

精密加工技术 实用手册

主 编 王先逵
副主编 李庆祥
刘成颖

精密加工技术实用手册

主 编 王先逵
副主编 李庆祥 刘成颖

机械工业出版社

精密加工和超精密加工技术是先进制造技术的基础和关键,是一个国家制造工业水平的重要标志之一。

本书分5篇共14章,内容包括总论、精密加工常用材料、金刚石刀具超精密车削、精密磨削和超精密磨削、光整加工、超精密加工机床、精密特种加工、微细加工技术、微型机械与微型机电系统、精密测量技术、微尺寸测量技术、微位移技术、误差的在线检测与补偿技术、精密和超精密加工的支持环境及精密基准件加工等。

图书在版编目(CIP)数据

精密加工技术实用手册/王先逵主编;李庆祥 刘成颖副主编. —北京:机械工业出版社, 2001. 3

ISBN 7-111-08579-5

I. 精... II. ①王... ②李... III. 精密切削-技术手册 IV. TG506.9-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 58454 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:熊万武 版式设计:张世琴 责任校对:申春香

封面设计:姚毅 责任印制:郭景龙

三河市宏达印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2001年3月第1版·第1次印刷

787mm×1092mm $1/_{16}$ -40印张·3插页·1041千字

00 001--4 000册

定价:79.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68993821、68326677-2527

前 言

先进制造技术是当前世界各国发展国民经济的主攻方向和战略决策，同时又是一个国家独立自主、繁荣昌盛、经济上持续稳定发展、科学上保持先进的长远大计。精密加工和超精密加工技术是先进制造技术中最具有实质性的重要组成部分，它是先进制造技术的基础和关键，是一个国家制造工业水平的重要标志之一。

精密加工和超精密加工从概念上来说具有相对性，它们代表了加工精度发展的不同阶段，由于生产技术的不断发展，划分的界限将随着历史进程而逐渐向前推移，过去的精密加工对今天来说已是一般加工，因此，其划分界限是相对的，并且在具体数值上至今没有准确定义。当前，精密加工是指加工精度为 $1\sim 0.1\mu\text{m}$ 、表面粗糙度为 $R_a0.1\sim 0.01\mu\text{m}$ 的加工技术，超精密加工是指加工误差小于 $0.01\mu\text{m}$ ，表面粗糙度小于 $R_a0.025\mu\text{m}$ 的加工技术，又称之为亚微米级加工。现在，超精密加工已进入纳米级，称之为纳米加工，并出现了相应的纳米技术。有时又统称为微米/纳米加工。从精密加工和超精密加工范畴来看，它应该包括微细加工和超微细加工、光整加工和精整加工等加工技术。

国外，精密加工和超精密加工技术的发展是从70年代初期开始的，主要集中在美、日、英等国家，在80年代中期取得了举世瞩目的成果，主要表现在机床、集成电路、仪器仪表和家用电器等诸方面，出现了美国加利福尼亚大学Lawrence Livermore实验室、英国Cranfield大学精密工程研究所(CUPE)、日本精密工学会等一些著名研究机构和学术团体。我国的精密加工和超精密加工技术在70年代后期有了长足进步，80年代中期结合航天、航空工业，电子工业等需求，出现了一些具有世界水平的超精密机床和部件、集成电路制造设备。很多单位，如哈尔滨工业大学、清华大学、国防科技大学、航空工业总公司303研究所、中国科学院长春光学精密机械研究所等，都在进行这一领域的研究。

国内，在精密加工和超精密加工技术的发展过程中，广大从事精密工程的技术人员和高等工科学校的教师和学生迫切需要一本关于精密和超精密加工的工具书，作为科研和教学工作的参考。而在1991年由机械工业出版社出版的《机械加工工艺手册》(孟少农主编)中，只有专门一章论述精密加工及超精密加工。此后，1997年出版的《机械工程手册》(何光远主编)中，没有单独立章，而是分散在各有关章节内容中。因此，出版一本专门的《精密加工技术实用手册》是十分必要的。本书的出版将是我国第一部专门的精密加工技术手册。

本手册从1995年开始酝酿，1996年9月确定编写人员，历经三年多才得以完成。全书共分5篇，它们是：精密切削磨削加工及其机床、精密特种加工、微细加工与微型机械、精密测量和质量保证、典型精密元件加工。手册在编写过程中，力求贯彻“准确性、先进性、实用性”的编写原则，使其具有如下特点：

- 1) 内容涵盖面涉及精密加工、超精密加工的各个方面，包括微细加工、纳米加工、微型机械、微型机械系统等。
- 2) 强调了实用性，手册作为工具书，贵在实用，应有较丰富的资料，以便广大工程技术人员参考。
- 3) 精密加工和超精密加工正处于不断发展中，近年来，在超精密磨削、磨料加工、精密

特种加工、微细加工和微型机械、纳米加工等方面均有突破性进展,手册在保证基础内容的前提下,尽量反映先进技术。

4) 材料是影响精密加工和超精密加工的重要因素,但对其系统研究较少,为了反映这方面的内容,特别编写了精密加工材料一章。

5) 贯彻现行国家标准名词术语、代(符)号、量和单位,以满足行业和社会的需求。

6) 精密加工和超精密加工是一个系统工程,手册从体系上力求从系统论、信息论、控制论所形成的系统科学和方法论出发,使之具有科学性。

手册可供广大从事机械制造工程的工程技术人员参考,同时也可作为高等工科院校机械工程专业师生作为参考书。

手册由清华大学精密仪器与机械学系、材料工程系编写,其中总论、第3章、第6章、第14章由王先逵编写,第1章由程荫芊编写,第2章、第4章由吴丹编写,第5章由刘成颖编写,第7章、第8章由李勇编写,第9、10章由李岩编写,第11章由李庆祥编写,第12章由白立芬编写、第13章由段广洪编写。全书由王先逵教授任主编,李庆祥教授、刘成颖副教授任副主编。在编写的早期,贾惠波教授、尤政教授参加了大纲的拟订和定稿。在编写过程中得到了制造工程研究所、精密仪器研究所等单位老师的指导和帮助,在此表示衷心感谢。

由于作者水平所限,书中会有不少错误和不足之处,恳请读者不吝赐教。

编者

2000年3月于清华园

目 录

前言		
总论	1	
1 精密加工和超精密加工范畴、特点、分类	1	
1.1 精密加工和超精密加工范畴	1	
1.2 精密加工和超精密加工的特点	1	
1.3 精密加工和超精密加工方法及其分类	3	
2 精密加工和超精密加工机理及工艺原则	7	
2.1 加工概念的扩展	7	
2.2 进化加工原则	11	
2.3 微量加工理论	12	
3 精密加工和超精密加工的体系结构	14	
3.1 精密加工系统工程	14	
3.2 影响精密加工和超精密加工的因素	15	
4 精密加工和超精密加工的形成和发展	20	
4.1 精密加工和超精密加工的形成	20	
4.2 精密加工和超精密加工的需求	24	
4.3 精密加工和超精密加工的技术地位和作用	25	
4.4 精密加工和超精密加工的发展趋势和技术前沿	26	

第 1 篇 精密切削、磨削及其机床

第 1 章 精密加工常用材料	28	第 2 章 金刚石刀具超精密车削	65
1 精密加工对材料的要求	28	1 金刚石刀具超精密车削机理	65
1.1 精密加工对材料使用性能的要求	29	1.1 切削厚度与材料切应力的关系	65
1.2 精密加工对材料工艺性能的要求	32	1.2 材料缺陷及其对超精密车削的影响	66
1.3 精密加工对材料经济性的要求	39	1.3 加工表面的形成与质量	67
2 达到精密加工材料性能的工艺措施	41	2 金刚石刀具的设计和刃磨	69
2.1 热处理过程中的组织性能变化	41	2.1 超精密车削对刀具的要求	69
2.2 改善加工性能的热处理	43	2.2 金刚石的性能	71
2.3 提高力学性能的热处理	44	2.3 金刚石的结构	71
2.4 提高耐磨性、耐腐蚀性的表面处理技术	45	2.4 金刚石晶体的面网	73
2.5 消除应力、稳定组织的热处理	49	2.5 金刚石晶体各晶向的性能	75
3 精密加工常用金属材料	49	2.6 金刚石原料的选取	77
3.1 碳素钢和合金钢	49	2.7 金刚石晶体的定向	78
3.2 铸铁	51	2.8 金刚石刀具的设计	81
3.3 有色金属	56	2.9 金刚石刀具的刃磨	84
4 常用非金属材料	59	3 影响金刚石超精密车削的因素	87
4.1 工程陶瓷	60	3.1 金刚石刀具	87
4.2 工程塑料	61	3.2 被加工材料	88
4.3 复合材料	62	3.3 超精密车床	88
4.4 其他材料	63	3.4 工作环境	88
		3.5 测量技术	88
		4 金刚石刀具超精密车削工艺	89

4.1 刀具的磨损和耐用度	89	2.3 研具	170
4.2 切削速度的选择	90	2.4 研磨剂	175
4.3 积屑瘤的生成规律	90	2.5 研磨工艺参数	178
4.4 刀具锋锐度对切削变形和加工表面质量的影响	93	2.6 研磨方法与研磨实例	179
4.5 进给量和修光刃对加工表面粗糙度的影响	95	2.7 研磨的常见故障及排除方法	184
5 金刚石刀具超精密车削的应用及其发展	95	3 抛光	186
第3章 精密磨削和超精密磨削	98	3.1 抛光机理与加工要素	187
1 概述	98	3.2 抛光轮	187
1.1 精密和超精密磨料加工方法分类	98	3.3 抛光剂	188
1.2 精密磨削和超精密磨削磨料	99	3.4 抛光工艺参数	189
1.3 精密磨具和超精密磨削磨具	107	3.5 影响抛光表面质量的因素	190
2 普通磨料砂轮精密磨削	118	4 珩磨	190
2.1 精密磨削及其机理	118	4.1 珩磨原理及工艺特点	190
2.2 精密磨削砂轮选择	119	4.2 珩磨头	192
2.3 精密磨床	119	4.3 工艺参数的选择	192
2.4 精密磨削时的砂轮修整	120	4.4 珩磨的切削过程	194
2.5 精密磨削时的磨削用量	122	4.5 珩磨液	195
2.6 精密磨削时的砂轮平衡	123	4.6 特种珩磨工艺	196
3 超硬磨料砂轮精密磨削	125	5 超精加工	202
3.1 超硬磨料砂轮磨削特点及应用范围	125	5.1 超精加工原理及特点	202
3.2 金刚石微粉砂轮精密磨削	126	5.2 加工机理	205
3.3 超硬磨料砂轮磨床	127	5.3 超精加工工艺参数与切削液	205
3.4 超硬磨料砂轮精密磨削工艺	127	5.4 超精加工头和超精加工油石	206
3.5 超硬磨料砂轮修整	130	5.5 轮式超精磨	207
4 超精密磨削	136	5.6 无心外圆超精加工	209
4.1 超精密磨削的概念、特点和应用	136	6 新型光整加工方法	210
4.2 超精密磨削机理	139	6.1 机械化学研磨	210
4.3 超精密磨床	140	6.2 磁力研磨	211
4.4 超精密磨削工艺	142	6.3 非接触研磨	215
5 精密和超精密砂带磨削	143	6.4 浮动抛光	215
5.1 砂带磨削方式、特点和应用范围	143	6.5 水合抛光	218
5.2 砂带磨削加工机理	155	第5章 超精密加工机床	220
5.3 精密砂带磨床和砂带磨削头架	156	1 概述	220
5.4 精密砂带磨削工艺	163	1.1 超精密机床发展现状	220
第4章 光整加工	167	1.2 超精密机床的发展趋势	221
1 光整加工的特点及类型	167	2 超精密加工机床的设计	223
2 研磨	167	2.1 对超精密机床的要求和设计原则	223
2.1 研磨特点和分类	167	2.2 超精密机床的分类	226
2.2 研磨机理和运动轨迹	169	2.3 超精密机床的基本问题	228
		3 超精密机床的基础元部件和结构	234
		3.1 超精密机床的总体布局	235
		3.2 精密主轴部件	236
		3.3 床身和精密导轨部件	242

3.4 微量进给装置	246	4.5 2m 镜面车床	254
3.5 精密定位检测元件	249	4.6 LODTM 大型光学金刚石车床	254
4 典型超精密机床介绍	250	4.7 DTM-3 型大型超精密车床	256
4.1 半球车床	250	4.8 MSG-325 型超精密车床	257
4.2 半球车床	251	4.9 OAGM 2500 大型超精密车床	257
4.3 Moore 车床	251	4.10 AHNIO 型高效专用车削、磨削超精密机床	258
4.4 R- θ 车床	253	4.11 超精密铣床	259

第 2 篇 精密特种加工

第 6 章 精密特种加工	260	4.7 电镀加工	338
1 概述	260	5 电子束加工	341
1.1 特种加工含义	260	5.1 电子束的热效应及其加工	341
1.2 特种加工方法的种类	260	5.2 电子束的化学效应及其加工	344
1.3 特种加工的特点	261	5.3 电子束加工装置	345
1.4 特种加工技术的应用范围	262	5.4 电子束加工的特点及应用	346
2 电火花加工	264	6 离子束加工	346
2.1 电火花加工的基本原理、特点及分类	265	6.1 离子束的力效应及溅射现象	346
2.2 电火花加工的基本规律	270	6.2 离子束加工方法	348
2.3 电火花成形加工设备	274	6.3 离子束加工装置	350
2.4 工具电极	286	6.4 离子束加工的特点及应用	351
2.5 电火花穿孔成形加工工艺	289	7 激光束加工	352
3 电火花线切割加工	295	7.1 激光的产生过程及特性	352
3.1 电火花线切割加工原理、分类、特点及应用范围	295	7.2 激光加工机理	353
3.2 电火花线切割加工设备	298	7.3 激光加工方法	354
3.3 电极丝	303	7.4 激光加工设备	356
3.4 电火花线切割工艺	304	7.5 激光加工的特点及应用	358
4 电解加工	308	8 光刻加工	359
4.1 电解加工基本原理、特点及应用	308	8.1 工作原版制作	359
4.2 电解加工中的基本规律	320	8.2 光刻	359
4.3 电解加工机床	325	9 超声加工	360
4.4 电解质溶液	328	9.1 超声加工的基本原理和特点	361
4.5 电解加工工艺方法	333	9.2 超声加工设备	361
4.6 电解磨削	335	9.3 超声加工工艺	365
		9.4 超声加工的应用	367

第 3 篇 微细加工与微型机械

第 7 章 微细加工技术	370	1.3 加工实例	372
1 半导体微细加工技术	370	2 LIGA 工艺	374
1.1 氧化、掺杂与沉积	371	3 特种微细加工技术	375
1.2 刻蚀	372	3.1 微细电火花加工	375

3.2 光成形微细加工	377	2.2 微型加速度传感器	387
3.3 其他微细加工方法	378	2.3 微型陀螺仪	389
4 粘接装配技术	380	3 微型致动器	391
4.1 粘接技术	380	3.1 微型旋转/角位移致动器	391
4.2 微操作装配技术	381	3.2 微型直线/振动型致动器	393
第 8 章 微型机械与微型机电系统	383	4 微量流体控制器件与系统	396
1 概述	383	4.1 微型阀	397
2 微型传感器	385	4.2 微型泵	398
2.1 微型压力和流量传感器	385	4.3 微量流体控制系统	400

第 4 篇 精密测量和质量保证

第 9 章 精密测量技术	402	2.2 外差干涉轮廓测量	468
1 精密测量原理	402	3 平面度和表面粗糙度的测量	469
1.1 测量的一般概念	402	3.1 平面度误差的测量和数据处理	469
1.2 精密测量原理	403	3.2 表面粗糙度的测量及仪器	472
1.3 制定测量方案时应考虑的 若干因素	407	4 微细图形尺寸的测量	476
2 典型几何量的测量方法与仪器	410	4.1 比较测量	476
2.1 常见的几何量测量仪器	410	4.2 直接测量	478
2.2 轴类零件的测量	415	5 台阶、膜厚的测量及其他	481
2.3 孔类零件的测量	416	5.1 台阶测量	481
2.4 锥度测量	417	5.2 膜层厚度测量	482
2.5 螺旋线的测量	418	第 11 章 微位移技术	490
2.6 渐开线的测量	419	1 概述	490
3 典型物理量的精密测量方法 与仪器	420	1.1 微位移机构的分类	490
3.1 常用的力学性能测试	420	1.2 微位移系统的应用	491
3.2 振动性能检测	426	2 微位移机构的原理	493
4 精密测量的精度分析	431	2.1 压电、电致伸缩器件	493
4.1 测量误差的来源分析	431	2.2 电磁驱动器件	499
4.2 评定测量精度的两个综合性指标	434	2.3 电热式微位移机构	502
4.3 精密测量中的误差理论	434	2.4 机械式微位移机构	503
5 典型精密测量系统简介	446	3 柔性铰链	507
5.1 双频激光外差干涉仪及应用	446	3.1 柔性铰链的类型及特点	507
5.2 圆度仪及圆度测量	452	3.2 柔性铰链的设计	507
5.3 三坐标测量机	453	4 精密微动工作台的设计及其特 性分析	514
5.4 莫尔条纹技术	458	4.1 精密微动工作台的设计要求	514
第 10 章 微尺寸测量技术	465	4.2 精密微动工作台设计中的几个 问题	514
1 微小尺寸测量的概念和特点	465	4.3 精密微动工作台的设计	517
2 微位移的测量	467	5 常用的微动工作台简介	523
2.1 光干涉法微位移的测量	467	5.1 柔性支承—压电或电致伸缩微位移驱	

动器驱动的微动工作台	523
5.2 平行弹簧导轨	526
5.3 滚动导轨—压电器件驱动	528
5.4 气浮导轨	529
第 12 章 误差的在线检测与 补偿技术	530
1 概述	530
1.1 先进制造技术及其发展	530
1.2 先进制造系统中的质量监控技术	532
1.3 影响加工精度的因素	533
1.4 保证加工精度的途径	535
2 误差检测技术	535
2.1 误差检测技术简述	535
2.2 位移量的检测	536
2.3 机械加工振动及其检测方法	561
3 误差补偿技术	565
3.1 几何误差的补偿	565
3.2 热误差的补偿	569
3.3 机床误差的其他补偿方法	581
4 在线检测与补偿系统举例	583
4.1 阿贝误差实时修正系统	583

4.2 机床热误差的测量与补偿	587
第 13 章 精密和超精密加工的 支持环境	589
1 空气的环境和热环境	589
1.1 空气环境	589
1.2 热环境	591
1.3 洁净室	594
1.4 分层次的局部环境	598
2 振动环境	598
2.1 振动干扰的影响	598
2.2 振动干扰的消除	599
2.3 隔振器的隔振原理	600
2.4 隔振元器件	601
3 噪声环境	603
3.1 噪声及其影响	603
3.2 噪声源	604
3.3 噪声控制	604
4 其他环境	607
4.1 光环境	607
4.2 静电环境	608
5 精密和超精密加工的环境设施	609

第 5 篇 典型精密元件加工

第 14 章 精密基准件加工	612	2.2 精密分度板的加工工艺	617
1 精密平板和直角尺加工	612	2.3 精密分度方法	617
1.1 精密平板的加工	612	3 精密球加工	622
1.2 精密直角尺的加工	616	3.1 球面研磨原理	623
2 精密分度板(盘)加工	616	3.2 四轴自动球面研磨原理	623
2.1 精密分度板的技术要求	616	参考文献	626

总 论

1 精密加工和超精密加工范畴、特点、分类

1.1 精密加工和超精密加工范畴

制造技术的发展已有几千年的历史,从石器时代、铜器时代、铁器时代到现代的高分子塑料时代;从手工制作、机器制作到现代的智能控制自动化制作;同时,从一般精度加工、精密加工到超精密加工,现在已达到广为流传的纳米加工境界,并逐渐接近加工精度和表面质量的极限,代表了当前先进制造技术的一个重要方面。因此,精密加工和超精密加工代表了加工精度发展的不同阶段,由于生产制造技术的不断发展,划分的界限将随着历史进程而逐渐向前推移,过去的精密加工对今天来说已是一般加工,其划分的界限是相对的,并且在具体的精度数值上至今没有确切的定义。

当前,精密加工是指加工精度为 $1\sim 0.1\mu\text{m}$ 、表面粗糙度为 $R_a0.1\sim 0.01\mu\text{m}$ 的加工技术,超精密加工是指加工误差小于 $0.1\mu\text{m}$,表面粗糙度小于 $R_a0.025\mu\text{m}$ 的加工技术,又称之为亚微米级加工。但是,目前超精密加工已进入纳米级,并称之为纳米加工及相应的纳米技术。

从精密加工和超精密加工的范畴来看,它应该包括微细加工和超微细加工、光整加工和精整加工等加工技术。

微细加工和超微细加工技术是指制造微小尺寸零件的加工技术,它们是针对集成电路的制造要求而提出的,由于尺寸微小,其精度是用切屑的大小来表示的,而不是像一般尺寸那样,用所加工尺寸与尺寸误差的值来表示。

光整加工技术,一般是指降低表面粗糙度值和提高表面层力学及机械性质的加工方法,不强调加工精度的提高。近年来,提出了相对应的精整加工概念,强调了精度和表面质量两个方面。但从光整加工和精整加工的概念上来说,含有毛刺加工方面。

1.2 精密加工和超精密加工的特点

精密加工和超精密加工处于发展中,当前有以下几个特点。

(1) 形成了系统工程 精密加工和超精密加工是一门多学科的综合高级技术,要达到高精度和高表面质量,不仅要考虑加工方法本身,而且涉及被加工材料、加工设备及工艺装备、检测方法、工作环境和人的技术水平等。因此,孤立的加工方法是不能达到预定的效果的,必须有综合技术和条件的支持,从而形成了精密加工系统工程。精密加工技术与系统论、方法论、计算机技术、信息技术、传感器技术、数字控制技术的结合,更促成了精密加工系统工程的形成。在研究精密加工和超精密加工理论和表面形成机理、建立数学模型的同时,还要研究各项相关技术。

(2) 精密加工和超精密加工与微细加工和超微细加工关系密切 微细加工和超微细加工是指制造微小尺寸零件和超微小尺寸零件的生产加工技术。微细加工和超微细加工的出现和发展与集成电路密切相关,集成电路要求在微小面积的半导体材料芯片上制造出更多的元件,形成

各种复杂功能的电路。因此，单元芯片上的单元逻辑门电路数、单元芯片上的电子元件数和最小线条宽度是集成电路集成度的标志，同时也表示了其制造难度和水平，如表 0-1 所示，表中列出了小、中、大、超大规模集成电路的参数与性能。

表 0-1 集成电路集成度的标志

参数与性能 分 类	单元芯片上的单元逻辑 门电路数(个)	单元芯片上的电 子元件数(个)	最小线条宽度 / μm
小规模集成电路	< 10 ~ 12	< 100	≤ 8
中规模集成电路	12 ~ ≤ 100	100 ~ < 1000	≤ 6
大规模集成电路	> 100 ~ < 10^4	1000 ~ < 10^5	6 ~ 3
超大规模集成电路	$\geq 10^4$	$\geq 10^5$	2.5 ~ 0.1

微细加工与一般尺寸加工在概念和机理上是不同的，一般尺寸加工时，精度是用公差单位来表示的，公差 = 公差等级系数 \times 公差单位，相同精度有相等的公差等级系数，但公差单位随基本尺寸的大小而不同，基本尺寸愈大，公差单位愈大，按基本尺寸的分段范围有不同的公式来计算。而微细加工时，由于加工尺寸很小，精度就用尺寸的绝对值来表示。因为从工件的角度来看，一般加工和微细加工的最大差别是切屑的大小(厚度)不同。微细加工时背吃刀量极小，切削在材料的晶体内部进行，切削去除量用“加工单位尺寸”或称“加工单位”来表示，“加工单位”的大小代表了加工精度的水平，如分子级加工、原子级加工。

微细加工与一般尺寸加工虽然在概念和机理上有所不同，但从加工技术上来看，微细加工主要是加工微小尺寸，而精密加工和超精密加工既加工大尺寸，也加工小尺寸，因此，微细加工是属于精密加工和超精密加工范畴。实际上，两者的许多加工方法都是相同的，只是加工对象有所不同而已。

(3) 精密加工和超精密加工与特种加工关系密切 特种加工是指利用机、光、电、声、热、化学、磁、原子等能源来进行加工的非传统加工方法，近年来发展很快，不仅可以采取单独加工方法，更可采用复合加工方法，应用十分广泛。目前，许多精密加工和超精密加工方法采用了激光加工、离子束加工等特种加工工艺，开辟了精密加工和超精密加工的新途径，一些高硬度、脆性的难加工材料，如淬火钢、硬质合金、陶瓷、石英、金刚石等，一些刚度差、加工中易变形的零件，如薄壁零件、弹性零件等，在精密加工和超精密加工时，特种加工已是必要手段，甚至是唯一手段，形成了精密特种加工。

当前，虽然传统加工方法仍占有较大的比例，是主要加工手段，应该重视并进一步发展，但由于特种加工的迅速兴起，不仅出现了许多新加工机理，而且出现了各种复合加工技术，它将几种加工方法融合在一起，发挥各自之所长，相辅相成，具有很大的潜力，可以提高加工精度、表面质量和效率，并且扩大了加工应用范围。

(4) 加工检测一体化 精密加工和超精密加工的加工精度和表面质量都很高，因此，一定要有相应的检测手段，才能说明是否达到技术要求。所以，在精密加工和超精密加工中，加工和检验都是难题，而且往往检测的难度更大，只有采用加工检测一体化的策略，在加工的同时

考虑检测。

从检测过程的时域来分析,检测可分为离线检测、在位检测和在线检测三大类。离线检测是指加工完成后,在检验室检测,因此,加工与检测是分离的,如果检测不合格,由于加工精度很高,一般很难返修。在位检测是指加工完成后,工件不卸下,在机床上进行检测,如果检测不合格,可及时返修,不会产生返修时再次装夹造成的误差,但要考虑离线检测和在线检测由于检测环境的差异对检测结果的影响。在线检测是在加工的过程中进行实时检测,随时掌握加工误差值及其发展趋势,并进行实时控制,是一种动态检测过程。

误差补偿是提高加工精度的一个有效技术措施,可分为静态误差补偿和动态误差补偿两大类。静态误差补偿主要用来补偿工艺系统中的系统误差,如误差校正尺。动态误差补偿是加工过程中的实时补偿,可以补偿工艺系统中的随机误差和系统误差,动态误差补偿和在线检测是密切相关的。

数控技术、计算机控制技术、传感器技术、微位移机构的发展,丰富了误差补偿方法,特别是使在线检测与动态误差补偿有了长足进步。在精密加工和超精密加工中,检测与误差补偿是加工检测一体化的重要举措。

(5) 精密加工和超精密加工与自动化技术联系密切 制造自动化是先进制造技术的重要组成部分,它的作用不仅是提高效率、提高劳动生产率、改善工作环境和工人劳动条件,而且是提高加工精度和表面质量、避免手工操作引起的人为误差、保证加工质量及其稳定性的重要举措。同时,它又是快速响应市场需求、缩短生产制造周期的有力措施。精密加工和超精密加工要达到高质量,必须依靠自动化技术才能保证。如工艺过程优化与适应控制、检测与误差补偿、计算机控制等技术都是提高和保证加工质量的自动化技术。

虽然精密加工和超精密加工的加工质量在当前仍靠工人的技艺来保证,如研磨、刮研等加工方法仍依赖于手工,但从发展的趋势来看,自动化技术代替手工的比例越来越大,加工效果也越来越好。

(6) 精密加工和超精密加工的发展与产品需求联系紧密 精密加工和超精密加工由于在加工质量上要求高,技术上难度大,涉及面广,影响因素多,因此,往往投资很大,所以精密加工和超精密加工的发展与具体的产品需求关系密切,例如,美国加利福尼亚大学 Lawrence Livermore 实验室和 Y-12 工厂在能源部支持下,于 1989 年联合研制成功的 DTM-3 型超精密金刚石车床,就是针对了加工激光核聚变用的各种反射镜、大型天体望远镜的天线等,反映了航天技术的需求。我国在精密加工和超精密加工技术的发展上也是结合了航天、航空技术上的具体需求进行的。当前,精密机床、超精密机床的规格化、系列化远不及普通机床,品种也不够多,主要是由于在技术上推广不够,通用性不强,价格又十分昂贵,随着市场需求的扩大、产品质量的提高和精密加工技术的不断成熟,通用化、系列化的精密加工和超精密加工设备一定会更为广泛地应用于生产实际中。

1.3 精密加工和超精密加工方法及其分类

1.3.1 加工成形原理

现代精密加工和超精密加工从加工成形的原理和特点来分类,可分为去除加工、结合加工和变形加工三大类:

去除加工又称为分离加工,是从工件上去除一部分材料,如车削、铣削、磨削、电火花加工等。

结合加工是利用理化方法将不同材料结合(Bonding)在一起,按结合的机理、方法、强弱等又可分为附着(Deposition)、注入(Injection)和连接(Jointed)三种。附着加工又称沉积加工,是在工件表面上覆盖一层物质,为弱结合,如电镀、气相沉积等。注入加工又称渗入加工,是在工件表层上注入某些元素,使之与基体材料产生物化反应,以改变工件表层材料的力学、机械性质,属强结合,如氧化、渗碳、离子注入等。连接是将两种相同或不同材料通过物化方法连接在一起,如焊接、粘接等。

变形加工又称为流动加工,是利用力、热、分子运动等手段使工件产生变形,改变其尺寸、形状和性能,如锻造、铸造、液晶定向等。

表 0-2 表示了该三大类精密加工和超精密加工方法,可见其加工范围十分广泛。

从材料在加工过程中的流动来分析,去除加工是使材料逐步减少,一部分材料变成切屑,这种流动称为分散流。结合加工是使材料在加工过程中逐步增加,这种流动称之为汇合流。近年来,提出了电铸、晶体生长、分子束外延,快速成形加工等加工方法,突破了传统加工大多局限于分离去除加工和表面结合加工的概念,特别是快速成形加工是一种利用离散/堆积成形技术的分层制造方法,将一个三维空间实体零件分解为在某个坐标方向上的若干层有很小厚度的三维实体,由于厚度很小,可按二维实体成形,再迭加而成为所需零件的原型。变形加工是指在加工过程中材料基本不变,称为直通流。

表 0-2 精密加工和超精密加工方法

分 类	加工成形原理		主要加工方法示例
去除加工 (分离加工)	电物理加工 电化学加工、化学加工 力学加工(力喷射) 热物理加工(热蒸发、热扩散、热熔解)		电火花线切割加工、电火花成形加工 电解加工、蚀刻(电子束曝光)、化学机械抛光 切削、磨削、研磨、抛光、超精加工、珩磨、超声加工、离子喷射加工、等离子体加工、喷射加工 电子束加工、激光加工、脱碳处理、气割
结合加工	附着加工	化学 电化学 热物理(热熔化) 力物理	化学镀、化学气相沉积 电镀、电铸 真空蒸镀、熔化镀 离子镀(离子沉积)、物理气相沉积
	注入加工 (渗入加工)	化学 电化学 热物理(热扩散) 力物理	氧化、氮化、活性化学反应 阳极氧化 晶体生长、分子束外延、掺杂、渗碳、烧结 离子束外延、离子注入
	连接加工	热物理、电物理 化学	激光焊接、气焊、电焊、快速成形加工、卷绕成形 化学粘接
变形加工 (流动加工)	热流动、表面热流动 粘滞流动 分子定向		锻造、塑性流动加工(气体火焰、高频电流、热射线、电子束、激光) 铸造、液体流动加工(金属、塑料、橡胶等注塑、压铸) 液晶定向

1.3.2 加工方法机理

从加工方法的机理来分类,精密加工和超精密加工又可分为传统加工、非传统加工和复合

加工。传统加工是指刀具切削加工、固结磨料和游离磨料的磨削加工；非传统加工是指利用机械能、光能、电能、声能、磁能、化学能、核能等对材料进行处理的特种加工方法；复合加工是采用多种加工方法的复合作用，其中包括传统加工与非传统加工的复合、传统加工与传统加工的复合，非传统加工与非传统加工的复合，进行优势互补，相辅相成。目前，在制造业中，占主要地位的仍是传统加工方法，而非传统加工和复合加工是极其重要的发展方向。表0-3列出了按刀具切削加工、磨料加工、特种加工、复合加工分类的各种常用的精密加工和超精密加工方法，其所用工具、所能达到的精度和表面粗糙度、被加工材料以及应用。

表 0-3 常用精密加工和超精密加工方法

分类	加工方法	加工工具	精度 / μm	表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	被加工材料	应用			
刀具切削加工	精密、超精密车削	天然单晶金刚石刀具、人造聚晶金刚石刀具、立方氮化硼刀具、陶瓷刀具、硬质合金刀具	1~0.1	0.05~0.008	金刚石刀具 有色金属及其合金 等软材料 其他材料刀具 各种材料	球、磁盘、反射镜			
	精密、超精密铣削	硬质合金钻头、高速钢钻头				20~10	0.2	低碳钢、铜、铝、石墨、塑料	多面体
	精密、超精密磨削							印刷线路板、石墨模具、喷嘴	
	微孔钻削								
磨料加工	精密、超精密砂轮磨削	氧化铝、碳化硅、立方氮化硼、金刚石等磨料	5~0.5	0.05~0.008	黑色金属、硬脆材料、非金属材料	外圆、孔、平面			
	精密、超精密砂带磨削							平面、外圆、磁头	
	精密、超精密研磨	铸铁、硬木、塑料等研具 氧化铝、碳化硅、金刚石等磨料	1~0.1	0.025~0.008	黑色金属、硬脆材料、非金属材料	外圆、孔、平面			
		氧化铝油石、玛瑙油石、电铸金刚石油石				平面			
	磁性研磨	磁性磨料	10~1	0.01	黑色金属等	外圆 去毛刺			
		固结磨料、游离磨料、化学或电解作用液体				型腔			
	抛光	精密、超精密抛光	抛光器 氧化铝、氧化铬等磨料	1~0.1	0.025~0.008	黑色金属、铝合金	外圆、孔、平面		
		弹性发射加工	聚氨基醚球抛光器、高压抛光液	0.1~0.001	0.025~0.008	黑色金属、非金属材料	平面、型面		
		液体动力抛光	带有模槽工作表面的抛光器 抛光液	0.1~0.01	0.025~0.008	黑色金属、非金属材料、有色金属	平面、圆柱面		
		水合抛光	聚氨基醚抛光器 抛光液	1~0.1	0.01	黑色金属、非金属材料	平面		
		磁流体抛光	非磁性磨料 磁流体	1~0.1	0.01	黑色金属、非金属材料、有色金属	平面		

(续)

分类	加工方法	加工工具	精度 / μm	表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	被加工材料	应用	
磨料加工	挤压研抛	粘弹性物质 磨料	5	0.01	黑色金属等	型面、型腔去毛刺、倒棱	
	喷射加工	磨料 液体	5	0.01~0.02	黑色金属等	孔、型腔	
	砂带研抛	砂带 接触轮	1~0.1	0.01~0.008	黑色金属、非金属材料、有色金属	外圆、孔、平面、型面	
	超精研抛	研具(脱脂木材,细毛毡)、磨料、纯水	1~0.1	0.01~0.008	黑色金属、非金属材料、有色金属	平面	
	精密超精加工	磨条 磨削液	1~0.1	0.025~0.01	黑色金属等	外圆	
	精密珩磨	磨条 磨削液	1~0.1	0.025~0.01	黑色金属等	孔	
特种加工	电火花加工	电火花成形加工	成形电极,脉冲电源、煤油、去离子水	50~1	2.5~0.02	导电金属	型腔模
		电火花线切割加工	钼丝、铜丝、脉冲电源、煤油、去离子水	20~3	2.5~0.16		冲模、样板(切屑、开槽)
	电化学加工	电解加工	工具极(铜、不锈钢) 电解液	100~3	1.25~0.06	导电金属	型孔、型面、型腔
		电铸	导电原模 电铸溶液	1	0.02~0.012	金属	成形小零件
	化学加工	蚀刻	掩模板、光敏抗蚀剂、离子束装置、电子束装置	0.1	2.5~0.2	金属、非金属、半导体	划线、图形
		化学铣削	刻形、光学腐蚀溶液、耐腐蚀涂料	20~10	2.5~0.2	黑色金属、有色金属等	下料、成形加工(如印刷线路板)
	激光加工	超声加工	超声波发生器、换能器、变幅杆、工具	30~5	2.5~0.04	任何硬脆金属和非金属	型孔、型腔
		微波加工	针状电极(钢丝、钨丝)、波导管	10	6.3~0.12	绝缘材料、半导体	打孔
		红外光加工	红外光发生器	10	6.3~0.12	任何材料	打孔、切割
		电子束加工	电子枪、真空系统、加工装置(工作台)	10~1	6.3~0.12	任何材料	微孔、镀膜、焊接、蚀刻
离子束加工		离子束去除加工	离子枪、真空系统、加工装置(工作台)	0.01~0.001	0.02~0.01	任何材料	成形表面、刃磨、蚀刻
	离子束附着加工	1~0.1		0.02~0.01	镀膜		
	离子束结合加工				注入、掺杂		
	激光束加工	激光器、加工装置(工作台)	10~1	6.3~0.12	任何材料	打孔、切割、焊接、热处理	

(续)

分类	加工方法	加工工具	精度 / μm	表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	被加工材料	应用	
复 合 加 工	电 解	精密电解磨削	工具极、电解液、 砂轮	20~1	0.08~0.01	导电黑色金属、 硬质合金	轧辊、刀具刃磨
		精密电解研磨	工具极、电解液、 磨料	1~0.1	0.025~0.008		平面、外圆、孔
		精密电解抛光	工具极、电解液、 磨料	10~1	0.05~0.008	导电金属	平面、外圆、孔、 型面
	超 声	精密超声车削	超声波发生器、 换能器、变幅杆、 车刀	5~1	0.1~0.01	难加工材料	外圆、孔、端面、 型面
		精密超声磨削	超声波发生器、 换能器、变幅杆、 砂轮	3~1	0.1~0.01		外圆、孔、端面
		精密超声研磨	超声波发生器、 换能器、变幅杆、 研磨剂研具	1~0.1	0.025~0.008	黑色金属等硬脆 材料	外圆、孔、平面
	化 学	机械化学研磨	研具、磨料、化 学活化研磨剂	0.1~0.01	0.025~0.008	黑色金属、非金 属材料	外圆、孔、平面、 型面
		机械化学抛光	抛光器、增压活 化抛光液	0.01	0.01	各种材料	外圆、孔、平面、 型面
化学机械抛光		抛光器、化学活 化抛光液	0.01	0.01	外圆、孔、平面、 型面		

2 精密加工和超精密加工机理及工艺原则

2.1 加工概念的扩展

2.1.1 材料的生长堆积加工

长期以来，人们对加工的概念总是局限于经过各种各样的切削等加工，从毛坯上将多余的材料分离出去而形成零件。近年来，出现了采用生长、堆积方法来生成零件，在加工过程中，材料由少变多，逐步增长，与分离去除的原理正好相反，这种在加工概念上的变化，具有十分重要的意义。

材料的生长堆积加工大体上可以分为以下几类。

(1) 生长 如分子束外延、电铸、拉单晶等都是使材料逐渐增长，形成毛坯或零件。例如，电动剃须刀的网刀就是用精密电铸的方法制成的，其制作过程如图 0-1 所示。

1) 在铜板或铝板上涂敷光致抗蚀剂，将所需图形的照相底板与它贴紧，进行曝光、显影、定影后，得到由导体区(铜或铝)和绝缘区(光致抗蚀剂)所形成的所需图形，称为光刻。

2) 如果需要曲面网刀，则应将具有抗蚀剂图形的金属板弯曲成形。

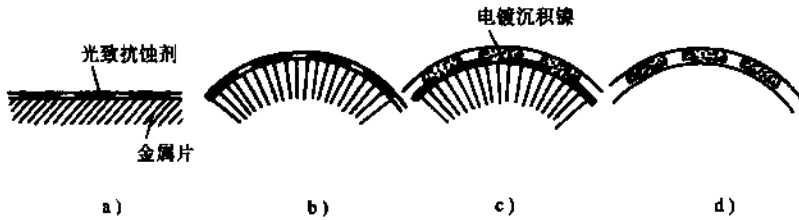


图 0-1 电动剃须刀网刃的精密电铸

a) 光刻 b) 弯曲成形 c) 电镀沉积 d) 分离

3) 电镀沉积镍至一定厚度。

4) 将镍质网刃从金属板上剥离下来，即可得到所需网刃。对于铜板，在电镀之前，应进行分离处理，以便镍质网刃能剥离下来。

(2) 堆积 如涂层、电镀、刷镀、堆焊等是在工件表面上堆积一层，其目的是改变工件表面的物理、力学性质(耐磨、防蚀、装饰等)，或为了增大零件的尺寸，以便进行修复。以磁盘为例，它是计算机的信息载体，分为硬磁盘和软磁盘两种，其制作过程如下：

1) 基片成形加工 对于硬磁盘是用特制的材质均匀的铝板，剪切冲制后在超精密金刚石刀具车削成形，表面达镜面后消除残余应力并进行氧化保护；对于软磁盘，可采用精密注塑成形。

2) 磁性材料的涂敷 将 γ 三氧化二铁微粉与粘接剂混合均匀后涂敷于基片表面上，磁粉与粘接剂混合均匀和涂敷均匀十分关键，为此可采用球磨混合方法和离心力甩涂方法，甩涂时，基片旋转，使涂料流满，继而高速旋转，利用离心力使所涂厚度均匀并达到所需层厚，然后进行干燥；同样，在基片反面也行涂敷。这种方法通常称之为甩涂，或称离心涂敷。

磁性材料涂敷的方法很多，常用的还有电镀、印刷等，可得到高质量的涂层。

3) 涂层面的精密加工 利用精密研磨、精密砂带研抛等使涂层面得到高精度和低表面粗糙度。之后，对于甩涂盘，还要进行高点铲刮工艺，去除涂层表面因磁粉与粘接剂混合不均所形成的高点。

(3) 分层制造 即快速成形制造(RPM-Rapid Prototype (Part) Manufacturing)，又称快速原型(零件)制造。可分为平面分层、曲面分层和卷绕成形制造三大类。平面分层的原理是将一个三维实体在某坐标上分割为若干层有一定厚度的三维实体，由于层厚很小，可按二维实体制造，再将它们堆积起来构成三维实体零件。很明显，零件分割的层数越多，则层厚越小，所堆积的零件精度越高，因此，分层所需的处理工作量很大，计算机技术的发展提供了有利条件。

目前，平面快速成形制造方法很多，主要有：

1) 光固化立体造型 其原理如图 0-2a 所示，液槽中盛有紫外激光固化的液态光敏树脂，开始成形时，工作台台面在液面下一个层高，将激光聚焦至光固化树脂表面，按该层图形进行扫描，完成一个层面的固化建造。继而升降台带动工作台下落一个层高，使液面覆盖一层，形成第二层树脂，再按第二层图形进行扫描，第二个层面固化并与第一层面牢固地粘在一起，如此重复，直至零件造型完毕。

2) 分层实体制造 其示意图如图 0-2b 所示，采用激光或刀具从箔材(金属、纸等)上切割出一个层面，并将非零件所需部分切成小块以便去除，再在层面上铺上一层箔材，用热压辊碾压以固化粘接剂，使新铺上的一层箔材平整地牢固地粘接在前一层上，切割该层图形，如此反复将所有层面切割出迭加而成三维实体零件。

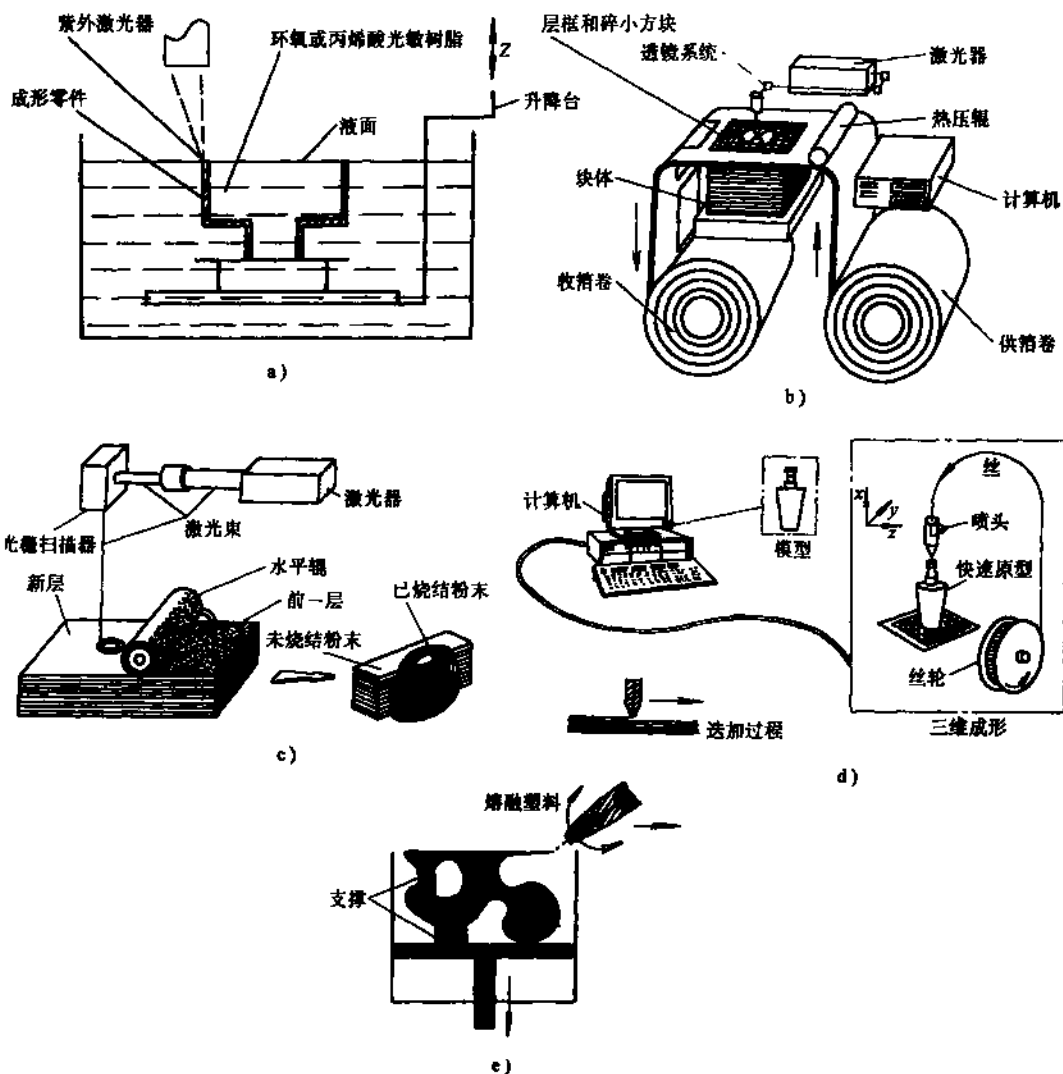


图 0-2 快速成形制造

a) 光固化立体造型 b) 分层实体制造 c) 选择性激光烧结 d) 熔融沉积成形 e) 喷射印刷成形

3) 选择性激光烧结 其原理如图 0-2c 所示, 先在工作台上铺上一层密实平整的粉末, 用激光束聚焦按所需层面图形扫描, 从而熔结成一个层面, 再在其上铺上一层粉末, 进行第二层熔结, 并与第一层熔接, 如此迭加成一个三维实体粉末烧结零件。它又分为直接熔接和间接熔接两种, 前者为直接熔化粉末, 多用于非金属; 后者为熔化粉末表面的粘接涂层, 形成半成品, 再进行烧结, 多用于金属粉末。

4) 熔融沉积成形 其原理如图 0-2d 所示, 将丝状热塑性材料(如蜡、尼龙、塑料等)通过一个熔化器熔化, 由一个喷头挤压出丝, 按层面图形沉积一个层面, 然后用同样方法建造第二个层面, 并与前一个层面熔结在一起, 这样层层扫描堆积形成一个三维实体。

5) 喷射印刷成形 其制作原理如图 0-2e 所示, 将热熔成形材料熔融后由喷头喷出, 扫描成形建造出一个层面, 逐层堆积形成三维实体零件。

快速成形制造多用于零件、模具、饰品、人造脏器制造。

2.1.2 表面工程技术

长期以来，“加工”是指利用切削等方法去除多余材料，“处理”是指利用热能改变材料表层的力学性能，统称热处理。现代制造技术的发展使“处理”的概念大为扩展，不仅包含表面处理的含义，更涉及表面加工的内涵，形成了以“表面”为研究对象的表面工程。

表面工程是由材料学、冶金学、机械学、物理学、化学、电子学等多学科交叉、综合而发展起来的新兴学科，是制造技术的重要组成部分，与精密加工和超精密加工的关系尤为密切。

表面工程的体系结构如图 0-3 所示，可以看出，表面技术可分为单一技术和复合技术两大类，主要的单一技术有以下几种：

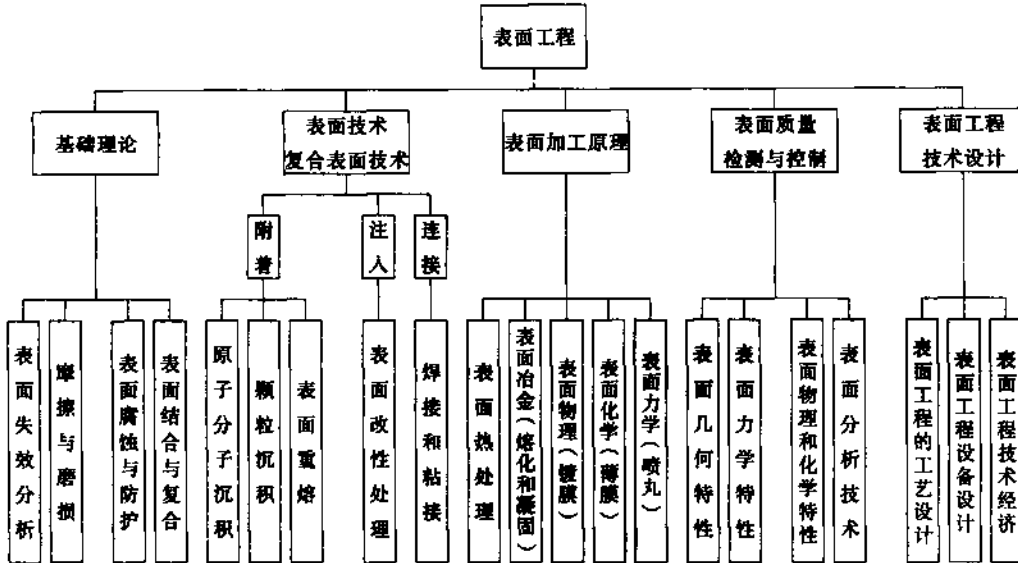


图 0-3 表面工程体系结构

(1) 原子分子沉积 沉积物以原子、分子、离子和粒子等形态在材料表面上沉积，形成外覆盖层，如电镀、离子镀、化学气相沉积、物理气相沉积、激光真空镀膜等。

(2) 颗粒沉积 沉积物以宏观尺度的颗粒形态在材料表面上形成覆盖层，如热喷涂、喷漆、喷塑、热浸镀、刷涂、刷镀、堆焊、激光涂敷等。

(3) 表面重熔 通过表面加热手段使工件表层金属快速熔化后凝固，以弥补表面的微缺陷，如气孔、砂眼、裂纹等，同时使表面光整、洁亮。利用激光进行表面重熔，效果良好，俗称激光上光。

(4) 表面改性处理 通过渗入和注入一些化学元素以改变表层材料的化学成分，或通过表层冷热处理进行相变以改变表层材料的组织结构，统称为表面改性处理，其目的是改变材料层的力学、机械性质。表面改性处理的方法有离子渗、扩散渗、磷化、离子溅射注入、激光固态相变等。

(5) 连接 指两种材料通过物理、化学等方法连接在一起，形成复合层，如包金属箔、贴片、焊接、化学粘接等。

单一表面技术由于其局限性，往往不能满足日益发展的工况需求，从而出现了复合表面技术，又称之为第二代表面技术，例如：热喷涂与激光重熔的复合，多层薄膜的复合等，复合表面技术使材料表面的性能更加优越，极有前途，值得进一步研究发展。

2.2 进化加工原则

2.2.1 “母性”加工原则

一般加工时,作为工作母机的机床,其精度总是要比被加工零件的精度高,称之为“母性”加工原则,是一种“蜕化”加工原则,也是目前加工的主要手段和思路。

随着各种工业的发展,对制造技术的要求也越来越高,出现了精密机床、超精密加工机床,以便能适应技术需求,为此,机床的精度要求越来越高,技术难度也越来越大,投资也越来越多。例如,美国加利福尼亚大学 Lawrence Livermore 实验室和空军 Wright 航空研究所等单位合作研制的 LODTM 大型超精密金刚石非球面车床,用于加工大型金属反射镜,在 1984 年由美国国防部高级研究计划局(DARPA)投资了 1300 万美元。该机床采用了分辨力为 0.7nm 的双频激光测量系统,进行在线测量和误差补偿;机床内各发热部分采用油温控制可达 $(20 \pm 0.0005)^\circ\text{C}$ 的大量恒温液体冷却;机床采用 4 个空气垫支承在防振大基地上,其中有两个空气垫是连通的,故实际是三点定位,但支承刚度增强。该机床主轴回转精度为 $0.025\mu\text{m}$,定位误差小于 $0.051\mu\text{m}$,加工零件的最大尺寸为 $\phi 1625\text{mm} \times 500\text{mm}$,重量 1360kg。它是世界上公认为精度最高、技术水平最高的大型金刚石超精密车床的代表作。可见,采用“母性”加工原则对于精密加工和超精密加工而言,存在以下几个问题:

1) 由于被加工零件的精度和技术要求很高,很难研制其工作母机进行加工,在技术上已非常困难。

2) 投资太大,技术经济指标很不合理,特别是在单件小批生产情况下,每件零件的生产成本更难承受。

3) 精密加工和超精密加工是一个系统工程,其组成环节很多,虽然加工设备是主要因素,但可发挥其他组成环节的影响,如借助于工艺手段和特殊工具来弥补机床的不足。

由此应该另辟新径,采用创造性加工原则,即“进化”加工原则。

2.2.2 “进化”加工原则

用精度低于工件精度要求的机床设备,通过其他手段,加工出达到精度要求的零件,称之为“进化”加工原则,它又可分为两种情况。

(1) 直接式进化加工 在精度低于工件精度要求的机床设备上,借助工艺手段和专用工具等,直接加工出高于工作母机的零件,就是直接式的进化加工。例如在加工精密丝杠时,精密丝杠磨床的螺距精度不能满足工件要求,这时可采用计算机控制的在线检测微位移补偿装置,对加工过程中的丝杠进行在线检测和实时补偿,使被加工丝杠的螺距精度能够达到要求。又如在镗床上加工精密孔时,可采用浮动镗刀来保证孔径尺寸,弥补机床进给系统精度不够所带来的问题。

(2) 间接式进化加工 用较低精度机床和工具,通过工艺措施制造出第二代高精度工作母机,用第二代工作母机加工出高精度零件,这为间接式进化加工,这对于中批和大批大量生产是比较合适的,工厂只要能够研制出第二代工作母机,就能保证产品的高质量生产。例如,精密滚齿机的关键零件是蜗轮蜗杆副,其中蜗轮的分度精度影响很大,现有的通用机床(滚齿机)不能满足精度要求,如用直接式进化加工则工作量很大,对批量生产不适合,因此采用间接式进化加工,花大力气研制一台第二代高精度工作母机,即高精度滚齿机,便能保证高精度蜗轮的生产,同时,也就保证了精密滚齿机产品的生产。因此,这种第二代高精度工作母机成为该工厂的关键设备和技术,同时也是该厂技术水平和技术能力的标志。

“进化”加工原则不仅对精密加工和超精密加工有重要意义,同时对一般加工也是重要的

加工原则，只不过在精密加工和超精密加工中矛盾因精度高而更为突出。

实际上，不少加工方法本身就反映了“进化”加工原则的思想，例如精密研磨、精密珩磨、超精加工等都是在较低精度设备上，通过工艺措施加工出高精度低表面粗糙度的工件。

更进一步，从加工尺寸的大小与加工设备的关系上来分析，一台机床的加工范围总是有限的，大机床加工大零件，小机床加工小零件，但若工件尺寸太大，无法制造更大的机床，或无力承担相应的费用，则可采用小机床加工大零件的创造性加工原则，这时，工件不动，机床相对于工件运动来完成加工，俗称“蚂蚁啃骨头”。

2.3 微量加工理论

2.3.1 微量切削

超精密加工的关键是能够在被加工表面上进行微量加工，其加工量的大小标志着精密加工和超精密加工的水平。

当前，对于精密切削和超精密切削主要以金刚石刀具超精密车削和金刚石微粉砂轮超精密磨削为代表，主要是微量切削，又称极薄切削，如果能切除一个纳米(1nm)，则其切削水平可达纳米级，如果能切除一个分子、一个原子，则其水平可达分子级、原子级。当然，这需要超精密车床和超精密磨床，锋利的刀具和砂轮，其中，金刚石刀具刃口钝圆半径值就非常重要，对于纳米级切削，刃口钝圆半径应为2nm，而金刚石微粉砂轮的金刚石颗粒大小应为0.5~2 μm ，甚至更小，并应有高精度的在线砂轮修整装置。

微量切削的机理与一般切削是有很大差别的，因为这时的切屑厚度极小，背吃刀量(切削深度)可能小于晶粒的大小，切削就在晶粒内进行，因此，切削不是在晶粒之间的破坏，切削力一定要超过晶体内部非常大的原子、分子结合力，刀刃上所承受的切应力就急速地增加并变得非常大。如在切削低碳钢的情况下；刀刃上的切应力值接近材料的抗剪强度极限，当切削厚度在1 μm 以下时，被切材料的切应力可达13000MPa。刀刃在受到很大应力的同时，切削区会产生很大的热量，刀刃切削处的温度会很高，要求刀具材料应有很高的高温强度和高温硬度。因此，只有超硬刀具材料，如金刚石、立方氮化硼等才能胜任。金刚石刀具不仅有很高的高温强度和高温硬度，而且由于金刚石材料本身质地细密，经过精密研磨或精密电火花加工，不仅几何形状好，切削刃钝圆半径很小，通常可达0.02~0.005 μm ，最高可达2nm，而且表面粗糙度也很低，是极薄切削的刀具理想材料。

2.3.2 材料缺陷及其破坏方式

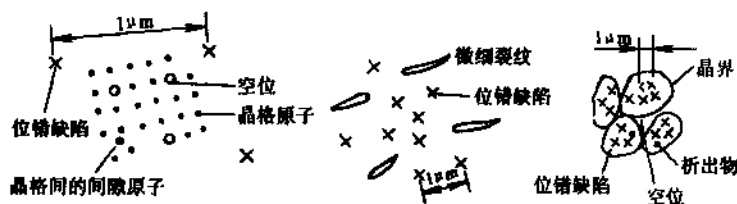


图 0-4 材料微观缺陷分布

在进行超精密切削时，从工件上去除的一块材料的大小(切削应力所作用的区域)就是加工单位，加工单位的大小和材料缺陷分布的尺寸大小不同时，被加工材料的破坏方式就不同。材料微观缺陷分布或材质不均匀性，有以下几种情况(见图 0-4)：

1) 晶格原子、分子 其破坏方式是把原子、分子一个一个地去除。

2) 点缺陷 当晶体中存在空位、填隙原子、杂质原子等时,称为点缺陷或原子缺陷,其破坏方式是以这些原子缺陷为起点来增加晶格缺陷的破坏。

3) 位错缺陷和微裂纹 位错缺陷就是晶格位移,即有一列或若干列原子发生了有规律的错排现象,它在晶体中呈连续的线状分布,故又称为线缺陷。当晶体中存在位错缺陷和微裂纹等线缺陷时,其破坏方式是通过位错线的滑移和微裂纹引起晶体内的滑移变形。

4) 晶界、空隙和裂纹:它们的破坏是以缺陷面为基础的晶粒间破坏。

材料的破坏方式与其应力作用的区域有密切关系,当应力作用区域在上述各种缺陷空间的范围内时,则材料会以加工应力作用区域相应的破坏方式而破坏。如果加工应力作用区域比上述缺陷空间范围更广,则会以更容易破坏的方式而破坏。所以,材料的破坏方式不仅与其微观缺陷分布或材质不均性有关,而且与其应力作用的区域有关,即与加工单位的大小有关,与微量切削的背吃刀量有关。

例如,在由大小为数微米到数百微米的微细晶粒所组成的金属材料中,在晶粒内部,一般在 $1\mu\text{m}$ 的间隔内就有一个位错缺陷,即每平方厘米有 10^8 个。当加工应力作用在比位错缺陷平均分布间隔 $1\mu\text{m}$ 还要狭窄的区域时,在此区域内是不会发生因位错线移动而产生材料的滑移变形。当加工应力作用在比位错缺陷平均分布间隔 $1\mu\text{m}$ 还要宽阔的区域时,则位错线就会在位错缺陷的基础上发生滑移,晶体产生滑移变形或塑性变形。当加工应力作用在比晶粒大小更宽时,则多数情况易发生由晶界缺陷所引起的破坏。实际上,当加工应力作用在比位错缺陷平均分布间隔还要狭窄的区域内时,由于存在着空位、填隙原子等缺陷,也有可能演变成位错缺陷而发生局部滑移变形。

2.3.3 加工能量

超精密切削是一种原子、分子级加工单位的去除加工方法,要从工件上去除一块材料,需要相当大的能量,这种能量可用临界加工能量密度 δ (J/cm^3)和单位体积切削能量 ω (J/cm^3)来表示。临界加工能量密度 δ 是指当应力超过材料弹性极限时,在切削相应的空间内,由于材料缺陷而产生破坏时的加工能量密度。单位体积切削能量 ω 是指在产生某加工单位切屑时,消耗在单位体积上的加工能量。

加工单位不同会引起临界加工能量密度的变化,表0-4列举了常用几种去除加工在材料微观结构的各种缺陷情况下的临界加工能量密度 δ 。可见晶格原子、分子破坏所需的临界加工能量密度最大,点缺陷、位错缺陷和微裂纹次之,晶界、空隙和裂纹最小。

表 0-4 临界加工能量密度 δ

(J/cm^3)

加工单位/cm	10^{-8}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}
材料微观缺陷 加工机理	晶格原子、分子		点缺陷		位错缺陷 微裂纹		晶界、空隙 和裂纹	
晶格原子去除 (离子溅射、电子蚀刻)	$10^5 \sim 10^6$							
蒸发去除	$10^5 \sim 10^6$							
熔化去除	$10^4 \leftarrow$	$\rightarrow 10^3$						
化学分解、电解	$10^4 \leftarrow$	$\rightarrow 10^3$						
塑性变形 (微量切削、研磨、抛光)					$10^3 \leftarrow$	$\rightarrow 1$		
脆性破坏			$10^4 \leftarrow$				$\rightarrow 10^2$	

前已述及，精密加工和超精密加工是一个总称，可简称精密加工。精密加工和超精密加工在当前应包括亚微米加工、纳米加工、微细加工、超微细加工、光整加工、精整加工等，这些都是其组成部分，各部分的侧重点不同。亚微米加工是指加工精度在 $1\mu\text{m}$ 以下，纳米加工是指加工精度在纳米级，上面两者可合称微纳米加工；微细加工和超微细加工侧重于微小零件和微小尺寸的加工，多以集成电路与微型机械为对象，与微电子技术联系密切；光整加工强调了表面粗糙度值的降低和去除毛刺；精整加工是在光整加工的基础上强调了精度的提高。近年来，由于工业技术发展的需要，出现了许多新的组成部分，甚至形成了新的学科，如微型机械。

精密工程的技术难度大、产品技术要求高、投资很大，除基础共性技术外，产品个性比较突出，其实施大多靠产品投资支持，因此，应该以需求为牵引，以高新技术为基础，以产品为核心。

3.2 影响精密加工和超精密加工的因素

影响精密加工和超精密加工的因素很多，主要有加工机理、被加工材料、加工设备及其基础元部件、加工工具、检测与误差补偿、工作环境、工艺过程设计、夹具设计、人的技艺等，如图 0-6 所示。

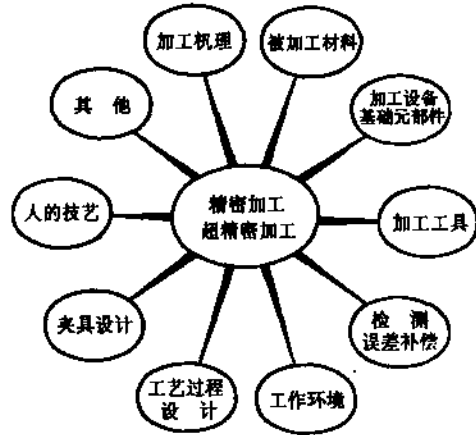


图 0-6 影响精密加工和超精密加工的因素

3.2.1 加工机理

(1) 新工艺新方法 近年来，新工艺新加工方法不断出现，应充分注意寻求新的加工手段。在传统加工方法中，金刚石刀具超精密切削、金刚石微粉砂轮超精密磨削、精密高速切削、精密砂带研抛和磨料加工等已占有重要地位；在非传统加工中，出现了电子束、离子束、激光束等高能束加工、微波加工、超声加工、蚀刻、电火花加工、电化学加工等多种方法；特别是复合加工，如电解研磨、超声珩磨等，都是在加工机理上有所创新的，新的加工机理出现，标志着一种技术突破，往往是新技术的生长点。

(2) 加工、处理的新概念 在加工机理上的突破表现在明确提出了去除加工、结合加工和变形加工，特别是以快速成形制造为代表的“堆积”加工的出现，在加工技术的思路上具有里程碑意义。

(3) 极薄加工具有无限生命力 超精密加工的目标和追求就是要寻求和探讨加工极限，目前的极薄切削水平是纳米级，随着科学技术的发展，这个极限将逐步前移，值得研究的问题还很多。

(4) 进化加工原则值得提倡 利用精度低于工件精度要求的机床设备，借助工艺手段、特殊工具、计算机技术、传感器技术等，直接或间接加工出所需工件，这种进化加工原则将影响精密加工和超精密加工的全局。

从上述几点可以看出，加工机理研究是精密加工和超精密加工的理论基础和新技术产生的源泉。加工机理是加工方法的本质，是加工方法成败、发展的关键。

3.2.2 被加工材料

精密加工和超精密加工应该用相应的精密加工和超精密加工用的材料，才能保证加工质

量,用一般加工用的材料或不合格要求的材料进行精密加工和超精密加工是不能达到预期效果的。

用于精密加工和超精密加工的材料,在化学成分、物理力学性能、加工工艺性能上均有严格要求;应该质地均匀,成分准确,性能稳定、一致,无外部和内部微观缺陷。其化学成分的误差应在 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 数量级,且应控制其杂质含量或不含杂质;其物理力学性能,如抗拉强度、硬度、伸长率、弹性模量、热导率、膨胀系数等,应达 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 数量级。冶炼、铸造、轧辗、热处理等工艺过程均应严格控制,温度、熔渣过滤、晶粒大小、均匀性及方向性等对材料在物理、化学、力学、加工等性能方面均有很大影响。

例如,高密度硬磁盘的片基是用专门的铝合金材料,在冶炼过程中,采用特殊的熔渣过滤装置,防止表面生成氧化层;在轧制时,采用两个方向交替滚轧,以防止晶粒产生纤维状态,影响物理力学性能的均匀性,使磁盘最终在磁记录性能上受到影响。

3.2.3 加工设备及其元部件

精密加工和超精密加工所用的加工设备范围很广,如各种精密机床、超精密机床、激光加工机、精密电火花加工机床、离子束加工机,以及镀膜、涂敷等加工设备。对切削加工设备来说,代表性的机床有超精密车床,用来加工各种轴类、盘套类和带曲面的零件等;超精密铣床配有精密回转工作台,用于加工平面和多面体零件;研磨机和抛光机仍然是重要的精密加工设备,用于加工外圆、孔、平面等,按加工需求有精密类型的。

归纳起来,精密加工和超精密加工用的加工设备应有以下一些要求:

(1) 高精度 包括高的静精度和动精度,主要的性能指标有几何精度、运动精度(定位精度、重复定位精度)和分辨力等,如主轴回转精度、导轨运动精度、分度精度等。当前,超精密车床的主轴回转精度大多在 $0.02 \sim 0.03 \mu\text{m}$,导轨直线度为 $0.025/1000000$,定位精度为 $0.013 \mu\text{m}$,重复定位精度为 $0.006 \mu\text{m}$,进给分辨力为 $0.003 \mu\text{m}$,分度精度为 $0.5''$ 。现代的精密机床和超精密机床大多采用液体静压轴承或空气静压轴承的主轴和导轨,精密滚珠丝杠传动,配有微动工作台、误差补偿装置,实现微位移。对于高速回转的零件、部件都应进行动平衡。

(2) 高刚度 包括静刚度和动刚度,除零、部件本身的刚度外,还应注意接触刚度,同时应考虑由工件、机床、刀具、夹具所组成的工艺系统刚度。精密机床和超精密机床虽然切削力不大,但机床受力变形将会造成精度上的很大影响。

(3) 高稳定性和保持性 设备在经过运输、仓储、安装调试后,在规定的工作环境下,使用过程中应能长时间保持精度、抗干扰、稳定地工作。因此,加工设备应有良好的耐磨性、抗振性、热稳定性。

(4) 高自动化 为了保证加工质量,减少人为因素影响,现代精密机床和超精密机床多配置精密数控系统以实现自动控制,或采用计算机控制来实现适应控制、优化等以保证零件生产加工要求。

精密加工和超精密加工设备与其基础元、部件关系密切,一方面,只有优良的基础元、部件才能有优良的加工设备,因此世界各国均十分重视基础元、部件的开发和研究,以便不断提高精密加工和超精密加工设备的水平,扩展其应用范围;另一方面,优良系列的基础元部件可以快速响应市场需求,缩短精密加工和超精密加工设备的开发周期。当前,基础元、部件的发展十分迅速,主要有主轴及其轴承、导轨及其滚动组合体(滚动直线导轨)、滚珠丝杠、光栅、激光检测装置、微位移装置、分度转台等,而且已经出现主轴单元、进给单元等部件形式。主轴单元包含了主轴、轴承、电动机及主轴箱,形成一个独立体,甚至主轴与电动机轴成为一

体,电动机为变频电动机,可进行无级调速,代替了整个主轴部件;进给单元是将导轨、滚珠丝杠、伺服电动机、位置检测等合在一起,成为独立体;新近,又出现了直线电动机进给伺服单元,简称直线单元,将直线电动机、滚动导轨、光栅检测装置等合在一起,形成一个独立体,直接得到直线运动,免去了由转动换为直线运动的环节,不仅结构简单,又提高了精度,可广泛用于各种机床、加工中心上,该直线单元如图 0-7 所示。

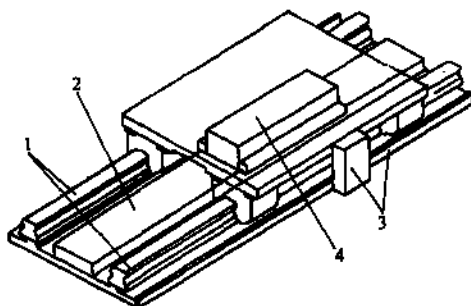


图 0-7. 直线伺服单元

- 1—导轨(滚动导轨) 2—电动机次级部分
3—直线检测装置 4—电动机初级部分

3.2.4 加工工具

加工工具主要是指刀具、磨具及刃磨、修整装置。

对于超精密切削,首先是超硬刀具问题,目前的超硬刀具材料主要有金刚石、立方氮化硼、陶瓷等,用得比较广泛的是人造金刚石,即聚晶金刚石。最好的材料是天然金刚石,但价格昂贵。金刚石刀具有切削刃形面和几何角度设计、晶体定向、晶面选择、刃磨、切削时对刀等问题,其中如刃磨应在专门的研磨机上进行,要有高超的技艺,刃口钝圆半径是一个关键参数,若极薄切削厚度欲达 10nm,则刃口钝圆半径应为 2nm;切削时精确方便地对刀将直接影响加工精度、表面粗糙度和加工效率,至今是一个难题。

对于超精密磨削,当前主要的磨具是金刚石、立方氮化硼等微粉砂轮,这种砂轮有磨料粒度选择、粘接剂选择、修整方法等问题,通常金刚石微粉砂轮多采用粒度为 W20~W0.5 的金刚石微粉,采用树脂、铜、纤维铸铁等粘接剂,以铜为粘接剂居多。金刚石砂轮的修整分为整形和修锐两个阶段,前者是修出几何形状,后者是修出锋利刃口,实际上是突出金刚石颗粒。由于金刚石微粉砂轮易堵塞,在使用中应采用在线修整。常用的修整方法有电解法、电火花法、磨削法和软弹性法等。

对于超精密研磨和抛光,可采用铸铁、锡、聚酯、呢毡等材料作研具或抛光器,采用金刚石、立方氮化硼、铬刚玉、氧化铝、碳化硅等磨料,进行非接触研磨抛光、软质粒子研磨抛光、液中研磨抛光等,获得高精度和低表面粗糙度。

刀具、磨具材料的选择是一个关键,刀具磨具的发展史基本上可用刀具磨具材料的发展来代表,从碳钢、合金钢(高速钢)、硬质合金、陶瓷、立方氮化硼到金刚石,以及采用多元共渗、镀膜、沉积等技术、提高了耐用度,超硬材料的出现给精密加工和超精密加工的发展提供了条件。目前,由于金刚石是由碳原子组成,与铁碳构成的黑色金属有较大的亲和力,故不宜切削黑色金属,多用于切削有色金属,现正在研究利用保护气氛、低温等措施来切削黑色金属,或用立方氮化硼、陶瓷等材料。

3.2.5 检测与误差补偿

精密和超精密加工必须具备相应的检测技术和手段,不仅要检测零件的精度和表面粗糙度,而且要检测加工设备及基础元、部件的精度。

高精度的尺寸、几何形状及位置尺寸等可采用分辨力为 0.1~0.01 μm 的电子测微计、分辨力为 0.01~0.001 μm 的电感测微仪、电容测微仪,以及自准直仪、双频激光干涉仪、圆度仪等来检测。

轴系回转精度低速时静态检测可用电感测微仪、电容测微仪与基准球来测量;高速动态检

测可用电容测微仪和同步示波器按测量定点峰值变化的方法来测量。

导轨直线度可采用电子水平仪、自准直仪和激光干涉仪等角度测量的方法来检测,也可用基准平尺与电子测微计分离平尺误差的方法来检测。

表面形貌和表面粗糙度的检测分为接触式和非接触式两类。接触式测量多用触针式的表面轮廓仪或表面形貌仪来检测,所用传感器多为电感式、压电晶体式等,接触式测量最大的缺点是检测时会划伤被测表面;非接触测量可用气动法、光纤法、电容法、超声微波法、隧道显微镜法、激光光斑法等。

表面层的应力状态、变质层深度、微裂纹等缺陷可用 X 光衍射法、激光干涉法等来进行测量。

精密检测和自动化检测是检测技术的两个重要方面,精密检测寻求检测精度的极限,自动化检测寻求非接触在线测量和误差分离、补偿技术。误差分离技术是用多个传感器在多处多个方位上同时进行检测,利用计算机软硬件进行处理,分离各种误差成分并分析造成误差的原因,为误差补偿创造条件。可见,误差分离与误差补偿关系密切,可以说,误差分离是误差补偿的先决条件,也可说误差分离是误差检测的重要组成部分。误差补偿又可分为静态误差补偿和动态误差补偿两类。静态误差补偿是事先测出误差值,按需要的误差补偿值设计制造出补偿装置,用硬件(如校正尺等)或计算机软件建模,在加工时进行误差补偿。动态误差补偿是在在线检测的基础上,通过计算机建模和反馈控制系统进行实时补偿,因此,需要建立一个闭环自适应误差补偿系统。

误差预防、误差补偿、误差预报是精密加工和超精密加工中提高加工精度的重要有效举措。误差预防是通过提高工艺系统精度、保证工作环境的条件等来减少误差源、减少误差的影响,具有治本性;误差补偿是通过修正来抵消或消除误差,具有治标性;而误差预报是根据误差出现的发展趋势,得出预测值,进行相应的补救措施,并可真正做到无滞后的实时补偿,具有主动性。

3.2.6 工作环境

精密加工和超精密加工的工作环境对加工质量的影响很大,因此,工作环境是保证加工质量的必要条件。工作环境主要有温度、湿度、净化和防振等方面的要求。

(1) 恒温 环境温度可根据加工要求控制在 $20^{\circ}\text{C} \pm (1 \sim 0.02)^{\circ}\text{C}$,甚至达到 $(20 \pm 0.0005)^{\circ}\text{C}$ 。达到恒温的办法可采用专门恒温室(间)的整体恒温和恒温罩的局部恒温。整体恒温可采用大恒温室、中恒温室、小恒室、地下恒温室等多层套间结构,逐渐得到控制精度越来越高的室温;同时采用地板恒温方式使温度分布均匀。

由于季节的温差,为了节省能源,标准室温在夏季可定为 23°C 、冬季可定为 17°C ,事实证明,这样的规定是可行的。

(2) 恒湿 在恒温室内,一般湿度保持在 $55\% \sim 60\%$,以防止机器的锈蚀,石材吸水膨胀,以及会影响一些仪器如激光干涉仪的零点漂移等。

(3) 净化 在超精密加工时,空气中的尘埃可能会划伤被加工表面,有时尘埃的大小可能比磨料的颗粒还要大,从而会破坏加工表面,使磨料加工不能达到预期效果,因此要进行空气的洁净处理。

进行空气净化的主要方法是滤清,进行净化的房间称净化室或超净室。净化可分为整体净化和局部净化,局部净化如净化工作台、净化腔等,其方法是在净化区内通入正压洁净空气,可防止外界空气进入,以保持净化效果,且比较经济。由于人是要进入净化室工作的,工作人员的衣物、头发、皮肤都会带入尘埃,因此,在进入净化室前应更换专门的衣服,甚至是特制的无尘服,进行风淋后,再进室工作,以控制人员活动时产生尘埃的影响,保持洁净度。

由于直径大于 $0.5\mu\text{m}$ 的尘埃对超精密加工的表面质量影响最大,故通常用每立方英尺体积中直径大于 $0.5\mu\text{m}$ 的尘埃数来表示空气净化等级,一般净化要求在 100 级~10000 级。

(4) 防振 在精密加工和超精密加工时,振动对加工质量的影响比较大,其振源来自两方面,一是机床等加工设备产生的振动,如由回转零件的不平衡,零件或部件刚度不足等;二是来自加工设备外部,由地基传入的振动,如邻近机床工作时产生的振动,这就需要将加工设备安放在带防振沟和隔振器的防振地基上,同时可使用空气弹簧(垫)来隔离低频振动,灵活方便,效果良好。

精密加工和超精密加工有时还需要一些特殊工作环境,如防磁、防静电、防电子辐射、防声波、防 X 射线、防原子辐射等,可根据需求进行整体环境或局部环境的处理。

3.2.7 工艺过程设计

工艺过程设计对加工质量、生产率、成本往往具有关键性的全局影响,在精密加工和超精密加工中更是如此,除应该遵循一般加工的原则和规律外,还应考虑以下问题。

(1) 循序渐近、严格要求 进行精密加工和超精密加工的工件,一定要有良好的粗、半精、精顺序加工基础。原材料,各工序加工质量应严格要求,工件在搬运存储中不得碰伤、工作地环境应清洁整齐、有条不紊。

(2) 正确选择定位基准,控制定位基准加工质量 往往采用加工面本身为定位基准,以保证加工余量的均匀;采用互为基准原则保证有位置精度要求的表面;要保证定位基准的加工质量及洁净,在每道工序加工前,要注意定位基准是否受损和洁净,在粗精工序转换时,应安排修磨定位基准工序。

(3) 要注意工件的夹紧变形和加工中变形 在超精密加工时,由于是微量去除,可能产生安装变形大于加工余量的情况,最好能做到无变形装夹。对于一些加工中易变形的零件,薄片状零件可用真空吸盘吸附;不规则形状的零件可采用液态橡胶、沥青、工业用蜡、电流变体(一种糊状液体,当通电流时即可固化,断电后恢复液态)等物质将工件粘接(溶接)于夹具上进行加工;当然也可以采用过定位结构来提高工件本身的刚度。

(4) 注意热处理工序的安排 精密加工和超精密加工中的内应力变形对零件加工精度有严重影响,而且一直是一个难题,因此在加工时要在粗、半精、精加工阶段转换时安排人工时效甚至自然时效来消除内应力,在关键工序前也要安排相应地热处理工序。

3.2.8 夹具设计

夹具是构成机械加工工艺系统的重要组成部分,其设计是否合理、制造质量是否能保证对工件的加工影响很大。夹具与刀具(磨具)、辅具、检具等构成了工艺装备。

在精密加工和超精密加工中,可选用精密通用夹具,如转台、卡盘等,但多数情况要设计精密专用夹具,并往往成为零件加工的关键,因此,在设计制造时应注意以下几点。

(1) 要按精密夹具设计的要求进行设计、制造 夹具的定位元件应有高精度,并耐磨损,夹具与机床的装夹部分也应有高的定位精度。整个夹具应有高刚度和精度保持性。

(2) 要注意工件的夹紧变形 夹紧力应足够,但不得使工件产生变形,特别是对于那些刚度比较差的零件,可采用一些特殊夹紧方法或夹紧装置结构。如采用多辅助支承结构,手工夹紧时用定转矩扳手,采用过定位结构等。可利用有限元分析进行一些必要的核算。

(3) 夹具上的定位基准面“就地加工” 为了保证夹具的质量,可在夹具每次装夹在机床上后,利用机床进行“就地加工”以保工件的高精度装夹。这时,在夹具要加工的表面应留出足够多次加工的余量。例如,超精密车削磁盘盘片表面时,利用真空吸盘进行装夹,真空吸盘

每次装夹在机床主轴上后,对其定位面进行一次超精密车削,从而保证了真空吸盘定位面本身的平面度及其与机床主轴轴线的垂直度,这不仅保证了盘片吸附的紧密性和所需的夹紧力,同时又避免了在夹紧时由于真空吸盘定位面的不平而造成盘片的变形,保证了盘片的平面度及厚度的均匀性。此外,也使盘片在加工时加工余量均匀,减少了误差复映。

3.2.9 人的技艺

当前,精密加工和超精密加工的加工质量和水平在一定程度上靠技术人员和操作工人的技艺来保证。加工设备的精度、检测仪器的精度、技术人员和操作工人的经验和技艺水平三者决定了工件的加工精度。因此,人的技术水平,知识面、经验和操作熟练程度,往往是影响精密加工和超精密加工质量和效率的重要因素。这里应特别强调操作者,他不仅要有高超的技艺,而且要有宽广的知识面,懂得机械、电子、物理、化学、计算机技术,才能胜任这一工作。例如,金刚石刀具的刃磨、精密静压轴承的制造中,精密研磨是关键技术,与人的技艺关系密切。

除上述的影响因素外,尚有市场需求及决策、组织管理及体制、标准化和规格化、资料和开发工具等问题,均归于“其他”因素内。

4 精密加工和超精密加工的形成和发展

4.1 精密加工和超精密加工的形成

精密加工和超精密加工是在 20 世纪 60 年代提出来的,日本著名学者谷口纪男教授在其发表的多篇文章中,以及所著《纳米技术的应用和基础——超精密、超微细加工和能束加工》一书中,从综合加工精度出发,将加工的发展分为普通加工、精密加工、高精精密加工和超精密加工 4 个阶段,并预计在 2000 年加工精度可达到纳米级,由于物质的原子或分子的尺寸大小,即原子晶格间距是 0.2~0.4nm,因此,提出了纳米加工技术是当今的极限工艺。所谓综合加工精度是包含了尺寸中心偏移误差和尺寸分布误差,也就是系统误差和随机误差的总和。图 0-9 表示了综合加工精度与年代的关系,指出了在 1980 年时,4 个加工限界的综合加工精度,并预测了 1980 年后的精度发展状态,同时又列举了 4 个阶段所出现的机床和测量仪器,已经提出了超晶格物质合成加工和超隧道效果显微镜、纳米表面形貌仪等。

此后,日本学术界又发表了随着年代的推移,各种测量仪器、机床和自动机床所能达到的最高精度(见图 0-8),同时也预测了 2000 年时的发展趋势。日本学者很重视对精密加工的研究成果进行历史回顾和发展展望的研究,从而对指导现阶段的工作和预测下阶段的发展有重要作用。

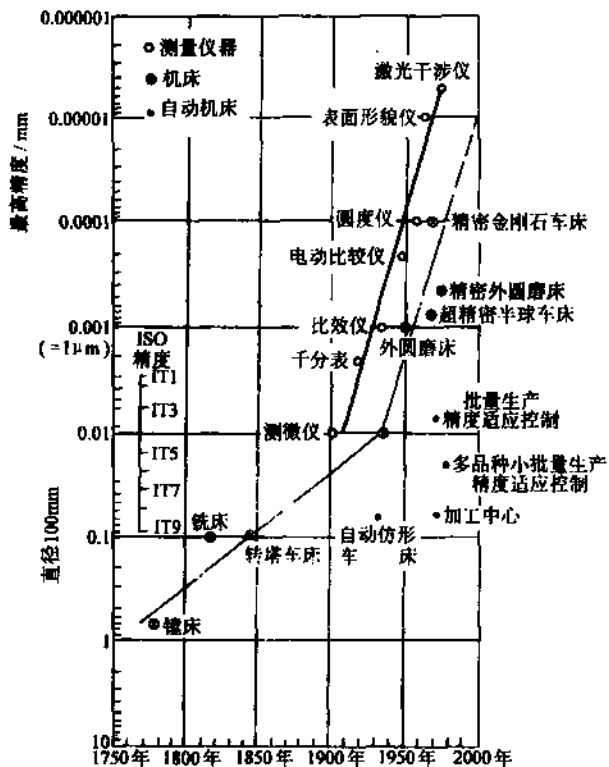


图 0-8 测量仪器、机床、自动机床所能达到的最高精度与年代的关系

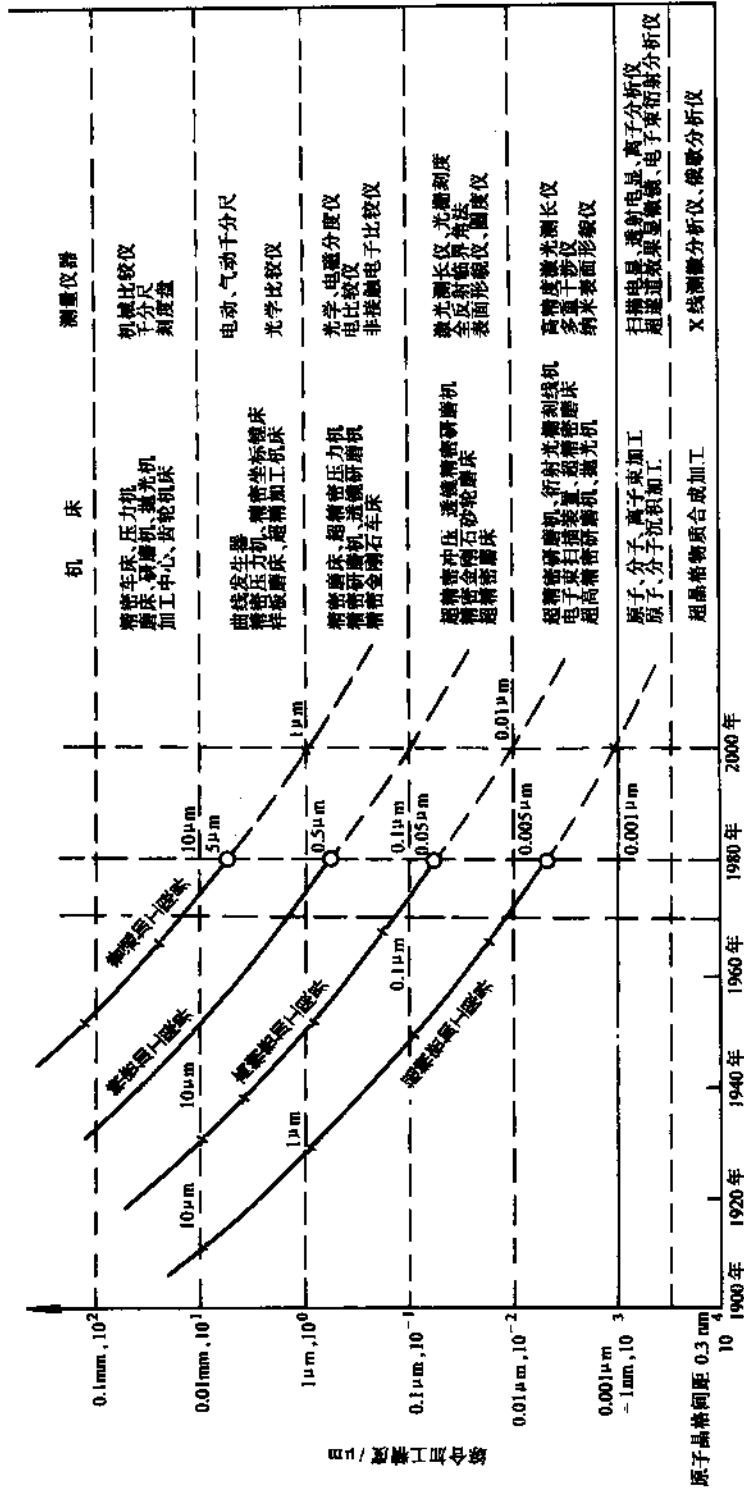


图 0-9 综合加工精度与年代的关系

精密加工和超精密加工提出以后，首先受到了日本等国的重视，在以“技术立国”和“新技术立国”的方针下，领导日本精密加工的学术力量当首推精密加工学会，该学会拥有专家、学者、教授、以及研究生、大学生等众多会员，力量强大，每年分春、秋两季有两次学术交流会，参加会议宣读论文十分踊跃，是日本很有影响的学术团体。日本在工科大学里，大多设置了精密工学科，十分注重培养精密加工方面的高级技术人材。日本有众多的生产和研究超精密技术的公司，如东芝、精工、三菱电气、住友、冈本、西铁城、三井精机等，研究了超精密非球面镜车床、精密激光干涉反馈测量系统、超精密平面磨床等。图 0-10 是日本一台比较理想的盒式超精密立式车床，其结构设计有以下特点。

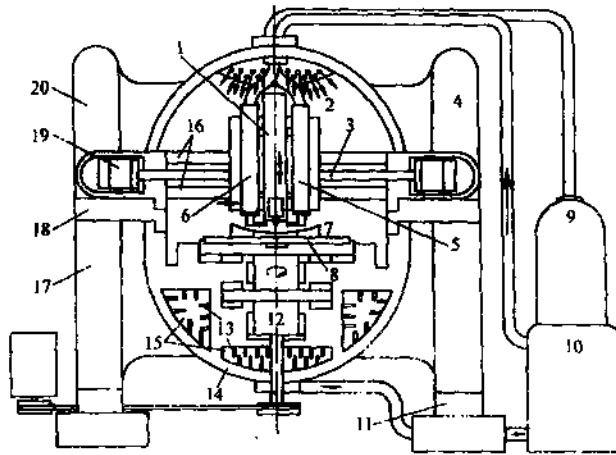


图 0-10 日本盒式超精密立式车床

- 1—用低热变形复合材料制成的滑板 2—冷却液淋浴 3—陶瓷滚珠丝杠 4—对称热源装置 5—冷却液喷射装置
6、9—切削回收装置 7—热变形补偿微位移工作台 8—卡盘附件 10—油温控制装置 11—隔振功能和水平调整功能装置 12—空气静压主轴 13—冷却散热片 14—热对称壳体结构 15—恒温循环装置 16—两个热对称圆导轨 17—热源隔离装置 18—热流控制功能和衰减能调整功能装置 19—滚珠丝杠驱动用电子冷却轴 20—热对称三点支撑结构

1) 整个机床采用了盒式结构，加工区域形成封闭空间，自成系统，不受外界影响。
2) 采用热对称结构、石材等低热变形复合材料，从结构上使热变形得到抑制。
3) 采用冷却液淋浴、恒温冷却液循环、热源隔离等措施，以保证整个机床处于恒温状态，形成局部恒温环境，再将机床安装在恒温室里，可达到更好的恒温效果。

4) 整个机床本身有隔振结构，放在防振地基上，可获更好的防振效果。

这台机床反映了现代超精密技术的水平。

美国在精密加工和超精密加工方面有良好的基础和雄厚的力量，著名的加利福尼亚大学 Lawrence Livermore 实验室、Union Carbide 公司、Moore 公司、Pneum Precision 公司等均研究和制造出高水平的超精密机床和装置，可举 Lawrence Livermore 实验室和美国空军合作研制出的大型光学金刚石车床(Large Optics Diamond Turning Machine-LODTM)为例，该机床是为镜面加工大直径光学镜头而开发的，采用双立柱立式车床结构，六角刀盘驱动，多重光路激光干涉测长进给反馈，分辨力为 0.7nm，定位误差为 0.0025 μm ；为了减少热变形影响，采用低热膨胀材料组合

技术、恒温液体冷却，液体温度控制在 $20^{\circ}\text{C} \pm 0.0005^{\circ}\text{C}$ ，如图 0-11 所示。另外，美国 HP、ZYGO 公司的激光干涉仪分辨率达 0.6nm ，精度达到 $10\text{nm}/1\text{m}$ 。

英国在精密加工和超精密加工方面主要以 Cranfield 大学的精密工程研究所(CUPE)为代表，在 80 年代开始研制出小型金刚石超精密车床和大型立式金刚石超精密机床；英国国立物理学实验室(National Physics Laboratory-NPL)开发的四面体结构立轴超精密机床如图 0-12a 所示，由 6 个圆柱连接 4 个支持球构成一个四面体框架，使每个圆柱承受压力，从而静刚度可达 10

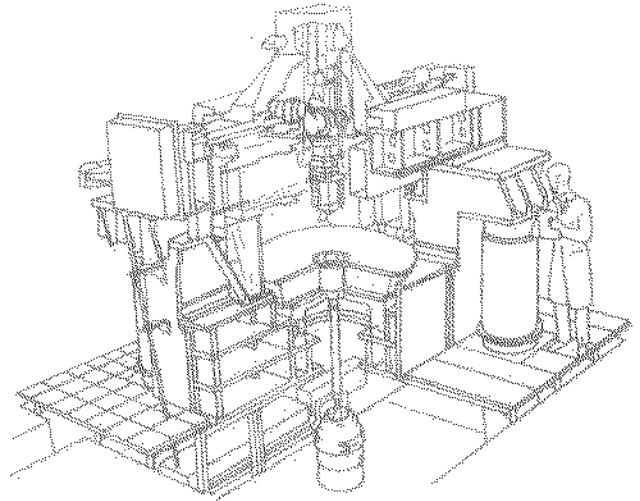
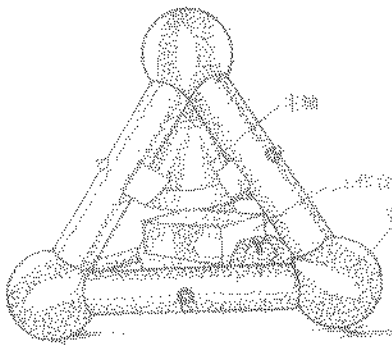
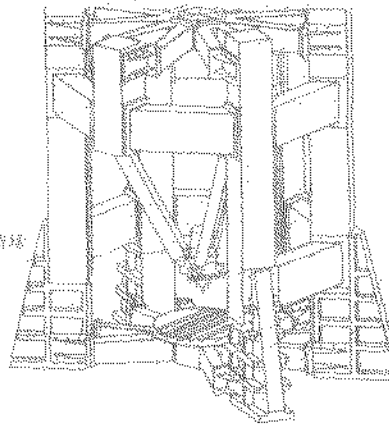


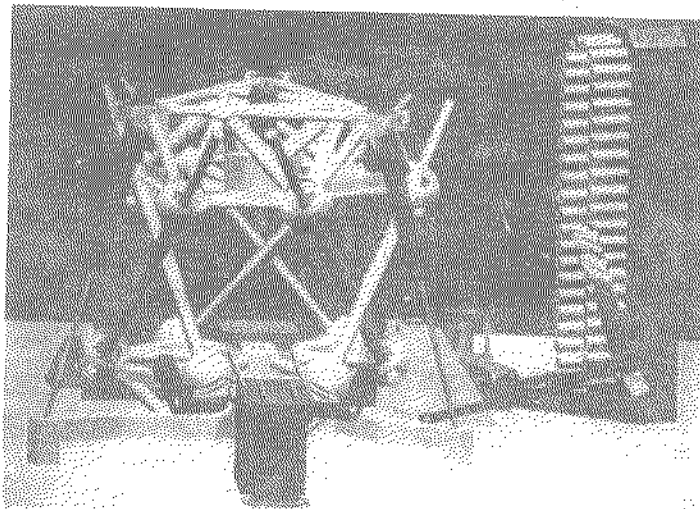
图 0-11 英国大型光学金刚石超精密车床



a)



b)



c)

图 0-12 几种超精密机床

a) 英国四面体结构 b) 美国 VARIAN 加工中心 c) 德国之金刚石

N/mm, 加工精度可达 1mm 以上, 为机床的新型结构开辟了一条途径, 受到世界各国的重视。此后, 出现了多种虚拟轴机床图 0-12b 表示了美国 Giddings & Lewis 公司开发的 VARIAX 六条腿加工中心的结构示意图, 图 0-12c 为德国斯图加特大学研制的三条腿机床示意图。此外, 英国尚有 Taylor Hobson 公司生产形貌仪等精密测量仪器。

在欧洲, 除英国外, 德国的 Zeiss 公司生产精密测量机, Heidenhain 公司生产光栅, 分辨力为 5nm, 荷兰的 Philips 公司、丹麦的 B&K 公司等都是世界上著名的精密仪器生产厂家。

我国的超精密加工技术在 70 年代末期有了长足进步, 80 年代中期出现了具有世界水平超精密机床和部件, 并向专业化批量生产发展。北京机床研究所是国内进行超精密加工技术研究的主要单位之一, 研制出了多种不同类型的超精密机床、部件和相关的高精度测试仪等, 如精度达 $0.025\mu\text{m}$ 的精密轴承、JCS-027 超精密车床、JCS-026 高精度圆度仪、JCS-031 超精密铣床、JCS-035 超精密车床、超精密车床数控系统、复印机感光鼓加工机床、红外大功率激光反射镜、超精密振动-位移测微仪等, 达到了国内领先、国际先进水平。航空工业总公司三零三所在超精密主轴、花岗岩加工及应用三坐标测量机等方面进行了深入研究及产品生产。哈尔滨工业大学在金刚石超精密切削、金刚石刀具晶体定向和刃磨、金刚石微粉砂轮电解在线修整技术等方面进行了卓有成效的研究。清华大学在集成电路超精密加工设备、磁盘加工及检测设备、微位移工作台、超精密砂带磨削和研抛、金刚石微粉砂轮超精密磨削、非圆截面超精密切削等进行了深入研究, 并有相应产品问世。此外, 中国科学院长春光学精密机械研究所、华中理工大学、沈阳第一机床厂、成都工具研究所、国防科技大学等都进行了这一领域的研究, 成绩显著。

4.2 精密加工和超精密加工的需求

4.2.1 国防工业上的需求

超精密加工技术与国防工业关系密切, 如陀螺仪的加工涉及多项超精密加工, 导弹系统的陀螺仪质量直接影响其命中率, 1kg 的陀螺转子, 其质量中心偏离其对称轴 $0.0005\mu\text{m}$, 则会引起 100m 的射程误差和 50m 的轨道误差。

在宇航技术中, 卫星的姿态轴承和遥测部件对卫星的观测性能影响很大, 该轴承属真空气润滑轴承, 其孔和外圆的圆度和圆柱度、表面粗糙度均达纳米级。卫星中的光学望远镜、高分辨力的电视摄像系统、高灵敏度的红外传感器等, 其光学系统中的高精度非球面透镜, 高分辨力的电视光栅、高灵敏度红外热成像机的碲镉汞半导体元件等, 都必须用超精密加工技术进行制造。

大型天体望远镜的透镜、直径达 2.4m, 形状精度为 $0.01\mu\text{m}$, 如著名的哈勃太空望远镜, 能观察 140 亿光年的天体。红外线探测器反射镜, 其抛物面反射镜形状精度为 $1\mu\text{m}$, 表面粗糙度为 $R_a 0.01\mu\text{m}$, 其加工精度直接影响导弹的引爆距离和命中率。激光核聚变用的曲面镜, 其形状精度小于 $1\mu\text{m}$, 表面粗糙度小于 $R_a 0.01\mu\text{m}$, 其质量直接影响激光的光源性能。从以上例子可以看出, 超精密加工在国防工业、航天工业、航空工业中有广阔市场。

4.2.2 信息产品中的需求

计算机上的芯片、磁板基片、光盘基片等都需要超精密加工技术来制造。录像机的磁鼓、复印机的感光鼓、各种磁头、激光打印机的多面体、喷墨打印机的喷墨头等都必须进行超精密加工, 才能达到质量要求。

4.2.3 民用产品中的需求

现代小型、超小型的成像设备, 如照相机、照相机等上的各种透镜, 特别是光学曲面透镜, 激光打印机、激光打标机等上的各种反射镜都要靠超精密加工技术来完成。至于超精密加

工机床、设备和装置当然更需要超精密加工技术才能制造。

4.3 精密加工和超精密加工的技术地位和作用

先进制造技术已经是一个国家经济发展的重要手段之一，许多国家都十分重视先进制造技术的水平和发展，利用它进行产品革新、扩大生产和提高国际经济竞争能力。当前，美国、日本、德国等国家的经济发展在世界上处于领先水平的重要原因之一，就是他们把先进制造技术看作是现代国家经济上获得成功的关键因素。日本在第二次世界大战后，为了迅速恢复经济，大力发展制造技术，特别是精密加工技术，使机械制造业的水平有了很大提高，有力地支持了其他工业的发展，在汽车制造业和微电子工业上取得了显著成绩，在短短的30年中，从一个战败国发展成为世界上的经济强国。而美国从20世纪30年代开始，在制造技术上处于世界领先地位，但在50年代以后，对制造技术不够重视，在经济竞争上感受到巨大的威胁，经过认真总结，认识到进入80年代后，在重要的、高速增长的技术市场上失利的一个重要原因是美国没有把自己的技术应用到制造上。美国国家工程科学院的国家研究理事会经过反复研究，提出要把注意力重新放在制造技术上，而不是像前些年那样，把制造放到从属于设计的地位上。

先进制造技术是当前世界各国发展国民经济的主攻方向和战略决策，同时又是一个国家独立自主、繁荣昌盛、经济上持续稳定发展、科技上保持先进领先的长远大计。

从先进制造技术的技术实质性而论，主要有精密和超精密加工技术和制造自动化两大领域，前者追求加工上的精度和表面质量极限，后者包括了产品设计、制造和管理的自动化，它不仅是快速响应市场需求、提高生产率、改善劳动条件的重要手段，而且是保证产品质量的有效举措，两者有密切关系，许多精密和超精密加工要依靠自动化技术得以达到预期指标，而不少制造自动化有赖于精密加工才能准确可靠地实现。两者具有全局的、决定性的作用，是先进制造技术的支柱。

4.3.1 超精密加工是国家制造工业水平的重要标志之一

超精密加工所能达到的精度、表面粗糙度、加工尺寸范围和几何形状是一个国家制造技术水平的重要标志之一。例如：金刚石刀具切削刃钝圆半径的大小是金刚石刀具超精密切削的一个关键技术参数，日本声称已达到2nm，而我国尚处于亚微米水平，相差一个数量级；又如金刚石微粉砂轮超精密磨削在日本已用于生产，使制造水平有了大幅度提高，突出地解决了超精密磨削磨料加工效率低的问题。

4.3.2 精密加工和超精密加工是先进制造技术的基础和关键

当前，在制造自动化领域，进行了大量有关计算机辅助制造软件的开发，如计算机辅助设计(CAD)、计算机辅助工程分析(CAE)、计算机辅助工艺过程设计(CAPP)、计算机辅助加工(CAM)等，统称计算机辅助工程(CAX)，又如面向装配的设计(DFA)、面向制造的设计(DFM)等，统称为面向工程的设计(DFX)；又进行了计算机集成制造(CIM)技术，生产模式如精良生产、敏捷制造、虚拟制造、以及清洁生产 and 绿色制造等研究，这些都是十分重要和必要的，代表了当前高新制造技术的一个重要方面。但是，作为制造技术的主战场，作为真实产品的实际制造，必然要靠精密加工和超精密加工技术，例如，计算机工业的发展不仅要在软件上，还要在硬件上，即在集成电路芯片上有很强的能力，应该说，当前，我国集成电路的制造水平约束了计算机工业的发展。美国制造工程研究者提出的汽车制造业的“两毫米工程”使汽车质量赶上欧、日水平，其中的举措都是实实在在的制造技术。

4.4 精密加工和超精密加工的发展趋势和技术前沿

4.4.1 向高精度、高效率方向发展

随着科学技术的不断进步，对精度、效率、质量的要求愈来愈高，超精密加工技术就是要向加工精度的极限冲刺，应该说，这种极限是无限的，当前的目标是向纳米级进军，而现状是处于亚微米级水平。

图 0-13 表示了超精密加工理论基础和应用技术的发展，提出了量子技术、量子能量的利用，并将和太空技术联系起来。

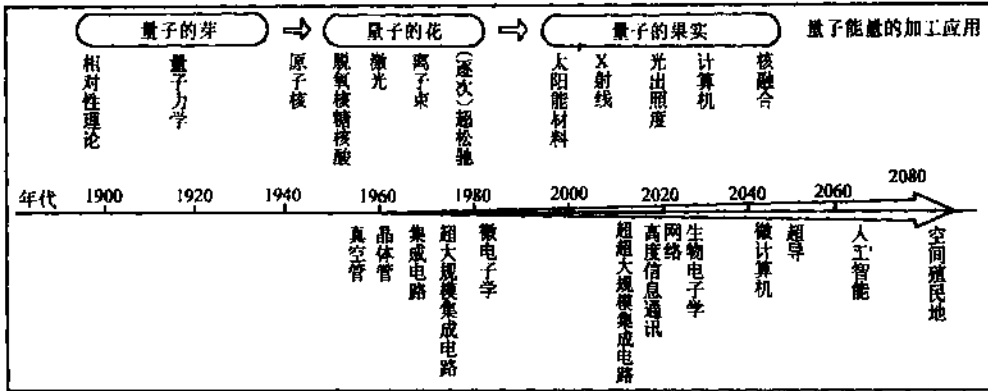


图 0-13 超精密加工理论基础和应用技术发展

4.4.2 向大型化、微型化方向发展

由于航天航空等技术的发展，大型光电子器件要求大型超精密加工设备，如美国研制的大型直径为 2.4~4m 的大型光学器件超精密加工机床。

由于微型机械、集成电路的发展，超精密加工技术向微型化发展，如微型传感器，微型驱动元件和动力装置、微型航空航天器件等。

图 0-14 是利用微细加工技术制作的微型机械及零件，其中图 a 为一对带轮，直径为 1mm，图 b 为电机，其转子直径约为 192 μ m，图 c 为梳形执行元件，图 d 为一个齿轮，直径为 124 μ m。

4.4.3 向加工检测一体化发展

由于超精密加工的精度很高，必须发展相应的检测技术才能适应其要求；同时，采用加工和检测独立进行的方法可能由于安装等误差而不能实现，因此，要采用在位检测方法，使加工检测一体化。

4.4.4 在线检测与误差补偿

超精密加工的精度很高，影响因素多且复杂，进行在线检测、工况监控以确保加工质量及其稳定性是十分必要的。由于超精密加工的精度很高，加工设备本身的精度有时很难满足要求，就要采用在线检测和误差补偿的方法来提高精度，保证加工质量的要求。

4.4.5 新型超精密加工方法的机理

加工机理的研究是新技术的生长点，超精密加工机理涉及微观世界和物质内部结构，所利用的能源包括机、光、电、声、热、化、磁、原子等，十分广泛。不仅可以采用分离去除加工，而且可以采用分层堆积加工方法；既可采取单独加工方法，更可采取复合加工方法。加工机理的研究往往具有突破性。

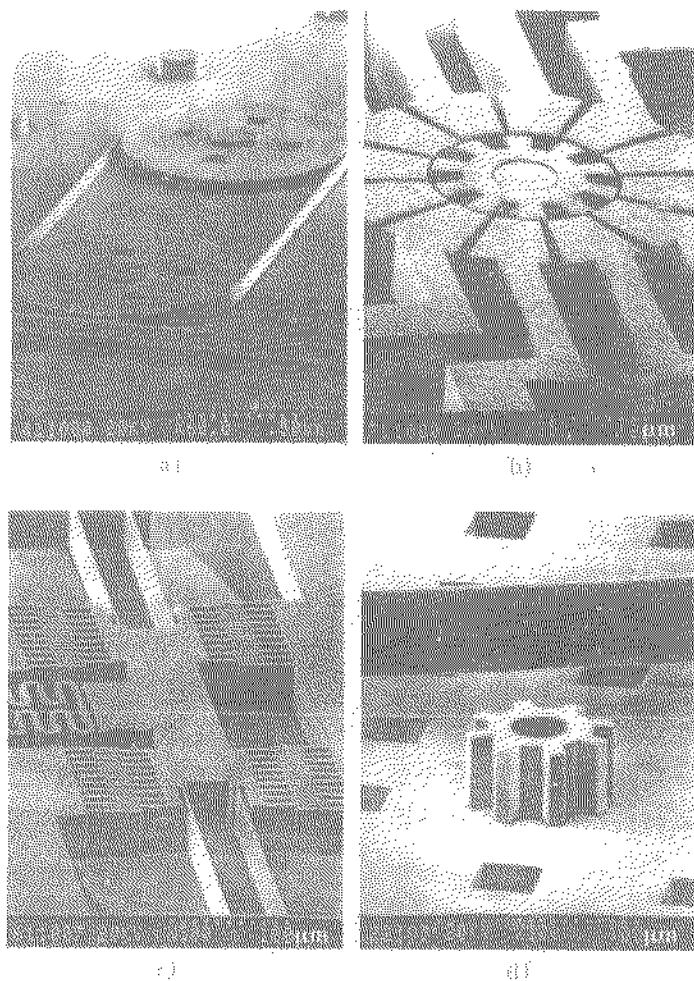


图 0-14. 几种微型机械及零件

a) 带轮 b) 电机 c) 锥形执行元件 d) 齿轮

4.4.6 新材料的研究

新材料包括新的工具材料(切削、磨削)和被加工材料。精密加工和超精密加工的被加工材料对其加工质量的影响极大,其化学成分、力学机械性能均有严格要求,亟待研究。

当前,精密加工和超精密加工在我国急需研究的是实用化,将一些成熟或比较成熟的精密加工和超精密加工技术推广到实际中去,以提高加工技术的水平,使生产的机械产品质量更好、生产率更高。

第 1 篇 精密切削、磨削及其机床

第 1 章 精密加工常用材料

随着科学、技术和生产的发展,精密加工在航空、航天、国防、电子、精密机床、精密仪器等诸方面都得到了更加广泛的应用。在设计和制造过程中,材料的选择和使用已显得极为重要。任何一个精密加工产品的设计,都是要通过材料的加工制作而付诸实现的。在制造过程中,设计、工艺和材料三者均是相互影响的因素,为了能够既保证质量,又符合经济地进行生产,这三者之间必须恰当的配合。设计时,材料的选择不仅要考虑材料的使用性能、工艺性能,还要考虑加工工艺对零件结构的要求。图 1-1 示意说明了它们之间的关系,可以看出,正确的选择材料和合理的加工工艺是精密加工零件达到质量的保证。这一问题如解决得好,可以使产品创名牌,占市场;相反,很多质量问题也是由于材料及其工艺过程引起的,材料选择不好或其工艺不当,不仅影响产品的质量、寿命,而且关系到产品的制造成本,甚至还会引起索赔及诉讼等问题。所以材料是实现精密零件设计要求的前提。因此,材料的选择和使用在精密加工中占有十分重要的地位。

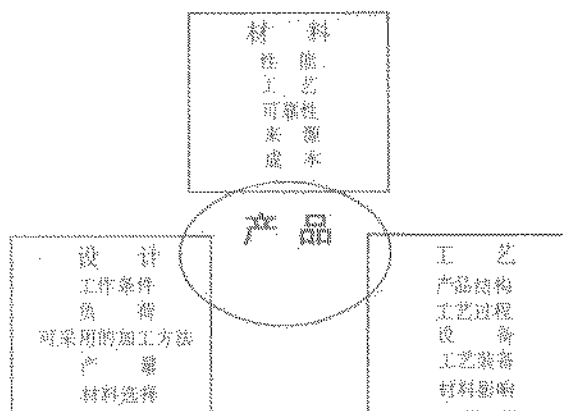


图 1-1 设计、工艺与材料之间的关系

本章主要从精密加工零件的设计、制造需要出发,论述有关精密加工零件所用材料中的一些基本问题,使读者能正确选择材料、使用材料,以便在精密加工时能达到预期的性能及精度要求。

1 精密加工对材料的要求

精密加工与一般加工对材料的基本要求是相同的,但由于精密加工零件要求加工精度比较高,而且零件在服役过程中仍要保持较高的精度。因此,精密加工对材料的某些要求比一般加

工对材料的要求要高。主要有以下三方面的基本要求:

1) 材料使用性能(力学性能、物理性能、化学性能)应与零件的工作条件(机械负荷、热负荷、环境介质……)相适应,满足使用方面提出的寿命、精度、尺寸和重量限制等要求。

2) 材料的工艺性能(铸造性能、塑性成形加工性能、焊接性能、切削加工性能、热处理工艺性能……)应与零件的结构设计相适应,以保证零件成品的性能、精度和表面质量的要求。

3) 在满足前两项要求的前提下,采用便宜的材料和低的零件制造成本,以便把总成本降至最低,使成品在市场上具有最强的竞争力。

实际上,一个零件往往有多种可适用的材料,对于精密加工的零件优先选用对保证零件精度和表面质量有利的材料。

1.1 精密加工对材料使用性能的要求

材料在使用过程中的表现即为使用性能,主要使用性能有力学性能、物理性能、化学性能等,如图 1-2 所示。图 1-2 中所列的各种性能指标,是用材料的标准试样在标准试验条件下测定出来的,各种材料的性能可以从一些有关的设计手册或材料手册中查出。

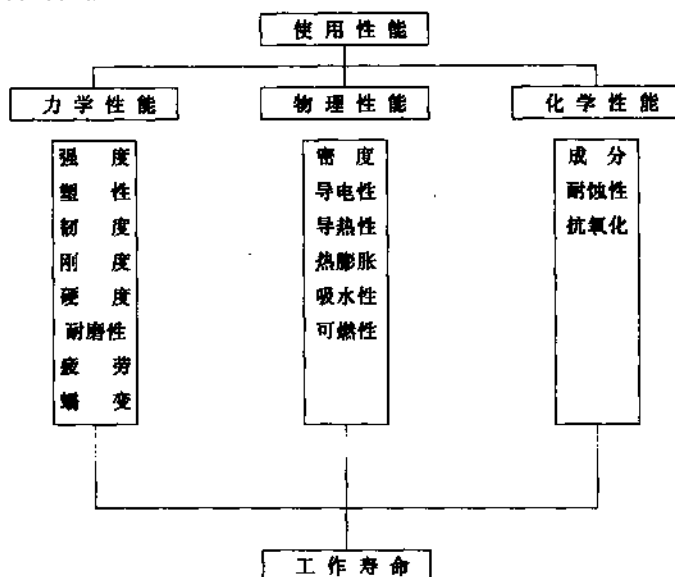


图 1-2 材料的使用性能

1. 各类工程材料的特性

常用的工程材料有金属材料、工程陶瓷材料、工程塑料和复合材料。金属有良好的塑性、导电、导热;工程陶瓷质硬耐磨;工程塑料质轻耐腐蚀。各类材料间性能之所以有如此大的差异,主要由于它们的结合键类型是不同的(如金属为金属键,陶瓷为离子键或共价键…),材料中的原子在固体中的排列方式也是不同的。金属和陶瓷材料的原子在固体中具有三维规则重复排列结构,所以金属和陶瓷材料均为晶体,塑料是不具有重复的三维排列原子的固体,塑料为非晶体。结合键类型和原子在固体中的排列方式决定了各类工程材料所具有的特性。

(1) 金属材料 金属是由公有化的自由电子与各正离子间产生的强烈的静电引力(金属键)将金属原子结合在一起。这种结合是比较强的,故金属具有较高的强度;当一块金属晶体的两部分发生相对位移时,金属键不会受到破坏,因而能承受塑性变形而不断裂,所以金属有很好的延展性;由于公有化的自由电子在整个金属中可以自由运动,故金属还具有良好的导电性、

导热性。

金属的塑性变形是通过金属晶体中的位错(晶体中的一种线型缺陷)运动进行的。对金属的晶体结构采取某种措施以阻止位错运动,就可以使金属得到强化,主要措施为:

- 1) 添加其他元素组成合金(如铁碳合金-钢、铸铁;铜锌合金-黄铜等)。
- 2) 形变强化(如冷轧钢板及冷拔钢丝等)。
- 3) 细晶强化。
- 4) 沉淀第二相的热处理(如硬铝的时效处理等)。

5) 由于温度引起晶体结构的变化(如奥氏体淬火得到马氏体)来进行强化。许多钢可以在不硬状态下进行成形和机械加工,然后再经过淬火硬化获得高的强度和硬度。正是由于这种强化机制才使钢得到如此广泛的应用。

金属材料具有强度高,塑性、韧性好等优良的综合力学性能。与其他材料相比,其耐磨性、耐热性和耐腐蚀性尚显不足。

(2) 工程陶瓷材料 工程陶瓷是由人工制取的高纯度化合物(氧化物、碳化物、氮化物等)粉料烧结而成。陶瓷的结合键是离子键或共价键,实际上往往是两种键的混合。这决定了陶瓷材料的特性,破坏这种键需要很高的能量,故陶瓷熔点高、硬度高;有高的室温和高温强度;抗腐蚀性好;在外力作用下难以变形,塑性差,对缺口敏感,易发生脆性断裂。在结合键中电子处于“受束缚”状态,不能在晶体中自由运动,所以工程陶瓷是良好的电绝缘体。

工程陶瓷可通过添加其他元素进行强化,但一般效果不大,某些陶瓷可以用改变晶体结构的方法进行强化,如六方氮化硼较软,而立方氮化硼的硬度接近金刚石,是优良的耐磨材料。

(3) 工程塑料 工程塑料是高分子合成材料,它是由重复的长链分子(由一些简单有机物单体聚合而成)组成的物质。重复分子中的原子之间是共价键结合,而长链分子间的结合力是较弱的分子键结合,也有一定的数量的共价键交联结合。这些长链分子在空间任意地或有规则地堆积而构成塑料。这种结合决定了塑料的特性,由于分子键很弱,故其弹性模量很低;没有固定的熔点,软化温度稍高于室温;在室温下使用时也容易发生蠕变(在载荷不变的情况下随时间的延长,变形不断增加的现象)。

除结合键外,分子链的长度即单体的数目(以聚合度 n 表示)也明显影响塑料的性能,强度随聚合度增大而升高,而加工性能(模压、注射成形等)随聚合度增高而降低。商用塑料聚合度一般为 $10^3 \sim 10^5$ 。同一种塑料的聚合度随生产方法和加工工艺而异,因此它们的性能在很大范围变化,这一点与金属材料不同,不同工厂生产的同一牌号的金属材料,它们的性能基本接近。

工程塑料具有优良的化学稳定性,对酸、碱均有良好的抗腐蚀性,良好的绝缘性,密度小,其不足之处是弹性模量小,热膨胀系数大,易发生蠕变等。

(4) 复合材料 复合材料可以由金属、陶瓷或高分子材料中任意两者人工合成,也可以由两种或多种金属、陶瓷或高分子材料来制备,复合的范围很广。复合材料的最大优越性是它们的性能比其组成材料的性能好得多。例如,玻璃和树脂的强度和韧度都不高,可是它们组成的复合材料(玻璃钢)却有很高的强度和韧度。但复合材料的价格高。

金属、陶瓷和塑料在性能上各有特性,各有其适合的应用范围。了解它们的特点对合理选用材料和使用材料是十分重要的。各类材料的性能特点如表 1-1 所示。陶瓷硬度高、耐热、耐蚀,可用来制造高温下工作的零件(如涡轮转子)、刀具和某些耐磨的零件,但脆性大不适于制造重要的受力零件。塑料的密度小、有些塑料的摩擦因数小,减摩、耐磨性好,在机械工业中

常用于制造轻载传动齿轮、轴承和各种密封等，但塑料的强度、韧度低，目前尚不能制造重要的机械零件。比较起来，金属具有最优良的综合力学性能，可用于制造各种重要的机械零件。所以它仍是目前最重要的工程材料。

表 1-1 金属、陶瓷、塑料三类材料的性能对比

材料类型	结合键	原子排列方式	力学性能	物理性能	化学性能
金属	金属键	晶体	塑性、韧度好，弹性模量较高，强度较高，耐磨性一般	密度大、导电性好、导热性好	耐腐蚀性一般
陶瓷	共价键 (离子键)	晶体	弹性模量高，硬度高，耐磨性好，高温性能好，脆性大	密度较低 不导电 导热性差	耐腐蚀性好
塑料	分子键	非晶体	耐磨性好，弹性模量低，硬度低，强度低，易蠕变	密度低、不导电、导热性差	耐腐蚀性好

2. 精密加工要求的材料使用性能

不同类型的精密加工零件对材料的使用性能要求是不同的，用于机器结构件、动力传输装置、工具等的材料，材料的力学性能是头等重要的；用于发动机中承受热负荷的零件时，材料的高温性能、导热性和热膨胀率是首要考虑的；用于化工机械零件时，材料的耐腐蚀性是主要的。如何确定零件材料的主要使用性能要求，最重要的是对零件的工作条件和零件失效形式有正确的认识并进行分析，提出对零件材料要求的主要使用性能。综合各类零件的工作条件主要包括三个方面：

(1) 受力状况 载荷类型(动载、静载、循环载荷……)及大小；载荷的形式(拉伸、弯曲、扭转……)及载荷特点(均布载荷或集中载荷)等。

(2) 环境状况 工作温度(常温、高温、低温……)；介质情况(是否有腐蚀、潮湿、真空……)

(3) 特殊要求(密度、导电、导热、外观……)。零件的失效形式主要有变形失效(弹性变形、塑性变形)；断裂失效(塑性断裂、疲劳断裂、低应力脆性断裂……)；表面损伤失效(磨损失效、腐蚀失效……)。通过对零件的工作条件和失效形式的综合分析，确定零件对材料的主要性能要求。其次，根据零件的形状、尺寸及工作中所承受的负荷大小，计算出零件的应力。最后根据工作应力、使用寿命和安全性等因素确定对材料性能指标的具体要求。查手册选出满足使用要求的几种材料。表 1-2 列举了几种常用零件要求的主要力学性能。

表 1-2 几种常用零件要求的力学性能

零件	工作条件			失效形式	要求的主要力学性能	其他
	载荷性质	承载状态	应力形式			
传动轴	循环载荷 有冲击	轴颈摩擦 振动	弯曲应力 扭转应力 应力集中	疲劳断裂 过量变形 轴颈磨损	高的强度和冲击韧度，刚度好，轴颈硬度高，耐磨性好	轴颈表面粗糙度要低
传动齿轮	循环载荷 有冲击	齿面摩擦 振动	弯曲应力 接触应力	齿折断 粘着磨损 点蚀剥落	心部强度、冲击韧度高；表面强度、硬度高，耐磨性好	要求齿表面形成压应力，齿表面粗糙度低，精度高
弹簧	交变载荷 有冲击	振动	扭转应力 弯曲应力	弹性失稳 疲劳断裂	屈服比(σ_s/σ_b)高，弹性极限高，疲劳强度高	弹簧表面形成压应力，表面无损伤，抗锈蚀

由上述分析可知，材料的力学性能是大多数精密加工零件对材料提出的主要要求，在精密加工中用得最多的材料是各种钢材。因此，对有关钢材的力学性能和手册使用问题进一步作些

说明。

1) 试样毛坯尺寸、热处理条件都会影响试样材料的力学性能。查手册时应选用毛坯尺寸与零件最大截面尺寸接近, 热处理条件与零件热处理一致的试样性能指标。

2) 手册中给出的力学性能, 大多限于常规的力学性能, 即抗拉强度 σ_b 、屈服点 σ_s 、伸长率 δ 、断面收缩率 ψ 和冲击韧度 α_K 。而一些特殊性能指标, 如疲劳强度、蠕变强度等由于这些性能试验起来较困难, 所以不是每种钢都进行这类测试, 在试验数据比较缺乏的情况下, 人们致力于寻求这些特殊性能指标与某些常规性能指标之间的关系, 目前只有疲劳强度 σ_{-1} 与抗拉强度 σ_b 之间具有很好的相关性, 它们之间的关系大致为: $\sigma_{-1} = 0.5\sigma_b$ 。

3) 硬度试验方法是将一个压头压入材料表面中, 然后用某种方法测定其效应(表面形成的压痕)。常用的硬度试验方法有布氏硬度(HB)、洛氏硬度(HRA、HRB、HRC)、维氏硬度(HV)和努氏硬度(HK)等。各种硬度试验方法所采用的压头、载荷是不同的, 所适用的范围也是不同的。不同的硬度值没有对应关系, 可查表进行近似的换算。试验表明: 抗拉强度与布氏硬度近似成正比, 在布氏硬度 500HBW 以下时, 两者的关系为: $\sigma_b \approx 3.43 \times \text{HB}(\text{MPa})$ 。由于测量硬度后只在表面留下一个压痕而不使试样破坏, 所以在设计的技术条件中常以硬度表示对材料性能的要求。在生产中可进行硬度测量以检验零件材料是否达到设计要求, 检验后不影响零件的使用。

3. 精密加工与一般加工对材料使用性能要求的对比

精密加工对材料使用性能的要求, 在满足上述基本使用性能要求外, 还对材料的刚度(弹性模量)、导热性、热膨胀系数、抗氧化耐腐蚀性和耐磨性有更高的要求。材料的刚度高、导热性好、热膨胀系数低对提高材料加工过程中的精度是有利的; 材料的刚度高、热膨胀系数低、抗氧化、耐腐蚀性和耐磨性好有利于零件在服役过中长期保持高的精度。各类材料的弹性模量如表 1-3 所示。

表 1-3 各类材料的弹性模量

材 料	E/GPa	材 料	E/GPa	材 料	E/GPa	材 料	E/GPa
金刚石	1000	钛合金	80~130	碳化硅	450	尼龙	2~4
铂	172	铁及低碳钢	196	碳化钛	379	聚乙烯	0.2~0.7
金	82	低合金钢	200~207	碳化钨	450~650	聚氯乙烯	0.03~0.1
钨	406	奥氏体不锈钢	190~200	刚玉(Al_2O_3)	390	碳纤维树脂复合材 料(CFRP)	70~200
钴及钴基合金	200~248	铸铁	170~190	氮化硅	300	玻璃纤维树脂复合 材料(GFRP)	7~46
镍及镍基合金	130~234	铝及铝合金	69~79	氧化锆(ZrO)	160~240		
硬质合金(Co/WC)	400~530	铜及铜合金	120~150	聚脂塑料	1~5		

1.2 精密加工对材料工艺性能的要求

对任何零件都是用不同的工程材料经过各种加工工艺制造出来的, 因此材料的工艺性即加工零件的难易程度, 自然是设计、加工所必须考虑的问题。

1. 各类工程材料的工艺性能

对材料工艺性能的要求与生产零件的加工工艺路线有密切的关系, 工艺性能的具体要求就是从工艺路线中提出来的, 下面简介各类材料的一般工艺路线及有关的工艺性能。

(1) 金属材料的工艺性能 精密加工金属制件的工艺路线如图 1-3 所示, 由图 1-3 看出, 金属材料加工成零件的主要加工工艺有五类, 即铸造、塑性成形加工、焊接、切削加工和热处理。前三类是毛坯成形工艺, 切削加工是最终成形工艺, 热处理则安排在各工序之间, 以改善切削加工性能和使零件达到所要求的力学性能等, 有的热处理工艺安排在最后工序以达到加工零件最后的性能和精度要求。零件所用的材料不同, 其加工工艺路线也不同, 对材料工艺性能的要求也不同。

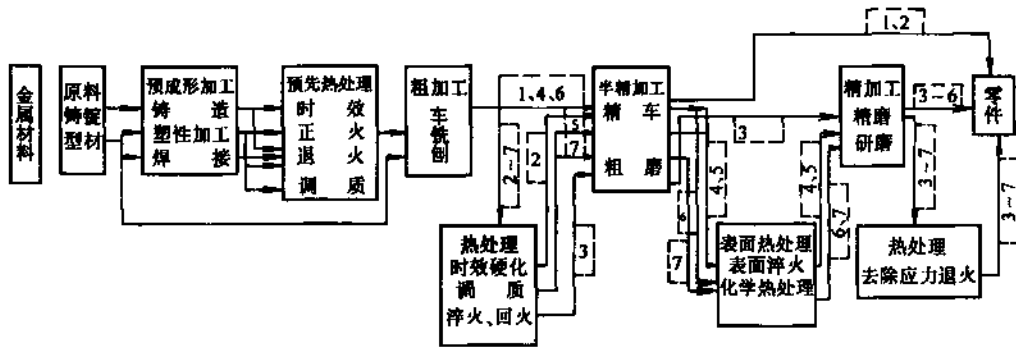


图 1-3 金属材料的加工工艺路线

(图中数字表示零件材料不同所采用的工艺路线序号)

1) 铸造性能 铸造性能包括熔化温度、流动性、缩孔性质、偏析等。由于共晶成分的合金熔化温度低、流动性较好、形成集中缩孔、偏析倾向小因而铸造性能最好。铸造合金大多为共晶成分的合金或接近共晶成分的合金。

由于铸态组织较粗大及存在各种铸造缺陷(如疏松、气孔、偏析、夹杂等), 一般来说, 铸件的力学性能低于材料成分相同的锻件。因而铸造工艺适用于制造形状复杂、壁薄而性能要求不高的零件(如箱体、支架等)。常用的几种金属材料的铸造性能如表 1-4 所示, 可以看出, 灰铸铁、铝合金的铸造性能最好, 应用最广。采用金属型铸造、熔模铸造、壳型铸造和压铸等铸造方法, 可铸造出精密的铸件。

表 1-4 几种常用铸造金属的铸造性能

材料名称	熔化温度	流动性	收缩性		偏析倾向	其他
			体收缩	线收缩		
灰铸铁	高	好	小	小	小	内应力小
球墨铸铁	高	稍差	大	小	小	易形成缩孔、疏松
铸钢	高	差	大	大	大	易出现冷裂
铸造黄铜	较高	好	小	较小	较小	形成集中缩孔, 致密度高
铸造青铜	较高	尚好	小	小	较小	形成分散缩孔, 致密度低
铸造铝合金	低	好	小	小	较小	易吸气、易氧化
铸造锌合金	低	好	小	小	小	自然时效(随放置时间长度变短)

2) 塑性成形加工性能 塑性成形加工分为热塑性成形加工(如锻造、压轧、热挤压等)和冷塑性成形加工(如冷冲压、冷挤压等)两类。

热塑性成形加工是指材料加热到某一定温度(高于再结晶温度)时进行的塑性成形加工, 其

塑性成形加工性是指变形抗力、变形能力、加热温度等。低、中碳钢具有较好的热塑性成形加工性能，高碳钢和合金钢尤其是高碳高合金钢热塑性成形加工性能较差。铜合金热塑性成形性能一般。铝合金由于锻造温度范围窄热塑性成形加工性能并不好。

热塑性成形加工可使材料致密、成分均匀、金相组织细化，成形后可提高材料的性能。

在热塑性成形加工的钢制件中，杂质按一定的方向分布，形成所谓纤维组织。纤维组织分布的方向对力学性能有较大的影响。试验证明，当旋转式弯曲疲劳试样的轴线与纤维组织方向垂直时，钢的疲劳极限比纤维组织成轴向的试样下降 30%。说明合理的锻造工艺可使纤维组织与应力方向一致，因而可提高零件的性能。所以像曲轴、连杆、齿轮等在交变载荷下工作的零件不用棒料直接切削加工，而是先将棒料锻造毛坯，使纤维方向与主应力方向相一致，如图 1-4 所示。

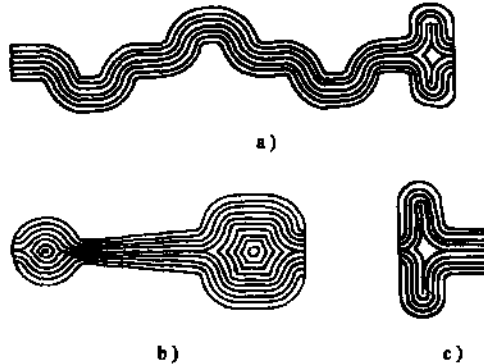


图 1-4 几种锻件理想的纤维方向

a) 曲轴 b) 连杆 c) 齿轮

冷塑性成形加工一般是在常温下进行，其加工成形性是指变形能力、变形抗力、硬化指数等。低碳钢、铜合金和铝合金等，其硬度低、变形抗力小、变形能力大，冷塑性成形加工性能好。冷塑性成形后材料的硬度、强度提高，而塑性、冲击韧度下降，这是由于形变引起强化的结果，故冷塑性成形加工也是提高这类材料力学性能的重要手段。

3) 焊接性能 焊接性能是指焊接时形成冷裂、热裂以及形成气孔的倾向，焊接性能也和焊接区的性能好坏有关。

钢的焊接性能与钢的成分密切相关，通常用碳当量(C_{eq})来表示成分的影响，碳当量就是钢中含碳量(w_C)和把钢中合金元素折合成作用相当的碳含量之总和，可根据经验公式：

$$C_{eq} = w_C + 1/6w_{Mn}\% + 1/24w_{Si}\% + 1/40w_{Ni}\% + 1/5w_{Cr}\% + 1/4w_{Mo}\% + 1/4w_V\%$$

进行计算。 C_{eq} 超过 0.44% 产生裂纹倾向增大，焊接性能大为恶化。此外，若钢中硫、磷杂质含量多，焊缝裂纹倾向也大。

铝合金由于线膨胀系数大，易吸氢等原因，焊接后易形成气孔、收缩大易形成裂纹，故它们的焊接性能并不好。采用钨极气体保护焊可获得优良的焊接接缝。

近几十年发展起来的电子束焊接已在民用工业中得到应用，它的焊接速度快，焊缝非常窄，且熔透层深，使焊接变形尽可能减小，可用于精密焊接。激光焊是用聚集的激光束进行焊接、焊接速度快，变形小，也是一种新发展的精密焊接方法。

4) 切削加工性能 切削加工性能是指切削的难易程度和加工的表面质量，通常可由四个方面进行衡量：切削时消耗的动力；刀具的磨损；表面粗糙度；切屑的形态。切削加工性能的

高低常用“切削加工性能指数来表示，该指数越高，切削加工性能越好。表 1-5 中列出了一些材料加工性能指数，可以看出，铝及铝合金具有优良的切削加工性能。

表 1-5 几种常用金属切削加工性能的比较

材 料	加工性指数	材 料	加工性指数
Y12*	100	1Cr18Ni9Ti	25
Y12Pb*	152	Y1Cr18Ni9*	45
Y45*	95	灰铸铁	50~80
45(退火)	60	可锻铸铁	70~120
30CrMo	65	铝	1000
40CrNiMoA	45	硬铝	1000
50CrV	45	铜	60
GCr15	30	黄铜	80
W18Cr4V	25	磷青铜	40

注：带*者为易切削钢。

切削加工性能与所加工材料的硬度有密切关系，最适合切削加工的硬度范围为 170~230HBS。若硬度过低，切削时金属易粘刀而形成切削瘤，加工后零件表面粗糙度高；硬度过高，则切削抗力大，刀具磨损量也大，使加工变得困难。被加工材料的金相组织对切削加工性能也有很大的影响，当组织中含有大量硬而脆的化合物，尤其是含有大片状、网状、针状化合物时，切削加工困难，这种情况可通过热处理等工艺来改善组织，以利于切削加工。

5) 热处理工艺性能 热处理是通过对金属制件加热、保温和冷却过程，改变材料的组织从而获得所需性能的工艺。钢可以通过各种热处理工艺在较大范围内改变钢的性能，所以钢的热处理工艺性能是十分重要的。钢的热处理工艺性能包括淬透性、变形开裂倾向、过热敏感性、回火稳定性及氧化、脱碳倾向等，其中最重要的是淬透性。

淬透性是钢在淬火时获得淬透层深度的能力。钢的淬透性对机械设计很重要。例如用淬透性不同的两种钢材制成相同直径的轴，进行淬火(淬火介质为水)后再经高温回火(或总称调质处理)，比较其力学性能如图 1-5 所示。淬透性高的钢制轴整个截面被淬透，淬火后由表面至中心的组织全为马氏体，回火后为回火索氏体(渗碳体呈细颗粒状)，由表面至中心的力学性能是相同的，回火索氏体有较高的冲击韧度和强度，如图 1-5a 所示；淬透性低的钢制轴心部没淬透(图 1-5b 中影线部分所示)，调质处理后，只有表层的组织为回火索氏体，而未淬透的心部为片状索氏体，其强度尤其是冲击韧度较低，如图 1-5b 所示。对于承受拉、压下工作的重要零件，如螺栓、拉杆、锻模等常常要求全部淬透。车刀、钻头切削工具由于不断磨刃也要求全部淬透。对于承受弯曲、扭转应力的轴类零件，由于最大应力分布于外层，淬透层深度为半径的 $1/3 \sim 1/2$ 就可满足要求了。

为了便于测量，一般规定从表面至半马氏体区(组织中马氏体体积分数为 50%处)的距离为淬透层深度。

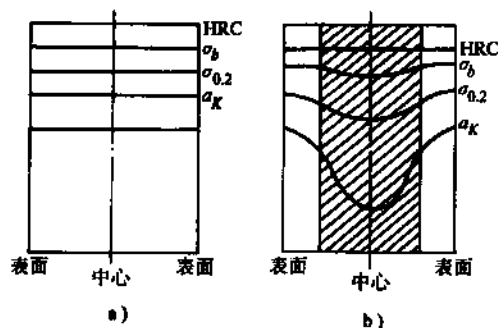


图 1-5 淬透性不同的钢调质后力学性能的比较

a) 完全淬透 b) 未完全淬透

淬透性常用端淬法测得的淬透性曲线表示。图 1-6 是 40、40Cr、40CrNiMo 三种钢的淬透性曲线。已知 40、40Cr 和 40CrNiMo 三种钢的半马氏体的硬度分别为 40HRC、45HRC 和 45HRC，可以由图上查出三种钢半马氏体区处至水冷端的距离，分别为 3.5mm、6mm 和 7.5mm，距水冷端的距离越大表明钢的淬透性越好，对比三种钢的淬透性可知，40CrNiMo 钢的淬透性最好，合金钢比碳钢的淬透性好。当零件要求淬透层深度一定时，采用合金钢就可以用较低的冷却速度进行淬火得到所需的力学性能，而产生裂纹和变形的危险性将减少。

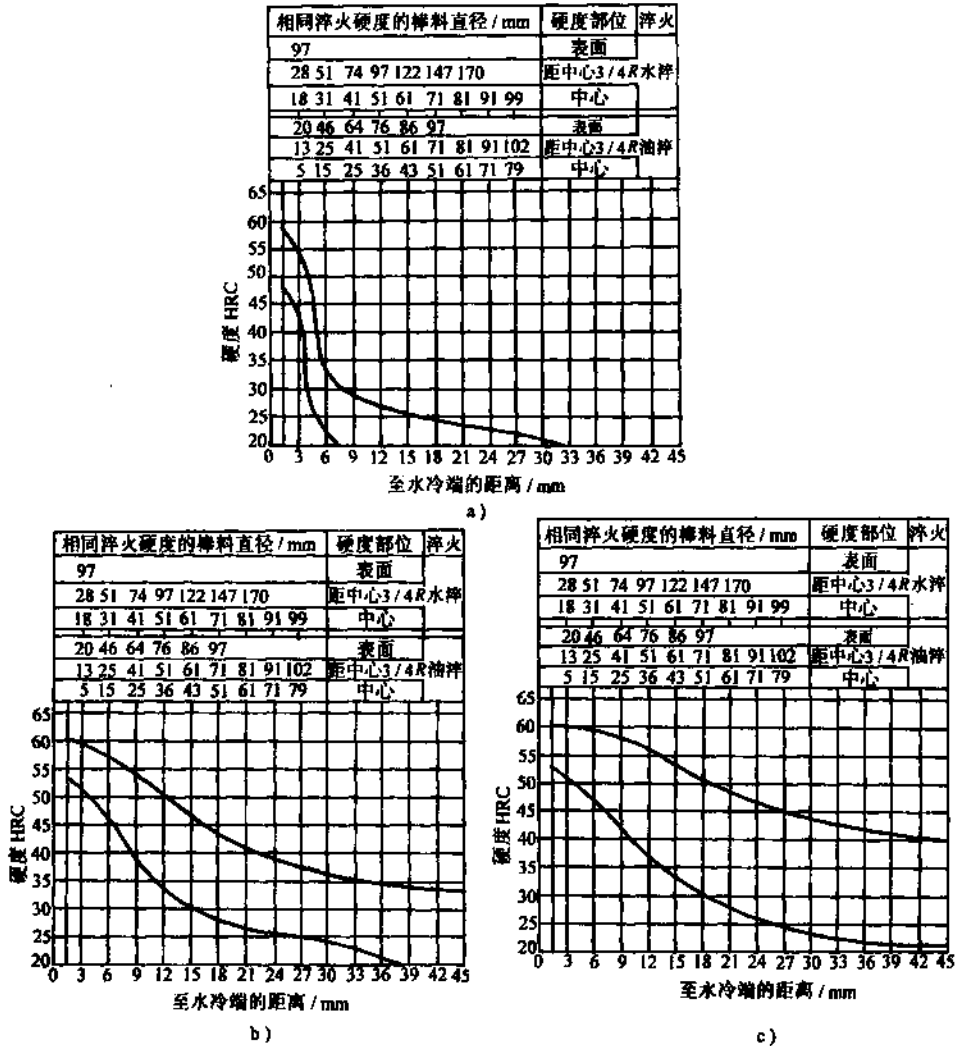


图 1-6 40、40Cr、40CrNiMo 三种钢的淬透性曲线

a) 40 钢 b) 40Cr c) 40CrNiMo

(2) 工程陶瓷材料的工艺性能 工程陶瓷材料的加工工艺路线如图 1-7 所示，与金属材料相比其工艺路线比较简单。工程陶瓷是通过化学反应等工艺特别制取的某些化合物(常用的有氧化铝、碳化硅、氮化硅等)粉料，经不同的成形工艺(见表 1-7)和烧结工艺(见表 1-8)而制成。陶瓷材料的性能是由原材料的成分、粉料粒度、成形工艺和烧结工艺所决定的。经烧结后陶瓷的性能基本不变，成形加工后只需机械加工即可成为零件，由于陶瓷材料很硬，而且很脆，只

能用碳化硅或金刚石砂轮进行磨削加工或采用电子束、激光、超声波等特种加工进行加工。由于陶瓷材料对缺陷和应力集中都很敏感，故陶瓷件的表面粗糙度比金属件要求的要严，所以有些陶瓷零件磨加工后，还要求研磨或抛光。

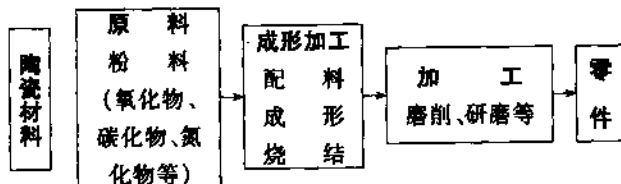


图 1-7 陶瓷材料的加工工艺流程线

(3) 工程塑料的工艺性能 工程塑料的加工工艺流程如图 1-8 所示。从图中可以看出，其工艺流程也是比较简单的。塑料成形后可进行机械加工。

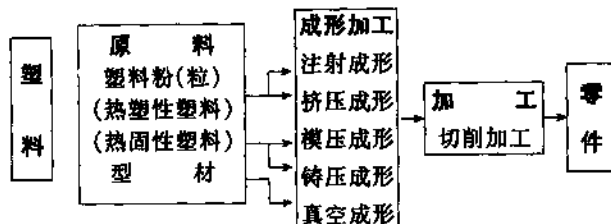


图 1-8 塑料的加工工艺流程线

塑料分为热塑性塑料和热固性塑料。热塑性塑料的特点是，受热时软化，冷却后变硬，这一过程可反复进行，可以多次成形，废品可以回收利用。热固性塑料的特点是，受热时软化，但加热到一定温度范围并经历一定的时间后，由于它们的化学结构发生变化而固化。再加热时不再软化，如果温度过高则分解，只能塑制成形一次。不同类型的塑料其成形工艺是不同的，热塑性塑料的成形过程(从加料到塑制件的获得)多数是连续的，成形的方法多采用注射成形和挤压成形。热固性塑料多数是间歇的，成形的方法多采用模压成形和铸压成形。塑料切削加工性能较好，与金属材料基本相同。由于它的导热性较差，在切削过程中热量不易散出，使工件表面温度急剧升高，使其烧焦(热固性塑料)或变软(热塑性塑料)致使加工时变形较大，这一点在加工时要特别引起注意。

2. 精密加工对毛坯的要求

精密加工零件选用什么样的毛坯，应根据对零件材料的使用性能要求、零件的结构形状、尺寸和生产的批量来确定。零件的结构形状应具有工艺的合理性，与所采用毛坯的成形加工方法相适应。毛坯的形状和尺寸应尽量接近零件，以减少机械加工量。

1) 金属材料可采用铸造、锻造、焊接等方法制造的毛坯，也可采用型材直接加工。几种主要预成形方法如表 1-6 所示。

表 1-6 金属材料几种主要预成形方法的比较

预成形方法	铸 造	锻 造	型 材	焊 接
结构形状、尺寸	形状复杂，薄壁，空心，曲面	形状较复杂，截面尺寸变化大	形状简单，截面尺寸变化不大	形状较复杂，壁较厚，加工面少
载荷大小	一般	较大	较小	一般
生产量	批量	批量	单件或批量	单件或批量
应用举例	床身，支架，箱体，活塞等	曲轴，凸轮轴，主轴，齿轮，连杆等	小轴，小齿轮，法兰盘，螺栓，螺母等	数控机床床身、支柱、横梁，齿轮箱等

2) 陶瓷材料只能采用成形和烧结工艺来制取。主要的成形工艺和烧结工艺如表 1-7 和表 1-8 所示。

表 1-7 工程陶瓷材料成形工艺的比较

方 法	优 点	缺 点
注浆成形	可制作形状复杂的、薄壁件，成本低	收缩大，尺寸精度低，生产率低
压制成形(热压、模压)	可制作形状复杂件，密度、强度高，精度较高	设备较复杂，成本较高
挤压成形	生产率高，成本低	不能制作薄壁件，零件形状须对称
等静压	密度、强度高	须经预烧后加工成形再去烧结

表 1-8 工程陶瓷材料的烧结工艺的比较

分 类	方 法	烧 结 工 艺	特 点
反 应 烧 结	反应烧结	通过反应形成坚固的烧结体	尺寸不变化，适合复杂形状，一般有残存气孔，强度低
	二次反应烧结	在烧结中加入辅助剂达到致密化	由于烧结时收缩变形小，尺寸精度比常压烧结的高
致 密 化 烧 结	常压烧结	是粉末成形体的一般方法，又叫无压烧结	适合制作复杂形状的零件，收缩变形大，性能比热压烧结的低
	气压烧结	在气压下粉末烧结成体的方法	比常压法加的辅助剂少，可致密化
	热压(HP)烧结	在模子加热情况下，单向加压成形的方法	适用于难烧结的陶瓷，致密度高，性能好，不适于形状复杂的零件

3) 工程塑料不像金属材料有各种型材可供选择，只有某些塑料有简单形状(薄板、厚板、圆棒、管材、异形棒)的型材供应，所以塑料件大多采用成形方法制取，主要成形工艺如表 1-9 所示。

表 1-9 工程塑料主要成形工艺的比较

工 艺	适 用 材 料	产 品 形 状	表 面 粗 糙 度	尺 寸 精 度	模 具 费 用	生 产 规 模
注射成形	热塑性塑料(粉)	复杂形状	很低	很高	很高	大批量
挤压成形	热塑性塑料(粉)	各种型材	低	一般	低	批量生产
模压成形	热塑性塑料(粉、型材) 热固性塑料(粉)	复杂形状	很低	高	高	批量生产
真空成形	热塑性塑料(型材)	简单形状	一般	一般	低	小批量

3. 精密加工件的表面质量及精度的控制

在把毛坯经过粗、精加工和热处理制成所需零件的过程中，加工设备的精度，刀具的性能，夹具的质量对加工零件的表面质量和精度都有很大的影响，材料本身的性能也是一个很重要的因素，材料切削加工性能好，不仅加工表面质量好，而且表面残余应力也小；淬透性好的钢在淬火时，内应力较小，变形倾向也较小，有利于达到加工精度的要求。

在加工过程中，由于切削变形和切削热的影响，加工零件表面层会产生残余应力和温升，如果残余应力过大不仅可以引起变形，甚至开裂，表面温度如果太高会引起表层性能的变化，所以在加工过程中要尽量减小表面温升及残余应力，但完全避免是不可能的。通过去除应力退火可有效地去除残余应力。

钢在淬火时会产生很大的内应力, 不可避免的要引起变形, 甚至开裂, 所以在淬火、回火后还需进行磨削加工, 在淬火前要留有一定的加工余量。精密加工零件选用淬透性好、变形小的钢, 可减小淬火时的变形以及内应力。

在加工工艺流程中, 合理安排机械加工和热处理之间的关系, 是减少复杂零件淬火变形或开裂的一个重要方面。如加工弹簧夹头, 在夹头两颈部铣缝时都不铣到头, 留下约 3mm 的一段, 待淬火回火后再将连接部分切开, 保证了夹头的形状。下面给出图 1-3 中所示的不同材料和不同精度要求的零件加工工艺路线 1~7 的具体例子:

1) 丝杠车床母丝杠(6级) T10A 碳素工具钢①

下料—球化退火—粗加工—去除应力退火—粗车螺纹—去应力退火—半精车螺纹—低温时效—磨削加工—零件

2) 发动机活塞 ZL109 铸造铝合金②

金属型铸造—时效强化—粗加工—去除应力退火—精加工—零件

3) 计算机磁盘 铝合金板料(厚 $1.27 \pm 0.06\text{mm}$)①

下料 $\phi 356.4\text{mm}$ (内径 168mm)—板坯两面切削加工—去除应力退火(叠置装箱)—基材抛光—涂覆磁性材料(磁性材料流到盘上后, 盘高速旋转, 靠离心力获得均匀涂膜)—抛光涂膜—零件

4) 螺纹磨床母丝杠(5级) CrWMn 合金工具钢③

下料—锻造—球化退火—粗加工—去除应力退火—半精加工—淬火、冷处理、回火—粗磨—低温时效—半精磨—低温时效—精磨—零件

5) MZ208 轴承磨床导轨 GCr15③

下料—锻造—退火—粗加工—去除应力退火—半精加工—淬火、回火—粗磨—低温时效—半精磨—低温时效—精磨—零件

6) CA6140 车床床身导轨 HT300④

铸造—退火—粗加工—精加工—导轨表面淬火、回火—磨削加工—零件

7) C620 车床主轴 45 钢⑤

下料—锻造—正火—粗加工—调质—精加工—轴颈、锥孔表面淬火、回火—磨削加工—零件

8) Y7163 齿轮磨床主轴 20CrMnTi⑥

下料—锻造—正火—粗、精切削加工—渗碳—车去渗碳层(不需渗碳部位)—淬火、冷处理、回火—粗磨—低温时效—精磨—零件

9) T615K 镗床镗杆 38CrMoAlA⑦

下料—锻造—退火—粗车削加工—调质处理—精车削加工—去除应力退火—粗磨—渗氮—精磨—低温时效—超精研磨—零件

1.3 精密加工对材料经济性的要求

零件的总成本与使用寿命、零件重量、材料价格和加工费用等因素有关, 材料价格和加工费用是主要影响因素。

据统计, 材料费用在机械产品中占有较大比重, 一般为 30%~70%, 在满足使用性能要求的前提下, 零件应采用价格较低的材料。材料的价格随供应量和需求量的不同而涨落, 给出材料的精确价格是不可能的, 表 1-10 列出了一些材料的相对价格。

零件加工费用是由材料的工艺性能和零件加工精度要求所决定的。加工性能差的材料其加

工成本比性能好的材料高。加工精度要求越高，其制造成本也越高。

表 1-10 各种材料的价格(1980年1月)

材料名称	单价(美元/t)	材料名称	单价(美元/t)
工业金刚石	90000000 (9亿)	刚玉(Al_2O_3)	1900
铂	26000000	碳化硅(SiC)	400~700
金	19100000	玻璃	1500
硬质合金 (C/WC金属陶瓷)	66000	有机玻璃(PMMA)	5300
钨	26000	尼龙66	3289
钴	17200	聚碳酸酯	2550
镍	7031	环氧树脂	1650
钛合金	10190~12700	泡沫塑料	880~1430
高速钢	3995	天然橡胶	1430
不锈钢	2400~3100	聚丙烯	1280
低合金钢	385~550	聚乙烯	1210~1250
低碳钢(型材)	440~480	聚酰胺	10100
铜锭	238	碳纤维复合材料(基体占成本30%,纤维60%)CFRP	200000
铸铁	260		
铜(型材)	2256~2990	玻璃纤维复合材料(基体占成本60%,制造成本40%)CFRP	2400~3300
黄铜(型材)	1650~2336		
铝合金(型材)	2000~2440		

现以机床、汽车和飞机传动机构中的双联齿轮为例说明之，齿轮要求有一定的韧性、一定的强度和表面耐磨性。机床齿轮负荷小，对精度要求较高；汽车齿轮负荷较大对韧性、耐磨性要求较高，飞机齿轮负荷大，对韧性、耐磨性要求较高，对精度要求也较高，且自重要轻；根据要求三种齿轮分别选用调质钢，渗碳钢和渗碳钢，其加工过程如下：

1) 机床双联齿轮加工过程为：

调质钢—锻造—退火—粗加工—调质—精加工—制齿—高频淬火—回火

高频淬火是先淬小齿轮，再淬大齿轮，要求大小齿轮的外径差大于15mm，齿部端面距离 H 大于8mm，如图1-9所示，其结构紧凑性稍差；高频淬火变形小，齿轮精度较高；但其耐磨性比渗碳淬火的低。

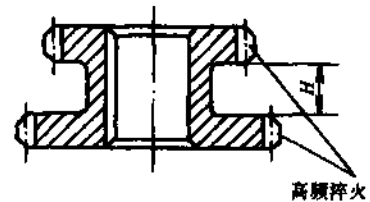


图 1-9 高频淬火双联齿轮

2) 汽车双联齿轮加工过程为：

渗碳钢—锻造—正火—粗、半精加工—制齿—渗碳、淬火—回火

与高频淬火齿轮相比，韧性、耐磨性好，结构较紧凑；但精度低些，加工成本高些。

3) 飞机双联齿轮加工过程为：

渗碳钢—锻造—正火—粗、半精加工—制齿 1—渗碳、淬火—回火—磨齿

电子束焊接—去除应力退火

渗碳钢—锻造—正火—粗、半精加工—制齿 2—渗碳、淬火—回火—磨齿

在渗碳、淬火及回火后经过磨齿提高了零件的精度，但当磨齿时，要求两齿部端面之间要有一定的距离。若分别加工两齿，磨齿后经电子束焊为一体，使齿部端面的距离尽可能减小，如图 1-10 所示。这样，虽然制造成本增加了，但由于结构紧凑自重就减轻了，飞机的载重量增加，燃料费用降低，总经济效果是好的。

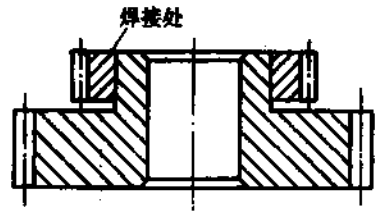


图 1-10 电子束焊接双联齿轮

综上所述，精密加工材料在满足零件对材料的使用性能要求的前提下，材料的价格要低，工艺性能要好，加工费用要低，以使总成本最低，以获得最大的经济效益。

2 达到精密加工材料性能的工艺措施

精密加工的零件加工精度要求高，要满足这一要求，材料的切削加工性能要好，材料的硬度不能太高；服役过程中要长久地保持高的精度，要满足这一要求，材料的耐磨性、耐蚀性好，材料的硬度要高，金属材料通过热处理可以在较大范围内改变材料的性能，例如钢在硬度较低时进行切削加工，然后再经过淬火硬化获得高强度、高硬度，所以热处理是精密加工中，使材料满足性能要求的十分重要的工序。由于金属材料耐磨性、耐蚀性不高，通过表面处理技术可进一步提高金属材料的耐磨性和耐蚀性，表面处理技术可以改变表面的成分和组织，进而改变材料的性能；或者在表面涂覆另一种材料以达到所需的性能。所以表面处理技术是一种广义的材料复合的方法。

2.1 热处理过程中的组织性能变化

通过对金属制件加热、保温和冷却的热处理工艺过程，只改变了材料的性能，而不改变零件的形状和尺寸(由内应力引起的变形除外)。材料性能的变化是由于热处理过程中组织结构变化而引起的。已经知道，只有在固态具有组织结构变化的材料才能进行热处理，钢及部分铝合金、铜合金可进行热处理。合金相图是确定加热温度的依据，并可确定加热时组织的变化；控制冷却过程中的组织变化获得所要求的性能。了解热处理过程中组织结构的变化，对于采用何种热处理，合理安排热处理和机械加工之间的关系是十分必要的。

1. 合金相图

(1) 铁—碳合金相图 铁—碳合金相图是钢和铸铁热处理的依据，图 1-11 是铁—碳合金部分相图示意图。当含碳量低于 E 点的合金为钢，超过 E 点的合金为铸铁。 GS 线表示奥氏体开始转变为铁素体的温度线，以 A_3 表示。 ES 是碳在奥氏体中的溶解度曲线，随着温度的降低自奥氏体中析出网状渗碳体，以 A_{cm} 表示。 PSK 线是奥氏体转变为珠光体的温度，以 A_1 表示。 S 点为共析点。 S 点成分(如合金 1)的合金为共析钢，平衡组织为珠光体(铁素体 + 片状渗碳体)。成分在 PS 间的所有合金(如合金 2)为亚共析钢，平衡组织为铁素体 + 珠光体，随含碳量由 P 点增至 S 点的合金，组织中的珠光体随之增加，强度、硬度提高，塑性、韧性下降。成分在 SE 间的所有合金(如合金 3)为过共析钢，平衡组织为网状渗碳体 + 珠光体，随含碳量的增加，合金组织中的渗碳体随之增加，硬度提高，脆性增大。可以看出，各种钢在固态时自高温冷却到室温都有组织的变化。

(2) 铝合金相图 图 1-12 为部分铝—铜合金相图示意图，由图可以看出，含铜量低于 F 的合金，在固态都没有任何变化，这类合金不能通过热处理来改变其性能。 FD 线是铜在 α 固

溶液中的溶解度曲线，随温度的下降 θ 相自 α 固溶体中析出。可以看出，这些合金在固态时有组织变化。所以成分在FD范围的合金可以进行热处理。

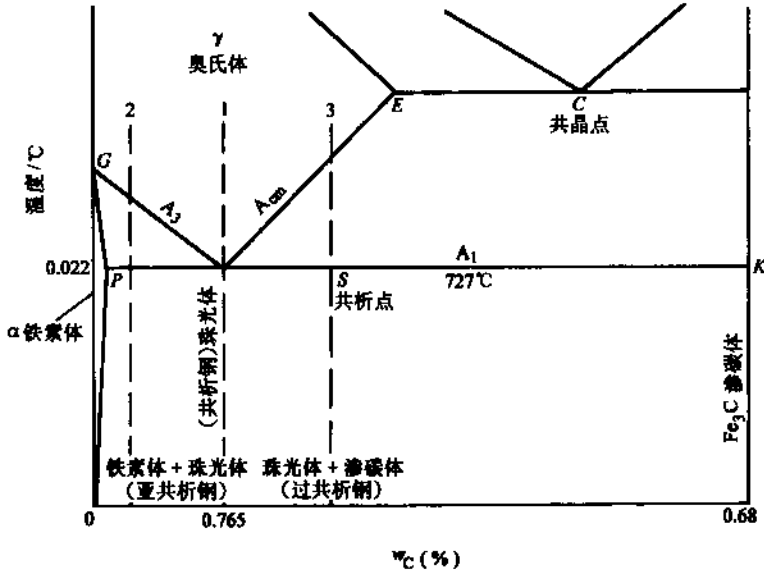


图 1-11 部分铁-碳合金相图

2. 奥氏体状态的钢在冷却时的转变

钢的热处理是将钢加热至临界温度(A_1 、 A_3 、或 A_{cm})以上某一温度，获得奥氏体组织(见图 1-11)保温一定的时间后，以不同速度冷却，奥氏体发生不同的转变。常用奥氏体等温转变曲线来说明这种转变，在手册中可查到各种钢的奥氏体等温转变曲线，图 1-13 是共析钢的过冷奥氏体等温转变曲线，转变曲线是由转变开始曲线和转变终了曲线组成， M_s 水平线表示奥氏体转变为马氏体的开始温度(终了温度 M_f 在零度以下)。曲线表明温度在 A_1 以上奥氏体稳定，不发生转变，在 A_1 以下奥氏体不稳定，转变之前处于过冷状态。奥氏体的稳定性取决于转变的孕育期，在鼻尖处(约 550°C 时)孕育期最短，过冷奥氏体稳定性最小。若冷速较慢，过冷奥氏体在鼻尖(550°C)以上的温度转变得到珠光体类(片层状)组织，这是退火正火时的组织变化；若冷却速度很快，在冷到 550°C 时奥氏体尚未转变，继续冷到 M_s 温度以下，过冷奥氏体转变为马氏体，还有残余奥氏体，这是淬火时的组织变化。控制冷却速度可以获得所需的组织和性能。

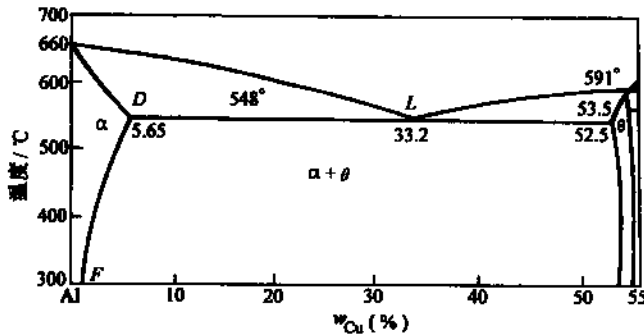


图 1-12 部分铝-铜合金相图

2.2 改善加工性能的热处理

零件的坯料大多通过铸造、锻造和焊接而制成，由于坯料自高温冷却时各部位的冷却速度不尽相同，不仅各部位收缩不一致而形成内应力，而且还常常出现粗大组织、魏氏组织、碳化物局部聚集等组织缺陷，这些缺陷对切削加工和淬火都是不利的，所以在切削加工前要对毛坯进行预先热处理，主要热处理有退火、正火、调质和去除应力退火。这里主要介绍退火和正火，而调质和去除应力退火分别在 2.3 节和 2.5 节中介绍。

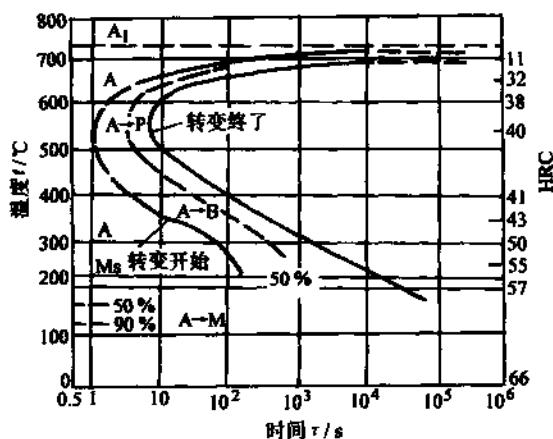


图 1-13 共析钢的过冷奥氏体等温转变曲线

1. 完全退火

退火的种类和方法很多，主要有完全退火、等温退火、球化退火等。完全退火是改善碳钢和低合金钢的组织、降低硬度和改善切削加工性能的最常用的方法，如果只说退火，一般指的就是完全退火。

退火工艺是将钢件加热到临界点(A_3 、 A_1)以上 $20 \sim 30^\circ\text{C}$ 经一定时间保温，然后随炉缓慢冷却。钢加热至 A_3 以上时，组织变为单相奥氏体，在随后冷却至临界点以下时奥氏体转变为片状珠光体，在这一过程中组织经重新形成而得到改善，消除了缺陷组织。这种处理使钢的硬度降低，内应力也得到消除，改善了切削加工性能。完全退火主要用于改善中碳钢、中碳合金钢的切削加工性能。

2. 正火

正火工艺是将钢加热到临界点(A_3 、 A_1 或 A_c)以上 $30 \sim 50^\circ\text{C}$ ，经一定的时间保温后，然后在空气中自然冷却。

与退火相比冷却速度更快，获得的组织更细，因而强度、硬度比退火后的要高；但消除内应力的效果不如退火。由于正火可提高硬度，多用于改善低碳钢、低碳合金钢的切削加工性能。

3. 球化退火

为了提高共析钢，特别是过共析钢的切削加工性能，增加淬火后的韧性和防止淬裂等。要把片状珠光体中的片状渗碳体改变为球状渗碳体，为此目的而进行的退火称做球化退火。

球化退火一般采用随炉加热至略高于临界点(A_1)以上的温度，使珠光体尚未全部转变为奥氏体，仍保留有较多未溶的渗碳体，保温使渗碳体趋于球化，保温后以极其缓慢的速度随炉冷

却至临界点以下，奥氏体转变为铁素体基体上分布着球状渗碳体的组织(粒状珠光体)，粒状珠光体有利于切削加工，故球化退火改善了切削加工性能，粒状珠光体组织均匀可以防止淬火时开裂。球化退火是碳素工具钢、合金工具钢、高速钢和轴承钢等在机加工前必须进行的预处理。球化退火处理时间长，温度控制要求严格，可采用循环加热冷却法、等温球化退火法来缩短处理时间。

退火、正火、球化退火的应用对比如表 1-11 所示。

表 1-11 退火、正火、球化退火应用对比

工艺名称	目的	应用
退火	1) 消除魏氏组织、白口组织，降低硬度，改善切削加工性 2) 使组织细化均匀 3) 消除内应力	1) 中碳钢、中碳合金钢加工前的预先热处理，改善切削加工性 2) 铸铁件、铸钢件和焊接件的预处理
正火	1) 细化组织，提高硬度，改善切削加工性 2) 消除过共析钢中的网状渗碳体 3) 部分消除内应力	1) 低碳钢、低碳合金钢加工前的预先热处理，改善切削加工性 2) 负荷不大的零件的最终热处理
球化退火	获得球状珠光体改善切削加工性能和热处理性能(若钢中有网状渗碳体，球化退火前应进行正火)	1) 碳素工具钢、合金工具钢、轴承钢加工前的预先热处理，改善切削加工性 2) 不淬硬丝杠等的最终热处理

2.3 提高力学性能的热处理

对于力学性能要求较高的零件经过粗加工、半精加工后还需进行热处理以提高其性能。各种钢一般进行淬火、回火处理，部分铝合金、铜合金进行时效强化处理，可以获得所需要的力学性能。

1. 淬火、回火处理

(1) 淬火 淬火是将钢加热到临界温度以上，保温一定的时间使钢获得均匀的奥氏体，然后在水、油等介质中快速冷却，使奥氏体转变为马氏体组织而得到硬化的操作。

马氏体是过饱和固溶体，它的强度、硬度很高，但很脆；奥氏体转变为马氏体时体积要膨胀，产生很大的组织应力，再加上快冷引起的热应力，所以淬火后有很大的内应力，致使淬火时产生变形，甚至开裂，含碳量越高，变形、开裂的倾向越大，由于上述原因，淬火后必须立即回火。

淬火时奥氏体未全部转变为马氏体，尚有少量未转变的残余奥氏体；一般含碳量越高，合金元素量越多的钢，奥氏体转变为马氏体的终了温度越低，淬火后残余奥氏体量越多，使淬火后硬度降低。残余奥氏体也是不稳定的组织，回火时残余奥氏体也发生转变，使残余奥氏体转变为回火马氏体。

淬火后残余奥氏体量多的钢，淬火时组织应力小，因而变形也小，这类钢对某些精密加工零件是很重要的，如精密丝杠采用变形小的钢，减少淬火变形，可以达到较高的精度。

淬火时在油中冷却，冷却速度较慢，热应力相对较小，故变形开裂倾向就小，合金钢的淬透性好，一般采用油淬，所以合金钢淬火后变形小。

(2) 回火 回火是将淬火的零件再加热到低于奥氏体转变的临界温度，经保温一定时间后，冷却到室温。回火后钢的强度、硬度下降，而塑性、韧性提高。回火温度越高，强度、硬度下降得越显著，而塑性、韧性越好。所以经不同的温度回火，可得到不同的组织和性能。回

火的分类和应用如表 1-12 所示。

低温回火得到回火马氏体，硬度高；中温回火得到回火托氏体、高温回火得到回火索氏体，其硬度较低。由于回火托氏体、回火索氏体组织中渗碳体呈颗粒状，与未淬火得到的片层状的托氏体、索氏体组织相比，其力学性能更好。淬火经高温回火后提高了钢的综合力学性能，故又称这种处理为调质处理。

2. 时效强化

(1) 固溶处理 由图 1-12 铝合金相图中可看出， FD 成分的合金加热温度高于 FD 线以上时，合金形成单相固溶体，经保温后迅速水冷，固溶体由于迅速冷却而来不及析出第二相，就会形成过饱和固溶体，这一处理称为固溶处理。固溶处理后硬度较低。

表 1-12 回火的分类和应用

回火名称	回火温度/℃	回火后的组织	回火后的硬度 HRC	回火后的力学性能	应用范围
低温回火	150~250	回火马氏体	58~64	强度高，硬度高，耐磨性好	刀具，量具，冷冲模具，滚动轴承，渗碳或表面淬火零件等
中温回火	350~500	回火托氏体	35~45	弹性极限高，屈强比(σ_s/σ_b)高	各种弹簧，弹簧夹头及某些受多次冲击的零件
高温回火 (调质处理)	500~650	回火索氏体	25~35	强度、塑性、韧性都好，即综合力学性能好	在交变载荷下工作的零件，如连杆、螺栓、齿轮及轴类零件；作为某些精密零件如丝杠、量具、模具以及表面淬火或氮化等零件的预先热处理

(2) 时效强化 固溶处理后过饱和固溶体这种组织是不稳定的，有分解出强化相过渡到稳定态的倾向，因此在室温下放置或低温加热时，强度和硬度明显提高，这种现象称为时效或时效强化，在室温下进行的时效称为自然时效，在加热条件下进行的时效称为人工时效。

时效处理是部分铝合金、铜合金所进行的重要热处理。

2.4 提高耐磨性、耐腐蚀性的表面处理技术

磨损是由于摩擦而造成表面材料被消除的一种现象，致使零件产生逐渐累积的尺寸和形状的变化，这会降低精密加工零件在服役过程中的精度。金属由于受环境的影响在表面生成非金属性的腐蚀生成物，致使表面金属不断消耗，降低了表面质量和精度。提高精密加工件的耐磨性、耐蚀性对其使用寿命是十分重要的。由于磨损、腐蚀是发生在零件的表面，采用表面处理技术来提高耐磨性、耐蚀性是既经济又有效的工艺措施。常用的表面处理技术有表面淬火、化学热处理、涂层、镀层等。

1. 表面淬火

表面淬火是快速加热钢件表面至奥氏体化温度并淬火，仅表面得到硬化，而心部仍保留表面淬火前的状态。这种热处理工艺主要用于中碳钢，表面淬火前材料一般先进行调质处理，表面淬火后表面硬度高，耐磨性好，而心部保持原有的强度和韧性，有抗冲击载荷的能力。与整体淬火相比，表面淬火变形要小。按照加热方法的不同，淬火有高频表面淬火、火焰表面淬火、电接触加热表面淬火和激光表面淬火等。

(1) 高频表面淬火 高频表面淬火是利用高频感应电流的趋肤效应使钢制零件表面迅速加热至淬火温度，随即淬火的方法。表面淬火后要进行低温回火，硬度可达 58~61HRC。高频表

面淬火生产率高,易于自动控制,但设备较贵。在精密加工中得到广泛应用,如齿轮、主轴、床身导轨和滚珠丝杠等。

(2) 火焰表面淬火 火焰表面淬火是用氧乙炔火焰将钢件表面迅速加热至淬火温度,随即淬火的方法。表面淬火后要低温回火,硬度可达 58~61HRC。主要用于大件或修复零件的表面淬火。

(3) 电接触加热表面淬火 电接触加热表面淬火是利用电流通过电极与工件表面的接触电阻来迅速加热工件表面至淬火温度,随着电极的移开,借助工件本身的热传导进行自激冷却,达到表面淬火的目的。主要用于车床、镗床、龙门刨床等导轨的表面淬火。

(4) 激光表面淬火 激光表面淬火是用激光束扫描工件表面,高能量密度的红外线能使工件表面急剧升温至淬火温度,随着激光束移开,通过热传导自激冷却,使表面淬火。由于加热速度很快,加热层较薄,冷却速度也极大,与高频表面淬火相比组织细,硬度高,变形小,但硬化层浅。主要用于汽车发动机的缸套、活塞环、活塞环槽、曲轴的轴颈,金属模具、刀具、滚珠丝杠和小型精密零件。

2. 化学热处理

化学热处理是将钢件置于含有欲渗元素的活性介质中,加热到一定温度后进行保温,使渗入元素被吸附并扩散进入其表层,改变其化学成分,致使工件表面层的组织结构和性能发生变化。这种工艺过程称为化学热处理。根据表面渗入元素的不同,化学热处理可分为渗碳、渗氮、碳氮共渗等。化学热处理能有效地提高钢件表层耐磨性、耐蚀性、抗氧化性以及疲劳强度等。

(1) 渗碳 渗碳是把低碳钢、低碳合金钢钢件在富碳活性介质中(如煤油、甲醇等的热分解产物)加热至奥氏体状态(920~930℃)保温足够的时间,使表层达到所要求的碳含量(质量分数为 0.8%~1.2%)和渗碳层深度(0.25~2.0mm),再经淬火和低温回火处理。这样能使工件在保持其心部原有高韧性的条件下,获得高硬度的和具有残余压应力的表层,从而提高了工件表面的耐磨性和疲劳强度。由于渗碳温度高,直接淬火变形较大,为了减少变形,应根据零件的形状和所用钢材热处理工艺的特点,采用不同的淬火方法。处理后需进行精加工。主要用于齿轮、主轴、滚珠丝杠、活塞销和凸轮轴等。

(2) 渗氮 渗氮是向钢件表面渗氮。渗氮过程是将工件加热到 500~650℃,通入氨气(NH₃分解出 N),保温足够长的时间(20~100h),其表面氮原子浓度大大增加,氮渗入钢后形成各种氮化物。为了获得高硬度的氮化层,钢中需含有能形成稳定氮化物的合金元素,如铝、铬、钼、钒、钛等。进行渗氮工艺的钢一般采用渗氮钢(如 38CrMoAlA 钢)和含铬、钼的模具钢和结构钢。渗氮后不需淬火,表层硬度可达 1000~1200HV,有很高的耐磨性和抗咬合性,有高的疲劳强度和高的耐蚀性。在渗氮前钢件必须进行调质处理,使心部具有高的综合力学性能。由于渗氮温度低,渗氮后又不需淬火,故渗氮后变形较小。又由于渗氮层较薄(约 0.5mm),处理时间长,成本比较高,所以只适用于精度要求高的零件,例如精密机床的丝杠、主轴,镗床的镗杆等。由于渗氮时间长,而且又需要应用专用钢种,因此使其应用受到一定的限制。

(3) 离子渗氮 离子渗氮是将工件放入真空容器内,通入氮气或氩氮混合气体,以工件为阴极,容器壁为阳极,在 133~1330Pa 的气压下利用辉光放电,使离子化的氮扩散渗入钢中形成氮化物,提高了钢的硬度。与渗氮相比,离子渗氮所需的时间短,处理的钢种范围广,但处理后硬度低于渗氮的硬度,设备费用高。主要用于金属模具、切削工具、曲轴和丝杠等。

(4) 气体氮碳共渗 气体氮碳共渗是以渗氮为主的碳、氮共渗过程,渗剂为尿素、甲酰胺

胺、三乙醇胺(加热时分解出氮和碳), 气体氮碳共渗温度为 570℃左右, 时间一般为几小时, 所处理的材料也比较广泛。不同钢种氮碳共渗后的硬度范围为 450~900HV。主要用于曲轴、缸套、活塞环、花键滚刀、铣刀、热锻模和压铸模等。

(5) 碳氮共渗 碳氮共渗是将钢件放在能产生碳、氮活性原子的化学介质中加热至奥氏体状态(800~900℃), 使碳和氮同时渗入钢件表面, 渗后可直接淬火, 淬火后需低温回火。与渗碳相比, 加热温度低, 加热时间短, 淬火变形小, 但渗层较薄。主要用于齿轮, 主轴, 滚珠丝杠等零件。

(6) 渗硫、硫氮共渗、硫氮碳共渗 渗硫是零件在含硫介质中加热, 使钢或铸铁表面形成硫化物渗层, 渗硫层呈致密多孔的鳞片状, 硬度不高, 可在接触面之间滑动, 降低了摩擦因数, 避免两个金属表面的直接接触, 提高了抗粘着磨损的能力。渗硫适用于经过研磨的表面硬化(淬火低温回火、渗碳、高频淬火)的工件。主要用于高速钢刀具、铣刀、搓丝板、冲模、内燃机的凸轮、摇臂、行星齿轮等零件。

硫氮共渗或硫氮碳共渗是将渗硫与渗氮或与氮碳共渗相结合。共渗层的外层主要是渗硫层, 摩擦因数小, 抗粘着性好; 共渗层的内层是硬度高的氮化层或氮碳共渗层。因而这种渗层兼有渗硫层与渗氮层的优点。主要用于高速钢插齿刀和铣刀、不锈钢切断刀、冷冲模、齿轮、丝杠、飞机轮轴的高速钢专用轴承、汽车油泵活塞及缝纫机零件等。

(7) 蒸汽处理、氧化氮化处理 蒸汽处理是将工件在 540~560℃过热蒸汽中加热, 使其表面形成薄的多孔性的氧化膜(Fe_3O_4), 此表面氧化膜能贮油, 并有减摩及润滑作用, 经过这样工艺处理后的高速钢刀具, 在加工时使刃部不易结瘤, 可以提高刀具的使用寿命。这一工艺主要用于高速钢刀具的处理。

氧化氮化处理是将蒸汽处理与渗氮相结合, 兼有氧化层与渗氮层的优点。主要用于高速钢刀具的处理。

几种表面热处理的对比如表 1-13 所示。

表 1-13 几种表面热处理的对比

表面处理工艺类型	适用材料	表面处理硬化层的深度/mm	处理后的表面硬度	处理过程零件变形情况	承受载荷的能力	耐磨性	冲击韧度	成本
渗碳	低碳钢、低碳合金钢	0.5~2mm	58~62HRC	(3)	(1)	(2)	(1)	(2)
渗氮	中碳合金钢 ^①	0.3~0.5mm	1000~1200HV	(1)	(2)	(1)	(2)	(3)
高频淬火	中碳钢	0.5~7mm	58~61HRC	(2)	(3)	(3)	(3)	(1)

注: 表中(1)、(2)、(3)表示优劣的顺序。

① 含有钨钼或钨钼钼的合金钢。

3. 热喷涂涂层

热喷涂是将喷涂材料加热至熔化或半熔化状态, 然后从喷嘴高速射出, 并以高速微粒碰撞在工件表面形成较厚的涂层。常用的喷涂热源有乙炔火焰和等离子弧, 常用的喷涂材料: 金属材料有 Mo、Ni、Al、镍基合金、钴基合金; 陶瓷材料有 Al_2O_3 , Cr_2O_3 , ZrO_2 ; 塑料有聚乙烯、聚脂等粉末。如活塞环喷 Mo 降低了合金铸铁气缸套的磨损, 在机床床身上喷涂聚乙烯、机床导轨面上和溜板及尾架底座导轨面上, 可以提高导轨的耐磨性。

4. 气相沉积

气相沉积是近年兴起的一种表面改性新技术, 气相沉积的方法有物理气相沉积(PVD)法和

化学气相沉积(CVD)法。化学气相沉积与物理气相沉积一样,都是通过气体(以分子或原子状态)沉积成膜的方法,它们的主要区别是气化的方法不同。

(1) 物理气相沉积(PVD)法 物理气相沉积有多种方法,常用的是离子镀膜法,它是在真空条件下,以工件为阴极,被蒸发金属为阳极,利用辉光放电产生的等离子体,使沉积物由固态转变为气态,从而沉积到工件的表面上的表面改性技术,沉积膜结构致密,与基体结合力强;沉积温度较低,可避免零件的软化或变形;能制成金属、合金和无机化合物的膜层,有耐磨膜、耐蚀膜、耐热膜、润滑膜、磁性膜、光学膜以及其他功能性薄膜。能满足现代技术提出的越来越高的要求,因而这种技术得到了迅速的发展,在航空航天、原子能,电子、电器、机械制造和轻工等部门得到了广泛的应用。 TiN 、 TiC 、 $Ti(CN)$ 、 Al_2O_3 镀膜硬度高,耐磨性好,能使工件的寿命延长几倍到几十倍,已广泛用于金属切削工具、成形模具、量具和精密轴承等。气相沉积 Al 、 Cr 、 Ni 和合金的防腐镀层已用于飞机、宇航器上。

(2) 化学气相沉积(CVD)法 化学气相沉积是使沉积材料的挥发性化合物气体发生分解或化学反应,并在工件表面沉积成膜的方法,反应主要包括分解、还原和化合,这一过程需要一定的激发能。常用的有热 CVD、等离子 CVD 等。沉积膜结构致密,与基体结合力强;沉积温度较高,易使工件变形;能制成金属、合金和无机化合物的膜层。主要用于制造半导体器件,切削刀具改性,制取人造金刚石等。硬质合金刀具常用 CVD 法镀制 TiN 、 TiC 镀层,由于 CVD 法一次装炉量大,设备投资低,因而成本较低。由于处理温度较高($900 \sim 1200^\circ C$),超过高速钢的回火温度,故高速钢刀具不适宜采用 CVD 法。

5. 其他

(1) 镀铬 镀铬是用外加电流通过含铬酸的电解液,在零件表面析出金属铬的过程。镀铬有镀硬铬、松孔镀铬和防护装饰性镀铬。

1) 镀硬铬 镀硬铬层的厚度一般为 $2 \sim 50\mu m$,镀硬铬的硬度可达 $750 \sim 1000HV$,镀铬层摩擦因数小,耐腐蚀性好。镀硬铬广泛用于量具、刀具、模具及机器、仪器零件,如千分尺、铣刀、塑料模具、内燃机气缸套等。

2) 松孔镀铬 松孔镀铬是使镀层中形成许多微细裂纹和孔洞,可贮存润滑油,使镀层有很好的润滑性,从而使耐磨性得到较大的改善。松孔镀铬层的厚度一般为 $100 \sim 150\mu m$ 。主要用于内燃机气缸套、活塞环等零件。

3) 防护性镀铬 防护性镀铬的目的是为了防止金属制品在大气中生锈,防护性镀铬的特点是镀层薄,一般为 $0.25 \sim 0.30\mu m$;必须有中间镀层(铜/镍);镀层平滑美观。主要用于汽车、钟表、医疗器械和仪器仪表等。

(2) 磷化处理 磷化处理是以磷酸锰、磷酸锌、磷酸作为处理溶液,在钢或铸铁件的表面上形成磷酸盐多孔性薄膜。这层膜质地柔软,有较好的贮油性,主要用于提高磨合过程中的抗粘着磨损的能力。如减速箱齿轮、内燃机的挺柱、凸轮、活塞环、花键、滚动轴承等。

(3) 发蓝 发蓝是对钢铁件进行氧化处理,氧化后零件表面上生成一薄层氧化膜(主要组成是四氧化三铁),膜层的色泽一般呈蓝黑色或黑褐色。钢铁件进行氧化处理后,虽然能提高耐蚀性,但其防护性仍然较差,所以氧化处理后还要经过肥皂液钝化处理,最后浸油。广泛用于机械零件、精密光学仪器、弹簧和兵器等。

(4) 铝的阳极氧化 铝的阳极氧化是在电解液中,在外界电流作用下利用电解作用使铝及铝合金件(阳极)表面形成氧化薄膜的过程。氧化膜厚度可达 $60 \sim 250\mu m$,硬度可达 $400 \sim 600HV$,有很好的耐磨性,由于阳极氧化膜有较高的化学稳定性,故有较好的耐蚀性。但阳极

氧化膜呈多孔结构并具有强吸附性能，表面易被污染，尤其处在腐蚀环境中，腐蚀介质进入孔内易引起腐蚀。因此经阳极氧化后需进行封闭处理才能提高其耐腐蚀性。广泛用于航空、电子、机械制造和轻工产品等。

2.5 消除应力、稳定组织的热处理

铸件、锻件和热处理件中存在内应力，机械加工件也或多或少地存在内应力，这些残留于工件内部的应力都会引起变形。一般讲，残余应力越低，工件的变形就越小，零件加工精度越高；工件热处理后组织越稳定，服役期间的组织变化越小，工件内的应力变化也越小，服役期的精度也就越能长久保持。必须采用不同的热处理工艺，降低工件的残余应力和稳定组织，以达到精密加工件的精度要求。常用的方法是去除应力退火和冷处理。

1. 去除应力退火

退火、正火处理不仅改善了组织，提高了切削加工性能，而且降低了内应力和减少变形。是最常用的消除内应力的工艺方法，主要用于铸钢件、锻件、棒料加工件的毛坯处理。具体工艺见本章 2.2。为了消除机械加工过程中产生的内应力需进行去除内应力退火，根据退火温度的不同，分为低温退火和低温时效。

(1) 低温退火 低温退火是将工件加热到约 500~650℃，经保温数小时(4~6h)后缓慢冷却的热处理。其目的是降低内应力，减少变形，而不降低其力学性能。由于加热温度在临界点 A_1 以下，故这种消除应力退火称为低温退火。主要用于铸铁件、调质后的加工件和正火后的加工件。工件精度要求越高，低温退火的次数就越多一些。

(2) 低温时效 低温时效是将工件加热至 110~220℃，保温 6~48h，在空气中冷却。主要用于精密零件去除半精加工后的内应力，以确保精密加工零件少变形或不变形。硬度要求高的零件采用低一些温度(低于回火温度)处理，处理温度越低，保温的时间相应的越长。特别精密的零件可以采用两次或两次以上的处理，对精度稳定性更有利。

2. 冷处理

由于合金工具钢、轴承钢等钢淬火冷却后，组织中除了马氏体外，还有较多的残余奥氏体。如 CrWMn 钢(合金工具钢)淬火后约有 15%(体积分数)的残余奥氏体，这不仅降低了淬火钢的硬度和耐磨性，而且在使用过程中残余奥氏体要发生转变，故会引起零件尺寸形状的变化。这对尺寸精度要求高的零件，如量具、精密丝杠等是极为不利的。为了消除残余奥氏体，生产上常采用冷处理。冷处理必须在淬火后立即进行。

冷处理是把淬火冷却到室温的零件，再放入零度以下的某种介质(如 -80℃干冰)中继续冷却使残余奥氏体转变为马氏体。

冷处理后还须进行回火,对于高合金钢为了防止开裂和变形,冷处理和回火可以交替进行。

3 精密加工常用金属材料

精密加工常用金属材料主要有黑色金属(钢和铸铁)、有色金属(铝合金和铜合金)和精密合金(弹性合金、膨胀合金和热双金属)等。下面介绍各类常用金属材料的牌号、成分、性能和应用情况。

3.1 碳素钢和合金钢

含碳量不大于 2.11%(质量分数)的铁碳合金称为钢，钢中除了铁和碳元素外还有少量的

锰(Mn)、硅(Si)、硫(S)、磷(P)、氧(O)、氮(N)、氢(H)等杂质元素,除锰、硅外其他元素对钢的性能都有不利的影响,钢的品质是由这些有害杂质(主要是S、P)含量的多少来确定的。

按化学成分的不同,钢可分为碳素钢和合金钢。合金钢是在碳素钢的基础上,在冶炼过程中按要求特意加入某些合金元素(如Mn、Si、Cr、Ni、W、Mo、V、Ti、B),以提高钢的性能。按用途的不同,钢可分为结构钢(主要有渗碳钢、调质钢、弹簧钢和滚珠轴承钢等)、工具钢(主要有碳素工具钢、低合金工具钢、高速钢、冷模具钢、热模具钢等)和特殊性能钢(不锈钢等)。

钢的编号方法世界各国是不一样的,我国钢的编号特点是钢牌号能反应出碳含量及其主要合金元素的含量。结构钢按成分分为碳素结构钢、优质碳素结构钢、低合金高强度结构钢和合金结构钢,优质碳素结构钢的钢号是以钢的平均含碳量的万分之几十的两位阿拉伯数字表示,如45钢,可知它的碳含量为0.45%(质量分数,下同)。合金结构的钢号由碳含量、合金元素的种类和含量表示,碳含量与优质碳素结构钢相同,主要合金元素以元素符号表示,其含量以百分之几表示,平均含量少于1.5%时不标出,平均含量为1.5%~2.49%、2.49%~3.59%……时,相应地标以2、3……。如40Cr,它的碳含量为0.40%,含有铬在1.5%以下。合金结构钢含硫、磷都较少故都是优质钢,对于高级优质钢(含S、P更少),则在钢号的末尾加“A”字标明,如18Cr2Ni4WA。

滚珠轴承钢是制作轴承的专用钢,用“滚”字的汉语拼音字首“G”来标明,碳含量不标出,铬含量以千分之几的数字表示。如GCr15表示碳含量约1.0%,铬含量约1.5%的滚珠轴承钢。

碳素工具钢的钢号以平均碳含量的千分数表示,并在前冠以碳的汉语拼音字头“T”,如T8是碳含量平均0.8%(千分之8)的碳素工具钢。合金工具钢的编号方法与合金结构钢相似,只是碳含量的表示不同,碳含量 $\geq 1.0\%$ 时,碳含量不标出;碳含量1.0%以下时,用千分之几的数字表示,如9SiCr是碳含量约0.9%,含Si、Cr低于1.5%的合金工具钢。Cr12MoV钢是碳含量 $\geq 1.0\%$,Cr含量12%、Mo、V含量低于1%(质量分数,下同)的合金工具钢。

不锈钢钢号的表示方法与合金工具钢相似,如4Cr13是碳含量约为0.4%,Cr含量约为13%的马氏体不锈钢。1Cr18Ni9是碳含量约为0.1%,Cr含量约为18%,Ni含量约为9%的奥氏体不锈钢。

1. 结构钢

结构钢是精密加工使用最多的材料,主要用于制造各种精密机械、精密仪器的轴、齿轮、弹簧和联接件等重要零部件。对钢的强度、硬度、塑性和冲击韧度都有较高的要求,钢的力学性能主要取决于钢的成分和热处理。与碳钢相比,合金结构钢的淬透性好,因此,当零件性能要求一定时,合金钢可制作大尺寸的零件;当零件要求淬透的深度一定时,采用合金钢就可以用较慢的冷却速度进行淬火,从而得到所需的力学性能,因而对产生不利的残余应力、裂纹和变形的危险性就减少了。零件的尺寸越大、形状越复杂,合金钢的这一优点就越显得重要。所以尺寸大而形状复杂、性能要求高的零件大多选用合金钢。合金钢的耐蚀性和耐磨性也比碳钢好,只是价钱不如碳钢便宜。

结构钢包括渗碳钢、调质钢、弹簧钢和滚珠轴承钢。渗碳钢由于碳含量低,韧性好,适用于承受一定冲击的耐磨件,经渗碳、淬火、低温回火处理后,表面具有高的耐磨性,而心部具有较高的冲击韧度。调质钢碳含量中等,经调质(淬火后经高温回火)处理后有较好综合力学性能,若零件表面要求耐磨,再经表面淬火处理。弹簧钢碳含量较高,经淬火及中温回火处理后具有高的弹性极限、屈服极限和高的屈强比(σ_s/σ_b)。为了提高弹簧的疲劳性能,广泛采用喷

丸强化处理。常用的渗碳钢、调质钢、弹簧钢的牌号、成分、热处理、性能和应用如表 1-15 所示。

轴承钢主要制造滚动轴承的滚动体(滚珠、滚柱、滚针)、内外套圈等,属专用结构钢。由于轴承钢中含有高的碳,故轴承钢具有高的硬度和耐磨性;含有一定的铬不仅提高了淬透性而且碳化物呈细密、均匀状分布,提高了钢的接触疲劳强度和耐磨性,轴承钢一般采用电炉冶炼并采用真空脱气等新冶炼技术,所以 S、P 等含量较低,更有利于提高钢的接触疲劳强度。所以也用于制造精密量具、精密丝杠、冷冲模等耐磨件。常用轴承钢的牌号、成分、热处理、性能和应用如表 1-14 所示。

表 1-14 常用滚珠轴承钢的牌号、成分、热处理和应用(摘编自 YB/T 1—1980)

钢 号	化学成分质量分数(%)				热 处 理			应 用
	C	Mn	Si	Cr	淬火温度 /℃	回火温度 /℃	回火后硬度 HRC	
GCr9	1.0~ 1.10	0.25~ 0.45	0.15~ 0.35	0.9~ 1.20	830	160	61~65	量具、弹簧及耐磨的机械零件
GCr15	0.95~ 1.05	0.25~ 0.45	0.15~ 0.35	1.40~ 1.65	830~845	50~160	61~65	高精度量具、针阀体、磨床导轨、滚珠丝杠、车床主轴
GCr15SiMn	0.95~ 1.05	0.95~ 1.25	0.45~ 0.75	1.40~ 1.65	830	180	62	螺纹量规,轧辊及高耐磨的零件

2. 工具钢

工具钢主要用于制造刀具、量具、模具等工具,故要求材料具有高的硬度和耐磨性,有一定的韧性,热处理变形小,尺寸稳定性好等性能,所以钢中不仅含碳量较高,而且含有较多的合金元素。常用工具钢的牌号、成分、热处理、性能和应用如表 1-16 所示。

3. 不锈钢

不锈钢在大气和一般介质中有很高的耐腐蚀能力,在石油、化工、原子能、宇航和一些尖端科学技术中得到广泛应用。主要用于制作各种容器、管道、阀门和泵,医疗手术器械,防锈刀具和量具等。对不锈钢的要求最主要的是耐蚀性;此外,在制作重要结构零件如滚动轴承、弹簧时,要求有高的强度;对制作工具的不锈钢还要求有高硬度、高耐磨性等。不锈钢是主要含铬、镍的高合金钢,它们的碳含量一般很低,碳含量越低,耐腐蚀性越好,但制作刀具、量具的不锈钢,碳含量应较高,其铬含量也相应地提高。

不锈钢按正火状态的组织可分为马氏体不锈钢和奥氏体不锈钢等。马氏体不锈钢的热处理与结构钢相似,淬火后可进行不同温度的回火以满足不同零件的要求。奥氏体不锈钢的耐蚀性、塑性和韧性均较马氏体不锈钢好,无磁性,但强度、及硬度都较低。常用不锈钢的牌号、成分、热处理、性能和应用如表 1-17 所示。

3.2 铸铁

铸铁是碳含量大于 2.11% 的铁碳合金,并且还含有较多的硅、锰、硫和磷等杂质元素。铸铁中的一部分碳以石墨形式存在,根据石墨的形状铸铁可分为灰铸铁(石墨呈片状)、球墨铸铁(石墨呈球状)、可锻铸铁(石墨呈毛团状)等。

表 1-15 常用结构钢的牌号、成分、热处理、性能和应用

类别	钢号	化学成分质量分数(%)						热处理			力学性能					应用	
		C	Si	Mn	Cr	Ni	其他元素	一次淬火温度 / $^{\circ}\text{C}$	二次淬火温度 / $^{\circ}\text{C}$	回火温度 / $^{\circ}\text{C}$	σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ (%)	ψ (%)	A_k /J		
渗碳钢	15	0.12~0.19	0.17~0.37	0.35~0.65				910				380	230	28	55		小轴、活塞销
	20	0.17~0.24	0.17~0.37	0.35~0.65				900~930				410	250	24	55		小齿轮、小轴、活塞销
	20Cr	0.17~0.24	0.17~0.37	0.50~0.80	0.70~1.00			880	780	200		835	540	10	40	47	齿轮、小轴、活塞销、凸轮
	20MnVB	0.17~0.24	0.17~0.37	1.30~1.60			V0.07~0.12	880		200		785	590	10	40	55	齿轮、活塞销
	20CrV	0.17~0.23	0.17~0.37	0.50~0.80	0.80~1.10		V0.10~0.20	880	800	200		835	590	12	45	55	齿轮、轴、气门挺杆、蜗轮
	20CrMnTi	0.17~0.23	0.17~0.37	0.80~1.10			Ti0.04~0.10	880	870	200		1080	835	10	45	55	中载和重载齿轮、蜗杆、主轴、十字头
	20SiMnVB	0.17~0.24	0.50~0.80	1.30~1.60			V0.07~1.20 B0.0005~0.0035	900		200		1175	980	10	45	55	中载和重载齿轮、主轴、蜗杆、爪形离合器
	18Cr2Ni4WA	0.13~0.19	0.17~0.37	0.30~0.60	1.35~1.65	4.00~4.50		930	850	200		1175	835	10	45	78	大型渗碳齿轮和轴、精压机床进给蜗轮
	40	0.47~0.45	0.17~0.37	0.50~0.80				870	870	650		730	480	25	68		心轴、曲轴、拉杆、齿轮
	45	0.42~0.50	0.17~0.37	0.50~0.80					810	650		770	500	23	59		曲轴、主轴、连杆、齿轮
调质钢	40Cr	0.37~0.44	0.17~0.37	0.50~0.80			850		520		980	785	9	45	47	齿轮、蜗轮、磨床砂轮	
	30CrMnSi	0.27~0.34	0.90~1.20	0.80~1.10	0.80~1.10		880		520		1080	885	10	45	39	主轴、齿轮、曲轴	
	35CrMo	0.32~0.40	0.17~0.37	0.40~0.70	0.80~1.10		850		550		980	835	12	45	63	蜗杆、连杆、主轴、槽轮传动齿轮	

(续)

类别	钢号	化学成分质量分数(%)								热处理			力学性能					应用
		C	Si	Mn	Cr	Ni	其他元素	一次淬火温度/℃	二次淬火温度/℃	回火温度/℃	σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ (%)	ψ (%)	A_k /J			
调质钢	38CrMoAlA	0.35~0.42	0.20~0.40	0.30~0.60	1.35~1.65		Mn0.15~0.25 Al0.70~1.10	940		640	980	835	14	50	71	精密机床、磨床主轴、连杆、丝杠		
		0.37~0.44	0.17~0.37	0.50~0.80	0.60~0.90	1.25~1.65	Mn0.15~0.25	850		600	980	835	12	55	78	重载齿轮轴, 航空发动机曲轴, 汽轮机轴		
弹簧钢	65	0.62~0.70	0.17~0.37	0.50~0.80				840		500	100	800	9	35	1	小弹簧, 轴, 凸轮, 弹簧环		
		0.62~0.70	0.17~0.37	0.90~1.20				830		540	1000	800	8	30	1	气门簧, 弹簧发条, 砂轮主轴		
		0.52~0.60	1.50~2.00	0.60~0.90				870		480	1300	1200	6	30	1	高应力弹簧, 安全阀、止回阀用弹簧		
弹簧钢	60Si2Mn	0.56~0.60	1.50~2.00	0.60~0.90				870		480	1600	1400	5	20	1	高应力弹簧、缓冲簧		
		0.46~0.54	0.17~0.37	0.50~0.80				850		500	1300	1150	10*	40	1	大截面高应力螺旋簧、耐热弹簧		

注: 1. 表中伸长率的数据除带*者为 δ_5 %, 其余皆为 δ_{10} %。

2. 本表摘编自 GB/T 699—1988、GB/T 3077—1988、GB/T 1222—1988。

表 1-16 常用工具钢、模具钢的牌号、成分、热处理及应用(摘编自 GB/T 1298—1986、GB/T 1299—1985、GB/T 9941—1994—1988)

分类	钢号	化学成分质量分数(%)										热处理				应用	
		C	Si	Mn	Cr	W	V	Mo	淬火		回火		硬度 HRC				
									淬火温度/°C	淬火介质	硬度 HRC	回火温度 /°C					
碳素 工具 钢	T8	0.75~ 0.84	≤0.35	≤0.4								780~800	水	62	\	\	编纹塞规、精密卡尺游片、 弹簧夹头
		0.95~ 1.04	≤0.35	≤0.4								760~780	水	62	\	\	精密车床的母丝杠、长导 轨、丝锥、冲模、卡板量具
低合金 工具钢	9SiCr	0.85~ 0.95	1.20~ 1.69	0.30~ 0.60	0.95~ 1.25							860~880	油	≥62	180~200	60~62	拉刀、铰刀、齿轮刀具、弹 簧卡头、螺紋工具、细长零件
		0.85~ 0.95	≤0.35	1.70~ 2.00			0.10~ 0.25					780~810	油	≥62	150~200	60~62	磨床导轨, 较高精度的磨床 主轴, 丝杠, 量规, 铰刀
	CrMnD	1.30~ 1.50	≤0.35	0.45~ 0.75	1.30~ 1.60							840~860	油	≥62	130~140	62~65	各种量块、量规、精密丝 杠、模具, 导向套筒
		0.90~ 1.05	0.15~ 0.35	0.80~ 1.10	0.90~ 1.20	1.20~ 1.60						820~840	油	≥62	140~160	62~65	坐标镗床工作台丝杠、凸轮 车床床身导轨、样板、模具
高速 钢	W18Cr4V	0.70~ 0.80	0.20~ 0.40	0.10~ 0.40	3.80~ 4.40	17.50~ 19.00	1.00~ 1.40					1260~1280	油	≥63	550~570 (三次)	63~66	铣刀、钻头、编纹磨床顶 尖、冷冲模、冷镦模
		1.10~ 1.25	≤0.30	≤0.35	3.80~ 4.40	5.75~ 6.75	2.80~ 3.30	4.75~ 5.75				1220~1224	油	≥63	550~570 (三次)	≥65	拉刀、钻头, 大尺寸的钻头、 冷挤压模、冷冲模、冷镦模
冷作模 具钢	Cr12MoV	1.45~ 1.70	≤0.4	≤0.4	11.00~ 12.50		0.15~ 0.30	0.40~ 0.60				1120	油	41~45	510 (三次)	60~61	拉丝模, 搓螺紋丝板, 冷冲 模, 冷镦模
		0.50~ 0.60	≤0.35	0.50~ 0.80	0.50~ 0.80	Ni 1.40~1.80		0.15~ 0.30				820~860	油	≥47	550~550	HB 364~302	形状复杂、冲击负荷较大的 各种锤锻模
热作 模具 钢	3Cr2W8V	0.30~ 0.40	≤0.35	0.20~ 0.40	2.20~ 2.70	7.50~ 9.00	0.20~ 0.50					1050~1100	油	>50	560~580 (三次)	44~48	铝合金压铸模、铜合金挤压 模、热剪切刀、螺釘热压模

表 1-17 常用不锈钢的牌号、成分、热处理、特性和应用(摘编自 GB/T 1220—1992)

类别	钢 号	化学成分质量分数(%)				热 处 理	特 性	应 用
		C	Cr	Ni	Ti			
马氏体 型	2Cr13	0.16~ 0.25	12~ 14			1000~1050℃油或水淬 700~790℃回火	耐腐蚀性较好, 能承受冲击载荷	仪器中传动件、 标准尺、镜面轴
	4Cr13	0.36~ 0.45	12~ 14			1000~1050℃油或水淬 200~300℃回火	有较高的硬度和 耐磨性	医疗工具, 耐蚀 量规、丝杠、弹簧
	9Cr18	0.90~ 1.00	17~ 19			950~1050℃油或水淬 200~300℃回火	硬度较高, 耐磨 性好	耐蚀量规、丝杠 及耐磨件
奥氏体 型	1Cr18Ni9	≤0.14	17~ 19	8~ 12		1100~1150℃水淬 (固溶处理)	耐腐蚀性好, 冷加 工后有高的强度	表壳, 柄头, 弹 簧
	1Cr18Ni9Ti	≤0.12	17~ 19	8~ 11	5X(C%-0.02) ~0.8	1100~1150℃水淬 (固溶处理)	具有较好的耐晶 间腐蚀性	耐蚀丝杠、弹 簧, 抗磁仪表零件

铸铁的组织是由石墨和基体组成, 基体可以是铁素体、珠光体和铁素体+珠光体。基体组织相当于钢的组织, 因此铸铁的组织, 可以看成是钢基体上分布着石墨、石墨相当于裂纹或孔洞。石墨的形态、大小和多少对铸铁的力学性能有很大的影响。

灰铸铁的石墨呈片状, 对基体起割裂的作用, 所以灰铸铁抗拉强度和塑性较低。由于石墨的存在也使灰铸铁具有一些特殊的性能, 由于石墨使切屑易断, 故灰铸铁有优异的切削加工性能; 石墨有良好的润滑作用, 并能贮存润滑油, 使灰铸铁有良好的耐磨性; 石墨对振动的传递起削弱的作用, 使灰铸铁具有良好的减振性; 铸铁的熔点较低, 在凝固时有石墨的析出, 减少了铸铁体积的收缩, 降低了铸铁中的内应力, 灰铸铁有很好的铸造性能。所以灰铸铁广泛用于制造机床的床身、导轨、发动机缸体和缸盖、支架、箱体、带轮等。

球墨铸铁的石墨呈球状, 大大改善了石墨对基体的割裂作用。所以球墨铸铁的强度较高, 其综合力学性能接近于钢, 可以用来制造主轴、曲轴、齿轮等受力比较复杂的零件。

为了改善灰铸铁的性能, 在铸铁中加入某些合金元素, 得到了一些具有各种特殊性能的合金铸铁, 如耐磨铸铁、耐热铸铁、耐蚀铸铁等。

灰铸铁的编号以阿拉伯数字表示抗拉强度(MPa)的最低值, 数字前冠以“灰”、“铁”汉语拼音的字首“HT”, 如 HT200 是抗拉强度不低于 200MPa 的灰铸铁。球墨铸铁的编号是以两组数字表示, 前一组以抗拉强度(MPa)的最低值表示; 后一组以伸长率(%)最低值表示, 前面冠以“球”、“铁”的汉语拼音的字首。如 QT600-3 是强度不低于 600MPa, 伸长率为 3% 的球墨铸铁。耐磨合金铸铁的牌号, 数字表示最低的抗拉强度值(MPa), 前面冠以“磨”、“铁”汉语拼音的字首, 合金元素以元素符号置于中间。MTP200 是抗拉强度不低于 200MPa 的高磷合金耐磨铸铁。

常用的各种铸铁的牌号、性能及应用如表 1-18 所示。

表 1-18 常用灰铸铁、球墨铸铁的牌号、性能、特性和应用(摘编自 GB/T 9439—1988)

铸 铁 名 称	牌 号	抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 δ (%)	特 性	应 用
灰 铸 铁	HT200	200		耐磨性、铸造性、减振性较好	机床床身, 发动机缸体, 缸盖
	HT250	250		耐磨性、铸造性、减振性较好	气缸套, 齿轮箱, 机床床身
	HT300	300		高强度, 耐磨性、铸造性差	重型机床床身、主轴箱
高磷耐磨铸铁	MTP200	200		耐磨性良好, 铸造应力大	机床床身、溜板、工作台
磷铜钨耐磨铸铁	MTPCuTi200	200		耐磨性、强度好, 铸造应力大	精密机床床身、工作台
球墨铸铁	QT600-3	600	3	较高的强度及一定的冲击韧度	机床主轴、发动机曲轴

3.3 有色金属

1. 铝合金

在铝中加入适量的硅、铜、镁、锰等元素即形成铝合金。铝合金的最大特点是密度小，比强度(强度极限/密度)高；有良好的塑性和耐腐蚀性。铝合金包括铸造铝合金和变形铝合金两大类。

(1) 铸造铝合金 铸造铝合金具有较好的铸造性能，包括铝硅合金、铝铜合金、铝镁合金、铝锌合金等。它们主要用于仪器、仪表的壳体。常用铸造铝合金的牌号、性能及应用如表 1-19 所示。

表 1-19 常用铸造铝合金的牌号、性能及应用(摘编自 GB/T 1173—1995)

名称	牌 号	化学成分质量分数(%)							力学性能				应 用		
		Si	Cu	Mg	Mn	Zn	Ti	Al	铸造方法	热处理	σ_b /MPa	δ_5 (%)		HB	
铝硅合金	ZL101	6.5 ~ 7.5		0.25 ~ 0.45					余	J	T5	205	2	60	形状复杂、中等负荷、要求耐蚀的仪器零件、仪表外壳
	ZL102	10.0 ~ 13.0							余	J	T2	145	3	50	形状复杂、较低负荷、要求耐蚀的仪器、仪表壳体等
	ZL104	8.0 ~ 10.5		0.17 ~ 0.35	0.2 ~ 0.5				余	J	T6	235	2	70	中等负荷、工作温度较高的仪器、仪表壳体等
	ZL109	11.0 ~ 13.0	0.5 ~ 1.5	0.8 ~ 1.3				Ni 0.5~ 1.5	余	J	T6	245	-	100	工作温度较高的零件，如活塞
铝铜合金	ZL201		4.5 ~ 5.3		0.6 ~ 1.0			0.15 ~ 0.35	余	S	T4	295	8	70	高温下承受高负荷、形状简单的零件等
铝镁合金	ZL301			9.5 ~ 11.0					余	S	T4	280	10	60	承受高负荷、形状简单与腐蚀介质接触的零件等
铝锌合金	ZL401	6.0 ~ 8.0		0.1 ~ 0.3		9.0 ~ 13.0			余	J	T1	245	1.5	90	大型、高载、复杂的仪器零件及医疗器械等

注：1. 表中铸造方法符号为：J为金属型铸造 S为砂型铸造。

2. 表中热处理符号为：T1为人工时效，T2为退火，T4为淬火+自然时效，T5为淬火+不完全时效，T6为淬火+人工时效。

(2) 变形铝合金 变形铝合金具有较好的塑性，适于进行冷、热压力加工。变形铝合金包括防锈铝、硬铝、超硬铝、锻铝等，其中硬铝应用最多。常用于制造光学仪器、精密机械中的结构零件如绳轮、带轮、齿轮及导轨等，也可用作自动化仪表中的指针、度盘等。常用变形铝合金的牌号、性能及应用如表 1-20 所示。

2. 铜合金

纯铜具有优良的导电性、导热性，但强度较低。加入合金元素后，可获得较高的强度，铜合金也有较好的导电性、导热性，对大气和水的抗蚀能力也很好，具有优良减摩性和耐磨性。

主要铜合金有黄铜和青铜。铜合金在电气、仪表、造船及机械制造业中获得了比较广泛的应用。

表 1-20 常用变形铝合金的牌号、成分、性能及应用(摘编自 GB/T 3190—1996)

名称	牌 号	化学成分质量分数(%)					Al	力学性能			应 用	
		Cu	Mg	Mn	Zn	其他		热处理及状态	σ_b /MPa	δ_{10} (%)		硬度 HBS
防锈铝合金	5A05	0.10	4.8~5.5	0.3~0.6			其余	M	260	22	65	用于制作承受中等载荷的零件, 自动化仪表中的面板, 铆钉, 防爆接头等
	5A21	0.2	0.05	1.0~1.6			其余	M	130	23	30	用于制作承受轻载的零件, 铆钉等
硬铝合金	2A11	3.8~4.8	0.4~0.8	0.4~0.8			其余	CZ	420	15	100	用于制作中等强度的件, 仪表外壳, 面板及支架等
	2A12	3.8~4.9	1.2~1.8	0.3~0.9			其余	CZ	460	17	105	用于制作承受高强度的零件, 如飞机骨架零件
超硬铝合金	7A04	1.6~2.0	1.8~2.8	0.2~0.6	5.0~7.0	Cr 0.1~0.25	其余	CS	600	12	150	用于制作承受高载荷的零件, 如飞机起落架
	7A06	2.2~2.8	2.5~3.2	0.2~0.5	7.6~8.6	Cr 0.1~0.25	其余	CS	680	7	190	
锻造铝合金	2A50	1.8~2.6	0.4~0.8	0.4~0.8		Si 0.7~1.2	其余	CS	420	13	105	用于制作形状复杂、中等强度的锻件、模锻件
	2A70	1.9~2.5	1.4~1.8	0.2		Ti 0.02~0.10 Ni 0.9~1.5 Fe 0.9~1.5	其余	CS	440	12	120	用于制作高温下工作的复杂零件, 如内燃机活塞

注: 表中材料状态符号为: M—退火; CZ—淬火+自然时效; CS—淬火+人工时效。

(1) 黄铜 黄铜是铜和锌的合金, 具有较好的力学性能和工艺性能。为了进一步提高黄铜的性能, 在铜锌的合金基础上再加入其他元素, 这种铜合金称为特殊黄铜。例如黄铜加铅可改善黄铜的切削加工性能。主要用于弹性元件和钟表零件。常用黄铜的牌号、性能及应用如表 1-21 所示。

表 1-21 常用黄铜的牌号、成分、性能及应用(摘编自 GB/T 5232—1985)

名称	牌 号	化学成分质量分数(%)			状态	力学性能			应 用
		Cu	Pb	Zn		σ_b /MPa	δ (%)	硬度 HB	
普通黄铜	H80	79.0~81.0		其余	软	320	52	53	用于制作仪器仪表中受力不大的弹簧及膜片, 并用于镀层及装饰等
	H68	67.0~70.0		其余	软	320	55		用于制作仪器仪表中的波纹管, 散热器外壳及导管等
	H62	60.5~63.5		其余	软	330	49	56	用于制作仪器仪表中受力不大的弹簧及膜片, 铆钉, 垫圈及螺母等
铅黄铜	HPb63-3	62.0~65.0	2.4~3.0	其余	硬	580	5		用于制作要求高切削性能的钟表结构零件, 如夹板、双圆盘、中心轮及时轮等
	HPb61-1	59.0~61.0	0.6~1.0	其余	硬	650	5		主要用于制作要求高强、高切削性能的结构零件, 如夹板、时轮、过轮、秒轮等
	HPb59-1	57.0~60.0	0.8~1.9	其余	硬	550	5	149	适用于以热冲压和切削加工制作的各种结构零件, 如螺钉、垫圈、衬套等

(2) 锡青铜 锡青铜是铜与锡的合金。具有高的力学性能和耐磨性能,主要用于制造耐磨零件如轴承、衬套、导轨等。常用锡青铜的牌号、性能及应用如表 1-22 所示。

(3) 铝青铜 以铝为主要合金元素的铜合金。铝青铜的特点是化学稳定性高,比锡青铜更耐酸、碱腐蚀,更耐磨。主要用作弹簧及弹性元件和高负荷下的抗磨耐蚀零件,如齿轮、蜗轮等。常用铝青铜的牌号、性能及应用如表 1-22 所示。

(4) 铍青铜 以铍为主要合金元素的铜合金。铍青铜可进行时效强化处理,在淬火状态下塑性好,可进行冷成形加工和切削加工。经人工时效后,具有很高的弹性极限,疲劳极限,优良的耐磨、耐蚀性,良好的导电、电热性,无磁性,受冲击后不产生火花,但价格较贵。主要用于制造精密仪器的重要弹簧和其他弹性元件,特殊要求的耐磨零件等。常用铍青铜的牌号、性能及应用如表 1-22 所示。

表 1-22 常用青铜的牌号、成分、性能及应用(摘编自 GB/T 5233—1985)

名称	牌 号	化学成分质量分数(%)					力学性能				应 用
		Sn	Al	Be	其 他	Cu	热处理 及状态	σ_b / MPa	δ (%)	硬度 HB (HV)	
锡 青 铜	QSn4-3	3.50~ 4.50			Zn 2.7~3.3	其余	软	350	40	60	扁弹簧、圆弹簧,轴承及 抗磁零件
	QSn4-4-2.5	3.00~ 5.00			Zn3.00~5.00 Pb1.50~3.50	其余	软	300~ 350	35~ 45	60	制作在摩擦条件下工作的 轴承、衬套等
	QSn6.5-0.1	6.00~ 7.00			P 0.10~0.25	其余	软	350~ 450	60~ 70	70~ 90	弹簧,精密仪器中的耐磨 件及抗磁件
	QSn4-0.3	3.50~ 4.50			P 0.20~0.40	其余	软	340	52	70	制作压力计弹簧用的各种 尺寸的管材
铝 青 铜	QAl7		6.00~ 8.00			其余	软	420	70	70	制作要求耐蚀的弹性元 件、齿轮及蜗轮等
	QAl9-4		8.00~ 10.00		Fe 2.00~4.00	其余	软	450	20~ 40	80~ 100	制作高负荷抗磨、耐蚀 件,如轴承、齿轮等
	QAl10-3-1.5		8.50~ 10.00		Fe2.00~4.00 Mn1.00~2.00	其余	软	500~ 600	20~ 30	125~ 140	制作高温下工作的耐磨 件,如齿轮、轴承等
铍 青 铜	QBe2			1.80 ~ 2.10	Ni 0.20~0.50	其余	软 固溶时效	450~ 500 1250	40	(90) (375)	精密仪表、仪器中的弹簧 和弹性元件
	QBe1.9			1.85 ~ 2.10	Ni0.20~0.40 Ti0.10~0.25	其余	软 固溶时效	450 1250	40	(90) (380)	精密仪表、仪器中的弹簧 和承受交变载荷的弹性元件
	QBe1.7			1.60 ~ 1.80	Ni0.20~0.40 Ti0.10~0.25	其余	软 固溶时效	440 1150	50	(85) (360)	同上

3. 精密合金

精密合金是指具有特殊物理性能(如恒弹性、定热膨胀性、热双金属等)的合金。

(1) 弹性合金 弹性合金包括高弹性合金和恒弹性合金,高弹性合金具有高的弹性模量和强度,较好的耐蚀性。恒弹性合金的特点是在一定温度范围内,弹性模量变化很小。弹性合金是精密仪器、精密机械制造工业中不可缺少的重要材料,主要用于制造仪器、仪表、精密机械中的弹性元件膜片、膜盒、游丝,它们的质量关系到仪器仪表的精度、稳定性和使用寿命。常用的高弹性合金和恒弹性合金的牌号性能特点及应用如表 1-23 所示。

(2) 膨胀合金 定膨胀合金在一定温度范围内有一定的膨胀系数或低的、与玻璃相近的膨胀系数,主要用于要求尺寸稳定的各种仪器、仪表零件,如精密的线纹尺等。常用的定膨胀合金的牌号、性能、特点及应用如表 1-23 所示。

(3) 热双金属合金 热双金属是由两层或几层具有不同膨胀系数的金属或合金组成的材料。具有大的膨胀系数的组元称为主动层,具有小的膨胀系数的组元称为被动层。主要用于测量环境介质温度变化敏感元件,如蒸汽温度计,保护继电器,热敏继电器等。常用的热双金属合金的牌号、性能、特点及应用如表 1-23 所示。

表 1-23 常用精密合金的牌号、成分、特性和应用(摘编自 GBn 291--1989)

名称	牌号	化学成分质量分数(%)						主要特性	应用
		Ni	Cr	Co	Mo	其他	Fe		
弹性合金	3J21	14.0~ 16.0	19.0~ 21.0	39.0~ 41.0	6.5~ 7.5		其余	无磁,耐腐蚀,高弹性,高强度和良好的疲劳性能	400℃以下工作的各种仪表弹簧及其他弹性元件
	3J22	15.0~ 17.0	18.0~ 20.0	39.0~ 41.0	3.0~ 4.0	W4.0~5.0	其余	无磁,耐腐蚀,高硬度	仪表的轴尖
	3J53	41.5 ~ 43.0	5.2 ~ 5.8			Ti2.3~2.7 Al0.5~0.8	其余	较高的弹性和强度,在(-60~+100)℃范围内具有低的弹性模量温度系数	仪表工业中各种膜片、膜盒、波纹管、弹簧等弹性元件
	3J40		39.0~ 41.0			Al3.3~3.5 Ce0.1~0.2	≤0.50	无磁,抗振,耐磨	仪器、仪表的轴尖
	3J09	9.0~ 10.5	19.0~ 20.5		1.60~ 1.85		其余	无磁,高弹性,高硬度,高强度	钟表、定时器发条及仪表的弹性元件
膨胀合金	4J36	35.0~ 37.0					其余	在20~100℃范围内具有低的线膨胀系数	要求尺寸稳定的各种仪器、仪表零件
	4J58	57.5 ~ 59.5					其余	在20~50℃范围内具有一定的线膨胀系数,有较高的尺寸稳定性	要求尺寸稳定的精密线纹尺等
热双金属	5J137	高膨胀层 Ni20Cr5				低膨胀层 Ni36	其余	具有中热敏感性和较高电阻率	中温测量及自动控制设备中的热敏感元件
	5J1478	高膨胀层 Ni19Cr7				低膨胀层 Ni34	其余	在0℃以下具有较高电阻率	低温测量及自动控制设备中的热敏感元件

4 常用非金属材料

非金属材料按化学组成可分为有机高分子材料(塑料、橡胶、胶粘剂,涂料等)简称高分子材料 and 无机非金属材料(石英、宝石、石材、金刚石及工程陶瓷等)。随着科学技术的发展,传统的金属材料已不能满足各方面的需要,近几十年来非金属材料由于其丰富的资源和优良的力学、物理和化学等方面的特性,得到了惊人的发展,越来越多地应用于航空、航天、汽车、机车、船舶、机械、仪器、仪表、电器、电子等领域,正在改变着以钢铁为中心的时代。其中以工程陶瓷和工程塑料发展最为迅速,但陶瓷由于脆性大、工程塑料由于线膨胀系数大、易蠕变、老化等,因而在应用上受到一定的限制。采用复合技术,把一些不同性能的材料复合起来,取长补短以满足科学技术对材料越来越高的要求,复合材料在强度、刚度、耐蚀性方面比金属材料、工程陶瓷、工程塑料都优越,具有广阔的发展前景,可能成为21世纪的“钢”。石材、金刚石、宝石等材料在精密机械、精密仪器中的应用日益增加,下面对工程陶瓷、工程塑料、复合材料等材料作一简单的介绍。

4.1 工程陶瓷

工程陶瓷主要有氧化铝、氮化硅、碳化硅、部分稳定氧化锆、氮化硼等。陶瓷的性能主要是由它的化学键和晶体结构决定的，如陶瓷具有高硬度、高耐磨性、高耐腐蚀性，脆性大等特性；显微结构包括晶体相的分布、晶粒大小和形状、气孔的大小和分布、杂质、缺陷等对力学性能有较大的影响。通过改进烧结工艺和陶瓷的成分，可以改变陶瓷的显微结构，以改善其性能，主要是提高陶瓷的韧性。

(1) 氧化铝陶瓷 氧化铝陶瓷因其自身烧结性能好，可用常压烧结。氧化铝陶瓷的硬度高(97HRA)、在温度高达1200℃时仍为80HRA，耐磨性好，但脆性大，是最先用来制作刀具的陶瓷。可以对铸铁、淬硬的钢、烧结硬质合金进行粗车、精车加工。成形工艺采用热压烧结，如用等静压烧结工艺，则可提高氧化铝陶瓷的冲击韧度、抗弯强度。在氧化铝陶瓷中添加TiC、TiN、TiB₂或SiC等化合物，可提高陶瓷的冲击韧度、抗弯强度和耐热冲击的能力，扩大了刀具的应用范围。

氧化铝陶瓷具有很好的耐腐蚀性和绝缘性，除用作刀具外，还广泛用于喷砂用的喷嘴，内燃机火花塞，拔丝模，石油化工用泵的密封环等。

(2) 氮化硅陶瓷 氮化硅陶瓷的键合能很高，单纯高温难以烧结，故常用反应烧结和热压烧结。反应烧结制品精度高，可制作精度要求高、形状复杂的零件；热压烧结制品致密，强度、硬度高，韧性好。

Sialon是在Si₃N₄中加入Al₂O₃和Y₂O₃热压烧结而成的以Si₃N₄为基的陶瓷。其强度、硬度、韧性等性能都比氮化硅陶瓷好。

氮化硅陶瓷具有很高的抗弯强度、硬度，摩擦因数小，有自润滑性，可在无润滑剂的条件下工作。不仅自身耐磨性好，对匹配材料的磨损也小，是一种极优良的耐磨材料。耐磨蚀，耐高温及抗振等性能也良好。

氮化硅陶瓷主要用于刀具、泵的密封环、高温轴承、汽车发动机的气门、挺柱等。

燃气轮机采用氮化硅陶瓷制作叶片，可使工作温度由1000℃提高到1370℃，则效率提高30%，降低了油耗，减轻了自重，已用于发电站和无人驾驶飞机上。

(3) 碳化硅陶瓷 碳化硅陶瓷常用反应烧结和热压烧结的成形工艺。与其他陶瓷相比，它的最大特点是高温强度高，导热性能好。主要用于火箭尾喷管的喷嘴，浇注金属的浇口，热电偶套管，燃气轮机叶片，高温下的热交换材料，核燃料的包封材料及磨料等。

(4) 部分稳定氧化锆 纯氧化锆晶体有三种结构即单斜(M)相、四方(T)相和立方(C)相，纯氧化锆自高温冷却时，晶体结构要发生变化，其中T→M转变时有大约5%的体积膨胀，易导致陶瓷开裂，为了避免在高温使用时发生这种相变，在纯氧化锆中加入一定量的MgO、Y₂O₃，适当控制加热和冷却条件，使高温相部分稳定，形成锆部分稳定氧化锆(Partially Stabilized Zirconia)，简称PSZ，韧性好。可用于活塞顶、气门导管等。

(5) 氮化硼 氮化硼晶体是六方晶系，产品有粉状、棒料和各种制成品如高温轴承、玻璃模具、润滑剂、脱模剂等。

六方氮化硼当有催化剂作用时，在高温(1500℃~2000℃)、高压(6~9MPa)条件下，可以转化为立方氮化硼，立方氮化硼的硬度接近金刚石，是很好的磨具材料。

几种陶瓷材料的性能如表1-24所示，几种陶瓷刀具材料的性能如1-25表所示。

表 1-24 几种典型结构陶瓷的性能与钢、铝性能的比较

种类 性能	热压 Si_3N_4	Sialon	反应烧结 SiC	PSZ ^①	Al_2O_3	钢	铝
热导率/ ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)	25	18 ~ 20	20℃ 104 640℃ 39	20	2.73	50.2	155
线膨胀系数 $/10^{-6}\text{K}^{-1}$	2.8	3.0	3.4	10.6	8.0	13	21
密度 $/(\text{Mg}/\text{m}^3)$	3.19	3.2	2.98	5.78	3.3	7.87	2.75
强度 $/\text{MPa}$	840 (3F) ^②	862 (3F) ^②	383 (4F) ^③	610 (4F) ^③	380 (3F) ^②	586 (UTS) ^④	150 (UTS) ^④
弹性模量 $/\text{GPa}$	310	288	332	200	300	206	71
断裂韧性 $/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$	5	7.7	4.9	9.5	5.85	120 ~ 140	22 ~ 52
硬度 HV	1800	2000	1800 (HK) ^⑤	1200 (HK) ^⑤	1600	450 ~ 650	100 ~ 150

① 部分稳定氧化锆陶瓷。

② 3F 为集中载荷的抗弯强度。

③ 4F 为等弯矩载荷的抗弯强度。

④ UTS 为最大抗拉强度。

⑤ HK 为努氏硬度。

表 1-25 部分国产刀具用陶瓷牌号及性能

牌 号	M16(T8)	M4	SM	HS73	FT80	F85	SC3	CBN
主要成分	$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$	$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC-金属}$	Si_3N_4	Si_3N_4	$\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiC-Co}$	$\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiC-其他}$	Sialon	立方氮化硼
制造方法	热压	热压	热压	热压	热压	热压	热压	烧结
密度/ (Mg/m^3)	4.60	5.0	3.26	3.14	3.41	3.41	3.29	3.44 ~ 3.49
硬度 HRA (HRN15)	≥ 97	$\geq (965 \sim 97)$	91 ~ 93	91 ~ 92	93 ~ 94	93.5	94 ~ 95	HV 8000 ~ 9000
抗弯强度 $/\text{MPa}$	700 ~ 850	800 ~ 900	750 ~ 850	600 ~ 800	600 ~ 800	700 ~ 800	750 ~ 820	300
断裂韧性/ (冲击韧性/ KJ/m^2)	4.830	6.616	(4)	4.7 ~ 6.609 (4)	7.21 (4.42 ~ 5.5)	6 ~ 7 (5 ~ 7)		

4.2 工程塑料

塑料是一类高分子合成材料，它是以合成树脂(未加工的高分子化合物)为主要原料，含有一些添加剂(如填料、增塑剂、润滑剂、稳定剂、固化剂、着色剂等)在一定温度、压力下塑制成形的。塑料具有许多优异的性能，如质量轻、耐磨、耐蚀，但耐热性较差。通过共聚反应或交联反应来改变高分子化合物的化学结构以提高塑料所需的性能。如 ABS 塑料就是丙烯腈(A)、丁

二烯(B)和苯乙烯(S)共聚得到的三元共聚物,它综合三种单体的特性从而使这种塑料具有很好的耐冲击、耐热等综合性能。改变添加剂也能显著地改善塑料的性能。工程塑料是指力学性能良好并能作工程结构材料使用的塑料。这类塑料主要有聚酰胺、聚碳酸酯、聚四氟乙烯等。常用的几种工程塑料的性能如表 1-26 所示。

表 1-26 几种常用工程塑料的性能

品 种	聚苯 乙烯 (PS)	聚酰胺 尼龙 6 (PA)	聚碳 酸酯 (PC)	氯 化 聚 乙 烯	丙烯腈 丁二烯 苯乙烯 共聚物 (ABS)	高 压 聚 乙 烯 (PE)	聚 四 氟 乙 烯 (PTFE)	聚 甲 醛 (POM)	有 机 玻 璃 (PMMA)
密 度 /($Mg \cdot m^{-3}$)	1.04 ~ 1.05	1.13 ~ 1.16	1.18 ~ 1.20	1.40	1.05	0.91 ~ 0.92	2.10 ~ 2.30	1.40 ~ 1.42	1.18
抗拉强度 /MPa	>60	70 ~ 80	56 ~ 70	41 ~ 46	39	7.5 ~ 16	≥ 22	56 ~ 60	
弯曲强度 /MPa	≥ 70	70 ~ 100	80 ~ 110	70 ~ 76	68			125	75 ~ 130
冲击韧度 /(kJ/m^2)	≥ 1.20		20	4.66 ~ 5.78	13		1.6	3.23 ~ 3.53	1 ~ 6
弹性模量 /GPa	2.80 ~ 3.51	1.05 ~ 2.60	2.25	0.42	0.70 ~ 2.82	0.18 ~ 0.39	0.4	2.81	
硬 度	65 ~ 80 HRM	103 ~ 118 HRR	15.5HB	100HRR	90 ~ 118 HRR	41 ~ 46 HRR	50 ~ 65 HRD	85 ~ 110 HRR	低
膨胀系数 $\times 10^{-5}/^{\circ}C$	6 ~ 8	8 ~ 12	7	8	6 ~ 13		10	8.5	大
最高工作 温度/ $^{\circ}C$	160	275	250		180	200	550	40 ~ 100	60 ~ 100
吸水率 24h, %	0.05	1.6 ~ 1.88	0.06 ~ 0.10	0.01	0.20	<0.01	0.005	0.2	
耐日光	微变色	微变色	微变色、 脆化	微变色	不变色、 微黄	退色	良		
耐弱酸 碱性	耐	耐	不太好	耐	耐	耐	极好	耐	易溶于有 机溶剂中
应 用	电 绝 缘, 壳 体类 零件, 光学 塑料	可代替 青铜 制件, 如齿 轮、轴 承、滑 块、衬 套等	可代替 不锈 钢、青 铜制 件, 可 做蜗 轮蜗 杆、 泵轮	可做密 封件, 精密 机械 零件	可作传 动件及 一般 结构 件	用作密 封和包 装件	耐化学 腐蚀和 耐高温 的活塞 环、轴 承。密 封等	汽车传 动轴、 轴承、 齿轮、 丝杠、 螺母及 耐蚀 件等	透镜、 光学 元件、 飞机、 汽车、 仪表 护罩、 玻璃 窗等

4.3 复合材料

复合材料是由两种或两种以上不同化学性能或不同组织结构的材料,通过不同的工艺方法组成的多相材料,主要包括两相:基体相和增强相。复合材料不仅保持原组分的部分特性,而

且还具有原组分所未有的特性,可以根据需求进行设计,从而得到具有最合理使用性能的材料。常用的基体相材料有树脂(聚脂树脂、环氧树脂、酚醛树脂、尼龙)、金属(铝合金、高温合金)、陶瓷(氮化硅)等,增强相材料有纤维(玻璃纤维、碳纤维、碳化硅晶须)、粒子(碳化硅颗粒)等。由于纤维材料价格较高,复合工艺方法中多为手工操作(手工缠绕),生产率低,价格昂贵。目前只有纤维增强树脂的复合材料应用比较广泛。表 1-27 列举出几种典型复合材料的性能。

表 1-27 几种典型复合材料的性能

	碳纤维($V_f=58\%$)/ 环氧树脂复合材料	玻璃纤维($V_f=50\%$)/ 聚酯复合材料	SiC 晶须($V_f=16\%$)/ 2014 铝合金复合材料	2014 铝合金	高强 度钢
密度 /(Mg/m^3)	1.5	2.0	2.9	2.8	7.8
弹性模量 /GPa	189	48	105	68.8	207
屈服强度 /MPa	1050	1240	424	289	1000
断裂韧度 /($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)	32~45	42~46			100
应用	宇宙飞行器的雷达天线的构 架,航天飞机巨大操控机械手 臂、机翼大梁、太阳能电池基 板,汽车外壳、车灯,齿轮、 轴承,磨床用的磨头、齿轮刀 具等	可代替有色金属制作轴承、 轴承架、齿轮等精密零件,直 升飞机螺旋桨,船舶的壳体, 火箭发动机壳体、火箭发射 管,撑杆跳高的撑杆,假肢等	发动机活塞顶、活 塞环槽等		

注: V_f 为纤维体积分数。

4.4 其他材料

(1) 石材 石材由于硬度高,耐磨损,不易变形等特点,石材在精密机械及精密仪器中的应用日益受到重视,主要用于天文、地震、航空工业用测量仪器的平台、平尺、角尺、V 形块、平行规、测量仪座;超精密机床的导轨;三坐标测量仪的底座、立柱、轴、轴承等。

石材不仅可进行锯、钻、铣、刨及车加工,也可进行磨削和抛光。由于石材硬度高而且脆,加工是比较困难的,对于形状复杂的零件如机床床身可由岩石块和树脂压制成形,以减少加工。

常用的石材多为辉长岩、辉绿岩、闪长岩、玄武岩和黑色花岗岩等,它们的性能特点是硬度高、耐磨性能好、稳定性好、耐酸和碱、膨胀系数和热导率小及无磁性等。具体性能如下:

弹性模量/GPa

62

硬度

肖氏硬度

60~90HS

莫氏硬度

6~7

密度(kg/m^3)	
辉长岩,辉绿岩,闪长岩	2800~3000
玄武岩	2900~3300
花岗岩	2500~2800
抗拉强度/MPa	
辉长岩、辉绿岩、闪长岩	100~280
玄武岩	100~300
花岗岩	120~300
膨胀系数/ $(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	5.6~7.34
吸水率(%)	<1

(2) 金刚石 金刚石是碳的许多同素异构体中的一种,它是自然界已发现的最硬的一种材料,莫氏硬度为10。金刚石脆性大,加工困难,主要用作磨具及磨料,只有少数金刚石作成刀具。

天然金刚石刀具的刀刃极为锋利,刀具耐用度极高,刃磨一次可使用几百小时。加工表面粗糙度可达 $R_a 0.1 \sim 0.012 \mu\text{m}$,可获得 1T6(孔)或 1T5(轴)的尺寸精度, $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 的几何形状精度,主要用于珠宝业、钟表工业和仪器仪表制造业。此外,还用于制造硬度计压头、拉伸 $5 \mu\text{m} \sim 3 \text{mm}$ 金属丝的拉丝模、玻璃光栅及半导体薄片划线用的刻刀等。由于天然金刚石(尤其大颗粒单晶)来源少,价格昂贵,因此,很多加工已用人造金刚石代替。

人造聚晶金刚石刀具具有整体人造聚晶金刚石刀片和聚晶金刚石复合刀片。整体人造聚晶金刚石刀片是以石墨为原料,加入催化剂,在高温($\approx 2000^{\circ}\text{C}$)、高压($5 \sim 9 \text{GPa}$)下烧结而成。聚晶金刚石复合刀片是以硬质合金为基底,面层为金刚石微粉在高温、高压下烧结而成的复合烧结体。与天然金刚石刀具相比具有较高的强度和韧性,可采用较高的切削用量,但其硬度低,故刀刃耐磨性较天然金刚石刀具低,刀刃锋利性也较天然金刚石刀具差,加工表面粗糙度也不及天然金刚石刀具,因而镜面加工和超精密加工仍用天然金刚石刀具。人造金刚石的价格虽比天然金刚石低一些,但比硬质合金仍要贵 35~75 倍。

(3) 宝石材料 宝石材料包括蓝宝石、红宝石、玛瑙、石英等。

蓝宝石、红宝石的成分是 100% 的 Al_2O_3 ,蓝宝石因含铁、钛色素离子而呈蓝色、红宝石因含铬色素离子而呈红色,其硬度仅次于金刚石莫氏硬度为 9,耐磨性好;耐酸(磷酸除外)、碱腐蚀;材料致密,抛光能达到的表面粗糙度比金属抛光能达到的要低很多;热膨胀系数小,对温度变化不敏感;其高温下的机械性能非常好。由于人造蓝宝石、红宝石的物理性能与天然宝石相同,近年来人造宝石的质量和产量日益提高,成本也越来越低,宝石材料在精密仪器、仪表及钟表行业的应用更加普遍。主要用在精密仪器、仪表中要求回转精度高、摩擦力矩小、结构尺寸比较小的支承。

玛瑙是以玉髓为主的岩石,属低中档玉石,硬度较高,莫氏硬度为 6.5~7,耐磨性好,化学成分稳定,耐酸(氢氟酸除外)腐蚀。玛瑙是精密仪器、仪表中宝石支承的重要材料。

石英是 SiO_2 晶体,莫氏硬度为 7,弹性模量(E)为 94GPa,弹性模量 E 的温度系数小,弹性迟滞小,热膨胀系数小,有压电性,可做精密测量的弹性元件和控频率的石英谐振器。

第2章 金刚石刀具超精密车削

金刚石刀具超精密车削是为适应计算机用磁盘、各种精密光学反射镜等精密零件加工而发展起来的一种精密车削加工方法，其特点见表2-1。

表2-1 金刚石刀具超精密车削的特点

刀具	加工要求		加工精度
	机床部件	环境	
1) 刀刃极锋利 2) 刃口强度高 3) 切削阻力极小 4) 复映性良好	1) 高精度的基础部件 2) 高精度的定位检测元件 3) 高分辨力的微进给机构	1) 恒温、恒湿 2) 减振、隔振 3) 防止工件污染	1) 平面度精度达 $0.1\mu\text{m}$ 以下 2) 表面粗糙度达 $R_a 0.02 \sim 0.01\mu\text{m}$

1 金刚石刀具超精密车削机理

1.1 切削厚度与材料切应力的关系

金刚石刀具超精密车削属微量切削，其机理和普通切削有较大差别。普通加工的精度在 $10\mu\text{m}$ 级，其加工深度一般远大于材料的晶格尺寸，切削加工是以数十计的晶粒团为加工单位，在切应力的作用下从基体上去除。而精密切削时要达到 $0.1\mu\text{m}$ 的加工精度和 $R_a 0.01\mu\text{m}$ 的表面粗糙度，刀具必须具有切除亚微米级以下金属层厚度的能力。由于切深一般小于材料晶格尺寸，切削是将金属晶体一部分一部分地去除，因此，普通加工去除材料时起主要作用的晶格间位错缺陷，在精密切削中不起作用。精密切削在切除多余材料时，刀具切削要克服的是晶体内部非常大的原子结合力，于是刀具上的切应力就急剧增大，刀刃必须能够承受这个比普通加工大得多的切应力。

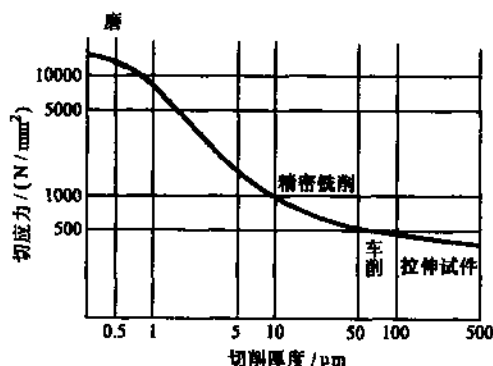


图 2-1 切应力与切削厚度的关系

图 2-1 所示为被加工材料为易切削钢时切应力与切削厚度的关系图。材料的切变模量 $G = 8.2 \times 10^4 \text{MPa}$ ，切应变 $\gamma \approx 3$ ，理论切应力 $\tau_{th} = G/2\pi \approx 1.3 \times 10^4 \text{MPa}$ 。

从图中可以看出，切削厚度与切应力成反比，切削厚度越小，切应力越大。当进行切深为

0.1mm 的普通车削时,其切应力只有 500MPa,与理论切应力相差二十几倍;当进行切深为 $0.8\mu\text{m}$ 的精密切削时,切应力约为 10000MPa,接近理论切应力。因此精密切削时,刀具的尖端将会产生很大的应力和很大的热量,尖端温度极高,处于高应力高温的工作状态,这对于一般刀具材料是无法承受的。因为普通材料的刀具,其刀刃的刃口不可能刃磨得非常锐利,平刃性也不可能足够好,这样在高应力和高温下会快速磨损和软化,不能得到真正的镜面切削表面。而金刚石刀具却有很好的高温强度和高温硬度,能保持很好的切削性能,而不被软化和磨损。

另外,刀具能否从工件表面切下如此薄的金属层,还取决于刀具刃口的锋利程度。刀具的锋利程度,一般用刀具刃口刃磨得到的钝圆半径 r_n 的大小来表示,刃磨出的 r_n 越小,刀具越锋利。图 2-2 所示为刃口钝圆半径 r_n 与切深 a_p 的关系。进行微量切削,刃口钝圆半径越小,切屑变形越小,车削才能顺利进行。单晶体天然金刚石由于质地细密,经过研磨从理论上可得到 $0.002\mu\text{m}$ 的刃口钝圆半径 $r_{n\text{min}}$,我国一般可达到 $r_{n\text{min}} = 0.3 \sim 0.08\mu\text{m}$ 。

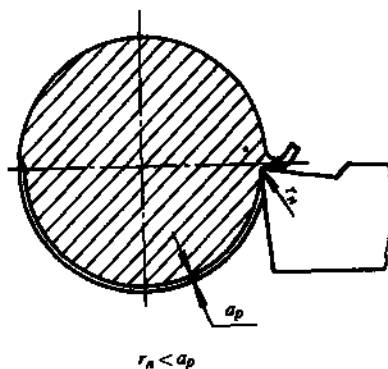


图 2-2 刀具刃口半径 r_n 与切削深度 a_p 的关系

1.2 材料缺陷及其对超精密车削的影响

金刚石刀具超精密车削是一种原子、分子级加工单位的去除(分离)加工方法,要从工件上去除材料,需要相当大的能量,这种能量可用临界加工能量密度 δ (J/cm^3) 和单位体积切削能量 ω (J/cm^3) 来表示。临界加工能量密度就是当应力超过材料弹性极限时,在切削相应的空间内,由于材料缺陷而产生破坏时的加工能量密度;单位体积切削能量则是指在产生该加工单位切屑时,消耗在单位体积上的加工能量。从工件上去除的一块材料的大小(切削应力所作用的区域)就是加工单位,加工单位的大小和材料缺陷分布的尺寸大小不同时,被加工材料的破坏方式就不同。

材料微观缺陷分布或材质不均匀性,可以分为以下几种情况:

- 1) 晶格原子、分子 它的破坏就是把原子、分子一个一个地去除;
- 2) 点缺陷 点缺陷就是在晶体中存在空位和填隙原子。点缺陷的破坏是以原子缺陷(包括空位和填隙原子)为起点来增加晶格缺陷的破坏。晶体中存在的杂质原子也是一种点缺陷。
- 3) 位错缺陷和微裂纹 位错缺陷就是晶格位移,它在晶体中呈连续的线状分布,故又称线缺陷,即有一列或若干列原子发生了有规律的错排现象。这种破坏方式是通过位错线的滑移或微裂纹引起晶体内的滑移变形。
- 4) 晶界、空隙和裂纹 它们的破坏是以缺陷面为基础的晶粒间破坏。

这几种缺陷分布见图 2-3。

当应力作用的区域仅仅限制在上述各种缺陷空间的狭窄范围内,则会以加工应力作用区域相应的破坏方式破坏;如果加工应力作用的范围更广,则会以更容易破坏的方式破坏。如在由微细的晶粒(数微米到数百微米)所组成的金属材料中,在晶粒内部,一般在大约 $1\mu\text{m}$ 的间隔内就有一个位错缺陷,即 10^8 个/ cm^2 。当加工应力作用在比位错缺陷平均分布间隔 $1\mu\text{m}$ 还要狭窄的区域时,在此狭窄区域内是不会发生由于位错线移动而产生材料滑移变形,因此,实际的剪切强度接近于理论值。当加工应力作用在比位错缺陷平均分布间隔还要宽的范围时,位错

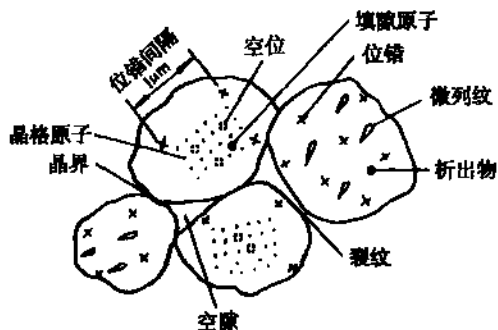


图 2-3 材料微观缺陷分布

线就会在位错缺陷的基础上发生滑移，同时在比剪切应力理论值低得多的加工应力作用下，晶体产生滑移变形或塑性变形。当加工应力作用在比晶粒大小更宽的范围时，多数情况易发生由晶界缺陷所引起的破坏。实际上，在比位错缺陷平均分布间隔还要小的范围内，还存在着空位、填隙原子等缺陷，会演变成位错并发生局部塑性滑移，因此实际剪切强度比理论值低，实际的临界加工能量密度和单位体积切削能量比理论值也要低得多。

表 2-2 列出了常用的几种去除(分离)加工在材料微观结构的各种缺陷情况下的临界加工能量密度。从表中可知，加工单位不同会引起临界加工能量密度的变化。应该指出，随着材料加工单位尺寸的不同，其加工机理也会变化，例如，对于玻璃等脆性破坏去除加工，由于微裂纹(一般微裂纹分布间隔约 $10\mu\text{m}$ 左右)所引起的应力集中而导致材料产生分离和断裂，其临界加工能量密度很低，几乎不存在发热现象。如果加工应力的作用在比微裂纹的分布间隔更狭窄的区域(如 $1\mu\text{m}$ 左右)，玻璃将会发生粘性流动式的滑移，从而产生发热现象，并需要极大的临界加工能量密度。

表 2-2 临界加工能量密度 δ (J/cm^3)

加工单位/cm	10^{-8}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}
材料微观缺陷	晶格原子	点缺陷	位错缺陷	微裂纹	晶界、空隙、裂纹
加工机理					
化学分解、电解	$10^5 \sim 10^6$	$10^4 \sim 10^5$			
脆性破坏					$10^3 \sim 10^2$
塑性变形(微量切削、抛光)			$10^4 \sim 10^5$		$10^2 \sim 10$
熔化去除	$10^5 \sim 10^6$	$10^4 \sim 10^5$			
蒸发去除	$10^6 \sim 10^8$	$10^4 \sim 10^5$			
晶格原子去除(离子溅射、电子蚀刻)	$10^6 \sim 10^8$	$10^4 \sim 10^5$			

1.3 加工表面的形成与质量

1.3.1 金刚石刀具超精密车削表面的形成

用金刚石刀具超精密车削形成表面的主要影响因素有几何特性、塑性变形和机械加工振动等。

几何特性主要是指刀具的形状、几何角度、刀刃的表面粗糙度和进给量等。它主要影响与切削运动方向相垂直的横向表面粗糙度，图 2-4a 表示了切削时，主偏角 κ_r 、副偏角 κ'_r 和进

给量 f 对残留面积高度的影响。图中 a_p 为切削深度, R_y 为表面粗糙度的轮廓最大高度, 由几何关系可知:

$$R_y = f / (\operatorname{ctg} \kappa_r + \operatorname{ctg} \kappa'_r)$$

图 2-4b 表示了切削时, 刀尖圆弧半径 r_e 和进给量 f 对残留面积高度的影响, 其几何关系如下:

$$R_y \approx f^2 / 8r_e$$

塑性变形不仅影响横向表面粗糙度, 而且影响与切削运动方向相平行的纵向表面粗糙度。加工中的振动对纵向表面粗糙度有影响, 因此, 超精密切削中, 振动是不允许的。

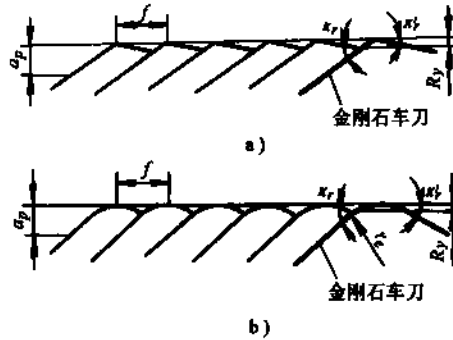


图 2-4 金刚石刀具切削表面的形成

a) 主偏角 κ_r 、副偏角 κ'_r 和进给量 f 的影响

b) 刀尖圆弧半径 r_e 和进给量 f 的影响

1.3.2 金刚石刀具超精密车削的切屑形成

金刚石刀具超精密车削所能切除金属层的厚度标志其加工水平, 当前, 最小切削深度可达 $0.1\mu\text{m}$ 以下, 其主要影响因素是刀具的锋利程度, 一般以刀具的切削刃钝圆半径 r_n 来表示。超精密车削所用的金刚石车刀, 其切削刃钝圆半径一般小于 $0.5\mu\text{m}$, 而切削时的切削深度 a_p 和进给量 f 都很小, 因此, 在一定的切削刃钝圆半径下, 如果切削深度太小, 则不能形成切屑。切屑能否形成主要取决于切削刃钝圆圆弧处每个质点的受力情况, 在自由切削条件下, 切削刃钝圆圆弧上某一质点 A 的受力情况见图 2-5。该点有切向分力 F_t 和法向分力 F_y , 合力为 $F_{y,z}$ 。切向分力使质点向前移动, 形成切屑; 法向分力使质点压向被加工表面, 形成挤压而无切屑。所以, 切屑的形成取决于 F_t 和 F_y 的比值, 当 $F_t > F_y$ 时, 有切削过程, 形成切屑; 当 $F_t < F_y$ 时, 有挤压过程, 无切屑形成。由此, 可找出 $F_t = F_y$ 的分界质点 M , M 点以上的金属可切离为切屑, M 点以下的金属则被压入工件而不能切离。这样便可求得在一定的切削刃钝圆半径下的最小切削深度 $a_{p\min}$, 即

$$a_{p\min} = r_n - h = r_n (1 - \cos \psi)$$

$$\psi = 45^\circ - \varphi = 45^\circ - \arctan \frac{F_f}{F_n}$$

式中 φ ——金刚石车刀切削时的摩擦角;

F_f ——金刚石车刀切削时的摩擦力;

F_n ——金刚石车刀切削时的正压力。

可见切削刃钝圆半径 r_n 是决定切屑形成的关键参数。

金刚石刀具超精密车削时，刀具切削刃钝圆半径小，切薄能力强，形成流动切屑，因此切削作用是主要的。但由于实际切削刃钝圆半径不可能为零，以及修光刃等的作用，因此还伴随着挤压作用。所以金刚石刀具超精密车削表面是由微切削和微挤压而形成，并以微切削为主。

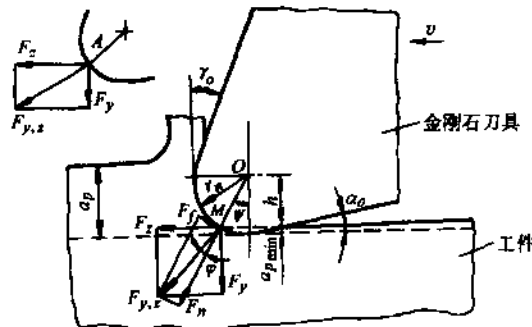


图 2-5 金刚石车刀切削刃钝圆圆弧受力分析

1.3.3 表面破坏层及应力状态

金刚石刀具超精密车削时，虽然切削深度和进给量都很小，在切削软金属时也会在工件被加工表面上留下较深的破坏层和较高的应力，可参照图 2-6a 所示的 Hill 球壳膨胀理论的图解来分析。对于铜、铝等软金属，其弹性模量 E 与维氏硬度 HV 的比值较大， c/r_n 比值较大，即塑性变形区较大；而玻璃、酚醛树脂、氧化铝、硅和碳化钛等硬脆材料，都具有较低的 E/HV 和 c/r_n 值，见图 2-6b。图中还表示了 E/HV 与 E/σ 的关系。

Hill 公式为

$$(c/r_n)^3 = E/3(1-\nu)\sigma$$

$$HV = \frac{2}{3}\sigma [1 + 3\ln(c/r_n)]$$

式中 r_n ——切削刃钝圆半径；
 c ——塑性变形区深度或半径；
 E ——被加工材料的弹性模量；
 HV ——被加工材料的维氏硬度；
 σ ——被加工材料的屈服应力；
 ν ——被加工材料的泊松比。

金刚石刀具超精密车削时，工件表层产生塑性变形，内层产生弹性变形。切削后，内层弹性恢复，受到表层阻碍，从而使表层产生残余压应力。另一方面，由于微挤压作用，也使得工件表层有残余压应力。

应该指出，有关金刚石刀具超精密车削的机理，尚有一些问题不够清楚，有待于进一步研究。

2 金刚石刀具的设计和刃磨

2.1 超精密车削对刀具的要求

超精密车削属微量切削，其终加工的切削厚度常为所要求的加工精度。超精密车削刀具应具备的主要条件见表 2-3。

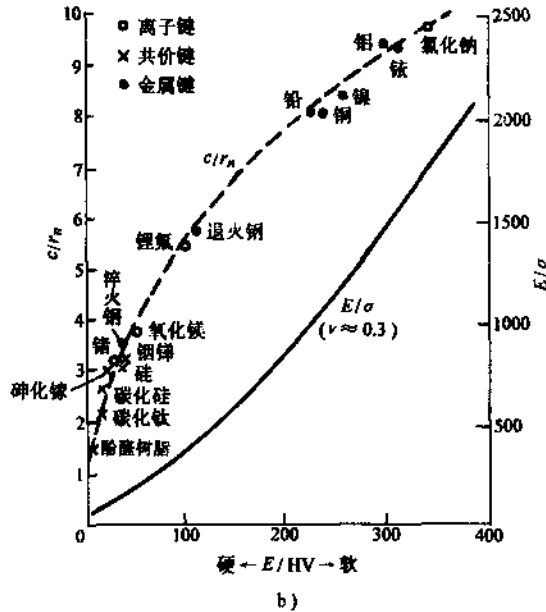
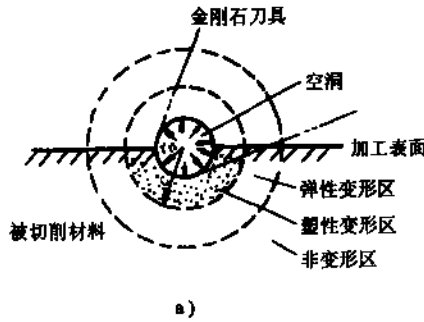


图 2-6 Hill 球壳膨胀理论

a) Hill 球壳膨胀理论图解

b) 材料物理、力学性能对 E/σ 和 c/r_n 的影响

表 2-3 超精密车削刀具应具备的主要条件

分类	主要要求
刀具切削部分的几何形状	1) 刃口能磨得极其锋利, 刃口钝圆半径 r_n 值极小, 能实现超薄切削厚度 2) 具有不产生走刀痕迹、强度高、切削阻力非常小的刀具切削部分几何形状 3) 刀刃无缺陷, 切削时刃形将复印在加工表面上, 能得到超光滑的镜面
物理及化学性能	1) 和工件材料的抗粘结性好, 化学亲和力小, 摩擦因数低, 能得到极好的加工表面完整性 2) 极高的硬度、耐磨性和弹性模量, 以保证刀具具有很长的寿命和很高的尺寸耐用度

目前, 超精密车削中都使用单晶体金刚石刀具, 特别是天然单晶体金刚石刀具。这主要是由于天然单晶体金刚石有一系列优异的性能, 能满足超精密车削加工对刀具材料的要求。

2.2 金刚石的性能

超精密车削刀具用的金刚石为大颗粒(0.5~1.5 克拉(1 克拉=200mg))、无杂质、无缺陷、浅色透明的优质单晶体金刚石。金刚石是已知材料中硬度最高的,金刚石和其他材料硬度的对比见表 2-4,金刚石的其他物理力学性能见表 2-5。

表 2-4 不同材料的硬度

材 料	金刚石	CBN	SiC	TiC	WC	Al ₂ O ₃	高碳马氏体
硬度 HV	6000~10000 随晶体方向而异	6000~8500	3500	3200	2400	2200	1000

表 2-5 金刚石的物理性能

物 理 性 能	数 值
硬 度	60000~100000MPa 随晶体方向和温度而定
抗弯强度	210~490MPa
抗压强度	1500~2500Mpa
弹性模量	$(9 \sim 10.5) \times 10^{12}$ MPa
热 导 率	8.4~16.7J/cm ² ·s·°C
质量热容	0.516 J/(g·°C)(常温)
开始氧化温度	900~1000°K
开始石墨化温度	1800°K(在惰性气体中)
和铝合金、黄铜间摩擦因数	0.05~0.07(在常温下)

从表 2-5 中可看出,金刚石具有极高的硬度,强度和耐磨性,导热性能好,与有色金属间的摩擦因数低、亲和力小,开始氧化的温度高。并且单晶体金刚石刀具可刃磨得极其锋利,其刃口钝圆半径可磨到 $r_n = 0.005\mu\text{m}$,在放大 400 倍显微镜下观察,且切削刃没有缺口、崩刃等现象,而且刀刃的直线度可达 $0.1 \sim 0.01\mu\text{m}$,没有其他任何材料可以磨到如此锋利程度且能长期切削而磨损极小,因此单晶体金刚石成为当前最理想的超精密车削加工的刀具材料,因而分析研究金刚石的性能,设计并刃磨出质量好的金刚石刀具是十分必要的。

2.3 金刚石的结构

天然单晶体金刚石一般为八面体和十二面体,有时也会是六面体或其他晶形。人造单晶体金刚石常为六面体、八面体和十二面体。优质金刚石晶形都比较规整。金刚石晶体具有各向异性和解理现象,不同晶向物理性能相差很大。

按晶体学原理,金刚石晶体属六方晶系,单晶硅和金刚石有相同的晶体结构。

2.3.1 金刚石晶体的最小单元

金刚石是碳的结晶体(见图 2-7),它的结构最小单元是由五个碳原子构成的一个正四面体,它的中心有一个原子,同其他四个锥角顶端的原子保持着等距离(0.154nm)。

正四面体的每个角顶的原子又为相邻四个四面体所共有。这样,由许多结构最小单元构成了单位晶胞(如图 2-8 所示)。单位晶胞内共有 18 个原子,它们分布在正方形单位晶胞的顶角

及各个面中心。此外，还有四个碳原子在晶胞的内部。单位晶胞的棱边长为 0.356nm ，单位晶胞有秩序地排列成为晶体。金刚石是由碳原子构成的单晶体。

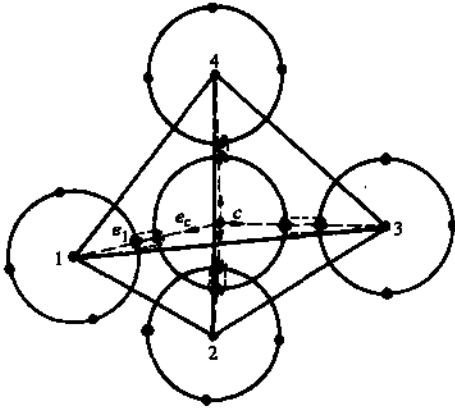


图 2-7 金刚石结构最小单元及其碳原子间共价键的结合示意图

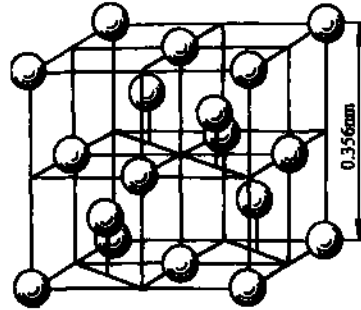


图 2-8 金刚石的单位晶胞图

金刚石碳原子之间相互结合之力是共价键类型的。电子围绕着每个原子核排列在各层轨道上。每个轨道包含一定数量的电子。六个电子围绕着碳原子核，两个在内层，四个在外层，称为价电子，外层要包含八个电子才能稳定，因此只要有会，碳原子就会吸引四个以上的电子来稳定它的结构。

相邻原子之间的共价键结合的特点是存在着公共电子对，这就是说 e_0 及 e_{01} 电子对(图 2-7)不再属于某一个原子，而是分别属于 c 和 l 。它们只要接近到足够距离，就属于两个原子公有。公共电子对同时受到原子核吸引，而它们又吸引两个原子核，这使金刚石结构中的碳原子相互结合在一起。

但是，金刚石碳原子的共价键结合有它的特点，每个碳原子可以提供四个未配对电子和四个轨道形成四个共价键，由于电子的性质具有波动性，可以迭加在一起，所以碳原子和周围原子成键时所用的轨道不是原来的纯粹的 s 或 p 轨道，而是 s 或 p 轨道经过组合得到的杂化轨道。由于 s 轨道 ψ 在全部空间是正值， p 轨道一半为正，一半为负，两者相加的结果，使一半变大，另一半变小。这样一来，得到的杂化轨道的角度分布图，某些方向上数值比 p 轨道还大得多，它和周围原子轨道的重迭增加，在重迭区中电子出现几率大，因此杂化轨道比原来的 s 或 p 轨道的成键能力增强，键结合力要强得多。

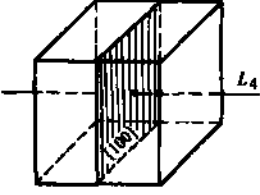
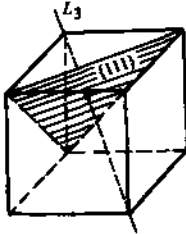
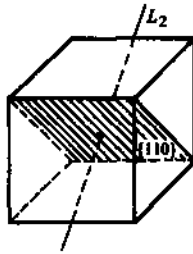
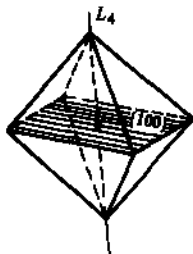
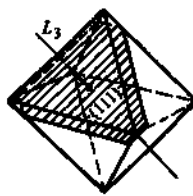
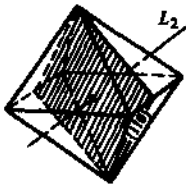

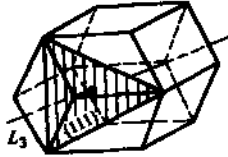
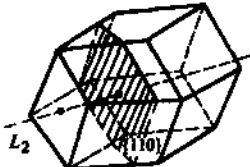
根据量子力学理论，一个 s 轨道和三个 p 轨道杂化形成四个 sp^3 杂化轨道，这四个 sp^3 等性杂化轨道的角度分布最大值分别指向正四面体四个顶点。每两个键之间的夹角为 $109^\circ 28'$ ，这种共价键具有严格的方向性，因此金刚石具有晶体各向异性的特点，晶体的不同方向性能相差甚大。

2.3.2 金刚石晶体的晶轴和晶面

按晶体学原理，六方晶系的金刚石晶体有三个主要晶面： (100) 、 (111) 、 (110) 。当用 X 光对这些晶面垂直照射时，形成的衍射图形上的黑点显示出 4 次、3 次、2 次对称现象，故和上述晶面垂直的轴称为 4 次对称轴(和 (100) 晶面垂直)，3 次对称轴(和 (111) 晶面垂直)，2 次对称轴(和 (110) 晶面垂直)。

规整的单晶金刚石晶体有六面体、八面体和十二面体。它们均有三根四次对称轴，四根三次对称轴，六根二次对称轴。各种晶体形式的晶轴和晶面见表 2-6。

表 2-6 金刚石晶体的晶轴和晶面

晶轴和晶面 晶体	四次对称轴位置 和(100)晶面	三次对称轴位置 和(111)晶面	二次对称轴位置 和(110)晶面
六 面 体 由六个(100)晶 面围成外表面	 (100)面的法线方向是四次 对称轴	 两对对角的连线是三次对称 轴；和三次对称轴垂直的是 (111)晶面	 每两相对棱的中点连线是 二次对称轴；和二次对称轴 垂直的是(110)晶面
八 面 体 由八个(111)面 围成的外表面	 两个对应四个面相交点的连 线是四次对称轴，和四次对称 轴垂直的各面为(100)晶面	 (111)面的法线方向是三次 对称轴	 每两相对棱的中点连线是 二次对称轴，和二次对称轴 垂直的是(110)晶面
十二 面 体 由十二个(110) 晶面围成外表面	 两个对应四个面交点的连线 是四次对称轴，和四次对称轴 垂直的是(100)晶面	 两个对应三个面交点的连线 是三次对称轴，和三次对称轴 垂直的是(111)晶面	 (110)晶面的法线方向是二 次对称轴

2.4 金刚石晶体的面网



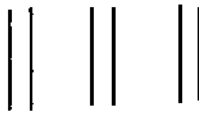
面网就是金刚石结构内部分布有原子的面。

金刚石是六方晶系，主要面网有(100)、(111)和(110)。

2.4.1 金刚石晶体的面网距

面网间的距离称为面网距。面网上原子排列形式和原子密度不同，面间距不同都将直接影响其性能，造成金刚石晶体各向异性。金刚石晶体的面网距见表 2-7。

表 2-7 金刚石晶体的面网距

面网名称	面网距图示 ^①	面网距 ^②	特 点
(110)		$\frac{\sqrt{2}}{4} D = 0.126\text{nm}$	面网分布均匀，面网距始终一样
(100)		$\frac{D}{4} = 0.089\text{nm}$	
(111)		宽面网距 = $\frac{\sqrt{3}}{4} D = 0.154\text{nm}$ 窄面网距 = $\frac{\sqrt{3}}{12} D = 0.051\text{nm}$ 实际面网距 ^③ $\approx 0.154\text{nm}$	面网分布不均匀，面网距出现一宽一窄的交替

① 图中面网垂直于图面；

② 式中 D 为金刚石结构中单位晶胞的棱边长；

③ 由于(111)面的窄面网距很小，实际中把相近的两个面网看成一个加厚的面网。两个加厚面网的面间距，就是(111)面的实际面网距，近似取为宽面网距。

由表 2-7 可知，金刚石晶体各晶面的面网距的关系为：

(111)面网距 > (110)面网距 > (100)面网距

2.4.2 金刚石晶体的解理现象

解理就是晶体受到定向的机械力的作用时，可以沿平行于一个或几个平整的面劈开的性能。

为了说明金刚石晶体的解理现象，图 2-9 画出了金刚石晶体中碳原子在(111)面分布的情况。图中面网与图面垂直，并用直线表示，原子间的直线表示共价键的结合力方向。在图中可以看出一大一小交替出现的面网间距。由于(111)面网的宽面间距比(110)和(100)面网的面间距都大，而且在面间距大的面网之间，只需击破一个键就可使其劈开。因此，金刚石晶体内部的解理劈开在绝大多数情况下，是与(111)面网平行并发生在相距较远的两个相邻面网之间。解理劈开时，可以得到很平的劈开面。

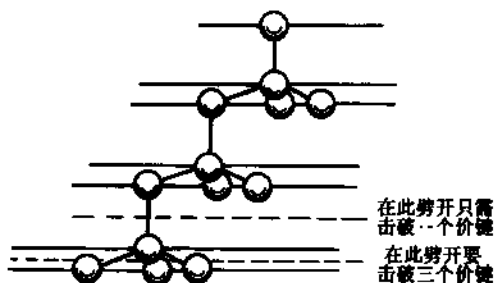


图 2-9 金刚石晶体(111)面网的碳原子分布示意和解理劈开面

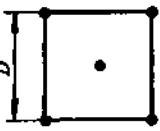
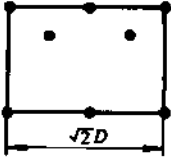
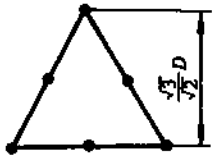
解理现象是金刚石晶体非常重要的特性。金刚石晶体可以沿解理面平整地劈成两半，而且

金刚石的破碎和磨损都和解理现象有关。

2.4.3 金刚石晶体的面网密度

面网的单位表面上的原子数叫面网密度。金刚石晶体各晶面的面网密度见表 2-8。

表 2-8 金刚石晶体的面网密度

面网	最小单元	最小单元面积	最小单元包含的原子数		面网密度
			计算过程	说明	
(100)		D^2	$4 \times 1/4 + 1 = 2$	正方形四个角上的每个原子是四个相邻正方形所共有，每个原子在这正方形单元中只能算 1/4	$\frac{2}{D^2}$
(110)		$\sqrt{2}D^2$	$4 \times 1/4 + 2 \times 1/2 + 2 = 4$	矩形四个角上的原子是相邻四个矩形所共有，在此矩形中只能算 1/4；矩形两条长边中间的每个原子是两个相邻矩形所共有，在此矩形中只能算 1/2	$\frac{4}{\sqrt{2}D^2}$
(111)		$\frac{\sqrt{3}}{2}D^2$	$3 \times 1/6 + 3 \times 1/2 = 2$	三角形三个角上的每个原子是六个三角形所共有，在此三角形中只能算 1/6；三角形三个边中间的每个原子是相邻两个三角形所共有，在此三角形中只能算 1/2	$\frac{4}{\sqrt{3}D^2}$

由表 2-8 可知，金刚石晶体各晶面的面网密度之比为：

$$(111)\text{密度}:(110)\text{密度}:(100)\text{密度} = 1.154:1.414:1$$

但在实际的金刚石晶体结构中，(111)面网的面间距出现一宽一窄的交替，窄的面间距很小，以致实际中可把这相邻的两个面网看成一个加厚的面网，加厚的面网密度是原来的 2 倍。因此金刚石晶体的三个面网密度应为：

$$(111)\text{密度}:(110)\text{密度}:(100)\text{密度} = 2.308:1.414:1$$

2.5 金刚石晶体各晶向的性能

2.5.1 金刚石晶体各晶面的硬度和耐磨性

金刚石晶体不同晶面的硬度和耐磨性明显不同，(111)硬度和耐磨性最高，(100)面次之，(110)面最低。这可以从以下两方面解释。

(1) 面网密度和面网距的不同造成性能差异 由表 2-7 和表 2-8 可知，金刚石各晶面的面网密度和面网距关系分别为

$$(111)\text{面网密度} > (110)\text{面网密度} > (100)\text{面网密度}$$

$$(111)\text{面网距} > (110)\text{面网距} > (100)\text{面网距}$$

金刚石晶体各晶面的硬度和耐磨性，一方面受其面网密度的影响，面网密度越大，硬度和耐磨性就越高；另一方面，受相邻晶面的影响，即面网距的影响。(100)晶面的面网距比(110)晶面小，因此，相邻晶面对硬度和耐磨性的影响要大。综合面网密度和面网距两方面的影响，

可以得到如下结果：

(111)硬度和耐磨性 > (100)硬度和耐磨性 > (110)硬度和耐磨性

(2) 面网中原子结合共价键密度不同造成性能差异 金刚石进行硬度试验和研磨加工时，要击破其原子间的结合共价键。单位面积中共价键多(共价键密度大)，它的抗外物压入的能力就强，硬度和耐磨性就高。因此，可根据各晶面中共价键的密度大小来评价它的相对硬度和耐磨性。金刚石各晶面的共价键密度见表 2-9。

表 2-9 金刚石各晶面的共价键密度

晶面类别	面网密度	面网最小单元的原子结合共价键数	面网的共价键密度	共价键密度比值
(111)	$\frac{4}{\sqrt{3}D^2}$	3	$\frac{12}{\sqrt{3}D^2}$	3
(100)	$\frac{2}{D^2}$	2	$\frac{4}{D^2}$	1.732
(110)	$\frac{4}{\sqrt{2}D^2}$	1	$\frac{4}{\sqrt{2}D^2}$	1.225

由表 2-9 可知，金刚石(111)面的原子结合共价键密度最大，(100)面次之，(110)面最小。因此，(111)面的硬度和耐磨性最高，(100)面次之，(110)面最低，这在实际金刚石晶体的各晶面的性能是一致的。

2.5.2 金刚石晶体各晶面的相对磨削率和研磨方向

金刚石晶体各晶面的耐磨性不同，并且同一晶面不同方向的耐磨性也有很大差别。金刚石的耐磨性可用它的相对磨削率来表示。磨削率是指单位载荷和单位线速度下的磨削体积。在对金刚石进行研磨加工时，各晶面均有所谓“好磨”和“难磨”方向，其磨削率相差很大。金刚石硬度高，研磨加工难度大。因此，研磨金刚石时必须知道各晶面的相对磨削率和各晶面的好磨和难磨方向。此问题通过以下实验得到解决。

将金刚石固定在一个特殊的夹具上，并始终在某个固定晶面上进行研磨，在研磨过程中，逐次改变与晶面的相对位置，使研磨在晶面的不同方向上进行，记录偏转不同角度时的磨削率。图 2-10 为实验结果，图中 A、B、C 分别表示了(100)、(110)和(111)晶面上进行研磨得到的实验结果。从图可看到：

1) (100)晶面的磨削率具有四个峰值，即有四个好磨方向，各相差 90°。最大磨削率为 $0.58 \times 10^5 \left(\mu\text{m}^3 / \left(\text{N} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \right)$ 。

2) (110)晶面的磨削率具有二个峰值，即有两个好磨方向，各相差 180°。最大磨削率为 $1.28 \times 10^5 \left(\mu\text{m}^3 / \left(\text{N} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \right)$ 。

3) (111)晶面的磨削率具有三个峰值，即有三个好磨方向，各相差 120°。其最大磨削率为 $0.1 \times 10^5 \left(\mu\text{m}^3 / \left(\text{N} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \right)$ 。

由此可见，在好磨方向上(110)晶面的磨削率最高，最容易磨。(100)晶面的磨削率次之，(111)面磨削率最低。都是好磨方向时，三个晶面的磨削率之比为：

(110)面磨削率:(100)面磨削率:(111)面磨削率 = 12.8:5.8:1

这三个晶面的难磨方向的磨削率都极低，研磨很难。

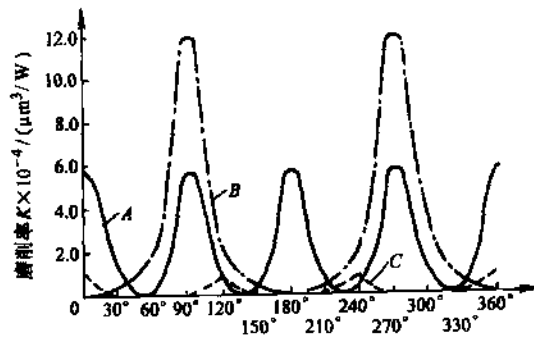


图 2-10 研磨方向与磨削率的关系

A—(100)晶面 B—(110)晶面 C—(111)晶面

从上述实验结果可以得到(100)、(111)、(110)晶面的好磨和难磨方向,如图 2-11 所示。图中实线表示好磨方向,虚线表示难磨方向。

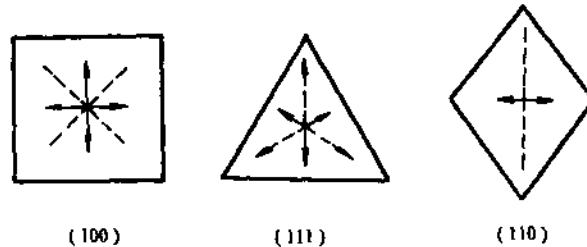


图 2-11 金刚石各晶面的好磨和难磨方向

2.6 金刚石原料的选取

金刚石原料的选取参见表 2-10。

表 2-10 金刚石原料的选取原则

序号	选取原则	说明
1	选取大颗粒单晶天然金刚石(工业用一级),应具有完整的形状,表面应光滑、透明,没有骤然的凸起或凹坑	一块优质无缺陷的金刚石应具有高的透明度,发出均匀的光泽。天然单晶金刚石以茶色、黄色和无色的较多,当金刚石晶体有缺陷或晶体内混有杂质都会引起颜色的变化
2	金刚石刀具的原料一般为 0.7~1.5 克拉(1 克拉 = 200mg)	金刚石的价格非常昂贵,研磨加工又非常困难,故应选择合适的金刚石
3	将金刚石在 10 倍放大镜下观察,不允许看到裂纹、气泡、杂质及其他缺陷	金刚石的缺陷主要有:杂质的包裹体、金刚石包裹体、裂纹、孪生晶体、不完整或畸形晶体等。有缺陷的金刚石研磨加工极为困难,且无法磨出合乎要求锋利的刀刃

值得注意的是,选择金刚石原料应该注意节约,目前我国工厂用来做刀具的大多数是浑圆形的菱形十二面体,如选长形的则更为经济。最重要的是保证刀刃部位的质量,在刀尾部位有点杂质也是允许的。

2.7 金刚石晶体的定向

1. 定向的意义和原则

金刚石晶体是各向异性的，因此，可以利用这个特性对金刚石晶体进行定向。用于刀具的金刚石晶体的定向原则就是正确地确定刀面及刀刃的位置，使切削刀具承受切削力的方向在某一确定的基本晶面上，并与该晶面硬度最大的方向一致，以使刀具磨损最大的方向具有最高的耐磨性。但是，在定向时必须注意：刀具的受力方向不能与金刚石的解理面平行，同时还应该考虑每个面在研磨时的磨向。

2. 定向的方法

(1) 人工目测定向 首先确定晶轴的位置。由于晶轴与晶面是相互垂直的，所以当知道了某根晶轴的位置，也就知道了与之对应的晶面的位置。

由表 2-6 可知：除了六面体有六个(100)面围成外表面，八面体有八个(111)面围成的外表面，菱形十二面体有十二个(110)面围成的外表面之外，在六面体、八面体及十二面体中均有三根四次对称轴、四根三次对称轴、六根二次轴。又因为二次对称轴同三次对称轴之间的夹角为 $35^{\circ}15'52''$ ；三次对称轴同四次对称轴之间的夹角为 $54^{\circ}44'8''$ ；四次对称轴同二次对称轴之间的夹角为 45° 。所以这些对称轴及晶面在空间的方位就可以知道(图 2-12~图 2-14)。在定向时，刀刃的位置可按设计要求确定，然后在刃磨时以某一晶面定位夹紧，再根据标准极图分别转动不同角度，就能找到所需的各个晶面的位置。

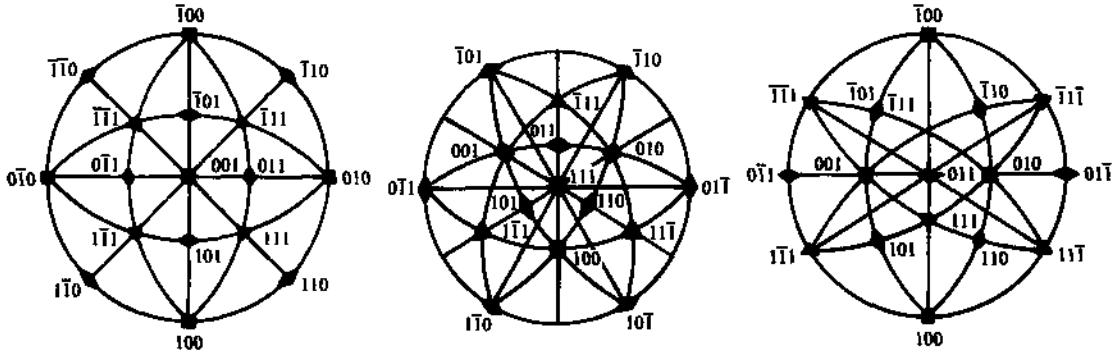


图 2-12 立方晶系(001)标准极图 图 2-13 立方晶系(111)标准极图 图 2-14 立方晶系(011)标准极图

熟悉了理想形状中各晶面的位置关系，就为认识金刚石各晶面的位置奠定了基础。固然，通常所见到的金刚石形状不同于理想形状，但总是能够分析出它是属于哪一种形状，也总能够找到一个最近似于理想形状的晶面来。对于菱形十二面体金刚石，将最近似理想形状的(110)晶面水平放置，并且把它的长短对角线按照图 2-14 的位置(图中心处(011)菱形的长短对角线位置)放置，然后再根据图 2-14，分别转动不同角度，就能找到所需要的各个晶面。

对规整的金刚石晶体，人工目测定向方法比较方便和实用。

(2) X 射线定向 金刚石晶体目测定向法虽然简单易行，但定向精度低，使用有局限性。当定向精度要求较高时，可采用 X 射线晶体定向。无论是天然形状或已加工过的金刚石，都能很快地确定晶面位置。

X 光是一种电磁短波发射，也是直线传播，它们几乎能被所有物质散射。然而，X 光是看不见的，但能在照相底片上形成一个图形。X 射线影像增强机是一种光的转换器，它能够把看

不见的 X 光转换成可见光，并且能够在各种不同的光亮度的水准上观察到各种不同现象。

假定某一定波长的 X 光束穿透晶体，它们会使晶体内的原子中的电子开始振动，然后这种振动了的电子在各个方向发出了同样波长的光，这就是散射。这种散射的光几乎在每个方向彼此要发生干涉而受到破坏，只在很少几个方向遗留下来，并进一步增强，这些光就形成了所谓被衍射的光束。它们被照相底片吸收，其痕迹会遗留在照相底片上，冲洗底片后就能看见这些痕迹。

勃拉葛提出了简单的反射公式是

$$\lambda = 2d \sin \theta$$

式中 θ ——光束及原子晶面之间的入射角；

d ——两个连续的原子晶面之间的空间距离；

λ ——X 光的波长。

假定入射角 θ 及一定的空间距离 d ，仅仅是一定波长的 X 光才会被反射，而普通光不管什么波长值都可以反射。满足了反射公式的条件，原子晶面的作用好像镜子，X 光束从这面镜子反射。在一个晶体内，有无数个原子晶面，然而只有那些原子密度很高的晶面反射 X 光才具有一定的亮度，只有这样的亮度的衍射图形才能被观察到。这些密度很高的晶面就是(111)、(110)、(100)。

假若 X 光束各自沿 4 次、3 次、2 次对称轴方向入射，则衍射图形上的黑点能显示出 4 次、3 次、2 次对称现象，这就是说衍射图形呈现出 4 次、3 次、2 次对称现象，这就说明已找到金刚石晶体上的 4 次、3 次、2 次对称轴的方位。垂直 4 次对称轴的是(100)、垂直 3 次对称轴的是(111)、垂直 2 次对称轴的是(110)。因此，(100)、(111)、(110)三个晶面的方位也确定。这就是 X 光定向确定晶面的原理。X 光定向的步骤参见表 2-11。

表 2-11 X 光定向步骤

序号	步 骤	说 明
1	将金刚石安装在测角器上，从 X 光管中发射出来的 X 光束，经过平行光管穿过金刚石晶体	开始时被反射的 X 光束不形成任何对称性的有规律的衍射图形
2	调整测角器上的螺钉，使 4 次、3 次、2 次对称轴同 X 光束入射方向相符	
3	观察影像增强机中屏幕上所看到的衍射图形，以检验定向是否正确	在屏幕上看到 4 次、3 次、2 次对称的图形才算完成定向

图 2-15 表示 X 光束入射方向与金刚石八面体的 4 次对称轴重合，其衍射出来的图形呈 4 次对称。

图 2-16 是 X 光射线影像增强机的示意图，来自连续射线源，经平行光管的 X 射线束，与安装在测角器中的金刚石 C 相遇后射向荧光屏 F_1 ， F_1 安装在抽真空的玻璃管 G 内，它把 X 光射线转换成一般的荧光图象。然而这种图形的光亮度很小，难以看到，因此要增强。在荧光屏 F_1 上产生的光点能使与荧光屏密接的光敏阴极 P 放出电子，其数量的大小是同荧光屏上的亮度及 X 光的密度成比例的。电子从光敏阴极发射出来之后，被加在光敏阴极 P 及开放阳极 A (开放阳极位于管子的另一端)之间的高压所加速，并且聚焦在第二荧光屏 F_2 上，由于电子的加速和它们又是集聚在比 F_1 小得多的 F_2 面积上，使原来的荧光影像的光亮度至少增强 1000 倍。用一个双目显微镜放大，最后的影像仍为它原来的大小。然后将定向后的金刚石转移到研

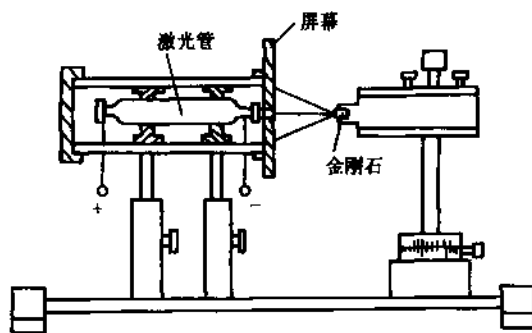


图 2-17 金刚石晶体的激光定向原理

激光反射形成的衍射光像，与金刚石表面的晶纹和微观凹坑具有对应关系。由于金刚石单晶各个晶面的结构不同，晶纹和微观凹坑的形状取决于各晶面面网的结构，即金刚石晶体的各晶面有其固定的晶纹和微观凹坑形状，因此各晶面反射激光而形成的衍射光像形状也是固定的。通过对各晶面的激光衍射光像，以及各晶面的表面晶纹和微观凹坑的观察，可分析和研究得到激光照射各晶面所形成的衍射光像图形和晶面的形貌的具体对应关系。

晶体的激光定向形成的光像，是由于激光衍射形成的，并非简单的反射作用。改变激光通孔的直径，将改变激光照射的面积，这只会改变光像的亮度，而不会改变光像的形状。

买来的单晶金刚石原料，一般表面都有晶纹和微观凹坑，可以直接用激光进行晶体定向，较精确的测定晶面的空间方位。对已磨过的金刚石需要定向时，表面要进行腐蚀，露出晶纹和微观凹坑，再进行晶体定向。用激光进行晶体定向时，只有在晶面面网和激光束垂直时，才有清晰的光象；不垂直时，光象模糊或看不到，因此晶面的定向可以达到较高精度。

用激光对金刚石晶体进行定向的方法有如下优点：

- 1) 设备价格便宜，约为 X 射线晶体定向仪价格的十分之一；
- 2) 操作方便，所用氦氛激光管功率为 0.5W，对人体没有任何副作用；
- 3) 直观，不仅可确定晶面在晶体中的空间方位，而且可以知道该晶面的好磨方向；
- 4) 激光定向法的定向精度可以满足生产需要，虽然略低于 X 射线晶体定向法，但更适宜于生产使用。

2.8 金刚石刀具的设计

1. 金刚石刀具的设计原则

- 1) 保证刀具质量，使其能加工出高质量的光滑表面($R_a = 0.01 \sim 0.02\mu\text{m}$)。
- 2) 提高刀具寿命，长时间切削能保持刀具锋利(一般要求切削长度数十万米)，且仍可切出极高质量的加工表面。
- 3) 对金刚石原料要求合理，利用率高。
- 4) 工艺性好，便于研磨。

2. 金刚石刀具切削部分的几何形状和参数

(1) 刀刃的形状 金刚石刀具一般不采用主切削刃和副切削刃相交为一点的尖锐刀尖，这样的刀尖不仅容易崩刃和磨损，而且在加工表面上留下加工痕迹，使表面粗糙度增加。金刚石刀具的主切削刃和副切削刃之间采用过渡刃对加工表面起修光作用，可以把刀刃设计成圆弧形

或带直线修光刃的折线形(见图 2-18), 以减少切削残留面积对粗糙度的影响。

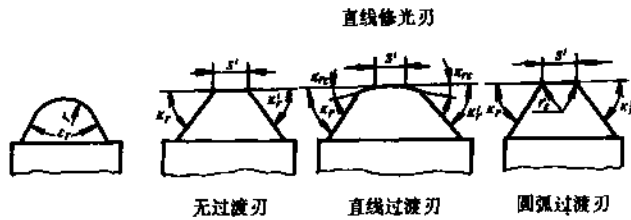


图 2-18 刀刃形状示意图

在机床运动精度极高, 工件材质优良, 不考虑切削过程中力学、物理、环境诸因素影响时, 切削加工表面粗糙度主要取决于切削残留面积高度所产生的理论粗糙度 R_a 与刀刃粗糙度 R_e 的叠加。通过理论分析和实际加工证明, 在进给量小 ($f \leq 0.05 \text{ mm/r}$), 圆弧刀刃研磨良好的条件下, 用半径为 10 mm 的圆弧形刀刃所切削加工的表面粗糙度可达到 $R_a 0.032 \mu\text{m}$ 或小到 $0.02 \mu\text{m}$ 。若进给量加大, 则加工表面粗糙度急剧上升。因圆弧形刀刃对刀方便, 刀刃磨损后可转位使用, 所以, 当工件表面粗糙度允许用圆弧形刀刃时, 尽可能采用圆弧刃, 它特别适用于成形表面的切削加工。

国外金刚石刀具较多采用圆弧修光刃。采用圆弧修光刃时, 对刀容易, 使用方便, 但圆弧形刀刃不能选用大的进给量, 使切削加工生产率受到限制。而且刀具制造研磨费事, 价格要高些。国外标准的金刚石刀具, 推荐的修光刃圆弧半径 $R = 0.5 \sim 1.5 \text{ mm}$ 。

采用直线修光刃, 且安装正确, 则切削加工表面粗糙度, 从理论上说, 完全取决于刀刃的粗糙度值 R_e 。因此, 要获得切削加工表面粗糙度 $R_a 0.01 \mu\text{m}$, 刀刃粗糙度 R_e 应小于 $0.01 \mu\text{m}$, 为此, 前后刀面的表面粗糙度 R_e 不得大于 $0.0063 \mu\text{m}$ 。

直线修光刃可采用较大的进给量, 刃磨质量也易保证, 理论上修光刃的长度 S 略大于进给量 f 。但为使刀刃磨损后仍可保持良好的修光效果, 并顾及对刀的方便, 修光刃长度 S 实际做得要长些, 一般取 $S = 0.08 \sim 18 \text{ mm}$ 。同时要指出的是, 修光刃过长, 会引起径向切削力的加大, 导致切削振动和被加工工件的变形。国内在加工圆柱面、圆锥面和端平面时, 多采用这种制造容易的直线修光刃。

在车削球面或非球面时, 使用的金刚石刀具必须是圆弧修光刃。使用两坐标联动数控车床车削时, 如刀架无旋转运动, 工件加工表面和圆弧刀刃的接触点是要改变的, 只有刀刃为精度很高的圆弧, 才能保持工件的形状精度。因此, 这种圆弧修光刃要求有很高的精度。由于金刚石晶体各向异性, 磨削率不等, 要研磨出精确的圆弧修光刃相当不容易。加工时, 刀刃和加工表面接触点是变化的, 因此圆弧刃要有足够长度, 即圆弧刃的包角 θ 要足够, 一般 $\theta = 90^\circ \sim 100^\circ$ 。

(2) 刀具几何角度 由于金刚石很脆, 在保证获得较小的加工表面粗糙度前提下, 为增加刀尖强度和便于研磨、测量、装夹, 应采用较大的刀具楔角 β 和很小的前角。由于增大金刚石刀具的后角, 可减少刀具后刀面和加工表面的摩擦, 减小表面粗糙度值。但为保证刀刃强度, 后角一般取 $5^\circ \sim 8^\circ$, 用得较多的是 $5^\circ \sim 6^\circ$ 。加工球面和非球曲面的圆弧修光刃刀具, 常取 10° 。主偏角一般在 $30^\circ \sim 90^\circ$, 多选择 45° , 过小会导致径向切削力增大。

金刚石刀具的前角, 根据加工材料选择, 可以参考表 2-12 中推荐的数值。

图 2-19 所示是一种车削铝合金、铜、黄铜的通用金刚石车刀。这种车刀采用主偏角 45° , 前角 0° , 后角 5° 。采用直线修光刃, 修光刃长度 0.15 mm 。该车刀在工厂中实际使用效果良好,

能稳定地加工出 $R_a < 0.05\mu\text{m}$ 的表面。

表 2-12 金刚石刀具前角的选择

加工材料	前角数值
塑料	$2.5^\circ \sim 5^\circ$
铝合金、铜、黄铜、青铜、玻璃钢	$0^\circ \sim -5^\circ$
陶瓷、玻璃	$-15^\circ \sim -20^\circ$
硫化锌、硒酸锌	-15°
锗、硅	-25°
磷酸二氢钾晶体	-45°

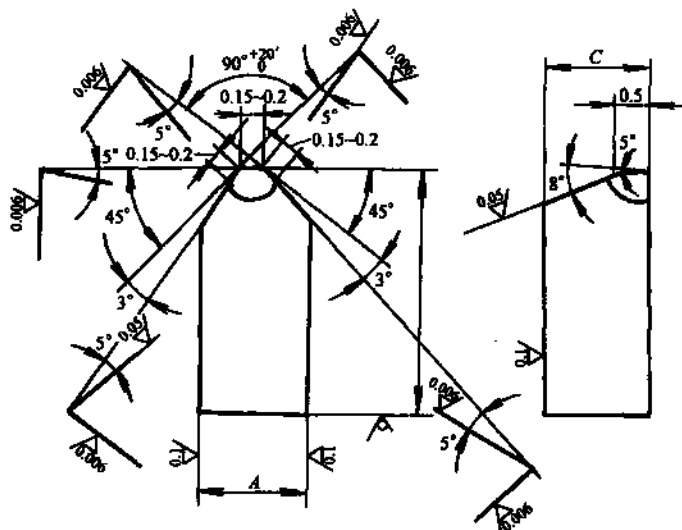


图 2-19 通用金刚石车刀

图 2-20 为美国 Contour 精密刀具公司的标准金刚石车刀。它采用圆弧修光刃，圆弧半径 $R = 0.5 \sim 15\text{mm}$ 由用户自选。后角采用 10° ，刀具前角根据加工材料按表 2-12 选用。

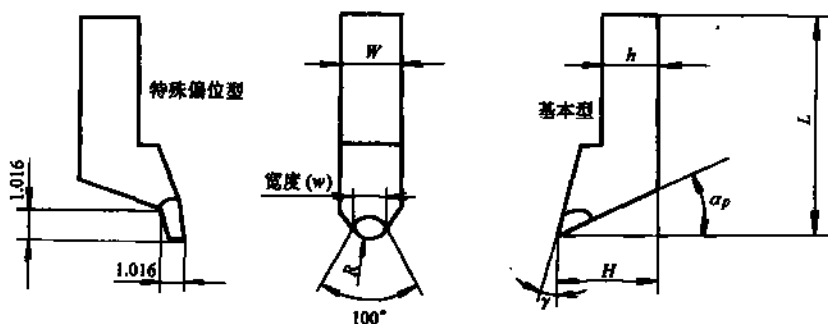


图 2-20 圆弧修光刃金刚石车刀

3. 金刚石刀具的结构和金刚石的固定方法

金刚石车刀一般是把金刚石固定在小刀头上，小刀头用螺钉或压板固定在车刀刀杆上。金刚石车刀也有将金刚石直接固定在车刀刀杆上的。

金刚石在小刀头上的固定方法参见表 2-13。

表 2-13 金刚石在小刀头上的固定方法

名称	特点
机械夹固	这种夹固方式需将金刚石的底面和加压面磨平，用压板加压固定在小刀头上。用这种方式固定时，需要较大颗粒的金刚石
粉末冶金法固定	将金刚石放在冶金粉末中，经加压在真空中烧结，使金刚石固定在小刀头内。这种固定方法可使用较小颗粒的金刚石，对金刚石的使用较为经济，因而得到广泛应用。用这种方法固定金刚石时，要注意正确选用合金粉末的成分比例，使烧结后能有较高的硬度和强度，保证金刚石有坚实的支承面，在使用中不会松动。由于这种方法要使用热压真空烧结炉，因而价格较高
粘结或钎焊固定	可用无机粘结剂或其他粘结剂，但粘结强度都不高，金刚石易掉下来。 钎焊是一种很好的固定金刚石的方法。表 2-6 中的金刚石晶体毛坯是用特殊合金钎焊在 Mo 片上，有铜片后可以很容易地钎焊到小刀头或刀杆上

金刚石刀具的加工研磨和用钝后重磨是一项难度很大的技术。国外金刚石刀具的使用厂多数都不自己磨刀，而将金刚石刀具送回原制造厂重磨。重磨费用高且很不方便。Sumitomo 公司推出一次性使用不重磨的精密金刚石刀具，金刚石钎焊在硬质合金片上，再用螺钉夹固在车刀杆上。刀片结构见图 2-21。刀片上的金刚石由制造厂研磨得很锋锐，使用厂用钝后不再重磨。该刀具使用的金刚石颗粒很小，价格比较便宜，适用于超精密车削不太多的工厂。

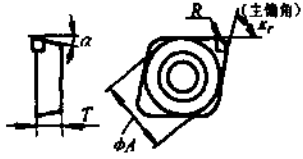

形状	刀尖半径 R	尺寸/mm			
		外径 A	厚度 T	刀尖半径 R	孔径
	完整 R	6.35	2.38	0.1	3.75
				0.2	
0.4					
	不完整 $0.5R$	6.35	2.38	0.8	3.75

图 2-21 一次性使用的不重磨精密金刚石刀头

2.9 金刚石刀具的刃磨

由于金刚石硬度极高，加工困难，研磨效率低，精密金刚石刀具还要求有极锋锐的刃口，制造金刚石刀具技术难度很大，特别是金刚石的研磨加工。

一颗单晶金刚石毛坯，要做成精密金刚石刀具，需经过以下过程：

- 1) 对金刚石晶体定向，确定制成刀具的前后刀面的空间位置，需要磨去的部分。
- 2) 仔细观察切削部分的金刚石内部是否有裂纹、杂质或其他缺陷。
- 3) 采用高速旋转的铸铁盘加金刚石微粉进行粗研磨，基本成形。
- 4) 进行精研磨，以磨出锋锐、完好、无缺陷的刀刃。
- 5) 严格检验刀具质量，使之切出超光滑表面。

金刚石刀具的粗研磨时间长，因此其关键问题是提高磨削效率。而精研磨的目的是保证刃口质量，达到极其锋锐而无缺陷。金刚石刀具的质量和所使用的精密研磨机及研磨工艺有直接关系。

1. 金刚石刀具的研磨机

精密金刚石刀具的粗研和精研都使用研磨机。研磨机装有高速旋转的铸铁研磨盘，加上金刚石微粉研磨金刚石刀具。精研时，为使刃口达到极其锋锐无缺陷，要求研磨盘转动平稳，没有振动，端面跳动小。

目前，生产中广泛使用的精密金刚石刀具研磨机，结构极其简单，其结构原理如图 2-22 所示。铸铁研磨盘装在两端有精密反顶尖的轴上，顶尖座用硬木制成（红木或梨木），使它能自动适应研磨盘轴的顶尖，达到较高的旋转精度。研磨盘的轴由柔软的丝质平带带动旋转，以减少振动，使研磨盘平稳转动，研磨机具有较好的刚度和抗振性。

研磨盘用优质铸铁制造，要求表面平整，不得有砂眼或其他缺陷。研磨盘的直径一般取 300mm，转速 2000~3000r/min。研磨盘装在轴上后，要连轴一起进行精密平衡，以保证转动时的平稳性和无振动。

研磨时金刚石小刀头装在夹具中，按要求的角度调整好。加一定负载在研磨盘上，再加上金刚石微粉对金刚石进行研磨加工。研磨盘的表面要定期修整，除去研磨时表面留下的划痕。

该研磨机能保证研磨盘的最小端面跳动误差为 1~3 μm ，能满足一般的精密金刚石刀具研磨时的要求。由于超精密车削技术的迅速发展，对金刚石刀具的要求不断提高，现在要求精密金刚石刀具的刃口钝圆半径 $r_n \leq 0.01 \sim 0.05 \mu\text{m}$ ，原来的金刚石刀具研磨机已不能满足要求，新的空气轴承的研磨机已制成使用，它可保证研磨盘的端跳在 0.5 μm 以下，使金刚石刀具的制造技术又提高一步。

2. 影响粗研磨时磨削效率的因素

金刚石刀具的粗研磨主要是尽快去除较多量的金刚石，同时保证一定的表面质量，不能有大的划痕，刀具刃口不能有崩刃或其他大的缺陷，否则将给精研造成很大困难。

(1) 研磨方向 研磨方向应为金刚石晶体的好磨方向。偏离所磨晶面的好磨方向，将使磨削效率大幅度下降。如遇到难磨方向时，将发生打滑、振动、发出噪声和磨不动等现象。找准好研磨方向时，可感到平稳、正常，有时还有浅黄色或浅蓝色的微小火花，这时研磨就很顺利，研磨效率较高。

(2) 研磨速度 通过实验得出磨削量与研磨条件的关系为

$$V = k v p$$

式中 V ——磨削体积(μm^3)；

k ——磨削率，即单位载荷和单位线速度下的磨削体积($\mu\text{m}^3 / (\text{N} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}})$)；

v ——磨盘的线切削速度(m/s)；

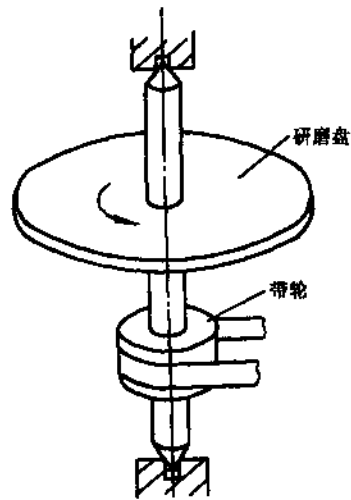


图 2-22 金刚石刀具研磨机结构原理图

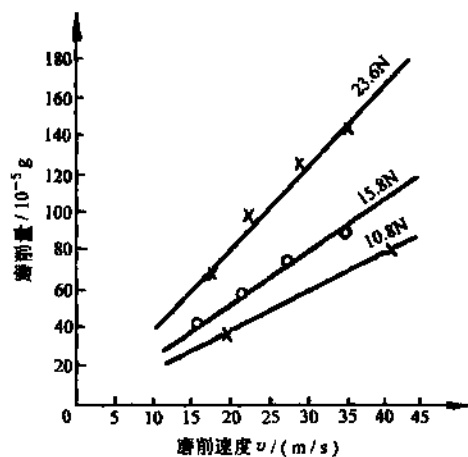


图 2-23 磨削速度与磨削量的关系

p ——研磨时，金刚石所承受的力(N)。

图 2-23 为试验得到的磨削速度与磨削量的关系。关系式和关系曲线都表明：为了获得更多的磨削量，必须努力提高线磨削速度。但由于客观条件的限制，线速度的提高是有一定限制的，因为 $V = \pi nD$ ，所以提高线速度就应增大磨盘的直径 D ，或提高磨盘的转速 n 。增大磨盘的直径是提高线速度的捷径，但无限制地增大磨盘直径会使研磨机体积加大，重量过大，不利于磨盘的装卸。另外在启动和停止时，磨盘的阻力矩过大。故应合理选择磨盘的直径，一般磨盘直径为 300mm。而提高磨盘转速，必然产生振动，使轴承间的磨损加剧，因此可采用转速很高的空气轴承。

(3) 施加在金刚石上的载荷 加大研磨金刚石时的载荷，以获得大的磨削力，从而提高研磨效率。图 2-24 为磨削量与载荷关系的试验结果，由图可知，载荷与磨削量成正比。通常情况下，载荷不宜过大，否则会因磨削力过大，而产生很大的磨削热，以致影响金刚石的表面质量，有时会使金刚石产生裂纹、破损或表面氧化。载荷一般选 9.6 ~ 11.4N。

(4) 金刚石微粉粒度 采用粒度粗的金刚石微粉可提高研磨效率，但使研磨的金刚石表面的粗糙度值增大，故开始粗研时可使用粒度较粗的金刚石微粉（一般为 W10 ~ W1.5），粗研后期采用粒度小些的金刚石微粉，以得到较好的研磨表面质量。

3. 影响精研磨时磨削质量的因素

金刚石刀具的精研加工是制造精密金刚石刀具的最关键的工序，要求精研后的刀具刃口极其锋锐，刀刃无裂纹、缺口或其他缺陷。

(1) 磨料粒度 磨料应均匀地覆盖在磨盘的表面，并将粒度小的磨料涂抹在盘径小的圆周上，而粒度大的磨料抹在盘径大的圆周上，图 2-25 表示了磨料在磨盘上的分布。当磨盘高速旋转时，磨料受到离心力的作用，有向外扩散的趋势，将粒度小的磨粒放在盘径小的圆周上，当细磨粒向外扩散时，细磨粒混入大圆周上的粗磨粒中，这不会使在大圆周上进行研磨的金刚石的粗糙度增大。反之，如将粒度大的磨料放在盘径小的圆周上，粗磨粒受到离心力时，就会向外圈的细磨粒中扩散，这就会使在盘径大的圆周上研磨的金刚石的粗糙度增高。

试验结果表明：磨料的粒度越小，被研磨的金刚石表面粗糙度越低。磨料粒度与表面粗糙度之间的关系可从图 2-26 看出。

(2) 研磨盘的质量 研磨盘的质量对被加工表面的影响很大。研磨盘用优质铸铁制成，要求表面均匀细密，不允许有砂眼、杂质或其他缺陷。在显微镜下观察，研磨盘表面有均匀分布的许多微孔，涂上去的金刚石微粉将镶嵌在这些微孔中，形成一个带金刚石微粉磨粒的研磨盘，对金刚石进行研磨加工。因此铸铁研磨盘的材质是否均匀细密，微孔是否尺寸一致和分布

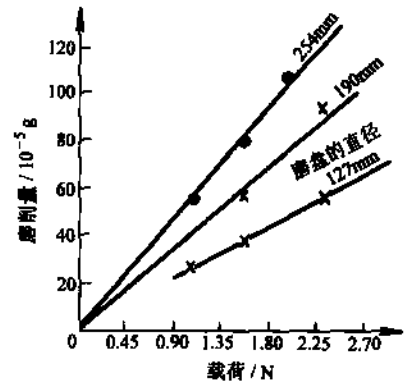


图 2-24 载荷与磨削量的关系

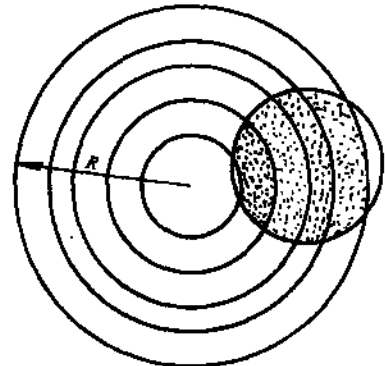


图 2-25 不同粒度的磨料在磨盘上的分布

均匀，都直接影响研磨的效率和表面质量。

在一个表面平整的研磨盘上研磨出的金刚石，表面的磨削痕迹是细密均匀的。而在一个高低不平并有许多划痕的研磨盘上研磨出的金刚石，其表面的磨削痕迹是粗细不均的，这些磨痕很深，需要经过几次研磨和抛光才能将这些痕迹研磨掉，大大降低了劳动生产率，同时对研磨质量也有影响。

当研磨盘工作一段时间后，研磨盘表面质量必然会下降，因此应定期对研磨盘进行修整。首先用粗砂轮磨削盘面，磨削到基本看不出很粗很深的划痕，然后用不同粒度的碳化硼磨料磨掉盘面上所有划痕，修整好的盘面应是极平整，并有均匀的微细的立方碳化硼磨料的磨削痕迹。

(3) 精抛的影响 精抛就是用细磨料进行研磨的同时，让金刚石做垂直于研磨方向的运动。用这种方法能抛光掉被加工表面的磨削痕迹，进一步提高表面质量。

精抛的操作通常是人工进行的，研磨工人握住固定金刚石的夹具，并施加一定压力，让被加工表面作垂直于研磨速度的法向运动。对于这种操作的要求是非常严格的，要求施加在金刚石上的力必须均匀，法向运动的速度要恒定。最后必须在运动中将磨好的金刚石很快地离开盘面。否则，抛光不掉磨痕，而且金刚石在不平稳的切削条件下，非但得不到好的表面质量，而且加工表面的平面度下降，会出现弧面。精抛后应在高倍显微镜下检查刃口的锯齿度、刀面的粗糙度。刃口应平直看不到崩口，刀面粗糙度达到 $R_a \leq 0.03 \mu\text{m}$ 。

(4) 逆磨和顺磨对刃口锯齿的影响 逆磨就是研磨方向由刃口指向刀体的方向，磨削力将刃口的晶体压向刀体，刃口受压，金刚石具有较大的抗压强度，故不易产生崩刃。顺磨时，磨削力方向是从刀体指向刃口，刃口的晶体受拉，由于金刚石的抗拉强度比抗压强度小，故容易崩刃，因此，研磨金刚石刀具必须按逆磨的方式进行，这是金刚石刀具研磨工艺中一条重要原则。

(5) 偏离好磨方向对研磨质量的影响 研磨时，偏离好磨方向，不但生产率低，而且对刃口及表面粗糙度都有影响，所以偏向角应控制在一定范围内。

3 影响金刚石超精密车削的因素

金刚石超精密车削是一项内容广泛的新技术，它的加工精度和表面质量受多种因素影响，但这些因素并不是独立地起作用，而是相互影响、相互制约的。

3.1 金刚石刀具

金刚石刀具是实现超精密车削的关键技术之一。金刚石刀具应保证良好的刃磨质量，以得到非常锋利的刀刃，在切削工件表面不残留刀痕的刀刃形状。金刚石晶体定向应保证有良好的抗磨性和抗破损性能，刀具几何参数应使切削力尽量小。此外，金刚石刀片在刀杆上要固定可靠，重磨和调整方便。金刚石刀具对刀时要借助于显微镜。

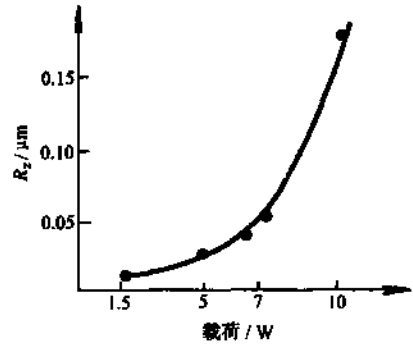


图 2-26 表面粗糙度 R_a 与粒度之间的关系

3.2 被加工材料

在超精密车削过程中，切削深度一般小于多晶体材料的平均晶粒尺寸，这时的切削过程实际上是在每个具有不同取向的晶粒内部进行的，因此，被加工材料的均匀性和微观缺陷对已加工表面质量有很大影响。其主要原因有：

- 1) 被加工材料表面出现不纯物，会造成不规则的空穴和划伤。
- 2) 结晶的晶界出现阶梯。
- 3) 加工工件有残留变形和残余应力。
- 4) 对金刚石刀具的亲合性，产生粘结现象等。

为解决这些问题可以采用高纯度合金元素(例如 99.99% 铝)在高真空中熔解铸造，用极高速度使铸件冷却，在高于再结晶温度中长时间保温。

对同一种材料，衡量切削变形的重要参数——剪切角并不是一个常数，随晶体取向的不同而发生变化。由于切削力是剪切角的函数，剪切角的任何变化都将导致切削力的变化，进而使已加工表面质量随晶体切削方向的改变而发生变化。因此，应沿被加工材料晶体的最佳切削方向进行切削。

3.3 超精密车床

金刚石超精密车削机床是精密切削的必备条件，其精度直接影响工件的加工精度。超精密车床应同时具有高精度、高刚度和高稳定性。其主要精度指标见表 2-14。

表 2-14 超精密车床的精度指标

指标名称	实用机床	实验机床	目标值
回转精度/ μm	0.1	0.025	0.01
直线精度(250mm 长度上)/ μm	0.25	0.025	
刚度/(N/m)	$10^8 \sim 10^9$	$10^8 \sim 10^9$	
热变形量/ μm	0.1 ~ 1	0.025	0.00025
温度控制/K	0.2	0.01	0.001
尺寸精度/ μm	0.02 ~ 1	0.005	0.0005

3.4 工作环境

在金刚石超精密车削中，加工环境的极微小变化都可能影响加工精度和表面质量，因此，超精密车削必须在恒温、防振、超净的超稳定加工环境条件下进行。

3.5 测量技术

加工和测量是相互相成不可分离的整体。一定的加工精度必须有相应的测量技术和装置。目前超精密加工的精度已可较稳定地达到亚微米级，并可达百分之几微米级，相应的测量精度应具备纳米级水平。金刚石刀具超精密车削中的测量包括机床超精密部件运动精度的测量和加工精度的测量。目前，在超精密车削中，除广泛应用基于光学原理的测量技术和高灵敏度的电气测微技术外，还正在探索采用高新技术进行显微计量，如应用扫描显微技术实现亚纳米量级的表面粗糙度的测量。

4 金刚石刀具超精密车削工艺

金刚石刀具超精密车削是金属切削的一种，它当然服从金属切削的普遍规律，但同时也有不少的特殊规律和工艺，这是由金刚石刀具的特殊物理化学性能和切削层极薄等因素引起的。

4.1 刀具的磨损和耐用度

金刚石刀具的磨损可以分为：机械磨损、破损和碳化磨损。金刚石刀具工作一段时间之后，在前、后刀面上出现细长而光滑的磨损，同时刀刃变成稍圆的形式。当加工继续进行时，刀刃的轻微变圆将发展成前刀面同后刀面之间的斜面（有的刀具在斜面上还磨出凹槽），它的宽度逐渐增加，各把刀具的斜面形式是不一样的。

随着切削距离的增加，副后刀面上磨损增长，并出现两个可以区别的磨损部分。有比较大的磨损量的部分称为原始磨损面，有较小磨损量的部分称为次磨损面。当原始磨损面出现之后，刀刃就磨损，由于刀刃磨损而造成工件上有未切部分（或工件的残留量），因此这种未切部分被同原始磨损面相邻的刀刃切除。这样就形成次磨损面。就这两个磨损面上的切削去除量而言，虽然它们的切削宽度是与进给量相适应的，但在原始磨损面上的切削深度要比次磨损面上的切削深度大，虽然磨损面的长度相同，但在两个磨损面上的磨损量却不相同，从而形成阶梯形的磨损。

前刀面上的磨损是切屑流过前刀面而引起的。在前刀面上出现了从与工件切入点到切屑的流出最后接触点之间的一条磨损带，这条磨损带是一个凹槽，它常常与后刀面上的凹槽联系起来。有时导致刀刃在那个地方的大破损。在凹槽内的磨损结构组织一般是粗糙的，但大部分范围内的磨损是非常平滑的。被观察到在平滑磨损区的结构组织是一系列剥离组织。

金刚石刀具的破损形式见表 2-16。

表 2-16 金刚石刀具的破损形式

名称	特点	产生原因
裂纹	在金刚石刀具表面研磨时，应力裂纹在(111)面内产生，当金刚石进一步研磨时，这些裂纹就要增大，并引起表面破损	裂纹可能是由于结构缺陷而引起的，也可能是由于金属经过刀具表面，使它受到连续不断的循环应力的疲劳现象所造成的。在研磨时出现的裂纹，特别是那些靠近刀刃的或联接刀刃的裂纹都与加工中的损坏有联系，有时甚至是严重的损坏
碎裂	碎裂呈贝壳状，可以发生在任何面内。刀具的碎裂会引起凹槽，也会促使进一步的碎裂	碎裂是因疲劳过程及金刚石本身的脆性，受冲击及振动而产生的
解理	解理破损表面一般呈鳞片状	就金刚石的特性而言，解理沿(111)晶面发生

用天然单晶金刚石刀具对有色金属进行超精密车削，如切削条件正常，刀具无意外损伤，刀具磨损甚慢，耐用度很高。在超精密车削中，金刚石刀具不能继续使用的标志是加工表面粗糙度超过规定值。金刚石刀具的耐用度以其切削长度表示。在正常切削条件下，金刚石刀具的耐用度可达数百千米。

图 2-29 为美国 ILL 实验室进行的刀具磨损试验结果。可以看到，在切削长度超过 20km 后，加工表面粗糙度仍在 $0.01\mu\text{m}$ 以内，刀具能继续使用。由于刀具的磨损很少，故同一刀具可以加工很多零件，零件尺寸的一致性受刀具磨损影响很小。

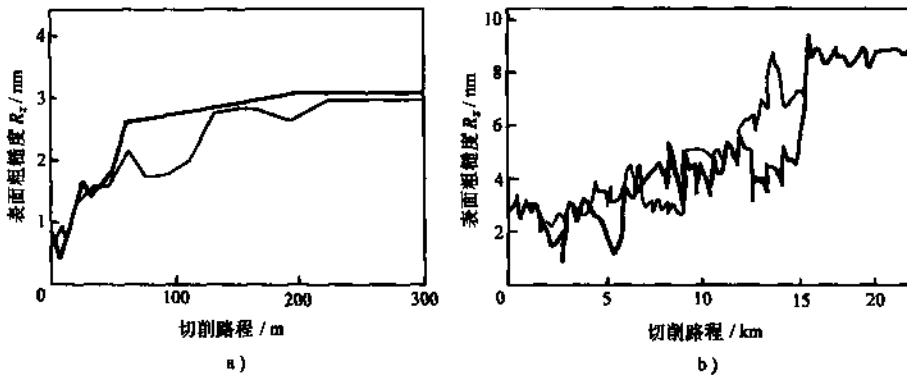


图 2-27 金刚石刀具的磨损实验

a) 切最初 300m 时的表面粗糙度 b) 切削达 20km 时的表面粗糙度

实际使用中, 金刚石刀具由于刀刃产生微小崩刃而不能继续使用, 常达不到上述耐用度, 这主要是由切削时振动或刀刃碰撞引起的。因此, 在使用和维护金刚石刀具时要极为小心, 同时在刀具设计时应正确选择金刚石晶体方向, 以保证刀刃有较高强度。

4.2 切削速度的选择

超精密车削要得到超光滑的加工表面和高的加工精度, 就要求刀具有高的尺寸耐用度。金刚石刀具的尺寸耐用度很高, 高速切削时刀具磨损也很慢, 因此超精密车削时, 切削速度并不受刀具耐用度的限制, 这点与普通的切削规律不同。

超精密车削实际选择切削速度时, 应根据所用机床和切削系统的动特性, 选择振动最小的转速。因为在该转速时表面粗糙度最低, 加工质量最高。使用质量好, 特别是动特性好、振动小的超精密机床可以采用高的切削速度, 从而提高加工效率。例如, 在批量生产计算机磁盘时, 因产量大, 要求高效率, 如切 5in 磁盘(铝合金)采用 3000r/min, 而在单件小批生产一般只用每分钟数百转的切削速度。实验证明, 机床在某一转速范围内振动很大。因此用该机床进行超精密车削时, 要避开这个转速范围, 用高于或低于该转速切削, 均可得到较好的加工表面质量。

4.3 积屑瘤的生成规律

4.3.1 切削参数对积屑瘤生成的影响

(1) 切削速度对积屑瘤产生的影响 用金刚石刀具切削有色金属时, 在不同的切削速度下都会产生积屑瘤。积屑瘤牢固地粘在刀尖上, 不能被冲洗掉。积屑瘤一般都很小, 肉眼和对刀显微镜有时难以看清, 需用倍数较大的显微镜观察。切削速度的变化影响积屑瘤的高度, 如图 2-28 所示, 切削速度较低时, 积屑瘤高度 h_0 最高, 当切削速度大于 314m/min 时, 积屑瘤趋于稳定, 高度变化不大。这说明在低速切削时, 切削温度比较低, 适于积屑瘤生成。在高速时 h_0 值不稳定。特别是切黄铜和紫铜时, 积屑瘤不稳定且比较小, h_0 在 0.1~0.75 μm 内。

(2) 进给量和切削深度对积屑瘤生成的影响 图 2-29 给出了不同进给量对积屑瘤高度的影响。图 2-30 给出了切削深度对积屑瘤高度的影响。在实验的切削参数范围内都有积屑瘤产生。

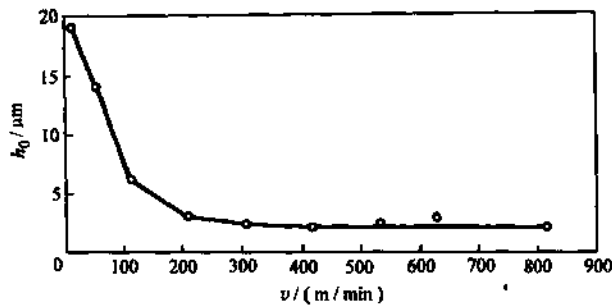
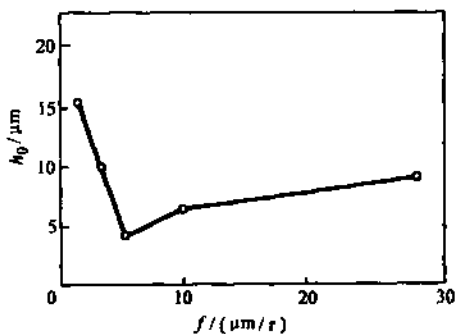
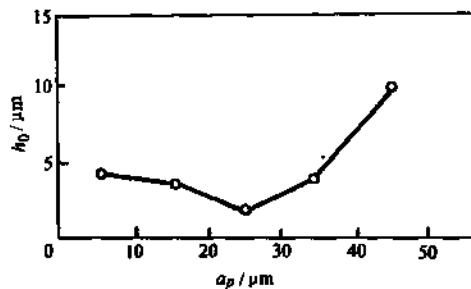


图 2-28 超精密车削时切削速度对积屑瘤高度的影响

工件为硬铝 $f=0.0075mm/r$ $a_p=0.02mm$ 图 2-29 进给量 f 对积屑瘤高度的影响工件为硬铝 $v=314m/min$ $a_p=0.02mm$ 图 2-30 切削深度 a_p 对积屑瘤高度的影响

从图 2-29 可看到在进给量很小时，积屑瘤的高度 h_0 较大，在 $f=5\mu m/r$ 时， h_0 值最小， f 值再增大时， h_0 值稍有增加，这是由切削温度所引起的。

从图 2-30 可看到，在切削深度 $a_p \leq 25\mu m$ 时，积屑瘤的高度变化不大，但在 $a_p > 25\mu m$ 后，积屑瘤高度将随 a_p 值的增加而增加，这主要是由切削温度变化和积屑瘤底部粘附面积的变化造成的。

刀具的微观缺陷直接影响积屑瘤的高度。在相同的切削条件下，完整刀具的积屑瘤高度为 $5\mu m$ ，而有微小崩刃的刀具积屑瘤高度为 $18\mu m$ 。

4.3.2 超精切削时积屑瘤对切削力和加工表面粗糙度的影响

(1) 积屑瘤对切削力的影响 图 2-31 所示是超精切削时切削力与切削速度的关系曲线。可看到超精密车削铝合金和紫铜并采用较低切削速度时，切削力较大。随着切削速度的增加，切削力急剧下降。到 $200 \sim 300m/min$ 后，切削力基本保持不变，

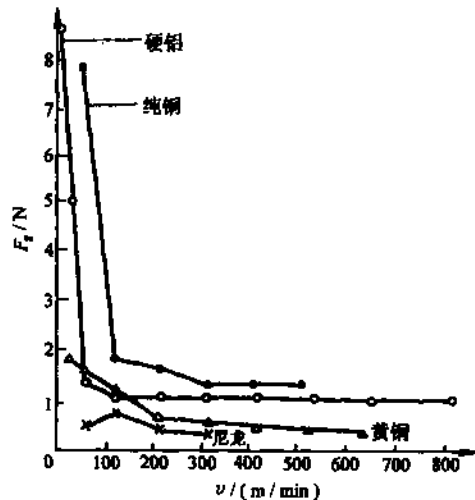


图 2-31 超精切削时的切削力与切削速度的关系曲线

 $f=0.0075mm/r$ $a_p=0.02mm$

这个规律和图 2-28 中的积屑瘤高度随切削速度的变化规律是一致的，即积屑瘤高时切削力大，积屑瘤小时切削力也小。而这却与普通切削切钢时的规律正好相反，普通切削切钢时，由于积屑瘤可增加刀具的实际前角，因此积屑瘤的增大会使切削力下降。

从实际金相显微观察，超精切削时的积屑瘤都呈鼻形，凸出在刀刃前，顶端有一个圆弧半径 R ，这鼻形积屑瘤代替锋利的刀刃进行切削。图 2-32 所示是有积屑瘤时的超精切削的切削模型。

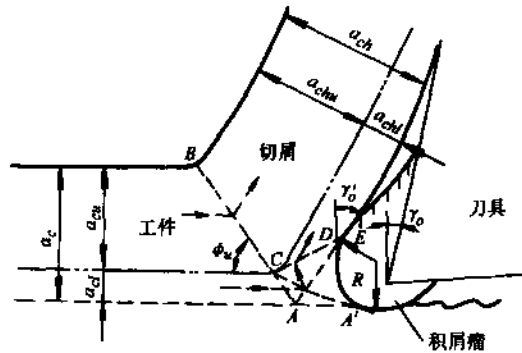


图 2-32 有积屑瘤时的超精切削模型

根据此模型，分析积屑瘤造成切削力增加的原因在于：

1) 鼻形积屑瘤前端的圆弧半径大约为 $2 \sim 3 \mu\text{m}$ ，比原来金刚石车刀的刃口半径 $r_n = 0.2 \sim 0.3 \mu\text{m}$ 大得多。由于超精切削的切削层极薄，实际切削由刃口半径 r_n 起作用，这将导致切削力明显增加。

2) 积屑瘤存在时，它代替金刚石刀具进行切削，积屑瘤和切屑间的摩擦、积屑瘤和已加工表面之间的摩擦都很严重，摩擦力很大，大大超过金刚石和这些材料之间的摩擦，这也导致切削力的增加。

3) 积屑瘤呈鼻形并自刀刃前伸出，这使切削厚度超过名义值。超精密车削的切削厚度原来就甚小，增加切削厚度将使切削力明显增加。

(2) 积屑瘤对加工表面粗糙度的影响 如上述，超精切削时积屑瘤呈鼻形，代替刀刃进行切削，积屑瘤和已加工表面剧烈摩擦，使表面粗糙度增高。图 2-33 为超精切削时，切削速度对加工表面粗糙度的影响。图中工件材料为硬铝，无切削液情况下表面粗糙度和切削速度的关系曲线和图 2-28 基本一致，即加工表面粗糙度直接与积屑瘤的高度有关：积屑瘤高度大时，加工表面粗糙度高；积屑瘤小时加工表面粗糙度降低。

4.3.3 使用切削液减小积屑瘤，降低加工表面粗糙度

从上面的分析可知，要降低加工表面粗糙度，应消除或减小积屑瘤，使用切削液可以达到上述目的。由图 2-33 可看到加工硬铝时，如航空汽油为切削液，可明显降低加工表面粗糙度，并且在低速时表面粗糙度亦小。这说明使用切削液后，消除了积屑瘤对加工表面粗糙度的影响，这时切削速度已和加工表面粗糙度无关，这和普通切削时切钢的规律不同。

在刀具、机床和加工环境都满足一定条件时，从极低到极高切削速度都能得到粗糙度值极小的加工表面，这个规律对于实际的加工很有意义。例如用金刚石刀具车削计算机磁盘表面时要求自外面到中心都是粗糙度值极小的超光滑表面。

加工铝合金和纯铜时，可使用酒精或煤油为切削液，根据实验结果，这两种切削液的效果

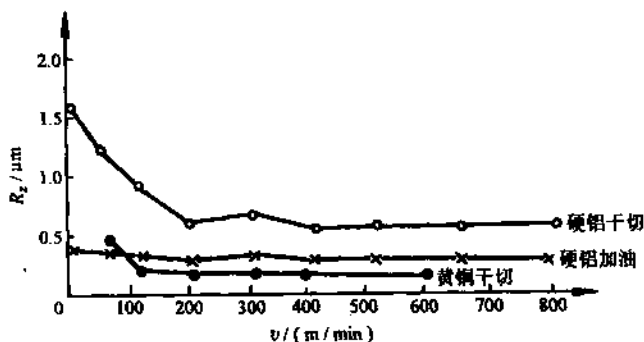


图 2-33 超精切削时切削速度对加工表面粗糙度的影响

$$f = 0.0075 \text{ mm/r} \quad a_p = 0.02 \text{ mm}$$

都很好，可任意选用。超精密车削常加工直径不大的零件，受到机床动特性的限制，采用高切削速度以消除积屑瘤常不易实现，使用切削液要方便得多。加工黄铜时，切削液无明显效果，低速时加工表面粗糙度不高，故加工黄铜可不使用切削液。

4.4 刀具锋锐度对切削变形和加工表面质量的影响

刀具锋锐度对加工表面质量有很大影响，一般用刀具刃口半径 r_n 表示。

金刚石刀具的刀刃锋锐度的测量是一个技术难题。普通刀具的刀刃锋锐度 r_n 值可用印痕法或双筒显微镜光切法测量 (r_n 值在 $5 \sim 30 \mu\text{m}$)，金刚石刀具因刃口半径 r_n 值小，上述方法分辨率不够，不能使用。金刚石刀具的 r_n 值现在都采用扫描电镜，观察刀刃的侧投影 (和刀刃垂直的投影)，在放大 $20000 \sim 30000$ 倍时测量刃口半径 r_n 值。由于金刚石刀具的前后刀面都研磨得极平，扫描电镜的景深大，故用此法能测出可靠的结果。但如 $r_n < 0.1 \mu\text{m}$ ，则用扫描电镜测量分辨率不够，测量就有困难。

为研究刀刃锋锐度对切削变形和加工表面质量的影响，可通过实验采用对比方法，比较超精密车削时不同锋锐度金刚石刀具对切削变形、加工表面粗糙度、加工表面层的冷硬、组织位错和残留应力等的影响。

切削实验使用两把几何形状完全相同的天然单晶金刚石车刀。用扫描电镜测得刃口半径为 $r_n = 0.4 \mu\text{m}$ 和 $0.7 \mu\text{m}$ 。考虑到拍扫描电镜照片时刀尖经真空镀金，故实际刃口半径 r_n 应为 0.3 和 $0.6 \mu\text{m}$ 。切削实验中的加工材料是 2A12 铝合金。

4.4.1 刀刃锋锐度对加工表面粗糙度的影响

在不同的切削条件下，刀刃锋锐度对加工表面粗糙度的影响见表 2-17。

表 2-17 不同切削条件下的加工表面粗糙度值 R_z (μm)

切削用量			刀刃锋锐度 $r_n/\mu\text{m}$	
切削深度 $a_p/\mu\text{m}$	进给量 $f/(\mu\text{m/r})$	切削速度 $v/(\text{m/min})$	0.3	0.6
5	2.5	314	0.048	0.097
2			0.042	0.048
0.5			0.035	0.060
2	25	314	0.087	0.13
	5		0.042	0.066
	1		0.033	0.056
1~2	2.5	不同速度	差别不大	

由此可知, 金刚石刀具刃口锋锐度对加工表面粗糙度是有一定影响的。

4.4.2 刀刃锋锐度对切削力的影响

用金刚石刀具进行超精密车削时, 由于切削深度和进给量都很小, 直接测量切削变形比较困难。因此, 可通过测量主切削力来间接说明切削变形受刀刃锋锐度的影响。

为便于分析比较, 测出的主切削力折算成单位切削面积的切削力。实验结果如图 2-34 所示。从图中曲线可看到, 由于刀刃锋锐度不同, 切削力有明显差别。在切削深度较小时, 差别更明显。此外, 还可看到在切削深度很小时, 单位切削力急剧增大。这是因为超精密车削时, 切削深度和进给量都很小, 刃口半径 r_n 不同将明显影响变形。 r_n 值增大将使切削变形明显加大。在切削深度很小 ($a_p \leq 1\mu\text{m}$) 时, 刃口半径造成的切削变形已占总切削变形的很大比例, r_n 值的微小变化将使切削变形产生很大的变化。因此, 在切削深度很小的精切时, 采用 r_n 值很小的锋锐金刚石车刀, 应予特别注意。

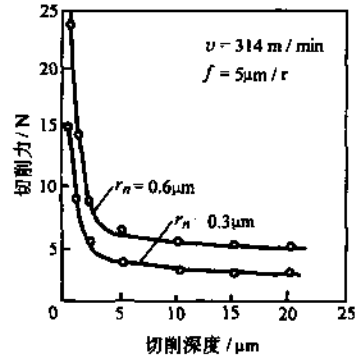


图 2-34 刀刃锋锐度对切削力的影响

4.4.3 切削表面层的冷硬和组织位错

超精密车削时, 加工表面的变质层必须严加控制。变质层厚度和变形程度与所用刀具的锋锐度直接有关。

2A12 铝合金原始材料的显微硬度为 $HV = 105$ 。使用 $r_n = 0.3\mu\text{m}$ 和 $r_n = 0.6\mu\text{m}$ 的金刚石车刀切削得到的加工表面显微硬度分别为 $HV = 167$ 和 $HV = 205$ 。由此可知:

- 1) 金刚石刀具锋锐度不同时, 加工表面变质层的冷硬和显微硬度有明显差别。
- 2) 在金刚石刀具较锋锐的情况下 ($r_n = 0.3\mu\text{m}$), 超精密车削的加工表面仍有较大的冷硬存在。在加工表面要求变质层很小的情况下, 应努力将金刚石刀具研磨得更锋锐。

加工表面层组织的位错密度是加工表面的质量和性能的重要标志。它取决于加工时的切削变形和后刀面摩擦。由于金刚石和有色金属之间摩擦因数较小 (一般为 $0.06 \sim 0.10$), 后刀面的摩擦不大, 故加工表面层的位错密度主要由切削变形决定。即切削变形大时, 表面层的位错密度大; 切削变形小, 位错密度也小。

用上述两把锋锐度不同的金刚石车刀切削 2A12 铝合金, 加工表面层用透射电镜 (TEM) 观察其组织的位错密度。从制得的电镜照片可看到, 用 $r_n = 0.3\mu\text{m}$ 切出的位错密度时显低于用 $r_n = 0.6\mu\text{m}$ 的位错密度, 后者有较多的位错团。即前者的加工表层位错密度小, 切削变形小, 表面质量高。

4.4.4 加工表面层的残留应力

超精切削的加工表面层残留应力, 它不仅影响材料的疲劳强度的耐磨性, 而且影响加工零件的前期尺寸稳定性。从实验结果可知:

- 1) 用锋锐的 $r_n = 0.3\mu\text{m}$ 的金刚石车刀切削时, 加工表面的残留应力要比用稍钝的 $r_n = 0.6\mu\text{m}$ 的刀具切削时低得多。
- 2) 切削深度减小可使残留应力减小。当切削深度减小到某临界值时, 再继续减小切削深度, 却使加工表面残留应力增大。

4.5 进给量和修光刃对加工表面粗糙度的影响

为使加工表面粗糙度值降低，金刚石超精密车削时都采用很小的进给量，刀具制成带修光刃的。图 2-35 是一组实验结果。从此图可看出在 $f \leq 10 \mu\text{m}/\text{r}$ 时，可得到低的表面粗糙度值。因此应采用小的进给量，一般可取 $f = 5 \sim 10 \mu\text{m}/\text{r}$ 。

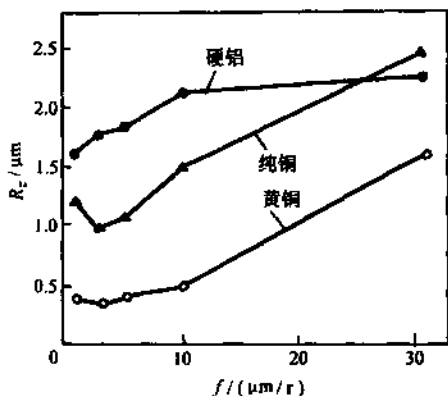


图 2-35 进给量对加工表面粗糙度的影响

$v = 314 \text{m}/\text{min}$ $a_p = 0.02 \text{mm}$

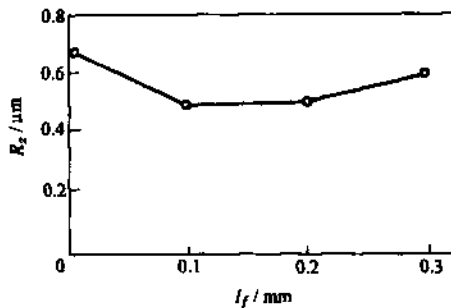


图 2-36 金刚石刀具修光刃对加工表面粗糙度的影响

工件材料：硬铝 $v = 314 \text{m}/\text{min}$

$f = 10 \mu\text{m}/\text{r}$ $a_p = 0.02 \text{mm}$

超精密车削用的金刚石刀具常制成带修光刃的，这样可减小加工的超光滑表面的粗糙度值。修光刃的长度常取 $0.05 \sim 0.10 \text{mm}$ 。图 2-36 是修光刃长度对加工表面粗糙度的影响。从图可看出修光刃的长度过长，对提高加工表面质量的效果不大。

对有修光刃的金刚石车刀，加工时要精确对刀，使修光刃和进给方向一致。生产中常使用对刀显微镜来精确对刀。为易于对刀，有将修光刃制成曲率半径较大的圆弧刃。这种刀使用方便，但制造刀具较复杂。

5 金刚石刀具超精密车削的应用及其发展

金刚石刀具超精密车削主要用来加工软金属材料，如铜、铝等有色金属及其合金，以及一些非金属材料，在实际应用中取得了很好的效果。表 2-18 列出了金刚石刀具适用的被加工材料。表 2-19 是超精密车削的主要应用情况举例。

表 2-18 金刚石刀具适用的被加工材料

材料分类	材料举例
金属	铝、铜、锡、铅、锌、铂、银、金、镁等金属及其合金
聚合物	聚丙烯、聚碳酸酯、聚苯乙烯、乙烯醛、氟塑料
结晶体	锗、硒化锌、硫化锌、硫酸铯、碘化铯、二氢磷化镉、硅、溴化钾

表 2-19 金刚石刀具超精密车削的应用举例

领域	加工零件	可达到的精度
航空及航天	高精度陀螺仪浮球	球度 $0.2 \sim 0.6\mu\text{m}$, 表面粗糙度值 $R_a 0.1\mu\text{m}$
	气浮陀螺和静电陀螺的内外支承面	球度 $0.5 \sim 0.05\mu\text{m}$, 尺寸精度 $0.6\mu\text{m}$, 表面粗糙度 $R_a 0.025 \sim 0.012\mu\text{m}$
	激光陀螺平面反射镜	平面度 $0.05\mu\text{m}$, 反射率 99.8%, 表面粗糙度 $R_a 0.012\mu\text{m}$
	液压泵、液压马达转子及分油盘	转子柱塞孔圆柱度 $0.5 \sim 1\mu\text{m}$, 尺寸精度 $1 \sim 2\mu\text{m}$, 分油盘平面度 $1 \sim 0.5\mu\text{m}$, 表面粗糙度 $R_a 0.1 \sim 0.05\mu\text{m}$
	电机整流子	
	雷达波导管	内腔表面粗糙度 $R_a 0.01 \sim 0.02\mu\text{m}$, 平面度和垂直度 $0.1 \sim 0.2\mu\text{m}$
	航空仪表轴承	孔轴的表面粗糙度 $R_a < 0.001\mu\text{m}$
光学	红外反射镜	表面粗糙度 $R_a 0.01 \sim 0.02\mu\text{m}$
	激光制导反射镜	
	其他光学元件	表面粗糙度 $R_a < 0.01\mu\text{m}$
民用	计算机磁盘	平面度 $0.1 \sim 0.5\mu\text{m}$, 表面粗糙度 $R_a 0.03 \sim 0.05\mu\text{m}$
	磁头	平面度 $0.04\mu\text{m}$, 表面粗糙度 $R_a < 0.1\mu\text{m}$, 尺寸精度 $\pm 2.5\mu\text{m}$
	非球面塑料镜成形模	形状精度 $1 \sim 0.3\mu\text{m}$, 表面粗糙度值 $R_a 0.05\mu\text{m}$
	激光印字用多面反射镜	平面度 $0.08\mu\text{m}$, 表面粗糙度值 $R_a 0.016\mu\text{m}$

对于黑色金属的超精切削，因金刚石车刀在切削过程中磨损速度过快，破坏了加工过程的稳定，不能保证被加工零件具有较理想的表面粗糙度和几何形状精度，有文献表明，金刚石车刀切削钢时比切削铜的磨损速度快 10^4 倍。因此，一般认为，天然金刚石车刀不宜用于黑色金属材料的超精切削。而在实际生产中，确实存在一些形状复杂，精度要求极高的钢及其他难加工材料零件，如非球面金属零件等，因而近年来人们开始进行黑色金属的金刚石超精密车削方面的研究，目前主要采用以下两种方法。

(1) 气体保护法 保护气体一般为：二氧化碳(CO_2)、一氧化碳(CO)、甲烷(CH_4)、乙炔(C_2H_2)、氩气(Ar_2)及真空环境等，其中以富碳气体(CH_4 、 C_2H_2)保护效果较好。其机理基于“优先扩散”理论，即和固体金刚石相比，保护气体中的碳原子更活泼一些，会首先和被切削表面中的铁发生反应，从而减缓金刚石的扩散速度，达到保护金刚石刀具的目的。但是，由于在切削过程中，切削层和刀具表面在切削区接触紧密，保护气体不能完全和金刚石刀具刃口接触，因而也就不能完全起到保护的作用，还是可以造成金刚石刀具的磨损，因而金刚石保护气体法切削钢还没有达到实用阶段。

(2) 低温切削法 造成金刚石刀磨损的两个重要因素是：温度和压力。其中，由于切削过程中刀具需做功，难以改变其受力状态，因此只能对切削温度加以控制，即在低温条件下进行切削，一般采用低温流体作为切削过程中的冷却液，用以冷却刀具或工件，降低切削温度，达到控制刀具磨损的目的。实验结果表明：采用低温切削技术可以有效地减缓金刚石刀具的磨损，大幅度地提高金刚石刀具的寿命，从而使得用金刚石车刀切削钢成为可能。但是，这种技术尚未用于生产实际中。

金刚石刀具超精密车削的发展趋势见表 2-20。

表 2-20 金刚石刀具超精密车削的发展趋势

发展趋势	说 明
向更高精度、高效率 and 大型化发展	在激光和聚变、同步加速器放射光技术及大型天文望远镜的研究、开发等各个技术领域内，大型光学镜片是必不可少的。故要求超精密车削的工件逐步大型化，且对加工精度要求也日益提高。随着超精密加工质量稳定和要求超精密加工零件的数量剧增，国外超精密车削机床向高效率方向发展。提高生产率一般从提高主轴转速和进给速度，缩短主轴启动和停止时间两个方面着手。
采用计算机补偿技术，以提高加工精度	预先测出导致加工精度下降的各类有关参数，通过计算及处理，并进行补偿，从而获得高于机床所能达到的精度，这一发展趋势现与越来越受到重视。因单靠提高基准元件精度来提高加工精度是有限的。例如有些超精密车床的导轨直线度已达 $0.025/1000000$ ，再要提高其精度已很难达到，须采用计算机补偿的办法来解决。
加工、计量一体化	超精密加工机床的元、部件都具有较高精度，如配置一些适当的仪器或采取一定的措施，即可作计量装置使用。这样可使加工和计量结合，做到边加工、边测量，在监控条件下加工，以实现加工、计量一体化，提高经济效益。
发展模块化超精密车床	利用不同的超精密机床元、部件，组成各种类型的超精密车床，有利于降低成本，缩短制造周期，用户可根据需要提出要求，以较低的价格，较短的时间获得所需机床。

第3章 精密磨削和超精密磨削

1 概述

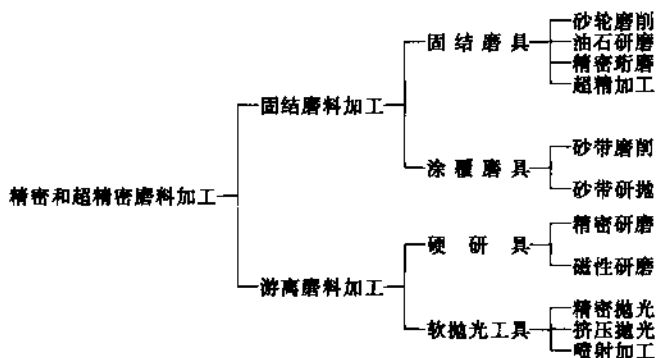
用金刚石刀具对铜、铝等及其合金进行超精密车削可获得高精度、低表面粗糙度值，效率也很高，已是一种重要的超精密加工方法，得到了广泛运用。但对于硬脆材料，如陶瓷、石英、玻璃、半导体等，则不使用刀具切削，而是用精密和超精密磨料加工方法，以达到高精度和低表面粗糙度值。

所谓精密和超精密磨料加工是指利用细粒度的磨粒或微粉磨料进行砂轮磨削、砂带磨削、研磨、抛光等精密加工和超精密加工的总称，即利用磨料进行精密加工和超精密加工。

1.1 精密和超精密磨料加工方法分类

精密和超精密磨料加工方法分为固结磨料加工和游离磨料加工两大类，如表3-1所示。固结磨料加工是指磨料呈固结状态，如砂轮、砂带等，形成精密磨削和超精密磨削，为本章论述内容；游离磨料加工是指磨料在加工时呈游离状态，如研磨、抛光等，形成精密和超精密研磨、抛光，在光整加工一章中论述，该章内容不仅介绍了研磨、抛光等游离磨料加工，同时也介绍了油石研磨、珩磨、超精加工等固结磨料加工。

表3-1 精密和超精密磨料加工方法分类



1.1.1 固结磨料加工

将磨粒或微粉与结合剂均匀混合在一起，采用烧结、粘接、涂敷等方法，形成具有一定的形状和强度的磨具，并用来进行磨削、研磨等加工，称为固结磨料加工，其中用烧结方法形成砂轮、砂条、油石等磨具，称为固结磨具；用涂敷方法形成砂纸、砂带等磨具，称为涂覆磨具或涂敷磨具。

对于精密加工和超精密加工来说，固结磨料加工主要有砂轮磨削、砂带磨削、油石研磨、珩磨、超精加工、砂带研抛等加工方法。

(1) 精密砂轮磨削 利用粒度为 $60^{\#} \sim 80^{\#}$ 的砂轮，经过精细修整后进行磨削，其加工精度可达 $1\mu\text{m}$ ，表面粗糙度可达 $R_a 0.025\mu\text{m}$ ，通常可在精密磨床上加工，这种加工方法称为精

密砂轮磨削，简称精密轮磨、精密磨削。由于所磨削的表面光亮如镜，光彩照人，故又有镜面磨削的美称。

(2) 超精密砂轮磨削 通常是指利用粒度为 W40 ~ W5 的金刚石、立方氮化硼等超硬微粉磨料砂轮，经过精细修整或在线修整在超精密磨床上进行磨削，可获得低于或等于 $0.1 \mu\text{m}$ 的加工精度，表面粗糙度为 $R_a 0.025 - 0.008 \mu\text{m}$ 的加工表面，称为超精密砂轮磨削，实际上是超硬磨料微粉砂轮超精密磨削。也称之为镜面磨削，取其达到镜面之意。

(3) 精密砂带磨削 利用粒度为 P280 ~ P600 的微粉砂带可进行精密砂带磨削，其加工精度可达 $1 \mu\text{m}$ ，表面粗糙度可达 $R_a 0.025 \mu\text{m}$ 。

(4) 超精密砂带磨削 利用粒度为 P600 ~ P1200 的微粉砂带可进行超精密砂带磨削，其加工精度可达 $0.1 \mu\text{m}$ 以上，表面粗糙度可达 $R_a 0.025 - 0.008 \mu\text{m}$ 。通常应在超精密砂带磨床上进行加工。

(5) 精密和超精密砂带研抛 利用粒度为 P1000 ~ P1200 的微粉砂带，选用表层为橡胶的接触轮，综合研磨和抛光两种加工机理，称之为砂带研抛，能获得加工精度 $0.1 \mu\text{m}$ ，表面粗糙度 $R_a 0.025 - 0.008 \mu\text{m}$ ，是 80 年代出现的新方法。

(6) 油石研磨 传统的研磨方法是在研具和被加工表面之间放上磨粒和滑润剂合成的研磨膏，由研具和工件之间的相对运动使磨粒产生微切削作用，磨粒在研磨中呈游离状态。而油石研磨是用油石与工件直接接触产生微切削作用，磨粒在研磨中呈固结状态，通常所用的油石有氨基甲酸酯油石、金刚石电铸油石和金刚石粉末冶金油石等，是 80 年代出现的新加工方法。

此外，尚有珩磨、超精加工等，其加工方式与传统的无差异，只是精度和表面质量不同。

1.1.2 游离磨料加工

在加工时，磨粒或微粉不是和结合剂固结在一起，而是呈游离状态放在工件和工具之间，其传统的加工方法是研磨和抛光。研磨时的工具称研具，抛光时的工具称抛光工具，由于通常是用抛光轮来进行抛光，故将抛光工具称为抛光轮。研磨和抛光时，磨料可与滑润剂混合在一起，形成研磨膏或抛光剂，但也有将磨料和滑润剂分别使用。传统的研磨和抛光的区别是在工具和效果上，研具是硬的，不仅可提高精度，而且可降低表面粗糙度值；抛光工具是软的，它主要用于降低表面粗糙度值，对加工精度无提高，甚至会降低或破坏几何形状。

近年来，在传统工艺的基础上，出现了许多新的游离磨料加工方法，如弹性发射加工、磁性研磨、液体动力抛光、水合抛光、磁流体抛光、挤压抛光、喷射抛光等，由于研具或抛光工具有时是半软半硬，即其表层是由一定硬度的橡胶或塑料构成，或由磁力产生微切削作用，从而模糊了研磨和抛光的概念，如果从传统的研磨和抛光来分类，则应归为抛光更为合适。

通常精密磨削和超精密磨削一般多指砂轮磨削，后来又包括了砂带磨削，都是在 60 年代发展起来的，以前只有精磨、光整加工等精加工方法。

1.2 精密磨削和超精密磨削磨料

1.2.1 磨料种类及其选择

在精密磨削和超精密磨削中，除使用刚玉系、碳化物系等普通磨料外，由于要求磨具有良好的精度保持性、被加工材料硬脆性高、表面质量要求高等原因，还大量使用超硬磨料。

普通磨料的种类、代号和应用范围如表 3-2 所示，它们分为刚玉系和碳化物系，种类繁多，表 3-3 表示了几种主要磨料对工件材料的适应性。表 3-4 表示了主要国家磨料种类代号对照。

超硬磨料的种类、代号和应用范围如表 3-5 所示, 它们主要分为金刚石和立方氮化硼两大类以及以它们为主要成分的复合材料。金刚石又包括天然金刚石和人造金刚石两种, 表 3-5 中

表 3-2 普通磨料的种类、代号和应用范围

系类	名称	代号	特 性	应用范围
刚 玉 系	棕刚玉	A (GZ)	呈棕褐色, 硬度较高, 韧性较大, 价格相对较低	适于磨削抗拉强度较高的金属材料, 如碳钢、合金钢、可锻铸铁、硬背钢等
	白刚玉	WA (GB)	呈白色, 硬度比棕刚玉高, 韧性较棕刚玉低, 易破碎, 棱角锋利	适于磨削淬火钢、合金钢、高碳钢、高速钢以及加工螺纹及薄壁件等
	单晶刚玉	SA (GD)	呈淡黄或白色, 单颗粒球状晶体, 强度与韧性均比棕、白刚玉高, 具有良好的多棱多角的切削刃, 切削能力较强	适于磨削不锈钢、高钒钢、高速钢等高硬、高韧性材料及易变形、烧伤的工件, 也适用于高速磨削和低粗糙度磨削
	微晶刚玉	MA (GW)	呈棕黑色, 磨粒由许多微小晶体组成, 韧性大, 强度高, 工作时呈微刃破碎, 自锐性能好	适于磨削不锈钢、轴承钢、特种球墨铸铁等较难磨材料, 也适于成形磨、切入磨、高速磨及镜面磨等精加工
	锆刚玉	PA (GG)	呈玫瑰红或紫红色, 韧性高于白刚玉, 效率高, 加工后表面粗糙度较低	适于刀具、量具、仪表、螺纹等低粗糙度表面的磨削
	锆刚玉	ZA (GA)	呈灰褐色, 具有较高的韧性和耐磨性, 是 Al_2O_3 和 ZrO_2 的复合氧化物	适用于对耐热合金钢、钛合金及奥氏体不锈钢等难磨材料的磨削和重负荷磨削
	黑刚玉	BA (GH)	呈黑色, 又名人造金刚砂, 硬度低, 但韧性好, 自锐性、亲水性能好, 价格较低	多用于研磨与抛光, 并可用来制做树脂砂轮及砂布、砂纸等
碳 化 物 系	黑色碳化硅	C (TH)	呈黑色, 有光泽, 硬度高, 但性脆, 导热性能好, 棱角锋利, 自锐性优于刚玉	适于磨削铸铁、黄铜、铅、锌等抗拉强度较低的金属材料, 也适于加工各类非金属材料, 如橡胶、塑料、矿石、耐火材料及热敏性材料的干磨等, 也可用于珠宝、玉器的自由磨粒研磨等
	绿色碳化硅	GC (TL)	呈绿色, 硬度和脆性均较黑色碳化硅为高, 导热性好, 棱角锋利, 自锐性能好	主要用于硬质合金刀具和工件、螺纹和其他工具的精磨, 适于加工宝石、玉石、钟表宝石轴承及贵重金属、半导体的切割、磨削和自由磨粒的研磨等
	立方碳化硅	SC (TF)	呈黄绿色, 晶体呈立方形, 强度高于黑碳化硅, 脆性高于绿碳化硅, 棱角锋利	适于磨削韧而粘的材料, 如不锈钢、轴承钢等, 尤适于微型轴承沟槽的超精加工等
	锆碳化硅	CC (TS)	呈暗绿色, 硬度比绿碳化硅略高, 韧性较大, 工件不易烧伤	适用于加工硬质合金、钛合金以及超硬高速钢等材料
	碳化硼	BC (TP)	呈灰黑色, 在普通磨料中硬度最高, 磨粒棱角锐利, 耐磨性能好	适于硬质合金、宝石及玉石等材料的研磨与抛光

注: 根据 GB 2476—83《磨料代号》第 1 号修改单(刊载于《中国标准化》1987 年第 1 期), 括号内为旧代号, 括号外为更改后新代号, 自 1987 年 1 月 1 日起实施。

表 3-3 几种主要普通磨料对工件材料的适应性

材 料	按材料性能							按材料种类										
	硬度 HRC			伸长率		抗拉强度 /MPa		碳素钢	碳素工具钢	淬火结构钢	合金钢	轴承钢	高速钢	不锈钢	铸铁	球墨铸铁	有色金属	硬质合金
	<25	25~55	>55	大	小	>70	<70											
磨 料																		
棕刚玉	○			○	○		○	○	○		○				○	○	○	
白刚玉		○	○	○		○		○	○	○	○	○					○	
单晶刚玉			○	○	○	○		○	○	○	○	○					○	
微晶刚玉	○	○		○	○	○	○	○	○		○			○	○			
铬刚玉		○	○	○		○				○	○							
锆刚玉				○		○					○			○				
黑碳化硅	○	○			○		○							○	○	○		
绿碳化硅		○	○		○		○						○	○	○			○
碳化硼			○		○		○											○

注：○表示磨料对加工材料适应。

表 3-4 国际标准和主要国家磨料种类代号对照表

品 种	国际标准 ISO	中 国 GB 2476—		美国 Noton 公司	日 本 R6111- 1974	德 国 DIN	前苏联 ГОСТ 2424-75	英 国	备 注	
		83 ^①	81							
刚 玉 系	棕刚玉	A	A	GZ	A	A	NK	12A-16A	A	又称优质刚玉
	半脆性刚玉				57A					
	白刚玉	WA	WA	GB	38A	WA	EK	22A-25A	WA	
	单晶刚玉		SA	GD	32A	(HA, SA)		43A-45A		
	铬刚玉		PA	GC		PA	FA	32A-34A		
	钛刚玉							37A		
	锆刚玉		ZA	GA	ZS, ZF	(ZA)			(Z)	
	黑刚玉		BA							
	微晶刚玉		MA	GW	44A	(TA)			T	
	钽土烧结刚玉				75A					
铝氧粉烧结刚玉				76A						
碳 化 物 系	黑碳化硅	C	C	TH	37C	C	SK	52C-55C	BC	
	绿碳化硅	GC	GC	TL	39C	GC	SK	62C-64C	C	
	立方碳化硅		SC	TF						
	铈碳化硅		CC	TS						
	碳化硼		BC	TP	B ₄ C			B ₄ C		
混 合 磨 料	棕刚玉/白刚玉			GZ/GB	19A					
	单晶刚玉/其他刚玉				23A					
	刚玉/氧化锆				16A					
	刚玉/碳化硅				AC					
	黑碳化硅/绿碳化硅		TH/TL							

注：日本栏中有括号者属日本昭和电工；英国栏中有括号者，属环球公司。

① 此栏代号是根据 GB 2476—83《磨料代号》第1号修改单更改后的新代号。自1987年1月1日起实施。

表 3-5 超硬磨料的种类、代号和应用范围

品 种	代 号	适 用 范 围		
		粒 度		用 途
		窄 范 围	宽 范 围	
人 造 金 刚 石	RVD	60/70 ~ 325/400	60/80 ~ 270/400	树脂、陶瓷结合剂磨具或用于研磨等
	MBD	50/60 ~ 325/400	60/80 ~ 270/400	金属结合剂磨具、电镀制品、钻探工具或研磨等
	SCD	60/70 ~ 325/400	60/80 ~ 325/400	加工钢和钢与硬质合金组合件等
	SMD	16/18 ~ 60/70	16/20 ~ 60/80	锯切、钻探及修整工具等
	DMD	16/18 ~ 40/45	16/20 ~ 40/50	修整工具及其他单粒工具等
	MP-SD 微粉	主系列 0/1 ~ 36/54	补充系列 0/0.5 ~ 20/30	硬脆金属和非金属(光学玻璃、陶瓷、宝石)的精磨、研磨
立 方 氮 化 硼	CBN	20/25 ~ 325/400	20/30 ~ 270/400	树脂、陶瓷、金属结合剂磨具等
	MP-CBN 微粉	主系列 0/1 ~ 36/54	补充系列 0/0.5 ~ 20/30	硬脆金属材料研磨与抛光

注：根据 GB6405—86、GB6966—86。

只列出了人造金刚石，因为在工业上使用多为人造金刚石。金刚石和立方氮化硼均属于立方晶系。人造金刚石的品种很多，有较低强度金刚石(RVD)，为不规则的脆性结晶；中强度金刚石(MBD)，颗粒规则，为块状结晶或长形结晶，一定韧性，中低脆性，制作金属结合剂砂轮和电镀制品；高强度金刚石(SMD)，韧性大，强度高，块状结晶，杂质少，用于制作锯片、修整工具等；此外，尚有磨钢专用金刚石，自锐性金刚石。两种超硬磨料对工件材料的适应性如表3-6所示。

表 3-6 两种超硬磨料对工件材料的适应性

工 件 材 料	湿 磨		干 磨	
	金 刚 石	立 方 氮 化 硼	金 刚 石	立 方 氮 化 硼
高速钢	×	○	×	○
热压工具钢	×	○	×	○
工具合金钢	×	○	×	○
不锈钢、耐热钢	○	○	×	○
镍铬钛合金	○	○	×	○
模具钢	○	×	×	○
耐磨覆盖物(硬质合金、镍、铬等)	○	×	○	×
钢与硬质合金组合体	○	×	○	×
铸铁	○	×	×	○
有色金属	○	×	○	×

注：○——适用，×——不适用。

金刚石是自然界中硬度最高的物质，有较高的耐磨性，又有很高的弹性模量，可以减小加工时工件的内应力、内部裂隙和其他缺陷。它有较大的热容量和良好的热导性，线胀系数小，

熔点高。但 700℃ 以上易与铁族金属产生化学作用而形成碳化物，造成化学磨损，故一般不宜磨削钢铁材料。

金刚石有天然金刚石和人造金刚石两种。天然金刚石有透明、半透明的和不透明的，以透明的为最贵重。其颜色有无色、浅绿、浅黄、褐色等，以褐色硬度最高，无色次之。天然金刚石在加工制造业中多用于制作超精密切削的车刀、硬度计的压头等，很少作为磨料用。人造金刚石分为单晶体和聚晶烧结体两种，单晶体颗粒小，多用来制作磨料磨具，聚晶烧结体多用来制作刀具、压头、拉丝模等。

立方氮化硼的硬度略低于金刚石，但耐热性比金刚石高，有良好的化学稳定性，与碳在 2000℃ 时才起反应，故适于磨削钢铁材料。由于它在高温下易与水产生反应，因此，一般多用于干磨。

由于超硬磨料本身的特点，用它们制作的磨具能够满足精密磨削和超精密磨削的要求，因此使用广泛。超硬磨料磨具的特点有以下几方面。

1) 磨料本身磨损少，可较长时间保持切削性，修整次数少，磨具耐用度和寿命长。

2) 磨具在尺寸和形状上保持性好，耐用度高，磨削精度高。

3) 磨削时，一般工件温度较低，因此可以减小内应力、裂纹、烧伤等缺陷。

4) 超硬磨料磨具价格较贵，修整比较困难，但由于使用寿命长，使得在性能价格比上仍占有优势。

5) 超硬磨料磨具能加工各种硬脆材料，如磨削陶瓷、光学玻璃、宝石、硬质合金、铜合金，耐热钢、不锈钢等难加工材料，应用已十分广泛。

表 3-7 列出了超硬磨料与普通磨料的力学物理性能，可见超硬磨料有很大的潜力和应用前景。

表 3-7 超硬磨料与普通磨料的主要力学物理性能

磨料种类		显微硬度 HV	抗弯强度 /MPa	抗压强度 /MPa	热稳定性 /℃
超硬磨料系	金刚石	天然	210 ~ 490 300	2000	700 ~ 800
		人造			
立方氮化硼		7300 ~ 9000	300	800 ~ 1000	1250 ~ 1350
普通磨料系	碳化物系	碳化硼	300	1800	700 ~ 800
		碳化硅	3100 ~ 3400	155	1500
	刚玉系	1800 ~ 2450	87.2	757	1200

在选择磨料种类时，应考虑以下一些问题：

1) 应考虑被加工材料的性质，对于抗拉强度较高的材料，应选用韧性较大的磨料；对于硬度低、伸长率大的材料，应选用韧性较小的较脆磨料；对于硬脆材料，应选用超硬磨料，可参考表 3-3 选用。

2) 应考虑被加工材料与磨料的化学反应，以减少磨料的磨损，保持精度。如在用刚玉系、碳化物系磨料磨削钛合金时，则有很大的化学反应，产生熔融和磨损。又如在用金刚石磨料加工铁碳合金材料时，将产生化学反应，造成化学磨损。

3) 应考虑磨削时的工作环境，如切削区温度、工作液性质等可能对磨料引起的化学反应，使磨料受到侵蚀，甚至分解。如金刚石的热稳定性为 700℃ ~ 800℃，高于此温度的工作环境会

使金刚石产生较大磨损。又如碳化硅在高温时，会与铁起化学反应，分解并生成 FeSi 和 Fe_3C ，因此不适于加工钢铁材料。

4) 应考虑结合剂的性能，结合剂应与磨粒有较强的结合力，或粘接力，同时又不会对磨粒产生不良化学反应，影响其切削性能。当然，结合剂的选择尚要考虑磨具性能方面的要求及被加工材料的影响。

1.2.2 磨料粒度及其选择

磨料粒度是精密磨削和超精密磨削的重要影响因素。

磨料从其粒度考虑可分为磨粒和微粉两大类。粒度是表示磨料的颗粒尺寸，其具体大小用粒度号表示。

磨粒一般是用筛选法分级，其粒度号表示 1 in 长度上的筛孔数，粒度号越大，磨粒越细；反之，粒度越小，磨粒越粗。我国国标中，对于普通磨料，磨粒分为 27 级，从 4# 至 240#，如 60# 磨粒是指所用的筛网，其在 1 in 长度上有 60 个筛孔，磨粒的基本尺寸为 300 ~ 250 μm 。对于超硬磨料，磨粒分为 20 级，即 16/18 ~ 275/400，其粒度号是以相邻两个筛网网孔尺寸来确定的，如粒度号 60/70 表示磨粒可通过 60# 筛网，但不能通过 70# 筛网，其基本尺寸为 250 μm /212 μm 。可见，对于超硬磨料的磨粒大小要求比较严格。

微粉一般是用水力法按不同沉降速度分级，这显然是由于筛选法不可能制造网孔过小的筛网，水力法是利用磨料在水中，质量越大，沉降速度越快的原理。微粉的粒度号，或称粒度标记，表示了微粉颗粒的尺寸范围，可用颗粒的长度和宽度表示。我国国标中，对于普通磨料，微粉分为 14 级，从 W63 至 W0.5，W 表示微粉，如 W5 是指微粉尺寸在 5 ~ 3.5 μm 。对于超硬磨料，微粉分为 18 级，其粒度标记是将微粉颗粒的长宽尺寸折合为相当圆（或称相似圆）的直径来表示，其折合算法如下：

设微粉颗粒的投影长度为 l ，投影宽度为 w ，则相当圆的直径 D 与长度 l 、宽度 w 的关系为颗粒面积等值，即

$$lw = \pi (D/2)^2$$

$$D = 2 \sqrt{lw/\pi}$$

如超硬磨料微粉 6 ~ 12 是指微粉的相似圆直径为 6 ~ 12 μm 。

有关各种磨料的粒度号及其基本尺寸见表 3-8。

表 3-8 各种磨料的粒度号及其基本尺寸

(μm)

普通磨料系				超硬磨料系			
磨料	粒度号	基本尺寸	说明	磨料	粒度号	通过网孔/不通过网孔 基本尺寸/基本尺寸	说明
磨粒	4#	5600 ~ 4750	粒度号用筛选法 分级，以 1 in 长度 上有多少筛孔来表 示。如 40# 粒度是 指 1 in 长度上有 40 个筛孔	磨粒	16/18	1180/1000	粒度号是以相 邻两个筛网网孔 尺寸来确定的
	5#	4750 ~ 4000			18/20	1000/850	
	6#	4000 ~ 3350			20/25	850/710	
	7#	3350 ~ 2800			25/30	710/600	
	8#	2800 ~ 2360			30/35	600/500	
	10#	2360 ~ 2000			35/40	500/425	
	12#	2000 ~ 1700			40/45	425/355	
	14#	1700 ~ 1400			45/50	355/300	
	16#	1400 ~ 1180			50/60	300/250	
	20#	1180 ~ 1000			60/70	250/212	
微粒	22#	1000 ~ 850		微粒	70/80	212/180	
	24#	850 ~ 710					

(续)

普通磨料系				超硬磨料系			
磨料	粒度号	基本尺寸	说明	磨料	粒度号	通过网孔/不通过网孔 基本尺寸/基本尺寸	说明
磨粒	30 [#]	710~600	粒度号用筛选法 分级,以1in长度 上有多少筛孔来表 示。如40 [#] 粒度是 指1in长度上有40 个筛孔	磨粒	80/100	180/150	粒度号是以相 邻两个筛网网孔 尺寸来确定的
	36 [#]	600~500			100/120	150/125	
	40 [#]	500~425			120/140	125/106	
	46 [#]	425~355			140/170	106/90	
	54 [#]	355~300			170/200	90/75	
	60 [#]	300~250			200/230	75/63	
	70 [#]	250~212			230/270	63/53	
	80 [#]	212~180			270/325	53/45	
	90 [#]	180~150			325/400	45/38	
	100 [#]	150~125					
	120 [#]	125~106					
	150 [#]	106~90					
	180 [#]	90~63					
	微粒	W63			63~50	W表示微粒, 其粒度用微分的基 本尺寸表示。如 W40,其微粒尺寸 在40~28 μm 之间	
W50		50~40	22-36	22~36			
W40		40~28	20-30	20~30			
W28		28~20	12-22	12~22			
W20		20~14	10-20	10~20			
W14		14~10	8-12	8~12			
W10		10~7	6-12	6~12			
W7		7~5	5-10	5~10			
W5		5~3.5	4-8	4~8			
W3.5		3.5~2.5	3-6	3~6			
W2.5		2.5~1.5	2.5-5	2.5~5			
W1.5		1.5~1.0	2-4	2~4			
W1.0		1.0~0.5	1.5-3	1.5~3			
W0.5		0.5~更细	1-2	1~2			
粉				粉	0.5~1.5	0.5~1.5	
					0.5~1	0.5~1	
					0~1	0~1	
					0~0.5	0~0.5	

注:普通磨料粒度号及其基本尺寸见 GB 2477—83;超硬磨料粒度号及其尺寸范围见 GB 6406.1—86、微粒粒度及其基本尺寸见 GB 6966.2—86。

世界各国有自己的磨料粒度标准,表示方法也各有不同,表3-9列出了主要国家磨料磨粒基本尺寸对照表,表3-10列出了主要国家磨料微粒基本尺寸对照表。

在选择磨料粒度时,应考虑以下一些问题:

(1) 加工表面粗糙度 表面粗糙度与磨料粒度关系最为密切,表面粗糙度值要求越低,应该用越细粒度的磨料,在精密磨削和超精密磨削中,多用细粒度、微粒磨料。

(2) 被加工材料的力学物理性质和材质 对于高硬脆材料、组织结构紧密的材料,应选择细粒度磨料。

(3) 加工方式和加工条件 对于精密磨削、超精密磨削、成形磨削、高速磨削,由于加工精度要求高,希望砂轮保持尺寸和轮廓精度,或由于速度高,使每颗磨粒承受的磨削力小,都应用细粒度磨料。

(4) 加工生产率 生产率要求高,应选用较粗一些的磨粒,但对于精密磨削和超精密磨削,要提高生产率,应用提高切削速度等其他方法。

表 3-9 主要国家磨料磨粒基本尺寸对照表

(μm)

粒度号 (#)	国际标准 ISO	中 国 GB 2477-83	美 国 ANSI	日 本 JIS	前 苏 联 ГОСТ 3647	
	基本粒尺寸	基本粒尺寸	基本粒尺寸	基本粒尺寸	粒 度 号	基本粒尺寸
8	2800~2360	2800~2360	2830~2380	2830~2380	250	3150~2500
10	2360~2000	2360~2000	2380~2000	2380~2000	200	2500~2000
12	2000~1700	2000~1700	2000~1680	2000~1680	160	2000~1600
14	1700~1400	1700~1400	1680~1410	1680~1410	125	1600~1250
16	1400~1180	1400~1180	1410~1190	1410~1190	100	1250~1000
20	1180~1000	1180~1000	1190~1000	1190~1000	80	1000~800
22	—	1000~850	—	—	—	—
24	850~710	850~710	841~707	840~710	63	800~630
30	710~600	710~600	707~595	710~590	50	630~500
36	600~500	600~500	595~500	590~500	40	500~400
40	—	500~425	—	—	—	—
46	425~355	425~355	420~354	420~350	32	400~315
54	355~300	355~300	354~297	350~297	—	—
60	300~250	300~250	297~250	297~250	25	315~250
70	250~212	250~212	250~210	250~210	20	250~200
80	212~180	212~180	210~177	210~177	16	200~160
90	180~150	180~150	177~149	177~149	—	—
100	150~125	150~125	149~125	149~125	12	160~125
120	125~106	125~106	125~105	125~105	10	125~100
150	106~75	106~75	105~74	105~74	8	100~80
180	90~63	90~63	88~63	88~63	6	80~63
220	75~53	75~53	74~53	74~53	—	—
240	75~53	75~53	74~53	—	5	63~50

表 3-10 主要国家磨料微粉基本尺寸对照表

(μm)

中国 GB 2477-83		日 本 JIS		美 国 USAS		前苏联 ГОСТ		德 国 DIN			
粒度号	基本尺寸	粒度号 (#)	基本尺寸	粒度号 (#)	基本尺寸	粒度号	基本尺寸	粒度号	基本尺寸	粒度号	基本尺寸
W63	63~50	240	87.5~73.5	240	53.5~50	4*	50~40	OS53	53±3	P240	58.5±2
		280	73.5~62					OS45	44.5±2	P280	52.2±2
W50	50~40	320	62~52.5	280	44~40	3*	40~28	OS37	36.5±1.5	P320	46.2±1.5
		360	52.5~44					OS29	29.5±1.5	P360	40.5±1.5
W40	40~28	400	44~37	320	36~32.5	M28	28~20	P400	35.0±1.5	P400	35.0±1.5
		500	37~31					OS23	22.8±1.5	P500	30.2±1.5
W28	28~20	600	31~26	400	28.8~25.8	M20	20~14	P600	25.8±1	P600	25.8±1
		700	26~22					OS17	17.5±1	P800	21.8±1
W20	20~14	800	22~18	500	19.7~16.7	M14	14~10	P800	21.8±1	P1000	18.3±1
		1000	18~14.5					OS13	12.8±1	P1200	15.3±1
W14	14~10	1200	14.5~11.5	600	16~13	M10	10~7	OS9	9.3±1		
		1500	11.5~8.9								
W10	10~7	2000	8.9~7.1	1000	9.3~8.6	M7	7~5	OS5	4.5±0.8		
		2500	7.1~5.9								
W7	7~5	3000	5.9~4.7								
W5	5~3.5										
通用		通用		磨具用		通用		磨具用		砂布(纸)用	

(5) 形成砂轮时的要求：当所用的结合剂为树脂、粘土等粘性较大材料时，应选粗粒度磨料，当所用的结合剂为铜、铸铁、陶瓷等硬脆性材料时，应选细粒度磨料。

此外，还应考虑砂轮大小，砂轮与工件的接触面积大小、加工余量、磨料材料等因素。

1.3 精密磨具和超精密磨削磨具

磨具可分为固结磨具和涂覆磨具两大类。

1.3.1 固结磨具

由于加工的要求、被加工材料等的不同，固结磨具分为普通磨料固结磨具和超硬磨料固结磨具两类，它们在结构上有所差异。

1. 普通磨料固结磨具

普通磨料固结磨具是由磨粒、结合剂和气孔等组成，裸露在表面上的磨粒棱角起切削作用，结合剂将磨粒粘接在一起，经过加压成形后烧结而具有一定的形状和强度，气孔在磨削中起容屑、容工作液和散热作用，其结构示意图如图 3-1 所示。某些特殊用途的固结磨具还要加一些特殊辅剂，如导电砂轮中要添加铜粉，使砂轮在磨削中能起导电作用适应电加工。

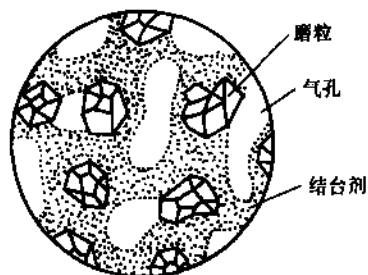


图 3-1 普通磨料固结磨具示意

普通磨料固结磨具中有磨料种类、磨料粒度、结合剂、组织、硬度、强度、形状和尺寸等问题，前已述及磨料，现分述其他。

(1) 结合剂及其选择 对于精密磨削和超精密磨削磨具，常用的结合剂分为有机结合剂和无机结合剂两大类。普通磨料固结磨具中，常用的结合剂有树脂、橡胶、陶瓷、菱苦土等，表 3-11 列出了它们的性能和应用范围。结合剂会影响磨具的结合强度、硬度、自锐性、化学稳定性、形状和尺寸的保持性、修整方法等。

(2) 组织及其选择 普通磨料固结磨具中磨料的含量用组织表示，它反映了磨料、结合剂和气孔三者之间体积的比例关系，组织紧密表示磨料所占体积大，气孔所占体积小；组织疏松表示磨料所占体积小，气孔所占体积大。

表 3-11 结合剂代号、性能及应用范围

类别	名称及代号 (GB 2484—84)	原 料	性 能	适 用 范 围
无机结合剂	陶瓷结合剂 V (A)	粘土、长石、硼玻璃、石英及滑石等	化学性能稳定，耐热，抗酸、碱，气孔率大，磨耗小，强度较高，能较好保持磨具的几何形状，但脆性较大	适用于内、外圆、无心、平面、螺紋及成形磨削以及刃磨、珩磨及超精磨等；适于对碳钢、合金钢、不锈钢、铸铁、有色金属以及玻璃、陶瓷等材料进行加工
	菱苦土结合剂 Mg (L)	氧化镁及氯化镁等	工作时发热量小，其结合能力次于陶瓷结合剂，有良好的自锐性，强度较低，且易水解	适于磨削热传导性差的材料及磨具与工件接触面较大的工件，还广泛用于石材加工

(续)

类别	名称及代号 (GB 2484—84)	原 料	性 能	适 用 范 围
有机 结 合 剂	树脂结合剂 B(S)	酚醛树脂或环氧树 脂等	结合强度高,具有一定的弹性, 能在高速下进行工作,自锐性能 好,但其耐热性、坚固性较陶瓷结 合剂差,且不耐酸、碱	适用于荒磨、切断和自由磨削, 如磨钢锭、打磨铸、锻件毛刺等; 可用于制造高速、低粗糙度、重负 荷、薄片切断砂轮,以及各种特殊 要求的砂轮
	橡胶结合剂 R(X)	合成及天然橡胶	强度高,弹性好,磨具结构紧 密,气孔率较小,磨粒钝化后易脱 落,但耐酸、耐油及耐热性能较 差,磨削时有臭味	适于制造无心磨导轮,精磨、抛 光砂轮,超薄型切割用片状砂轮以 及轴承精加工用砂轮

注:括号内代号为旧代号,见 GB 2484—81。

磨具组织的表示方法有两种,即磨粒率和气孔率。

磨粒率表示磨料在磨具体积中所占的百分数,它反映了磨具工作时单位工作面积可参加切削的磨粒数,表 3-12 表示了以磨粒率表示的磨具组织及其应用范围,共有 15 个组织号,在组织号 14 以外,还发展了大气孔砂轮,即在工艺配方中加入一定数量的碳粒或精萘,烧结时挥发后形成大气孔。

表 3-12 以磨粒率表示的磨具组织及其应用范围

组织号	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
磨粒率 (%)	62	60	58	56	54	52	50	48	46	44	42	40	38	36	34
适 用 范 围	重负荷磨削,成形、精密 磨削,间断磨削及自由磨 削,或加工硬脆材料等				无心磨、内、外圆磨和工 具磨,淬火钢工件磨削及刀 具刃磨等				粗磨和磨削韧性大、硬度不高的 工件,机床导轨和硬质合金刀具磨 削,适合磨削薄壁、细长工件,或 砂轮与工件接触面大以及平面磨削 等				磨削热敏 性较大的钨 钼合金、磁 钢、有色金 属以及塑料、 橡胶等非金 属材料		

注:根据国标 GB 2484—84。

气孔率表示气孔在磨具体积中所占的百分数,按其松紧程度分为高密度、中等密度和大气孔三类,如表 3-13 所示。

表 3-13 以气孔率表示的磨具组织及其应用范围

松紧程度	高 密 度	中 等 密 度	大 气 孔
气孔率 (%)	趋于 0	20~40	40~60 及 60 以上
应用范围	形状保持性好,磨削表面粗糙度值 低 适于重负荷磨削,成形磨削,精密 磨削,加工硬脆材料	适于一般磨削,淬火 钢磨削,刀具刃磨	磨削韧性大,硬度不高的材料 磨削热敏性大的材料(磁钢,钨钼合金等) 磨削有色金属和非金属材料(塑料,橡胶) 薄壁、细长工件磨削 大接触面平面磨削

(3) 硬度及其选择 普通磨料固结磨具的硬度是指磨粒在外力作用下, 自磨具表面脱落的难易程度。磨具硬度低表示磨粒易脱落。磨具的硬度和磨料本身的硬度是两个不同概念, 不要混淆。磨具硬度等级名称及其代号如表 3-14 所示。表 3-15 列出了主要国家磨具硬度代号对照表。

表 3-14 普通磨料固结磨具等级名称及其代号

硬度等级名称		代号 (GB 2484—84)
大 级	小 级	
超 软	超软 1 超软 2 超软 3	D E F
软	软 1 软 2 软 3	G H J
中 软	中软 1 中软 2	K L
中	中 1 中 2	M N
中 硬	中硬 1 中硬 2 中硬 3	P Q R
硬	硬 1 硬 2	S T
超 硬	超硬	Y

表 3-15 主要国家磨具硬度代号对照表

硬度级	国 别	中 国 GB 2484—		前苏联 ГОСТ	美 国 Norton	英 国	日 本 JIS	德 国 DIN 捷 克	
		84	81						
超 软	1	D		uM	A, B, C, D, E, F, G, H	E, F, G, H, I	E, F, G	E	
	2	E	CR	BM ₁				F, G	
	3	F		BM ₂					
软	1	G	R ₁	M ₁			H, I, J, K	H, I, J, K	H, I, J
	2	H	R ₂	M ₂					
	3	J	R ₃	M ₃					
中 软	1	K	ZR ₁	CM ₁	J, K, L	K, L	K, L		
	2	L	ZR ₂	CM ₂					
中	1	M	Z ₁	C ₁	I, J, K, L, M, N, O, P	M, N, O, P	L, M, N, O	M, N	
	2	N	Z ₂	C ₂					
中 硬	1	P	ZY ₁	CT ₁	Q, R, S, T, U, V, W, X, Y, Z	Q, R, S	P, Q, R, S	O, P, C	
	2	Q	ZY ₂	CT ₂					
	3	R	ZY ₃	CT ₃					
硬	1	S	Y ₁	T ₁	Q, R, S, T, U, V, W, X, Y, Z	Q, R, S	P, Q, R, S	R, S	
	2	T	Y ₂	T ₂					
超 硬	1			BT ₁	Y, Z	T, U, V, W, X, Y, Z	T, U, V, W, X, Y, Z	T, U	
	2			BT ₂					
	3	Y		CT ₁					
	4		CY	CT ₂					W, Z

选择磨具硬度时应考虑以下因素:

1) 精密磨削、超精密磨削、成形磨削时, 应选用较硬磨具, 以保持形状和尺寸精度; 对只要求低表面粗糙度值的镜面磨削等应选软或超软磨具。

2) 工件材料越硬, 磨具硬度选软些, 磨具自锐性好, 减小磨削温度以免产生烧伤。对有色金属、橡胶等软材料, 应选用较软磨具, 以免堵塞。对导热性差的材料, 磨具硬度应选低些, 使自锐性好、磨削热减少。

3) 磨削接触面大时, 宜用软磨具。磨削薄壁零件时, 磨具硬度选低些。磨削平面、内圆时比磨削外圆时的磨具硬度要低些。

4) 高速磨削、间断表面磨削、去毛刺磨削时应选硬度较高的磨具。

5) 细粒度磨具的硬度应选低些, 以免堵塞。

超硬磨料固结磨具中, 由于超硬磨料耐磨性高, 又比较昂贵, 一般多选用高硬度, 在其标志中, 无硬度项。

(4) 强度及其选择 磨具的强度是指磨具在高速回转时, 抵抗因离心力的作用而自身破碎的能力。为确保磨具工作时的安全, 对各种结合剂的磨具都规定了最高工作线速度, 如表 3-16 所示。

磨具的最高工作线速度 v_w 与破碎速度应保持一定比例, 以确保工作安全, 通常用安全系数 f_{se} 来表示。以砂轮为例, 其最高工作线速度在 60m/s 及其以下时, $f_{se} = 2$; 当 v_w 为 80m/s 时, 其 $f_{se} = 1.8$ 。因此, 砂轮在出厂时, 每个砂轮都要进行检验, 其检验速度 $v_e = f_e v_w$, f_e 为检验系数, 其值应略低于安全系数, 通常对 $v_w = 35 \sim 80\text{m/s}$ 的砂轮, f_e 均取值为 1.6。

影响磨具强度的因素很多, 主要有结合剂、磨料的粒度, 磨具的组织、硬度、形状、不平衡值和制作质量, 以及磨具的使用条件等。

表 3-16 普通磨料固结磨具的最高工作线速度 (m/s)

磨具名称	代 号	最高工作线速度		
		陶瓷结合剂	树脂结合剂	橡胶结合剂
平形砂轮	P	35	40	35
弧形砂轮	PH	35	40	—
双斜边砂轮	PSX1-3	35	40	—
单斜边砂轮	PDX1-2	35	40	—
单面凸砂轮	PDT	35	—	—
单面凹砂轮	PDA	35	40	35
单面凹带锥砂轮	PZA	35	40	—
双面凹砂轮	PSA	35	40	35
双面凹带锥砂轮	PSZA	35	40	—
筒形砂轮, 筒形带槽砂轮	N, NC	25	30	—
杯形砂轮	B	30	35	—
碗形砂轮	BW	30	35	—
碟形砂轮	D1-3	30	35	—
磨量规砂轮	JL	30	30	—
磨针砂轮	JZ	25	—	—
薄片砂轮	PB	35	50	50
磨转子槽砂轮	PB	35	35	—
螺钉紧固平形砂轮	PL	—	35	—
铍形砂轮	JB	—	60~80	—
丝锥抛光砂轮	P	—	—	20
板牙抛光砂轮	P	—	—	20
石墨抛光砂轮	P	—	30	—
镜面磨砂轮	P	—	25	—
柔性抛光砂轮	P	—	—	23
磨螺纹砂轮	P	50	50	—
高速砂轮	—	50~60	50~60	—
磨皮辊砂轮	P	30	30	—
棕刚玉 30 [#] 及更粗、中及更硬砂轮	—	40	40	—
磨 头	—	25	25	—
砂 瓦	—	30	30	—

注: 根据 GB 2494—84。

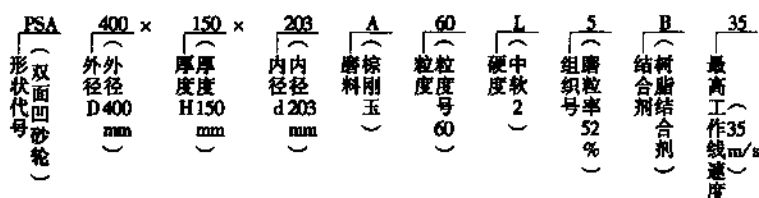
(5) 形状和尺寸选择 普通磨料固结模具主要有砂轮、磨头、油石和沙瓦等, 其名称、代号、形状及基本用途可查阅国家标准 GB 2484—84 和 GB 4127—84。对于砂轮, 其系列及其代号有: 平形系列(P)、筒形系列(N)、杯形系列(B)、碟形系列(D)、专用系列(J); 磨头的代号为 M, 油石的代号为 S、沙瓦的代号为 W。有关磨具形状和尺寸选择主要应根据所用机床、加工工件的情况而定, 应注意以下几点:

1) 砂轮的直径应考虑最高工作线速度。

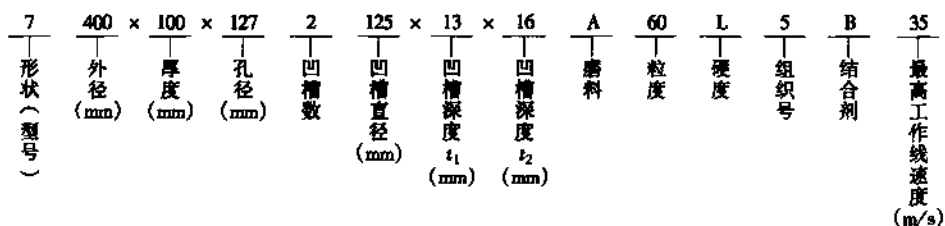
2) 砂轮的宽度选择可考虑具体情况, 机床刚度好, 动力大, 工件刚度好, 可用较宽砂轮, 加工细长件、薄壁件应选择较窄砂轮。

3) 磨具的系列、形状主要根据工件形状和要求来选择。

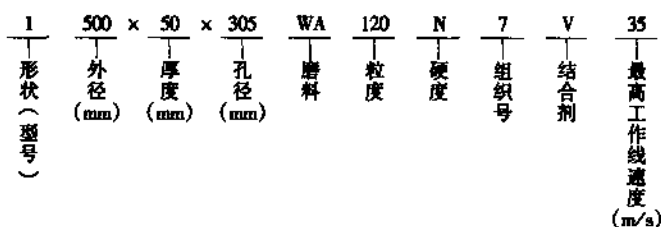
(6) 标志 普通磨料固结磨具的标志按国标 GB 2484—84 规定, 其书写顺序为: 磨具形状、尺寸、磨料、粒度、硬度、组织、结合剂、最高工作线速度。下面为一砂轮标志示例:



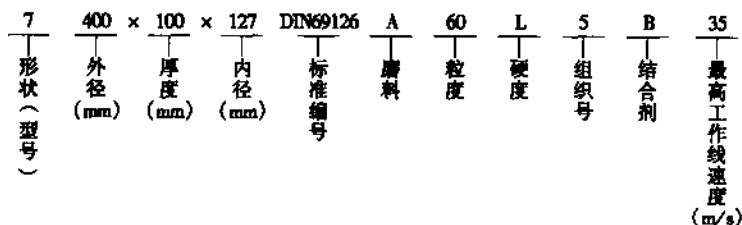
国际标准 ISO 普通磨具标志示例:



日本标准 JIS 普通磨具标志示例:



德国标准 DIN 普通磨具标志示例:



2. 超硬磨料固结磨具

超硬磨料固结磨具与普通磨料固结磨具在结构上有所不同, 一般由磨料层、过渡层和基体三部分组成, 其结构如图 3-2 所示。磨料层有磨料种类、磨料粒度、结合剂、浓度、断面形状、在基体上的位置等问题; 过渡层的作用是使磨料层与基体更好地连接在一起, 为了结构简

单,不少厂家取消了过渡层,根据结合剂选用相应基体材料或采用嵌套结构,将磨料层直接固接在基体上;基体与机床工作主轴相连,其材料随磨料层的结合剂而异,通常金属结合剂磨具采用钢或铜合金,树脂结合剂磨具采用铝、铝合金或电木,陶瓷结合剂磨具则多采用陶瓷。

有关超硬磨料的种类、粒度前已述及,现分别论述磨料层的其他问题,基体和磨具总体形状、标志等问题。

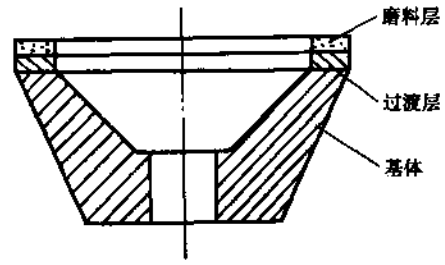


图 3-2 超硬磨料固结磨具结构

(1) 结合剂及其选择 超硬磨具结合剂常用的有树脂、陶瓷、金属 3 类,其中金属结合剂又有青铜、电镀金属和纤维铸铁几种,其结合能力和耐磨性能的强弱依次为树脂、陶瓷、青铜、电镀金属、纤维铸铁。有关各种结合剂的代号、性能和应用范围如表 3-17 所示。

表 3-17 各种结合剂代号、性能和应用范围

类别、名称、代号	材 料	性 能	应用范围	
有机结合剂	树脂结合剂 B	酚醛树脂 环氧树脂	自锐性能好,不易堵塞 有弹性,抛光性能好 结合强度差 耐磨性、耐热性差 不耐酸碱	金刚石磨具用于硬质合金和非金属材料 的半精磨、精磨 立方氮化硼磨具用于高速钢、工具 钢,不锈钢、耐热合金钢的半精磨、 精磨
	无机结合剂	陶瓷结合剂 V	粘土 长石 石英 滑石 硼玻璃	化学稳定性高,耐热、耐酸碱 结合强度高,几何形状保持性好 工作时不易发热及堵塞 磨具易修整 脆性较大
金属结合剂 M		青铜	结合强度较高,形状保持性好,使用 寿命长 自锐性差,易发热	金刚石磨具用于非金属硬脆材料的 粗、精磨、切割、成形磨 立方氮化硼磨具用于黑色金属、合 金钢等材料的磨削
		电镀金属	结合强度更高 表层磨粒密度较高,等高性好,刃 口锐利,磨削质量好,效率高 镀层较薄,使用寿命短	用于成形磨削 小孔磨削 钳工用金刚石油石
	纤维铸铁	结合强度最高,形状保持性好,使用 寿命长 有一定韧性 自锐性比青铜好	金刚石磨具用于非金属硬脆材料磨 削 立方氮化硼磨具用于黑色金属、合 金钢等材料的磨削	

(2) 浓度及其选择 超硬磨具中磨料的含量用浓度表示,与普通磨具用组织表示有所不同,这主要是由于超硬磨料耐磨性好,寿命长,价格昂贵。浓度是指磨料层中每 1cm^3 体积中所含超硬磨料的重量 ct 值,浓度越高,其含量越多。浓度用浓度代号标志,浓度值与磨料含量的关系如表 3-18 所示。

表 3-18 超硬磨料固结磨具浓度值与磨料含量的关系

浓度代号	浓度 (%)	磨料含量 / (ct/cm ³)	磨料在磨料层中所占体积 (%)	备注
25	25	1.1	6.25	ct 为 carat 中文名克拉 1ct = 0.203g
50	50	2.2	12.50	
75	75	3.3	18.75	
100	100	4.4	25.00	
150	150	6.6	37.50	
200	200	8.8	50.00	

浓度直接影响磨削质量、效率和加工成本，选择时应综合考虑磨料种类、粒度、结合剂、磨削方式、质量和生产率等因素。对于人造金刚石磨料，树脂结合剂磨具的常用浓度为50%~75%，陶瓷结合剂磨具为75%~100%，青铜结合剂磨具为100%~150%，电镀金属、纤维铸铁磨具为150%~200%。对于立方氮化硼磨料，树脂结合剂磨具的常用浓度为100%，陶瓷结合剂磨具为100%~150%，电镀金属、纤维铸铁磨具为150%~200%，一般都比人造金刚石磨具的浓度要高一些。

总的来说，成形磨削、沟槽磨削、宽接触面平面磨削选用高浓度；半精磨、精磨选用中粒度、中浓度；高精度、低表面粗糙度值的精密磨削和超精密磨削选用细粒度、低浓度，甚至低于25%，这主要考虑磨削时的堵塞和发热问题。

(3) 形状和尺寸的选择 超硬磨具的尺寸和形状涉及磨具断面形状、磨具基体基本形状、磨料层断面形状、磨料层在基体上的位置、基体改型等问题。图 3-3 表示了几种超硬磨料固结磨具的形状和尺寸。

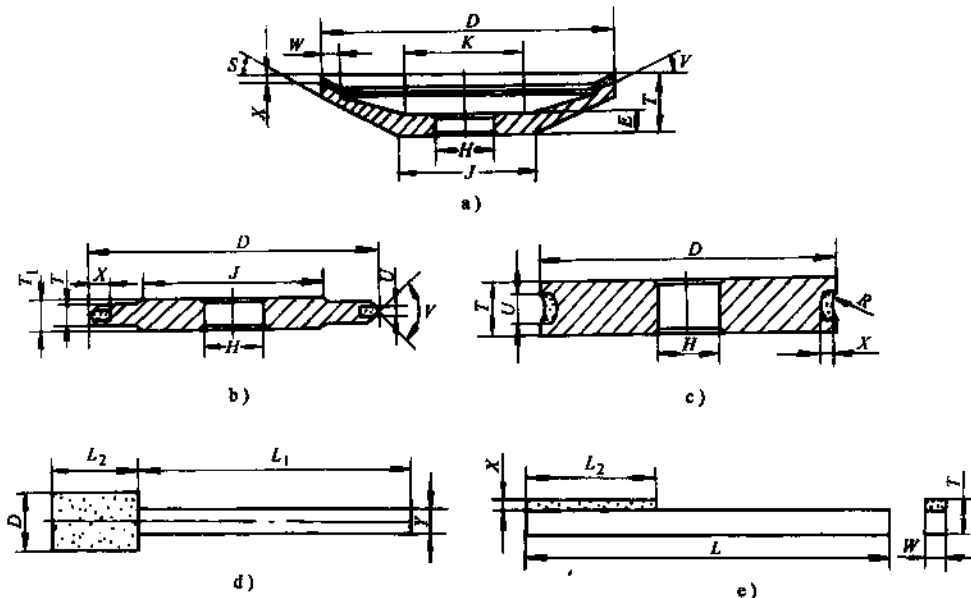
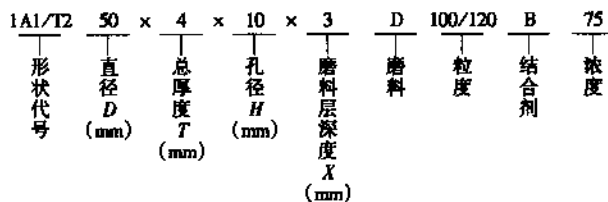


图 3-3 几种超硬磨料固结磨具的形状和尺寸

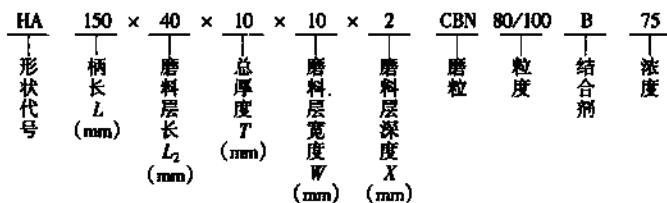
- a) 碟形砂轮 b) 平行砂轮 c) 成形砂轮 d) 带柄油石 e) 带柄油石
 D —直径 E —孔处厚度 H —孔径 J —台径 K —凹面直径 L —柄长
 L_1 —轴长 L_2 —磨料层长度 R —半径 S —基体角度 T —总厚度
 T_1 —基体厚度 U —磨料层厚度(当小于 T 或 T_1 时) V —磨料面角度
 W —磨料层宽度 X —磨料层深度 Y —心轴直径

(4) 标志 超硬磨具标志的书写顺序为：形状、尺寸、磨料、粒度、结合剂和浓度等。

某一平形砂轮的标志示例如下：



某一带柄油石的标志示例如下：



1.3.2 涂覆磨具

涂覆磨具是将磨料用粘接剂均匀地涂敷在纸、布、化纤或其他复合材料等基底上的磨具，又称涂敷磨具，其结构示意图见图 3-4。

(1) 涂覆磨具分类 根据涂覆磨具的形状、基底材料、工作条件和用途等，其分类如表 3-19 所示。



图 3-4 涂覆磨具结构示意图

1—磨粒 2—粘接剂(覆胶) 3—粘接剂(底胶) 4—粘接膜 5—基底

表 3-19 涂覆磨具的分类、代号、产品

涂覆磨具	形	<ul style="list-style-type: none"> —页状(Y)：砂纸、砂布、砂布页轮 —卷状(J)：砂带 —带状(D)：砂布套、环状砂带(有接头、无接头) —盘状(P)：刚纸砂盘(磨片)
	基底材料	<ul style="list-style-type: none"> —纸(Z)：牛皮纸、耐水牛皮纸、刚纸 —棉布(B)：粗布、细布、平纹布、帆布 —化纤(H)：碳化纤维布 —塑料膜(S)：聚碳酸酯 —复合(F)：纸布、夹层网格布
	工作条件	<ul style="list-style-type: none"> —干磨(G)：干磨砂布 —耐水(N)：耐水砂纸
	工件材料	<ul style="list-style-type: none"> —金属：钢、铁、铜、铝 —硬脆材料：石材、玻璃、陶瓷 —软性材料：皮革、塑料、橡胶、木材

(2) 涂覆磨料 常用的涂覆磨料有普通磨料和超硬磨料两大类,如棕刚玉、白刚玉、铬刚玉、锆刚玉、黑色碳化硅、绿色碳化硅、氧化铁、人造金刚石、立方氮化硼等,与固结磨具基本相同。

(3) 涂覆磨料的粒度 与普通磨料粒度相近似,但无论是磨粒还是微粉,一律用冠以 P 字的粒度号表示,表 3-20 列出其对照表,同时也列出了砂纸、砂布的粒度旧代号。

表 3-20 涂覆磨料的粒度及其对照表

涂覆磨具磨料 粒度号 (JB3630—84)	普通磨料 粒度号 (GB2477—83)	干磨砂布粒度 旧代号	耐水砂纸粒度 旧代号
P16	16		
P20	20		
	22		
P24	24	4	
P30	30		
P36	36	3½	
	40	3	
P40	46	2½	
P50	54		
P60	60	2	
P70	70		80
P80	80	1½	100、120
	90		
P100	100	1	150
P120	120	0	180、220
P150	150	2/0	240、260
P180	180	3/0	280、300
P220	220		320
P240	240		
	W63	4/0	360
P280			400
P320	W50	5/0	500
P360			600
P400	W40		700
P500			
P600	W28		800
P800			
P1000	W20		
P1200			

(4) 粘接剂 粘接剂又称为胶,其作用是将砂粒牢固地粘接在基底上,有些粘接剂是起耐热、耐潮、抗静电等作用。

根据涂覆磨具基底材料、工作条件和用途等不同,粘接剂可分为粘接膜、底胶、覆胶和超涂层几种,可参考图 3-4。

1) 粘接膜 当基底材料为聚酯、硫化纤维时,要在聚酯薄膜、硫化纤维布上预先涂上一层粘接膜,使底胶能与基底牢固粘接。对于基底材料为纸、布等,其粘接性能好,不必预涂粘接膜。

2) 底胶 底胶一般与磨粒混在一起,一般要求粘接性能好,是涂覆磨具的主要粘接剂。

为了使磨粒均匀地分布在其底上，磨粒与底胶要严格地混合在一起。

3) 覆胶 为了使涂覆磨具性能更好，可在底胶上涂敷一层耐热、耐潮、富有弹性的覆胶，形成双层粘接剂结构。但大多数一般的涂覆磨具都是单层胶。

4) 超涂层粘接剂 在覆胶层上再涂敷一层具有特殊性能的超涂层粘接剂。如①抗静电超涂层粘接剂，可避免砂带背面与支承物之间产生静电而附着切屑粉尘；②抗堵塞超涂层粘接剂，是一种以金属皂为主的树脂，可避免砂带表面堵塞；③抗氧化分解超涂层粘接剂，由高分子材料和抗氧化分解活性材料所组成，加工中有冷却作用，可提高涂覆磨具的耐用度和被加工工件表面质量。

各类粘接剂的名称、性能、应用范围如表 3-21 所示。

表 3-21 各类粘接剂的名称、性能及其应用范围

种类和代号		性能	应用范围
动物胶 G	皮胶 明胶 骨胶	粘接性能好 价格便宜 溶于水，易受潮，耐热性差，稳定性受环境影响	轻切削的干磨和油磨 非金属品加工 金属材料抛光
树脂 R	醇酸树脂 胺基树脂 尿醛树脂 酚醛树脂 油漆	粘接性能好 耐热、耐水或耐湿 有弹性 易溶于有机溶液 有些树脂成本较高	重负荷磨削 难磨材料或复杂形面的磨削或抛光
高分子化合物	聚酯酸乙稀酯	粘接性能好 耐水或耐湿 有弹性 成本较高	精密磨削

对于双层粘接剂结构的涂覆磨具，其粘接剂代号用底胶/覆胶表示，如 R/G 表示树脂/动物胶，G/G、R/R 分别表示全胶、全树脂。

(5) 涂覆方法 涂覆磨具的涂覆方法是影响其质量的重要因素之一，不同品种的涂覆磨具可采用不同的涂覆方法，以满足其使用要求。当前，磨料、粘接剂涂敷在基底上的方法可归纳为重力落砂法、涂敷法和静电植砂法等几种，如图 3-5 所示。

1) 重力落砂法 先将粘接剂均匀地涂敷在基底上，再靠重力将磨料均匀地喷洒在涂层上，经烘干、去除浮面磨料后即成卷状砂带，整个过程自动进行。这种砂带的质量一般。

2) 涂敷法 先将磨料与粘接剂均匀地混合在一起，然后利用胶辊将磨料与粘接剂的混合物均匀地涂敷在基底上，再经烘干后即成卷状砂带。这种方法的关键是均匀地混合和涂敷，粘接剂与磨料的混合多用球磨机，而涂敷多用类似印刷机的多胶辊涂敷机。这种方法可生产出质量上乘的砂带，精密加工和超精密加工中用的涂覆磨具、基底材料为聚酯的砂带等都用这种涂覆方法。通常所使用的磁带、照相胶卷也多用这种方法。对于小量生产纸质材料基底的砂带，则可以直接用喷枪将磨料与粘接剂的混合物喷涂在基底上，其质量要差一些。

3) 静电植砂法 其原理是利用静电作用将磨料吸附在已涂胶的基底上，再经烘干形成卷状砂带。由于静电作用，这种砂带上的磨料尖端朝上，具有很好的切削性和等高性，加工质量好，受到广泛采用。

(6) 涂覆磨具产品 涂覆磨具的产品有砂带、砂布、砂纸、高速刚纸砂盘、砂布页轮、砂

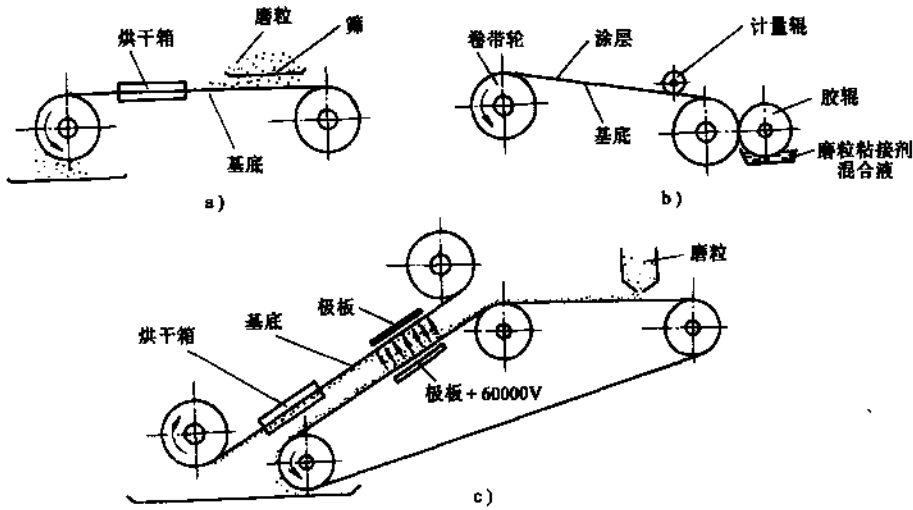


图 3-5 涂覆磨具涂覆方法示意图

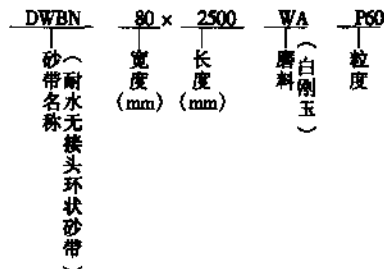
a) 重力落砂法 b) 涂敷法 c) 静电植砂法

布套等。

1) 砂带 一般涂覆磨具生产的是像布匹宽度的卷状砂带，再裁剪成规格宽度和规格长度。ZB J43 003—88 标准规定，宽度为 15 ~ 2240mm，共 37 种，长度为 400 ~ 12500mm，共 25 种，有宽《与长组合选择。另外，也可以生产出环状砂带，无接头，其宽度和长度也有标准规定，宽度为 10 ~ 600mm，共 23 种，长度为 913 ~ 3200mm，共 6 种，而且也有宽与长组合选择。

砂带按形状可分为卷状砂带和环状砂带两类，其中环状砂带又分为有接头和无接头两种。无接头的环状砂带其基底呈环状，在其上涂敷磨料和粘接剂；有接头的环状砂带是由一定宽度和长度的砂带，将其两端接起来而形成环状，其接头方法有：直接接头法（搭接法、对接法）、S 形接头法、焊接接头法等。焊接法一般以尼龙聚酰胺作焊接材料，在热压合成机上将焊料加热至液态，浇注到接口之间进行压合。无接头环状砂带工作时运转平稳，但有规格限制，不如有接头的方便。

砂带的标志按砂带名称、尺寸（宽×周长）、磨料、粒度的顺序书写，如无接头的环状砂带的标志示例如下：



2) 干磨砂布 有密植和稀疏两种布砂形式，前者用于金属加工，后者主要用于木材、皮革、橡胶加工。干磨砂布呈页状，由宽幅砂带剪裁而成。

3) 耐水砂纸 用于金属、非金属各种材料加工,呈页状,由砂带剪裁而成。

4) 高速刚纸砂盘 又称高速刚纸磨片,是用优质硫化纤维作基底、高强度耐热树脂为粘接剂,配以各种磨料及其粒度,制成圆形薄片状的磨具,利用手提磨机上高速旋转的端面进行磨削或抛光,效率高、适应性强。

5) 砂布页轮 页轮是由页状砂布自轴心呈辐射方向伸出,构成轮状的一种磨具,用于磨削、修整和抛光等,效率高、使用方便。

6) 砂布套 又称砂布圈或砂套,为一圆筒状的无接头砂布磨具,适用于对大型轴瓦的刮研,锋利耐用、效率高。

7) 砂布轮 在一可张紧的轮上套上相应周长的环状砂带,撑紧后就形成砂布轮,其用途与砂轮相同,钝化后可更换砂带,效率高,使用方便。

8) 金相磨片砂盘 将圆形细粒度耐水砂纸紧绷上一垂直轴金属盘的端面上,形成砂盘,可磨削和抛光金相试件。

2 普通磨料砂轮精密磨削

2.1 精密磨削及其机理

精密磨削是指加工精度为 $1 \sim 0.1 \mu\text{m}$ 、表面粗糙度达到 $R_a 0.2 \sim 0.025 \mu\text{m}$ 的磨削方法,也可称之为低粗糙度磨削。它又分为普通磨料砂轮和超硬磨料砂轮精密磨削两大类,前者通常是指用普通磨料砂轮在普通工作环境下进行的精密磨削,多用于加工主轴、导轨、轴承、丝杠、齿轮、液压元件等精密零件,为论述方便,简称精密磨削。

精密磨削是在精密磨床上,选择细粒度砂轮,并通过修整砂轮的精细修整,使磨粒具有微刃性和等高性,磨削后,使被磨削表面所留下的磨削痕迹极其微细、残留高度极小,再加上无火花磨削阶段的作用,获得高精度和低表面粗糙度的表面。因此,精密磨削机理可归纳为以下几方面:

(1) 微切削作用 采用细粒度砂轮,用极小的修整导程(砂轮轴向),即纵向进给量和修整深度精细修整砂轮,使磨粒表面微细破碎而产生微刃,如图 3-6 所示。从而,一颗磨粒就形成了多颗磨粒,使磨粒变细,造成了微切削作用,得到了低粗糙度表面。

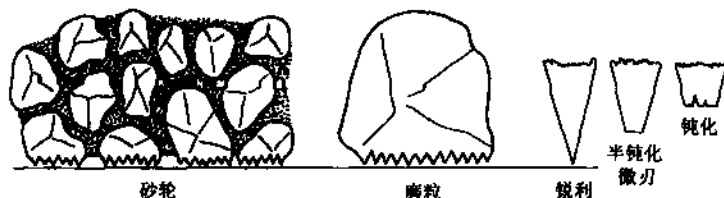


图 3-6 磨粒的微刃性和等高性

(2) 滑挤、摩擦、抛光作用 砂轮修整得到的微刃开始比较锐利,切削作用较强,随着磨削时间的增加而逐渐钝化,同时,等高性得到改善。这时,切削作用减弱,滑挤、摩擦、抛光作用加强。同时,磨削区的高温使金属软化,钝化微刃的滑挤和挤压将工件表面的凸峰辗平,降低了表面粗糙度。

(3) 微刃的等高切削作用 砂轮精细修整所形成的微刃,分布在砂轮表层上,具有很好的

等高性，从而使加工表面的磨削残留高度极小，且均匀而无过深的划痕，降低了表面粗糙度。

影响精密磨削的因素很多，主要有砂轮的磨粒材料、粒度、结合剂、组织、硬度等选择，砂轮的修整方法，精密磨床的砂轮主轴精度、工作台导轨精度等几何精度、刚度和热变形，被加工材料和磨削用量的选择等。

2.2 精密磨削砂轮选择

精密磨削的砂轮选择可参考表 3-22 所示。一般选择原则如下：

表 3-22 精密磨削的砂轮选择

砂 轮					被加工材料
磨粒材料	粒 度	结合剂	组 织	硬 度	
白刚玉(WA)	粗 60 [#] ~ 80 [#] 细 240 [#] ~ W7	树脂(B) 陶瓷(V) 橡胶(R)	密 分布均匀 气孔率小	中软(K、L) 软(H、J)	淬火钢、铸铁
铬刚玉(PA)、棕刚玉(A)					15Cr、40Cr、9Mn2V
绿碳化硅(GC)					工具钢 38CrMoAl 有色金属

1) 在磨削钢件及铸铁件时，采用刚玉磨料较好，因为刚玉磨料韧性较好，能保持微刃性和等高性。而碳化硅磨料韧性较差，颗粒为针片状，砂轮修整时难以形成等高性好的微刃，且磨削时微刃易产生细微碎裂，影响等高性，故适于加工软金属。在刚玉类磨料中，以单晶刚玉最好，白刚玉、铬刚玉应用最普遍。

2) 砂轮的粒度可选择粗粒度和细粒度两类。粗粒度砂轮主要靠精细修整使磨粒有微刃性和等高性；这时，微刃切削作用是主要的，修整质量非常关键。细粒度砂轮经过精细修整，不仅有很好的微刃性和等高性，而且其半钝态微刃在适当压力下与工件表面的滑擦抛光作用比较明显，砂轮的耐用度高，所得到的磨削质量更好，但对于微粉砂轮，要考虑其切屑堵塞问题。

3) 结合剂的选择中，以树脂类较好。如果加入石墨填料，则可加强摩擦抛光作用。近年来出现了采用聚乙烯醇乙缩醛新型树脂加上热固性树脂作结合剂的砂轮，有良好的弹性，抛光效果较好。对于粗粒度砂轮，也可用陶瓷结合剂，磨削效果也较好。

此外，对于精密磨削，砂轮的組織应采用高密度，易于保持形状精度。同时可配选较软的硬度，以便有一定的砂轮自锐性。

在精密磨削中，采用细粒度砂轮对提高表面质量的效果比较明显，但磨削中易产生切屑堵塞等问题。因此，提出了细粒度磨料粗化措施，即先将细粒度磨料与结合剂混合形成大颗粒磨粒，再将大颗粒磨粒与结合剂混合形成砂轮，如图 3-7 所示，从而解决了砂轮细粒度与容屑空间的矛盾，细粒度磨料所形成的的大颗粒磨粒经过修整后可得到很好的微刃性与等高性。但砂轮制作工艺比较复杂。



图 3-7 细粒度磨料的大颗粒磨粒砂轮结构

1—细粒度磨料 2—结合剂 3—气孔 4—大颗粒磨料 5—结合剂

2.3 精密磨床

精密磨削应在相应的精密磨床上进行。按照我国机床分类，从精度上分为普通精度机床、精密机床和高精度机床 3 类。其中，精密磨床属精密机床。磨床从类别上分为 M

(外圆磨床、内圆磨床、平面磨床等)、2M(超精机、珩磨机、抛光机、砂带抛光及磨削机床、研磨机等)、3M(轴承、滚子、钢球、气门等磨削机床)3个分类。从机床特性代号有:高精度(G)、精密(M)、自动(Z)、半自动(B)、数控(K)、加工中心(H)等。因此,精密磨床的特性代号应为MM,而MG应为高精度磨床,可属于超精密磨床一类。

精密磨削时所用的精密磨床应注意满足以下要求。

(1) 高几何精度 精密磨床应有高几何精度,主要有砂轮主轴回转精度、工件主轴回转精度、导轨平直度等,以保证工件的形状及位置精度要求。主轴轴承可采用气体或液体静压轴承,这些轴承精度高,而刚度低些;可采用短三块瓦或长三块瓦油膜轴承、整体多油楔式动压轴承,这些轴承有较大刚度,而精度不及静压轴承。新近出现的动静压组合轴承,具有精度高、转速高、刚度好等综合特点,适用于功率大的精密磨床。精密磨床主轴的径向圆跳动一般应小于 $1\ \mu\text{m}$,轴向圆跳动应限制在 $2\sim 3\ \mu\text{m}$ 以内。

导轨可采用滑动导轨,为了减小摩擦,提高运动平稳性,可用减摩塑料贴在滑动导轨面上;对于承载较大的主运动导轨可采用动压导轨;还可以采用卸荷导轨以减轻导轨负荷,提高导轨耐磨性和低速运动的平稳性,减小爬行,提高运动精度。其卸荷方式有液压、气压和机械等;静压导轨包括气体静压导轨和液体静压导轨在精密和超精密机床中应用比较普遍,其特点是导轨基本上无磨损,精度高、精度保持性好、低速运动平稳、均匀,但从刚度上考虑,液体静压导轨比气体静压导轨要高些;滚动导轨也是常用的导轨,其摩擦因数小,可通过加预载提高刚度,但结构较复杂,吸振能力低,制造精度要求高。精密磨床所用导轨的直线度一般为 $1/1000000\sim 2/1000000$ 。

(2) 低速进给运动的稳定性 精密磨床进给系统运动的精度和稳定性会直接影响工件的精度和表面粗糙度。同时,由于砂轮的修整导程要求 $10\sim 15\text{mm}/\text{min}$,因此,工作台必须低速进给运动,要求无爬行和无冲击现象,能平稳工作。这就要求对机床工作台进给运动的液压系统进行特殊设计,采用性能优良的低流量节流阀、严格排除液压管路和元件中的空气,工作台导轨采用液体静压或滚动结构,或进行强制润滑,以减小摩擦力,保证工作台低速运动的平稳性。

对于机床横向进给,其主要影响加工精度,应保证其运动的准确性和平稳性,为了提高加工精度,有时在砂轮头架进给方向上配置了相应精度要求的微进给机构。

(3) 高抗振性 精密磨削时如果机床的刚度不高,隔振防振措施不当,磨削用量选择不合适等,都会产生振动,严重影响加工质量。从机床结构上应考虑一些减振措施,如机床回动运动部件应进行动平衡,包括主轴部件、电机转子、砂轮等都应进行动平衡或精细静平衡;主电动机与砂轮架之间应垫以硬橡胶或木块进行隔振,最好是与机床脱开,分离安装在地基上。精密磨床应安装在防振地基上,以防止外界干扰,如果没有防振地基,应在机床和地面之间加上防振垫。

2.4 精密磨削时的砂轮修整

砂轮修整是精密磨削的关键,也是其特色所在,修整方法有单粒金刚石修整、金刚石粉末烧结型修整器修整和金刚石超声波修整等,如图3-8所示。

一般修整时,修整器应安装在低于砂轮中心 $0.5\sim 1.5\text{mm}$ 处,并向上倾斜 $10^\circ\sim 15^\circ$,使金刚石受力小,使用寿命长。同时,金刚石的修整位置应与砂轮磨削时的位置相当,如果相差太大,则可能因砂轮架导轨扭曲所造成的平直度误差,使得在磨削时出现单面接触,影响被磨削表面的粗糙度,甚至产生螺旋形等缺陷,金刚石修整器修整时的位置如图3-9所示。

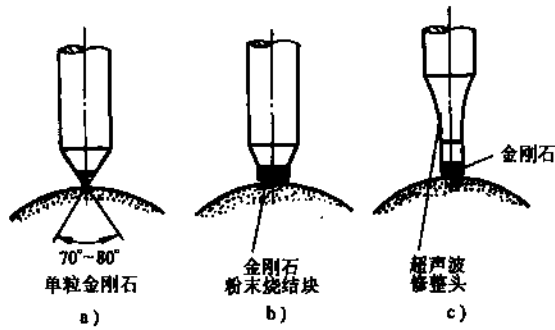


图 3-8 精密磨削时的砂轮修整

a) 单粒金刚石修整 b) 金刚石粉末烧结型修整器修整 c) 金刚石超声波修整

金刚石超声波修整又分为点接触法和面接触法两种，点接触法的修整器，其金刚石是尖顶的，面接触法的修整器，其金刚石是平顶的，在超声波作用下，金刚石的一个小平面与磨粒接触，接触应力小，磨粒上不易产生裂纹，且易形成等高性很好的微刃，由于超声波的作用，修整的效率也比较高。

砂轮的修整用量有修整导程、修整深度、修整次数和光修次数等。修整导程即工作台速度，又称纵向进给量，其单位为砂轮每转进给量(mm/r)或每分钟进给量(mm/min)，它对工件表面粗糙度的影响较大，图 3-10 表示了当修整深度为每单行程(st)0.005 mm，砂轮为 WA60KV 时，修整导程对工件表面粗糙度的影响，可见修整导程越小，工件表面粗糙度值越低。一般为 10~15mm/min，若过小，则工件易烧伤和产生螺旋形等缺陷。修整深度对工件表面粗糙度的影响如图 3-11 所示，可见修整深度越小，工件表面粗糙度值越低，一般修去 0.05 mm 就可恢复砂轮的切削性能。

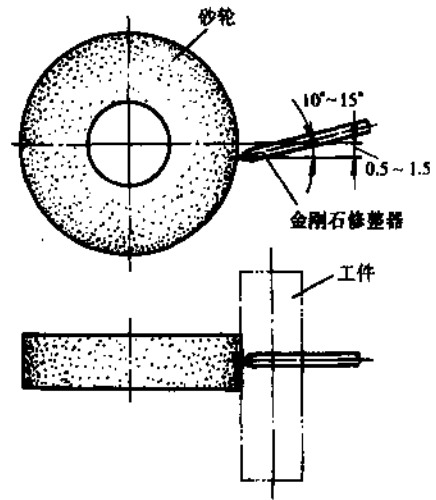


图 3-9 金刚石修整器修整砂轮时的安装位置

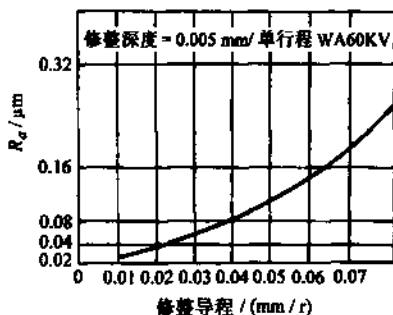


图 3-10 修整导程对工件表面粗糙度的影响

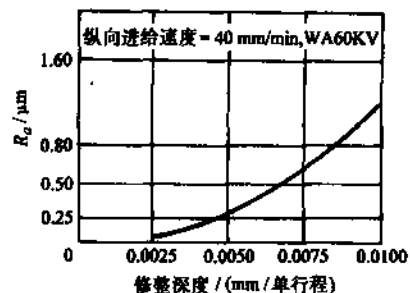


图 3-11 修整深度对工件表面粗糙度的影响

修整时，一般可分为初修与精修，初修用量可大些，逐次减小，一般精修需修 2~3 次单行程。最后为光修，它是无修整深度修整，主要是为了去除砂轮表面个别突出微刃，使砂轮表面更加平整，其次数一般为 1 次单行程。

精密磨削时的砂轮修整用量见表 3-23。

表 3-23 精密磨削时的砂轮修整用量

修整参数	修整用量
砂轮线速度/(m/s)	12~20
修整导程/(mm/min)	10~15
修整深度/ μm	2.5~5
修整次数(单行程)	2~3
光修(单行程)	1

2.5 精密磨削时的磨削用量

精密磨削时的磨削用量可参考表 3-24。

表 3-24 精密磨削时的磨削用量

磨削用量		数值
砂轮线速度/(m/s)		32
工件线速度/(m/min)		6~12
工件纵向进给量/(mm/min)		50~100
吃刀量(磨削深度)/ μm		0.6~2.5
走刀次数(单行程)		1~3
无火花磨削次数 (单行程)	粗粒度砂轮	5~6
	细粒度砂轮	5~15
磨削余量/ μm		2~5

(1) 砂轮速度 一般在 15~30m/s，砂轮速度进一步提高时，其切削作用增强，摩擦抛光作用减弱，对表面粗糙度不利。同时，砂轮速度高时磨削热会增加，机床易产生振动，可能使被加工表面产生烧伤、波纹、螺旋形等缺陷，因此砂轮速度取低一些为好。

(2) 工件速度 一般为 6~12m/min，工件速度较高时，易产生振动，工件表面可能有波纹；工件速度较低时，工件表面易产生烧伤和螺旋形等缺陷。视工件材料不同，砂轮速度与工件速度的比值可在 120~150 之间选取。

(3) 工件纵向进给量 由于砂轮经过精细修整，其切削能力有所减弱，因此，工件纵向进给量不宜过大，否则会使工件表面的粗糙度值增大，产生烧伤、螺旋形、多角形等缺陷，一般为 50~100mm/min 或 $0.06\text{mm}/r_w \sim 0.5\text{mm}/r_w$ 。

(4) 磨削深度(吃刀量) 由于砂轮经过精细修整有微刃性，因此磨削深度不能超过微刃高度，一般取 0.6~2.5 μm /单行程。

(5) 走刀次数 由于磨削余量一般为 2~5 μm ，故走刀次数一般为 2~3 个单行程。

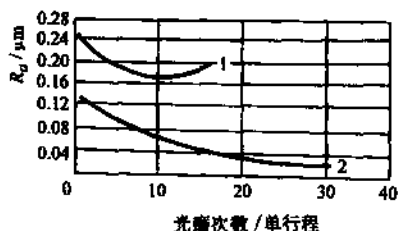


图 3-12 光磨次数对工件表面粗糙度的影响

1—粗粒度砂轮(PA60KV) 2—细粒度砂轮(WA/GCW10KR)

(6) 无火花磨削 又称光磨，其次数的确定主要是使磨床相关部件的弹性变形得以充分恢复，磨粒的微刃性的微切削、摩擦、抛光等作用得以充分发挥。用粗粒度砂轮(60[#]~80[#])精细修整后进行精密磨削时，光磨次数视加工表面粗糙度的要求不同可取5~10次单行程；用细粒度砂轮(240[#]~W7)精细修整后进行精密磨削时，光磨次数可取10~25次单行程。图3-12表示了光磨次数对工件表面粗糙度的影响。

2.6 精密磨削时的砂轮平衡

砂轮精密磨削时，砂轮平衡是一个重要问题，无论是普通磨削、精密磨削和超精密磨削都是须要进行砂轮平衡的，但显然在精密和超精磨削时，砂轮的平衡要求更高。

砂轮平衡主要影响磨削时的加工稳定性、机床精度的保持性、磨削表面质量和磨削精度等。砂轮平衡不好时，磨削过程中易产生振动，使加工表面上形成波纹，影响表面粗糙度，严重时会造成工作不平稳，甚至不能工作，涉及安全工作问题。因此，也是安全生产之必须。

砂轮的平衡方法可分为静平衡和动平衡两种类型。有机外、机内平衡两种方式。

2.6.1 静平衡

静平衡是力矩平衡，是在一个平面上的平衡，主要用于单个窄砂轮的平衡，属于静平衡类型范畴的方式有以下3种。

1. 机外静平衡架上平衡

利用静平衡工具，在机外由手工进行平衡工作，是最常用最简单的一种平衡方法，应用广泛。

静平衡工具主要有静平衡架和砂轮平衡心轴，先将待平衡的砂轮装在相应的法兰盘上，再将法兰盘装在平衡心轴上，成为一体，安装在静平衡架上进行平衡。砂轮孔与法兰盘应有0.1~1.2 mm的间隙要求，随砂轮孔径大小选择，孔径大的砂轮间隙选大值。法兰盘与心轴是靠心轴锥度紧密配合的。静平衡架的结构有多种，刀口式静平衡架是指平衡心轴放在静平衡架的刀口上，灵敏度高，但承载能力小，用于小直径砂轮的平衡；圆轴式和圆盘式静平衡架是将平衡心轴放在其滑动轴承上和双圆盘支承上，承载能力大，用于大直径砂轮的平衡。

砂轮的静平衡通常用“三点平衡法”进行，其原理如图3-13所示，它是利用分布在圆周上的3个平衡块 m_a 、 m_b 、 m_c 来进行平衡的，通过3个平衡块的分布，使其与砂轮的合成质心能与砂轮轴心 O 重合，达到静平衡。

设砂轮轴心为 O ，由于不平衡，其质心不在 O 上，而在 E 处，其间距为 l_e 。在 OA 连线方向加平衡块 m_a ，则此时砂轮不平衡的质心将移至 F 点，它与砂轮轴心 O 的间距为 l_f 。再在 OD 两侧的 B 、 C 点分别加平衡块 m_b 、 m_c ，保持平衡块 m_a 不变，调整平衡块 m_b 、 m_c 的位置，使该两平衡块的合成质心位于 OD 线的 G 点，它与砂轮轴心 O 的间距为 l_g ，设砂轮的质量为 M ，则砂轮静平衡的条件为

$$(M + m_a) l_f = (m_b + m_c) l_g$$

经过这样的平衡后，砂轮在任何方向都能保持平衡。

2. 机上动态平衡

利用一种便携式力矩平衡仪，通过仪器上所带的传感器对砂轮进行动态平衡的检测，砂轮

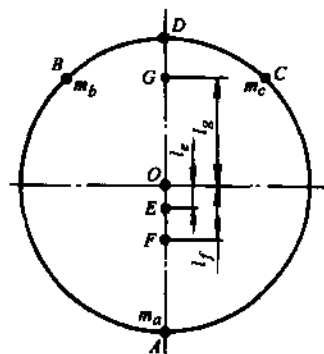


图 3-13 “三点平衡法”原理图

上装置了平衡块，根据检测结果，人工调整平衡块的位置，再进行检测，这样反复2~3次，就可以快速方便地平衡砂轮，这种方法不必将砂轮拆下来，而是在砂轮工作状态直接平衡，比机外静平衡架上平衡要准确、简捷、易行，应用逐渐广泛，其关键是要配置一台高质量的便携式力矩平衡仪。由于其机理上属于力矩平衡，故是一种在砂轮工作运转情况的静平衡，不是动平衡，为区别起见，称之为动态平衡。

3. 机内动态平衡

在磨床砂轮主轴系统上，内置动态平衡装置对砂轮进行自动或半自动平衡，是一种更为方便的砂轮平衡方法，现代的新式磨床多配有此种动态平衡装置。

动态平衡装置有多种，一种是装在主轴锥孔内部；另一种是装在主轴前端，与砂轮有一段距离，这时是靠附加力偶来平衡，其效果不如直接装在主轴锥孔内的无附加力偶的平衡装置好。从平衡所用动力方式来分析，动态平衡装置有电气机械式、液压式和气动机械式等多种形式。

(1) 电气机械式半自动动态平衡装置 平衡装置装在主轴锥孔内，与砂轮基本上在同一平面上，是一种无附加力偶的平衡装置，如图3-14所示。平衡装置与砂轮主轴一起以工作速度转动，利用主轴尾端安装的两台微电机分别控制平衡锤2的相位和径向位置，即可改变平衡锤移离主轴轴心的位置，从而产生相应的离心力使砂轮平衡。砂轮的平衡状态是由安装在磨床砂轮头架上的测振器7来检测的，测振器所拾取的信号经处理后，在仪表上显示出平衡相位、振幅和不平衡量等参数，根据这些参数由操作人员先按动相位按钮，相应的微电机驱动平衡锤2在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 间调整其相位，再按动径向位置按钮，由相应的微电机驱动平衡锤2调整其径向位置，这样反复调整2~3次，当仪表显示达到允许值时为止，这种平衡装置准确、快速、方便。同时，测振器7还是一种在线监控装置，使操作人员可及时发现由于砂轮磨损、直径变化、磨粒分布不均等所造成的不平衡问题，及时进行再平衡，以保证加工质量。

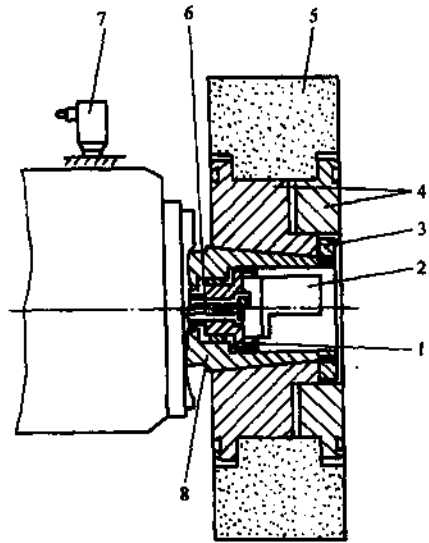


图3-14 电气机械式半自动动态砂轮平衡装置

- 1—平衡锤座 2—平衡锤 3—螺母
4—法兰盘 5—砂轮 6—平衡锤传动轴 7—测振器 8—主轴

(2) 液压式自动动态平衡装置 在砂轮法兰盘侧面上装上环形器8，其上有4个环形槽各对应一个液压腔体，4个液压腔体呈周向布局，通入液体后相当于4个平衡块。利用磨床本身的磨削工作液，通过阀组块7中的4个方向阀，经喷嘴块4中的4个喷嘴，将工作液通入环形器8中的相应环形槽并进入相应的腔体。依靠砂轮1回转的离心力，使工作液有效地贴附在腔体内壁，从而使砂轮得到平衡，如图3-15所示。

砂轮的平衡状态是由测振器来检测的，测振器3所拾取的砂轮主轴2的振动信号，经控制仪5的处理后，在仪表上可显示振动频率、振幅、相位、不平衡力矩等参数，并可连续或断续地向相应的腔体送相应量的工作液，达到动态平衡的自动控制。当达到动态平衡的设定允许值时，该装置自动停止工作。控制仪5上可设置动态平衡值，它同时又是一个监控仪，可以观测磨削工作过程中的平衡状态。该平衡装置平衡精度高、操作方便、使用寿命长、平衡量大，自

动化程度高，是一种无附加力偶的动态平衡装置。

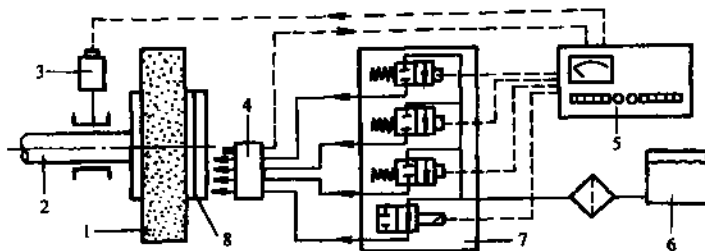


图 3-15 液压式自动动态平衡装置

1—砂轮 2—砂轮主轴 3—测振器 4—喷嘴块 5—控制仪
6—磨削工作液箱 7—阀组块 8—环形器

(3) 气动机械式半自动动态平衡装置 它是利用压缩空气将平衡块移动到一定的相位和径向位置，使砂轮动态平衡。砂轮平衡状态是通过测振器检测、处理、显示，操作人员根据显示参数进行人工调整控制。

2.6.2 动平衡

动平衡是力偶平衡，它不是在一个面上而是在一个有一定长度的体上进行平衡，用于宽砂轮和多砂轮轴的平衡。动平衡一般都在动平衡机上进行，由仪表显示不平衡的端部(左、右端)、相位及不平衡量等，人工调整砂轮(轴)两端的平衡块，经几次反复调整达到允许的数值内。

砂轮平衡应在其粗修整、或整形后进行为好，并注意在磨削过程中由于砂轮磨损、修整、直径减小，砂轮质量分布不均等对平衡的影响，进行及时平衡。

3 超硬磨料砂轮精密磨削

精密磨削根据所用的砂轮磨料不同，可分为普通磨料砂轮精密磨削和超硬磨料砂轮精密磨削，上一节主要论述了刚玉类砂轮的精密磨削问题，本节将主要论述超硬磨料砂轮的精密磨削问题。超硬磨料砂轮目前主要有金刚石砂轮和立方氮化硼(CBN)砂轮，并用来对难加工材料进行精密磨削。

3.1 超硬磨料砂轮磨削特点及应用范围

超硬磨料砂轮磨削的共同特点和应用范围：

1) 可用于加工各种高硬度、高脆性金属材料和非金属材料，如陶瓷、玻璃 半导体材料、宝石、石材、硬质合金、耐热合金钢，以及铜铝等有色金属及其合金等。

2) 磨削能力强、耐磨性好、耐用度高，易于控制加工尺寸及实现加工自动化。

3) 磨削力小，磨削温度低，加工表面质量好，无烧伤、裂纹和组织变化。用金刚石砂轮磨削硬质合金时，其磨削力只有绿色碳化硅砂轮磨削时的 $1/4 \sim 1/5$ 。

4) 磨削效率高，这是由于超硬磨料有锋利的刃口，耐磨性高，因此有较高切除率和磨削比。但超硬磨料砂轮有难度较大的修整问题。

5) 加工成本低，虽然金刚石砂轮和立方氮化硼砂轮比较昂贵，但其寿命长，加工效率高，工时少，综合成本低。

除了共同的特点和应用范围外，金刚石砂轮磨削和立方氮化硼砂轮磨削尚有各自的特点和应用范围。金刚石砂轮有较强的磨削能力和较高的磨削效率，在加工非金属硬脆材料、硬质合

金、有色金属及其合金等有优势，由于人造金刚石的出现及工艺的成熟，价格上也比较便宜，因此应用比较广泛，但由于金刚石易与铁族元素产生化学反应和亲和作用，故对于硬而韧的、高温硬度高、热传导率低的钢铁材料，如耐热合金钢、钛合金、模具钢等，则用立方氮化硼砂轮磨削较好。立方氮化硼比金刚石有较好的热稳定性、较强的化学惰性，如金刚石的热稳定性只有 $700 \sim 800^{\circ}\text{C}$ ，而立方氮化硼可达 $1250 \sim 1350^{\circ}\text{C}$ ，不易与铁元素产生化学反应和亲和作用，加工钢铁金属时，有较高的耐磨性。虽然当前立方氮化硼磨料的应用不如金刚石磨料，且价格也比较贵，但它是一个很有发展前途的磨具磨料。

为了扩大金刚石砂轮磨削的应用范围，现在正在进行金刚石砂轮磨削钢铁金属方面的研究，如在一种保护气氛下磨削、低温下磨削等，但都尚未能用于工业生产。

3.2 金刚石微粉砂轮精密磨削

3.2.1 金刚石微粉砂轮精密磨削的产生、特点及其应用范围

铜、铝及其合金等软金属材料的超精密金刚石车削已经获得了极大的成功，而工程陶瓷、半导体、石材等各种硬脆材料的超精密加工一直还是主要依赖于研磨、抛光等游离磨料加工方法，这些方法虽然能达到很低的表面粗糙度值，但加工效率比较低。

金刚石砂轮磨削工程陶瓷、半导体、石材等硬脆材料是一种有效的加工方法，但普通的金刚石砂轮磨削要达到很低的表面粗糙度值是很困难的，所以提出了采用金刚石微粉砂轮精密和超精密磨削的方法，此法一经提出就获得良好效果，并得到迅速发展。

金刚石微粉砂轮的磨削特点有以下几方面：

1) 金刚石微粉砂轮主要采用粒度为 W40 ~ W5 的微粉磨料，树脂、金属(铜、纤维铸铁)结合剂制作，要求磨料能均匀分布，其结构与普通超硬磨料砂轮相同。

2) 金刚石微粉砂轮由于粒度很细，容屑空间小，切削时易堵塞，因此，除一般修整外，尚要进行在线修整，才能保证磨削的正常进行和磨削加工质量。

3) 由于金刚石微粉砂轮的容屑空间很小，因此要严格控制磨削时的磨削深度，机床应有微进给系统。当然，应配置相应的精密和超精密磨床。

3.2.2 金刚石微粉砂轮磨削机理

金刚石微粉砂轮磨削主要是基于微切削作用的微量去除来达到低表面粗糙度值，是一种采用固结微粉磨料进行精密加工的新方法。

传统的用游离磨料进行精密和超精密加工，其加工主要是延展方式，如研磨和抛光，其加工机理主要有磨粒的滚动和挤压使被加工表面产生的塑性变形和流动，使其轮廓峰趋于平缓光滑，磨粒的压力使被加工表面的材料反复变形产生加工硬化，以致断裂而形成切屑，当然有磨粒的微切削作用，总之可归于延展方式磨削(Ductile mode grinding)。

金刚石微粉砂轮在磨削时，其主要机理是微切削，磨粒具有很大的负前角和较大的切削刃钝圆半径，一般前角可达 $\gamma_0 = -45^{\circ}$ ，切削刃钝圆半径可达 $r_n = 100 \mu\text{m}$ ，因此，在切削过程中有磨屑形成、耕犁(隆起)，滑擦(滑动和摩擦)等现象，与刀具切削有较大差异。

(1) 磨屑形成 分布在砂轮表面上比较锋利且比较高(凸出)的磨粒，可以获得较大的磨削深度，可以形成磨屑，并可看到由于切屑离开工件时氧化和燃烧所产生的火花。

(2) 耕犁 分布在砂轮表面上不够锋利和不够凸出的磨粒，不能产生磨屑，只是在工件表面上划出犁沟，在犁沟两边产生隆起，影响表面粗糙度。

(3) 滑擦 分布在砂轮表面上的有些磨粒，凸出高度很小，既不能产生磨屑，也不能产生

耕犁，只是在工件表面上产生滑动与摩擦，由于磨削速度很高，会产生磨削高温，并引起热塑性流动，影响表面加工质量。

(4) 挤压和塑性变形 分布在砂轮表面上的有些磨粒，凸出高度很小，又无刃口，只是挤压被加工表面的轮廓峰，产生塑性变形使轮廓峰趋于平缓 and 光滑，降低了表面粗糙度值。

(5) 弹性破坏 在晶体结构材料中，有晶格缺陷存在，一般在大约 $1\ \mu\text{m}$ 的间隔内就有一个位错缺陷。由于微粉砂轮在精密和超精密磨削时，其加工应力的作用范围是在位错缺陷平均间隔 ($1\ \mu\text{m}$) 以内的区域，因此会产生原子或分子级的弹性破坏，这种破坏既无塑性破坏，也无残留变质层。

3.3 超硬磨料砂轮磨床

在普通磨床和精密磨床上可以进行金刚石砂轮和立方氮化硼砂轮的磨削，对于精密磨削应在相应的精密磨床上进行。

在普通磨床和精密磨床上可以进行超硬磨料微粉砂轮的磨削，对于精密磨削应在相应的精密磨床上进行，但由于微粉磨料颗粒尺寸很小，磨床应有微米级的横向进给系统，以保证要求的磨削深度。

从实际上来说，超硬磨料砂轮磨削时对磨床提出了一些要求，最好能够在超硬磨料砂轮磨床上进行磨削加工。超硬磨料砂轮磨削对磨床的要求主要有以下几方面。

1) 磨床应有高精度，砂轮主轴回转精度中，径向圆跳动应 $< 0.001\ \text{mm}$ ，轴向圆跳动应 $< 0.005\ \text{mm}$ ，主轴轴承多用动压轴承或动静压组合轴承，也可用静压轴承，以保证精密磨削所要求的加工精度。

2) 磨床必须要有足够的刚度，要求稳定性高，振动小。机床刚度的大小会影响磨削加工的稳定性、抗振性，从而影响超硬磨料砂轮的耐用度和寿命，同时也影响磨削加工质量，一般要求比普通磨床刚度提高 50% 左右。

3) 要求有良好的进给系统，精度高，速度均匀稳定，速度范围广，高速保证生产率要求，低速保证磨削尺寸、形状精度和表面粗糙度要求。一般纵向进给速度最小应为 $0.1\ \text{m/min}$ ，甚至更小，横向进给速度 (磨削深度) 最小应为 $0.001 \sim 0.0005\ \text{mm/st}$ (st 为单行程)。对于微粉砂轮磨削，应考虑磨床横向进给速度与磨粒尺寸大小的匹配。

4) 应考虑超硬磨料砂轮的修整问题，超硬磨料砂轮修整会涉及一些特殊装置、工作液、修整参数的需求等，应使机床有改装的可能性。

5) 机床各运动部件如主轴回转部分、进给运动导轨部分等都应有可靠的密封，以防止超硬磨料进入引起严重磨损。

6) 应有完善的磨削工作液处理系统，以保证磨削工作液的洁净和作用，以免影响加工表面粗糙度，防止磨削工作液不洁净对机床运动部件造成磨损。

7) 超硬磨料砂轮磨削时要求振动小，机床应置于防振地基上，采取相应的防振、隔振措施，如砂轮应精细修整、平衡，机床与地面接触处加防振垫等。

3.4 超硬磨料砂轮精密磨削工艺

3.4.1 磨削用量选择

(1) 磨削速度 金刚石砂轮的磨削速度一般为 $12 \sim 30\ \text{m/s}$ 。磨削速度太低，单颗磨粒的切屑厚度过大，不但使工件表面粗糙度增加，而且也使金刚石砂轮磨损增加；磨削速度提高，可

使工件表面粗糙度值降低，但磨削温度将随之升高，而金刚石的热稳性温度只有 700~800℃，因此金刚石砂轮磨损也可能会增加。金刚石砂轮的磨削速度应根据磨削方式、粒度、砂轮结合剂、冷却状态等具体情况来选择，一般平面磨削、外圆磨削、磨粒尺寸大、湿磨、树脂和陶瓷结合剂的金刚石砂轮，其磨削速度可选得高些；内圆磨削、工具磨削、沟槽和切断磨削、磨粒尺寸小、干磨、金属结合剂的金刚石砂轮，其磨削速度可选低些。

立方氮化硼砂轮的磨削速度可比金刚石砂轮高得多，可选 45~60m/s，这主要是由于立方氮化硼磨料的热稳定性较好。

(2) 磨削深度(吃刀量) 磨削深度一般为 0.001~0.01 mm，可根据磨削方式、磨料粒度、结合剂和冷却状况等具体情况选择，平面磨削、外圆磨削、粗粒度、金属结合剂的金刚石砂轮可选取较大的磨削深度；内圆磨削、工具磨削、沟槽和切断磨削、细粒度、树脂和陶瓷结合剂的金刚石砂轮磨削可取较小值。立方氮化硼砂轮的磨削深度可稍大于金刚石砂轮的。对于微粉砂轮磨削，其磨削深度应小于磨粒尺寸，通常为磨粒尺寸的 1/3~1/5。

(3) 工件速度 一般为 10~20m/min，过高会使单颗磨粒的切屑厚度增加，从而使砂轮磨损增加，可能会出现振动和噪声，影响加工表面粗糙度；工件速度低一些对降低加工表面粗糙度值有利，但会降低生产率。

(4) 纵向进给速度 可参考普通砂轮磨削情况选取，一般在 0.45~1.50m/min。纵向进给速度大会使砂轮磨损增加；纵向进给速度对加工表面粗糙度影响较大，对表面粗糙度值要求较低时，宜选用较小的纵向进给速度。

3.4.2 磨削液选择

超硬磨料砂轮磨削时，磨削液对磨削表面加工质量、磨削效率、砂轮寿命等有很大影响，如树脂结合剂超硬磨料砂轮湿磨可比干磨提高砂轮寿命 40%左右，因此一般多采用湿磨方式。

近年来，由于绿色制造的问世，为了保护环境，提出了多采用干磨方式的设想。实际上，在砂轮磨削中，一直就同时存在着干磨和湿磨两种方式，干磨方式操作使用方便，但磨削质量较差、效率低、砂轮易磨损，多用于工具刃磨等工作；湿磨方式操作使用麻烦些，有磨削液的配置、输送、过滤、更换、清洗等工作，但由于其磨削质量好、磨削效率高、砂轮寿命长，因此应用范围广泛。由于超硬磨料砂轮有很强的切削性能和耐磨性，采用干磨方式比普通磨削更具可能性，应开展这方面的研究工作。

1. 磨削液的作用

磨削液的基本性能有润滑性、冷却性和清洗性，随着制造技术的发展，对磨削液提出许多性能要求，这些要求可通过添加剂来达到，常见的性能要求有：渗透性、防锈性、防腐性、消泡性、防火性、切削性、极压性等。

防腐性主要是指对机床零部件表面的腐蚀，保护机床以免损坏。防腐性也应包括磨削液本身在使用期限不变质，保持其性能。

切削性主要是指一些特殊切削性能，如在切削过程中能在切削区域产生一种气氛、或一种薄膜，有利于切削进行。

极压性是指磨削液在磨削区与被磨削金属表面起作用，形成一层牢固的润滑膜，在磨削区的高压下有良好的润滑和抗粘着性能。

由于超硬磨料砂轮组织紧密，气孔少，磨屑容积小，易被堵塞，故通常要求磨削液应有良好的润滑性、冷却性、渗透性和清洗性。

2. 磨削液的种类和组成

磨削液分为油性液和水溶性液两大类。

油性液以轻质矿物油为主体，掺入 5%~10% 的脂肪油，再加上一些添加剂而构成，润滑性能好。常用的矿物油有 L-NA 油、轻质柴油、煤油等。加入的添加剂有极压添加剂等，如加入硫、氯、磷等有机化合物可增强磨削液的活性，在高温下与金属表面起化学反应，生成熔点高的化学吸附膜，可减小摩擦，保持润滑作用，即有极压性。

水溶性液的主要成分是水，有乳化液、无机盐水溶液、化学合成水溶液等品种，可加入一些添加剂，水溶性液的冷却性能好。

乳化液是由矿物油、乳化剂和防腐添加剂等配制成乳化油，形成商品出售。在使用时根据不同要求加水稀释成 1%~20% 浓度乳白色的水溶液，具有润滑和冷却双重性能，一般磨削液为 1%~5% 浓度。乳化液的乳化作用主要是靠乳化剂，它是一种表面活性剂，是一种有机化合物，能吸附在油—水界面上形成坚固的吸附膜，使油以微小的颗粒稳定地分散在水中，形成稳定的水包油 (O/W—Oil/Water) 乳化液，如图 3-16 所示。乳化液使用十分广泛。

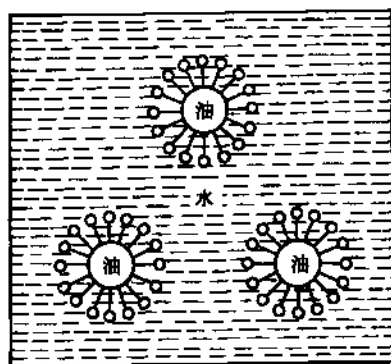


图 3-16 水包油乳化液示意图

无机盐水溶液是在水中加入一定量的无机盐防锈添加剂以及其他添加剂而成，有良好的冷却性能，但润滑性能较差。常用的无机盐有磷酸盐、硼酸盐、亚硝酸钠、碳酸钠、甲酸盐、三乙醇胺等。无机盐水溶液呈半透明状，又称透明水溶液。由于经常使用碳酸钠 (Na_2CO_3)，俗称苏打 (soda)，故这种水溶液又称苏打水。

离子水溶液是由水、阴离子表面活性剂、非离子型表面活性剂和无机盐配制而成，这些表面活性剂在水溶液中能离解成各种强度的离子，通过这种离子反应可迅速消除在切削和磨削中由于强烈摩擦所产生的静电荷，从而使切削区和磨削区不会产生高温，提高了刀具和磨具的耐用度、磨削比，是一种适合超硬磨料磨削的磨削液。

为了改善磨削液的性能，满足各种磨削的要求，添加剂的作用十分关键，表 3-25 列出了常用的添加剂。

表 3-25 磨削液中的添加剂

种类	添加剂	
油性添加剂	动植物油，脂肪酸及其皂，脂肪醇，醇、酮、胺类等化合物	
极压添加剂	硫、磷、氯、碘等有机化合物，如氯化石蜡，二烷基二硫代磷酸锌等	
防锈添加剂	水溶性	亚硝酸钠、碳酸钠、磷酸三钠、磷酸氢二钠、苯甲酸钠、苯甲酰胺、三乙醇胺等
	油溶性	石油磺酸钡、石油磺酸钠、环烷酸锌、二壬基萘磺酸钡等
防腐添加剂	苯酚、五氯酚、硫柳汞等化合物	
消泡沫添加剂	二甲基硅油	
助溶添加剂	乙醇、正丁醇、苯二甲酸酯、乙二醇醚等	
乳化液 (表面活性剂)	阴离子型	石油磺酸钠、油酸钠皂、松香酸钠皂、高碳酸钠皂、磺化蓖麻油、油酸三乙醇胺等
	非离子型	聚氧乙烯脂肪醇醚、山梨糖醇油酸酯、聚氧乙烯山梨糖醇油酸酯
乳化稳定剂	乙二醇、乙醇、正丁醇、二乙二醇单正丁基醚、二甘醇、高碳醇、苯乙醇胺、三乙醇胺等	

对于超硬磨料磨削的磨削液，可介绍日本重松等人系统研究的结果，两种系列的磨削液列于表 3-26 中。

表 3-26 超硬磨料磨削用磨削液

油性磨削液				水溶性磨削液					
牌号	矿物油(%)	脂肪油%	极压添加剂%	磨削材料	牌号	矿物油(%)	无机盐%	表面活性剂%	磨削材料
S-1	88.5	10	含硫极压添加剂 1.5	钛合金	W-1	-	18.0	-	钛合金
S-2	77.5	20	含硫极压添加剂 2.5	钛合金	W-2	-	35.0	-	钛合金
S-3	88.5	10	含硫 0.5 含磷 1.0	钛合金	W-3	-	3.0	非离子型表面活性剂 0.1	钢(高速磨削)
S-4	77.5	20	含硫 1.5 含氯 1.0	钛合金	W-4	-	14.0	0.5	钢
S-5	94.0	2	含硫 2.0 含氯 2.0	钢	W-5	87.0	-	13.0	钢(使用时加水稀释)

注：1. 取自日本重松等人资料。

2. 表中百分数为质量分数。

3. 超硬磨料磨削时的磨削液选择

用金刚石砂轮磨削时，常用油性磨削液和水溶性磨削液，视具体情况而定，通常磨削耐热合金钢、钛合金、不锈钢、陶瓷等材料时多用水溶性磨削液；磨削硬质合金时多采用油性磨削液。常用的油性磨削液有煤油、轻柴油、低号 L-AN 油或低号 L-AN 油与煤油的混合油；常用的水溶性磨削液有添加碳酸钠、亚硝酸钠、硼砂、三乙醇胺、聚乙二醇等各种添加剂的水溶液和弱碱性乳化液等。如磨削硬质合金时，普遍采用煤油，也可用加防锈添加剂等水溶液，但不宜使用乳化液。用树脂结合剂金刚石砂轮磨削时，不宜使用加碳酸钠的水溶液(苏打水)。

用立方氮化硼砂轮磨削时，多采用油性磨削液，如煤油、柴油等轻质矿物油，一般不用水溶性磨削液，因为在高温下，立方氮化硼磨粒会和水起化学反应，产生水解作用，加剧磨料磨损。如必须用水溶液时，可添加极压添加剂以减弱水解作用。

3.5 超硬磨料砂轮修整

超硬磨料砂轮的修整是其使用中必须解决的重要技术问题，由于超硬磨料比较坚硬，故超硬磨料砂轮的修整又是一个难题。超硬磨料砂轮的修整会直接影响被磨工件的加工质量、磨削效率、砂轮寿命和加工成本。

3.5.1 超硬磨料砂轮修整过程

砂轮的修整通常包括整形和修锐两个过程，修整是整形和修锐的总称。整形是使砂轮在尺寸和几何形状上达到一定的精度要求。在砂轮产品出厂时应进行整形；砂轮安装在机床砂轮主轴上时，为了使其外圆工作表面与主轴同轴，端面与主轴垂直或成一定角度，或要形成成形工作表面，都必须整形。整形要求一定精度的尺寸和几何形状，很高的效率。修锐一方面使钝磨粒破碎，形成新切削刃；同时又去除钝磨粒和结合剂，使新磨粒裸露，从而砂轮形成足够的切削刃和容屑空间，便于磨削；对于超硬磨料砂轮，由于金刚石和立方氮化硼都比较坚硬，很难用别的磨料磨削，形成新切削刃，故通过去除磨粒间的结合剂，使磨粒突出结合剂一定高度，通常最好是磨粒尺寸的 1/3 左右，形成新磨粒。修锐要求砂轮有磨削性能。因此，整形和修锐两个过程的要求不同。

普通砂轮修整时，在机床上一般是将整形和修锐合为一步进行的，而超硬磨料砂轮的整形

和修锐一般是分为先后两步进行的,有时,整形和修锐可采用不同的方法。

3.5.2 超硬磨料砂轮修整方法

超硬磨料砂轮修整方法很多,可归纳为如表 3-27 所示。

1. 车削法

将超硬磨料砂轮安装在磨床上,用单点或聚晶金刚石笔、修整片等车削超硬磨料砂轮以达到修整目的。这种方法的修整精度和效率都比较高,但修整后的砂轮表面比较平滑,切削能力低,同时修整成本高。

2. 磨削法

是利用砂轮、砂块、砂带进行超硬磨料砂轮修整,方法较多,如普通砂轮磨削法、GC 杯形砂轮磨削法、砂带磨削法等,是比较广泛应用的修整方法。

表 3-27 超硬磨料砂轮修整方法

修整方法		修整质量	修整效率	修整费用	应用场合	
					结合剂种类	修整范围
车削法		较好	较高	高	各种	整形和修锐
磨削法	普通砂轮磨削法	一般	较低	较高	各种	整形和修锐
	GC 杯形砂轮磨削法	较好	较低	较高	各种	整形和修锐
	砂带磨削法	较好	较高	较低	各种	修锐和整形
研磨法		好	低	低	各种	修锐
滚压挤轧法	滚压法	一般	低	低	各种	只能修锐
	游离磨料挤轧法	一般	较低	低	各种	修锐
喷射法	气压喷砂法	好	高	较低	各种	修锐
	液压喷砂法	好	高	较低	各种	修锐
电加工法	电解法	好	较高	一般	金属(导电)	修锐
	电火花法	较好	高	一般	金属(导电)	整形和修锐
超声波振动法		一般	较高	一般	各种	修锐
激光法		较好	较高	高	各种	修锐
清扫法		较好	低	低	各种	只能修锐
其他						

(1) 普通砂轮磨削法 用碳化硅、刚玉等普通磨料砂轮或砂块与超硬磨料砂轮对磨进行修整,这时,普通磨料磨粒被破碎,对树脂、陶瓷、金属结合剂起切削作用,失去结合剂所把持的超硬磨粒就会脱落,新超硬磨粒就会显露。这种修整方法的质量及效率均较好,但普通磨料砂轮或砂块磨损很快,其损耗量远比超硬磨料砂轮大。由于在修整时,修整砂轮或砂块与超硬磨料砂轮的轴线平行,修整砂轮或砂块的损耗又远比超硬磨料砂轮大,因此修整后,超硬磨料砂轮的圆柱度不好,易产生锥形、中凸、中凹等形状。仅管如此,这种修整方法是目前最广泛采用的。

(2) 碳化硅(GC)杯形砂轮磨削法 采用碳化硅杯形砂轮修整器进行修整,如图 3-17 所示,其中图 a 为修整器的结构图,图 b 为修整时的运动关系。杯形砂轮由小型电动机通过带轮带动,整个修整器可安装在平面磨床的磁力工作台上。修整时,杯形砂轮轴线与被修整砂轮轴线垂直,杯形砂轮沿被修整砂轮圆周的切线方向作往复进给运动,并在每一往复进给中,当杯形砂轮与被修整砂轮脱开时,进行一定量的吃刀。该种类型的杯形砂轮修整器已发展成为具有自动往复进给和吃刀的独立装置,可在各种磨床上修整陶瓷、金属结合剂金刚石砂轮等各种超硬磨料砂轮。这种修整方法比普通砂轮磨削修整法在质量和效率上都有较大提高,但杯形砂轮的损耗也是较大的。

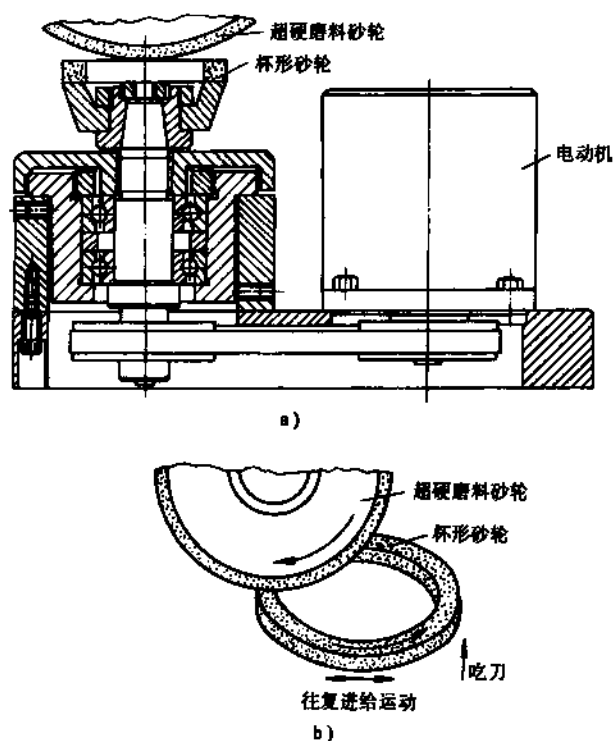


图 3-17 杯形砂轮修整器

a) 修整器结构图 b) 修整时的运动关系

杯形砂轮修整法是由日本东北大学庄司克雄教授提出的，他所领导的研究室在这方面作了多年的潜心研究。

(3) 砂带磨削法 采用刚玉、碳化硅砂带修整超硬磨料砂轮有较好的效果，由于砂带的带基是软质材料的，有一定弹性，故它是一种软弹性修整法，简称弹性修整法。

图 3-18 为砂带修整器示意图，是在平面磨床上进行修整的状况，一卷新砂带装于砂带轮 2 上，拉出砂带 3 绕经接触轮 5，最后绕到卷带轮 6 上。修整时，卷带轮 6 由电动机及减速装置 7 带动缓慢回转，带动砂带 3 缓慢移动，接触轮 5 作自由转动，砂带轮 2 作被动转动并起拉紧

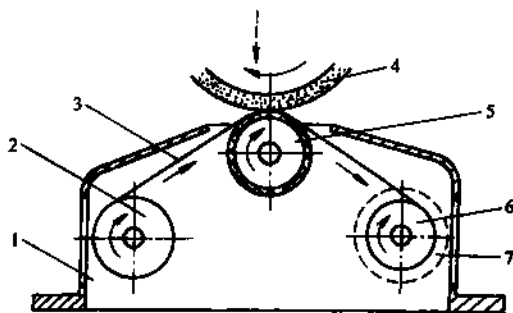


图 3-18 砂带修整器

1—基座 2—砂带轮 3—砂带 4—超硬磨料砂轮
5—接触轮 6—卷带轮 7—电动机及减速装置

砂带作用。当被修整的超硬磨料砂轮 4 与在接触轮部位的砂带接触时, 就可以进行修整。修整一段时间后, 由砂轮向下送进获得吃刀量。整个修整器的基座 1 装于平面磨床的电磁工作台上, 靠电磁力夹紧。

这种软弹性修整法采用了开式砂带磨削方式, 在磨削区, 已磨钝的磨粒不断退出, 新的锐利的磨粒不断进入, 因此总是有新磨粒参加切削, 保持了磨削的稳定状态, 不会造成磨粒间的切屑阻塞, 磨削能力下降等问题。由于砂带带基是软质材料, 接触轮的表层也是软质材料, 因此, 在修整时, 当碰到金刚石等超硬磨料而磨不动时, 砂带可以变形而移让, 磨去超硬磨粒之间的结合剂, 达到修整作用。所以, 这种修整方法的修整质量和效率都比较好, 更适用于进行修锐。为了进一步提高修整效率, 可在接触轮轴向方向附加振动, 形成砂带振动磨削修整方法。

砂带磨削法可用于外圆磨、平面磨等超硬磨料砂轮修整, 用于不同磨床上时, 其砂带轮、接触轮、卷带轮的布局应作相应变化。

砂带磨削法是由清华大学制造工程研究所提出, 并进行了较深入的研究。

3. 研磨法

是一种游离磨料研磨法, 用一个铸铁轮或铸铁块与超硬磨料砂轮对研, 中间加上碳化硅等游离磨料配制的研磨膏, 可以手工研磨, 也可机械研磨, 这种修整方法效率低, 劳动量大, 但修整质量较好, 通常多用来进行修锐。

另外, 研磨法用来修整砂轮端面, 这时将超硬磨料砂轮端面置于铸铁研磨平台上, 用碳化硅等研磨膏进行手工或机械研磨, 效率低, 但研磨质量好。

4. 滚压挤轧法

它的主要工作原理是挤压作用, 有滚压法和游离磨料挤轧法多种。

(1) 滚压法 用碳化硅、刚玉、硬质合金、钢、铸铁等制成修整轮, 与超硬磨料砂轮在一定压力下进行自由对滚, 修整轮无动力, 为自由滚动, 在挤压作用下使结合剂破裂脱落形成容屑空间, 并使超硬磨粒表面崩碎形成微刃, 该法修整效率低, 只能用作修锐, 修锐时压力较大, 如果在磨床上进行修锐, 要求磨床有高刚度。

(2) 游离磨料挤轧法 如图 3-19 所示, 在钢制修整轮与超硬磨料砂轮的无差速对滚中, 通入碳化硅、刚玉等游离磨料或玻璃球与压缩空气混合的磨料流, 依靠游离磨料或玻璃球的挤轧作用, 使结合剂破裂脱落以致超硬磨粒突出结合剂表面, 这种方法主要用于修锐, 效果较

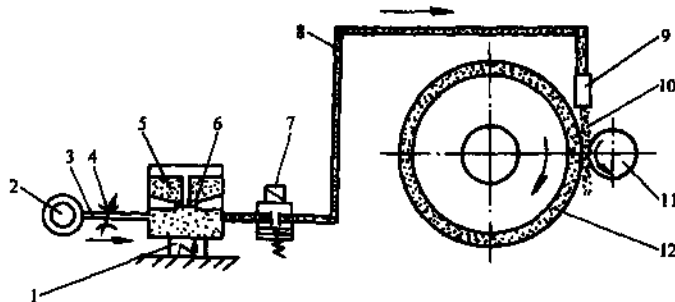


图 3-19 游离磨料挤轧修锐法

- 1—振动机 2—气源 3—压缩空气 4—流量调节阀 5—磨料或玻璃球 6—筛网 7—电磁阀 8—管道 9—喷嘴 10—磨料流 11—修整轮 12—超硬磨料砂轮

好,但效率不高,且有安全防护问题。在该修整装置中,压缩空气由气源2提供,磨料5通过振动机1和筛网6筛选,并与一定量的压缩空气混合,形成磨料流,由喷嘴9喷出,压缩空气量由流量调节阀4调整,磨料流的开断由电磁阀7控制。

5. 喷射法

有气压喷砂法和液压喷砂法两种。

(1) 气压喷砂法 如图3-20所示,将碳化硅、刚玉磨粒和压缩空气的混合磨料流从喷嘴高速喷射到转动的超硬磨料砂轮表面上,可去除部分结合剂,使超硬磨粒突出,达到修锐效果,是一种效果较好的砂轮修锐方法。喷嘴安装角度比较重要,一般 $\alpha = 5^\circ \sim 15^\circ$,以便于结合剂的溅射去除,喷嘴与被修整砂轮表面的间隙 h 可尽量小些,通常喷射时间约为30s。这种方法主要用于修锐,质量好,效率高,但要注意安全防护。

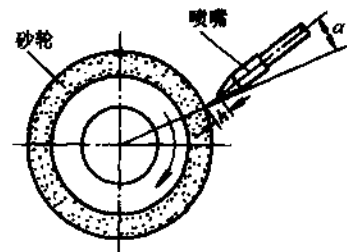


图 3-20 气压喷砂修锐法

(2) 液压喷砂法 如图3-21所示,用高压泵打出流量为20L/min、压力为150Pa的冷却液,当冷却液进入喷嘴的旋涡室时,形成低压,就可从边孔中吸入碳化硅或刚玉等磨粒及空气,与冷却液形成混合液,并以高速从喷嘴喷射到转动的超硬磨料砂轮上,进行修锐。修锐时,喷嘴安装角 $\alpha \leq 10^\circ$, h 值应尽量小些,视具体情况而定。这种方法修锐的砂轮精度高、锋利、修锐时间短,效率高,但应注意防护。

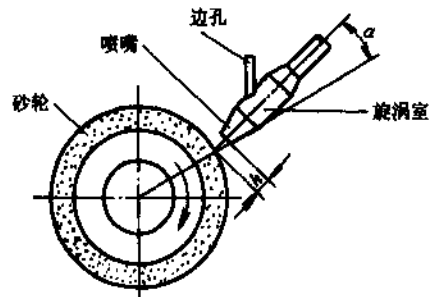


图 3-21 液压喷砂修锐法

6. 电加工法

利用电解加工和电火花加工来修整超硬磨料砂轮,主要是针对金属结合剂砂轮。修整质量好,效率高,使用广泛。

(1) 电解修整法 其原理是电解加工,如图3-22所示,在超硬磨料砂轮3与负电极6之间通以电解液7,将超硬磨料砂轮3作为正电极。通电时,电流由支架5经电刷4传入金属结合剂的超硬磨料砂轮3,于是产生电解作用,通过电化学反应去除金属结合剂而达到修锐效果。这种修锐方法的装备简单,质量好,可方便地实现在线修锐,特别适合金刚石微粉砂轮的修锐,但电解液易腐蚀机床,应加入一些防腐蚀添加剂。在对纤维铸铁结合剂金刚石砂轮进行修锐时,发现结合剂有钝化现象,使金刚石砂轮能保持长时间的切削能力。同时,钝化层会阻止电解的进一步进行;当突出的磨粒磨损后,钝化层被破坏,修锐作用会继续进行。这种方法多用于金属结合剂砂轮的修锐,一般不用于整形。

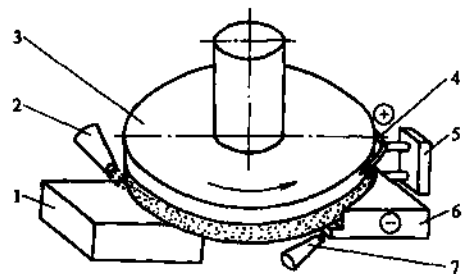


图 3-22 电解修整法

1—工件 2—冷却液 3—超硬磨料
砂轮 4—电刷 5—支架 6—负
电极 7—电解液

电解修锐法的电刷接电装置因砂轮转速高而易磨损或损坏,导致接触不良、打火等问题,图3-23为一种双电极电解修锐法,在绝缘材料板5上装有

两个石墨电极 6 (即 A、B)，电极接电可靠，超硬磨料砂轮与机床均不带电，电源系由双线圈变压器 1 和可调变压器 2 所构成的交流电源，电流通路为电极 A、B 和金属结合剂之间的电容网络，通入电解液后相当于阻容并联网路。

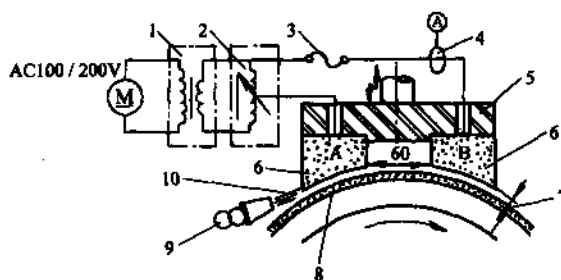


图 3-23 双电极电解修锐法

- 1—双绕组变压器 2—可调变压器 3—熔丝 4—电流
传感器 5—绝缘板 6—两个石墨电极 7—间隙
8—超硬磨料砂轮 9—喷嘴 10—电解磨削液

电解修整法是当前应用比较成功、比较广泛的超硬砂轮修整法，日本物理化学研究所大森整教授在这方面作了大量的研究工作，提出了电解在线修锐 (ELID: Electrolytic in-process dressing) 方法，受欢迎。我国哈尔滨工业大学在金刚石微粉砂轮电解在线修锐方面也作了深入研究。

(2) 电火花修整法 其原理是电火花放电加工，如图 3-24，电源 1 提供直流电，将正负极分别接至超硬磨料砂轮 7 和修整器 2，形成正极性加工，由于砂轮 7 是回转的，故要通过电刷 3 将电接至砂轮轴上，修整器 2 和电刷 3 均应与机床绝缘。

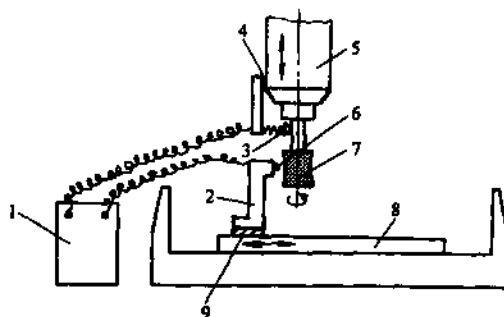


图 3-24 电火花修整法

- 1—直流电源 2—修整器 3—电刷 4、9—绝缘
材料 5—机床主轴 6—修整器电极 7—超
硬磨料砂轮 8—机床工作台

电火花修整法适用于各种金属结合剂砂轮，若在结合剂中加入石墨粉，也可对树脂、陶瓷结合剂砂轮进行修整。这种修整可用电火花成形方式 (图 3-24) 和电火花线切割方式两种方式进行，可以用正极性加工，也可用负极性 (砂轮接负极) 加工，视需要而定，一般精修整用正极性加工，粗、半精修整用负极性加工。若配置

数控系统，还可进行成形修整。这种修整方法既可用于整形，也可用于修锐，由于其效率较高，用于整形比较合适，当用于修锐时，应注意用较小的电加工参数，以避免损伤金刚石磨粒，电火花的修整质量与磨削法相当。电火花修整可用于在线修整，适合于金刚石微粉砂轮的修整。它可以在普通磨削液中进行修整，方法方便简单，有广泛应用范围。我国清华大学制造工程研究所在这方面作了不少研究工作。

7. 超声波振动法

用受激振动的簧片或超声波振动头驱动的幅板作为修整器，并在超硬磨料砂轮和修整器间放入混油磨料，通过游离磨料撞击砂轮表面，使其结合剂碎裂去除而超硬磨粒能够突出，达到修锐效果。如图 3-25 所示，由超生波发生器所发出的超生波信号，通过磁致伸缩换能器 5 变

为机械能，并通过变幅杆4将振幅放大，得到具有一定振幅值的超声波，带动幅板3超声波振动。这种方法多用于修锐，很少用于修整。

8. 激光法

利用激光束的热效应加工超硬磨料砂轮表面，去除其结合剂使超硬磨粒突出，达到修整效果，但要注意激光对超硬磨粒的损伤，激光光源等装置价格较贵，有待进一步研究。

9. 清扫法

用高强纤维制成的清扫器来修锐超硬磨料砂轮，刷除砂轮空隙中的堵塞物，又不使磨粒有过多的脱落和破损，是一种极简便的修锐方法。现有的清扫器如用直径为 $13\mu\text{m}$ 的玻璃纤维聚合物进行单向排列，并用环氧树脂粘合在一起，就形成玻璃纤维清扫器，其修锐效果不错。但这种方法只能用于修锐，且砂轮处于轻度磨损或堵塞状态，同时效率也较低。

超硬磨料砂轮的修整是一个难题，它直接影响超硬磨料砂轮的应用，值得进一步探讨研究。

4 超精密磨削

4.1 超精密磨削的概念、特点和应用

4.1.1 超精密磨削的概念

超精密磨削是近年来发展起来的最高加工精度、最低表面粗糙度的砂轮磨削方法，一般是指加工精度达到或高于 $0.1\mu\text{m}$ ，表面粗糙度低于 $R_a0.025\mu\text{m}$ ，是一种亚微米级、纳米级的砂轮磨削加工方法。超精密磨削的形成和发展远比超精密金刚石刀具车削和铣削要缓慢得多，金刚石刀具超精密切削技术的研究比较成熟，它目前主要是用于加工铜、铝及其合金等软金属，不宜切削钢、铁，淬火件和陶瓷、玻璃、半导体等硬脆材料。金刚石刀具在切削铁碳合金时，切削所产生的局部高温使金刚石中的碳原子很容易扩散到铁素体中而造成金刚石的碳化磨损，又称扩散磨损；金刚石刀具在切削淬火件时，由于淬火件硬度高，易造成崩刃和刃口磨损。同样，在微量切削陶瓷、玻璃、半导体时，剪切应力很大，临界剪切能量密度也很大，切削刃处的高温和高应力使刃口产生较大的机械磨损。虽然，目前正在进行一些研究工作，如寻求在一种保护气氛下或在低温下，用金刚石刀具切削钢、铸铁材料；探寻金刚石刀具在切削脆硬材料时，从脆性转变为塑性的临界切削速度等切削时空条件等，但超精密磨削显然是一种重要的有前途的超精密加工方法，特别是超硬磨料微粉砂轮超精密磨削更显示了它的生命力。

近年来，超精密磨削的发展很快，出现了一些与超精密磨削有关的磨削加工，如镜面磨削、微细磨削、高速磨削等。

镜面磨削一般是指加工表面粗糙度达到 $R_a0.02 \sim 0.01\mu\text{m}$ ，表面光泽如镜的磨削方法，它在加工精度的含义上不够明确，比较强调了表面粗糙度的要求，从精度、表面粗糙度和表面层力学和物理性质的相应性、统一性来分析和理解，应该认为镜面磨削是属于精密磨削和超精密磨削范畴，它是一种生动的俗称。

微细磨削也是属于精密磨削和超精密磨削范畴，它强调了加工微小零件上的微小尺寸，砂

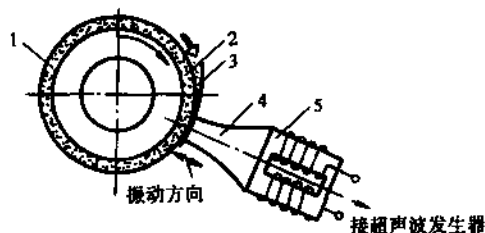


图 3-25 超声波振动修锐法

1—超硬磨料砂轮 2—混油磨料 3—振动幅板 4—变幅杆 5—磁致伸缩换能器

轮的直径显然很小,要达到理想的磨削效果,砂轮的速度要很高,通常,微细磨削除外圆、平面磨削外,突出了小尺寸的内圆磨削。

高速磨削的特点显然是高速和超高速,由于高速要求砂轮主轴的高精度、高刚度、高平稳性,以及整个机床及其各部件都应满足高速磨削的要求,因此,高速磨削也是可用于精密磨削和超精密磨削的加工方法。

4.1.2 超精密磨削的特点

超精密磨削的特点可归纳如下:

(1) 超精密磨削是一个系统工程 超精密磨削不是一种单纯的加工方法,已经形成了一个系统工程,其组成部分有:

1) 被加工材料 质地均匀、无纤维性的金属材料、光学玻璃、石材、具有电子、电磁、磁性等功能材料等。

2) 超精密磨削机理 是一种极薄切削、多磨粒固结磨具切削。

3) 超精密磨床 数控磨床具有高精度、高刚度,抗振性好,热稳定性好,高分辨力的运动控制系统,高精度位移反馈系统等。

4) 砂轮及其修整 采用超硬磨料、微粉粒度、颗粒尺寸均匀的固结砂轮,并应能在线精细修整。

5) 工件的定位与夹紧 有高定位精度、无变形装夹、高刚度的夹具,对于刚度差、易变形的工件应采用多支承、过定位、柔性夹紧等,以提高工件刚性。如电流变体夹紧就是一种新型柔性夹紧。

6) 检测及误差补偿 不仅要检测加工零件的精度和表面质量,而且要检测加工设备的精度和基础元部件精度。工件检测时可采用离线、在位、在线检测方式,并采用误差预防和误差补偿来提高加工精度。

7) 工作环境 主要有温度、湿度、洁净、抗振、声、光、电场、磁场等环境要求。由于超精密磨削对工作环境要求比较高,故都只是在某一范围内的局部环境,如室内或加工区的局域环境。

8) 人的技艺 当前,超精密磨削的加工质量在一定程度上与技术人员和操作工人的技艺有关,即加工质量由加工设备的精度、检测仪器的精度和工作人员的技艺水平三者来决定。应注意对工作人员专业知识和技艺的培养,以适应高新技术的发展。

图 3-26 表示了超精密磨削加工系统框图,左边为其 8 个组成部分,超精密磨削通常为最终工序,与前道工序有密切关系,故应进行过程管理与控制,同时应有性能评价方法,以保证质量、生产率与经济性。继而是加工性能,除精度和表面完整性外,还提出了材料性能要求,所谓表面完整性是指表面纹理(表面粗糙度、波纹度、纹理方向、伤痕)和表面冶金变化(表面层硬度、表面层的组织、表面层的残余应力),它是表面质量更广义的一种提法,更强调了表面层的性质,两者含义一致。图中右边是通过超精密磨削后可达到的产品性能要求,以及最后形成的产品,产品共分 4 类,结构零件(各种机械零件)、光学零件(镜片、透镜等)、功能部件(电子零件、半导体芯片、传感器等)和磁性零件(磁心、磁头等)。

从上述可知,超精密磨削需要一个高稳定性高精度的工艺系统,影响这个系统的因素很多,各因素之间又相互关连,建立这个系统不仅复杂,而且难度大,投资大。

(2) 超精密磨削对象带动了超精密磨削技术的发展 超精密磨削需要建成一个加工系统,精度高、复杂、难度大,投资大,要有多种高新技术的支持,因此,大多是先有磨削对象的需

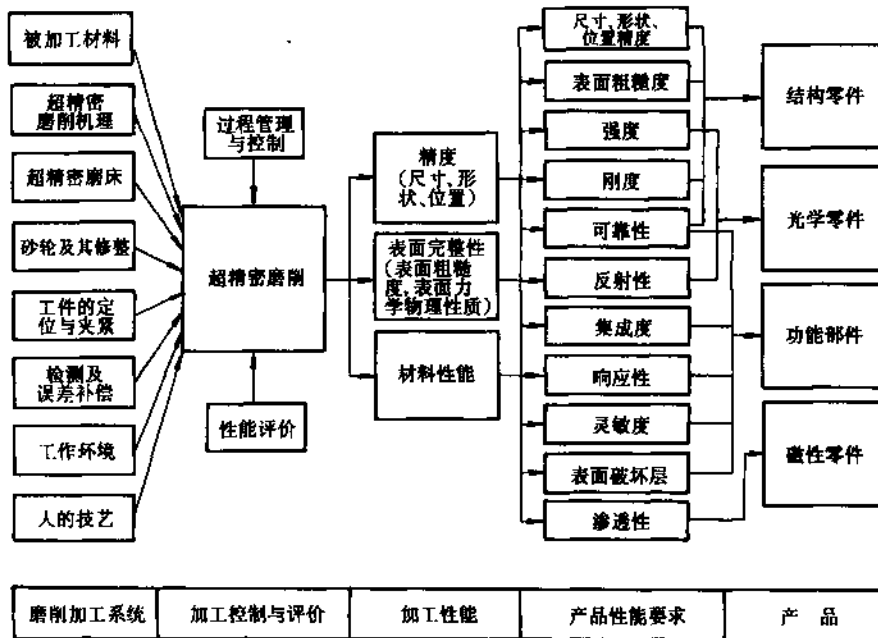


图 3-26 超精密磨削加工系统框图

求和资金支持，才能开展这一工作，且针对性比较强。由市场需求所建造的超精密磨削加工系统，一定要满足磨削对象的要求。当然，所研制的超精密磨床、砂轮、工夹具，以及磨削工艺和用量应尽可能考虑其通用性，以便有较广泛的应用范围。

超精密磨削加工是一个通用加工技术，可应用于加工硬脆材料等多种场合，只是由于其技术难度大、投资大，不可能像一般加工那样，形成系列化、规格化的机床产品，进行批量生产，而是根据市场需求进行单件小批生产，甚至单独订货。

(3) 超精密磨床是超精密磨削的关键 超精密磨削是在超精密磨床上进行的，其加工精度是靠机床来保证的，所采用的加工原则是遵循“母性原则”，它是一种“模仿式加工”，即所加工出的工件精度要比机床精度低，由于超精密磨削的精度要求越来越高，已经进入亚微米级($0.01\mu\text{m}$)和纳米级，这就给超精密磨床的研制带来了很大的困难，需要多学科多技术的密集和结合。

(4) 超硬磨料砂轮是超精密磨削的主要工具 超精密磨削时，由于它是一种极薄层的切削，磨削深度(吃刀量)很小，要求磨粒材料具有很高的强度和高温压力，因此采用金刚石和立方氮化硼超硬磨料。同时，由于超精密磨削要求很低的表面粗糙度值，因此多采用超硬磨料微粉砂轮进行磨削，由此，其修整技术成为一个关键。目前，金刚石微粉砂轮超精密磨削及其电解在线修整技术已逐渐较成熟地用于生产中，达到了较满意的结果。

(5) 超精密磨削是一种超微量切除加工 超精密磨削和超精密切削一样，是一种极薄切削，是在晶体内部进行的磨削，其去除的加工余量很小，很可能与工件所要求的精度数量级相当，甚至于不能用工件的公差值来衡量，其精度的概念是用能去除的切屑大小来表达，形成纳米级加工、分子级加工、原子级加工。

4.1.3 超精密磨削的应用

超精密磨削的应用主要有以下几方面。

2) 磨粒切削刃的切入深度是从零开始逐渐增加, 到达最大值再逐渐减少, 最后到零。其切屑形状如图 3-28 所示, 图中所示为平面磨削情况。

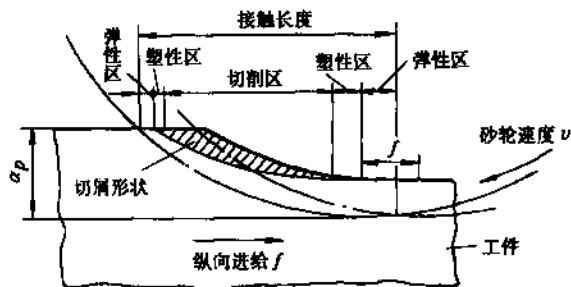


图 3-28 平面磨削时的切屑形状

3) 磨粒磨削时在与工件的接触过程中, 开始是弹性区, 继而塑性区、切削区、塑性区, 最后是弹性区, 与切屑形成形状相符合。

4) 超精密磨削时有微切削作用、塑性流动和弹性破坏作用, 同时还有滑擦作用。当刀刃锋利, 有一定磨削深度时, 微切削作用较强; 如果刀刃不够锋利, 或磨削深度太小, 磨粒切削刃不能切入工件, 则产生塑性流动、弹性破坏和滑擦。当然, 上述的各种作用和磨削系统的刚度关系密切。

(2) 连续磨削 工件连续转动, 砂轮持续切入, 开始, 磨削系统整个部分都产生弹性变形, 磨削切入量(亦即磨削深度)和实际工件尺寸的减少量之间产生差值, 这种差值称之为弹性让刀量。此后, 磨削切入量逐渐变得与实际工件尺寸减少量相等, 磨削系统处于稳定状态。最后, 磨削切入量到达给定值, 但磨削系统弹性变形逐渐恢复, 为无切深磨削状态, 或称无火花磨削状态。在超精密磨削中, 掌握弹性让刀量十分重要, 应尽量减小弹性让刀量, 即磨削系统要求高刚度, 砂轮修锐质量好, 形成切屑的磨削深度小。

4.3 超精密磨床

4.3.1 超精密磨床的特点

超精密磨床的特点在许多方面都与超精密车床相似, 其特点如下:

(1) 高精度 目前国内外各种超精密磨床的磨削精度和表面粗糙度可达到的水平为:

尺寸精度: $\pm 0.25 \sim \pm 0.50 \mu\text{m}$

圆度: $0.25 \sim 1 \mu\text{m}$

圆柱度: $0.25/25000 \sim 1/50000$

表面粗糙度: $R_a 0.006 \sim 0.01 \mu\text{m}$

(2) 高刚度 超精密磨床是进行超精密加工, 切削力不会很大, 但由于精度要求极高, 应尽量减小弹性让刀量, 提高磨削系统刚度, 其刚度值一般应在 $200\text{N}/\mu\text{m}$ 以上。

(3) 高稳定性 为了保证超精密磨削质量, 超精密磨床的传动系统, 主轴、导轨等结构, 温度控制和工作环境均应有高稳定性。

(4) 微进给装置 由于超精密磨床要进行超微量切除, 因此一般在横向进给(切深)方向都配有微进给装置, 使砂轮能获得行程为 $2 \sim 50 \mu\text{m}$, 位移精度为 $0.02 \sim 0.2 \mu\text{m}$, 分辨力达 $0.01 \sim 0.1 \mu\text{m}$ 的位移。实现微进给的原理和装置有精密丝杠、杠杆、弹性支承、电热伸缩、磁致伸

缩、电致伸缩、压电陶瓷等，多为闭环控制系统。

(5) 计算机数控 由于在生产上要求稳定进行批量生产的超精密磨削，因此，现代超精密磨床多为计算机数控，可减少人工操作的影响，使质量稳定，一致性好，且能提高工效。

4.3.2 超精密磨床的结构

超精密磨床在结构上的发展趋势如下：

(1) 主轴系统 主轴支承由动压向动静压和静压发展，由液体静压向空气静压发展。空气静压轴承精度高、发热小、稳定、工作环境易洁净，但要注意提高承载能力和刚度。主轴系统向主轴单元发展。

(2) 导轨 多采用空气静压导轨，也有采用精密研磨配制的镶钢滑动导轨。

(3) 石材部件 床身 工作台、主轴等大件逐渐采用稳定性好的天然或人造花岗岩制造。

(4) 热稳定性结构 整个机床采用对称结构、密封结构、淋浴结构等热稳定性措施。

一种比较理想的新颖的四面体结构立轴超精密磨床如图 0-12a 所示，它由 6 个柱连接 4 个支持球构成一个罐状的四面体，静刚度为 $10\text{N}/\text{mm}$ ，加工精度可达 1nm 以上，是由英国国立物理学实验室(NPL)开发的。

日本 Namba 等人开发了一台超精密磨床(1989 年)，如图 3-29 所示，该磨床有由无热膨胀材料制成的直径 125mm 的玻璃陶瓷主轴，由内置式电动机直接驱动，转速可达 $3500\text{r}/\text{min}$ ，主轴由高精度和高刚度的空气静压轴承支承，整个磨床有两个立式主轴。磨床的主轴轴向进给运动由滚珠丝杠螺母副实现，并通过光栅编码器数控检测，精度可控制在 $0.1\mu\text{m}$ 。磨床还配置了回转工作台。在该机床上，用金刚石微粉砂轮磨削光学玻璃、铁氧体锰锌磁铁、半导体芯片等可获得亚微米级平面度和纳米级表面粗糙度，在超精密磨削光学玻璃表面时，可获得比光学表面要求还要好的超平滑表面，而无需任何后续抛光。此时砂轮速度为 $1200\text{m}/\text{min}$ ，要有极精细的磨削深度和微粉级(磨粒尺寸 $2\sim 6\mu\text{m}$)金刚石砂轮。

国内外生产的一些超精密磨床的结构特点和加工质量如表 3-28 所示。我国生产的高精度磨床可列入超精密磨床一类。

表 3-28 国内外超精密磨床简况

机床型号及类型国别及生产厂家	结构性能特点	加工质量	
		尺寸形状精度	表面粗糙度
N5 外圆磨床 美国布朗-夏普公司	工件主轴为液体静压轴承 弹性微位移机构	圆度 $0.25\mu\text{m}$ 圆柱度 $0.25/25000$ 尺寸精度 $\pm 0.25\mu\text{m}$	$R_{0.03}\mu\text{m}$

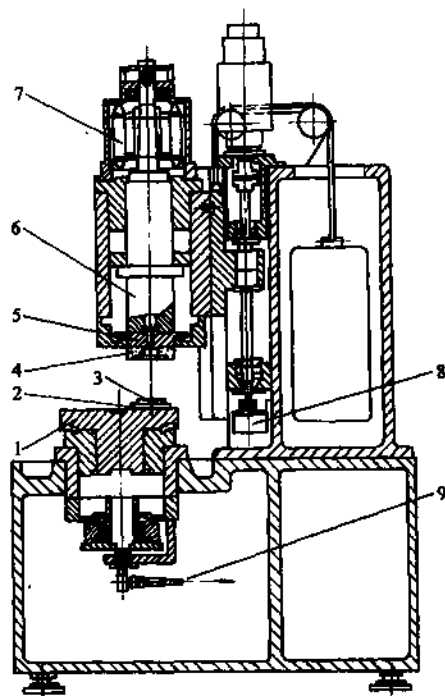


图 3-29 日本立式双轴超精密磨床

- 1—回转工作台 2—可加工的陶瓷工作台
3—工件 4—砂轮 5—砂轮适配器
6—玻璃陶瓷主轴 7—内置式电动机
8—光栅编码器 9—真空抽磨屑

(续)

机床型号及类型国别及生产厂家	结构性能特点	加工质量	
		尺寸形状精度	表面粗糙度
MUG21/50 万能磨床 日本三井精机	工件主轴为空气静压轴承	圆度 $0.1\mu\text{m}$ 圆柱度 $1/250000$ 尺寸精度 $\pm 0.5\mu\text{m}$	$R_{\text{a}}0.04\mu\text{m}$
MG1432A 外圆磨床 中国上海机床厂	砂轮主轴为动压轴承 工件主轴为液体静压轴承	圆度 $0.5\mu\text{m}$ 圆柱度 $1/200000$ 尺寸精度 $\pm 1\mu\text{m}$	$R_{\text{a}}0.01\mu\text{m}$
RHU500 超精密磨床 瑞士斯图特公司	砂轮与工件主轴均为多点式动压轴承	圆度 $0.1\mu\text{m}$ 圆柱度 $1/500000$ 尺寸精度 $\pm 0.25\mu\text{m}$	$R_{\text{a}}0.02\mu\text{m}$
双轴立式磨床 日本(1989)	砂轮主轴为刚性静压轴承, $3500\text{r}/\text{min}$ 或 $1200\text{r}/\text{min}$, 主轴为无膨胀玻璃陶瓷材料 磨削深度可控制在 $0.1\mu\text{m}$ 以内		$R_{\text{a}}2\text{nm}$
OAGM2500 数控磨床 英国科兰菲尔德工业大学精密 工程研究所(CUPE)(1991)	磨头为空气静压轴承, 液体静压导轨, 人造花岗岩填充型 钢焊接结构床身, 双频激光干涉反馈进给系统 $\phi 2500\text{mm}$ 高精度回转工作台, 加工 $2500\text{mm} \times 2500\text{mm} \times 610\text{mm}$ 大型曲面反射镜	分辨率 2.5nm	
数控车削磨削机床 日本东芝公司(1997)	车削: 空气静压轴承主轴, $3000 \sim 30000\text{r}/\text{min}$ 径向刚度 $10\text{N}/\mu\text{m}$, 轴向刚度 $20\text{N}/\mu\text{m}$, 激光干涉反馈, 加工区 恒温 $\pm 1\text{K}$, 加工大型非球面镜 $\phi 650\text{mm} \times 250\text{mm}$ 磨削: 砂轮 $\phi 200\text{mm}$, 转速 $10000\text{r}/\text{min}$ 工件转速 $10\text{r}/\text{min}$	分辨率 2.5nm 加工镍铝凹镜 形状精度 $< 0.1\mu\text{m}$ 加工玻璃陶瓷镜面 形状精度 $0.3\mu\text{m}$	$R_{\text{a}}2\text{nm}$ $R_{\text{a}}0.6\text{nm}$
三坐标超精密磨床 英国科兰菲尔德工业大学精密 工程研究所(CUPE)(1990)	刚性静压轴承主轴, 大推力摩擦传动, 激光干涉反馈, 人造花岗岩 T 形结构底座, 工件 $\phi 600\text{mm} \times 260\text{mm}$, 关键部件油喷温度控制, 电解在线修整砂轮, 集车、 磨、抛光、测量于一体	分辨率 1.25nm	
CNC 超精密平面磨床 中国航空精密机械研究所	砂轮主轴采用气体静压轴承, 采用真空吸附气体静压 导轨, 电液伸缩陶瓷进给装置, 花岗岩底座, 立柱	直线度 $0.5/1000$ 平面度 $1\mu\text{m}/500\text{mm}$ $\times 500\text{mm}$	$R_{\text{a}}0.02 \sim 0.005\mu\text{m}$

超精密磨床的特点在许多方面都与超精密车床相同, 采用静压轴承主轴单元、直线电动机送进伺服单元、花岗石主轴、导轨、床身、立轴结构, 在砂轮头架送进上配有精密位移机构。

4.4 超精密磨削工艺

有关超精密磨削的砂轮选择、砂轮修整、砂轮动平衡、磨削液选择等问题可参考有关精密磨削和超硬磨料砂轮磨削所述, 现仅将超精密磨削时的磨削用量作一简单介绍。通常超精密磨削用量如下所列:

砂轮线速度：18~60m/min

工件线速度：4~10m/min

工作台纵向进给速度：50~100mm/min

磨削深度：0.5~1 μ m

磨削横进给次数：2~4次

无火花磨削次数：3~5次

磨削余量：2~5 μ m

超精密磨削用量与所用机床，被加工材料，砂轮的磨粒和结合剂材料、结构、修整、平衡，工件欲达精度和表面粗糙度等有关，比较复杂，应根据具体情况进行工艺试验来决定。

超精密磨削质量与操作工人的技艺关系十分密切，应由高技术水平的工人精心细致科学地操作机床，才能达到预期效果。

5 精密和超精密砂带磨削

砂带磨削是一种新的高效磨削方法，能得到高的加工精度和表面质量，具有广泛的应用前景和应用范围，可以补充或部分代替砂轮磨削。

5.1 砂带磨削方式、特点和应用范围

5.1.1 砂带磨削方式

1. 砂带磨削方式分类

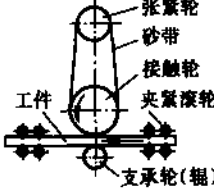
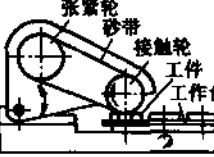
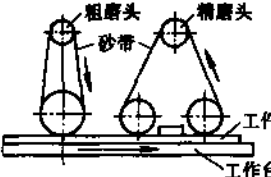
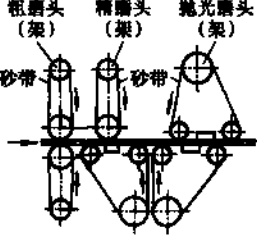

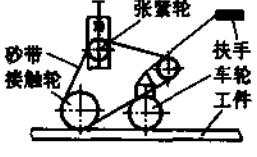

砂带磨削方式从总体上可以分为闭式和开式两大类：

(1) 闭式砂带磨削 采用无接头或有接头的环形砂带，通过张紧轮撑紧，由电动机通过接触轮带动砂带高速回转，工件回转，砂带头架或工作作纵向及横向进给运动，从而对工件进行磨削。这种方式效率高，但噪声大，易发热，可用于粗、半精和精加工，闭式砂带磨削的各种类型及其特点见表 3-29。

表 3-29 闭式砂带磨削的各种类型及其特点

磨削方式	类型	简图	加工工件	特点
接触面磨削式	带式连续进给式		板、箱盖、盘	结构简单，工件有连续进给装置，加工效率高
	接触轮与支承轮组合式		盖板、板材	图 a: 光滑表面橡胶接触轮，磨削量小，工件表面粗糙度值低 图 b: 槽形表面橡胶接触轮，磨削量大，效率高。 两者均有支承轮，增加工件刚度

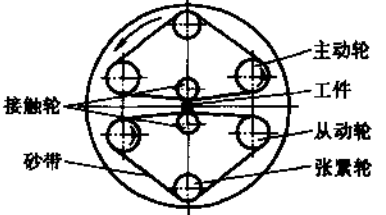
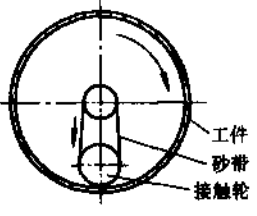
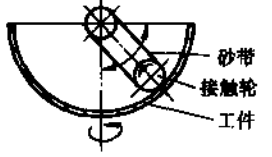
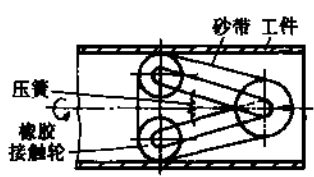
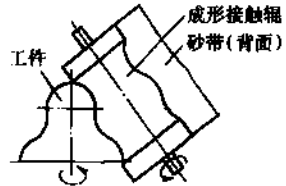

(续)

磨削方式	类型	简图	加工工件	特点
接 触 轮 磨 式 削	夹紧轮进给式		板材、带材	工件由4对夹紧滚轮带动进给, 为避免磨削中工件变形, 工件下加支承轮 可磨削较长板材及带材
	圆工作台式		轮、盘	砂带头架能摆动, 装卸工件方便。当工作台作慢速送进时, 装卸工件时间与切削时间重合
	粗精磨头单面磨削组合式		板材	一次完成粗磨、精磨多头架加工 效率高 可加工长板材
	粗精磨头双面磨削组合式		板材、带材	同时采用粗磨、精磨、抛光多头架一次完成双面加工, 效率高, 适于板材大量生产
	多磨头双面磨削卷带组合式		带材、卷材	采用多头架一次完成双面粗磨、精磨加工 用于大型带材和卷材的大量连续生产
	移动磨头式		大型结构件	整个头架形成可移动小车, 主要用于特大零件, 如大型结构件的表面磨削清理, 如焊缝磨削精度和表面粗糙度要求不高的工件加工
	双面接触轮式		板、块	上下接触轮间距可以调整, 可同时磨削工件的上下表面 效率高 一般为手工操作

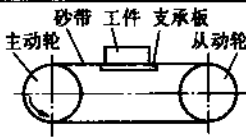
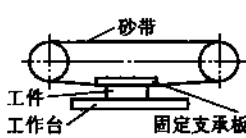
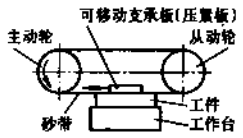
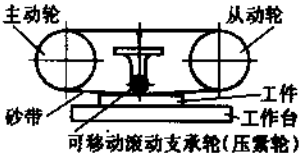
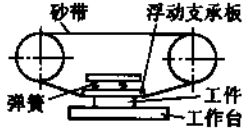
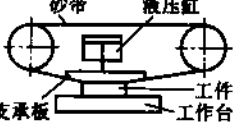
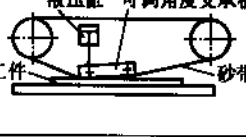
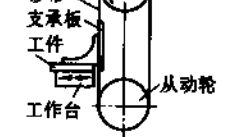
(续)

磨削方式	类型	简图	加工工件	特点
定心 外圆 磨削	外接触轮式		轴、盘、套筒	结构简单 可将砂带磨削头架作为部件, 装于车床上, 改装为砂带外圆磨床 磨削量一般较大
	内接触轮式		轴、盘、套筒	结构简单, 接触轮起支承轮作用, 接触轮应能自由回转 磨削量一般较大
	浮动接触轮式		轴、盘、套筒、管件、异形件, 如凸轮、弯曲管件	接触轮可随时保持与工件接触, 结构复杂 可加工非圆截面工件和异形外表面积
无心 外圆 磨削	导轮式		轴、销、滚柱	用橡胶轮或砂轮作导轮, 便于批量生产 工件回转和进给由导轮带动, 可通过调整导轮的角度来控制进给量
	支承板导轮式		轴、销、滚柱	工作方便, 便于批量生产 工件回转和进给由左边支承板带动, 支承板的角度变化可调整工件进给量
	砂带导引式		轴、销	以砂带代替导轮, 磨削量大, 但磨削精度较低

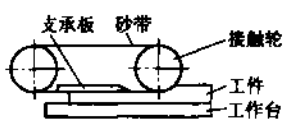
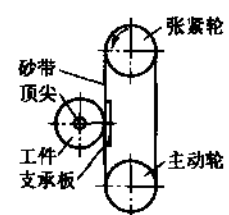

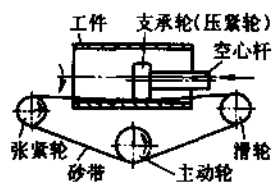
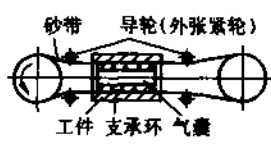
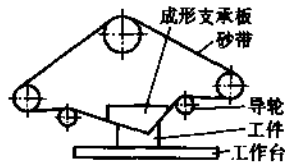
(续)

磨削方式	类型	简图	加工工件	特点
接触式	无心外圆磨削		轴、销、滚柱、线材	两条砂带同时磨削工件，磨削量大，效率高 结构复杂 磨削表面粗糙度值较低
	旋转式		圆筒、大管	磨削时工件回转，头架不动或摆动，工件作进给运动 加工大型圆筒件内壁
	旋转式		球形容器、望远镜和卫星的天线	磨削时，工件回转，头架摆动 加工球形容器内壁
	穿孔式		套筒、管道	头架的两接触轮有弹簧自动撑紧，保证与磨削表面接触 磨削时，头架转动并送进，可获低表面粗糙度，磨削内孔
	成形磨削		成形件	应用成形接触轮和薄砂带，磨削时靠砂带自身柔性变形，磨削成形面
	自由磨削		小零件，如刀具，刀杆等	主要用于手工磨削小零件的平面，外形面等，很像砂轮机

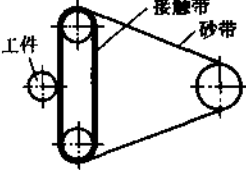
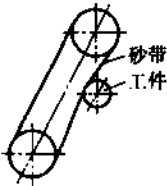

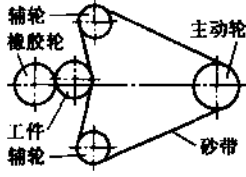
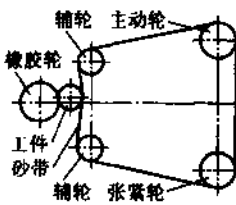
(续)

磨削方式	类型	简图	加工工件	特点
支 平 承 面 板 磨 (轮) 式	下固定支承板式		箱体、盖、盘	工件与支承板均不动 结构简单, 操作方便 砂带背面与支承板间有摩擦力
	固定支承板式		箱体、盖、板	支承板固定, 砂带背面与支承板有摩擦力 磨削量大, 加工效率高
	可移动支承板式		箱体、支架、板	工件在支承板下方, 用于加工大零件 支承板与砂带背面有相对运动而有摩擦
	滚动压轮式		箱体、支架、板	可移动的滚动支承轮可使砂带张紧, 并可调整张紧力, 支承轮可转动, 与砂带背面有滚动摩擦
	浮动支承板式		板材、盖、成形平面零件	由于采用弹簧浮动支承板, 故可磨削成形平面零件
	可调压力支承板式		盖、板材	砂带与工件的磨削力可调
	可调角度支承板式		盖、板材	通过调整支承板的角度, 改变磨削接触面积, 可进行大切削用量磨削
	垂直支承板式		箱体、支架	适于加工有垂直度要求的垂直面 排屑方便

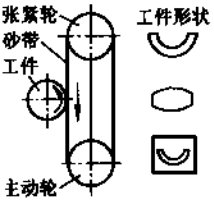
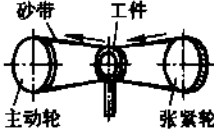
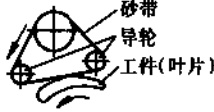
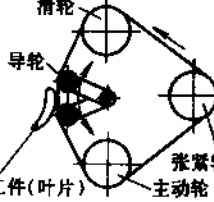
(续)

磨削方式	类型	简图	加工工件	特点	
支 承 板 式 磨 削 (轮)	平面磨削	接触轮与支承板混合式 	盖、板材	磨削量大 同时有接触轮和支承板, 结构上较复杂	
	定心外圆磨削	固定支承板式 	轴、盘、套筒	支承板与砂带背面有摩擦 结构简单, 排屑方便, 磨削精度较高	
	内圆磨削	气体支承板式	气体支承板式 	套筒	磨削细长孔 由压缩空气产生支承板作用力, 并可调整
		移动支承轮式	移动支承轮式 	套筒、管、环	砂带要穿过工件内孔, 因此砂带有接头
		支承环式	支承环式 	套筒	通过气囊产生砂带与工件间的作用力 采用无接头环带磨削短孔
	成形磨削	成形支承板式 	成形件、导轨	依靠成形支承板进行成形磨削, 砂带靠自身柔性变形磨削效率高 结构上可采用工作台上下移动或头架上下移动来控制工件与砂带接触及磨削深度	

(续)

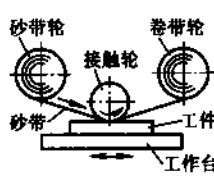
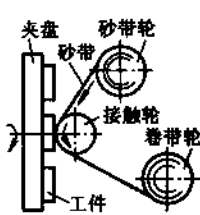
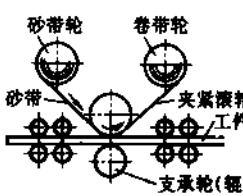
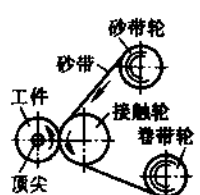
磨削方式	类型	简图	加工工件	特点
自由接触式	接触带式		轴、套筒、管件、异形件, 如活塞	磨削量较小, 磨削表面粗糙度值较低 接触带可有一定变形, 可适于磨削非圆截面件
	直接接触式		轴、套筒、管件、异形件	磨削量小, 磨削表面粗糙度值较低 可磨削非圆截面件
	行星式		轴、销、圆柱、椭圆形、线材	两条砂带同时磨削工件, 磨削量大, 效率高 结构复杂 加工范围广, 可磨圆形、椭圆形、菱形等 磨削表面粗糙度值较低
	导轮与辅轮式		轴、短轴、销	磨削量大, 磨削表面粗糙度值低
	导轮与辅轮式		轴、短轴、销	磨削量大, 磨削表面粗糙度值低 有张紧轮便于调整砂带松紧程度

(续)

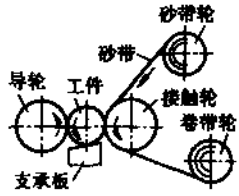
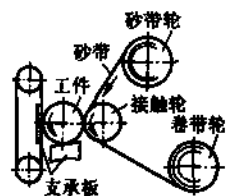
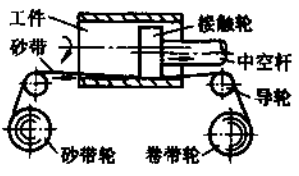
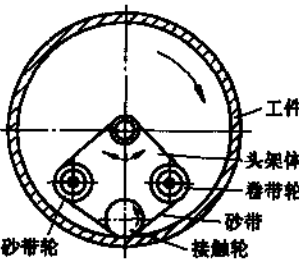
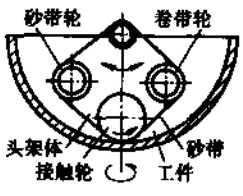
磨削方式	类型	简图	加工工件	特点
自由磨削式	单砂带接触式		带、内外成形表面的小零件	在磨削工件内轮廓时,砂带要穿过工件内腔,故砂带有接头
	双砂带接触式		带有成形内表面的小零件,如剪刀	砂带穿过工件磨削其内表面,可用无接头环带 专用于磨削封闭内环表面
由式	导轮式		成形件	由一对导轮支撑砂带进行成形磨削,磨头与工件的运动可用微机控制
	可调导轮式		带有外成形面的零件,如叶片	有一对可调导轮来调整砂带的松紧程度

(2) 开式砂带磨削 采用成卷砂带，由电动机经减速机构通过卷带轮带动砂带作极缓慢的移动，砂带绕过接触轮并以一定的工作压力与工件被加工表面接触，工件回转，砂带头架或工作台作纵向及横向进给，从而对工件进行磨削。由于砂带在磨削过程中的连续缓慢移动，切削区域不断出现新砂粒，磨削质量高且稳定，磨削效果好，但效率不如闭式砂带磨削，多用于精密和超精密磨削中，开式砂带磨削的各种类型及其特点见表 3-30。

表 3-30 开式砂带磨削的各种类型及其特点

磨削方式	类型	简图	加工工件	特点
接 面 磨 削 轮 式	水平磨削式		盘、板、盘	工件相对于接触轮应有一定的移动速度 可获得低表面粗糙度值表面
	垂直磨削式		盘、盘、板	工件要有一定转速 夹盘上可装夹若干小零件进行磨削，也可装夹 1 个大平面零件进行磨削 可获得低表面粗糙度值表面
	夹紧轮进给式		板材、带材	工件由 4 对夹紧滚轮带动磨削，为避免磨削中工件变形，工件下加支承轮 可磨较长板材及带材 工件应有一定的移动速度
	外接触式		轴、套筒	工件要有一定转速 可作为磨削头架作为附件安装在车床上 磨削头架进行横磨时，可按接触轮形状进行成形磨削 可获得低表面粗糙度值表面

(续)

磨削方式	类型	简图	加工工件	特点
无心外圆磨削	导轮式		轴、滚柱、销	通过导轮调整工件轴向的进给量 可获得低表面粗糙度值表面 便于批量生产
	砂带导引式		轴、滚柱、销	工件回转和轴向进给由左边支承板带动并可调整 可获得低表面粗糙度值表面 便于批量生产
接触轮式内圆磨削	移动接触轮式		套筒、管	工件要有一定转速 砂带要穿过工件的孔
	旋转式		圆筒	磨削时工件回转，磨头不动或摆动，工件作进给运动 加工大型圆筒件内壁
	旋转式		球形容器、望远镜和卫星的天线	磨削时，工件回转，磨头摆动 加工球形容器内壁

(续)

磨削方式	类型	简图	加工工件	特点
平面磨削	固定支承板式		盖、板	支承板固定，砂带背面与支承板有摩擦力 磨削精度高
	固定支承轮式		盖、板	支承轮可自由转动，砂带背面与支承轮有滚动摩擦
支承板磨削 (轮)	固定支承板式		轴、盘、套筒	支承板与砂带背面有摩擦 磨削精度高
	固定支承轮式		轴、盘、套筒	支承轮能自由回转，砂带背面与支承轮间有滚动摩擦 工件应有一定转速
无心外圆磨削	导轮式		轴、滚柱、销	工件回转和进给由导轮带动，并通过调整导轮的角度来控制进给量
内圆磨削	移动支承轮式		套筒、管、环	砂带通过两个导轮压紧并引导 工件应有一定转速 支承轮与砂带背面有摩擦

磨削方式	类型	简图	加工工件	特点
自由接触式	直接接触式		轴、套	工件要有一定转速
	导轮式		成形外圆零件	由一对导轮支撑砂带进行成形外圆磨削 工件要有一定的相对运动
	可调导轮式		带有外成形面的零件, 如叶片	由一对可调导轮调整砂带的松紧程度 工件要有一定的相对运动

2. 砂带磨削接触形式

砂带磨削按砂带与工件接触形式来分又可分为接触轮式、支承板(轮)式和自由式三大类,也表示在表 3-29 和表 3-30 中。

(1) 接触轮式 其特点是有一接触轮,通过它使工件与砂带接触,产生切削压力,其结构比较简单,应用较广。

(2) 支承板(轮)式 其特点是由支承板(轮)起加压作用。支承板式砂带磨削一般多进行平面加工,以增大接触面,提高加工效率,但砂带背面与支承板间有摩擦,因此要求砂带的抗拉强度好。支承板可以是移动的或固定的,当工件的长度大于支承板时,支承板要移动,若支承板不动,工件就要移动,才能加工工件全长。支承轮式砂带磨削适于加工平面和内孔,当支承轮可以自由转动时,可减少支承轮与砂带背面的摩擦。

(3) 自由式 其特点是无接触轮和支承板(轮),工件直接与柔性的砂带接触,多用于加工各种内外成形表面。自由式砂带磨削又可分为自由浮动接触式和自由接触式。

自由浮动接触式砂带磨削在结构上有一对可调导轮,可用它调整砂带的松紧程度,以便更有效地进行磨削。

自由接触式砂带磨削在结构上无导轮,或有一对不可调导轮,砂带的松紧程度在闭式砂带磨削中靠张紧轮来调整;在开式砂带磨削中靠砂带轮来调整,不够方便、直接。

砂带与工件的接触形式中,接触轮与支承轮在结构上是不一样的,接触轮一般在其外缘上有各种硬度的橡胶层,表面有平滑的或带槽的两种;而支承轮为光滑表面,只起支承作用。

按照加工表面类型来分,砂带磨削又可分为外圆、内圆、平面、成形表面等磨削方式。对于砂带外圆磨削来说,与砂轮外圆磨削一样,也有定心磨削和无心磨削,可参考表 3-29 和表 3-30。

5.1.2 砂带磨削特点及其应用范围

1) 砂带磨削时,砂带本身有弹性,接触轮外缘表面有橡胶层或软塑料层,砂带与工件是柔性接触,磨粒载荷小而均匀,具有较好的跑合和抛光作用,同时又能减振,因此工件的表面质量较高,表面粗糙度可达 $R_a 0.05 \sim 0.01 \mu\text{m}$ 。砂带磨削又有“弹性”磨削之称。

2) 砂带制作时,用静电植砂法易于使磨粒有方向性,同时磨粒的切削刃间隔长,摩擦生热少,散热时间长,切屑不易堵塞,力、热作用小,有较好的切削性,有效地减小了工件变形和表面烧伤。对于开式砂带磨削,由于不断有新磨粒进入磨削区,钝化的磨粒不断退出磨削区,磨削条件稳定,切削性能更好。工件的尺寸精度可达 $0.5 \sim 5 \mu\text{m}$,平面度可达 $1 \mu\text{m}$ 。砂带磨削又有“冷态”磨削之称。

3) 砂带磨削效率高,可以与铣削和砂轮磨削媲美,强力砂带磨削的效率可为铣削的 10 倍,普通砂轮磨削的 5 倍。砂带磨削无需修整,磨削比(切除工件重量与磨料磨损重量之比)可高达 300:1 甚至 400:1,而砂轮磨削一般只有 30:1。砂带磨削方法早已有之,由于基底材料强度和磨粒与基底的粘接强度有了极大的提高,才使得砂带磨削焕发新生,有了“高效”磨削之称。

4) 砂带制作比砂轮简单方便,无烧结、动平衡等问题,价格也比砂轮便宜。砂带磨削设备结构简单,可制作砂带磨床或砂带磨削头架,后者可安装在各种普通机床上进行砂带磨削工作,使用方便,制造成本低廉。因此,有“经济”磨削之称。

5) 砂带磨削有广阔的工艺性和应用范围,可加工外圆、内圆、平面和成形表面。砂带磨削头架可安装在车床、立式车床、龙门刨床等普通机床上进行磨削加工。因此,有很强的适应性。砂带不仅可加工各种金属材料,而且可加工木材、塑料、石材、水泥制品、橡胶等非金属材料。此外,还能加工硬脆材料,如单晶硅、陶瓷和宝石等。开式砂带磨削加工铜铝等软材料表面效果良好,独具特色。因此,有“万能”磨削之称。

近年来出现了砂带研抛加工,它是一种精密和超精密加工方法,其加工为开式砂带磨削方式,用细粒度砂粒聚酯薄膜基底砂带。如果采用接触轮外缘材料为橡胶、塑料等时,加工时的抛光作用强,能有效降低表面粗糙度;如果采用接触轮外缘材料为钢铁、铜、胶木等较硬物质,加工时的研磨作用强些,抛光作用弱些,能够降低表面粗糙度,对精度也会有所提高;如果所采用接触轮外缘材料半软半硬,如一定硬度的橡胶和塑料,则研磨、抛光兼有,故称砂带研抛。由于在聚酯薄膜基底上所涂覆的一层细粒度砂粒(一般为微粉)和粘接剂非常薄,形如薄膜,故又有“研磨膜”或“抛光膜”之称。这种砂带研抛实际上是砂带精密磨削或砂带超精密磨削的一种方式,已用来加工精密磁头,高密度硬磁盘涂层表面等精密元件的加工,效果十分良好,应用十分广泛。

当前,对于窄退刀槽的阶梯轴、阶梯孔、盲孔、小孔、齿轮等,砂带磨削尚不能加工。对于精度要求很高的工件,特别是形状和位置精度上,砂带磨削也还不如精密砂轮磨削。

5.2 砂带磨削加工机理

砂带磨削时,砂带经接触轮与工件被加工表面接触,由于接触轮的外缘材料一般是一定硬度的橡胶或塑料,是弹性体;同时砂带的基底材料是纸、布或聚酯薄膜,也有一定的弹性,因此在砂带磨削时,弹性变形区的面积较大,使磨粒承受的载荷大大减小,载荷值也较均匀,且

有减振作用。图 3-30 表示了砂轮磨削和砂带磨削的接触区和载荷分布情况。可见砂带磨削时材料的塑性变形和摩擦力均较砂轮磨削时减小，力和热的作用降低，工件温度降低。砂带粒度均匀、等高性好，磨粒尖刃向上，有方向性，且切削刃间隔长、切屑不易堵塞，因此有较好的切削性。这些都使得加工表面能得到很高的表面质量，但对提高工件的几何精度带来了一定困难。

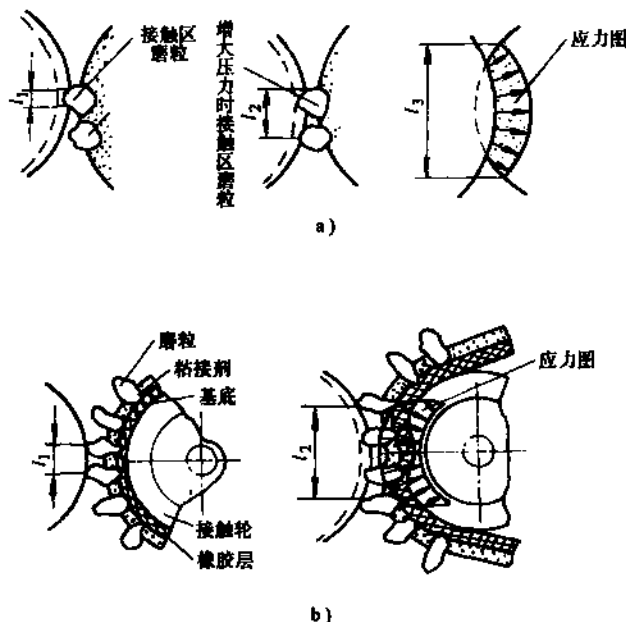


图 3-30 砂轮磨削和砂带磨削过程

a) 砂轮磨削 b) 砂带磨削

l_1 —接触区起始长度 l_2 —压力增大时接触区长度 l_3 —应力区长度

砂带磨削时，除有砂轮磨削的滑擦、耕犁和切削作用外，由于有弹性，还有磨粒的挤压使加工表面产生的塑性变形、磨粒的压力使加工表面产生的加工硬化和断裂、以及因摩擦升温而引起的加工表面热塑性流动等，因此，从加工机理来看，砂带磨削兼有磨削、研磨和抛光的综合作用，是一种复合加工。

对于精密和超精密砂带磨削，闭式砂带磨削方式和开式砂带磨削方式都有，但主要是开式砂带磨削方式。加工时多采用细粒度砂粒，甚至是细粒度微粉，基底材料为厚度 0.06 ~ 0.12mm 的聚酯膜或复合材料膜。但在加工机理上没有什么不同，只是各个作用的比例可能有所变化，与接触轮的外缘状态关系密切。

从总的效果来看，砂带磨削在提高加工表面质量，特别是降低表面粗糙度上效果比较明显，但在提高加工精度上可以做到略有提高。精密加工和超精密加工对精度和表面质量均要求很高，因此，砂带磨削时如何提高其加工精度应在机理和实践上进行进一步研究，其意义是很大的。

5.3 精密砂带磨床和砂带磨削头架

砂带磨削是在系列生产的砂带磨床上进行的，与普通砂轮磨床的结构一样，砂带磨床也有床身、工作台、工件头架、砂带头架等，所不同者，主要是在砂轮头架上，一般来说，将普通

磨床的砂轮头架换上砂带头架就可改装为砂带磨床。砂带磨床上的关键部件是砂带头架，现就砂带磨削头架进行阐述。

5.3.1 砂带磨削头架

砂带磨削方式不同，砂带磨削头架的结构各异，可分为闭式磨削头架和开式磨削头架两大类。

(1) 闭式砂带磨削头架 闭式砂带磨削头架主要是由接触轮(或支撑板)、主动轮、张紧轮、张紧机构、调偏机构、电动机、基座等构成。其传动特点与平带传动类似，砂带由张紧轮和张紧机构张紧，运动由电动机经主动轮、传动带直接传到接触轮，由接触轮带动砂带运动。为保证砂带正常工作，各传动轴的轴线应平行，各传动轮的外缘边上应有一定高度的凸缘，防止砂带跑偏。图 3-31 为一磨削外圆的闭式磨削头架，图 3-32 为一磨削内圆的闭式磨削头架。

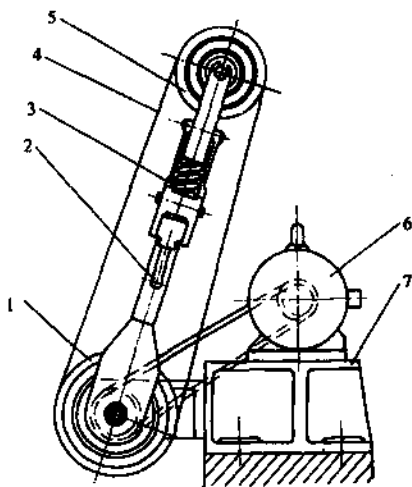


图 3-31 闭式砂带磨削外圆头架

1—接触轮 2—张紧手柄 3—张紧弹簧 4—砂带
5—张紧轮 6—电动机 7—基座

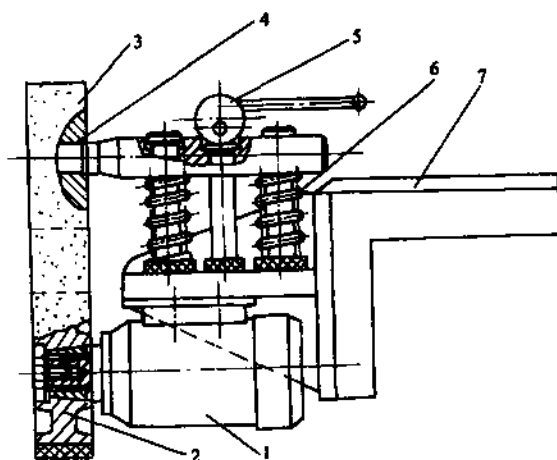


图 3-32 闭式砂带磨削内圆头架

1—电动机 2—主动轮 3—砂带 4—接触轮
5—张紧凸轮 6—张紧弹簧 7—夹持座

(2) 开式砂带磨削头架 用于开式砂带，由于开式砂带磨削是用卷状砂带，故其头架结构与闭式砂带磨削头架大不相同，它是由卷带轮、接触轮、砂带轮、电动机、基座等构成。整卷砂带放置在砂带轮上，砂带经接触轮绕于卷带轮上，动力由电动机经减速及调速装置带动卷带轮缓慢转动，并由卷带轮带动砂带作缓慢移动，砂带轮轴系上的摩擦机构所产生的摩擦力使砂带撑紧。某些传动轮外缘边上有一定高度的凸缘，防止砂带跑偏。图 3-33 是一种磨削外圆或平面的开式磨削头架，它由直流力矩电动机经减速器带动卷带轮作正反转，可无级调速，视砂带需要的移动速度而调整；砂带轮轴上的碟形弹簧机构所产生的摩擦阻尼使砂带在移动中保持撑紧；移动液压缸经杠杆使接触轮移向(或离开)工件，并保持一定的接触压力。移动速度和压力大小由液压调整。卷状砂带装在砂带轮上，通过斜面撑紧机构，由三条滑块撑紧，只要拧紧或松开带锥面的螺母，便可以方便装上或卸下砂带。一般砂带设置在上方，卷带轮设置在下方，以易于保持砂带的洁净。砂带轮和接触轮均应设置在人工操作方便的地方，并应方便更换。

卷状砂带有各种宽窄规格尺寸，图 3-33 中所示为宽砂带开式结构，结构上复杂些。

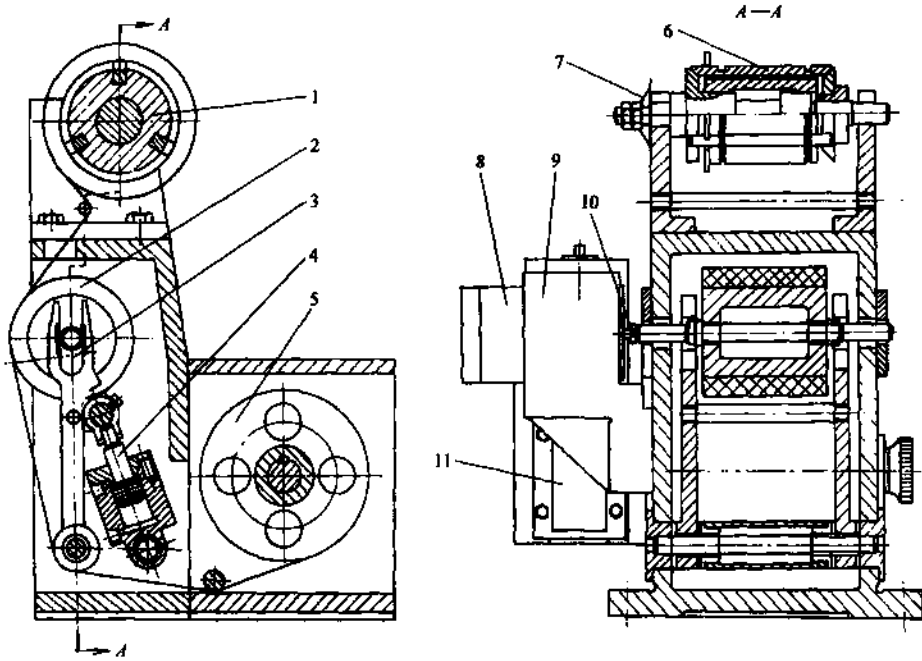


图 3-33 开式砂带磨削头架

1—砂带轮 2—接触轮 3—杠杆 4—移动液压缸 5—卷带轮 6—卷状砂带撑紧机构
7—碟形弹簧 8—激振器 9—直流力矩电动机 10—联轴器 11—减速器

近年来，出现了砂带振动磨削，它是将开式砂带磨削和振动叠加起来形成的一种复合加工。一般振动是叠加在接触轮的轴向方向，振动的作用很重要，可归纳如下：

1) 在开式砂带磨削时，振动可以弥补工件不能高速运动时的效率下降，使加工效率大大提高。

2) 振动的叠加可以形成复杂而又不重复的磨削轨迹，形成网状纹路，有利于降低表面粗糙度，得到很低的粗糙度值加工表面。

3) 由于振动的作用，可以采用干式磨削，加工表面不易出现划痕，对加工软材料非常有利。

4) 对于宽砂带，沿接触轮轴向振动可使砂带不跑偏和磨损均匀。

图 3-33 所示即为开式砂带振动磨削头架，由电动式激振器通过一特殊联轴器带动接触轮作沿其轴向的振动，激振器由低频信号发生器和功率放大器控制，频率、振幅和激振力均可无级调整。

5.3.2 接触轮

在砂带磨削头架中，最重要而关键的零件是接触轮，其基本结构如图 3-34，轮毂和外缘是由不同材料制成，一般轮毂用钢铁制造，外缘视磨削要求不同，可选用钢、铜、橡胶等材料。接触轮的主要参数有外缘材料、硬度、

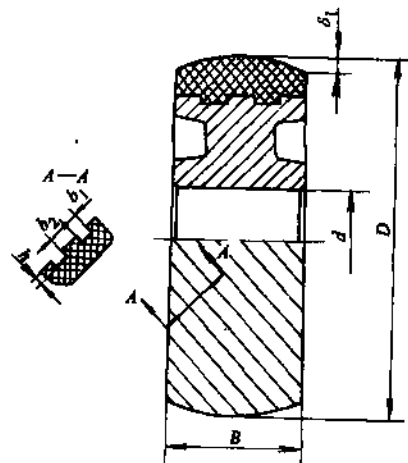


图 3-34 接触轮的基本结构

表面形状及尺寸等。

接触轮外缘表面形状有平滑形、标准齿形、宽齿形和交叉齿形 4 种，如图 3-35 所示。有齿形的表面，其螺旋角又有 90° 、 45° 、 30° 和 0° 四种，一般多选用 $30^\circ \sim 60^\circ$ 之间， 30° 用于精磨， $45^\circ \sim 60^\circ$ 用于粗磨，如图 3-35 所示。接触轮外缘截面形状有平滑形、齿形和填充形三种结构，见表 3-31。

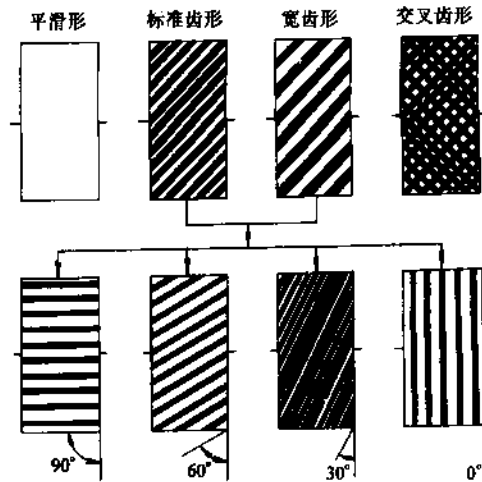


图 3-35 接触轮外缘表面形状

表 3-31 接触轮外缘截面形状及其结构

类 型		外缘截面形状及其结构	用 途
平滑形			细粒度砂带精磨、精密和超精磨及研抛
齿形	矩齿形		粗磨 精磨
	锯齿形		粗磨
填充形		 Cu或Al 橡胶	粗磨

各种接触轮外缘类型、材料、硬度及其特点和用途如表 3-32 所示, 对于精密和超精密磨削加工, 外缘材料多用橡胶、聚氨酯等, 且多用平滑形外缘表面。高速运行的接触轮应进行动平衡, 以保证运转平稳, 减少振动。

表 3-32 各种接触轮外缘类型及其特点和用途

类型	外缘材料	硬度	特点	用途
交叉齿形 标准螺旋齿形	钢	52~55HRC	切入作用强, 不易变钝	重负荷磨削
宽齿形	橡胶	70~90HS-A	切速快, 砂带寿命长	重负荷磨削 切除毛坯焊渣、浇冒口残留物
标准齿形		30~95HS-A	可获得中等粗糙度加工表面砂带 寿命很长	中负荷磨削
交叉齿形		30~70HS-A	砂带能进入工件轮廓的成形曲 面进行仿形磨削	轻负荷磨削, 研抛 磨削成形表面
平滑形	橡胶	40~95HS-A	可有效控制磨削深度	轻负荷磨削, 研抛, 低表面粗 糙度磨削
	胶木	100HBS	砂带切削作用强, 能提高几何 精度	中负荷磨削
	聚氨基甲酸酯	65~80HS-A	砂带寿命长, 能保持工件原有 几何精度	轻负荷磨削, 中负荷磨削
柔软型	压制帆布	软、中、硬	砂带寿命长, 切除率较高	中负荷磨削, 抛光
	涂橡胶帆布	中等	成形性能好, 切除率较高	成形磨削, 成形抛光
	实心层压帆布	软、中、硬	磨削表面平整均匀, 不留磨 痕, 价格低廉	成形磨削, 成形抛光
	软皮硬心帆布	柔软	适于精加工, 成本低廉	轮廓抛光, 精抛
充气胎	充气橡胶	特软	能进入工件轮廓, 加工表面粗 糙度均匀	轮廓抛光, 精抛
泡沫塑料	聚氨酯	极软	最柔软, 能进入工件轮廓	复杂形面抛光, 精抛

5.3.3 其他元件及机构

(1) 主动轮 主动轮是由动力源直接传动的, 为增大轮与砂带之间的摩擦力, 也采用外缘与轮毂为不同材料的组合结构, 外缘材料一般为橡胶, 并在轮缘上沿回转方向开出平行的环形沟槽, 以避免运行中砂带憋气。

(2) 张紧轮及张紧机构 为使砂带磨削时能正常稳定地传递动力, 保证磨削, 砂带必须张紧。张紧时可通过张紧轮及张紧机构产生张紧力, 张紧轮的结构与主动轮相同, 必须压在砂带的从动边上。也可采用接触轮或主动轮直接张紧。

张紧时, 张紧轮压在砂带背面为内部张紧, 张紧轮压在砂带砂面为外部张紧。一般多采用内部张紧方式, 外部张紧时因系滚动摩擦, 轮面磨损并不严重。

张紧机构可分为周期性张紧和自动张紧两类。周期性张紧多用螺纹、蜗轮副等，自动张紧多用弹簧、配重、气、液等装置。图 3-36 为用螺纹进行周期性张紧的装置，图 3-37、图 3-38、图 3-39 分别为用弹簧、配重、气动的自动张紧装置。

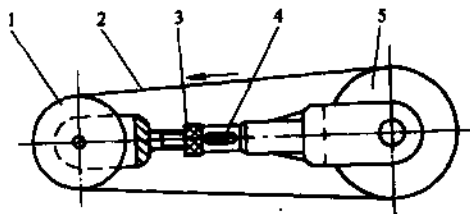


图 3-36 螺纹周期张紧装置
1—张紧轮 2—砂带 3—防松螺母
4—定向键 5—接触轮

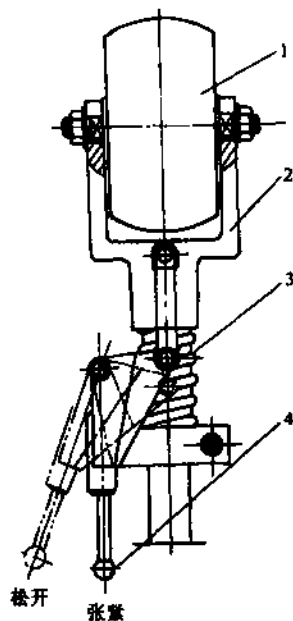


图 3-37 弹簧自动张紧装置
1—接触轮 2—支架 3—张紧弹簧
4—张紧手柄(图中为张紧状态)

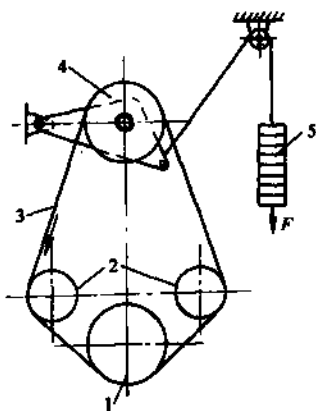


图 3-38 配重自动张紧装置
1—接触轮 2—辅轮 3—砂带
4—张紧轮 5—重锤

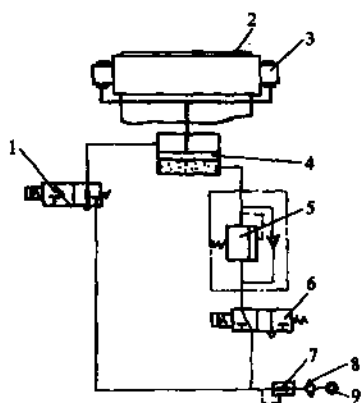


图 3-39 气压自动张紧装置
1—两位三通电磁阀 2—砂带 3—张紧轮
4—张紧气缸 5—单向压力顺序阀
6—两位三通电磁阀 7—调压阀
8—气水分离器 9—气源

气压自动张紧装置的工作原理如下：在张紧状态时，压缩空气从气源9通入，经气水分离器8和调压阀7获得一定压力的无水压缩空气，再经两位三通电磁阀6、单向压力顺序阀5至张紧气缸4的下腔，推动活塞上移，使砂带2张紧，气缸4上腔的空气经两位三通电磁阀1排入大气，由于有单向压力顺序阀5的作用，可保持张紧气缸4下腔的气压，使张紧力恒定。在松开状态时，压缩空气经两位三通电磁阀1进入张紧气缸4的上腔，推动活塞下移，而下腔的空气经单向压力顺序阀5和两位三通电磁阀6而排入大气。这种装置多用于幅面较宽的宽砂带。

一般对于10mm的窄砂带，其张紧力为40~80N，若低于40N，将会出现砂带工作不稳定，甚至脱落。

(3) 调偏机构 调偏机构的作用是为了防止砂带在运动中跑偏。砂带跑偏会影响砂带正常工作，如工作不稳定、掉带，甚至断带等。砂带调偏是使砂带产生轴向振荡，即改变砂带某一边的张紧力，使张紧轮轴的两端形成一个水平和垂直力矩，从而砂带将沿张紧轮轴两端极限位置作往复运动。可提高磨削质量，并使砂带磨损均匀。

调偏机构主要有机械调整式和气动调整式等。图3-40是一种机械调整固定式结构，在接触轮或张紧轮2的轴1上，其一端装有销3，使轴1可绕销3摆动，摆动量由左右调整螺栓4调整，调整后用调整螺栓固定。这种调整实际上是调整了接触轮轴和张紧轮轴之间的平行度，从图上看，是通过绕z轴的转动，即水平面上来调整；也可以通过绕y轴的转动，即在垂直面上来调整接触轮轴或张紧轮轴一端的高低，达到同样效果。图3-41是气动调整自动式结构，在接触轮(辊)左右端各有一个气孔，当砂带左偏时，A孔被阻塞，左端气压增大，打开顺序阀微动开关2，使换向阀1动作，压缩空气进入气缸5的下腔，推动活塞使接触轮(辊)微升，其右端成为紧端，砂带4就会向右移动，直至B孔堵塞。这样，砂带就在两个极限位置往复移动，达到振荡调偏。

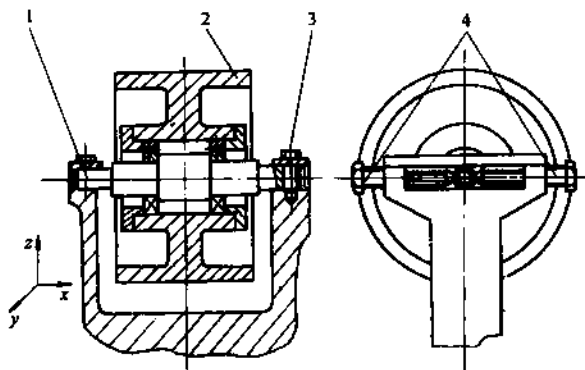


图3-40 机械调整式调偏机构

1—轴 2—接触轮或张紧轮 3—销 4—调整螺栓

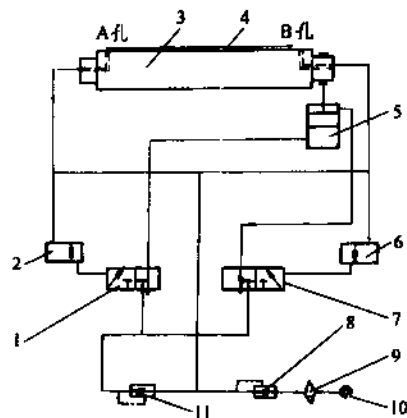


图3-41 气动调整式调偏机构

1、7—两位三通换向阀 2、6—顺序阀微动开关 3—接触轮(辊)
4—砂带 5—气缸 8、11—调压阀
9—分水排水器 10—气源

(4) 振荡装置 它产生接触轮沿其轴向的振动。为了使砂带磨损均匀，降低加工表面粗糙度值，有时要设置振荡装置使砂带在运动过程中沿接触轮轴向产生往复位移。对于宽砂带磨削

和横向进给磨削，砂带振荡更为需要。

在砂带磨削头架中，对于速度较高的回转零件，如接触轮、主动轮、辅轮等，都应考虑其动平衡，以保证运动的平稳性。

5.4 精密砂带磨削工艺

5.4.1 砂带磨削用量选择

(1) 砂带速度 通常可参考砂轮磨削来考虑。对于闭式磨削，粗磨时一般选 $12 \sim 20\text{m/s}$ ；精磨时一般选 $25 \sim 30\text{m/s}$ 。砂带速度与被磨工件材料有关，对难加工材料应取低值，对非金属材料可取高值。可参考表 3-33。对于开式磨削，砂带速度很低，因为这时砂带移动是为了不断有新砂带进入切削区，而切削主要靠工件的速度来得到。

(2) 工件速度 通常可参考砂轮磨削来考虑。工件速度高些可减少或避免工件表面烧伤，但会增加表面粗糙度值，一般粗磨选择 $20 \sim 30\text{m/min}$ ，精磨取 20m/min 以下。对于开式磨削，由于砂带速度非常低，切削形成主要靠工件速度，按磨削要求，相对速度应为 $20 \sim 25\text{m/s}$ ，才有工效，但考虑到开式磨削多用于精密磨削，一般可取 $10 \sim 12\text{m/s}$ 。

表 3-33 几种材料砂带磨削时的砂带速度 (m/s)

加工材料		砂带速度
有色金属	铝	22 ~ 28
	紫铜	20 ~ 25
	黄铜、青铜	25 ~ 30
钢	碳钢	20 ~ 25
	不锈钢	12 ~ 20
	镍铬钢	10 ~ 18
铸铁	灰铸铁	12 ~ 18
	冷硬铸铁	
非金属	棉纤维	30 ~ 50
	玻璃纤维	
	橡胶	25 ~ 35
	花岗岩	15 ~ 20

注：此表资料原载美国《Machine and Tool Blue Book》Vo 177No. 6 June 1982 P 91 ~ 94，译文载我国《现代科技译丛》1987 年第 1 期，原著 C.W. 马绍尔，大连铁道学院李秀山译。

(3) 纵向进给量和磨削深度 通常，纵向进给量可参考砂轮磨削来考虑，而磨削深度要比砂轮磨削时小些。总的说来，粗磨时，选大些；精磨、磨削合金钢等时，选小些。

粗磨时，纵向进给量为 $0.17 \sim 3.00\text{mm/r}$ ，磨削深度为 $0.05 \sim 0.10\text{mm}$ 。

精磨时，纵向进给量为 $0.40 \sim 2.00\text{mm/r}$ ，磨削深度为 $0.01 \sim 0.05\text{mm}$ 。

(4) 接触压力 这是砂带磨削所特有的参数。接触压力直接影响磨削效率和砂带寿命，可根据工件材料、砂带、磨削余量和表面粗糙度要求来选择，接触压力有时很难控制，一般选取 $50 \sim 300\text{N}$ 。

5.4.2 砂带和接触轮的选择

砂带和接触轮的选择应根据被加工材料、加工精度和表面粗糙度要求，其中包括磨料种

类、粒度、基底材料，接触轮外缘材料、形状及其硬度等。同时，砂带选择和接触轮选择之间又有一定的配合关系，故可统一考虑，可参考表 3-34。

表 3-34 砂带和接触轮的选择

工件材料	工 序	砂 带		接 触 轮	
		磨 料	粒 度 号	外 缘 形 状	硬 度 (HSA)
冷、热延压钢	粗 磨	WA	P30~60	锯齿形橡胶	70~90
	半精磨	WA	P80~150	平滑形、交叉锯齿形橡胶	20~60
	精 磨	WA	P150~500	平滑形或抛光轮	20~40
不锈钢	粗 磨	WA	P50~80	锯齿形橡胶	70~90
	半精磨	WA	P80~120	平滑形、交叉锯齿形橡胶	30~60
	精 磨	C	P150~180	平滑形或抛光轮	20~60
铝	粗 磨	WA、C	P30~80	锯齿形橡胶	70~90
	半精磨		P100~180	平滑形、交叉锯齿形橡胶	30~60
	精 磨		P220~320	平滑形、交叉锯齿形橡胶	20~50
铜合金	粗 磨	WA、C	P36~80	锯齿形橡胶	70~90
	半精磨		P100~150	平滑形、交叉锯齿形橡胶	30~50
	精 磨		P180~320	平滑形、交叉锯齿形橡胶	20~30
有色金属铸件	粗 磨	WA、C	P24~80	根据使用目的选择硬橡胶轮	50~70
	半精磨		P100~180	平滑形或抛光轮	30~50
	精 磨		P220~320	平滑形或抛光轮	20~30
铸 铁	粗 磨	C	P30~60	矩齿形或交叉锯齿形橡胶	70~90
	半精磨		P80~150	平滑形或交叉锯齿形橡胶	30~50
	精 磨		P120~320	平滑形或交叉锯齿形橡胶	30~40
钛合金	粗 磨	WA、C	P36~50	小直径锯齿形橡胶轮	70~80
	半精磨		P60~150	平滑形或抛光轮	50
	精 磨		P120~240	平滑形或抛光轮	20~40
耐热合金	粗 磨	WA	P36~60	平滑形或锯齿形橡胶	70~90
	半精磨		P40~100	锯齿形	50
	精 磨		P100~150	平滑形	30~40

5.4.3 砂带的预处理

对于砂带磨削来说，砂带大多是一次性使用，一般没有修整问题，但砂带制造的最终工序或在新砂带使用之前，应安排预处理。习惯上称为修整。如在精密和超精密磨削时，为了保证加工质量，新砂带在使用前，可进行一次预处理，其目的主要是改善磨粒的等高性，避免少数凸出的磨粒划伤工件表面，使砂带一开始就进入正常磨损的最佳阶段，这对提高加工表面质量十分有效，处理方法如下：

1) 滚压法 使砂带通过一对有相应间隙的淬火钢制平滑滚轮，砂带受压将凸出磨粒压平而获得等高性。要求高时可经过不同间隙的多对滚轮滚压。

2) 对磨法 用一细粒度砂带与欲用的新砂带对磨，将其凸出磨粒修整掉。此法也可用两条新砂带对磨来修整。对磨时要求接触压力很小，不会使砂带钝化或磨粒脱落。

3) 预磨法 将新砂带使用一段时间后，待砂带处于正常磨损的最佳阶段时备用。这种方法有时不易掌握，要求预磨后的砂带清洁，磨粒间空间不得粘有切屑等杂物。

在精密和超精密砂带磨削时，砂带预处理应作为制作中的最终工序则比较合理，质量易于

保证,使用也比较方便。一般砂带磨削没有必要。

5.4.4 砂带磨削的冷却与除尘

砂带磨削时分干磨与湿磨两种。

(1) 磨削液与干磨剂的选择 砂带也有干、湿磨。湿磨时,磨削液的选择除考虑加工表面粗糙度、被加工材料等外,必须要考虑砂带粘接剂的种类,因为它们多属无机物,易受化学溶剂的影响。另外,还应考虑基底材料。

干磨时,当粒度号大于 P150 时,可采用干磨剂,可有效防止砂带堵塞。

各类磨削液及干磨剂的选择可参阅表 3-35 所列。

表 3-35 砂带磨削时各类磨削液及干磨剂的选择

种 类		性 能	使 用 范 围
油 性 液	矿物油	磨削性能好	非铁金属
	混合油	润滑性能好,无腐蚀	金属精密和超精磨削
	硫化氯化油	磨削性能好	钢、铁、不锈钢等粗磨
水 溶 性 液	乳化液	润滑性能好,价格便宜	金属磨削
	无机盐水溶液	冷却和浸透性能好、防锈性能好	金属精密磨削
	化学合成液	冷却和浸透性能好	金属高速磨削、精密磨削
固态磨、蜡助剂		可有效防止砂带阻塞	用细粒度砂带干磨各种材料
水		冷却性能好	玻璃、石料、塑料、橡胶等

(2) 砂带磨削的除尘 从环保考虑,砂带磨削无论是湿磨还是干磨,无论是在砂带磨床上磨削还是在普通机床上利用砂带磨削头架磨削,都应设有吸尘和集尘装置。可用封闭罩或吸尘管等结构将磨削液、切屑、磨粒等汇集于集尘箱内,通过过滤回收,磨削液再用;干磨时则不必回收。

吸尘装置有多种

1) 吸尘口式 如图 3-42 所示,在砂带磨削区,工件与砂带接触的切线方向,装一个吸尘口,将磨屑通过吸尘道进入集尘袋或集尘箱,这是最简单的方式。

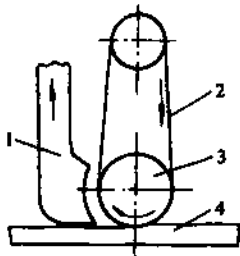


图 3-42 吸尘口式除尘装置

1—吸尘口 2—砂带
3—接触轮 4—工件

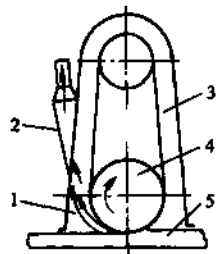


图 3-43 吸尘罩式除尘装置

1—吸尘罩 2—吸尘口 3—砂带
4—接触轮 5—工件

2) 吸尘罩式 如图 3-43 所示,将砂带磨削头架的相关部分用吸尘罩封闭起来,磨屑通过其上的吸尘口、吸尘道收集到集尘袋或集尘箱内。这种方式可与安全罩结合起来。

3) 独立式 如图 3-44 所示,在砂带头架上,利用带动砂带运动的电动机,在其轴端上装

上叶轮，在接触轮回转的切线方向，砂带与工件接触处的外面，附加一个水槽，由于叶轮的作用，磨屑经吸尘管通往集尘装置，部分磨屑还可落入水槽中。这种装置利用了砂带磨削头架本身的动力，可以自成一体，形成独立单元，不必要附加抽风机来吸尘，更为方便。

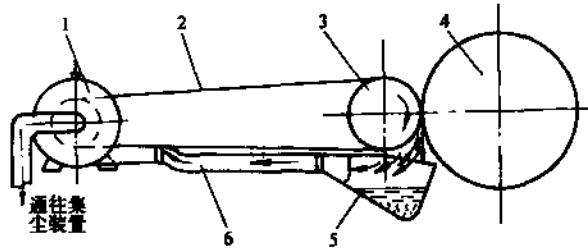


图 3-44 独立式除尘装置

- 1—电动机(带叶轮) 2—砂带 3—接触轮
4—工件 5—水槽 6—吸尘管

第4章 光整加工

1 光整加工的特点及类型

光整加工是指精加工后,从工件上不切除或只切除极薄材料层,用以降低工件表面粗糙度值或强化其表面的加工方法。光整加工可以获得比一般机械加工更高的加工精度和表面质量。

按照工具类型进行分类,光整加工可分为以下两种:

(1) 固结磨料加工 加工时,磨粒或微粉与结合剂粘结在一起,具有一定形状和强度(有时尚须进行烧结)。固结磨料加工对提高形位精度和尺寸精度有较高效率。本章主要介绍研磨、珩磨加工和超精加工,均属油石加工;砂轮加工和砂带加工见第3章。

(2) 游离磨料加工 加工时,磨粒或微粉成游离状态,如研磨时的研磨剂、抛光时的抛光液。游离磨料加工的典型方法有研磨和抛光等。近年来,在这些传统工艺的基础上,出现了许多新的工艺方法,如喷射磨料加工、弹性发射加工、磁流体抛光等。

2 研磨

研磨是使用研具和游离磨料进行微量加工的工艺方法,普遍应用于精密机械制造、精密工具制造及航空机载设备制造等行业,例如航空仪器及仪表、液压泵、电液伺服阀,以及精密量具等精密零件及偶件的最终加工。

研磨可用于各种钢、铸铁、铜、铝、硬质合金等金属材料,玻璃、陶瓷、半导体、塑料等非金属材料工件的平面,内、外圆柱面,圆锥面,内、外球面,螺纹,齿轮及其他型面的加工。工件经研磨后,能获得很低表面粗糙度值和很高的尺寸精度、几何形状精度和一定的位置精度。但要获得高的研磨加工精度,一般均应先采用其他加工方法得到较高的预加工精度,否则,研磨效率较低。

2.1 研磨特点和分类

1. 研磨特点 研磨的主要特点见表4-1。

2. 研磨分类 研磨可分别按其操作方式及研磨剂的使用条件不同进行分类,见表4-2。

表4-1 研磨的主要特点

主要特点	说 明
可获得很高的尺寸精度	(1) 研磨可以实现微量切削,其主要原因有: 1) 研磨采用极细的微粉磨料切削 2) 机床、工具、工件处于弹性浮动工作状态,可实现自动微量进给 (2) 加工过程中可随时中断工作,取出工件进行测量,随时按需要修正加工精度
可获得很高的形状精度和一定的位置精度	(1) 研磨属创成加工,可按或然原则自然消除工件的误差 (2) 研磨时工件基本处于自由状态,受力均匀,运动速度低而平稳,切削热量较小,且运动精度不影响形位精度的提高
可获得很低的表面粗糙度值	(1) 研磨属微量切削,切削深度小,且运动轨迹复杂,有利于降低工件表面粗糙度值 (2) 研磨时基本不受工艺系统振动的影响

主要特点	说 明
可改善工件表面质量	(1) 研磨一般在低速度、低压力条件下进行, 切削热量小, 工件变质层薄, 表面质量好 (2) 经研磨的工件表面能降低摩擦系数, 提高耐磨性和表面强度, 增强抗腐蚀能力, 同时研磨表面不会出现显微裂纹
适用范围广	(1) 研磨既适用于单件手工生产, 又适用于成批机械生产 (2) 研磨不苛求设备的精度条件, 可在一定条件下以较简单的、精度较差的设备加工精度要求高的工件 (3) 可用于加工各种金属和非金属材料 (4) 可用于加工各类简单或复杂的型面或平面
对研具的要求	(1) 所采用的研具较简单, 不要求具有极高的精度 (2) 研具材料的硬度一般应比工件软 (3) 研具在研磨过程中也受到切削及磨损, 故应注意及时修整或更换

表 4-2 研磨分类及适用范围

分类依据	分类名称	说 明	应用范围
操作方式	手工研磨	工件、研具的相对运动, 均采用手工操作	1) 各类金属、非金属工件的各种表面 2) 单件、小批生产及修理工作中的研磨加工
	半机械研磨	工件和研具之一采用简单的机械运动, 另一采用手工操作	1) 各类金属及非金属工件 2) 主要用于工件内、外圆柱面, 平面及圆锥表面的研磨 3) 小批及成批生产
	机械研磨	工件、研具的运动均采用机械运动	1) 各类金属及非金属工件 2) 主要用于表面形状不太复杂的工件、齿轮和螺纹的研磨 3) 成批及大量生产
研磨剂的使用条件	湿研磨	又称微砂研磨。把研磨剂连续加注或涂敷于研具表面, 磨料在工件与研具间不断地滑动与滚动, 形成对工件表面的切削作用	1) 机械研磨 2) 一般采用粗于 W7 的微粉作粗研, 用于加工精度要求不高的工件或用作高精度工件的预加工 3) 常用于平面及内外圆柱面的研磨
	干研磨	又称嵌砂研磨。把磨料均匀地嵌在研具工作表面层中(即压砂), 研磨时研具表面仅涂少量的润滑剂, 工件和研具保持一定的压力, 并按一定轨迹作相对运动	1) 手工、半机械或机械研磨 2) 一般采用细于 W7 的微粉作精研 3) 因形状复杂的研具嵌砂困难, 故多用于平面研磨
	半干研磨	类似湿研, 采用的研磨剂是膏状的研磨膏。研磨时应根据加工精度及表面粗糙度达到的程度, 间断地涂敷研磨膏	1) 用于手工、半机械或机械研磨 2) 能研磨普通或高精度的各类工件

2.2 研磨机理和运动轨迹

1. 研磨机理 研磨是使用研具和游离磨料对工件进行微量加工，其加工模型如图 4-1 所示。在加工过程中，工件表面发生复杂的物理和化学变化。研磨加工的主要机理见表 4-3。

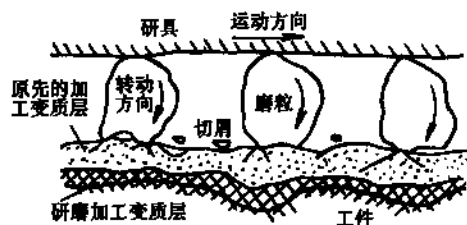


图 4-1 研磨加工模型

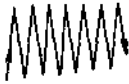


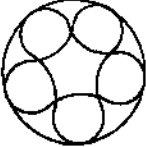
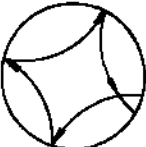

表 4-3 研磨机理

机理分类	说明
切削作用	<p>(1) 湿研磨过程中主要作用是磨料的切削作用。磨料切削作用可分为三个阶段：</p> <p>1) 研磨前期，磨料中仅有少数较大磨粒参加切削，故切削量不大</p> <p>2) 研磨中期，磨粒逐渐破碎，而使磨粒尺寸逐渐均匀，参加切削的磨粒逐渐增多，当研具上的磨粒全部参加切削时，研磨效率最高</p> <p>3) 研磨后期，磨粒继续细化，工件与研具间充满了微细的磨料和切屑，使研磨效率降低。因此，粗研时应尽量采用连续加注研磨剂，以获得最大生产率</p> <p>(2) 干研磨过程中，压嵌在研具工作表面的磨粒，在一定压力下对工件表面进行切削，形成许多细微而连续、密集重叠、纵横交错的磨痕。当研磨表面粗糙度 $R_a > 0.016\mu\text{m}$ 时，以切削作用为主</p>
塑性变形作用	<p>在干研磨过程中，圆滑的和已钝化的磨粒对工件表面进行挤压，同时在切削热的作用下，工件表面的微小起伏产生塑性变形及流动而趋于平滑。此时并不产生切屑，但可降低表面粗糙度值</p>
化学促进作用	<p>(1) 湿研磨过程中，研磨剂具有一些硬脂酸、油酸等活性物质，能使工件被加工表面产生化学作用，生成一层化合物薄膜</p> <p>(2) 干研磨过程中，工件被加工表面与空气接触，生成氧化膜</p> <p>(3) 上述化合物薄膜具有厚度薄、形成快、吸附磨料性能强、容易去除的特点。因此工件被加工表面的凸峰，被一层一层地研磨去除而逐渐趋于平滑，从而降低了表面粗糙度值</p>

2. 研磨运动轨迹 在实施研磨时，为保证工件表面被均匀地切削，获得良好的加工质量，要求研磨运动轨迹应能保证工件加工表面和研具表面上各点均有相同或相近的被切削条件和切削条件，具体如下：

- 1) 工件相对研具平面作平行运动，保证工件表面上各点有相同或相近的研磨行程。
 - 2) 工件的运动应遍及整个研具表面，以利于研具的均匀磨损。
 - 3) 研磨运动应力求平衡，尽量避免曲率过大的转角，且工件上任一点的运动轨迹应尽量避免出现周期性的重复。
 - 4) 及时更换工件的前进方向，使研磨纹路交错多变，有利于表面粗糙度值的降低。
- 常用的研磨运动轨迹见表 4-4。

表 4-4 常用研磨运动轨迹

名称	示意图	特点
直线式轨迹		这是一种平行运动,其研磨速度一致,研磨量均匀,运动较平稳,研磨行程的同一致性较好,可获得较低的表面粗糙度值。但研磨轨迹容易重复,研磨盘的磨损不一致,双面研磨时,工件尺寸一致性较差。适用于研磨底面狭长而高度较大的工件
正弦曲线轨迹		工件的运动轨迹和正弦曲线相似,基本上属于平行运动,研磨运动轨迹交错不易重复,方向有规律地变化,可避免切痕的重复,有利于表面粗糙度值的降低。但研磨盘磨损不均匀,影响工件尺寸的一致性和平面平行度的提高
次摆线轨迹		次摆线轨迹为拉开的圆环,工件在左右摆动的同时作直线往复移动。此轨迹能较好地遍及整个平面,不易重合,研磨表面粗糙度值低,研磨同一致性好,因此尺寸的一致性好。由于回转角度大,故不宜用来研磨高度比较大的工件
外摆线轨迹		短幅外摆线能比较全面地满足研磨运动的要求,具有较高的精度,特别是平面平行度和尺寸一致性较好,但需避免轨迹周期性重复。由于研磨运动平稳,研磨行程比较一致,工件能走遍整个表面,所以研磨盘的磨损比较均匀。适于尺寸精度较高、批量较大的小型工件的加工
内摆线轨迹		这种运动尺寸一致性好,研磨盘的磨损均匀。但由于连续 180° 大回转,所以运动平稳性较差,研磨完的工件平面平行度不够好
椭圆线轨迹		运动方向不断改变,可得到较好的研磨质量,结构简单,操作方便。但各处的研磨行程不一致,所以尺寸一致性差,研磨盘的磨损不均匀

2.3 研具

研具是研磨剂的载体,用以涂敷和镶嵌磨料,使游离的磨粒嵌入研具发挥切削作用;同时,它又是研磨成形的工具,把自身的几何形状精度按一定的方式传递到工件上。因此,研具的选择必须考虑材料性质和形状要求两方面的因素。对研具的基本要求是:

1) 研具材料硬度一般比工件材料低,且硬度一致性好,组织均匀致密、无杂质、异物、裂纹和缺陷,并有一定的磨料嵌入性和浸含性。

2) 材料组织均匀致密,有良好的耐磨性和精度稳定性,以保证研磨工件的均匀性。

3) 结构合理,刚性足够,工作表面有较高的几何形状精度,能满足工件加工表面的精度要求。

4) 湿研磨时,研磨工具应具有便于涂敷和储存研磨剂的结构。例如板面上经常开有宽 3~4mm,间距 20mm,交叉角 60° 的沟槽,其好处是:沟槽便于储存多余的研磨料,并可以增加切削力(多余磨料随时可以参见切削);可防止研磨剂的堆积,避免工件蹦边;可以及时排除研磨中产生的切屑,避免划伤工件,有助于散热。

1. 研具材料

选择研具材料的原则是：

1) 研磨工具的材料一般比研磨工件的材料软，以免在研磨过程中磨料嵌入工件，划伤研磨表面。研具材料的适宜硬度以其嵌砂性能而定。所谓嵌砂性能是指磨料的嵌入性、嵌固性及嵌料的均匀性而言。如果研具材料过软，磨粒颗粒将全部埋入到研具中，使其失去切削作用。如果研具材料过硬，磨料不能嵌入研具或嵌得不牢，从而影响研磨质量和效率。此外，选择研具的软硬还应考虑所嵌磨料的粒度。磨料粒度较大时，应选较软的研具材料；磨料粒度较小时，应选较硬的研具材料。

2) 选用不同种类磨料时，研具材料要与之适应。如选用磨料为金刚砂时，常采用铸铁材料的研具；选用氧化铬，常采用玻璃作为研具。

3) 选择研具材料时要考虑耐磨性。

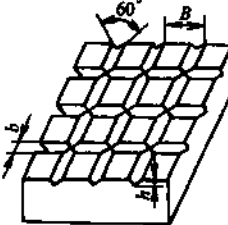
研磨工具常用的材料见表 4-5。

表 4-5 常用研具材料

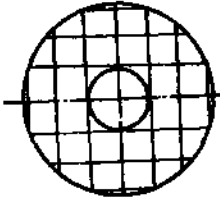
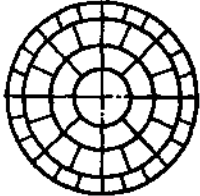
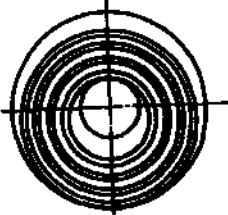
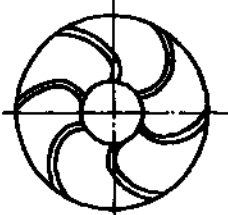
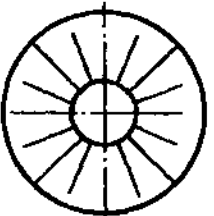
研具材料	性能和特点	适用范围
灰铸铁	硬度低(120~160HBS)，结晶粒细小。金相组织以铁素体为主，可适当增加珠光体比例，用石墨球化及磷共晶等方法提高使用性能，由于其多孔性，磨粒的含浸性好	用于湿研平板 要求保持形状，使用含灰钢铸铁
高磷铸铁	磨粒的硬度较高(160~200HBS)，以均匀细小的珠光体(体积分数70%~80%)为基体，可提高平板使用性能	用于干研平板及嵌砂研磨平板
10、20 低碳钢	强度较高	用于铸铁研具强度不足时，研磨孔径小于8mm的小孔、窄槽等
黄铜、纯铜	磨粒易嵌入，研磨工效高，但强度低，不宜用过大压力 耐磨性低，加工表面粗糙度高	用于研磨软金属 用于研磨余量较大的工件，粗研磨小孔
锡、铅、各种软合金	制成研光盘	研磨石英基片(可用于制造高精度振动元件)
木、竹、丝、纤维板、硬纸板、木炭	组织紧密、均匀、细致、纹理平直、无节疤虫伤等缺陷，以微观蜂窝状结构为最好	用于抛光和擦亮 研磨铜和其他软金属
沥青、塑料、石蜡、钎料	磨粒易于嵌入，组织特软，不能承受较大压力	适用于玻璃、水晶、电子元件等的精研和镜面研磨
玻璃	脆性大，一般要求厚度 $\geq 10\text{mm}$ ，并经450℃退火处理	用于精研，并配用氧化铬、氧化铈研磨膏，可获得良好的研磨效果

2. 通用研具(见表 4-6)

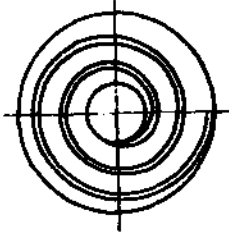
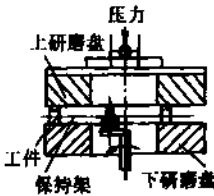
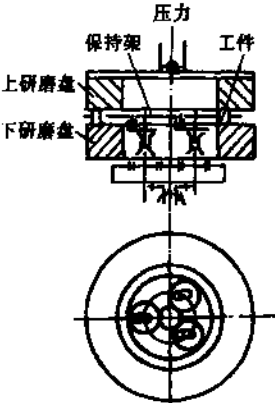
表 4-6 通用研具类型及适用范围

名称	简图	结构特点	适用范围
平面研具 研磨平板		湿研平板有开槽和不开槽两种。开槽目的是用于刮去多余的研磨剂，使零件获得高的平面度。常开60°V形槽，宽 b 和槽深 h 为1~5mm，槽距 $B=15\sim 20\text{mm}$ 。研磨平板多制成方形，常用尺寸有200mm×200mm，300mm×300mm，400mm×400mm等规格	用于研磨平面

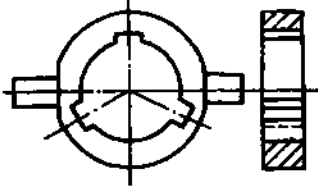
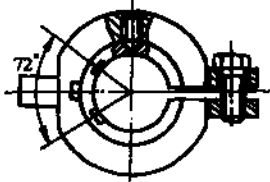


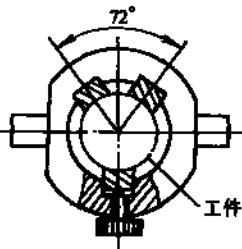
(续)

名称	简图	结构特点	适用范围
直角交叉圆盘			
平 面 磨 具 圆环射线圆盘			
偏 心 圆 环 圆 盘		<p>研磨圆盘也有开槽和不开槽两种。研磨圆盘多开螺旋槽，方向是使研磨液能向内循环移动，与离心力作用相抵消。如用研磨高研磨时，选阿基米德螺旋槽较好。但用开槽圆盘研磨，工件表面粗糙度值比用不开槽时高。</p>	<p>研磨各种平面零件，主要用于小型零件。</p>
螺旋射线圆盘			
径向射线圆盘			



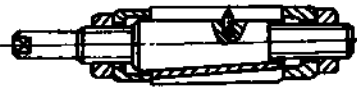

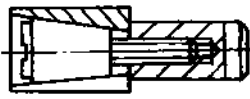
(续)

名称	简图	结构特点	适用范围
阿基米德螺旋线圆盘			
平面单偏心研磨盘		<p>研磨轨迹为次摆线，工件能较好地走遍整个研磨盘，运动平稳</p>	<p>研磨长宽比小且高度低的零件</p>
三偏心研磨盘		<p>改变传动结构的参数可获得不同形状的内外摆线轨迹。运动平稳，研磨均匀性较好</p>	<p>大量生产研磨小件</p>

(续)

名称	简图	结构特点	适用范围
整体式		整体式外圆研具是一个空心整体不开口的研套, 3槽均布	研小直径外圆柱面
无槽式		研磨较大直径时, 孔内加研磨套, 常用可调开口研磨套。研磨套内圆不开槽	研较大直径外圆柱面
带研磨套开口式		研磨套制成开口的, 便于调节尺寸。除开口外, 还开两个槽, 使研磨套具有一定的弹性	研一般直径外圆柱面
		大型工件研磨套, 可在套的内表面铣几条槽, 以增加弹性	研大型外圆柱面
三点式		三点式研具, 是在整体研具架的内径在过中心 72° 角的两点各开一槽, 再在前述 72° 角等分线上, 且与前述所开两槽的对面位置开一较深的槽, 在3个槽内均镶嵌一研磨块, 把三块车成研磨直径尺寸。深槽有一螺纹孔, 拧入调节螺栓	研高精度外圆柱面

(续)

名称	简图	结构特点	适用范围
整体式	不开槽式 	不开槽式不可调研棒, 是实心整体圆柱体, 刚性好, 研磨精度高	精研内圆柱面
	开槽式 	开槽式不可调研棒, 是在实心圆柱体外圆表面上开直槽或螺旋槽或交叉槽。螺旋槽研棒研磨效率高, 但研孔表面粗糙度和圆度较差; 交叉螺旋槽或十字交叉研棒加工质量好。水平研磨开直槽较好; 垂直研磨开螺旋槽较好	粗研内圆柱面
可调式	可调式 	心棒锥度与研磨套的配合锥度为 1:20 ~ 1:50。锥套外径比工件小 0.01 ~ 0.02mm, 大端壁厚为被研磨孔径的 0.125 ~ 0.8 倍, 研具长度为被研表面长度的 0.7 ~ 1.5 倍。其结构有开槽和不开槽两种	开槽式研棒用于粗研; 不开槽式研棒用于精研
	简易可调式 	中间沿轴向开有一条宽度为 B 的槽, 用几个平头螺钉调节研棒的直径。结构简单, 容易制造, 但调整不便, 可靠性差, 精度差	研磨精度要求不高的内圆柱面
盲孔式 	利用螺纹, 通过锥度使外径胀大。研棒的工作部分长度必须比被研磨孔长度长 20 ~ 30mm。锥度为 1:50 ~ 1:20。研磨盲孔由于磨料不易均布, 可在外径开螺旋槽, 或在轴向做成反锥	研盲孔的内圆柱面	

3. 新型研具

(1) 含固定磨料的烧结研磨平板 该平板是将金刚石或立方氮化硼磨料与铸铁粉末混合后, 利用粉末冶金的方法成形并烧结成薄块, 再用环氧树脂将这些小薄块粘结在底板上组合成大的研磨平板。这种平板适用于精密研磨陶瓷、硅片、石英、硬质合金等脆性材料零件, 研磨效率高, 加工表面光亮如镜。

(2) 粉末冶金研具 以铁粉为基础掺入少量铜粉和石墨粉, 压制成形后高温烧结, 最后精磨加工成形。研磨时加研磨剂, 其效果与灰铸铁研具接近, 但其成本低。

(3) 电铸金刚石研具 利用电铸方法, 通过镍金属结合剂将金刚石磨粒固结成薄片, 再用环氧树脂粘结在基体上而成的手工研具。主要用来研磨硬质合金刀具及各种淬硬金属。这种研具加工效率高, 研后表面粗糙度可达 $R_a 0.1 \mu\text{m}$, 工作面形状保持时间长, 使用方便。

(4) 环氧树脂研磨棒 用于研磨高精度静压轴承, 轴承材料 QA19-4, 要求研磨后圆度达到 $0.6 \mu\text{m}$, 锥度小于 $1 \mu\text{m}$, 两孔同轴度 $0.5 \mu\text{m}$ 。

2.4 研磨剂

研磨剂是由磨料、研磨液及辅料按一定比例调配而成的混合物。

2.4.1 磨料

用于研磨的磨料，与其他磨料加工一样，也是用磨料种类和粒度来表示。研磨时的磨料种类的选择可参见表 4-7。

表 4-7 常用的磨料及其使用范围

系 列	磨 料 名 称	适 用 范 围
氧化铝系	棕刚玉	粗、精研钢、铸铁及青铜
	白刚玉	粗研淬火钢、高速钢及有色金属
	绿刚玉	研磨低粗糙度表面、各种铜件
	单晶刚玉	研磨不锈钢等强度高、韧性大的工件
碳化物系	黑色碳化硅	研磨铸铁、黄铜、铝等材料
	绿色碳化硅	研磨硬质合金、硬铝、玻璃、陶瓷、石材等材料
	碳化硼	研磨和抛光硬质合金、陶瓷、人造宝石等高硬度材料，是金刚石的代用品
超硬磨料系	天然金刚石	研磨硬质合金、人造宝石、玻璃、陶瓷、半导体材料等高硬度难加工材料
	人造金刚石	
	立方氮化硼	研磨硬度高的淬火钢、高钎高钎高速钢、镍基合金钢等
软磨料系	氧化铁	精细研磨或抛光钢、淬硬钢、铸铁、光学玻璃及单晶硅等；氧化铈的研磨抛光效率是氧化铁的 1.5~2 倍
	氧化铬	
	氧化铈	

磨料粒度的选择一般要根据所要求的表面粗糙度来选择，粒度越细则加工后的表面粗糙度值越低。粗研时为了提高生产率，用较粗的粒度，如 W28~W40；精研时则用较细的粒度，如 W5~W28；精细研磨时则用更细的粒度 W1~W3.5，甚至还可用 W0.5。

2.4.2 研磨液

研磨液主要起润滑与冷却作用。湿研时它是研磨粉的载体，稀释研磨剂，使微粉均匀地分布在研具表面上。对研磨液有以下要求：

- 1) 能有效地散发热量，避免研具和工件表面烧伤。
- 2) 粘性宜低一些，以提高研磨效率。
- 3) 表面张力要低，粉末或颗粒易于沉淀，以保证较好的研磨效果。
- 4) 不会腐蚀工件。
- 5) 化学物理性能稳定，不会因放置或温升而分解变质。
- 6) 能与磨粒很好地混合。

常用的研磨液见表 4-8。

表 4-8 常用研磨液

工 件 材 料		研 磨 液
钢	粗研	煤油 3 份，L-ANIO 油 1 份，汽轮机油(少量)，轻质矿物油(适量)
	精研	L-ANIO 油
铸铁		煤油
铜		动物油(熟猪油与磨料拌成糊状，然后加 30 倍煤油)，汽轮机油(少量)，植物油(适量)
淬火钢、不锈钢		植物油、汽轮机油或乳化液
硬质合金		航空汽油
金刚石		橄榄油、圆度仪油或蒸馏水
金、银、白金		酒精或氨水
玻璃、水晶		水

2.4.3 辅助材料

辅助材料是一种混合脂，它不仅起吸附、润滑作用，而且在研磨过程中还要起化学作用，以加速研磨过程。例如，在研磨液中加入有粘性较好的油酸，它会附着在工件表面上，使工件表面很快产生一层氧化膜。工件表面凸起处的氧化膜在研磨开始时和研具的接触面很小，因而单位面积压力较大，首先被磨粒刮去。新的金属表面很快又被氧化，新形成的氧化膜又很容易地被刮掉。如此继续下去，轮廓峰就逐渐被磨平，而工件表面轮廓谷处的氧化膜却起了保护作用，使轮廓谷处不至被继续氧化。

最常用的辅助材料有硬脂酸、油酸、脂肪酸、蜂蜡、硫化油和工业甘油等。表4-9列出了硬脂酸混合脂的推荐配方。

表4-9 硬脂酸混合脂配方

种类	成分 (质量分数) (%)				使用温度 /°C	备注				
	硬脂酸	石蜡	工业用猪油	蜂蜡						
1	44	28	20	8	18~25	将配方按重量称出，同时加热至100~120°C，搅拌均匀，后用脱脂棉过滤，冷凝成块状后切片备用				
2	57		26	17	<18					
3	47	45		8	>25					
种类	硬脂酸 /g	蜂蜡 /g	二酸二异辛脂 /g	十二烯基丁二酸 /g	无水碳酸钠 /g	甘油	仪表油 /g	石油磺酸钡 /g	航空汽油 /mL	备注
4	100	11	16	0.8					2~4	将上述原料(汽油除外)一起加热(≤80°C)，然后加入航空汽油，不停地搅拌，不使其自由结晶，使各成分均匀混合为止
5	20~30	2~3			0.01~0.04	2~5滴				将硬脂酸和蜂蜡加热(180°C)熔化，然后加入无水碳酸钠和甘油，搅拌1~2min停止加热，继续搅拌至凝固
6	100	10~12					6~8	0.5	10	将上述原料(除汽油外)加热熔化(约80°C)，待温度降至70°C时，加入汽油搅拌均匀，然后倒入容器中成形备用

2.4.4 研磨剂的配制

研磨剂常配制成液态研磨剂、研磨膏和固体研磨剂(研磨皂)三种。

(1) 液态研磨剂 这是一种自由磨粒研磨剂。湿研时用煤油、混合脂加研磨微粉配制而成。配比不太严格，微粉比例约为30%~40%(质量分数)，微粉粒度愈细，其百分比越小，而混合脂比例要加大。当研磨剂由机床自动供给时，微粉比例约为10%~15%(质量分数)。

湿研时，为提高研磨效率，可采用以下配方：白刚玉(W14)16g、硬脂酸8g、蜂蜡1g、油酸15g、航空汽油80g、煤油80g。配制时先将硬脂酸和蜂蜡加热熔解，待其冷却后加入汽油搅拌，过滤后再加入研磨粉和油酸调和即成。

干研时，压砂用研磨剂的配方见表4-10。

表4-10 压砂常用的研磨剂配方

序号	成分	备注
1	白刚玉(W3.5 - W1)	15g
	硬脂酸混合脂	8g
	航空汽油	200mL
	煤油	35mL
		使用时不加任何辅料

(续)

序号	成分	备注
2	白刚玉(W3.5~W1)	25g
	硬脂酸混合脂	0.5g
	航空汽油	200mL
使用时, 平板表面涂以少量硬脂酸混合脂, 并加数滴煤油		
3	白刚玉(W3.5~W1)	50g
	硬脂酸混合脂	4~5g
	与航空汽油及煤油配成	500mL
航空汽油与煤油的比例(质量分数)取决于磨料的粒度		
W0.5 汽油 90% 煤油 10%		
W5 汽油 70% 煤油 30%		
4	刚玉(W10~W3.5)适量, 煤油 6~20 滴, 直接放在平板上用氧化铬研磨膏调成稀糊状	

(2) 研磨膏 一般分为研磨膏和抛光膏两种。抛光膏也用于湿研, 有些研磨膏也用于抛光, 只是在应用时有所侧重。钢铁类零件研磨主要选用刚玉类研磨膏; 硬质合金、陶瓷、玻璃及半导体等高硬度的材料研磨, 可选用碳化硅、碳化硼类研磨膏; 精细研或抛光有色金属选用氧化铬类研磨膏。金刚石研磨膏是以金刚石微粉和其他配合剂精细配制而成, 分为水溶液和油溶性两种, 以水溶性研磨膏应用普遍。金刚石研磨膏主要研磨如硬质合金等高硬材料的工件。

研磨膏的选择可参见表 4-11~表 4-13。

表 4-11 刚玉研磨膏

粒度号	成分(质量分数)(%)				用途
	微粉	混合脂	油酸	其他	
W20	52	26	20	硫化油 2 或煤油少许	粗研
W14	46	28	26	煤油少许	半精研及研窄长表面
W10	42	30	28	煤油少许	半精研
W7	41	31	28	煤油少许	精研及研端面
W5	40	32	28	煤油少许	精研
W3.5	40	26	26	凡士林 8	精细研
W1.5	25	35	30	凡士林 10	精细研及抛光

表 4-12 碳化硅、碳化硼研磨膏

研磨膏名称	成分(质量分数)(%)	用途
碳化硅	碳化硅(240 [#] ~W40)83, 黄油 17	粗研
碳化硼	碳化硼(W20)65, 石蜡 35	半精研
混合研磨膏	碳化硼(W20)35, 白刚玉(W20~W10)与混合脂各 15, 油酸 35	半精研
碳化硼	碳化硼(W7~W1)76, 石蜡 12, 羊油 10, 松节油 2	精细研

表 4-13 人造金刚石研磨膏

规格	颜色	加工表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	规格	颜色	加工表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$
W14	青蓝	0.16~0.32	W2.5	桔红	0.02~0.04
W10	蓝	0.08~0.32	W1.5	天蓝	0.01~0.02
W7	玫瑰红	0.08~0.16	W1	棕	0.008~0.012
W5	桔黄	0.04~0.08	W0.5	中蓝	≤ 0.01
W3.5	草绿	0.04~0.08			

2.5 研磨工艺参数

2.5.1 研磨压力

研磨压力是研磨表面单位面积上所承受的压力(MPa), 可按下列式计算:

$$P_0 = \frac{P}{NA}$$

式中 P ——研磨表面所承受的总压力(N);

N ——每次研磨的次数;

A ——每个工件实际接触面积(mm^2)。

研磨过程中, 研磨压力是一个变值。因为刚开始研磨时, 零件表面粗糙度高、形状误差大, 零件和研具的接触面积较小。随着研磨的进行, 实际接触面积逐渐增大, 研磨压力也随之降低。

研磨压力, 在手工研磨时主要靠操作者的感觉来确定, 而机械研磨时一般为 $0.01 \sim 0.3\text{MPa}$, 研磨压力过小, 研磨效率显著下降; 研磨压力过大, 研具磨损加快, 研磨表面粗糙度上升, 效率反而下降。研磨压力的选择可参见表 4-14。

表 4-14 研磨压力 (MPa)

研磨类型	平面	外圆	内孔(孔径为 5~20mm)	其他
湿研	0.1~0.25	0.15~0.25	0.12~0.28	0.08~0.12
干研	0.01~0.1	0.05~0.15	0.04~0.16	0.03~0.01

2.5.2 研磨速度

在一定范围内, 研磨作用随研磨速度的提高而增强。但是, 过高的研磨速度会造成发热现象, 甚至烧伤被研表面, 会使研磨剂飞溅流失, 运动平稳性降低, 研具急剧磨损, 直接影响了加工精度。一般粗研时, 采用较高压力和较低速度; 而精研时, 则采用较低压力和较高速度, 这样既可提高生产率, 又可保证零件表面质量。研磨速度的选取可参见表 4-15。

表 4-15 研磨速度 (m/min)

研磨类型	平面		外圆	内孔	其他
	单面	双面			
湿研	20~120	20~60	50~75	50~100	10~70
干研	10~30	10~15	10~25	10~20	2~8

注: 工件材质较软或精度要求较高时, 速度取小值。

2.5.3 研磨余量

为提高生产率和保证研磨表面质量, 研磨余量应尽量小, 一般手工研磨不大于 $10\mu\text{m}$, 而机械研磨也应小于 $15\mu\text{m}$ 。

2.5.4 研磨效率

研磨效率以每分钟研磨切除层厚度来表示, 一般淬火钢为 $1\mu\text{m}/\text{min}$, 低碳钢为 $5\mu\text{m}/\text{min}$, 铸铁为 $13\mu\text{m}/\text{min}$, 合金钢为 $0.3\mu\text{m}/\text{min}$, 超硬材料为 $0.1\mu\text{m}/\text{min}$, 水晶、玻璃为 $2.5\mu\text{m}/\text{min}$ 。

2.6 研磨方法与研磨实例

2.6.1 平板的研磨

(1) 平板的研磨运动

- 1) 下平板固定, 上平板作圆周运动;
- 2) 下平板固定, 上平板作“8”字形运动;
- 3) 下平板固定, 上平板作 90° 或 180° 转动;
- 4) 下平板转动, 上平板浮压;

5) 下平板转动, 上平板作圆形运动或摆动。

手工研磨以前两种运动为主, 但都易出现上平板呈凹形, 下平板呈凸形的现象。

(2) 平板的研磨方法

1) 三块平板互研法 可使三块平板同时获得理想平面, 应用广泛。表 4-16 中列出了三块平板互研的几种方法。为便于叙述, 将平板按 1、2、3 编号, 用分数表示上下位置。

2) 两块平板互研法 其实质是应用平板的研磨规律, 不断改换平板的上下位置。用此法研出的平板, 两块平板不可能同时达到理想的平面度, 只能应用其中的一块。

3) 特种研磨方法 又分为以下两种方法: 第一种是以小研大法, 利用小平板配以适当的研磨运动, 研磨大平板, 此法多用于对长方形或不规则大平板的研磨; 第二种是以大研小法, 利用一平面度较好或微凸的专用大平板研磨小平板, 工作时该专用平板始终处于下位。专用平板的硬度必须高于被研平板, 工作时采用的研磨运动, 必须有利于专用平板保持均匀磨损。

表 4-16 三块平板互研法

研 磨 法	对研顺序及要求
矩形循环法	$\frac{2}{1} \rightarrow \frac{3}{1} \rightarrow \frac{3}{2} \rightarrow \frac{1}{2} \rightarrow \frac{1}{3} \rightarrow \frac{2}{3}$, 直至达到理想的平面度
锯齿形循环法	$\frac{2}{1} \rightarrow \frac{1}{3} \rightarrow \frac{3}{2}; \frac{1}{2} \rightarrow \frac{2}{3} \rightarrow \frac{3}{1}; \frac{2}{3} \rightarrow \frac{3}{1} \rightarrow \frac{1}{2}$
组织循环法	$\frac{1}{3} \rightarrow \frac{2}{3} \rightarrow \frac{1}{2} \rightarrow \frac{2}{1} \rightarrow \frac{1}{2} \rightarrow \frac{2}{3} \rightarrow \frac{1}{3}$, 待基本达到要求后, 再改用矩形法或锯齿形法进一步校正。 此法适用于 1、2 号平板呈凸形, 3 号平板呈凹形的研磨
不等距矩形循环法	$\frac{1}{2} \rightarrow \frac{2}{3} \rightarrow \frac{1}{3} \rightarrow \frac{2}{3} \rightarrow \frac{1}{2} \rightarrow \frac{2}{1}$, 待基本达到要求后, 再改用矩形法或锯齿形法进一步校正。 此法适用于 1 号平板呈凸形, 2、3 号平板呈凹形的研磨

(3) 机用研磨盘的研磨修整

1) 研磨盘的对研 采用三块或两块平板互研原理, 在研磨机上进行。研磨时, 在上盘涂以适量的研磨剂, 上盘浮压而下盘转动, 在摩擦力作用下, 上下盘作同向转动, 同时推动上盘悬臂绕立柱摆动, 摆幅根据两盘凹凸情况决定。研磨后要求微凸 $0.15 \sim 1 \mu\text{m}$ 。

2) 用校正环研磨修整研磨盘 见图 4-2。当研磨盘呈凸形时, 校正环向中心移动, 反之向外移动; 如果呈波纹形, 则一环向中心, 一环向外侧移动, 另一环保持原位。校正环的移动量一般不超过 5mm。也有采用外圆带齿的校正环, 依靠装卸中心齿轮, 使校正环得到正转或反转来修整研磨盘。

(4) 平板研磨及其质量鉴别

1) 粗研 主要去除机械加工痕迹, 提高吻合性与平面度。选用磨料为 $180^\# \sim W28$ 粒度的刚玉, 以煤油为辅料。开始时选用 90° 或 180° 转动, 次数多些, 速度低些。待研磨剂均匀后, 再作正常的圆周运动, 但平板移动距离不得超过平板边长的 $1/3$ 。

2) 半精研 选用 $W20 \sim W7$ 的白刚玉, 适当加入一些氧化铬研磨膏或硬脂酸。待三块平板完全吻合, 平面度达到要求, 粗研的痕迹完全去除为止。

3) 精研 研磨剂视需要而定。研磨前对平板和工作环境加以清理, 研磨时速度不宜过高, 移动距离不宜过大,

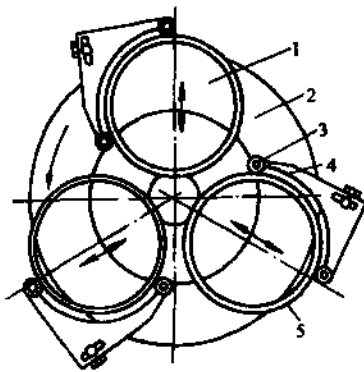


图 4-2 研磨盘校正环校正示意图

1—工件放入位置 2—研磨盘 3—滚动轴承 4—支架 5—校正环(保持架)

平板换位次数适当增加。

研磨质量的鉴别：

- ① 工作面吻合性好，色泽一致；
- ② 工作面无粗研痕迹、碰伤等缺陷；
- ③ 工作面呈微凸，一般为 $0.2 \sim 5\mu\text{m}$ 。

2.6.2 量块研磨

量块的技术要求见表 4-17。

表 4-17 量块技术要求

项 目	要 求	
	0 级	1 级
等级		
量块厚度 H 的偏差	$\pm 0.1\mu\text{m}$	$\pm 0.2\mu\text{m}$
平面度	$\pm 0.1\mu\text{m}$	$\pm 0.2\mu\text{m}$
研磨面粗糙度 R_a	$0.010\mu\text{m}$	$0.016\mu\text{m}$
材料	CrMn 或 GCr15, HRC ≥ 64	
研磨余量	0.05mm	
研磨前表面粗糙度 R_a	0.20 μm	

量块研磨工艺见表 4-18。每批量块的尺寸差 $< 0.1\mu\text{m}$ 。为保证研磨质量，必须对工件预选，使每批工件的尺寸差 $\leq 3 \sim 5\mu\text{m}$ 。精研时须进行几次工件换位，换位法见图 4-3。

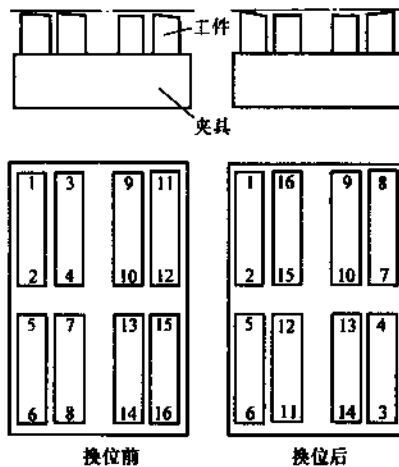


图 4-3 量块平面研磨换块法

表 4-18 量块研磨工艺

工 序	研磨余量 $/\mu\text{m}$	研磨方式	研磨剂粒度	可达到的表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$
一次研磨	10	湿研	W7	0.1
二次研磨	4	湿研	W3.5	0.05
三次研磨	1.5	干研	W2.5	0.025
四次研磨	0.6, 0.3	干研	W1.5	0.012
精研	0.1	干研	W1	0.01 ~ 0.008

2.6.3 外圆研磨

(1) 车床手工研磨 用可调节研磨环在普通车床上进行, 应注意研磨压力与研磨剂浓度。工件转速由外圆直径决定, 直径 $< 80\text{mm}$, 可用 100r/min 左右, 直径 $> 100\text{mm}$, 可选用 50r/min 左右。

(2) 双盘研磨机研磨 多用于较大批量生产。研磨时, 工件置于上下研磨盘之间的硬木质保持架上按工件尺寸开的斜槽中, 当下研磨盘和偏心保持架旋转时, 工件则在槽内作旋转和往复运动。双盘研磨机可分为单偏心式、三偏心式和行星轮式三种, 可使工件除旋转外分别按周摆线、内摆线和外摆线作复合运动。圆柱形工件研磨参数可按表 4-19 选取。

表 4-19 圆柱形工件研磨参数

研磨类型	下研磨盘与保持架速比	研磨速度/(m/min)	偏心量/mm	斜角 $\alpha/(\circ)$
粗研	-0.3 ~ -0.4	50 ~ 60	15 ~ 18	15 ~ 18
精研	-3.5 ~ -1.2	20 ~ 30	5 ~ 10	15 ~ 18

注: 速比的负值表示下研磨盘与保持架旋转方向相反。

每批工件研磨前尺寸差 $\leq 3 \sim 5\mu\text{m}$, 精研前, 应将比本批工件最大尺寸大 $1\mu\text{m}$ 的 3 个工件, 分别置于保持架相隔 120° 的槽内, 适当降低下盘转速, 以保证圆锥度的要求。对圆度要求较高 ($\leq 0.8\mu\text{m}$) 的工件, 研磨前圆度须控制在 $2 \sim 3\mu\text{m}$ 以下。精研时还须进行一次到几次的工件换位, 换位方式视条件而定, 换位法可参照图 4-4。

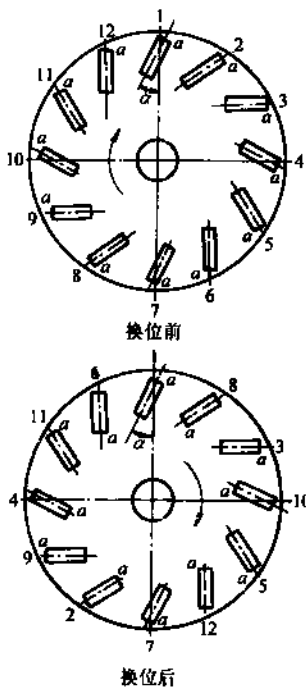


图 4-4 圆柱形工件圆盘式研磨换位法

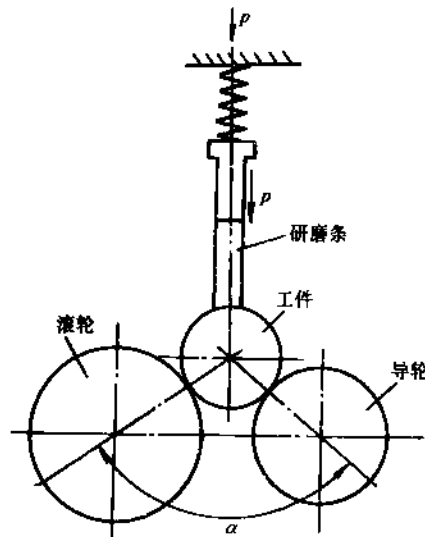


图 4-5 无心研磨圆柱工件原理图

(3) 无心研磨机研磨 研磨原理见图 4-5。无心研磨机由滚轮、导轮和压板(铸铁研磨条)组成, 压板与工件弹性接触, 导轮导角 $2^\circ \sim 5^\circ$, 锥度 0.5° , 两轮直径比一般取 $1.3 \sim 1.5$, 两轮

中心与工件中心连线夹角 α 一般取 $130^\circ \sim 140^\circ$ 。研磨压力选 $(0.4 \sim 1) \times 10^5 \text{ Pa}$ ；研磨速度，导轮取 $1 \sim 2 \text{ m/s}$ ，滚轮取 $1.5 \sim 3 \text{ m/s}$ 。研磨后圆度 $\leq 0.3 \mu\text{m}$ ，圆柱度 $\leq 1 \mu\text{m}$ ，表面粗糙度 $R_a 0.1 \mu\text{m}$ 。

2.6.4 内孔研磨方法

(1) 手工研磨 使用固定式或可调式研磨棒。加工时，将工件夹持在 V 形铁上，待研磨棒置入孔内后调整螺母，使研磨棒产生弹性变形，给工件以适当压力，双手转动铰杠，同时沿工件轴线作往复运动。

(2) 车床上手工研磨 将研磨棒夹持在车床卡盘上，手握工件在研磨棒全长上作往复运动，均匀研磨。研磨速度控制在 $0.3 \sim 1 \text{ m/s}$ 之内。研磨中可不断调大研磨棒直径，以使工件得到所要求的尺寸和几何精度。

(3) 盲孔研磨 精密组合件中，盲孔较多，其尺寸、几何精度一般在 $1 \sim 3 \mu\text{m}$ 之间，表面粗糙度 $R_a \leq 0.2 \mu\text{m}$ ，配合间隙为 $0.01 \sim 0.025 \text{ mm}$ 。工件孔径研磨前尽量接近最终要求，研磨余量尽量小。研磨棒工作长度应稍大于工件孔长 $5 \sim 10 \text{ mm}$ ，并使其前端有大于直径 $0.01 \sim 0.03 \text{ mm}$ 的倒锥。粗研磨用 W20 研磨剂，精研磨前洗净残留研磨剂，再用细研磨剂研磨。

2.6.5 球面研磨

球面研磨专指研磨加工带精密球面体工件的球面。它与整球体(如钢球)工件的研磨完全不同。

由于研具工作部分形状不同，内、外球面研磨的加工方式分成形法和范成法两类。成形法加工用的研具，其工作部分形状与工件球面形状相反，两者的球面直径应严格相等。范成法加工用的研具，其工作部分为圆柱形或圆筒形。圆柱形研具用于研磨内球面；圆筒形研具用于研磨外球面。其研磨工作部位是研具的圆柱或圆孔与工作端面垂直相交而形成的环形交线(简称工作环线)。研磨开始时，工件与研具环形交线接触。

研磨球面时，主运动是工件绕球面中心旋转，此运动可由机床或其他传动机构驱动；辅助运动是研具绕工作环线或工作球面的旋转。工件外球面直径小于 3 mm 时，研具可不旋转。研具工作部位贴合于工件球面上，施以微小压力，并沿工件球面往复摆动。摆动运动可由手工或机械完成。研具的工作位置应注入适量的研磨剂。

球面研磨主要用于精密球面的终加工，其常用的工艺举例见表 4-20。

表 4-20 球面研磨工艺举例

工艺分类	工艺简图	研具形式	说明
范成法 研磨外球面		圆筒形研具	1) 用于研磨较小直径的工件球面 ($\phi 0.8 \sim 50 \text{ mm}$) 2) 常用于加工带杆的球面体，例如柱塞泵和液压马达的柱塞杆，以及电液伺服阀的反馈杆等 3) 研磨小直径球面时，研具可不转动

工艺分类	工艺简图	研具形式	说明
展成法 研磨内球面		圆柱形研具	<ol style="list-style-type: none"> 1) 研磨球面直径中等($\phi 10 \sim 50\text{mm}$), 球面深度不大于球面半径(半球)的工件内球面 2) 可用于研磨柱塞泵和液压马达的定心座、柱塞体等, 但应用较少, 常采用成形法加工
成形法 研磨外球面		内球面 成形研具	<ol style="list-style-type: none"> 1) 用于球面直径较大, 但球面宽度较窄的外球面工件的研磨 2) 主要用于研磨密封偶件的外球面, 如液压马达的端盖
成形法 研磨内球面		外球面 成形研具	<ol style="list-style-type: none"> 1) 用于球面直径较小, 且球面深度大于半球的内球面, 也可用于球面直径较大, 但球面宽度较窄的内球面的研磨 2) 主要用于柱塞泵和液压马达的柱塞座内球面和端盖等密封偶件内球面研磨

2.7 研磨的常见故障及排除方法

半干及湿研磨的常见故障及排除方法见表 4-21。

表 4-21 半干及湿研磨的常见故障及排除方法

常见故障	产生原因	排除方法
工件研磨表面划伤	操作不当	先停机, 再取下工件或研具
	研具或工件有毛刺、碰伤或不清洁	仔细去除毛刺及碰伤而凸出的高点, 并严格清洗干净
	研磨设备和工作地不清洁, 落入灰尘或外来物	认真保持设备、工作地和一切用具的清洁, 防止外来物混入研磨剂中
	研具材料过硬	选择较软的研具材料
	磨料粒度不纯或混入粗颗粒	使用合格的研磨剂或重新分选磨料
	粗研磨痕迹未去除	正确选择粗、细研磨的磨料粒度, 合理选择研磨余量
	工件被研表面不完整, 有相交孔或沟槽	选用较细粒度的研磨剂, 正确掌握研磨压力, 使用不带容屑槽的研具
测量时划伤	正确使用合格的量具	

(续)

常见故障	产生原因	排除方法
工件研磨表面粗糙度达不到要求	磨料粒度太粗或使用不当	选用较细粒度的磨料,并涂敷均匀
	磨料材质选择不妥	根据工件材料及硬度,正确选择磨料
	研磨剂成分和比例不合适	重新配制研磨剂,保证有较好的润滑性
	研具表面粗糙度差	改善研具表面粗糙度,选用不带容屑槽的研具
	研具材料太硬	选用较软的研具材料
	工件材料硬度不均	重新热处理或更换工件材料
	研磨剂添加量太多	合理添加研磨剂,研磨至最后仅加润滑油
工件研磨表面暗淡无光泽,光亮度差	研磨压力过大	减小研磨压力
	研磨剂添加过量	减少研磨剂添加量,适当加入润滑油
	研磨压力过小	适当加大研磨压力
	磨料材质选择不当	选用合适的磨料
	工件材料硬度低	提高工件硬度或选用软磨料抛光
	研具材料过硬	选用较软材料作研具
研磨磨耗太快	研磨方法不妥	采用干研磨
	研具材料太软,耐磨性差	选用硬度较高、耐磨性较好的材料作研具
	研磨余量过大	合理选择研磨余量
	研磨运动不适当	研磨运动应尽量使研具均匀磨耗
形状误差大	研具工作面积过小	合理设计研具,使其尽量增大工作面积
	操作不当	练好基本功,掌握好用力的大小、方向、作用点和研磨时间
	研磨方法不当	采用干研磨
	工件被研表面太小或结构不利于正常研磨	合理设计研磨夹具或将工件数件合在一起研磨,以及探索新的研磨方法
	研具本身形状误差大	认真修整研具,使之满足工件要求
	研具或工件跳动大	提高研具或夹具的要求,使用合格的机床和卡盘,加工时仔细校正
	研具材料太软	研具选用较硬的材料
	研具设计不妥或制造不合格	根据工件的具体情况,认真确定研具的有关尺寸,并严格按照要求制造
	研磨运动不适当	采用符合要求的研磨运动,尽量使工件或研具磨耗均匀
	研磨速度太高	适当降低研磨速度
	研磨时间太长	准确地预加工,减少研磨余量
	研磨剂太厚、研磨压力太小	减少研磨剂用量,适当增大研磨压力
	磨料粒度太粗	使用较细粒度的磨料
	工件变形或温度影响	工件热处理,分粗、细、精研磨阶段加工,减小手温的影响,并适当控制温度
位置误差大	操作不当	操作应平衡;用力应得当;做到均匀去除余量
	余量太大	减少研磨余量,缩短研磨时间
	预加工不良	提高预加工质量或要求,研磨前先检查工件并根据检查结果进行研磨
	加工方法不妥	改进研磨方法或设计、使用夹具,改善加工条件,满足工件要求
研磨效率低	磨料硬度低、粒度细或研磨剂添加量不够	选用硬度高、粒度粗、研削力强的磨料,并加大研磨剂的添加量
	研磨速度低、压力小	提高研磨速度,加大研磨压力
	研磨余量大或预加工不良	提高预加工质量,选择合理的加工余量
	研具过硬或过软	选择硬度合适的材料作研具
	工序安排不当或操作不当	安排粗、细、精研磨工序

干研磨的常见故障及排除方法见表 4-22。

表 4-22 干研磨的常见故障及排除方法

常见故障	产生原因	排除方法
工件研磨表面划痕	灰尘侵入研磨部位	保证工作地、工件及一切用具的清洁
	磨料粒度不一致	重新分选磨料，再次压砂或打磨
	平板表面不清洁	勤擦平板，及时去除研屑和污物
	砂粒嵌得不牢	重新打砂，擦平板
	被仪器、量具或平晶工作面拉毛	使用合格的测量器具，并认真擦拭干净
工件研磨表面烧伤	研磨时间过长	适当定温、间断研磨
	润滑、冷却不良	经常涂擦研磨辅助材料
	研磨速度过快	降低研磨速度
	研磨压力过大	减小研磨压力
	砂粒钝化	重新压砂，保证有足够的切削能力
表面粗糙度不合格	磨料粒度太粗	磨料改用较细粒度或进一步打砂
	平板嵌砂不足	增加压砂次数
	辅助材料使用不当或质量不好	使用优质辅助材料，保证平板表面润滑良好
	平板表面不清洁	认真擦净平板，及时去除研屑或污物
光亮度不一致	基本功不过硬	练好基本功，做到研磨时平稳有力
	平板压砂不匀	增加压砂次数
	表面局部烧伤	研去烧伤部分
	平板平面度不良或变化	保证平板平面度，并用胶垫垫稳平板
有圆边圆角	两手用力不当	加强基本功练习
	夹具夹紧力过大或过小	调整夹具的夹紧力，防止工件变形和松动
	修整位置精度时研削量过大	注意位置精度与研削量的关系
	平板表面污物多	勤擦平板，及时去除研屑及污物
平面度不合格	平板的平面度或曲率未满足工件平面度要求	重新研磨平板，修整平面度或曲率
	两手掌握不稳	练好基本功
	平板嵌砂不匀	重新压砂
	夹具使用不当	掌握好夹具夹紧力
	研磨时间过长或工件变形	注意温度影响，防止工件变形

3 抛光

抛光是用微细磨粒和软质工具对工件表面进行加工，是一种简便、迅速、廉价的零件表面的最终光饰加工方法。其主要目的是去除前工序的加工痕迹(刀痕、磨纹、刻印、麻点、毛刺、尖棱等)，改善工件表面粗糙度，或使零件获得光滑光亮的表面。这种方法一般不能提高工件的形状精度和尺寸精度。通常用于电镀或油漆的衬底面、上光面和凹表面的光整加工，抛光的工件表面粗糙度可达 $R_a 0.4 \mu\text{m}$ 。随着技术的发展，又出现了一些新的抛光加工方法，如浮动抛光、水合抛光等，这些方法不仅能降低表面粗糙度，改善表面质量，而且能提高形状精度和尺寸精度。抛光应用广泛，从金属材料到非金属材料制品，从精密机电产品到日常生活用品，均可使用抛光加工提高表面质量。

3.1 抛光机理与加工要素

抛光加工模型见图 4-6, 其机理见表 4-23。

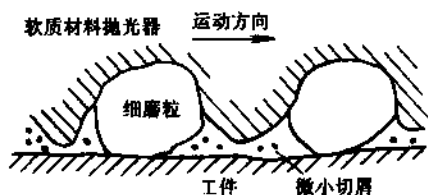


图 4-6 抛光加工模型

表 4-23 抛光机理

机理分类	说明
微切削作用	抛光属于用微细磨粒进行的切削加工, 因此抛光过程会产生微小的划痕, 生成细微的切屑
塑性流动作用	磨粒与抛光器对工件有摩擦作用, 使得接触点温度上升, 工件表面产生塑性流动, 形成凹凸不平的光滑表面
化学作用	抛光剂中的脂肪酸在高温下会产生化学反应, 从工件金属表面溶析出金属皂, 它是一种易于切除的化合物, 起着化学洗涤作用, 使工件表面平坦光滑
机械作用	加工环境中由于尘埃、异物的混入而产生机械作用

抛光的加工要素与研磨基本相同, 研磨时有研具, 抛光时有抛光器(或称抛光工具)。抛光与研磨是不同的。抛光时所用的抛光器一般是软质的, 其塑性流动作用和微切削作用较强, 其加工效果主要是降低表面粗糙度。研磨时所用的研具一般是硬质的, 其微切削作用、挤压塑性变形作用较强, 在精度和表面粗糙度两个方面都强调要有加工效果。近年来, 出现了用橡胶、塑料等制成的抛光器或研具, 它们是半硬半软的, 既有研磨作用, 又有抛光作用, 因此是研磨和抛光的复合加工, 可以称之为研抛, 这种方法能提高加工精度和降低表面粗糙度, 而且有很高的效率。由于考虑到这一类加工方法所用的研具或抛光器总是带有柔性的, 故都归于抛光加工一类。

3.2 抛光轮

(1) 固定磨料抛光轮 抛光轮用棉布、帆布、毛毡、皮革、软木、纸或麻等材料, 经缝合、夹固或胶合而成。经修整平衡后, 在其切片层间和外圆周边交替涂敷一定的胶质粘结剂(如环氧树脂等)和一定粒度、硬度的磨粒(如金刚砂等), 达到规定的直径尺寸、厚度和质量要求, 并保证一定的刚性和柔软性。

(2) 粘附磨粒抛光轮 采用对抛光剂有良好浸润性的材料, 以保证抛光轮粘附磨粒的性能。帆布胶压抛光轮刚性好, 切除力强, 但仿形性差; 棉布抛光轮整体缝合的柔软性好, 但抛光效率低。抛光轮的“刚性”还与其质量和转速有关。

(3) 液中抛光轮 大多采用脱脂木材和细毛毡制造。脱脂木材如红松、椴木具有木质松软、组织均匀、微观形状为蜂窝状, 浸含抛光液多, 且有易于“壳膜化”的优点, 可用于粗、精抛光。细毛毡抛光轮材质松软、组织均匀, 且空隙大, 浸含抛光液的能力比脱脂木材大, 主要用于精抛机进行装饰抛光。

抛光轮的材料可参见表 4-24 选用。抛光轮材料通常都要采取不同的处理方法, 如漂白、上浆、上蜡、浸脂或浸泡药物等, 以提高对抛光剂的保持性, 增强刚性, 延长使用寿命, 改善润滑或防止过热燃烧等。但处理时务必注意不要使处理用的材料粘附到工件表面上, 否则难以

去掉。

表 4-24 抛光轮材料的选用

抛光轮用途	选 用 材 料		
	品 名	柔 软 性	对抛光剂保持性
粗抛光	帆布、压毡、硬壳纸、软木、皮革、麻	差	一般
半精抛光	棉布、毛毡	较好	好
精抛光	细棉布、毛毡、法兰绒或其他毛织品	最好	最好
液中抛光	细毛毡(用于精抛)、脱脂木材(榉木)	好(木质松软)	浸含性好

3.3 抛光剂

抛光剂由粉粒状的软磨料、油脂及其他适当成分介质均匀混合而成。

抛光剂所含磨料的种类及其适用的工件材料见表 4-25。磨料粒度与加工时可获得的工件表面粗糙度的一般关系见表 4-26。

抛光剂在常温下可分为固体和液体两种，其中固体抛光剂用得较多，其种类和用途见表 4-27。

表 4-25 抛光剂所含磨料的种类及其适用的工件材料

序号	磨料名称	主要成分	抛 光 类 型	主要适用的工件材料
1	天然或人造金刚石	C	粗、细、精、超精抛光	宝石、玻璃、半导体、石材、陶瓷、硬质合金等
2	立方氮化硼	CBN	粗、细抛光	宝石、陶瓷、硬质合金、淬火钢
3	绿碳化硅	SiC		玻璃、硬质合金等
4	黑碳化硅			铸铁、工具钢、淬火钢等
5	棕刚玉	Al ₂ O ₃		铝、铸铁、铜合金等
6	白刚玉		细、精抛光	合金钢、高硬度钢、青铜、铜等
7	绿色氧化铬	Cr ₂ O ₃	精、超精抛光	铜合金、不锈钢、合金钢等
8	青玉粉	蓝宝石	精、超精抛光	铜合金、软钢等
9	玛瑙	SiO ₂		宝石、水晶、石英、硅玻璃等
10	精制氧化铁(红)	Fe ₂ O ₃		玛瑙、刚玉、金、银、白金等
11	精制氧化铁		细、精抛光	铜、青铜、铝、镀铜表面等
12	白云石抛光粉	焙烧白云粉 MgO、CaO	精、超精抛光	铜、黄铜、铝、镀铜面、镀锌面等
13	氧化锆	ZrO ₂	精抛光	硅、半导体、晶体等
14	氧化铈(淡黄)	CeO ₂	精、超精抛光	软金属、铁、铜、玻璃、水晶、硅、锗等
15	氧化铈(白)		粗、细抛光	
16	微晶无水硅酸	SiO ₂	精抛光	塑料、硬橡胶、象牙等

在固体抛光剂中使用最普遍的是熔融氧化铝，它和抛光轮间的胶接牢靠，碳化硅则较差，使用受到一定限制。

液中抛光用的抛光液，一般采用由氧化铝和乳化液混合而成的液体。氧化铝要严格经 5~10 层细纱布过滤，过滤后的磨粒粒度相当于 W5~W0.5。抛光液应保持清洁，若含有杂质或氧化铬和乳化液混合不均匀，会使抛光表面产生“桔皮”、“小白点”、“划圈”等缺陷，此外还须注意工作环境的清洁。从粗抛过渡到精抛，要逐渐减少氧化铬在抛光液中的比例，精抛时氧化

铬所占比例极小。

表 4-26 磨料粒度与加工表面粗糙度的关系

磨料		加工表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	磨料		加工表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$
粒度	尺寸范围/ μm		粒度	尺寸范围/ μm	
W63	63~50	0.8~0.4	W5	5~3.5	0.05~0.025
W50	50~40		W3.5	3.5~2.5	
W40	40~28		W2.5	2.5~1.5	
W28	28~20	0.4~0.2	W1.5	1.5~1	0.025~0.012
W20	20~14		W1	1~0.5	
W14	14~10		W0.5	0.5~0.25	
W10	10~7	0.2~0.1	W0.25	0.25~0.1	0.012~0.008
W7	7~5		W0.1	<0.1	

表 4-27 固体抛光剂的种类及适用范围

类别	名称	抛光用磨料	适用范围	
			工序	工件材料
油 脂 性	赛扎尔抛光膏	熔融氧化铝(Al_2O_3)	粗抛	碳素钢、不锈钢、非铁金属
	金刚砂膏	熔融氧化铝(Al_2O_3) 金刚砂($\text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$)	粗抛 半精抛	碳素钢、不锈钢、铝、硬铝、铜等
	黄抛光膏	板状硅藻岩(SiO_2)	半精抛	铁、黄铜、铝、锌(压铸件)、塑料等
	棒状氧化铁 (紫红铁粉)	氧化铁(粗制)(Fe_2O_3)	半精抛 精抛	铜、黄铜、铝、镀铜面、铸铁等
	白抛光膏	焙烧白云石(MgO, CaO)	精抛	铜、黄铜、铝、镀铜面、铸铁等
	绿抛光膏	氧化铬(精制)(Cr_2O_3)	精抛	不锈钢、黄铜、铝、镀铬面等
	红抛光膏	氧化铁(精制)(Fe_2O_3)	精抛	金、银、白金等
	塑料用抛光剂	微晶无水硅酸(SiO_2)	精抛	塑料、硬橡胶、象牙等
非 油 脂 性	润滑油修整棒 (润滑油)	—	粗抛	各种金属、塑料(作为抛光轮、抛光带、扬水轮等的润滑油加工油剂)
	消光抛光剂	碳化硅(SiC) 熔融氧化铝(Al_2O_3)	消光加工, 也可用于粗抛光	不锈钢、黄铜、锌(压铸件)、氧化铝、镀铜面、镀铬面、镀锌面、塑料

3.4 抛光工艺参数

抛光轮速度可参见表 4-28 选择。抛光直线进给速度一般为 3~12m/min。

表 4-28 抛光轮速度推荐值

工件材料	抛光轮速度/(m/s)	
	固定磨粒抛光轮	粘附磨粒抛光轮
铝	31~38	38~43
碳钢	36~46	31~51
铝板	26~38	36~46
黄铜和其他铜合金	23~38	36~46
镍	31~38	31~46
不锈钢和蒙乃尔合金 ^①	36~46	31~51
锌	26~36	15~38
塑料		15~26

① 蒙乃尔合金(Monel)是一种镍铜铁锰的合金。

抛光压力与抛光轮的刚性有关, 最大不超过 1kPa, 如果过大会引起抛光轮的变形。一般在抛光 10s 后, 可将加工表面粗糙程度减少到 1/3~1/10, 减少程度随磨粒的种类而异。

3.5 影响抛光表面质量的因素

影响抛光表面质量的因素及改善措施见表 4-29。

表 4-29 抛光表面质量的影响因素及改善措施

表面质量缺陷	产生原因	改善措施
抛光表面有划痕	抛光前工件表面有毛刺,使抛光表面划伤	抛光前应将毛刺去除干净
	抛光剂中磨料粗细不匀,使抛光面划痕深浅不一	抛光前应对抛光剂鉴定,可用 400 倍显微镜观察。应更换不合格的抛光剂,或对其作沉淀、过滤等分选
	抛光剂中磨料片状结构多,加工时磨料不易产生滚压作用,易出现滑压现象,导致抛光面产生较深的划痕	
	抛光剂粘度过大,使磨料不易产生滚压作用。划压机遇多,易出现较大、较多的划痕	对抛光剂适当稀释
	抛光液质地差、杂质多。例如使用干性油,易生成薄而硬的油膜,某些添加剂易变质、有沉淀物,空气中尘埃浸入等,均易导致抛光面产生划痕	应使用不干性油类作润滑剂,避免使用易变质的添加剂,如乳化液等。抛光环境应干净
	抛光液混合不均或磨料供给不均匀,使各工件表面抛磨不均,抛光过程不稳定,导致出现表面呈桔皮状、小白点或划圈等	抛光液要搅拌均匀,抛光剂的供给应均匀
	抛光剂介质中混有较多、较大的磨屑,而导致抛光表面划伤	抛光剂应及时更换
	抛光工具的纤维粗细、软硬相差悬殊;抛光工具有硬质点等,导致出现划痕深浅不一的划伤抛光表面	应对抛光工具严格筛选
	前面工序工件表面粗糙度高或划伤严重,抛光时无法消除	在预加工时要保证工件质量
	抛光后未及时清洗,表面受腐蚀。操作过程中或运输、存放时碰伤、划伤工件抛光面	应及时清洗,加强责任心
抛光表面粗糙度降低不明显或各部位的抛光量严重	抛光工具柔软性过大,使去除工件表面层金属的能力较弱,且抛光时间不足	适当提高抛光工具的运行速度或更换“刚性”较强的抛光工具
	抛光工具吸附抛光液及镶嵌游离磨料的能力低,使抛光能力降低	选用吸湿性和磨料的粘结性及亲和性较好的工具
	抛光工具的“刚性”过强,使工件表面局部切除量过大;抛光工具的仿形能力过弱,不能完全触及工件型面各部位	适当减低抛光工具的运动速度或采用“刚性”较弱的抛光工具
	工艺参数选择不当,例如抛光压力过大或过小;抛光速度过高或过低;抛光余量过多或过少。抛光工艺方法不能适应低表面粗糙度的加工等	调整工艺参数,更换工艺方法

4 珩磨

珩磨是一种以固结磨粒压力进给进行切削的光整加工方法,它不仅可以降低加工表面的粗糙度,而且在一定的条件下还可以提高工件的尺寸及形状精度。珩磨加工主要用于内孔表面,但也可以对外圆、平面、球面或齿形表面进行加工。珩磨时,有切削、摩擦、压光金属的过程,可以认为它是磨削加工的一种特殊形式,只是珩磨所用的磨具是由几根粒度很细的油石组成的珩磨头。

4.1 珩磨原理及工艺特点

珩磨的工作原理如图 4-7a 所示,珩磨加工时工件固定不动,珩磨头与机床主轴浮动连接,在一定压力下通过珩磨头与工件表面的相对运动,从而从加工表面上切除一层极薄的金属。珩磨加工时,珩磨头有三个运动,即旋转运动、往复运动和垂直于加工表面的径向加压运动。前

两种运动是珩磨的主运动，它们的合成使油石上的磨粒在孔的表面的切削轨迹呈交叉而不重复的网纹(如图 4-7b 所示)，因而易获得低表面粗糙度的表面。径向加压运动是油石的进给运动，加压力越大，进给量就越大。

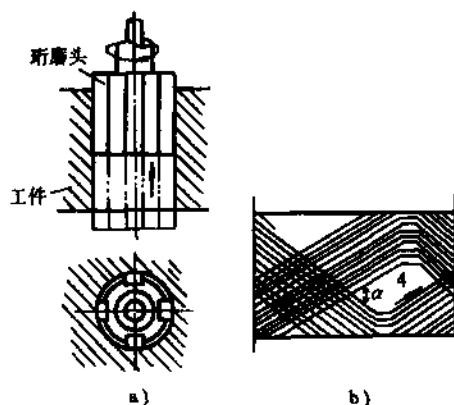


图 4-7 珩磨加工的工作原理

珩磨加工的主要特点见表 4-30。

表 4-30 珩磨加工的主要特点

加工特点	说 明
机床的精度要求低； 结构较简单	1) 珩磨对机床的精度要求低，与加工同等精度零件的磨床相比，珩磨机的主要精度可降低 1/2 ~ 1/7；动力消耗可下降 1/2 ~ 1/4；可大幅度降低成本 2) 机床结构较简单，除专用珩磨机外，也可用车床、钻床或镗床等设备改装。且机床较易实现自动化
加工精度高	1) 加工小直径孔时，孔的圆柱度可达 $0.5 \sim 1 \mu\text{m}$ ；直线度可达 $1 \mu\text{m}$ 2) 加工中等直径孔时，圆柱度可达 $5 \mu\text{m}$ 3) 加工外圆柱面时，圆柱度最高可达 $0.04 \mu\text{m}$ 4) 加工尺寸的分散性误差可在 $1 \sim 3 \mu\text{m}$ 范围内
加工表面质量好	1) 加工表面粗糙度 R_a 可达 $0.8 \sim 1 \mu\text{m}$ ；最低可达 $0.012 \mu\text{m}$ 2) 加工面形成有规则、均匀而细密的交叉网纹，有利于润滑油贮存和油膜保持，故珩磨表面能承受较大载荷和具有较高的耐磨性 3) 加工热量小，工件表面不易产生烧伤、变质、裂纹、嵌砂和零件变形等缺陷，故特别适用于精密偶件的加工
加工范围广	1) 可加工除铅以外的所有金属材料 2) 可加工各类圆柱及圆锥孔，也可加工各类外圆 3) 在极限情况下可加工孔径 $1 \sim 2000 \text{mm}$ ，孔深 $1 \sim 2400 \text{mm}$
切削效率高	1) 在单位切削时间内，珩磨参加切削的磨粒数为磨削的 100 ~ 1000 倍，故具有较高的金属切除率 2) 珩磨阀套类工件孔时，金属切除率达 $80 \sim 90 \text{mm}^3/\text{s}$ ，其切削效率比研磨高 3 ~ 8 倍。 3) 珩磨时以工件孔壁导向，进给力由中心均匀压向孔壁，故只须切除较少的余量，便可完成精加工
其他	1) 操作简单 2) 特别适于加工薄壁孔、深孔和超深孔

4.2 珩磨头

珩磨头一端连接机床主轴接头，杆部镶嵌或连接珩磨油石。在加工过程中，珩磨头的杆部与珩磨油石进入工件的被加工孔内，并承受切削转矩；在机床进给结构的作用下，驱动珩磨油石作径向扩张，实现珩磨的切削进给，使工件孔获得所需的尺寸精度、形状精度和表面粗糙度。

珩磨头的结构形式及其合理性对加工质量和生产率有很大影响。由于珩磨的零件孔大小不同，深浅不一，所以珩磨头的结构形状也都不一样，但不论对哪一种珩磨头，它必须具备以下几个基本条件：

- 1) 珩磨头上的油石对加工零件表面的压力能自由调整，并能保持在一定范围内。
- 2) 珩磨过程中，油石在轴的半径方向上可以自由均匀地胀缩，并具有一定刚度。
- 3) 珩磨过程中，零件孔的尺寸在达到要求后，珩磨头上的油石能迅速缩回，以便于珩磨头从孔内退出。
- 4) 油石工作时无冲击、位移和歪斜。

图 4-8 是一种利用螺旋调节压力的较简单的珩磨头。本体用浮动装置与机床主轴相连接，油石用粘结剂(或用机械方法)与油石座固结在一起装在本体的槽中，油石座两端由弹簧箍住，使油石保持向内收缩的趋势。珩磨头尺寸的调整是通过旋转螺母，推动调整锥向下移动，通过顶块使油石在圆周上均匀张开，当油石与孔表面接触后，再继续旋转螺母，即可获得工作压力。

这种珩磨头结构比较简单，制造方便，经济实用，但工作压力的调整频繁、复杂，且珩磨过程中随油石磨损或孔径增大而不稳定。为了自动获得恒定压力，成批或大量生产中应采用气动或液压控制的珩磨头。采用气动或液压控制油石胀缩的优点是：在珩磨过程中，油石对零件表面的压力均匀，磨削平稳，而且没有振动，生产率比较高。但是，这种珩磨头的结构较复杂，只有在专用的珩磨机上才能使用，一般中小型修理厂就可能不太适用。

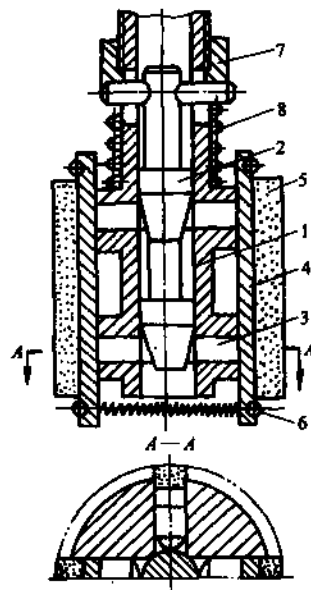


图 4-8 利用螺旋调节压力的珩磨头结构

1—本体 2—调整锥 3—顶块 4—油石座 5—油石 6—弹簧箍 7—螺母 8—弹簧

4.3 工艺参数的选择

4.3.1 珩磨速度和珩磨交叉角

珩磨速度 v 由圆周速度 v_t 和往复速度 v_a 合成。磨粒在加工面上切削出交叉网纹，形成珩磨交叉角 θ ，如图 4-9 所示。

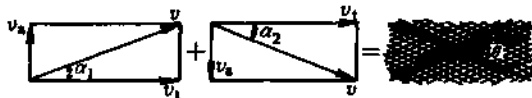


图 4-9 珩磨速度与珩磨交叉角的关系

$$\begin{aligned} \text{圆周速度:} \quad v_t &= \frac{\pi D n}{1000} \\ \text{往复速度:} \quad v_a &= \frac{2 n_a l_x}{1000} \\ \text{珩磨速度:} \quad v &= \sqrt{v_t^2 + v_a^2} \\ \text{珩磨交叉角:} \quad \theta &= 2 \arctan \frac{v_a}{v_t} \end{aligned}$$

式中 D ——珩磨头直径(mm);
 n ——珩磨头转速(r/min);
 n_a ——磨头往复次数(dst/min);
 l_x ——磨头单行程长度(mm)。

要获得较好的珩磨效果, 必须正确选择 v_t 、 v_a 和 θ , 具体可参见表 4-31。

表 4-31 珩磨切削参数的选择

工件材料	加工性质	珩磨速度 $v/(m/min)$	交叉角 $/(^{\circ})$	圆周速度 $v_t/(m/min)$	往复速度 $v_a/(m/min)$
灰铸铁	粗加工	25~30	45	23~28	10~12
	精加工	~35	45	32	13.5
球墨铸铁	粗加工	22~25	45	20~23	9~10
	精加工	~30	45	27	12
未淬火钢	粗加工	20~25	45	18~22	9~11
	精加工	~28	45	25	12
纯铁	粗加工	25~30	45	23~28	10~12
	精加工	~33	45	31	12
合金钢	粗加工	25	45	23	10
	精加工	~28	45	26	11
淬硬钢	粗加工	15~22	40	14~21	5~8
	精加工	~30	40	28	10
铝	粗加工	25~30	60	21~26	12~15
	精加工	~35	45	30	17.5
青铜	粗加工	25~30	60	21~26	12~15
	精加工	~35	45	30	17.5
黄铜	粗加工	18~30	60	15~26	9~15
	精加工	~50	30	48	13
纯铜	粗加工	25~30	60	21~26	12~15
	精加工	~40	45	38	16
硬铬	精加工	15~22	30	14~21	4~6
塑料	粗加工	25~30	45	23~28	10~12
	精加工	≤40	30	37	11

4.3.2 珩磨油石工作压力

珩磨油石工作压力是指油石通过进给机构施加于工件表面单位面积上的力, 油石上的磨粒借以切入金属和脱落自锐。压力增大时, 材料去除量和油石磨损量也增大, 但珩磨精度较差、

表面粗糙度升高,当压力超过极限压力时,油石就急剧磨损。

使用生产型珩磨机的珩磨压力可按表 4-32 选取,使用修配型珩磨机一般取 0.2~0.5MPa,大余量切削珩磨压力达 3MPa。采用金刚石或立方氮化硼油石,油石的工作压力可提高 2~3 倍。

表 4-32 珩磨油石工作压力 (MPa)

珩磨工序	工件材料	油石工作压力	珩磨油石的极限压力	
			陶瓷油石	≤25
粗 珩	铸 铁 钢	0.5~1.5	树脂油石	1.5~2.5
		0.8~2.0		
精 珩	铸 铁 钢	0.2~0.5	金刚石油石	3.0~5.0
		0.4~0.8		
超精珩	铸 铁 钢	0.05~0.1 0.05~0.1	立方氮化硼油石	2.0~3.5

4.3.3 对珩磨前工序的要求

1) 严格控制孔的尺寸公差,以保证珩磨余量合理,否则应按尺寸大小分组加工。珩磨钢件或高硬度、高韧性的工件,只要余量增大 0.01mm,珩磨工时便会成倍增加。

2) 待珩磨表面不应有残留氧化物、硬化层、油漆和油垢等,以免珩磨困难和堵塞油石。

3) 不要使用钝化了的油石,以免加工表面行程挤压硬化层,若为铸铁表面,其石墨层使珩磨很难进行且表面会出现麻坑。

4) 使用定压进给的珩磨机时,珩前孔圆柱度不能过大,以免转矩过大和出现锥度。

4.3.4 珩磨余量

珩磨是为了消除前道工序留在零件表面的切削痕迹,珩磨前零件表面质量越好,珩磨后零件表面的质量也就越高。所以,珩磨余量与前道工序的加工质量有很大关系。一般珩磨余量为前工序总误差的 2~2.5 倍。此外,珩磨余量与零件的材料也有直接的关系。珩磨余量可参见表 4-33。

表 4-33 珩磨余量参考值 (mm)

工件材料	珩磨余量		工件材料	珩磨余量	
	单件生产	成批大量生产		单件生产	成批大量生产
铸 铁	0.06~0.15	0.02~0.06	非金属	0.04~0.08	0.02~0.08
未淬火钢	0.06~0.15	0.02~0.06	硬 铝	0.03~0.08	0.02~0.03
淬火钢	0.03~0.08	0.01~0.03	粉末冶金	0.10~0.20	0.05~0.08
轻金属	0.05~0.10	0.02~0.08			

4.4 珩磨的切削过程

珩磨加工过程中,油石的表面状态、油石压力、加工表面状态均不断变化,其变化情况及相互关系,与采用的扩张进给方式有关。

4.4.1 定压进给的珩磨过程

珩磨加工时，进给机构以恒定的压力作用于油石并压向工件孔壁，称之为定压进给珩磨。其珩磨过程可根据油石表面的变化状态，分为三个阶段，见表 4-34。

表 4-34 定压进给珩磨的加工阶段

加工阶段	特 征
脱落珩磨阶段	珩磨开始因被加工表面比较粗糙，与油石实际接触面积较小，接触压强较大，珩磨转矩较大，故磨粒易脱落而自锐。材料去除率、油石消耗量均大，加工表面比较粗糙
破碎珩磨阶段	随着珩磨时间的增加，加工表面越来越光滑，与油石表面接触面积加大，接触面上的压强变小，珩磨转矩变小，磨粒脱落变少。但磨粒突出的尖部载荷较大，易破碎成新刃，在珩磨过程中，破碎磨粒被珩磨液冲洗掉。材料去除量和油石磨耗量减少，加工表面越来越光滑
堵塞珩磨阶段	随着珩磨时间增加，加工面与油石面的实际接触面积进一步加大，磨粒逐渐被磨平，接触压强越来越减小，油石自锐现象减弱直到消失。油石气孔逐渐被切屑堵塞，珩磨能力减弱，材料去除量和油石磨耗量均很小，但加工表面更加光滑。最后直到油石失去珩磨切削能力，加工表面逐渐形成挤压层，此时珩磨头应立即停止运行，工作结束

根据上述珩磨过程，珩磨应注意的要点是：

1) 珩磨前的加工表面不宜太粗糙，以防止珩磨转矩过大。为了珩磨顺利进行，孔面也不宜太光滑，珩磨前加工表面粗糙度应大于 $R_a 5\mu\text{m}$ 。

2) 珩磨余量较大时，珩磨前加工表面更不宜太光滑，也不宜有挤压层。否则需用粗油石进行粗珩，以破坏原光滑表面，珩磨效率才能提高。

3) 珩磨前原始精度不宜太差，以免珩磨转矩过大。在珩磨刚性大的中等孔径时，珩磨前孔的圆柱度一般应小于 $15\mu\text{m}$ 。

4) 一般采用脱落珩磨阶段和破碎珩磨阶段进行珩磨，兼顾珩磨效率和表面质量。为了进一步降低表面粗糙度，可采用堵塞珩磨阶段，但时间不宜过长。

4.4.2 定量进给珩磨

珩磨加工时，进给机构以恒定的速度扩张进给，使油石工作面的磨粒强制切入孔壁，称为定量进给珩磨。其珩磨过程仅有脱落和破碎切削两个阶段，不产生堵塞切削现象。因为当油石产生堵塞而使切削能力下降时，则进给量大于实际珩磨量，导致珩磨压力增高，使磨粒破碎和脱落，切削作用增强。用定量进给加工时，最后可采用无进给珩磨，以提高孔的精度和降低表面粗糙度。

4.4.3 定压—定量进给的珩磨过程

珩磨加工开始阶段采用定压进给，当油石进入堵塞珩磨阶段时，转换为定量进给方式珩磨，此时磨粒破碎和脱落，而使油石恢复切削能力，因而提高了珩磨效率，最后采用无进给珩磨，以提高孔的精度和降低表面粗糙度。

4.5 珩磨液

珩磨液有油剂和水剂两种，见表 4-35。

表 4-35 珩磨液的选择

类型	序号	成分(%) (质量分数)					适用范围		
		煤油	L-AN32号油	油酸	松节油	其余			
油剂	1	90~80	10~20				钢、铸铁、铝		
	2	55		40	5		高强度钢、韧性材料		
	3	100					粗珩铸铁、青铜		
	4	98				石油磺酸钡	硬质合金		
	5	95				硫磺+猪油	铝、铸铁		
	6	90				硫化矿物油	铸铁		
	7	75~80				硫化矿物油	软钢		
	8	95				硫化矿物油	硬钢		
水剂	序号	磷酸三钠	环烷皂	羧砂	亚硝酸钠	火碱	磺化蓖麻油	其余	用途
	1	0.6	0.6	0.25	0.25		0.5	水	粗珩钢、铸铁、青铜 及各种脆性材料
	2	0.6			0.25			水	
	3	0.25		0.25	0.25	0.25		水	
	4	0.6		0.25	0.25	0.25		水	

水剂珩磨液冷却性和冲洗性较好，适用于粗珩。油剂珩磨液宜加入适量的硫化物，以改善珩磨过程。另外，珩磨液的粘度也影响珩磨效率，对高硬度或脆性材料的研磨宜用低粘度的珩磨液。树脂结合剂油石不得采用含碱的珩磨液，因它会降低油石的结合强度；立方氮化硼油石不得使用水剂珩磨液，否则会由于水解作用，使油石出现急剧磨损。

珩磨液在使用过程中应注意以下几点：

1) 珩磨液的净化 珩磨液如果净化不好，就会使油石堵塞，珩磨头卡死而刮伤加工表面等。因此，要获得较高的珩磨效率与质量，必须注重珩磨液的过滤方法，最好采用磁性分离与纸带过滤的联合净化装置。

2) 温度控制 珩磨液的工作温度达到 35~40℃后，容易使珩磨产生振动，影响珩磨精度，降低表面质量。在大批量生产中，必须采用恒温装置，保证珩磨液的工作温度在 35℃左右。单件小批生产时，珩磨产生的热量小，通常可采用大珩磨液箱来解决。

3) 珩磨液的送进 必须保证珩磨液与珩磨头同时送进工件孔内，珩磨液的流量充足并具有足够的冲洗力。

4.6 特种珩磨工艺

4.6.1 超硬磨料油石珩磨

采用超硬磨料油石代替普通磨料油石进行珩磨，在生产实际中已得到广泛应用。这是由于超硬磨料硬而脆，珩磨过程中，可以很快地得到新的锐利的切削刃。此外，超硬磨料比普通磨料性能好，效率高，磨削区域产生的温度低，加工表面粗糙度低，油石不产生剥落现象，也不容易堵塞，使用寿命长，成本低。一般，珩磨高硬度和韧性材料，超硬磨料油石比普通磨料油石的珩磨效率高 3~75 倍，对一般材料的珩磨效率也可提高 10 倍左右。

(1) 超硬磨料油石珩磨的种类及应用 超硬磨料油石主要有有人造金刚石和立方氮化硼两种。人造金刚石多用于加工硬而脆的材料，效果显著。如珩磨高碳钢、铸铁、硬质合金等。也可用于珩磨普通钢材、铸铁和有色金属等，加工效果也较好。但不适用于珩磨韧性大、强度高和粘性大的某些钢材。立方氮化硼的硬度比人造金刚石稍低，但强度、耐热性优于人造金刚石，故适宜于珩磨韧性大、强度高的钢材，包括各种高合金钢、耐热合金、高速钢、不锈钢等

各种难切材料,例如珩磨不锈钢 9Cr18, 热处理硬度 $HRC \geq 56$; 珩磨合金钢 12CrNi3A, 渗碳淬火 $HRC \geq 58$ 时, 与金刚石油石珩磨相比, 其切削效率提高 2~3 倍。用于珩磨一般钢材、铜及铜合金等, 也可获得较好的效果。

超硬磨料油石的结合剂与浓度要根据珩磨条件具体选择, 可参见表 4-36。

表 4-36 超硬磨料油石的结合剂与浓度选择

结合剂	代号	浓度(%)	适用范围
树脂	S	25~50	用于低粗糙度珩磨(精珩、光珩)
陶瓷	V	75	自锐性好, 珩磨效率高, 可用于粗珩、半精珩
青铜	Q	100~150	强度高, 耐磨性好, 自锐性较差, 用于脆、硬材料或韧性材料的粗珩
电鍍金属	D	200	成形油石、小孔珩磨杆, 珩磨效率高, 耐用度低

人造金刚石油石珩磨和立方氮化硼油石珩磨的应用举例分别见表 4-37、表 4-38。

表 4-37 人造金刚石油石珩磨的应用举例

工件材料		热处理及表面处理		珩磨油石 主要特性	工件表面粗糙 度 $R_a/\mu m$	加工说明
类型	牌号	名称	硬度			
铸铁	灰铸铁、球墨铸铁、合金铸铁等			D180° M D280° M DW28B	0.8 0.4 0.1	加工效率高、油石磨耗小
碳素钢	45	淬火	$HRC \geq 45$	D120° M	0.8	粗粒度油石的加工情况良好; 细粒度油石易堵塞, 加工效率低
	T7、T8 等		45~54HRC	D180° M	0.4	
			$HRC \geq 55$	D280° B	0.2	
轴承钢	GCr15		$HRC \geq 56$	DW40B	0.1	
合金钢	4Cr14Ni14W2Mo	渗氮	$HRC \geq 58$	D280° M	0.2	加工效率高、油石磨耗小
	25Cr5MoA		820~1000HV	DW40M	0.1	
				DW28M	0.05	
	12CrNi3A	碳氮共渗、淬火	55~60HRC	D180° M	0.4	加工效率较高、油石磨耗一般
	1Cr13			D280° M	0.2	
				DW40B	0.1	
	12CrNi3A	渗碳、淬火	$HRC \geq 58$	D120° M	0.4	油石易堵塞、工件热量大、加工效率低
	12CrNi4A			D180° B	0.2	
	15Cr			D280° B	0.1	
	CrWMn	淬火	$HRC \geq 55$	D180° M D280° B DW40B	0.4 0.2 0.1	加工效率较低、油石磨耗较大
2Cr13	淬火	$HRC \geq 45$	D120° M	0.4		
30CrMnSiA		45~54HRC	D180° M DW40B	0.2 0.1		
铜合金	QA110-4-4 HPb59-1		$HBS \geq 200$	DW40M	0.2	加工效率高、油石磨耗小
铝合金	7A04		$HBS \geq 150$	DW40M	0.8~0.4	加工效率高、油石磨耗小, 但加工表面粗糙度高
	6A02		$HBS \geq 85$			
	ZL101		80~107HB			
	7A04	阳极化	$HV \geq 250$	DW28B	0.2	加工效率高、油石磨耗小
	6A02					

表 4-38 立方氮化硼油石珩磨的应用举例

类型	加工材料		材料热处理要求		珩磨油石主要特性	工件表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$
	牌 号	名 称	硬 度			
不锈钢	9Cr18	淬火	$\text{HRC} \geq 56$	180 [#] B	0.2	
				280 [#] B	0.1	
				W28B	0.05	
				W20B	0.005~0.05	
合金钢	12CrNi3A	渗碳淬火	$\text{HRC} \geq 58$	180 [#] B	0.2	
				280 [#] B	0.1	
	30CrMnSiA	淬火	$\text{HRC} \geq 56$	180 [#] B	0.4	
				280 [#] B	0.2	
轴承钢	GCr15	淬火	$\text{HRC} \geq 56$	180 [#] B	0.2	
				280 [#] B	0.1	
				W40B	0.05	
铜合金	QA110-4-4		200~240HB	280 [#] B	0.2	
				W20B	0.1	
铝合金	7A04		$\text{HB} \geq 150$	280 [#] B	0.2	
	6A02		$\text{HB} \geq 85$	280 [#] B	0.4	

(2) 超硬磨料油石珩磨的工艺参数 超硬磨料油石珩磨速度的选择可参见表 4-39。其往复速度，粗珩时可按具体条件选择较大值，精珩可按普通油石选用。

表 4-39 超硬磨料珩磨速度

(m/min)

超硬磨料	珩磨速度范围	加工材料	珩磨工序	圆周速度	往复速度
金刚石油石	40~80	钢	粗珩	24~36	12~18
			精珩	36~60	3~9
立方氮化硼油石	35~60	铸铁	粗珩	36~60	15~30
			精珩	48~78	6~12

青铜结合剂的金刚石油石，珩磨压力选用范围在 3~6MPa，立方氮化硼油石限制在 2~3.5MPa 之间。电镀金属结合剂的油石则需相应降低一半以上，以防止磨料层剥落。

超硬磨料油石珩磨的珩磨余量、珩磨液等的选择与普通磨料油石基本相同，但珩磨液的润滑性要高于普通磨料油石的珩磨液。

4.6.2 平顶珩磨

(1) 平顶珩磨表面特征 平顶珩磨采用双进给珩磨头，先用粗珩形成沟槽，再用精珩磨掉其轮廓峰形成平顶，以便获得能形成油膜的沟槽和良好的平顶支承(如图 4-10 所示)，主要用以提高被珩孔表面的耐磨性。平顶珩磨主要用于具有相对运动摩擦副的内孔珩磨，如内燃机气缸孔。平顶珩磨是较为经济的先进珩磨工艺，无论从产量、质量、制造成本和使用效果来看，都优于传统珩磨工艺。其主要特点如下：



图 4-10 平顶珩磨表面的微观轮廓曲线

1) 宏观表面具有明显的、粗细均匀的、对称珩磨交叉网纹。网纹无折叠、间断等现象, 见图 4-11。

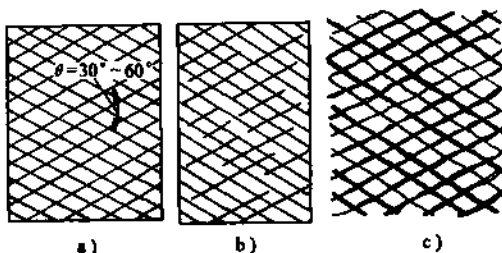


图 4-11 平顶珩磨的网纹与交叉角

a) 正确的 b) 不均匀对称 c) 有折叠夹砂的

2) 珩磨网纹交叉角 θ 较大, 一般要求 $30^\circ \sim 60^\circ$, 需达到产品设计要求。

3) 表面的微观轮廓曲线为宽度不等的平顶与深沟, 平顶表面以支承载荷, 沟槽则利于存油润滑。

4) 平顶珩磨表面粗糙度一般要求为: $R_a 0.5 \sim 1.25 \mu\text{m}$ 或 $R_a 0.7 \sim 1.5 \mu\text{m}$ 。

5) 平顶面积比率 t_p (又称表面支承率) 要求:

$$t_p = \frac{\sum a_i}{A} (\%) = 50\% \sim 80\%$$

t_p 可用专门仪器测定, 或通过微观轮廓曲线计算, 见图 4-12。

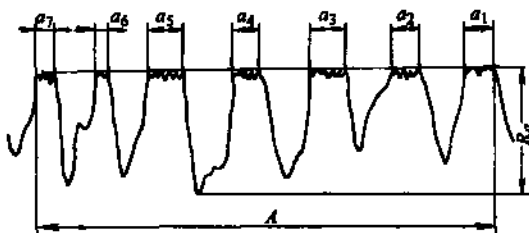


图 4-12 平顶面积比率的计算

6) 平顶珩磨表面上的沟槽大小, 一般要求宽度 $40 \sim 70 \mu\text{m}$, 深度 $4 \sim 6 \mu\text{m}$ 。

(2) 平顶珩磨机与珩磨头 平顶珩磨一般采用双进给珩磨头的专用珩磨机来加工。双进给

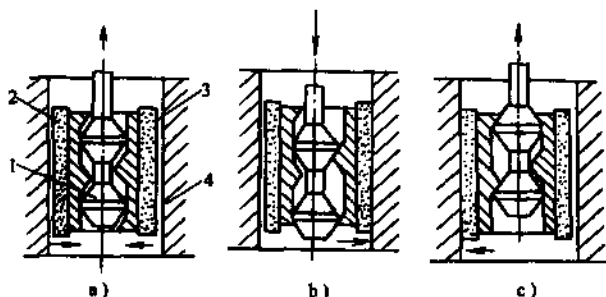


图 4-13 平顶珩磨头单锥体扩张进给结构

a) 粗、精珩油石收缩 b) 粗珩油石胀开 c) 精珩油石胀开

1—胀缩锥体 2—精珩油石 3—粗珩油石 4—工件

珩磨头有单液压缸扩张进给珩磨头和双液压缸扩张进给珩磨头两种结构。图 4-13 所示为单液压缸扩张进给珩磨头(单锥体形式)。当胀缩锥体在中间位置时,两种油石均缩回;向下运动时,粗珩油石进行珩磨,精珩油石在缩回位置;向上运动时,精珩磨油石进行珩磨,粗珩磨油石在缩回位置。在粗珩与精珩的交换过程中,由于珩磨头有保护板保护,因此加工表面不会被划伤。

图 4-14 所示为双液压缸扩张进给珩磨头(双锥体形式)。当粗胀缩锥体向下运动时,粗油石进行珩磨,达到粗珩尺寸后,精胀缩锥体向下运动,精珩油石开始珩磨,与此同时粗珩油石缩回,这样可使珩磨头不会因油石缩回而划伤工件表面。当精珩达到尺寸时,精珩油石缩回。

上述两种结构形式的珩磨头,加工时均可使用自动测量装置控制其加工尺寸,实现粗珩与精珩过程的压力转换与油石交替,从而稳定获得优良的平顶珩磨表面。

(3) 平顶珩磨工艺 平顶珩磨工艺见表 4-40。

表 4-40 平顶珩磨工艺

工 艺	说 明
对珩磨孔的预加工要求	1) 孔表面无冷挤硬化层,表面粗糙度 $R_a \leq 4\mu\text{m}$ 2) 平顶珩磨前应保证孔的几何形状公差要求 3) 中等孔径的珩磨余量 $\leq 0.05 \sim 0.08\text{mm}$ 4) 孔的圆柱度 $\leq 0.02\mu\text{m}$
珩磨油石	粗珩采用 100 ~ 150 号人造金刚石珩磨油石,精珩采用 W40 ~ W28 绿色碳化硅珩磨油石。因为金刚石油石粗珩较普通磨粒能获得较深的、均匀的珩磨网纹;而绿色碳化硅精珩则是为了保证粗珩表面上的轮廓峰被锋刃削平而不挤入沟槽或折叠
工艺参数	1) 粗珩网纹 珩磨孔为公差的中值,保证网纹交叉角 θ 符合产品要求,珩磨表面的宏观和微观曲线均符合上述特性,其工艺参数选择如下: 粗珩油石: SMD120/140Q100 珩磨压力: 0.8 ~ 1.2M 2) 精珩平顶 用锋锐的油石,轻微的压力,较短的时间,磨去粗珩表面上的轮廓峰而形成小平顶,保证表面微观轮廓曲线合格,表面粗糙度值 $R_a 0.5 \sim 1.25\mu\text{m}$,平顶面积比率 $t_p = 50\% \sim 80\%$ 。其工艺参数为 精珩油石: GCM40QV 珩磨压力: $(2 \sim 3) \times 10^5 \text{Pa}$ 珩磨直径余量: 4 ~ 6 μm 精珩时间: $t = 8 \sim 15\text{s}$
表面质量检查	用 Perthometer SSP 或泰勒—霍布森—6 (Taylor-Hobson-6) 型粗糙度检测仪可直接测出全部参数。也可在粗糙度检查仪上,使用合适的放大比例描出其微观轮廓曲线,根据此曲线便可计算出沟槽的深度和宽度,以及平顶面积比率 t_p 。此外,还可用表面薄膜复印法检查孔穴的沟槽微观结构,包括珩磨网纹角度和表面质量

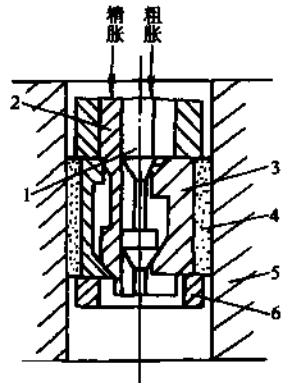


图 4-14 平顶珩磨头双锥体扩张进给结构
1—粗胀缩锥体 2—精胀缩锥体 3—精珩油石 4—粗珩油石 5—工件 6—磨头体

4.6.3 强力珩磨

强力珩磨是近年来发展起来的一种高效高精度的珩磨技术。其加工特点是珩磨切削速度高、进给压力大,能在短时间内切除较多的加工余量,然后降低进给压力,以无火花珩磨提高

工件的精度，并减小被加工表面的粗糙度。强力珩磨能直接将冷拔钢管或粗镗后的缸筒等加工成精密孔，也可加工淬硬材料或硬质合金材料的工件。

实现强力珩磨，应满足以下条件：

- 1) 珩磨机要有刚性好、功率大的主轴，并且主轴具有较高而可调的往复速度。
- 2) 珩磨头结构简单、刚性好，一般多用刚性瓦结构，可使用定压定量复合进给机构实现大余量珩磨。
- 3) 珩磨头与主轴浮动连接，夹具必须是固定式，且有足够的夹紧力。

强力珩磨选用有强力珩磨标记的油石，这种油石强度高于普通油石。粗珩油石粒度一般为 $120^{\#} \sim 150^{\#}$ ，精珩为 $182^{\#} \sim W40$ 。油石硬度可按表 4-41 选取，但卧式珩磨或机械扩张式珩磨进给时，油石硬度要相应降低 1~2 级。疏松的陶瓷油石比树脂油石珩磨效率高，但强度却比树脂结合剂低。为改善油石的自锐能力，可定期变换主轴旋转方向。

表 4-41 强力珩磨油石的硬度选择

珩磨孔径 /mm	油石硬度	珩磨材料	油石硬度	
			粗珩	精珩
≤ 120	N~M	铸 铁	Q~K	N~K
130~150	M~L	未淬硬合金钢	J~G	H~G
155~195	L~K	淬硬合金钢	H~F	G~E
≥ 195	K~J	其他淬硬材料	H~D	

珩磨压力主要通过液压缸加大推杆和进给胀锥的压力获得。先进的大余量珩磨机采用电子扩张机构，先使油石胀到接触孔壁，开始珩磨，然后根据油石与加工面的特征，控制油石以最合适的速度扩张，定速进给珩磨到最后尺寸。

由于强力珩磨产生的热量多，大余量珩磨温度可达 65°C ，珩磨切屑也多，必须大量供应具有一定压力、冷却和冲洗性能好的珩磨液，可参考表 4-35 选用。

4.6.4 顺序珩磨

顺序珩磨是采用电镀或喷镀一层金刚石磨粒的直径可调的固定珩磨头(如图 4-15 和图 4-16 所示)，对工件孔按顺序进行加工的方法。这种方法的加工精度高、表面粗糙度低，主要用于精密小孔、液压件和多台阶大孔的珩磨。加工喷油嘴孔圆度为 $1\mu\text{m}$ ，锥孔与内孔的同轴度小于 $4\mu\text{m}$ 。



图 4-15 小孔直径可调珩磨头

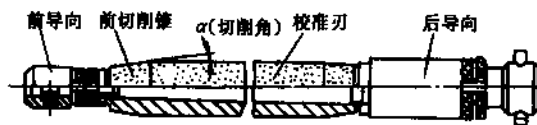


图 4-16 较大孔直径可调珩磨头

用顺序珩磨法加工时，珩磨机回转工作台可绕立柱回转，主轴箱装于立柱上，主轴有 18 根，它们带动刚性连接的珩磨头旋转，并随主轴箱一起下降，进行一次性珩磨。当主轴箱带动珩磨头回到原位时，装在浮动夹具中的工件也随回转工作台转位，在下一工位上进行第二次加工。新安装的工件转到第一个工位加工，依顺序加工直到最后完成。这种珩磨方法的效率为 180 件/h。珩磨多台阶汽车发动机、柴油机曲轴大孔时，可采用长而大的直径可调固定珩磨

头，一组为2~4根，机床为立式深孔珩磨机，一般在珩磨机侧面装有自动或半自动更换珩磨头装置，其珩磨速度与珩磨液压件孔的基本相同。加工圆柱度为 $5\mu\text{m}$ 的7个台阶孔的同轴度可达 0.02mm 。

5 超精加工

超精加工又称超精研加工，是采用细粒度的油石在一定的压力和切削速度下作往复运动，对工件表面进行光整加工的方法，属固结磨粒压力进给加工。超精加工能降低加工表面粗糙度值，特别是镜面加工，比珩磨或高速磨削的效率。但保证零件的尺寸误差和几何形状误差的作用较差，零件的加工精度主要靠前道工序保证。超精加工的表面几乎不产生变质层，并使工件表面层具有残余压应力，从而提高了零件的接触疲劳强度。

超精加工具有设备简单、操作方便、效果显著、经济性好等优点，可用来加工内燃机曲轴、凸轮轴、活塞、活塞销等零件，能对各种材料，如钢、铸铁、黄铜、磷青铜、铝、陶瓷、玻璃、花岗岩、硅和锗等进行加工，并能加工外圆、平面、内孔、锥面及各种曲面。近年来，超精加工在航空、航天、大规模集成电路、精密仪器和精密量具制造中得到越来越广泛的应用。

5.1 超精加工原理及特点

超精加工的工作原理见图4-17。

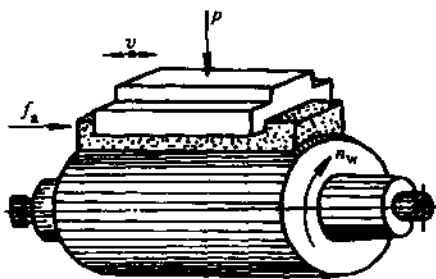


图 4-17 超精加工工作原理

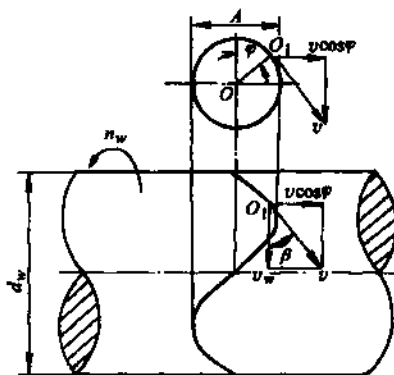


图 4-18 超精加工运动轨迹

超精加工中有三种运动，即工件低速回转运动 n_w 、油石轴向进给运动 f_a 和油石高速往复振动 $v_{\text{振}}$ 。这三种运动使磨粒在工件表面上形成不重复的复杂轨迹。如果暂不考虑油石的轴向进给运动，则磨粒在工件表面走过的轨迹是余弦曲线，如图4-18所示。

油石的往复振动由电动机传动偏心轮产生，图4-18中 O 为偏心轮转动中心， O_1 为偏心销中心。油石的振幅 A 为偏心距的两倍。油石振动速度 $v_{\text{振}} = v \cos \varphi$ 与工件的回转线速度 v_w 构成切削角 β ，它是超精加工的重要参数之一。

由图4-18可知：

$$\tan \beta = \frac{v \cos \varphi}{v_w} = \frac{\pi A f \cos \varphi}{\pi d_w n_w} = \frac{A f \cos \varphi}{d_w n_w}$$

式中 A ——油石振动的振幅(mm)；

f ——油石的振动频率(Hz);

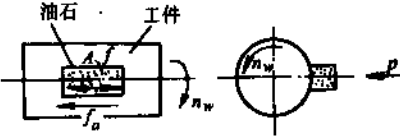
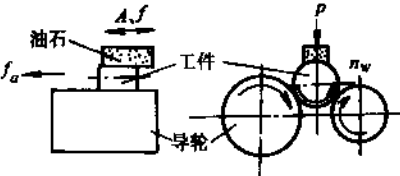
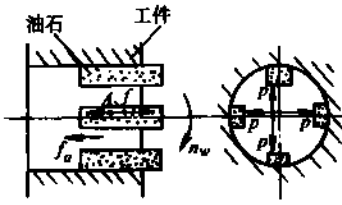
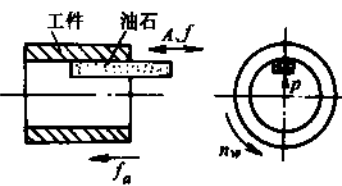
d_w ——工件直径(mm);

n_w ——工件的转速(r/s)。

当 $\varphi = 0^\circ$ 时, $\tan\beta$ 值最大, 即 $\beta_{\max} = \arctan \frac{Af}{d_0 n_0}$ 。应按此关系式选取切削角 β_{\max} 及有关用量。

各种表面的超精加工方式见表 4-42。超精加工的主要特点见表 4-43。

表 4-42 各种表面的超精加工

加工表面	工序类型	简图	运动方式		适用范围
			油石	工件	
外圆表面	外圆超精加工		纵向进给、 压力进给、往 复振动	旋转	较大尺寸的轴 颈
	无心外圆超精加工		压力进给、 往复振动	旋转、 纵向进给	较小尺寸的圆 柱体
内孔表面	多油石超精加工		纵向进给、 往复振动、压 力进给、旋转	静止不动	较大尺寸、较 重工件的孔
	单油石超精加工		压力进给、 往复振动	旋转 纵向进给	中等尺寸工件 的孔

(续)

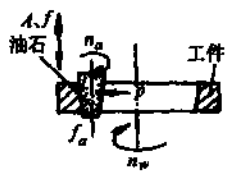
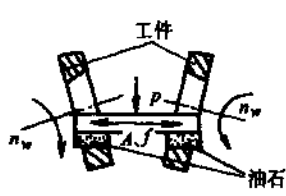
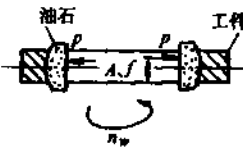
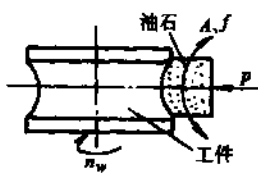
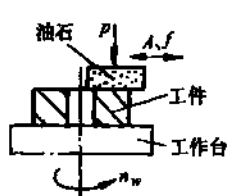
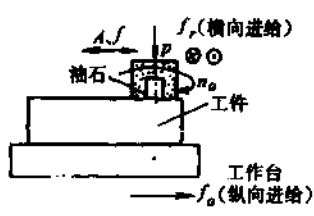
加工表面	工序类型	简图	运动方式		适用范围
			油石	工件	
锥孔表面	单件超精加工		压力进给、 往复振动、旋 转	旋转	较大尺寸的短 锥孔
	双件超精加工		压力进给、 往复振动	旋转	中等尺寸的短 锥孔
圆弧面	轴承内沟道超精加工		压力进给、 往复振动	旋转	较大尺寸的球 面内沟道
	轴承外沟道超精加工		压力进给、 往复振动	旋转	球面外沟道
平面	平面超精加工		压力进给、 往复振动	旋转	较小尺寸的端 面
	端面超精加工		压力进给、 往复振动、旋 转	纵向进给	较大尺寸的平 面

表 4-43 超精加工的主要特点

主要特点	说 明
加工表面粗糙度低	超精加工运动轨迹复杂, 能由切削过程过渡到光整抛光过程, 因而可获得 $R_a 0.01 \sim 0.04 \mu\text{m}$ 的光洁表面
工件尺寸精度高	超精加工油石的粒度极细, 只能切削工件的轮廓峰, 所以加工余量很小 ($0.005 \sim 0.025 \text{mm}$), 工件尺寸分散度小, 合格率极高
生产率高	超精加工油石的高速往复振动, 加长了每一磨粒在单位时间内的切削长度, 从而提高了生产率
加工表面质量好	<ol style="list-style-type: none"> 1) 超精加工的切削速度低 ($0.5 \sim 1.67 \text{m/s}$), 油石压力小 ($0.05 \sim 0.5 \text{MPa}$), 所以加工时发热少, 没有烧伤现象, 也不会使工件产生变形 2) 磨粒微刃的正反切削, 形成的磨屑易于清除, 不会在已加工表面形成划痕 3) 超精加工的变形层很薄 (一般不大于 0.0025mm), 能形成耐磨性比珩磨更高的光洁表面
修整工件形状和尺寸误差的作用较差	超精加工是一种低压力进给加工, 余量又小, 油石切除材料的能力较弱, 故修整工件形状和尺寸误差的作用较差, 一般要求前道工序保证必要的精度

5.2 加工机理

超精加工的切削过程与磨削不同, 分为四个阶段, 可见表 4-44。整个加工过程所需时间很短, 一般约 30s 左右, 生产率较高。

表 4-44 超精加工的加工机理

加工过程	说 明
强烈切削阶段	超精加工时虽然油石磨粒细、压力小, 工件与油石之间容易形成润滑油膜, 但在开始研磨时, 由于工件表面粗糙, 少数轮廓峰上的单位面积压力很大, 破坏了油膜, 故切削作用强烈
正常切削阶段	当少数轮廓峰被磨平后, 接触面积增加, 单位面积压力降低, 切削作用及油石自锐作用都减弱, 进入正常切削阶段
微弱切削阶段	随着接触面积逐渐增大, 单位面积上的压入力更低, 切削作用微弱, 且细小的切屑形成氧化物而嵌入油石的空隙中, 使油石产生光滑表面, 具有摩擦抛光作用而降低工件表面粗糙度
自动停止切削阶段	工件磨平, 单位压力很低, 工件与油石之间又形成油膜, 不再接触, 故切削自动停止。这个阶段是超精加工所特有的

5.3 超精加工工艺参数与切削液

超精加工工艺参数的选择可参见表 4-45。

表 4-45 超精加工切削参数的选择

项 目		加工阶段		说 明
		粗加工	精加工	
最大切削角 $\beta_{\max}/(^{\circ})$		30 ~ 45	10 ~ 20	切削角越大, 切削作用越强, 生产率越高, 但表面粗糙度较高
工件圆周速度 $v_w/(m/s)$		0.07 ~ 0.25	0.25 ~ 0.5	工件的圆周速度 v_w 越大, 则最大切削角 β_{\max} 越小, 切削作用减弱, 生产率下降, 但对降低表面粗糙度有利。而 v_w 过高会引起工艺系统振动, 使表面粗糙度增高
振动频率 $f/(\text{次}/\text{min})$		1500 ~ 3000	500 ~ 1500	振动频率越大, 切削作用越强, 生产率也越高。但振动频率受工艺系统刚度的限制。频率过高可能使工件表面出现振纹, 使表面粗糙度增高
振幅 A/mm		3 ~ 6	1 ~ 3	振幅越大, 切削作用越强, 磨粒形成的轨迹却越深, 对降低表面粗糙度不利
油石压力 p/MPa		0.15 ~ 0.3	0.05 ~ 0.15	油石的压力增大, 则切削作用增强。但压力过大, 磨粒易划伤加工表面, 表面粗糙度增高。若压力过低, 由于磨粒的自励性差, 不仅影响生产率, 而且磨粒易于钝化, 对降低表面粗糙度也不利
纵向进给量 $f_a/(\text{mm}/\text{r})$	油石长度 l/mm	10 ~ 25	0.1 ~ 0.3	纵向进给量应根据油石的长度和加工要求选择, 其值越大, 生产率越高, 但对降低表面粗糙度不利。 当工件转速较高时, 应使进给速度 $v_f < 300\text{mm}/\text{min}$
		25 ~ 50	0.3 ~ 0.7	
		50 ~ 80	0.7 ~ 1.2	
		80 ~ 120	1.2 ~ 2.0	

切削液对超精加工的表面质量影响很大, 其主要作用是冲洗切屑和脱落的磨粒, 并在油石和工件之间形成油膜以便自动控制切削过程。故不仅要求有良好的润滑性能, 而且要求油性稳定, 无分解腐蚀作用。煤油混合锭子油是最普通而常用的冷却润滑液。混合比例(质量分数)按加工材料而定, 具体如下:

- 非淬硬钢: 70%煤油, 30%锭子油;
- 淬硬钢: 85%煤油, 15%锭子油;
- 铸 铁: 90%煤油, 10%锭子油;
- 有色金属: 80%煤油, 20%锭子油。

在使用时应有循环系统, 并使之不断过滤净化。尽可能采用磁性过滤和渗过滤两级过滤的方法。

5.4 超精加工头和超精加工油石

(1) 超精加工头 油石振动的驱动装置有机械的和气动的。气动超精头的振动频率高, 结构较紧凑, 但一般噪声较大。机械超精头一般采用偏心轮传动机构, 振动频率不高。

(2) 超精加工油石

1) 要求油石有切削和研磨作用 超精加工和磨削加工一样, 采用油石的粒度越大, 加工后得到的表面粗糙度越高。为此, 一般在粗加工时多选油石粒度为 $300^{\#} \sim 400^{\#}$, 精加工时选用 W10 ~ W3.5。当粗加工和精加工选用同一油石时, 则可用 W10 的粒度。此外, 还要求油石粒度均一。磨料的粒度与超精加工表面粗糙度及余量的关系见表 4-46。

表 4-46 磨料粒度与表面粗糙度及余量的关系

磨料粒度	W5 ~ W10	W10 ~ W14	W14 ~ W20	W20 ~ W28
工件表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	0.012 ~ 0.025	0.025 ~ 0.050	0.050 ~ 0.100	0.100 ~ 0.200
直径上的加工余量 μm	2 ~ 7	6 ~ 11	7 ~ 12	10 ~ 16

2) 油石结合剂 主要为陶瓷、树脂、玻璃陶瓷、聚乙烯和石墨等。前三种用于切削, 后两种用于研磨。陶瓷结合剂应用最多。电化学—机械超精加工用金属结合剂。

3) 油石硬度 当加工高硬度工件时, 选用低硬度油石。同一根油石各点硬度应均匀。

4) 油石尺寸 油石尺寸大, 加工效率高, 但过大则难保证其与工件在全长上的良好接触。一般长度为 100 ~ 150mm。宽油石对减小表面波纹度有利, 但过宽则会使油石两侧磨削不均匀, 一般取 $0.5 \sim 0.8D_w$ (D_w 为工件直径)。

5) 油石的气孔率一般选 43% ~ 49%。

(3) 超精加工油石磨损跟踪机构 如图 4-19 所示, 工件 3 安装在工件轴 1 上。加工时, 装在夹持器 8 上的油石 2 进入工件锥孔。液压缸 4 加压时, 杠杆 6 绕销钉 7 转动, 其右端以规定压力把油石压在被加工表面上。油石在加工表面上作纵向超精加工运动。油石在液压缸作用下沿夹持器 8 进给, 直至油石磨损到一定尺寸, 发信开关 5 给控制系统发出信号, 停机人工换油石。一般, 一个班粗超精加工换 3 ~ 4 块, 精超精加工换 1 ~ 2 块。

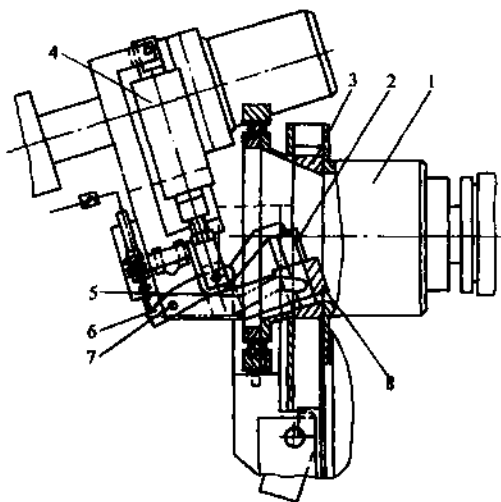


图 4-19 油石自动补偿机构

1—工件轴 2—油石 3—工件 4—液压缸
5—发信开关 6—杠杆 7—销钉 8—夹持器

5.5 轮式超精磨

轮式超精磨是用细粒度的固结磨粒在浮动状态下进行低速磨削的修整加工方法。主要用于加工尺寸较大的精密零件的内外圆柱表面, 例如细长轴、主轴、镗杆、缸体的内孔及大型轴承的内、外沟槽等。其表面粗糙度一般可稳定达到 $R_a 0.025\mu\text{m}$ 。

轮式超精磨有单轮和双轮两种形式, 单轮一般不用。图 4-20a 为双轮超精磨削原理图。工件在顶尖间以转速 n_w 旋转, 两磨轮在工件两侧弹簧力作用下压向工件, 磨轮轴线与工件轴线夹角 α 。当工件转动时, 由摩擦力带动磨轮以转速 n_0 旋转, 同时磨轮还沿工件轴向以速度 v_f 作进给运动, 由此组成磨削运动。

轮式超精磨削速度如图 4-20b 所示。设磨轮与工件的接触线上的任一点的线速度为 v_c , 它可分解为轴向和垂直于轴向的分速度 v_{ca} 、 v_{cr} 。由于 v_{cr} 的带动, 磨轮将绕其轴线旋转, 其线速度为

$$v_0 = \xi v_c \cos \alpha$$

式中 ξ ——考虑滑动摩擦损耗的有效速度系数, $0 < \xi < 1$ 。

磨削速度就是磨轮对于工件的相对速度, 它由垂直与磨轮轴向的径向相对速度 v_r 和沿磨

轮轴向的相对速度 v_{ra} 合成:

$$v_{rr} = v_c (1 - \xi) \cos \alpha$$

$$v_{ra} = v_{ca} = v_c \sin \alpha$$

$$v = v_c \sqrt{1 - a \cos^2 \alpha}$$

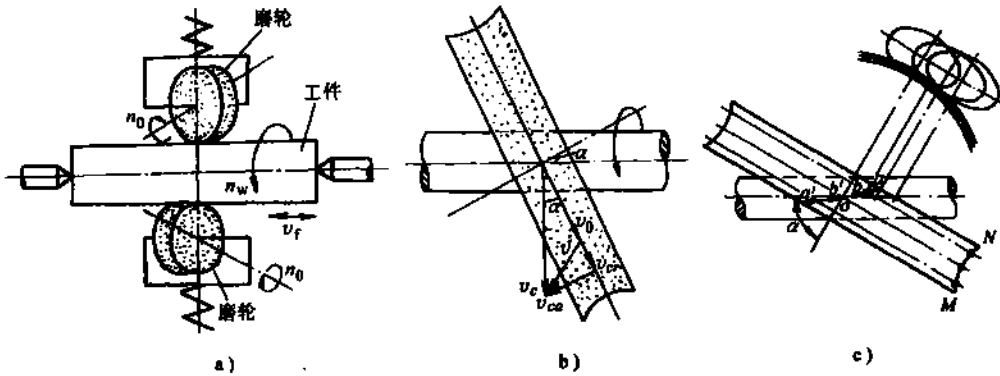


图 4-20 轮式超精磨削原理和磨削运动

a) 轮式超精磨削原理 b) 轮式超精磨削速度 c) 磨轮修整后的截面轮廓

轮式超精磨的磨轮由弹性支承紧压工件，工件两侧受力对称，加工运动平稳，工件摩擦力带动两侧磨轮回转加工工件。加工运动中虽无往复振动，但两侧磨轮滚磨轨迹仍为交叉网纹，故超精磨加工具有一定的超精加工特性。

轮式超精磨与超精加工的相同点是，两者均用细粒度磨具在浮动状态下进行低速的压力进给加工，能提高工件的表面质量，获得有利于存贮润滑油的交叉网纹轨迹，改善工件表面的物理力学性能，提高工件的耐磨性、抗腐蚀性和使用寿命，部分改善几何精度，降低表面粗糙度。不同点是前者在工件旋转时，磨具作全程单向进给运动，后者磨具作短程往复运动；前者对工件前工序要求不高，能修正工件的圆柱度误差，后者却对工件前工序有一定要求，能修正工件的波纹度。

轮式超精磨的工艺装备简单，只要在普通车床上安装超精磨装置就能对不同硬度，不同材料的内、外圆柱表面进行加工。一般是在普通卧式车床上进行，即把超精磨头直接装在刀架或刀杆上，也可拆下车床的小刀架，换装超精磨的专用装置。

轮式超精磨的工艺见表 4-47。

表 4-47 轮式超精磨工艺

工艺参数	一般选取值	工艺要求	一般选取内容
交角 $\alpha / (^\circ)$	27 ~ 35 (过大出现平行振痕)	磨轮修整	表面粗糙度要求不低时，可不修整 修整棒(环)：材料 氧化铝 粒度 100 [#] ~ 200 [#] 结合剂：环氧树脂
工件速度 v_w / (m/min)	外圆：60 ~ 65 内孔：50 ~ 60 (过大产生振动)		
接触压力 $F / (N)$	50 ~ 200 (外圆取大值，内孔取小值)	磨轮	磨料：W10 ~ W20 氧化铝 结合剂：环氧树脂
往复进给速度 v_f / (m/min)	外圆：0.16 ~ 0.33 (粗) 0.06 ~ 0.08 (精) 内孔：0.06 ~ 0.12	切削液配比 (质量分数)	粗磨：研磨膏 + 少量油酸 精磨：80% ~ 90% 煤油 10% ~ 20% L-AN15 号油
磨削余量 / (mm)	加工主轴：0.01 ~ 0.015 加工缸体：0.10 ~ 0.20		

5.6 无心外圆超精加工

(1) 加工原理 无心外圆超精加工原理如图 4-21a 所示, 工件的运动轨迹由导辊曲面形状决定。设计时, 根据工件直径、长度及母线形状要求进行计算, 每种导辊只能加工一定范围的工件。例如, 工件母线为直线的圆柱体, 导辊母线为准双曲线, 如图 4-21b 所示, 按理论导辊曲线, 即按工件直径修整导辊曲线; 加工工件母线为全凸的圆柱体, 导辊形面设计成若干个“鼓形”, 利用变化工件的移动轨迹加工出凸度形状, 如图 4-21c 所示。有的凸形短圆柱表面仅要求有 $1 \sim 4\mu\text{m}$ 的凸度, 用磨削加工方法不易达到, 而用无心外圆超精加工方法只需几秒钟即可加工出来。图 4-22a 是用多工位轴向进给方式加工凸形滚柱示意图。导辊有 2~5 个凸峰, 每个凸峰上放置一块油石, 另外在导辊每个谷底处安装导向板, 导向板的宽度及形状按需要定, 其作用是防止工件运动时翻滚, 顺利通过谷底。在工件进入端为粗超精加工阶段, 油石粒度可选用 W14、W10; 工件出口前端为精超精加工阶段, 油石粒度可选用 W5、W3.5; 工件表面质量要求高时, 最后一块用石墨油石。滚柱加工后测得的表面粗糙度和形状如图 4-22b 所示。

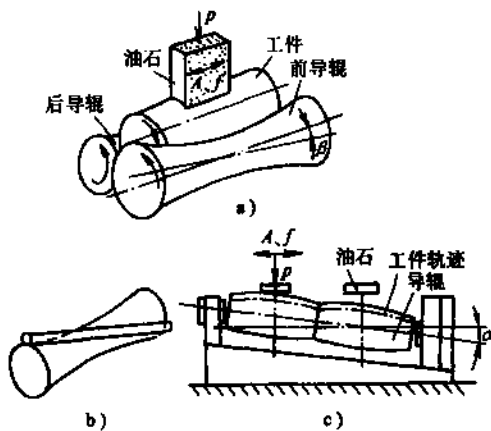


图 4-21 无心超精加工原理

- a) 加工运动 b) 用准双曲线导辊加工圆柱体工件
c) 用多台阶凸形导辊加工凸形圆柱体工件

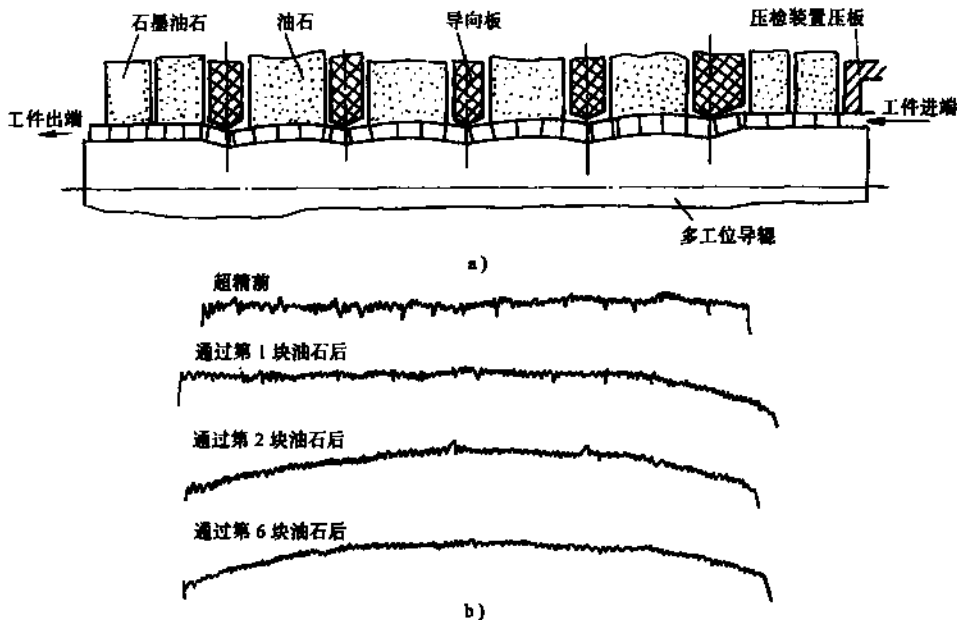


图 4-22 多工位轴向进给式加工凸形滚柱

- a) 多工位导辊轴向进给加工示意图 b) 加工后工件表面形状

(2) 加工方式 可分为切入式和贯穿式两种(见图 4-21)。单件和小批量生产多用切入式, 批量较大时多用贯穿式。为了提高生产率, 贯穿式通常采用多块油石加工。贯穿式超精加工工件除转动外, 还沿着导辊作贯穿运动, 油石磨粒运动轨迹是在螺旋线上展开的正弦曲线。

6 新型光整加工方法

6.1 机械化学研磨

机械化学研磨是利用软质磨粒与工件在接触点上产生的机械化学现象, 以去除工件表面的微量材料。该方法经济性好、生产率高, 可实现半导体等晶体的高精度加工。它有湿式和干式两种研磨方式。

1. 湿式机械化学研磨

湿式机械化学研磨可用于硅片的最终精加工。它采用粒径为 $0.01\mu\text{m}$ 的 SiO_2 磨料微粉在弱碱性溶液中均匀混合的胶状液作研磨剂。研具表层敷有质地细密的软质泡沫聚氨脂人造革。

研磨状态的示意图见图 4-23。研磨时, 工件(硅片)直径较大, 软质人造革平面无网眼, 所以在高速和高压的条件下, 工件和研具表面间可形成研磨剂层。研具表面虽有微小的凸凹, 有些位置还和工件接触, 但研磨剂一般均被封闭于工件和研具间。加工时硅片表面形成可被研具和磨粒去除的软质水化膜。这样, 研磨不是直接由研具的机械作用产生, 而是通过研具去除水化膜进行, 所以能进行良好的研磨。

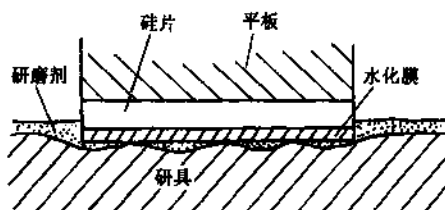


图 4-23 湿式研磨状态

但是, 实际加工并不完全像上述情况那样, 硅片表面会因水化膜有时破裂而出现加工缺陷。不过这些缺陷可采用清洗或 HF 水溶液腐蚀等措施加以消除, 仍可获得无任何加工缺陷的表面。提高研磨压力或减少研磨液的供给量, 硅片表面的缺陷就增多; 当提高研磨速度, 由于水面飘浮现象而使研磨液膜层增厚, 硅片表面的缺陷就减少。

为了提高研磨效率, 可将机械化学研磨分为两步: 第一步加工采用较粗的磨料和通气性好的研具, 以便使研磨液膜层减薄, 有利于利用磨料和研具表面的机械作用破坏水化膜, 使研具与硅片直接接触, 从而提高研磨效率; 第二步加工按正常方式研磨, 以获得缺陷少的加工表面。

2. 干式机械化学研磨

干式机械化学研磨示意图见图 4-24。它采用玻璃平板为研具, 以软质 SiO_2 为磨料, 用于研磨蓝宝石。研磨时, 在 SiO_2 和蓝宝石的接触表面间会产生化学反应, 生成很容易被去除的软质莫来石, 从而使工件获得高质量的表面。

干式机械化学研磨具有以下特点:

1) 产生化学反应的范围微小, 有利于加工, 且粒径为 $0.01 \sim 0.02\mu\text{m}$ 的 SiO_2 磨料微粉反应性较强, 可显著提高研磨

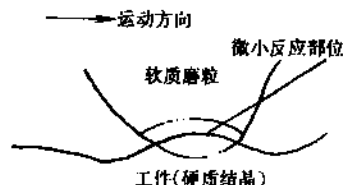


图 4-24 干式研磨加工示意图

效率,甚至比粒径为 $1\mu\text{m}$ 的金刚石微粉加工的生产率还高。

2) 工件的表面不产生擦伤痕,即使采用 300°C 的热磷酸浸蚀,也不会显示加工缺陷,故研磨后工件能获得良好的镜面。

3) 研磨采用玻璃平板作研具,在研磨过程中研具几乎无弹性变形,故工件外形周边不会出现塌边现象。

6.2 磁力研磨

磁力研磨是利用磁场作用进行研磨加工的新方法,它能高效、快速地对各种材料、尺寸和结构的零件进行精加工,是一种投资少、效率高、用途广、质量好的研磨加工方法。

6.2.1 利用磁性流体的磁力研磨

磁性流体是一种借助活性剂将粒径 15nm 以下的非常微细的铁氧体粒子均匀分散在液体中而形成的胶状溶液,它是一种可感应磁力的可动流体。当对混合有非磁性磨粒的磁性流体施加磁场时,因磁场作用磨粒被排斥上浮送到研具表面对工件进行研磨。

(1) 控制磨粒数的磁力研磨 加工原理如图4-25所示。在研具的孔中预先注入带有非磁性磨粒的磁流体。当磁场方向与重力方向平行时,则磁场加给非磁性磨粒浮力,磨粒进入研具表层。调节流经电磁铁的电流可以有效控制参与研磨的磨粒数量,达到有效的研磨加工。

加工装置的示意图如图4-26所示。将有穿孔的研具粘在黄铜盘上,可随黄铜盘一起回转,容器内注入适量的磁性流体。支承黄铜盘的轴通过推力轴承和滚珠轴承与波纹管连接。加工压力是利用水压使轴在上下方向运动而获得的。工件安装在上部的轴上与研具以同一转速回转。电磁铁设置在工件的下方,通过调节流经电磁铁的电流可控制上浮的磨粒数量。作用的磨粒数可通过测量研具与工件回转一圈时在工件表面上留下的划痕数而求得。研具是厚度为 3mm 的泡沫聚氨脂板并钻有直径为 5mm 的孔,以间距 7mm 成点阵状分布。使用与磁性流体等量的用蒸馏水稀释的研磨液。

(2) 控制压力的磁力研磨 采用橡胶板将磨粒与磁性流体隔开并以橡胶板作为研具对工件进行研磨。加工装置如图4-27所示。将磁性流体定量注入黄铜盘的切槽内,在其上覆盖一橡胶板(厚度 1mm)作为研磨盘。对磁性流体来说,配置电磁铁使之能从上下方向产生磁场。工件安装在上部铁心上,与橡胶板接触(接触压力为零)。使用水中含有适量磨粒的混合液作为研磨剂,借助上部铁心和圆盘的回转对工件进行研

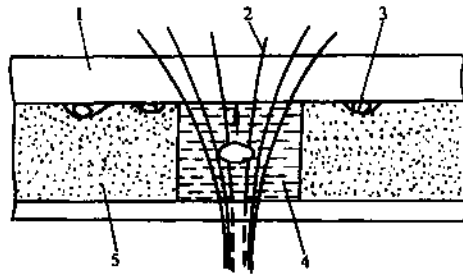


图 4-25 控制磨粒数磁力研磨加工原理图

1—工件 2—磁力线 3—磨粒
4—磁性流体 5—研具

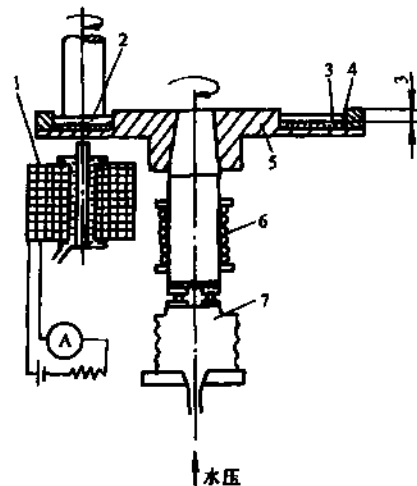


图 4-26 控制磨粒数磁力研磨装置示意图

1—电磁铁线圈 2—工件 3—磁性流体及磨粒
4—研具 5—黄铜盘 6—球轴承 7—波纹管

磨加工，下部铁心与圆盘成逆向回转。

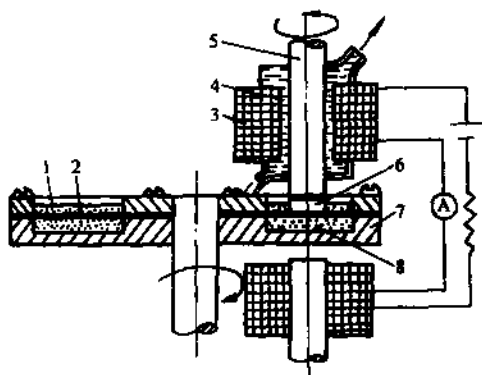


图 4-27 控制压力的磁力研磨装置示意图

- 1—研磨剂 2—研具(橡胶板) 3—电磁铁线圈
4—冷却水 5—铁心 6—工件
7—黄铜套 8—磁性流体

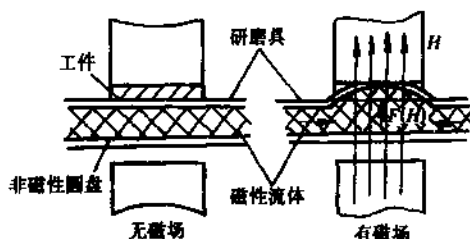


图 4-28 控制压力的磁力研磨加工原理

图 4-28 是加工原理图。当电磁铁通电后，磁性流体被引向磁极，使橡胶板(研具)向上鼓起，对工件产生研磨压力。加工压力的大小，可通过改变流经电磁铁的直流电流来调整。流经电磁铁的电与加工压力间在测量范围($0 \sim 10^5 \text{ A/m}$)成线性关系。

试验表明，加工量随电流(磁场强度)的增大而增大，而且磨粒直径越小，被加工工件的表面粗糙度越低。这是由于使用橡胶板作研具，其弹性大，对加工面的凹凸磨合性好，能将更多的微细磨粒送入其间，而磨粒越细，参与作用的磨粒数量越多，其加工量也变大。

(3) 磁力悬浮研磨 磁力悬浮研磨，是基于磁性流体中非磁性磨粒受磁场作用时，会产生向低磁场方向悬浮的现象而研究出的研磨方法。

将混合有非磁性磨粒的磁性流体置于重力方向设有高磁场的环境中，磁性流体被吸向高磁场一侧，而其中的非磁性磨粒则被排斥向低磁场一侧悬浮，利用这悬浮力使磨粒对回转的工件表面进行研磨，其加工原理见图 4-29。

磁力悬浮研磨法具有以下特点：

- 1) 磁力悬浮使作用在研磨面的磨粒数增多；
- 2) 由于磨粒由流体支撑，使支撑富有弹性，而且加工压力由悬浮力决定，故每一颗磨粒的加工压力很小；
- 3) 磁性流体的传热系数大，因此，可抑制加工点的温度上升；
- 4) 越接近磁铁，作用于磨粒的悬浮力越大，因此，对工件形状还有修正效果。

磁力悬浮研磨法的加工区域是立体的，因此，它不仅能研磨平面，而且也能研磨球面和其他复杂型面。当前，工业部门对研磨加工的高效率和高精度要求很强烈，而又以高精度为目标。使用微细粒子进行研磨时，由于同时参与加工的磨粒数量增多而使每一颗磨粒的加工压力

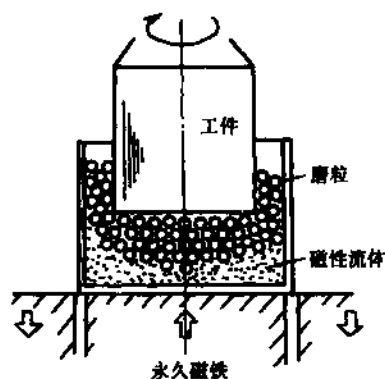


图 4-29 磁力悬浮研磨原理

变小，造成加工效率下降。磁力悬浮研磨则能使每一颗磨粒在保持相同加工压力的同时尽量增加参与加工磨粒的数量，以提高加工效率。

6.2.2 利用磁性磨粒的磁力研磨

磁性磨料研磨是在磁场中(N极和S极之间)充填粒径很小的磁性磨料，利用磁场作用使之形成磁力研磨刷，使工件在其中边回转、边振动，从而实现工件表面的研磨，去毛刺和精密倒圆。

(1) 加工原理 以研磨外圆柱表面为例，其加工原理如图 4-30 所示。将工件放置由电磁铁 N 极和 S 极构成的磁场中，在电磁铁与工件之间填充磁性磨粒，这是一种兼有磁化性质和研磨能力的直径为几微米至一百多微米的粒状体。当对电磁铁通以直流电时，在 N、S 两极之间便产生磁场。磁性磨粒被磁极吸引，在磁力作用下，磨粒沿磁力线整齐地排列成刷子状，即所谓磁力研磨刷。磁力研磨刷在磁场作用下，边保持加工间隙，边向工件表面加力，在使工件回转并沿轴向作振动时，磁力研磨刷与工件产生相对运动，工件表面就受到磁性磨粒的研磨。

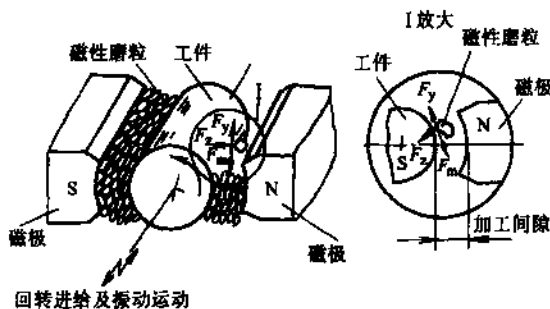


图 4-30 利用磁性磨粒的磁力研磨原理图

若工件为磁性材料，当磁性磨粒被磁化的同时，工件也被磁化。于是，磁力研磨刷前端的每个粒子在磁力作用下，会对工件表面产生 F_x 的研磨力。另一方面，受 F_x 力作用的粒子，由于工件的回转又受到工件切线方向的力 F_y 的作用。但是，由于磁极和工件之间产生的不均匀的磁场分布，加之基于切线方向的磁场梯度的磁力 F_m 与 F_y 作用方向相反，因此，可防止磨粒向加工区外流动和飞散，使磨粒稳定地保持在加工间隙内对工件表面进行研磨。

(2) 外圆和内孔表面的磁力研磨 图 4-31 是外圆表面的磁力研磨装置。在由线圈、磁极及轭铁构成的闭合磁路空隙部分放置工件和磁性磨料。磁路由设置在平台上的绝缘体支撑。研磨装置安装在立式铣床的工作台上，通过主轴使工件作回转和上下进给运动。设计磁路时，通过计算磁导率来决定各部分的尺寸。磁力研磨外圆表面，不仅可提高圆度精度，同时也可使圆柱度精度有所提高。

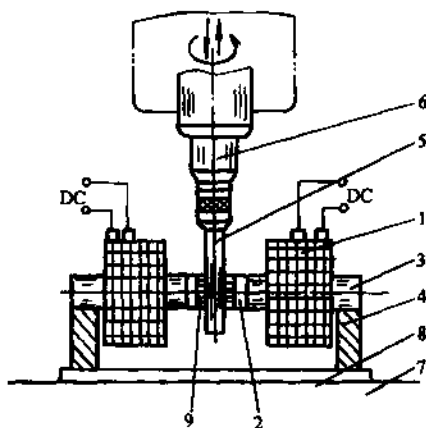


图 4-31 外圆表面的磁力研磨装置
1—线圈 2—磁极 3—轭铁 4—绝缘体
5—工件 6—主轴 7—工作台
8—平台 9—磁性磨料

以工件回转、磁极静止的方式能对内径大的工件进行内表面研磨，其加工原理同外圆表面研磨一样。但是，用这种方法时，由于强磁性体设置在内径里，对于内径小的工件，会使强磁性体和工件内表面之间的距离变小，向与加工无关的部位漏磁量比例增加，造成加工部位的磁场强度下降，磁场分布恶化。一般内径小于 20mm 的工件难以使用图 4-32 所示的方法加工。

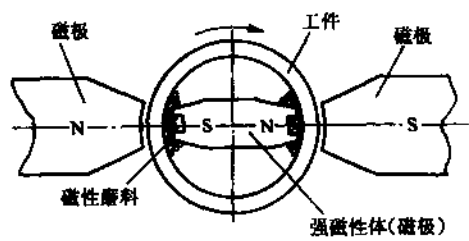


图 4-32 内表面的磁力研磨(内径较大时)

因此，当研磨内径小的工件内表面时，可采用磁极回转的磁力研磨方法，如图 4-33 所示。一边设置工具的高速回转的磁极，另一边配置可夹持工件的低速回转磁极，其转向相反。工具磁极的转速为 1000r/min，而工件转速是 10r/min，其速度比很大，工具磁极是在轴向上开有三个切槽的圆棒。根据实验，如使用没有槽的圆棒做工具电极时，磁极就被磨损。由于设有轴向槽，磁通集中在工具磁极的边缘部位，在该部位的磁力研磨刷与磁极同时回转，使工件表面得到研磨。

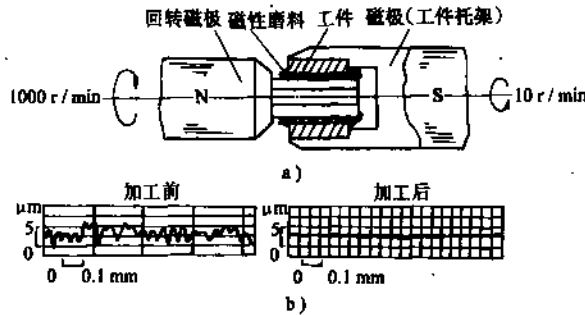


图 4-33 内表面的磁力研磨(内径较小时)

a) 磁力研磨方法 b) 磁力研磨效果

(3) 磁磨料 磁磨料是一种复合磨料，通常是将具有强磁性的铁磁性物质和具有磨削性能的磨料按一定比例混合后，经烧结、粉碎、球磨、筛选等工序制成。也可采用电铸或等离子粉末熔融法制作。作为铁磁性物质的有：铁、铁合金和铁的氧化物；作为磨料的有：氧化铝、碳化物、金刚石等。

(4) 特点

1) 根据磁力研磨的原理，通过改变线圈的励磁电流(即磁场的强度)可以很容易地控制研磨压力。此外，还能调节磁性磨粒的保持力及自动向加工区供给、排出及回收磁性磨粒。

2) 由于磁极和工件表面之间有加工间隙(1~4mm)，因此通过磁力研磨刷进行柔性研磨，不仅可用于圆柱和平面研磨，还可以进行异形表面和自由曲面的研磨。

3) 在磁极结构一定的情况下，通过控制磁感应强度，即可调节磨削力，加工过程容易实现自动化。

4) 可以在干燥状态下加工。磁性材料被约束在磁极之间，不会污染操作环境。

5) 磨料沿加工表面不断滚动和更换位置，使其具有良好的自锐性。

6) 加工效率高。研磨前表面粗糙度为 $R_{\zeta}5 \sim 6\mu\text{m}$ 的不锈钢零件，经 120s 研磨后，即可达到 $R_{\zeta}0.1 \sim 0.2\mu\text{m}$ 。

7) 既可磨削铁磁性材料, 也可磨削非铁磁性材料。

(5) 磁磨料磁力研磨的应用 磁磨料研磨适用于精密零件的研磨、抛光和去毛刺, 如轴承内外滚道、液压机械用的滑阀、齿轮泵、家用不锈钢器皿、螺纹轧辊、手表表壳、缝纫机零件等。过去必须用手工进行的去毛刺和抛光工序, 有可能在很大程度上应用磁磨料研磨而实现自动化。磁磨料研磨不仅可用于以铁和碳素钢、合金钢等磁性材料制作的零件, 也适用于黄铜、不锈钢和钛合金等非磁性金属材料, 以及陶瓷、硅片等非金属材料。

但磁性磨粒研磨特性受多种因素影响, 如磁场强度、磁极形状、磨粒磁化特性、被加工材料材质、形状和尺寸及加工间隙等, 所以对各种工件必须选取最佳加工条件。

6.3 非接触研磨

非接触研磨技术以弹性发射加工(Elastic Emission Machining, 简称 EEM)为理论基础。其加工原理见图 4-34, 加工时研具与工件不接触, 利用水流为载体, 使微细的磨料在工件表面滑动而去除其表面材料。它以粒径为 $1 \sim 0.02 \mu\text{m}$ 的氧化铝或氧化锆磨料微粉与水均匀混合作为研磨液, 以聚氨酯球作研具。工作时, 聚氨酯球作旋转运动, 并逐渐接近工件; 研磨液用泵加压后作循环运动。当研具接近工件表面时, 研磨液流体的动压力迫使研具与工件保持微小间隙, 并借助混合液的流动使磨粒加速, 以接近于水平的角度与工件表面进行弹性撞击, 并在接近工件表面处产生强大的剪切力, 从而去除工件表面的材料。它可使材料内部不产生错位和缺陷, 但又可产生微量的“弹性破坏”, 从而实现原子级加工。其加工面积仅局限于 10mm^2 的范围内。

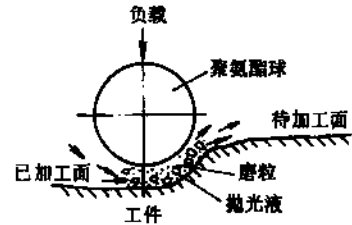


图 4-34 弹性发射加工原理

数控弹性发射加工试验装置见图 4-35, 用数控方法控制聚氨酯球位置, 以获得最佳几何形状精度, 同时使超细微粒加速, 对工件进行原子级弹性破坏。整个装置是一个三坐标数控系统, 聚氨酯球装在数控主轴上, 由变速电动机带动旋转, 其负载为 2N 。在加工硅片表面时, 用直径为 $0.1 \mu\text{m}$ 的氧化锆微粉, 以 100m/s 速度和水平面成 20° 的入射角向工件表面发射, 其加工精度达 $\pm 0.1 \mu\text{m}$, 表面粗糙度 $R_a 0.0005 \mu\text{m}$ 以下。

6.4 浮动抛光

浮动抛光是一种无接触的抛光方法, 加工出的工件表面的平面度很高, 没有端面塌边和变形缺陷。浮动抛光可用于计算机磁头的磁隙对置面、PCM 薄膜盖基片的加工, 通过选择合适的研磨剂和化学添加剂, 可防止出现晶界差, 即使是多晶体材料也能获得表面粗糙度为 $R_a 0.002 \mu\text{m}$ 的表面。浮动抛光法还适于加工高精度的光学零件。

浮动抛光的工作原理如图 4-36 所示, 它利用流体动力学原理使抛光器与工件浮离接触, 在抛光器的工作表面上做出了若干楔槽, 当抛光器高速回转时, 由于油楔的动压作用使工件或

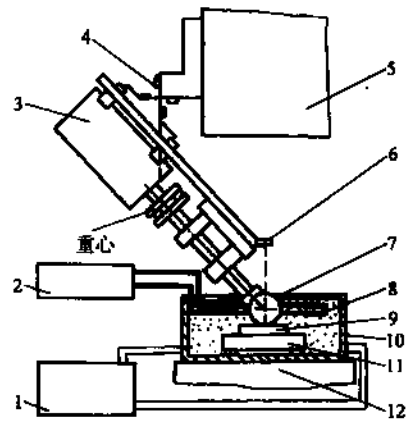


图 4-35 数控弹性发射加工装置

- 1—循环膜片泵 2—恒温系统 3—变速电动机
4—十字弹簧 5—数控主轴箱 6—加载杆
7—聚氨酯球 8—抛光液和磨料 9—工件
10—容器 11—夹具 12—数控工作台

抛光器浮起，其间的磨粒就对工件表面进行抛光。

6.4.1 浮动抛光机理

如图 4-37a 所示，实际结晶在表面上有很多晶格缺陷，从材料上去除表面原子所需能量比破坏材料原子结合所需的能量小，尤其是凸出部分易受冲击而被去除；当两物质相互摩擦时，如图 4-37b 所示，两物质表面的结合能量分布出现重叠，强度高的物质表面原子被强度低的物质表面原子冲击而去除，实现用软质粒子来加工硬质材料，而且工件材料也不会因塑性变形产生错位；图 4-37c 所示，工件最外层表面原子和研磨剂粒子最外层表面原子相互扩散，降低了工件最外层表面原子的结合能量，被以后的磨粒粒子冲击而去除。这种加工方法的加工效率随抛光粒子向工件表面的冲击频率、冲击速度、工件与抛光剂的表面原子结合能量分布和相互扩散的难易程度、不纯物原子侵入时工件最外层表面原子的结合能量的降低比例而异。例如可用极软的石墨和溶于水的 LiF 来抛光很硬的蓝宝石。为了提高加工效率，可使用能起机械化学反应的软质物质作抛光剂。

用传统方法以硬质磨粒来抛光软质材料工件，虽然加工效率高，但难于避免工件材料的变形和破坏，但若选取直径极小的硬质粒子冲击工件表面时，如果设定加工条件无工件变形，只进行去除最外层表面原子，也可使工件不产生错位。例如可使用公称直径为 $0.007\mu\text{m}$ 的 SiO_2 超微粒子，进行抛光软质 Mn-Zn 铁素体和 LiNbO_3 等单晶工件而不产生错位和增殖。技术要点是使用超微粒子，避免大的粒子混入。

6.4.2 浮动抛光速度

浮动抛光速度与下列因素有关：工件的形状、材料和晶面方位，抛光剂的种类、粒径和浓度，加工液的种类、氢离子浓度和粘度，化学药品种类，抛光压力，抛光器表面形状、直径、转速，工件转速、安装地点，抛光温度等。加工蓝宝石抛光速度与诸因素的关系可参见表 4-48 和表 4-49。

表 4-48 蓝宝石单晶的抛光速度

结 晶 面	抛光速度/ $(\mu\text{ m/s})$	结 晶 面	抛光速度/ $(\mu\text{ m/s})$
{0001}	0.00184	{2110}	0.000405
{1010}	0.00156	{1012}	0.000348
{1101}	0.00115	{1104}	0.000169
{2113}	0.000961		

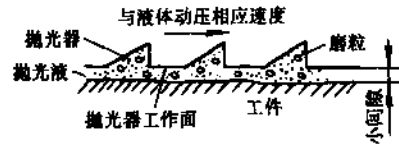


图 4-36 浮动抛光原理

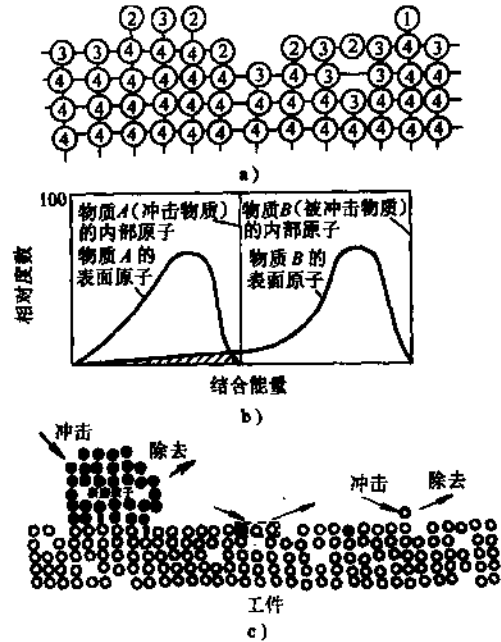


图 4-37 浮动抛光机理

- a) 结晶材料的表面原子结合状态模型
- b) 材料内部与表面原子结合能量的分布
- c) 浮动抛光工件最外表面原子的去除过程

表 4-49 蓝宝石 $\{1012\}$ 面浮动抛光的各种微粒子抛光速度

粒子种类 ($0.007\mu\text{m}$)	摩尔分数 (%)	抛光速度 $\text{}/(\mu\text{m/s})$
SiO_2	2.0	0.000816
CeO_2	2.0	0.000030
CeO_2	20.0	0.000541
ZrO_2	10.0	0.000166
Cr_2O_3	20.0	0.000078
Fe_2O_3	20.0	0.000047
MgO	10.0	0.000031
LiF	10.0	0.000019
石墨	10.0	0.000046
$0.02\mu\text{m}\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$	2.0	0.00016

6.4.3 浮动抛光形状精度

取直径 100mm, 厚度 30mm 的 BK-7 玻璃试件, 在控制室温、抛光液温及静压油温条件下抛光 1h。抛光前, 加工面为光学研磨面, $\lambda = 0.63\mu\text{m}$ 抛光后经测量其 P-V 平面度为 $0.029\lambda = \lambda/34 = 0.018\mu\text{m}$ 。

图 4-38 是用不同质量分数的抛光液抛光 Mn-Zn 铁氧体单晶(用于磁带录像机磁头)时, 端面塌边的测量结果, 抛光剂为 MgO 。用传统方法抛光时, 常使用夹具来防止端面塌边。采用浮动抛光, 不需使用夹具, 端面塌边半径可达 $0.01\mu\text{m}$ 。

6.4.4 浮动抛光表面粗糙度

表面粗糙度对光的反射率、散射、吸收以及激光照射对光学元件的损伤和材料的破坏均有影响。使用具有尖端半径为 $0.1\mu\text{m}$, 宽 $2\mu\text{m}$ 的触针的 Talystep 测量仪, (垂直放大倍数 200 万倍) 测量经浮动抛光的人造石英抛光面的表面粗糙度时, 在不改变测量仪的噪声电平时, 表面粗糙度在 $R_z 0.001\mu\text{m}$ 以下。

据报道, 利用浮动抛光法加工蓝宝石 $\{0001\}$ 面, 其表面粗糙度可达 $R_z 0.00008\mu\text{m}$ (测量长度为 1mm)。

6.4.5 表面特性

(1) 结晶性 晶体机能依赖于结晶的结构, 一旦结构遭到破坏, 机能就下降。因此, 在加工单晶时, 最重要的是不要破坏表面的结晶性。据用各种方法加工蓝宝石单晶 $\{1012\}$ 面的实验结果表明, 用 $8\mu\text{m}$ SiC 和 $3\mu\text{m}$ 金刚石磨粒研磨, 工件表面的结晶性丧失。而经过浮动抛光的表面具有良好的结晶特性。加工 Mn-Zn 铁氧体单晶也得到同样的效果。

(2) 磁特性 材料磁特性不仅对结构敏感, 对应力也很敏感。因此, 一旦加工后表面上有残余应力, 磁特性就会发生变化。例如, 对外径 8mm, 内径 4mm, 厚 0.2mm 的 Mn-Zn 铁氧体环形试件的两个平面施加各种加工, 研究其起始导磁率—温度特性, 发现浮动抛光的表面显示出有与腐蚀加工面同样的磁特性, 这足以证明其表面没有残余应力。用 Cr_2O_3 加工的表面, 粗

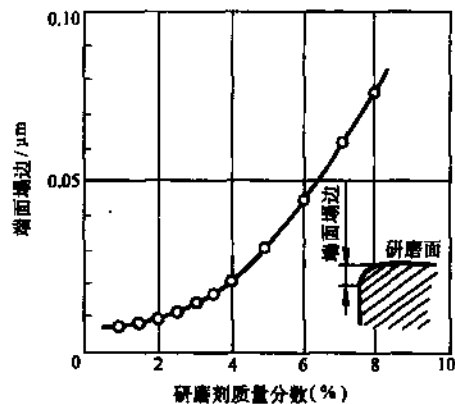


图 4-38 Mn-Zn 铁氧体单晶工件的端面塌边和抛光剂质量分数的关系

糙度为 $R_a 0.007\mu\text{m}$ ，但由于加工造成表面下 $0.5\mu\text{m}$ 左右有残余压应力，在常温下的起始磁导率降低到母材的 60% 左右。

6.5 水合抛光

水合抛光是利用在工件界面上产生的水合反应的新型高效、超精密抛光方法。其主要特点是不使用磨粒和加工液，而加工装置又与当前使用的抛光机相似，只是在水蒸气环境中进行加工。因此，要尽量避免使用能与工件产生固相反应的材料作抛光盘。图 4-39 为水合抛光装置示意图。在普通抛光机上，给抛光工件的部位加上耐热材料罩，使工件在过热水蒸气介质中进行抛光。通过加热，可调节水蒸气介质的温度。随着抛光盘的旋转，工件保持架在它上边作往复运动。

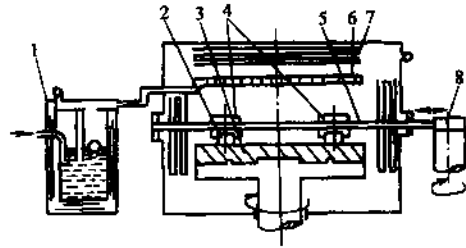


图 4-39 水合抛光装置示意图
1—水蒸气产生装置 2—工件 3—抛光盘
4—施加载荷 5—保持架 6—水蒸气
喷嘴 7—加热器 8—偏心凸轮

在水合抛光过程中，两个物体产生相对摩擦，在接触区产生高温高压，工件表面上的原子或分子呈活性化。利用过热水蒸气分子和水作用其表面，使之在界面上形成水合化层。借助过热水蒸气(不是用游离磨粒)或在一个大气压的水蒸气环境条件下利用外来的摩擦力从工件表面上将该水合化层分离、去除，去除量(厚度)为零点几个纳米，所以可获得无划痕、平滑光泽无略变的洁净面。

6.5.1 蓝宝石的水合抛光

蓝宝石表面不仅要求表面平滑性好，而且要求结晶无畸变，洁净度高。因为结晶紊乱易使晶膜错位，使集成电路特性恶化。此外，还必须防止杂质混入加工层表面。

表 4-50 示出水合抛光蓝宝石时，抛光盘材料与、水蒸气温度与加工速度的关系。

表 4-50 水合抛光的抛光盘材料、水蒸气温度与加工速度之间的关系

水蒸气介质温度/℃	对蓝宝石工件 {0112} 面的加工速度/(mg/h)			
	抛光盘材料			
	低碳钢	石英玻璃	石墨	杉木
100	0.034	0.024	0.045	0.010
150	0.051	0.048	0.048	0.040
200	0.080	0.034 ^①	0.021 ^①	0.075
常温	0.025	0.012	0.027	0.004
		0.020		

注：加工条件：载荷 500g，抛光盘转速 44r/min。

① 使用常温下的金刚石研磨膏，加工速度为 0.395mg/h。

水蒸气介质温度越高加工量越大。但有的抛光盘在抛光过程中，从抛光盘上抛光下的微粉会粘到蓝宝石工件上，使抛光加工量下降。如利用石英玻璃抛光盘时，水蒸气与抛光盘中的 SiO_2 微粉反应会生成含水硅酸盐化合物的粘连物，使加工表面有小划痕。而使用低碳钢和杉木抛光盘时，表面无粘连物，可获得无划痕的光滑表面。

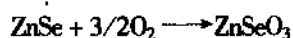
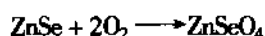
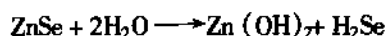
水合抛光蓝宝石时，水蒸气的最佳温度范围为 150 ~ 200℃，可获得的加工表面粗糙度在 $R_a 0.002\mu\text{m}$ 以下。

6.5.2 硒化锌(ZnSe)晶体的水合抛光

硒化锌可用作 CO₂ 激光光学元件的反射镜、透镜等。这些零件的平面度要求高,且表面应无划伤。因为表面稍有划伤,其伤痕部位就会增加激光的吸收,从而引起发热导致零件的报废。

硒化锌是用化学气相沉积法(CVD)制造出的一种多晶体,构成的晶粒均匀,且具有各向异性。结晶的硬度随晶粒直径不同而不同,一般在 1000~1500MPa 范围内变化。切削力在 0.005~0.01N 时会产生微小裂纹,跨在塑性变形和切削作用的倾斜区域。当载荷为 0.02N 时,划痕两侧有裂纹,并很快延伸到切削作用和材料破坏的区域。

ZnSe 在低压下具有闪锌矿晶格的结构,而在高压下,转移成 β -Se 形或 NaCl 结构,变为金属性结构。ZnSe 本是脆性多晶体,如抛光时磨粒给接触点局部加压,由于金属变质层同母材凝聚能量不同而引起裂纹。另外, ZnSe 还容易受水蒸气分子和大气中氧气的影响而产生如下反应:



ZnSe 与水反应产生带有恶臭的 H₂Se 气体,对人体有害,应采取保护措施。ZnSe 与氧发生反应产生 ZnSe 的氧化物,并使接触局部温度上升。ZnSe 氧化物与 H₂O 反应时,生成 ZnSe·xH₂O 水合物。当用 100℃ 的水蒸气喷吹 ZnSe 粉末晶体 4h 后,会生成 ZnSeO₃·2H₂O、ZnSeO₄·6H₂O 和六方晶体 ZnSe。上述生成物质软易于去除,故可利用上述 ZnSe 与水蒸气的化学反应进行 ZnSe 的水合抛光。

在图 4-39 所示的抛光装置上安装箱形保护罩,里面供应水蒸气进行水合抛光。工件为 CVD 晶体 ZnSe,前道工序表面粗糙度为 R_a0.05 μ m,抛光压力 0.5~0.6kPa,抛光盘转速 20r/min,工件转速 80r/min。水合抛光效果见表 4-51。

表 4-51 ZnSe 晶体水合抛光加工条件及加工特性

抛光工具	液体及介质条件	加工量/(μ m/min)	加工表面粗糙度 R _a (均方根值)/ μ m	加工表面质量
特殊微型十字架	水蒸气中	0.002	<0.01	无裂纹
特殊微型十字架	蒸馏水中	0.005	0.01	无裂纹
锡板	水蒸气中	0.005	0.01~0.02	有细裂纹
锡板	蒸馏水中	0.02	0.01~0.02	有细裂纹
特殊微型十字架	蒸馏水+乙醇液中	0.01	0.01~0.02	有细裂纹

6.5.3 其他亲水性晶体的水合加工

作为亲水性材料的玻璃、水晶、MgO、Y₂O₃、MgAl₂O₄ 等,也宜用水合抛光。这些材料与水能很快形成单分子层的羟基。由于过剩的水分子作用,水合化从表面进行到内部深处。水合化层的厚度为 0.1nm 左右。抛光普通玻璃时,加工表面的粗糙度可达 1~4nm,抛光石英玻璃可获得 0.27nm 的平滑表面。使用沥青抛光盘抛光玻璃时,除了水合化反应外,还有沥青上的化学反应,即在抛光过程中,因酸水溶液中的电离作用而形成的 H⁺ 离子和有机化合物等,这些氢离子进一步促进玻璃的水合化。因此以玻璃为主的水晶(α -SiO₂)、合成石英玻璃系列等的材料的机械性抛光,除磨粒的作用外,还包含有水合作用。

用水合抛光法抛光水晶时,水蒸气温度越高,加工量就越大。

第 5 章 超精密加工机床

1 概述

超精密机床是实现超精密加工最重要、最基础的条件,直接影响国防和尖端技术的发展。例如,关系到现代飞机、潜艇、导弹性能和命中率的惯导仪表的精密陀螺、激光核聚变用的反射镜、大型天体望远镜的反射镜和多面棱镜、大规模集成电路的硅片、计算机磁盘和复印机的磁鼓等高精度的零件,都要用超精密机床来加工制造。因此,在现代工业生产中,超精密机床有其极为重要的作用。

1.1 超精密机床发展现状

第二次世界大战后的 50 年代后期,美国首先开始进行超精密加工机床方面的研究,当时因开发激光核聚变实验装置和红外线实验装置需要大型金属反射镜,因而急需开发制作反射镜的超精密加工技术和超精密加工机床。因这种技术主要是军工需要,故以国家和军方的有关研究所为主导,进行了强有力的超精密加工技术和超精密加工机床的开发。在 60 年代超精密专用机床开始商品化,出现了加工激光核聚变反射镜、战术导弹及载人飞船用零件的超精密加工机床。到 80 年代末,超精密加工机床综合性技术趋于成熟,而且从国防工业扩展到民用工业,如加工计算机的磁盘、复印机的磁鼓、录像机的磁鼓、激光打印机的多面棱镜等,因此,要求发展高生产率的中小型超精密机床。目前,美国从事超精密加工制造比较有名的公司、企业至少有 30 家,其中最具代表性并取得重大成果的是美国联合碳化物公司(Union Carbide 公司)和劳伦斯·里佛莫尔国家实验室(Lawrence Livermore National Laboratory,简称 LLNL 实验室)。超精密加工技术的发展使美国在航空、航天、核能方面取得了许多重大的成就。

美国在超精密机床生产方面居世界领先地位。如 LLNL 国家实验室的大型光学金刚石车床(LODTM)和 3 型大型金刚石车床(DTM-3),是现在世界公认的水平最高的、达到当前技术最前沿的超精密车床。由于美国超精密机床水平较高,商品生产不仅国内使用,还有相当多的出口,比较著名的有 Moore 公司的 M-18AG 型超精密非球面车床和 Pneumo 公司的 MSG-325 型超精密非球面车床等。

由于各国对超精密加工技术都保密、不予外传,故欧洲的主要国家如德国、英国、法国、瑞士、意大利、荷兰等国家都投入很大人力物力进行超精密加工技术和超精密机床的开发研究。这些国家生产的中小型超精密机床有较高水平,近年来又投入力量研究开发大型超精密金刚石车床。如,在欧洲以具有研究开发超精密金刚石切削加工机械传统的荷兰的飞利浦公司(Philips)的中央研究所为中心,研究开发 CNC 超精密金刚石车床 COLATH,1978 年以后用于本公司的高精度零件的加工。英国 Cranfield 大学与 British Science and Engineering Research Council (SERC)签定合同研制开发 X 射线天体望远镜用大型超精密金刚石车床。

日本研究超精密加工技术和超精密加工机床起步较晚,70 年代中期才开始,而且是根据电子和光学等民用需要开始研究的。但是,由于得到有关方面的重视,投入大量的人力物力去开发,有计划地引进先进技术并深入剖析,从而使研制的产品很快达到甚至超过引进产品的水平。

平, 因此在发展速度上追上美国, 而且在技术上可以与美国抗衡, 并且民用工业向精密化发展。特别是日本在 80 年代开发小型超精密 CNC 车床方面已走在世界的前列, 约有 20 家厂商, 如丰田工机、东芝机械、不二越、日立精工、理研制钢、日本精密研究所等都研究生产小型 CNC 超精密车床。由于许多机床采用了高分辨率的数控系统($0.01\mu\text{m}$)和高分辨率的激光干涉测量系统($0.01\mu\text{m}$)以及其他一些先进技术, 因而可以加工多种高精度复杂球面。一些作为商品出售的小型精密车床, 其加工精度已超过 $0.1\mu\text{m}$, 加工表面粗糙度要低于 $R_a0.01\mu\text{m}$ 。但在大型超精密金刚石车削机床的研究与开发方面, 远远落后于欧美, 至今未见有关的报导。日本有关方面正大声疾呼在这方面积极赶上欧美。

我国从 60 年代开始发展精密和超精密机床, 经过 30 多年的努力, 我国的超精密机床现在已有一定的水平。沈阳、济南、上海等也都有超精密车床产品; 1987 年北京机床研究所又研制成功空气轴承主轴的加工球面的超精密车床。我国超精密机床近年虽有较快发展和提高, 但和工业发达国家相比还有较大差距。主要表现在超精密非球曲面车床还不能生产; 机床的精度一般要比国外的低一个等级; 机床精度的保持时间大大低于国外; 精密空气主轴、微位移机构、精密 CNC 伺服系统, 机床热变形和精密恒温控制、结构稳定性和防振隔振技术等亟待深入研究。因此, 对精度要求高的精密和超精密机床, 还不得不从国外进口。

超精密机床进一步发展对精度提出新的要求, 美国 POMA 计划可作为代表。80 年代, 美国 Union Carbide 公司、Moore 公司和美国空军兵器研究所等制订了一项有意义的计划, 其目标是将直径 $\phi 800\text{mm}$ 的大型球面反射镜的形状精度控制 $0.1\mu\text{m}$ 以内, 将机床的运动误差降低到十分之一。由于该项目的目标为 Point One Micrometer Accuracy ($0.1\mu\text{m}$ 级精度), 因此称为 POMA 计划, 该计划举世闻名, 所产生的影响十分深远。表 5-1 是 POMA 计划对机床精度的具体要求, 可见对机床精度要求甚高。

表 5-1 POMA 计划的精度目标

误差项目	精度/ μm	
	现在精度	POMA 计划值
位置检测精度	0.1	0.01
定位精度	0.5	0.05
偏摆、俯仰、摇摆	1.0	0.02
直线度	0.25	0.02
轴向跳动	0.1	0.02
径向跳动	0.1	0.02
主轴伸长	0.25	0.05
主轴驱动	0.25	0.01
热变形	0.5	0.05
工件装夹	0.5	0.05
共计	-1.5	-0.1

1.2 超精密机床的发展趋势

近年来, 世界各发达国家都非常重视超精密机床的发展, 由于得到国家的支持, 综合运用多项现代新技术, 使超精密机床发展迅速, 目前正向纳米级发展。现在通用的中小型超精密机床已逐渐成熟稳定, 很多国家都已有质量很高的标准超精密机床产品。当前国际上超精密机床的主要发展趋势是:

(1) 向更高精度、大型化、高效多功能和自动化的方向发展

1) 由于尖端技术的发展,要求加工出更高精度的大型光学元件,因此迫切需要发展更高精度的超精密机床。目前,美国和日本提出向纳米级精度挑战,并加紧研制纳米级超精密加工精度的超精密机床,主要目标为:主轴精度 20nm,定位精度 50nm,位置检测精度 10nm;环境温度 $20 \pm 0.0005^\circ\text{C}$;以及与之相应的纳米级关键基础件:如主轴轴系、主轴单元、导轨副、直线运动单元、微位移装置、数控伺服系统等。

2) 在大型激光武器、激光核聚变用大型激光器、同步加速器用大型光学元件和大型遥测光学器件研究开发中,有许多大型光学元件,其形状精度要求达到纳米级;X射线反射镜的表面粗糙度要求达到零点几纳米。为加工这些大型超精密工件,必须发展大型多功能的超精密机床。现在美国和英国处于领先地位,且仍在继续发展提高。日本过去在此领域进行的工作不多,现在提出要加速发展。美国研制的大型超精密机床已能加工出直径 2.4~4m 的大型光学器件。

3) 随着超精密加工在民用工业中的应用,要求发展更高效专用的超精密机床。一般通过提高机床转速和刀具进给速度来缩短切削时间。此外,缩短主轴的起停时间,由于主轴必须在几秒钟内高速运转,又要在几秒钟内停止,因而机床趋向于采用电动机直接带动主轴运转的方式。日本在此领域内处于领先地位,已生产高效自动化程度很高的专用磁盘车床,加工激光打印机多面棱镜的超精密铣床,加工录像机磁鼓的高效专用车床等。研究和开发高效专用机床是中小型超精密机床发展和竞争的热点。

4) 超精密加工从加工性质上来说最适宜采用自动化、无人化加工方式。这样可以最大限度减少外界干扰,保证加工质量。目前研制的超精密车床都已实现数控化,有些可以配自动上料装置,并可以纳入到超精密加工的 FMS(柔性制造系统)中去。无人化加工是超精密加工发展的一个重要趋势。

(2) 发展模块化超精密机床 当今世界上的市场竞争和科技进步,使工业产品的市场寿命周期越来越短。对多变市场的适应性,已成为当今生产技术发展和改造的战略目标。模块化技术方法使这种适应性得以实现和发展。即当加工对象改变时,机床结构应能就地(使用现场)根据需要很容易地进行结合和分离,以组成新的机床。如采用空气轴承组件、气浮导轨组件、进给装置、花岗岩底座和隔振气垫等八种超精密加工元部件作为模块,组成可以加工磁盘、活塞、转子、振动筒、红外抛物面反射镜、多面棱体、高精度轴承、蓝宝石切割、研磨等十种功能的超精密加工机床。美国的 ANORAD 公司生产各种旋转定位工作台、在线运动工作台、空气轴承线性定位工作台等,可以满足不同用户模块方式组成各种一维、二维和多维的超精密运动控制平台。由于有了模块化和结构化技术,研制新的超精密设备的费用和周期都大大下降,技术的难度也下降。据分析,制造成本可降至 $1/3 \sim 1/2$,制造周期可缩短 $1/3 \sim 1/2$,使机床随市场的变化具有快速性。

采用模块式结构可使机床具有更大的柔性和更高的利用率,也是降低成本、缩短制造周期的有效方法。因此发展模块化超精密机床是推广应用超精密加工技术的一个有效手段,用户可以根据需要提出要求,以较低的价格获得所需要的机床。

模块化设计方法应探讨如下问题:

- 1) 模块化分类法、编码系统与标准化的研究。
- 2) 标准基本元件的定义与分类。
- 3) 概念设计与模块化分解和联接的原则与方法。

- 4) 设计知识库支持系统和精度分析决策系统。
- 5) 单元模块设计技术等。

(3) 采用计算机补偿技术提高加工精度 提高加工精度的途径可分为两大类,一类称为避免误差技术,另一类为补偿误差技术。避免误差技术是靠提高机床本身精度来减小加工误差。补偿误差技术则是应用监测装置来实现加工精度。但随着机床本身精度的不断提高,单靠提高基准元件的精度来提高超精密加工机床的精度是有限的,而且其成本费用剧增。受经济条件和精度的限制,补偿误差技术得到更为广泛的应用。近年来,国外在机床上广泛采用计算机进行先发性的前馈控制,以实现超精密加工。这种方法是利用计算机预先测定引起加工精度下降的参数,并通过计算机进行处理,预测出加工误差,并及时进行补偿,从而可以得到高于机床本身结构所能达到的加工精度。利用计算机进行综合误差补偿是提高加工和测量精度的一种经济有效的方法,对开发纳米级加工精度的机床具有重要意义。这一趋势已日益引起重视。误差补偿技术的发展关键在于开发和应用灵敏、精确和稳定可靠的超精密传感器和分辨率、位移精度及重复精度很高的执行机构。

(4) 采用适应控制技术提高生产率 随着超精密加工质量稳定和超精密加工零件数量急剧增长的要求,国外超精密加工机床正向高效率方向发展。采用适应控制技术的超精密加工机床,可以清除加工中和加工环境中人为因素的影响,这是实现高精度和高效率超精密加工的主要手段。但由于适应控制技术成本偏高,目前主要用于大型和昂贵的超精密加工机床。

(5) 加工、测量一体化 在超精密加工中,精密测量也是关键。测量仪器的精度一般都要比被测零件精度高一个数量级。过去加工和测量通常是独立进行的。但随着机械加工技术水平的提高,机床本身的精度也大大提高。在这种条件下,配有适当的仪器或采取一定的措施后(如在刀具的位置上换成相应的传感器),机床也可以作为计量装置。例如以气体静压轴承为基准的超精密车床,其回转精度可以达到 $0.02\mu\text{m}$,加工零件的圆度为 $0.1\mu\text{m}$ 左右,用加工机床的轴系作为基准测量工件是完全可行的。当然,加工状态和检测状态是不同的,加工时必须考虑装夹变形等因素。目前,国外非常重视把加工和测量结合起来,积极发展边加工、边测量和在监控测量条件下进行高精度的加工方法。这种把加工技术、测量技术和控制技术有机地结合成为一体的加工系统是超精密机床的典型发展趋势。这种机床即是加工机,又是测量机,实现加工测量一体化,大大提高了经济效益。

2 超精密加工机床的设计

2.1 对超精密机床的要求和设计原则

2.1.1 超精密机床达到高精度应采取的措施

超精密机床的加工精度远远高于普通机床的加工精度。如机床的定位精度,普通镗床为 0.02mm ,精密镗床为 $0.002\sim 0.005\text{mm}$,超精密机床为 $0.01\mu\text{m}$ 。超精密机床之所以能达到如此高的精度,主要是从设计、制造及使用维护等方面采取了一系列措施。

(1) 结构设计 在进行设计时,对精密机床的结构,特别是对其总体布局、主运动部件、进给运动部件,要充分考虑到热、力等因素的作用。应采取相应的措施减小机床内部的发热量和热变形,提高机床的刚度和抗振性,减少磨损及其对精度的影响,并且尽可能缩短内联系传动链,提高内联系传动副的传动精度。

(2) 技术要求 应提高主要零件的几何精度和降低表面粗糙度,确保制造质量。其中又以

提高主轴部件、导轨、丝杠、分度蜗轮副以及某些传动齿轮的几何精度为主，因为这对提高机床加工精度最为直接。

(3) 制造

1) 超精密机床关键零件的加工和装配，应在恒温条件下进行。

2) 超精密机床的主要零件，往往要经过多次时效处理，以最大限度地减少内应力影响。经时效处理后的零件，在超精加工时能达到较高而稳定的精度。

3) 高精度的测量仪器和先进的测量方法是获得高精度的必要手段。对于超精密机床的一些零件，测量用的仪器，其精度都高于工件制造精度。这样才能保证零件的尺寸精度及形状位置精度。

4) 在超精密机床上，往往采用一些特殊装置。例如，误差补偿装置、变形补偿装置、间隙补偿装置等，以提高加工精度。

(4) 使用 超精密加工必须在稳定的加工环境条件下使用。稳定的加工环境条件主要是指温度、湿度、净化和防振四个方面的条件。

2.1.2 对超精密机床的基本要求

(1) 高精度 包括高的静精度和动精度，主要的性能指标有几何精度、定位精度和重复定位精度、分辨力等，如主轴回转精度、导轨运动精度、分度精度等。

(2) 高刚度 对静刚度、动刚度和热刚度均提出了严格的要求，除本身刚度外，还应注意接触刚度，同时应考虑由工件、机床、刀具、夹具所组成的工艺系统刚度。由于检测手段的不断改善，机床已从传统的静刚度要求，转而提出动刚度和热刚度的要求。

(3) 高稳定性 设备在经运输、存储以后，在规定的工作环境下使用过程中应能长时间保持精度、抗干扰、稳定工作。因此，设备应有良好的耐磨性、抗振性等。

(4) 高自动化 为了保证加工质量，减少人为因素影响，加工设备多用数控系统实现自动化。

2.1.3 超精密机床的设计原则

一般地说，当设计新的加工机床和加工设备时，首先必须就其用途、工件特点、加工条件、加工精度、加工效率和维修等进行充分研究，同时还要就其功能、特点和精度进行彻底的探讨和归纳，此外，还要就结构设计、元部件技术、材料特性和控制技术等问题进行综合性研究。

在设计超精密加工机床时，首先需要注意以下几点：

1) 为实现亚微米加工精度，首先要满足超精密加工机床的工作条件和工作环境的要求。

2) 在特定的工作环境中使用，对加工机床的设计和操作都是有利的，不理解这一点，就不能合理地进行超精密加工机床的设计。

3) 在超精密加工的环境中，最需要注意的是温度、振动和污染的问题。如不能满足这些条件，则不能获得所期望的工作特性。

超精密加工机床的设计目前尚无一套成熟的设计方法，往往是在已有经验和使用情况的基础上，进行机床的设计。

现参考国外一些资料，以非球面加工机床为例，把超精密加工机床的结构设计归纳如下：

1. 超精密机床结构设计基本思想

(1) 结构上尽可能地提高刚度 一般来说，亚微米级的精度需要有高刚度的结构来支持，如果没有与之对应的高支承刚度也不能有高的运动精度。因此，精度和刚度的要求是一致的，

不能把它们割裂开来考虑。

(2) 结构要简单 为了获得高刚度结构, 其结构必须尽量简单。结构越复杂, 零件数量越多, 作用力在传递过程中受弹性变形和热的影响就变得越复杂, 运动误差就越大。因此, 能够使精度高、结构简单, 传动路程短, 零件少, 则是合理的结构。

(3) 床身的特点 为了提高机床本身的刚度和获得高的平面度以及容易分析因温度变化引起的复杂热位移等, 床身形状要简单、质量要大、固有振动频率要低。床身导轨是机床组装时的精度基准, 所以要求要有同测量平面一样的平面度和形状精度。另外, 为了避免加工中产生的振动影响, 其质量要大, 振动衰减特性要好。因此, 床身的材料多采用天然花岗岩和铸铁。另外, 为了防止地面传来的振动, 机床必须采用气垫支承。

(4) 定位机构 在非球面加工机床上, 形状精度受工件和刀具间相对位置关系所支配。因此, 定位精度是很重要的, 而且超精密加工机床的定位方式应采用闭环控制方式, 进给的分辨力必须是 10nm 或更高。

(5) 自动化 对于实用的多面体反射镜加工机床以及更高精度的非球面加工机床等, 首先考虑的是加工精度, 所以在大多数情况下, 不太考虑加工效率。因此, 工件的装夹与拆卸等没有必要进行自动化。

一般认为, 越是高精度加工, 越允许较低的加工效率, 但为了加工条件的稳定和进行温度控制及防污染, 加工现场最好不留人。因此, 加工系统的机构应当是简单的, 个别部位的自动化与其说是为了提高效率, 不如说是为了维持高的加工精度。

2. 结构设计中的相关技术

(1) 精度设计 所谓精度设计, 就是从精度方面考虑, 来设计达到这一精度的机床结构。概括的说, 精度设计就是:

- 1) 在达到加工产品所要求精度的前提下, 确定机床最经济的精度。
- 2) 为达到产品的这一精度, 确定机床的最合理、最经济的运动精度。

设计超精密加工机床时, 首先要明确目标精度, 包括加工产品的目标精度和机床的目标精度。这是开发超精密机床的目的意义所在。

在产品的计划阶段中, 首先要从用途、功能到必要的特性和性能、附加价值和市场性、以及将来的发展方向、产品寿命等方面充分考虑产品的精度, 然后设定产品的目标精度。

根据所确定的产品的精度, 确定与之相适应的机床的精度。机床的目标精度当然要高于产品的目标精度, 但是理想的机床目标精度要根据产品的精度、机床的特性及耐久性(精度寿命)等来决定。一般情况下, 机床的精度最好比产品的精度高一个量级。

机床的精度包括静态精度和高速运转时的动态精度。两者都与产品的加工精度有直接的关系。机床的静态精度是由机床部件的精度、装配精度、零件精度和零部件的静态弹性变形确定的; 在机床上进行装卸工件和刀具, 进行实际加工时, 由于工件和刀具自重或重心的移动而产生的弹性变形量的变化、由于发热而产生的尺寸变化, 以及振动的影响等都会使动态精度降低。超精密加工中, 要特别重视动态精度。

目前, 超精密加工机床的精度可达到:

- 主轴前端的非重复性跳动为 $0.03 \sim 0.05 \mu\text{m}$;
- 直线导轨的直线度(每 250mm 长度上) $0.1 \sim 0.2 \mu\text{m}$;
- 定位精度 $0.01 \mu\text{m}$ 。

总之, 根据目标精度设计超精密加工机床时, 精度是第一位的, 必须严格地以精度为中心

进行设计。要打破现有精度的束缚确定目标精度，从性能方面研究结构的理想状态，以及机床的效率和经济性。

此外，为了提高机床的精度，必须尽可能减少结构的构件数量，使结构简单，极力抑制误差。因为，增加构件和力的传递元件的数量，误差也会随之增加，弹性位移量就变大。在结构简单的同时，必须使结构本身具有极大的刚度。如尽量用大的支承构件，即增大构件间的接触面积，极力避免悬臂支承而采用两端支承，等等。

(2) 强度设计 一般的结构设计是以强度设计为基础的，因此，强度设计优于精度设计进行。但在设计超精密机床时，首先要进行精度设计。

进行一般机械设计时，其指导思想是重量尽可能的轻、动作要灵活，而且以占用空间小、功能多、高效率、便于操作作为评价标准。因此，设计时应确定最大许用载荷或最大许用应力，使之等于外力与安全系数的乘积。在材料强度允许的范围内，尽量缩小结构尺寸和重量。

可是，这种强度设计的方法在超精密机床设计中是不重要的。超精密加工机床的结构设计中，最重要的是精度，为了严格的达到某一目标精度，其他都处于次要的位置。

超精密加工机床容易出现问题的不是强度，而是由于弹性而引起的极其微小变形。无须说明，在超精密加工中，加工精度的数量级已经与通常认为的零部件的弹性变形量相近，甚至已经小于弹性变形量。

(3) 控制设计 当机床工作时，要步进进给或加工非球面时，控制技术极其重要。但对只是为了提高操作性和自动化而采用控制技术时要特别慎重，不要使控制机构对精度产生影响。因此，在超精密机床结构设计中，首先保证达到目标精度，再考虑加工效率和操作性。

(4) 刚度设计 前面已经论述，由于零部件的弹性而引起的变形，对超精密加工机床的运动精度影响最大，必须加以考虑。在特定的外力作用下，弹性变形的大小是由材料的弹性系数及零部件的刚度决定的。因此，超精密加工机床中，精度与刚度有直接的关系，应当使它们一致。要提高刚度，应先选用弹性系数大的材料，但是要注意即使弹性系数大，如果密度大，重量也会大，因而由于自重的影响而引起的变形也会很大。

从结构上讲，在简单的同时，还必须使结构本身具有极大的刚度。因此，尽量用大的支承构件，即增大构件间的接触面积，要极力避免悬臂支承而应采用两端支承。

刚度与精度有着密切的关系，所以需要特别注意。除静刚度外，对动刚度也必须认真探讨。

(5) 防振设计 在超精密加工中，一定要极力抑制加工机床自身的振动。振动源为驱动电动机、进给丝杠等传动装置、轴颈轴承及平面导轨、以及所有进行相对运动的部分。

(6) 防热变形的设计 机床中几乎运动部分都会发热，电动机、滚动轴承和静压轴承的轴颈部分是主要的热源，滑动导轨在高速运动时发热也很严重。

(7) 材料选用 在评价超精密加工机床的构成材料是否合适时，应当考虑弹性系数与密度的比值大小，应选用比强度大的材料。因此，原来的碳素铁系材料已经不能满足超精密加工机床的要求。陶瓷材料，弹性系数大，密度小，被认为是机床结构中最适合的结构材料。

2.2 超精密机床的分类

超精密机床的类别可以从不同角度来划分。

1. 按通用化程度

(1) 通用型超精密加工机床 这类超精密机床通用性很强，功能齐全，精度高，可以加工

各种不同的零件,如非球面透镜,各种形状的铝、铜零件,激光辐射镜,印刷照相凹板,磁盘基片,配油盘等,但价格也昂贵,每台约50~70万美元。

(2) 专用型超精密加工机床 这类超精密机床结构简单,专用于加工某类零件,如磁盘车床、多面体超精密铣床等。因此价格也相对便宜一些,每台约10~15万美元。

2. 按加工工艺方法

(1) 切削类机床

1) 超精密车床 用于加工高表面质量、高形状精度的有色金属或非金属零件的外圆、平面、球面和非球表面等。如用于加工激光或红外的平面、球面或二次曲面等反射镜,以及用于磁盘、配油盘、转子孔、VTR 辊轴、有色金属阀芯等的加工。目前,超精密车削能达到 $R_a 0.005\mu\text{m}$ 的表面粗糙度, $0.1\mu\text{m}$ 非球面形状精度($\phi 80\text{mm}$)。

2) 超精密铣床 用于加工平面度与表面粗糙度要求很高的平面、多面体反射镜等。

3) 超精密镗床 用于孔和孔系的超精密加工,如活塞、销孔等。

切削类机床主要应用天然单晶金刚石刀具对铜、铝、锆等软金属进行加工,表面粗糙度可达 $R_a 0.04 \sim 0.05\mu\text{m}$ 。

车床是应用最早的切削类机床,目前发展也较快,不仅向高精度发展,也向高刚度、大型化发展,加工的材料也向光学玻璃等硬脆性材料发展,国内目前这方面的进展缓慢。超精密铣床的发展技术已趋完善,目前市场上对大型平面($600\text{mm} \times 150\text{mm}$)的加工有一定的需求,因此,能够加工大平面工件的铣床是一个发展方向。超精密镗床是在前两种机床的基础上发展起来的一种机床,它要求具备功能可靠的微动调刀机构,加工高效性是其发展方向,它可用于汽车的活塞销孔的加工。

(2) 磨削类机床

1) 超精密砂轮磨床 用于加工外圆、孔、平面等。

2) 超精密砂带磨床 用于加工外圆、磁头等。

磨削类机床主要对黑色金属、陶瓷、半导体功能材料等一些硬脆材料进行加工,用于加工尺寸和形状精度要求很高的伺服阀、空气轴承主轴和陀螺仪超精密轴承类零件等,表面粗糙度可达 $R_a 0.005 \sim 0.008\mu\text{m}$, $0.01\mu\text{m}$ 的圆度。

超精密砂轮磨床主轴均采用液体动压轴承,工件主轴有采用液体静压轴承的,也有采用液体动压轴承的,工件主轴轴承有向气体静压轴承发展的趋势。磨床的整体发展趋势是向更高精度、能加工较为复杂的光学曲面方向发展,可用于加工透镜模具及大型光学透镜。砂轮磨床在我国有一定发展,上海机床厂的 MG1432A 外圆磨床,加工的表面粗糙度可达 $R_a 0.02 \sim 0.01\mu\text{m}$,这一指标属于超精密加工级别。

超精密砂带磨床目前在超精密加工领域应用较少。

(3) 研磨类机床 研磨类机床按其工艺方法分为以下几类:磁性研磨机、滚动研磨机、电解研磨机和超声波研磨机。另外,传统的研磨机床,即利用开槽研具结合金刚石、立方氮化硼等研磨剂进行加工,也占有一定比例。

超精密研磨用于加工高表面质量与高平面度的集成电路芯片和光学平面以及蓝宝石窗口等,能达到 0.5nm 的表面粗糙度和 $0.008\mu\text{m}$ 的平面度($\phi 100\text{mm}$)。

此类机床的特点是:机床中各个功能部件的精度并不要求达到超精级,其加工的关键在于加工原理及方法。通过应用一定的原理方法,完成人的技艺无法完成的工作。

此类机床可以满足加工多样化的要求,使超精密加工应用领域得以扩大。

(4) 抛光类机床

抛光类机床按其工艺方法分为以下几类:

- 1) 弹性发射抛光机床 可用于加工硅片等表面。
- 2) 机械化学抛光机床 可用于抛光砷化镓(GaAs)、磷化镓(GaP)、铯化锂(Li₂NO₃)等,也可用于大量生产的金属、陶瓷等的抛光。
- 3) 液体动力浮动抛光机床 可用于硅片等表面的加工。
- 4) 磁流体(磁悬浮)抛光机床 可用于加工黑色金属、有色金属和非金属材料,加工过程控制极为方便。
- 5) 研抛机床 它同时具有研磨和抛光的特点,可用于加工黑色金属、有色金属和非金属材料;用于加工现有的精密线纹尺时,表面粗糙度可达 $R_a 0.008\mu\text{m}$,加工效率也较高。

抛光类机床的特点与研磨机床相同。

(5) 精密特种加工设备

- 1) 电子束加工设备:用于加工集成电路的半导体基片,主要运用电子的热效应进行加工。
- 2) 离子束加工设备:用于透镜表面的微量修复、金刚石刀具的原子加工、蚀刻大规模集成电路图形和光学衍射光栅、进行干式镀膜加工、以及改变半导体、高速钢和硬质合金刀具组织结构等。

这些设备的核心部件是电子枪及离子束发生器,通过其特有的加工方法进行超精密加工。这类设备如配以超精密运动部件及控制系统,其应用前景将会很大。

特种设备还包括激光束加工设备、X射线刻蚀设备等。

2.3 超精密机床的基本问题

2.3.1 超精密机床的抗振隔振

在超精密加工中,振动是一种十分有害的现象,它将严重影响被加工零件的表面质量和使用性能。在超精密加工中产生振动的振源有来自机床内部的振动(如驱动系统的振动)和来自机床外部的振动。目前减小振动影响的途径主要有三个方面:提高机床的稳定性;消除或减少机床内的振动;减小外界振动的影响。

1. 提高机床的稳定性

超精密机床要求高稳定的机床结构,即各部件尺寸稳定性好,刚度高、变形小、结构的抗振减振性能好。

(1) 各部件的尺寸稳定性好

1) 采用尺寸稳定性好的材料制造机床部件,如用陶瓷、花岗岩、尺寸稳定性好的钢材、合金铸铁等。

2) 各部件经过消除应力、时效、冰冷处理、铸件缓慢冷却等方法使部件有高度的尺寸稳定性。

(2) 结构刚度高,变形小

1) 当机床运动部件位置改变,工件装卸或负载变化,受力作用变化等,均将造成变形。要求结构刚度高、变形量极小,基本不影响加工精度。

2) 各接触面和连接面的接触良好,接触刚度高,变形极小。

2. 消除或减少机床内的振动

超精密机床使用金刚石刀具作超精密切削时,要求机床工作时及其平稳,不允许有振动,

因此必须提高机床结构的抗振性，以减少机床内部所有的振动。措施有：

1) 各运动部件都经过精密动平衡，消除或减少机床内部的振源。机床内部的主要振源是高速转动的部件，如电动机、主轴等，这些转动的部件必须经过精密动平衡，使振动减小到最低；有可能产生振动的还有电动机轴和主轴的不同轴，空气轴承的振荡，滚珠丝杠和螺母的不同轴，导轨运动部件直线运动的变化，加工工件有偏心重量等。当发现机床有振动时，必须找出振源，尽量消除或减少振动。

2) 采用很大的地基或重量很大的床身，以降低超精密机床的自振频率。如美国 LLL 实验室的 DTM-3 大型超精密机床使用 $6.4\text{m} \times 4.6\text{m} \times 1.5\text{m}$ 的巨大花岗岩做床身(重约 80t, 价值 5 万美元)。如有振动产生，应找到机床结构中易于产生振动的薄弱环节，予以加强，使振动减小。

3) 在机床结构的易振部分人为增加阻尼，减小振动。

4) 选用对振动衰减能力强的材料(如花岗岩、人造花岗岩等)制造机床的结构件。铸铁对振动的衰减率高于钢材，花岗岩对振动的衰减率是钢材的 5 倍，人造花岗岩对振动的衰减率又高于天然花岗岩。

由于花岗岩有很好的振动衰减率，现在很多的超精密机床和三坐标测量机的床身、立柱和溜板已采用花岗岩制造，获得很好的使用效果。瑞士 Studer 公司用人造花岗岩 Granitan 制造高精度 S 系列磨床的床身，效果甚佳，已成为专利，在其它工厂中推广使用。英国 Granfield 公司的 OAGM2500 大型精密机床，床身采用焊接钢结构，中间用人造花岗岩填充，有很好的振动衰减能力。

日本夏本铸工所最近推出几种新牌号热膨胀系数很低的 Nobinite 铸铁，其中有些牌号具有很好的振动衰减能力，图 5-1 所示是其中的 CF-5 铸铁的振动衰减波形图，可以看到 CF-5 铸铁要比普通铸铁 FC20 的振动衰减能力强得多。

3. 减小外界振动的影响

这也是超精密机床中的极重要的问题，现在采用的办法有：

(1) 超精密机床应尽量远离振源 机床附近的振源，如空压机、泵等应尽量移走。实在无法移走时，应采用单独地基、加隔振材料等措施，使这些无法移走的振源所产生的振动对超精加工的影响尽量减小。

美国 LLNL 实验室的 LODTM 大型超精密车床使用大量的恒温水通到机床的各个部分，以保持机床的恒温。为避免恒温水的水泵的振动影响超精密机床，采取如下措施：水泵将恒温水打到水箱中，恒温水靠自重从水箱流到超精密机床的各个部分，这样水泵的振动将不影响超精密机床。

(2) 超精密机床采用单独地基、隔振沟、隔振墙等 为减小外界振动的干扰，地基应有足够的深度，地基周围用隔振沟，沟中使用吸振材料。

美国 LLNL 实验室的 LODDTM 大型超精密车床，除机床用带隔振沟的地基外，机床装在有厚隔墙的单间房内。隔墙是双层的，中间有吸音材料，可以减少声波振动。

(3) 使用空气隔振垫(亦称空气弹簧) 现在超精密机床和精密测量平台底下都用能自动找水平的空气隔振垫，一般可以隔离 2Hz 以上的外界振动。中小型机床都用 3 个空气隔振垫支承，大型机床用 4 个空气隔振垫支承(其中有 2 个是内部联通的)。机床用空气隔振垫支承后，现已达到能隔离 1.5 ~ 2Hz 以上频率振动的传入。

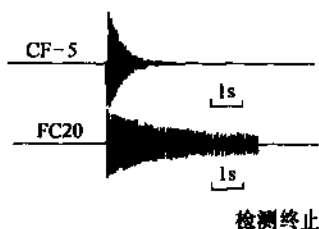


图 5-1 CF-5 铸铁的
振动衰减能力

机床使用空气隔振垫后需要有自动找水平的控制系统，在机床运动部件移动重心改变时，仍能保持水平。其方法是：在机床床身上安放位置相互垂直的两个电子水平仪。当机床上的运动部件移动时，由于重心改变而导致不水平，这时电子水平仪发出信号，由控制系统分别调整空气隔振垫的空气压力，使机床恢复水平位置。由于电子水平仪有不同的精度等级，可以根据需要选择，使机床的水平度达到要求。

中小型超精密机床(如 Moore 机床)的空气隔振垫一般都是放在机床床身下面，大型超精密机床(如 LODTM 机床)的空气隔振垫是架在机床上较高的位置，空气隔离垫本身是放在很高的基础上的。这两种不同的空气隔振垫支承方案对机床的抗振性有较大的影响。图 5-2 是两种空气隔振垫支承机床的不同方案的对比原理图。从图中可以明显看到，当空气隔振垫支承在机床较高位置时(见图 5-2b)比在机床床底支承(见图 5-2a)，可以明显降低机床的重心，使机床更稳定不易产生振动。此外，在机床有振动时，如支承点在机床底面，刀具切削工件位置将有较大振幅；而在高位支承，刀具切削工件位置是处在中心点，振幅要小得多。刀具切削工件位置是振动的敏感区，因此可以说高位支承将使机床的抗振性提高，增加机床的稳定性。

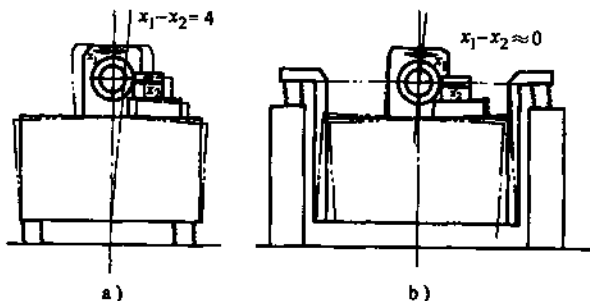


图 5-2 空气隔振垫支承位置不同对抗振性的影响

a) 床底支承 b) 上部支承

图 5-3 所示是一套使用三个空气隔振垫的隔振系统的工作原理图。空气隔振垫用橡胶制成，其高度随空气压力变化而改变，有较大的弹性，可以隔离外界振动传入。压缩空气经减压阀、充排气阀进入空气隔振垫。3 个空气隔振垫的空气压力大小，由控制系统分别调整，使得基座达到水平。橡胶的空气隔振垫内有主气室和辅助气室，由可调阻尼孔相连。当它受力压缩时，主气室内空气经阻尼孔进入辅助气室，由于阻尼的作用，使压缩变缓并避免了振荡。

制造超精密机床所用的空气隔振垫有很大的技术难度。因为它要求能隔离很低频率的振动(2Hz)，故空气隔振垫必须做得很软，自振频率必须很低。同时它要求不产生振荡摇摆，机床有重心改变时产生的倾斜，要迅速恢复水平，不振荡，这要求空气隔振垫内有很大的阻尼。

2.3.2 机床的热变形

在超精密加工过程中，机床会受到各种热的影响而产

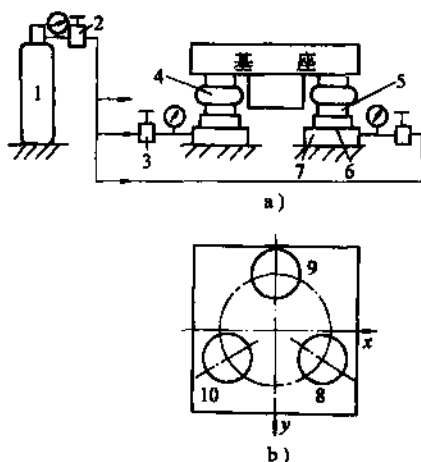


图 5-3 空气隔振垫隔振系统原理图

- 1—气源 2—减压阀 3—充排气阀
4—胶囊 5—主气室 6—可调阻尼孔
7—辅助气室 8—隔振垫 1
9—隔振垫 2 10—隔振垫 3

生热变形,这种热变形会使原有的精度遭到破坏,造成工件的加工误差。热变形已成为超精密加工中误差的最主要来源之一,因此尽量设法减少超精密机床的热变形。

1. 温度变化对超精密机床和超精密加工误差的影响

超精密加工过程中产生热变形的热源有:

1) 机床中的运动部件生产的摩擦热和动力源(如电机、激光管等)能量消耗时转化的热量。

2) 据文献统计,精密和超精密加工中机床热变形引起的加工误差通常会占加工总误差的40%~70%。因此,环境温度也是产生热变形的热源。

在一般机械加工中,磨床润滑油和磨削液的温度日变化 10°C 是常见的现象,如磨削 $\phi 100\text{mm}$ 的零件,温升 10°C ,直径将产生 $11\mu\text{m}$ 的误差。这对超精密加工是不可思议的。精密加工 600mm 长的铝合金件,温度变化 1°C ,将产生 $1.35\mu\text{m}$ 的误差。若保证 $0.1\mu\text{m}$ 级加工精度,环境温度的变化至少应控制在 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ 范围内。

由于热变形对超精密加工精度的影响很大,各国都在进行积极的研究。美国的POMA计划规定:控制机床主轴热伸长为 $0.05\mu\text{m}$,机床热误差控制指标为 $0.05\mu\text{m}$ 。日本1983年成立了“纳米技术调查委员会”,并在1985年7月发表了“超精密加工技术未来”研究项目报告书,其中一项为“超精密温度控制系统”。

2. 减少机床热变形的措施

(1) 尽量减少机床内的热源 如主轴采用空气轴承代替液体静压轴承以减少发热量;使用发热量小的电动机;将发热器件放在机床床身外,如进给电动机和激光管放在机床床身外侧等。

(2) 采用热膨胀系数小的材料制造机床部件 现在不少坐标测量机和超精密车床使用花岗岩、钢材、陶瓷、低热膨胀系数的铸铁等做机床的床身、导轨和其他大件。例如美国LLNL实验室的LODTM大型超精密车床中有不少关键零件,如激光测量系统的基准测量架,用钢材制造。

(3) 采用合理的机床结构设计 结构合理化使在同样温度变化的条件下,机床的热变形最小。

(4) 使机床长期处在热平衡状态,使热变形量成为恒定 例如某精密机床在主轴边上加一可调热源,当机床主轴在最高转速发热量最大时,附加热源不工作。当主轴为某中间转速时,附加热源供热,使总热量达到机床最高转速时的热量;当主轴不转时,附加热源产生热量最大,仍保持总热量恒定。夜间机床不工作时,附加热源继续供热,使机床主轴一直处在热平衡状态,保持机床的高精度。

(5) 使用大量恒温油(水)浇淋机床内的各发热部件,形成机床附近局部小环境的精密恒温 精密和超精密机床要保持恒温可用大量的恒温油(或恒温水)浇淋切削区、关键部件或整个机床。例如有的精密丝杠车床和丝杠磨床的母丝杠做成带内孔的,工作时用恒温油通过丝杠内孔,使母丝杠保持恒温,从而提高了加工丝杠的螺距精度。

美国LLNL国家实验室,在2号金刚石超精密车床上成功地采用了喷淋式冷却法。用缝纫机油为喷淋液体,采用厚 3mm ,面积为 5800cm^2 的过滤垫,用泵将压力为 0.28MPa ,流量为 $150\text{L}/\text{min}$ 的压力油打入导管,由热交换器降低工作温度,用电磁开关控制,其温控精度为 $(20 \pm 0.006)^{\circ}\text{C}$ 。对机床热变形进行的基础性研究,在其实验条件下证明,刀具相对主轴位移量与油温呈比例变化,油温变化 0.056°C 时,热变形为 $0.19\mu\text{m}$;在温度变化 0.006°C 时,热变形误差为 $0.019\mu\text{m}$;油温呈台阶式变化,变化量达 0.56°C 时,12min后,热变形误差最大值为

1.9 μm ，随后达到热稳定状态。从这结果可看到要提高机床的加工精度，必须严格控制温度变化。

在使用三坐标测量机测量时，操作人员对环境温度有影响，工件和环境温度的波动变化将直接影响测量精度，造成测量误差。采用恒温油对测量机浇淋，可明显减小温度的波动，提高测量精度。美国 LLNL 实验室曾对三坐标测量机进行浇淋油湿的对比试验。图 5-4 所示为采用恒温油对坐标测量机进行浇淋时，恒温油的控制系统，此系统可控制油温在 $(20 \pm 0.0055)^\circ\text{C}$ 。使用恒温油浇淋前，测量机附近的空气温度波动情况以及被测体(200mm 铝棒)尺寸的变化波动情况如图 5-5a 所示。使用恒温油浇淋后，空气温度波动和被测件尺寸变化见图 5-5b。可以看到使用恒温油浇淋后，测量机附近的局部小环境中，空气温度的变化要小得多，在平均温度(20°C)的上下波动，由于温度稳定，被测的 200mm 铝件的尺寸变化很小，尺寸基本稳定，由热变形引起的尺寸测量误差很小。超精密机床希望尽可能地减少热变形，因此要求极严格的恒温控制。很多现代的超精密机床都采用大量恒温油浇淋整个机床的措施。

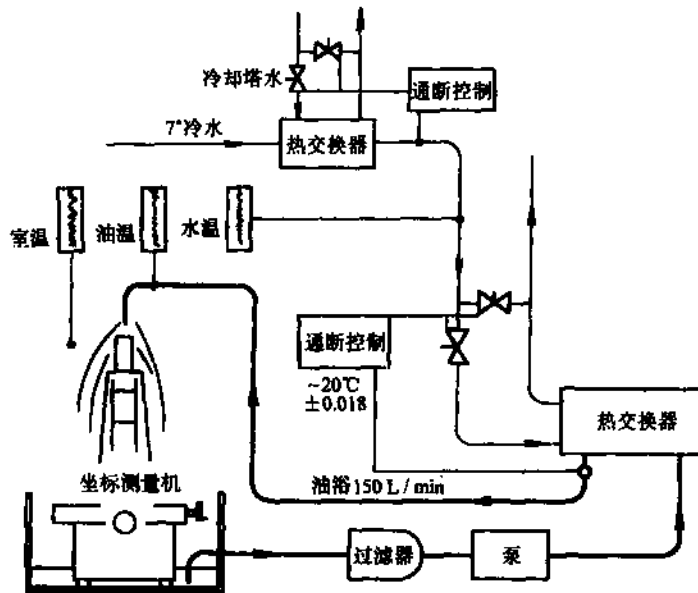


图 5-4 浇淋油的温控系统

除上述措施外，现在许多超精密机床都装有高精度温度控制系统和热误差自动补偿装置。日本 FCG32/10-NC-MACO 无人化适应控制 NC 高速磨床就配有油温控制和自动补偿系统。精密加工铝合金零件 100mm 长时，每温度变化 1°C ，将产生 $2.25\mu\text{m}$ 的误差。若要求确保 $0.1\mu\text{m}$ 的加工精度，环境温度就需要控制在 $\pm 0.05^\circ\text{C}$ 范围内。

1977 年美国空军兵器研究所 (AFWL) 和 Y-12 工厂合作研制精度为 $0.1\mu\text{m}$ 级加工直径 $\phi 800\text{mm}$ 的非球曲面加工机床，要求控制机床主轴热伸长为 $0.05\mu\text{m}$ ，机床热变形误差控制指标为 $0.05\mu\text{m}$ 。

下面介绍美国 LLNL 实验室对 LODTM 大型超精密车床恒温控制的情况。

该实验室将 LODTM 大型超精密车床放置于恒温室内，恒温室一般是用铝制框架和绝热塑料护墙板做成的。操作者和机床间有透明塑料窗帘隔开，这样可以防止周围空气侵入，使机床附近局部空间恒温更为稳定。

将放置机床的恒温室内通循环的恒温空气，气流量为 $9\text{m}^3/\text{min}$ 。通风用离心式风机的

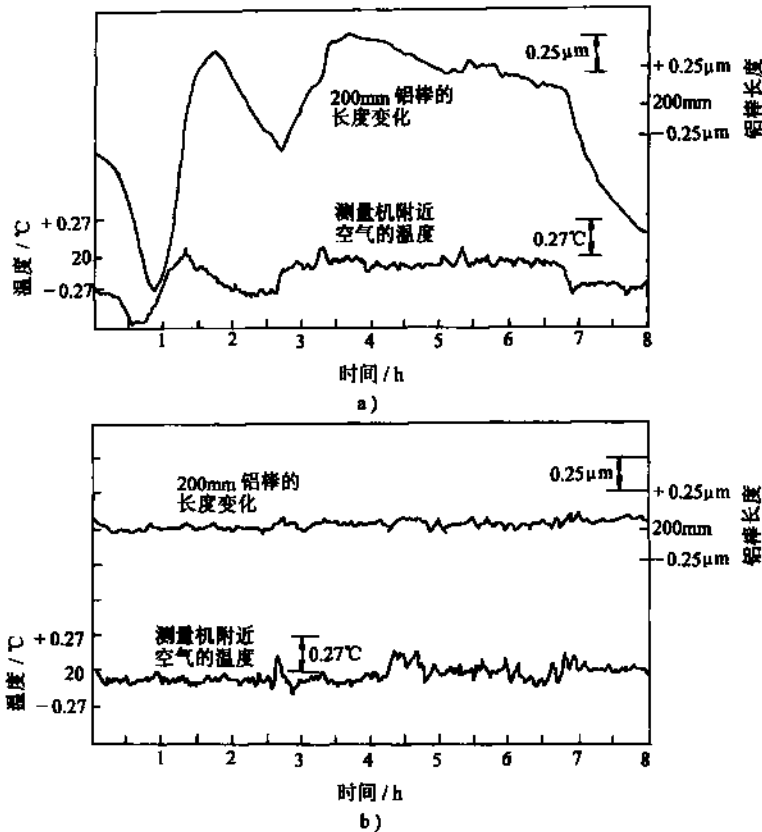


图 5-5 使用恒温油浇淋后, 测量机附近空气温度波动和被测件(200mm 铝棒)尺寸变化非常明显的变小
a) 未用油浇淋 b) 用油浇淋

19kW 电动机是该封闭系统内最大的热源。使用两级水冷式热交换器, 用测热传感器测量进入的空氣的温度, 反馈控制热交换器的水流量, 空气温度可控制在 $20^{\circ}\text{C} \pm 0.005^{\circ}\text{C}$ 的变化范围内。图 5-6 所示是 LODTM 机床周围的典型空气温度测量记录, 可说明该机床环境温度的稳定程度。

LODTM 机床的重要部件的温度是直接恒温水流来控制的。主轴的径向和推力轴承都是带夹层的, 可以通过恒温水流; 横梁上的检测基架也是中空的, 可以通过恒温水流。进入机床的恒温水, 流量为 6.3L/s。通过热交换器, 改变冰冷水的流量, 可以使恒温水的温度变化控制在 $(20 \pm 0.005)^{\circ}\text{C}$ 内。图 5-7 是所用恒温水的典型水温测量记录, 可见到水温波动变化极小。恒温水是从水塔靠重力流入机床的, 而不是用泵压入, 这样可以避免泵的振动通过恒温水流而传到机床来。

2.3.3 超精密加工环境

精密和超精密加工的工作环境是达到其加工质量的必要条件。对于超精密加工, 环境条件

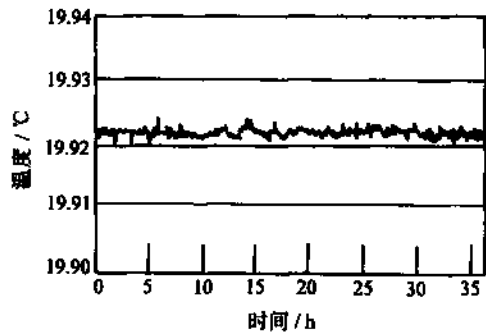


图 5-6 LODTM 机床周围的典型空气温度测量记录

和加工设备处于同等重要的地位。加工环境条件的极微小变化都可能影响加工精度和表面质量,使超精密加工达不到预期目标,因此,超精密加工必须在稳定的加工环境下进行。稳定的加工环境条件主要是指温度、湿度、净化和防振四个方面的条件。但并不是任何加工都要求同样的条件。在金属零件加工中,尺寸为100mm的零件,温差 1°C 所造成的尺寸误差为 $1\sim 1.6\mu\text{m}$ 。所以,要保证 $0.01\mu\text{m}$ 的精度,必须达到 0.01°C 的温度精度。但是对零件的平面度影响就不会如此严重,对零件的圆度影响就更小。

超精密加工机床,其加工必须在环境温度恒温的工作室内进行。加工过程中因温度变化,会造成机床的运动精度下降,不能获得所确定的加工精度。环境温度变化可根据加工要求控制在 $\pm 1^{\circ}\text{C}\sim \pm 0.02^{\circ}\text{C}$,甚至达到 $\pm 0.0005^{\circ}\text{C}$ 。达到恒温的办法还可采用多层套间逐步得到大恒温间、小恒温间,温度控制的精度再高,还可采用局部恒温的方法,如恒温罩,罩内还可用恒温液喷淋,达到更精确的控制温度。如美国 LLNL 实验室的某台超精密车床安装在恒温车间内,机床外部罩有透明塑料罩,罩内设有油管,对整台机床喷射恒温油流,加工区的温度可以保持在 $(20\pm 0.06)^{\circ}\text{C}$ 的范围内。

湿度主要是对机器的锈蚀、石材膨胀、以及一些仪器如激光干涉仪的零点漂移等有影响。在恒温室内,一般应按恒温间的技术要求确定湿度的大小,无特殊要求时,湿度应保持在 $55\%\sim 60\%$ 。

加工环境的高度洁净,是超精密加工区别于一般精加工的特征之一,是超精密加工中非常重要而又容易被忽视的环境因素。净化主要是为了避免空气中的尘埃影响,尘埃可能会在加工时划伤被加工表面。比如,在超精密研磨中,研磨剂的颗粒可小至 10nm ,而灰尘的微粒比研磨剂颗粒大数十倍至数百倍,灰尘的混入划伤了加工表面,无法研磨出低粗糙度的表面。洁净度是以 1ft^3 中有多少个 $0.5\mu\text{m}$ 以上的灰尘数量来表示。根据加工性质和加工零件要求的不同,超精密加工时的洁净度通常要求10000级至100级,100级是指每 1ft^3 空气中所含大于 $0.5\mu\text{m}$ 的尘埃不超过100个,以此类推。由于大面积的超净间造价很高,且达到高洁净度的难度很大,因此出现了超净工作台、超净工作腔等局部超净环境,采用通入正压洁净空气以防止腔外不洁净的空气进入,保证洁净度。为了防止工作人员的衣服、肤发的影响,要穿戴专门的工作服,并要通过风淋室进行洁净。例如加工256K集成片时,环境的净化要求为 1m^3 空气中大于 $0.1\mu\text{m}$ 的尘埃数小于10个,加工4M集成片时,净化要求为 1m^3 空气中大于 $0.01\mu\text{m}$ 的尘埃数小于10个。

在防振隔振方面,特别要注意低频振动(低于 2Hz)。除了在机床设计和制造上采取各种措施之外,必须采用隔振系统来保证机床不受或少受外界振动的影响。精密和超精密加工设备要安放在带防振沟和隔振器的防振地基上,并可使用空气弹簧(垫)来隔离低频振动。如美国 LLNL 实验室的 DTM-3 型机床使用空气弹簧隔振,隔振后轴承部件的相对振动振幅为 2nm ,并可防治 $1.5\sim 2\text{Hz}$ 的外界振动传入。

3 超精密机床的基础元部件和结构

超精密机床的质量,取决于它的关键部件的质量。世界各国都非常重视,投入大量人力物

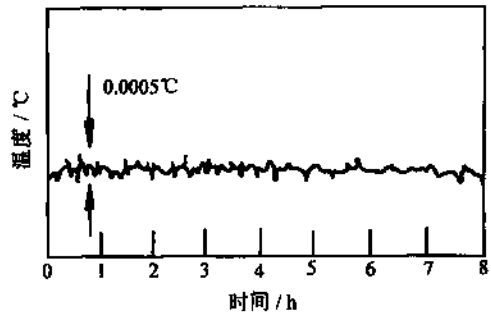


图 5-7 LODTM 机床用水的典型水温测量记录

力,对超精密机床的关键部件和关键技术进行开发和研究。

3.1 超精密机床的总体布局

超精密机床的总体布局直接影响机床的性能和精度。根据运动要求,超精密机床的总体布局有以下几种:

(1) 十字形滑座结构 既主轴箱位置固定,刀架装在十字形溜板上。一般的机床和精密、超精密机床,Z和X方向的导轨都集中在工作台(或溜板)上,形成十字形滑座。图5-8所示为 Moore 坐标镗床和三坐标测量机所用的十字形滑座构成的Z、X双向工作台。这种结构布局在 Moore 公司现在生产的 M-18AG 超精密非球曲面车床还采用。

这种结构布局中,十字形滑座的上下导轨,不仅要有很高的直线运动精度,而且要有非常严格的相互垂直度。这要求有很高的制造精度,否则下溜板的运动误差将影响上溜板的运动精度。

近年生产的超精密机床,都采用双频激光干涉仪作Z、X方向运动的随机位置检测。这对采用十字形滑座结构很不方便。因为,必须有一套双频激光干涉仪装在移动的十字形滑座上,这将降低测量精度;而且双频激光干涉测量系统有一定体积,使整个工作台系统高度大大增加。

这种结构布局,主轴箱位置固定不动,因此主轴用带传动很方便,电动机可以有单独地基,有利于减少电动机振动对主轴的影响。

(2) T形布局 近年生产的超精密机床主轴,常采用电动机通过柔性联轴器和主轴相连,或采用内装式同轴电动机驱动,没有带轮和单独的电动机座,主轴箱成为可移动的整体部件。这种超精密机床常采用Z、X运动分离的结构,即主轴箱带动工件作纵向运动(Z向),横向运动(X向)由刀架滑板完成。Z向和X向运动的导轨都放在机床的床身上(常用花岗岩制造),形成T形布局,使两条导轨基本在同一高度上。T形总体布局结构,有利于提高导轨的制造精度和运动精度,并且检测Z、X向运动位置的双频激光测量系统可以装在固定不动的床身上,仅将测量位置用的反射镜装在Z、X方向的移动部件上。这样不仅使测量系统的安装要简单很多,而且可大大提高测量精度。Pneumo 公司的 MSG-325 超精密车床即采用这种导轨布局。现在中小型超精密机床常采用这种总体布局。

还有一种T形总体布局,是立式T形布局,即机床主轴作X向运动,刀架滑板作Z向运动。X向运动和Z向运动的导轨都做在机床的床身上,如图5-9所示。这种总体布局的优缺点和前一种T形总体布局差不多,但是实际生产中应用不如第一种T形总体布局多。大型超精密车床多制成这种立式T形结构。

(3) R-θ布局 刀架滑板装在回转工作台上,改变

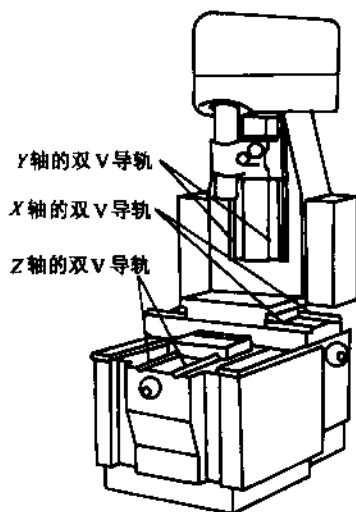


图 5-8 十字形滑座构成的
X、Z 双向工作台
(Moore 3 型坐标镗床)

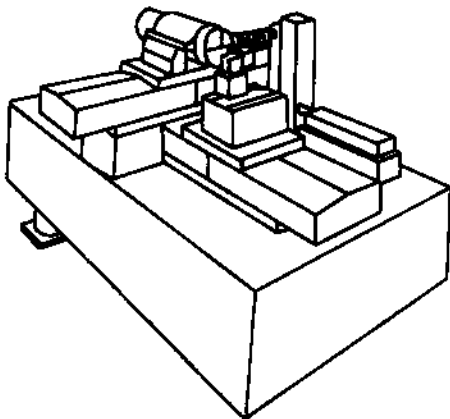


图 5-9 立式 T 形结构布局

刀座导轨的转角 θ 和半径 R ,可以加工非球曲面。在工件的厚度改变时,主轴箱(或回转工作台)需要在 Z 向调整。 R - θ 布局的机床结构比较复杂,加工、调整、计算与习惯用的不一致,因此用得不多。

(4) 立式结构布局 当加工的工件直径较大并且重量较重时,大型超精密机床多采用立式结构布局。超精密机床要求高的刚度,故多用龙门形式,滑板在横梁上作 X 向运动,刀架在滑板上作 Z 向上下运动。这种十字滑板结构 X 向的运动精度将直接影响 Z 向运动的精度。在机床精度要求特别高时,如美国的LODTM大型超精密立式机床,可采取特殊的在线测量和误差补偿措施,来补偿或消除运动误差。

3.2 精密主轴部件

1. 对主轴的基本要求

精密主轴部件是超精密机床最重要的部件之一,它是超精密机床的圆度基准,也是保证机床加工精度的核心。因此对超精密加工机床的主轴有很高的要求,要求条件如下:

- 1) 振摆回转精度要好。
- 2) 动特性良好。
- 3) 精度寿命长。
- 4) 不产生振动。
- 5) 刚度和载荷量具有与使用条件十分相称的值。
- 6) 发热量小。
- 7) 维护要容易。

2. 主轴和主轴轴承

要达到极高的回转精度,转动平稳,无振动,其关键在于所用的精密轴承。早期的精密主轴采用超精密级的滚动轴承,例如瑞士Shaublin的精密车床、美国的Hardinge等精密机床,主轴用滚动轴承,机床加工精度可达 $1\mu\text{m}$,表面粗糙度 $R_a 0.04 \sim 0.02\mu\text{m}$ 。滚动轴承的主轴要达到如此高精度是极为困难的,因此,自从采用液体静压轴承和空气静压轴承后,滚动轴承已很少在超精密机床主轴中使用。目前,超精密机床的主轴广泛采用空气静压轴承和液体静压轴承。

(1) 液体静压轴承主轴 液体静压轴承回转精度很高($\leq 0.1\mu\text{m}$),且刚度高、阻尼大,因此转动平稳,无振动,但高速下摩擦发热大,驱动功率要求高,并且90%以上功率变成热量,故必须冷却调温,一般用于大型超精密机床。例如美国LLNL实验室的DIM-3型大型超精密机床,其主轴的径向轴承用液体静压轴承(推力轴承用气体静压轴承)。

图5-10所示为典型的液体静压轴承主轴结构原理图。液体静压轴承常用的油压为 $0.6 \sim 1\text{MPa}$ 。压力油通过节流孔进入轴承偶合面间的油腔,使轴在轴套内悬浮,不产生固体摩擦。当轴受力偏斜时,偶合面间泄油的间隙改变,造成相对油腔中油压不等,油的压力差将推动轴回到

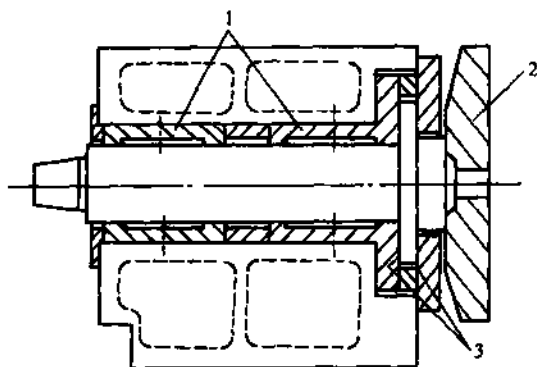


图 5-10 典型液体静压轴承主轴结构原理图
1—径向轴承 2—真空吸盘 3—推力轴承

原来的中心位置。使用液体静压推力轴承时，一般两个相对的止推面做在轴的同端，如图 5-10 所示。这是因为液体静压轴承转动时常产生较大的温升，如两个相对的止推面分别做在轴的两端，温度升高将使轴的长度增加，造成止推轴承间隙的明显变化，使轴承的刚度和承载能力显著下降。

图 5-11 所示为日本丰田工机 (TOYOTA Machine Works) 超精密机床的液体静压轴承主轴结构示意图 (图中止推轴承未画完整)。当主轴转速为 1500r/min 时，回转精度为：径向 $0.03\mu\text{m}$ ，轴向 $0.05\mu\text{m}$ 。主轴采用冷却补偿装置，在转动 10 min 后可以达到热平衡，由热变形造成的误差甚小。使用上述液体静压轴承主轴后，用金刚石刀车削 $\phi 155\text{mm}$ 、长 400mm 的铝合金圆筒，加工的工件圆度为 $0.3\mu\text{m}$ ，直线度为 $0.5/400000$ ，加工表面粗糙度为 $R_a 0.02\mu\text{m}$ 。

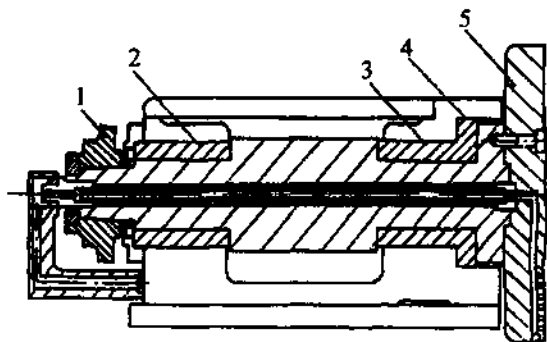


图 5-11 日本丰田工机的液体静压轴承主轴结构
1—带轮 2—径向轴承 3—径向轴承 4—推力轴承
5—真空吸盘

液体静压轴承有下列缺点不易解决：

1) 在工作时，液体静压轴承的油温会升高，且在不同转速时温度升高值不等，因此要控制恒温较难。温度升高将造成热变形，影响主轴精度。

2) 静压油回油时将空气带入油源，形成微小气泡悬浮在油中，不易排出。因此将降低液体静压轴承的刚度和动特性。

DTM-3 型的大型超精密机床主轴的径向轴承采用液体静压轴承，为解决上述两个难题，采用了如下措施：

1) 提高静压油的压力到 $6 \sim 8\text{MPa}$ ，使油中微小气泡的影响减小，提高了静压轴承的刚度和动特性。

2) 轴承用恒温水冷却，减小轴承的温升。

采用上述措施后，该液体静压轴承主轴得到令人满意的性能。

(2) 空气静压轴承主轴 空气静压轴承有很多优点：有很高的回转精度，可达到 $0.05 \sim 0.025\mu\text{m}$ ，而且平稳；在高速转动时摩擦发热小，温升也很小，因此造成的热变形误差很小；驱动功率小；不易污染等。它的主要问题是刚度低，只能承受较小的载荷。由于超精密加工时切削力很小，空气轴承能满足要求。空气轴承在中小型超精密机床中得到广泛的应用，并促进了超精密机床的发展。

空气静压轴承的工作原理和液体静压轴承类似，轴由压力空气浮在轴套内，轴的中心位置由相对面的静压空气压力差维持。由于空气的流动性很好，因此，轴承两偶合面间 (轴与套之间) 的空气泄气间隙很小 (常用单边 $6 \sim 15\mu\text{m}$)。轴套中的空气腔面积很小，或在空气输入的节流孔端作一倒棱，或沿轴向作一窄槽，两端均留较长的无槽泄气面。由于空气静压轴承的轴与套之间的间隙很小，回转精度要求又高，故轴与轴套均要求极高的制造精度。如同一轴上有两个径向轴承，两轴承要求极高的同轴度；同一轴上的径向轴承和推力轴承之间垂直度亦要求很高，否则空气轴承主轴就不能得到高的回转精度。空气轴承主轴结构较多，下面介绍几种典型的结构。

1) 圆柱径向轴承和平端面推力空气静压轴承 这种结构与图 5-10 所示的液体静压轴承主

轴结构基本相同，只是节流孔和气腔大小形状不同。这种结构的空气轴承可以有较高的轴向刚度，主轴结构比较简单，但要求前后径向轴承有很高的同轴度，径向轴承和推力轴承有很高的垂直度，因此要求很高的制造工艺水平。日立精机的超精密车床使用这种结构的空气轴承主轴，获得较好效果。

图 5-12 是另一种结构的平端面推力和圆柱径向空气轴承的主轴结构。其中的径向轴承的轴套制成可调的，位置调好后再固定，这样可提高前后轴套的同轴度，以提高主轴的回转精度。这种结构的空气轴承，采用多孔石墨的轴衬来代替输入空气的小孔节流，使用效果良好，使用多孔石墨作空气节流的衬套还有很大好处，即在没有空气状态下轴有少量旋转，不会和轴套咬住使主轴损坏。现在国外很多空气轴承都使用多孔石墨来作空气节流，但要求所用的多孔石墨组织均匀，各处透气率相同，因此，制造技术难度较大。

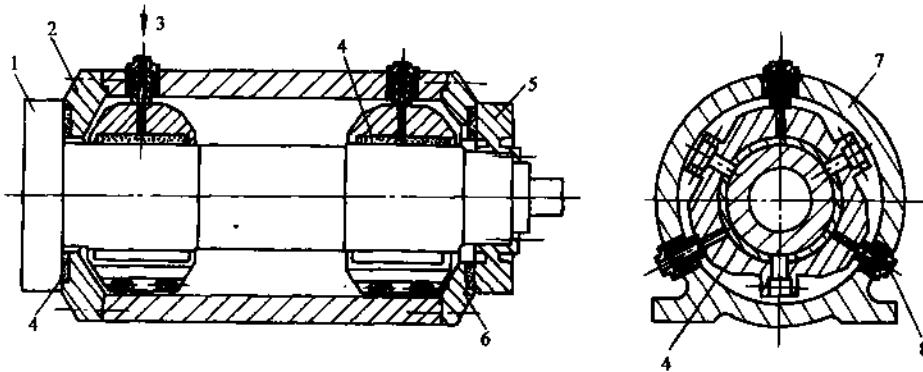


图 5-12 空气轴承主轴结构

1—轴 2—前止推板 3—进气孔 4—多孔石墨轴衬
5—挠性止推环 6—后止推板 7—外壳体 8—调整螺钉

2) 双半球空气轴承主轴 见图 5-13，前后轴承均采用半球状，又是径向轴承又是推力轴承。由于轴承的气浮面是球面，有自动调心作用，因此，可以提高前后轴承的同轴度，提高主轴的回转精度。

现在，美国有些工厂的超精密机床采用这种双半球空气轴承主轴，当主轴半径为 153 mm 时，刚度为 $115\text{N}/\mu\text{m}$ 。英国 Cranfield Precision Engineering 公司 (CUPE 公司) 生产的某些超精密车床使用这种双半球结构的空气轴承主轴。当轴承尺寸较大时，可以有较高的刚度和较大的承载能力，例如 Cranfield 公司的这种结构的 PG150S 型空气轴承主轴部件(见图 5-13)，径向和轴向承载能力为 180kg，径向和轴向刚度为 $350\text{N}/\mu\text{m}$ 。

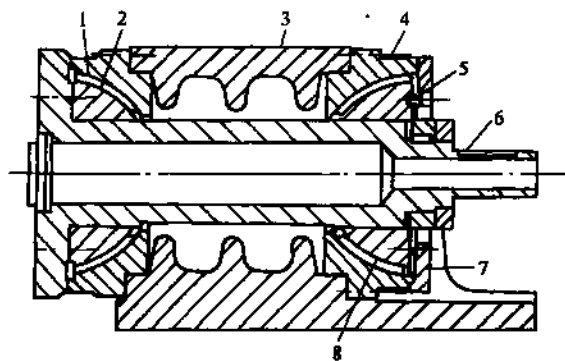


图 5-13 球面空气轴承主轴

1—石墨衬套 2—前部轴颈 3—外壳 4—轴承外套
5—柔性垫圈 6—轴 7—外盖 8—后部轴颈

3) 前端用球形空气轴承，后端用圆柱径向轴承的主轴 这种结构的主轴现在在超精密机床中经常使用。因一端为球形，同时起到径向和轴向推力轴承的作用，并有自动调心的作用，可以提高前轴承和后轴承(圆柱径向轴承)的同轴度，从而提高了主轴回转精度。图 5-14 是日

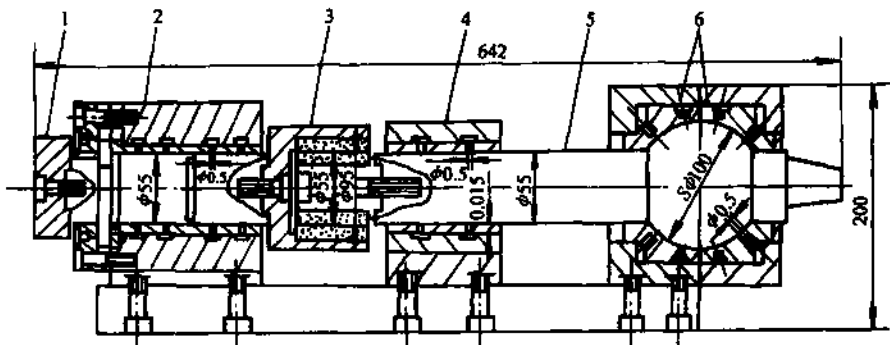


图 5-14 一端用球形轴承的空气轴承主轴结构(东芝机械)

1—带轮 2—径向及推力轴承 3—电磁联轴器 4—径向轴承 5—主轴 6—球轴承

本东芝机械的超精密车床的主轴结构, 其主要性能见表 5-2。从表中可以看到, 这种球形轴承的刚度和承载能力均不高, 优化轴承参数可以提高其刚度和承载能力。在有更高要求时, 可以加大轴承的尺寸。

表 5-2 一端用球形轴承的空气轴承主轴的性能(东芝机械)

规格	ABS-6		ABS-10		ABS-12	
球的直径/mm	60		100		120	
回转精度/mm	径向	轴向	径向	轴向	径向	轴向
	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
刚度/(N/ μm)(气压:0.6MPa)	15	29	49	59	69	80
允许载荷/N(气压:0.6MPa)	88	176	294	393	441	539
最高转速/(r/min)	10 000		6 000		5 000	

为进一步提高前后轴承的同轴度, 也有采用图 5-15 所示的一端用球形轴承的空气轴承主轴。从图中可看到, 在左端圆柱径向轴承的轴套外面又加了半球状的空气轴承, 使径向轴承的轴套能有一定程度的浮动, 提高轴承的同轴度, 从而提高主轴的回转精度。

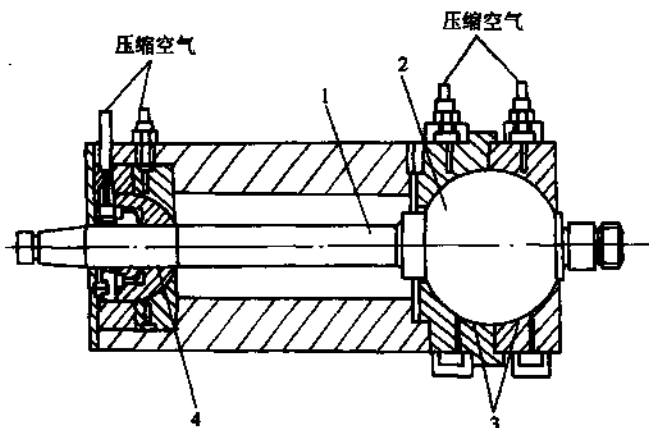


图 5-15 球—圆柱空气精密主轴

1—轴 2—球体 3—球面轴承 4—径向轴承

4) 立式空气静压轴承主轴 对于大型超精密车床, 空气轴承主轴常采用立式结构, 如图 5-16 所示。从图中可看到其径向轴承制成圆弧面, 可起到自动调心、提高精度的作用。

(3) 主轴的驱动方式 主轴的驱动方式直接影响超精密机床的主轴回转精度, 因此必须给予充分重视。现在超精密机床主轴主要有下面三种驱动方式:

1) 电动机带轮驱动 早期的超精密车床主轴都采用这种由电动机通过带轮驱动的方式。如美国 Moore 公司的 M-18AG 超精密车床, 采用厚为 0.4mm, 均匀性为 0.01mm 的无缝带驱动。带驱动有两种方式: 一种是主轴壳体固定, 电动机由地基通过传动带传至主轴(见图 5-17a); 另一种是电动机固定在主轴壳体上, 主轴壳体可以运动(见图 5-17b), 便于机床总体布置。

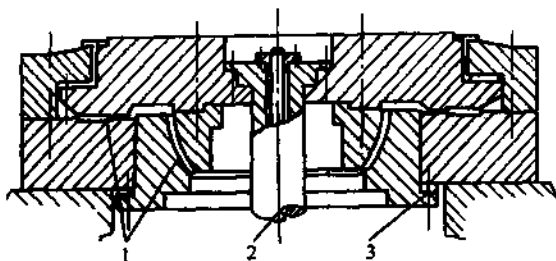


图 5-16 垂直轴空气轴承工作台结构
(Ex-Cell-O 公司的 M-B 型立轴车床)
1—多孔石墨轴衬 2—驱动轴 3—空隙

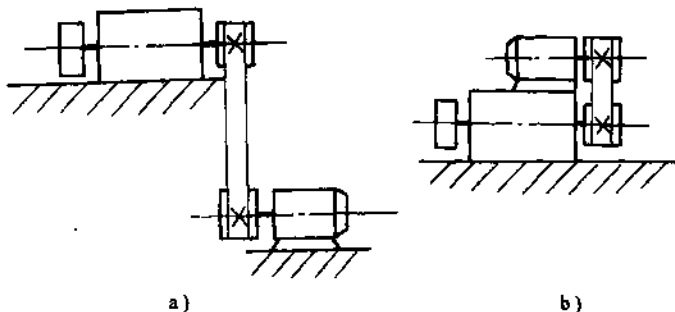


图 5-17 传动带驱动布局

带驱动的最大优点是电动机主轴与超精密主轴不要求严格的相对位置精度。电动机采用直流电动机或交流变频电动机, 可以无级调速, 不用齿轮调速以减少振动。图 5-17a 的带驱动方式中, 电动机的振动、发热对超精密机床主轴影响较小。图 5-17b 的驱动方式中, 电动机的振动、发热则对超精密机床主轴影响很大, 电动机必须用高精度的轴承, 进行严格的精密动平衡, 同时电动机座与主轴座之间必须采用隔振、隔热措施, 以减小电动机振动和发热对超精密主轴的影响。传动带是用柔软的无缝的丝质材料制成的平带。带轮有自己的轴承支承, 经过精密动平衡, 通过柔性联轴器(常用电磁联轴器)和机床主轴相连。采用上述措施主要是使主轴尽可能和振动隔离。图 5-14 所示的主轴结构即为用带轮(有自己的轴承支承)通过柔性的电磁联轴器驱动机床主轴。这种结构的主轴现在还常使用。

现在的超精密机床多数采用 T 形总体布局, 即主轴箱作 Z 向运动, 刀架滑板作 X 向运动。这时主轴箱成为运动部件, 采用电动机通过传动带带动主轴的驱动方式, 就十分不便, 电动机也不可能有单独的地基。因此, 现在大多数的超精密机床采用电动机和机床主轴直接相连的驱动方案。

2) 电动机通过柔性联轴器驱动机床主轴 用标准的直流电动机(或交流变频电动机), 通过柔性的联轴器和机床主轴相连, 此时电动机主轴和机床主轴在同一轴线上。电动机应经过精密动平衡, 安装时尽量使电动机轴和机床主轴同轴, 再用柔性联轴器消除电动机轴和机床主轴

不同轴引起的振动和回转误差。采用这种驱动方式，机床的主轴部件要比通过传动带驱动紧凑得多。这种驱动方式现在在超精密机床中用得较多。

3) 内装式同轴电动机驱动主轴 即电动机轴为机床主轴。这种电动机是特制的，电动机的转子直接装在机床主轴上，电动机的定子装在主轴箱内，电动机自己没有轴承，而是依靠机床的高精度空气轴承。电动机采用无刷直流电动机，可以很方便地进行主轴的无级变速，同时消除了电刷引起的摩擦振动。为使主轴能获得尽量高的回转精度，电动机转子装在主轴上后应经过精密动平衡，电动机转子和定子间的间隙应均匀，使驱动力均匀稳定。电动机的定子应采取通气冷却等措施，以减少温升引起的热变形。

内装式同轴电动机驱动主轴存在的一个问题是：电动机工作时定子将发热产生温升，使主轴部件产生热变形。为减小热变形，电动机定子应采用强制通气冷却或定子外壳做成夹层，恒温油(或水)冷却。采取上述措施后，基本上解决了内装式电动机的发热问题。

电机和机床主轴同轴，不仅可提高主轴的回转精度，而且主轴箱的轴向长度缩短，主轴箱成为一个便于移动的独立部件。现在新的超精密加工机床，采用主轴箱作Z向运动，刀架滑板作X向运动。Z向和X向导轨都做在机床床身上，使机床结构布局大为简化，容易提高导轨的运动精度。在这种方案中要求有上述可移动的主轴部件。图5-13所示为英国Cranfield公司(CUPE)用于所生产的超精密机床的主轴部件，采用内装式同轴直流电动机驱动机床主轴的。

(4) 超精密机床主轴和轴承的材料 现在超精密机床多数采用空气轴承主轴。使用空气轴承时主轴和轴承的材料选取，对主轴的精度和性能有重要影响。机床主轴和轴承的材料选取应考虑下列因素：

1) 不易磨损 对空气轴承主轴，要求在工作时或不通气时，主轴和轴套都不能咬住或发生磨损。一般情况下，工作时轴和轴套不接触也就不会产生磨损，但不通气时偶尔会发生少量转动。采用多孔石墨作空气轴承套，轴不易磨损。

2) 不易生锈腐蚀 空气轴承主轴工作时无润滑剂，虽然通入的压缩空气经过去水，是干燥的，不致使轴承生锈腐蚀。但如轴承一段时间不工作，潮湿空气会进入轴承内，因此要求主轴和轴套材料不易生锈腐蚀。

3) 材料的热膨胀系数要小 空气轴承主轴工作时虽发热量不大，温升也不大，仅 $1^{\circ}\text{C} \sim 3^{\circ}\text{C}$ ，但对精密机床来说 $1^{\circ}\text{C} \sim 3^{\circ}\text{C}$ 的温升仍将产生热变形，影响主轴回转精度。要减小温升除采用恒温油浇淋降温外，还应采用热膨胀系数小的材料制造主轴和轴套，并且主轴和轴套所用的材料热膨胀系数应接近，以避免空气轴承内的间隙变化。

4) 材料的稳定性要好 因空气轴承精度甚高，要避免制成后变形，常常需要进行稳定化处理。

现在制造空气轴承和轴套的材料有：

- 1) 轴和轴套都用38CrMoAl氮化钢，经表面氮化和低温稳定处理。
- 2) 不锈钢。
- 3) 多孔石墨和轴承钢。

此外，文献中还报导在研究试验中，用下列材料作空气轴承：宝钢、花岗岩、线膨胀系数接近于零的微晶玻璃、陶瓷。

为了减少热变形对主轴精度的影响，近来有试验用热膨胀系数很低的微晶玻璃、花岗岩或其他天然石材制造主轴和主轴箱，取得较好效果。

3.3 床身和精密导轨部件

1. 精密导轨部件的基本要求

精密导轨是超精密机床的直线性基准，对它的基本要求如下：

- 1) 运动平稳，动作灵活，直线运动时绝对没有爬行等不连续动作。
- 2) 有极高的直线运动精度，并且能长期保持它的精度。
- 3) 在实际应用中有与使用条件相适应的刚度。
- 4) 高速运动时发热量要少。
- 5) 维护保养要容易。

2. 导轨的结构形式

常用的机床的导轨结构有多种形式：燕尾形导轨、平面导轨、V—平面导轨，双V形导轨等。对超精密机床，如无特殊强制润滑措施，燕尾形和平面导轨有磨损，需定期校准其侧向间隙。

1) 平面导轨 液体静压导轨和空气静压导轨多数采用平面导轨结构。根据工作台的移动量、载荷和精度要求等的不同，一般采用图 5-18 所示的形式。

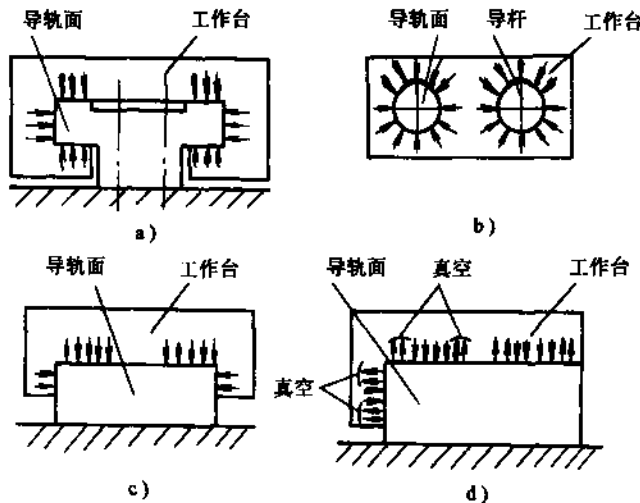


图 5-18 平面导轨形式

- a) 闭式(平面) b) 闭式(圆柱)
c) 重量平衡式 d) 真空负压平衡式

闭式导轨(平面)，可取得高的精度、高刚度，载荷量大，最适用做超精密加工机床和测量机等长导轨。

闭式导轨(圆柱)，这种导轨构件少，结构简单。零件的精度(导杆的圆度、圆柱度和导向孔的间距精度等)完全取决于其加工精度，用研磨等手段提高零件精度是较难的，所以运动精度有限。另外，导杆被两端支承，因自重和工作台的重量容易产生挠度，这种导轨除了用于立式外，作为长导轨不能获得高精度。

重量平衡式导轨，气体静压导轨常用这种结构形式。其特点是机床工作台的重量和气体静压保持平衡，这样导轨的间隙可以保持不变；结构比较简单，零件的高精度也容易加工实现。但由于刚度低，只用于载荷变化小的测量机。

真空负压平衡式导轨，这种导轨与重量平衡式是同一形式，适用于工作台重量轻或不能加重的场合，使真空负压和静压保持平衡的同时，又维持固定的导轨间隙。

2) V—平面导轨 因V—平面导轨磨损后可自动补偿，保持间隙和润滑，不少机床采用这种结构。但这种结构有下述缺点：第一，V形和平面导轨面的磨损不相等，因此工作台面因导轨面磨损而下降量不均匀；第二，当工作台和载重偏离中央并偏向平导轨面一侧时，V-平面导轨的导向能力就要明显下降，如图5-19a所示。

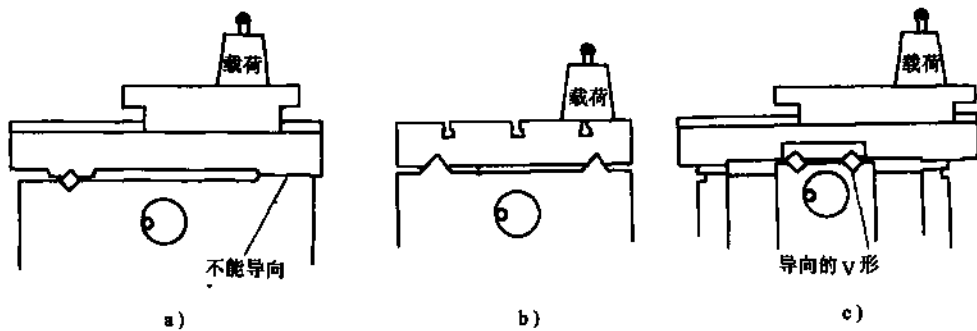


图 5-19 当工作台载重偏离中央时，不同形式的导轨的导向能力

a) 导向差 b) 导向好 c) 导向好

3) 双 V 形导轨 这种导轨能为直线运动提供良好的导向性。两条导轨上的摩擦和磨损是均匀的，驱动元件可对称地处在两条 V 形导轨之间，如图 5-19b 所示。这些都可保证导轨的直线运动精度。双 V 形导轨受到载重偏离中央时，仍能有较好的导向性。如果工作台面(或十字滑座)宽度较大，为防止一侧受重载变形，可在双 V 形导轨两侧加辅助平面支承，仍做成对称结构，驱动元件在中央，如图 5-19c 所示。

V-平面导轨和双 V 形导轨结构多用于滑动导轨。

3. 导轨的偶合形式

超精密机床导轨部件要求有极高的直线运动精度，不能有爬行，导轨偶合面不能有磨损。这一方面要求导轨有极高的制造精度，导轨的材料要有很高的稳定性和耐磨性，导轨的偶合面没有摩擦和磨损，同时还要求导轨的偶合面有很好的偶合形式。

现代超精密机床中导轨的偶合面，一般的摩擦接触已较少采用。现在采用的方式有：滑动导轨，滚动导轨，液体静压导轨，气浮导轨，空气静压导轨等。

(1) 滑动导轨 滑动导轨具有结构简单、紧凑、刚度高，停止时的稳定性高、热稳定性高及价格低等优点，作为超精密加工用的机床元部件可以充分利用其优点。当然，滑动导轨也有缺点，即动摩擦系数和静摩擦系数的差值较大，有爬行，定位精度有限，低速时运动的平滑度比其他导轨差。但是，这些缺点可以通过导轨面的不同制作方法，驱动系统的特殊设计和选择适宜的导轨面材料和润滑油等加以克服，如导轨表面用耐磨塑料层，导轨接触面强迫润滑。

图 5-20 所示是日本丰田工机的超精密机床的导轨，它采用 V-平面导轨结构，使用压力油

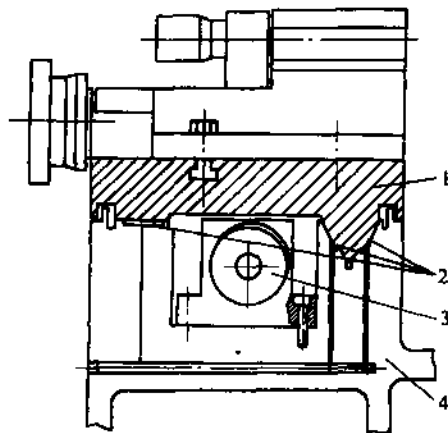


图 5-20 压力油强迫润滑的

V-平面导轨(丰田工机)

1—工作台 2—压力润滑

3—液压缸 4—底座

强迫润滑导轨接触面，减少了导轨磨损。在工作台面有较大重量，润滑油压力高度稳定时，导轨可达到较好的直线运动精度。但由于这种导轨不是对称结构，当载荷偏离中央时，导轨的导向性下降，润滑油压力波动将影响直线运动精度，故这种 V-平面导轨的精度提高是有限的。

美国 Moore 公司生产的坐标镗床、坐标测量机等都采用双 V 形导轨，如图 5-8 所示。在采用淬硬镶钢导轨时，应注意淬硬钢导轨镶条必须装在长的下导轨面上，短的上导轨面是软的。这样长的下导轨面基本不磨损，上导轨面则均匀磨损，使导轨能长期保持精度，而不会发生导轨中某一段因经常使用而局部磨损下凹，破坏导轨的精度。

(2) 液体静压导轨 液体静压导轨中平面型结构用得较多。图 5-21 所示是不同结构的液体静压导轨。由于导轨运动速度不高，液体静压导轨的温度升高不严重，而且液体静压导轨刚度大，能承受大的载荷，直线运动精度高并且平稳，无爬行现象，所以现在还有不少超精密机床使用液体静压导轨。图 5-21a 是平面型液体静压导轨，要求导轨的运动件上、下、左、右面都在静压油的作用下，可保证很高的导轨运动精度和很高的刚度。由于液体静压导轨还有一定的工作温升，两个侧向静压油腔(左右各一个)集中放在左边导轨的左右侧面，这样温度变化造成的油腔间隙变化较小。这种结构是左右不对称的，因此很难做到极高精度。平面型液体静压导轨，如果优化结构是有可能制成左右对称结构，这时驱动元件(滚珠丝杠驱动或摩擦驱动)可以放在中心位置，有利于提高导轨的运动精度。

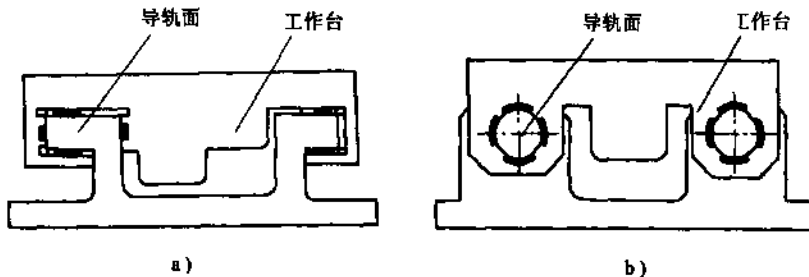


图 5-21 不同结构的液体静压导轨

a) 闭式导轨(平面) b) 闭式导轨(圆柱)

图 5-21b 是双圆柱型液体静压导轨。圆柱静压导轨本身可以制成很高精度，但要将两个圆柱导轨调整到严格平行是相当难的，因此，这种结构的液体静压导轨用得不多。

(3) 气浮导轨和空气静压导轨 气浮导轨和空气静压导轨在精心制造时可以得到很高的直线运动精度，运动平稳，无爬行，摩擦因数接近于零，不发热，因此在超精密机床中得到较广泛的应用。

1) 气浮导轨 当导轨上的运动部件重量很重并且压缩空气压力非常稳定时，可用气浮导轨。气浮导轨常用平面结构，运动导轨的底平面和两侧导轨面有压缩空气，使运动部件(床鞍或工作台)浮起，如图 5-22 所示。从图中可以看出，工作台的浮起是气浮作用，但侧面是气体静压作用，属气体静压导轨。气浮导轨的刚度低于空气静压导轨，且受压缩空气压力波动的影响。在压缩空气压力高度稳定时，气浮导轨可以得到较高的直线运动精度，导轨无爬行现象，无摩擦。美国 Pneumo 公司的 MSG-325 超精密车床即使用气浮导轨。

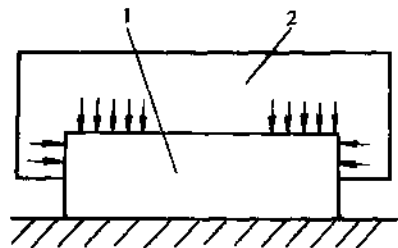


图 5-22 气浮导轨(日立精工)

1—导轨 2—工作台

2) 空气静压导轨 空气静压导轨中运动件的导轨面,上下、左右均在静压空气的约束下,因此和气浮导轨相比有较好刚度和运动精度。图 5-23 所示为日本日立精工的精超精密机床中所用的空气静压导轨。这是比较典型的空气静压导轨的结构,工作台导轨面的上下、左右均在静压作用下,移动导轨是浮在中间,基本没有摩擦力。空气静压导轨不发热,没有温升,因此两个侧导轨面做在工作台的左右两端,没有温升而造成的侧导轨面间隙的变化。空气静压导轨也有不同形式,其中平面型导轨用得较多。

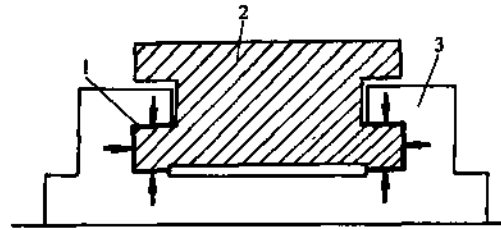


图 5-23 平面型空气静压导轨(日立精工)
1—静压空气 2—移动工作台(约 200kg) 3—底座

为使工作台运动平稳,要求工作台有一定重量,并且导轨的运动部分上下、左右均在空气静压作用下,以保证工作台运动的直线性。

表 5-3 为日本几个工厂的液体静压导轨和空气静压导轨的性能对比,可在选择静压导轨形式时作为参考。

表 5-3 日本代表性的超精密静压导轨性能

性能	液体静压导轨		空气静压导轨	
	丰田工机	不二越	日立精工	东芝机械
行程长度/mm	300	350	200	200
直线度 1/100 000	0.15	0.029	0.05 (H) 0.015 (V)	0.017 (H) 0.050 (V)
刚度/(N/ μm)	—	—	490	294
允许载荷/N	—	—	2940	1960

注: H—水平方向, V—垂直方向。

4. 导轨的驱动

静压导轨常用丝杠驱动。为避免丝杠螺母间的摩擦造成小进给量时的爬行,可以采用滚珠丝杠,滚珠丝杠一般为标准件,使用时可以选用。但随着走刀速度加快,热影响就成为严重问题。因此,有的用液体静压丝杠。液体静压丝杠结构复杂,且要自制,图 5-24 所示为液体静压丝杠的原理图,在丝杠和螺母的偶合面间,由压力油形成油腔,使偶合面不直接接触,提高了导轨驱动的平稳性。

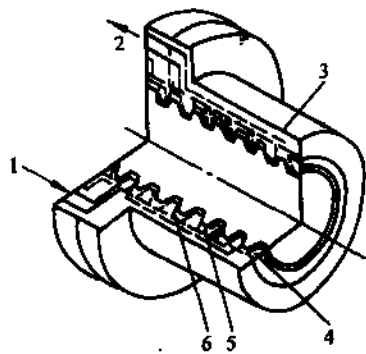


图 5-24 液体静压丝杠传动副
1—进油孔 2—排油孔 3—螺母
4—密封圈 5—外螺纹 6—油腔

近年来为进一步提高导轨运动的平稳性,在超精密机床中导轨的驱动有采用摩擦驱动装置,或采用钢带滚桶驱动装置的。这些新的导轨驱动方法已在超精密机床中得到实际使用,并获得较好效果。图 5-25 为超精密机床导轨的摩擦驱动装置原理图,其工作原理如下:与导轨运动体相连的驱动杆夹在两个摩擦轮之间,用弹簧压板压紧,使驱动杆无滑动。两个摩擦轮均有静压轴承支承,可以自由转动。下摩擦轮有电动机驱动,靠摩擦力带动导轨作非常平稳的直线运动。

摩擦驱动已应用较普遍,其中美国的 LODTM 型机床是最典型的。

5. 床身和导轨的材料

超精密机床床身结构因所用材料不同而异。过去床身和导轨材料都用铸铁，现在多数采用花岗岩等新材料，简述如下。

(1) 优质耐磨铸铁 铸铁是传统的制造床身和导轨的材料，它的优点是工艺性好。精密机床的床身和导轨的材料应选用耐磨性好、热膨胀系数低、对振动衰减能力强、并经过时效消除内应力的优质合金铸铁，可以得到满意的结果。近年来多数精密坐标测量机和超精密机床改用花岗岩，但美国 Moore 公司和瑞士 SIP 公司仍使用铸铁床身导轨，他们认为花岗岩有吸湿性，会导致微量变形，降低机床的精度，反不如铸铁好。

(2) 花岗岩 花岗岩现在已是制造三坐标测量机和超精密机床的床身和导轨的热门材料。这是因为花岗岩比铸铁长期尺寸稳定性好，热膨胀系数低，对振动的衰减能力比钢铁要高很多倍(约 15 倍)，硬度高耐磨并不会生锈等。花岗岩和铸铁等材料的性能对比见表 5-4。从表中的数值可以看到，用花岗岩做超精密机床的床身和导轨是比较好的。

表 5-4 几种机床结构材料的性能对比

性能	Al ₂ O ₃ 陶瓷	铸铁	钢	碳钢	花岗岩	人造花岗岩
弹性模量 E/GPa	240	100	210	140	40	33
密度 $\gamma/(g/cm^3)$	3.4	7.3	7.3	8.2	2.6	2.5
比刚度 $E/\gamma (\times 10^6 m)$	7	1.4	2.7	1.7	1.5	1.3
振动的对数衰减率 $\delta/(\times 10^{-3})$	0.6	1~3	0.5	—	6	20
热膨胀系数 $\alpha/(\times 10^{-6} K)$	7	12	11	0.6	8.3	12
热导率 $\lambda/(W/(m \cdot K))$	16	53.5	44	10.5	3.8	0.47

用花岗岩做床身时，一般都用整体方块，钻孔埋入螺母以便和其他构件连接。导轨也常用花岗岩制作。但花岗岩加工比较困难。空气静压轴承的节流孔在花岗岩中加工比较困难，故有时导轨做成花岗岩和钢的组合结构，以便于加工。

花岗岩的主要缺点是它的吸湿性，吸湿后产生微量变形，影响精度。有人提出在花岗岩表面涂上某种涂料以降低吸湿性。

(3) 人造花岗岩 花岗岩不能铸造而且有吸湿性。为解决这问题国外提出了人造花岗岩。人造花岗岩是由花岗岩碎粒用树脂粘结而成。用不同粒度的花岗岩组合可以提高人造花岗岩的体积比(可达 90%~95%)，人造花岗岩对振动的衰减能力比天然花岗岩还要高很多，而且易于成形，热导率较低。瑞士 Studer 公司采用人造花岗岩 Granitan 制造高精度 S 系列磨床的床身，效果甚佳；英国 Granfield 公司的 OAGM2500 大型超精密机床，床身采用焊接结构钢，中间用人造花岗岩填充，获得满意效果。

3.4 微量进给装置

在超精密机床和超精密加工中，为使机床微位移的分辨力进一步提高；为进行机床和加工误差的在线补偿，以提高加工的形状精度；为进行某种特殊的非轴对称表面的加工，都需要使用微位移机构。高精度微量进给机构已成为超精密机床的一个重要而且关键的功能部件。现在

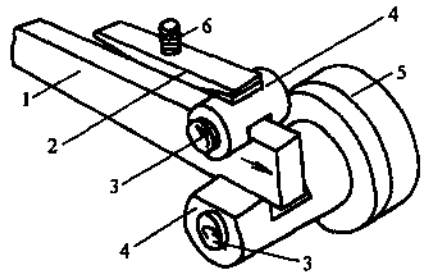


图 5-25 超精密机床导轨用摩擦驱动装置原理图

- 1—驱动杆 2—板簧
3—摩擦轮 4—静压轴承
5—驱动电动机 6—板簧调整螺栓

微位移机构已能达到的分辨力为 $0.005 \sim 0.01\mu\text{m}$ ，这对实现超薄切削和达到高精度尺寸加工和实现在线误差补偿是十分有用的。

1. 对微量进给装置的要求

在超精密机床中，高精度微量进给装置上夹固金刚石刀具，用于刀具微量调整，要求实现精确、稳定、可靠的微位移(有时还要求实现快速微位移)，以保证零件尺寸精度。如在超精密磨削中，砂轮的进给量要求达到百分之几微米；在超精密车削中，金刚石刀具的切深微调也要保证亚微米级的精度。

微量进给机构也用于超精密机床微量在线误差补偿，位移分辨力要求达千分之几微米。因此一个好的精密和超精密微位移机构应满足下列设计要求：

- 1) 精微进给和粗进给应分开，以提高微位移的精度、分辨力和稳定性。
- 2) 运动部分必须是低摩擦和高稳定度的，以便实现很高的重复精度。
- 3) 末级传动元件必须有很高的刚度，即夹固金刚石刀具处必须是高刚度的。
- 4) 微量进给机构内部各连接处必须是可靠连接，连接间隙极小，在可能时尽量采用刚性连接，否则这微量进给机构很难实现很高的重复精度。
- 5) 工艺性好，容易制造。例如要实现 $0.01\mu\text{m}$ 的进给，微量进给机构本身各元件的精度，应是能够制造的精度。
- 6) 在要求快速微位移时(如用于随机误差补偿)，微量进给机构应具有好的动特性，即具有高的频响。
- 7) 微量进给机构应能实现微进给的自动控制。

现在用的微量进给装置有多种结构形式，其工作原理也各不相同，归纳起来有下面 6 种类型：机械传动或液压传动式；弹性变形式；热变形式；流体膜变形式；磁致伸缩式；压电陶瓷式。根据精密和超精密微量进给装置的要求，上述 6 种类型中，仅有弹性变形式和压电陶瓷式微量进给机构比较适用并比较成熟。下面介绍这两种典型的微量进给装置。

2. 弹性变形微量进给装置

机械结构弹性变形微量进给装置，工作稳定可靠，精度重复性好。在手动操作时，这种变形微量进给装置是很适合的。

图 5-26 所示是一种双 T 形弹性变形微进给装置的工作原理图。当驱动螺钉前进时，垂直 T 形弹簧变直伸长，因 B 端固定，C 端压向水平 T 形弹簧。由于 D 端固定，故推动 E 端可位移

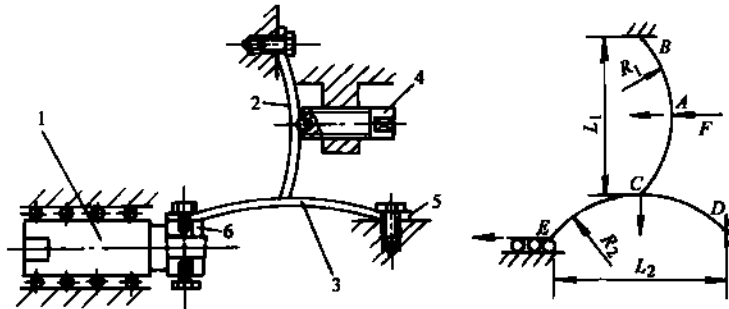


图 5-26 双 T 形弹性变形微进给装置原理

1—微位移刀夹 2、3—T 形弹簧 4—驱动螺钉
5—固定端 6—动端

刀夹作微位移前进。

3. 压电陶瓷微量进给装置

要实现自动微量进给和要求微量进给装置有较好动特性时，现在多采用压电陶瓷微量进给装置。

压电陶瓷具有逆压电效应和电致伸缩效应，这是电介质在电场作用下产生变形的基本电偶合效应。电致伸缩效应的变形量与电场强度的平方成正比。压电陶瓷用于制造微量进给机构有很多优点：

- 1) 能够实现高刚度无间隙位移。
- 2) 能实现极精细的微量位移，分辨力可达 $1.0 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 。
- 3) 变形系数较大。
- 4) 有很高的响应频率，其响应时间达 $100 \mu\text{s}$ 。
- 5) 无空耗电发热问题。

因此，压电陶瓷微量进给机构的研究在国内外都倍受重视。

图 5-27 所示为一种压电陶瓷微进给装置。压电陶瓷器件 3 在预压应力状态下与弹性变形载体刀夹 1 和后垫块 4 粘结安装。在电压作用下陶瓷伸长，推动刀夹作微位移。位移量由电感测头 5 测出，可作为微位移量的校准，或微位移量的监测反馈控制之用。此微位移装置最大位移为 $15 \sim 16 \mu\text{m}$ ，分辨力 $0.01 \mu\text{m}$ ，静刚度 $60 \text{N}/\mu\text{m}$ ，位移的重复性较好。

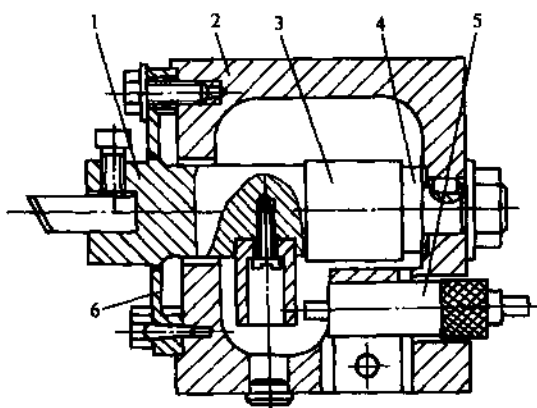


图 5-27 压电陶瓷微进给装置

- 1—刀夹 2—机座 3—压电陶瓷
4—后垫块 5—电感测头 6—弹性支承

压电陶瓷材料具有很高的响应频率，其响应时间仅 $100 \mu\text{s}$ ，但从国内外的文献资料报导，使用压电陶瓷制成的微位移装置其频响都低于 $200 \sim 300 \text{Hz}$ 。如微位移装置将用于动态误差补偿，很需要提高其频响。这可采取下列措施：

1) 研制高频响驱动电源，这可能是最有效的措施。提高电压使压电陶瓷伸长，其过程相当于对压电陶瓷片组成的电容充电。驱动电源常用 $0 \sim 300 \text{V}$ 连续可调。要求驱动电源内阻小，充电快，就可使微进给装置动特性改善。

2) 减少压电陶瓷片数，这可提高其频响，但使总位移量减少。

压电陶瓷微进给装置是有应用前景的。美国 LLNL 实验室的 LODTM 和 DTM-3 大型超精密机床都采用了压电陶瓷微进给装置。该微进给装置不仅用于实现超薄切削和微量进给，同时还

用于加工时的误差补偿,用于切削加工非轴对称特殊型面时刀具微进给的控制。图 5-28 是在 LODTM 机床上用刀具微进给补偿法加工出的非轴对称特殊型面。

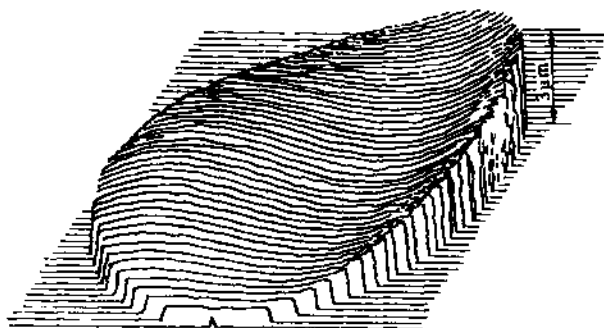


图 5-28 美国 LLNL 实验室在 LODTM 机床上用误差补偿法加工出的用于光波修正的非轴对称特殊型面

3.5 精密定位检测元件

要达到亚微米级和纳米级的加工精度,机床超精密部件运动精度的检测是一个极为重要的方面。

在超精密机床上定位检测,广泛采用激光干涉测量系统,这也是最高精度的检测方法,一般定位精度可达 $(0.2 \sim 0.3) \mu\text{m}/1000\text{mm}$,最高精度可达 $0.013 \mu\text{m}/1000\text{mm}$ 。

激光干涉测量系统主要由两部分组成:双频激光干涉器和光栅。双频激光干涉器是目前机床上定位检测精度最高的仪器,它的分辨力为 $0.01 \mu\text{m}$,目前世界上最高精度的双频激光器分辨力可达 1nm 。超精密加工机床向纳米级精度发展,双频激光干涉器是首要发展的器件。光栅是机床上应用较广泛的检测元件,随着超精密专用机床及检测仪器的进一步发展,国外已有 $0.01 \mu\text{m}$ 及纳米级分辨力的光栅。

检测过程是由精密闭环控制系统控制的。在加工工件时,机床的运动部件的位移,由装在机床内部的双频激光干涉测距系统随机精确监测,将数据反馈给精密数控系统,进行闭环控制,保证位移运动的高精度。例如 Moore 公司的 M-18AC 型和 Pneumo 公司的 MSG-325 型超精密机床,都在机床内装有两套密封的双频激光干涉测距系统,精确监测 Z 向和 X 向的位移。双频激光干涉系统的测量精度受环境干扰(如温度、湿度、气压、气流、尘埃、振动等)影响甚大,因此必须采用保护、密封和补偿修正等措施才能得到精确的测量结果。

下面是美国 LLNL 国家实验室的 LODTM 大型超精密机床中,使用双频激光干涉仪进行随机监测的例子。

LODTM 大型超精密机床系立车形式,滑座(重 1.8t)在机床的横梁导轨中作水平的 X 向运动;刀座(200kg)在滑座的导轨中作垂直的 Z 向运动。使用双频激光干涉测距系统对 X 向和 Z 向位移进行检测,双频激光检测系统的总体布局如图 5-29 所示。系统中共有 7 套双频激光干涉系统,共用一套双频氦氖激光器作为激光源经分光镜分成不同光路。在机床横梁的左端有独立的检测基架(用热膨胀系数很低的钢制造),上面装 4 套激光干涉仪,在滑座上有相应的反射镜检测滑座的水平“X 向”位移,用 4 套激光干涉仪的原因是防止滑座运动时的歪斜。在滑座的顶部装有三套激光干涉仪,检测刀座的垂直“Z 向”位移,使用三套激光干涉仪的原因也是防止刀座运动时的歪斜。采用上述多路双频激光干涉测量系统,可得很高测量精度,精密

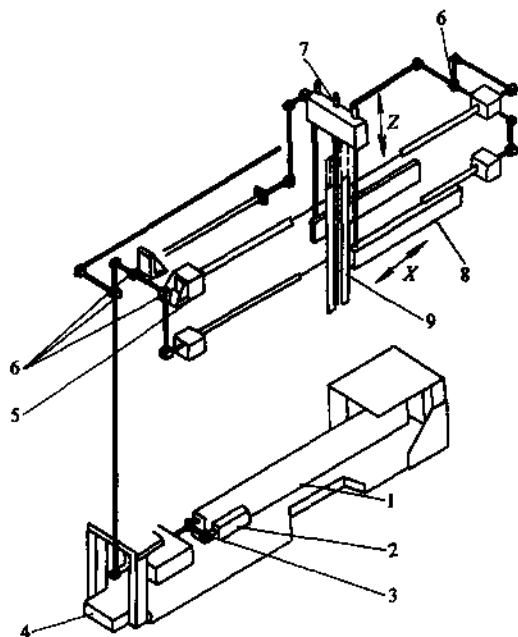


图 5-29 大型超精机床 LODTM
的位移激光监测系统

- 1—SP125He/Ne 激光器 2—经碘稳定的 He/Ne 激光器
3—检测器反馈 4—基座 5—侧滑座运动的 4 路
激光 6—分光镜 7—测刀架运动的 3 路激光
8—测 Z 向运动直尺 9—测 X 向运动直尺

数控系统根据测量结果进行反馈控制，使运动部件达到极高的运动位移精度，从而达到极高的加工精度。

这里所用的激光干涉测量仪是专门研制的 SP125 型双频激光干涉测量仪，输出光功率为 15mW。当分光为 7 路激光时，每路光仍有足够的功率。采用碘稳频，具有很高的频率稳定性，分辨力为 0.635nm。

4 典型超精密机床介绍

下面介绍超精密机床的发展过程中一些典型的、代表性的机床，它也代表了超精密切削加工技术的发展过程。美国开发研制超精密机床最早，发展过程最完整，现在的水平也最高，因此下面介绍的典型超精密机床也以美国的超精密机床为主。

4.1 半球车床

半球车床(亦称 Du Pont 1 号车床)是美国 Union Carbide 公司在 1962 年研制成功的，它

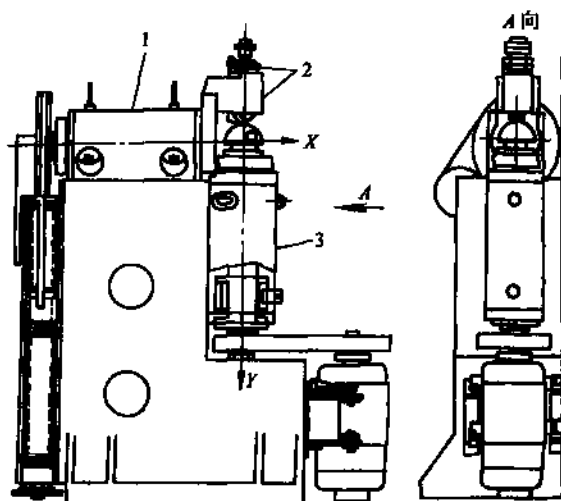


图 5-30 半球车床(1号车床)外观结构
1—刀具架主轴 2—刀具头架 3—工件主轴

是最早使用金刚石刀具实现超精密镜面切削的机床，可用于加工球形和半球形零件。图 5-30 给出了这台车床的外观结构。机床工件主轴和刀架主轴的回转精度均在 $0.125\mu\text{m}$ 以内，主轴转速在 $2000\text{r}/\text{min}$ 以下时，主轴振摆为 $0.125\mu\text{m}$ 。刀架的最小进给量为 $0.125\mu\text{m}$ 。

机床特点：机床为立式布局，电动机通过带轮带动主轴旋转。主轴采用高精度空气轴承，大大提高了主轴精度和平稳性。图 5-12 为这种车床的精密空气轴承主轴的结构，用多孔石墨制成轴衬，径向空气轴承的外套可以调整自动定心，这样可以提高前后轴套的同轴度，从而提高主轴的回转精度。刀具可绕刀具回转轴作圆弧进给，切削出高精度球面。

机床的加工精度：在温控 $\pm 0.14^\circ\text{C}$ 条件下，用金刚石车刀加工直径 $\phi 101.6\text{mm}$ 的铝合金半球时，尺寸精度为 $\pm 0.6\mu\text{m}$ ，表面粗糙度在 $R_a 0.025\mu\text{m}$ 以内。在加工整球体时，尺寸精度及圆度在 $0.38\mu\text{m}$ 以内。

4.2 半球体车床

半球体车床(亦称 Du Pont 2 号车床)是美国 Union Carbide 公司在 1966 年研制成功的。它是 1 号车床的改进型，所不同的只是刀架主轴和工件主轴能平行移动。和 1 号车床相比，能车削更大尺寸的凸球面和凹球面。1 号车床和 2 号车床的刀具均采用生物切片机上使用的直线刃金刚石刀具。

机床的加工精度：在加工 $\phi 152\text{mm}$ 的球形工件时，形状精度(球度)达到 $0.13\mu\text{m}$ 以内，尺寸精度达到 $0.51\mu\text{m}$ 。

4.3 Moore 车床

Moore 超精密车床是美国 Union Carbide 公司 Y-12 工厂和 Moore 公司合作，在有效的使用了上述两种试制机床的技术基础上，改造了 Moore 3 型坐标测量机，于 1968 年研制成功的。图 5-31 为这种机床的结构外形。它是一台性能很好的超精密金刚石车床，最大加工工件尺寸达

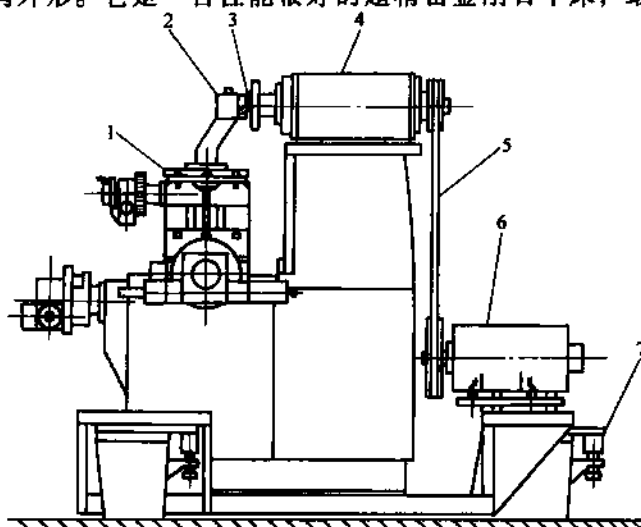


图 5-31 Moore 车床

1—精密回转工作台 2—刀具夹持器

3—金刚石刀具 4—空气轴承主轴

5—传动带 6—主轴传动电动机 7—空气垫(三点支承)

635mm, 可用于各种非球曲面的镜面加工, 如高精度的激光光学系统所用的各种反射镜等, 能达到较高的形状精度和很小的表面粗糙度。图 5-32 是若干种不同的反射镜精加工的例子, 其加工精度见表 5-5。

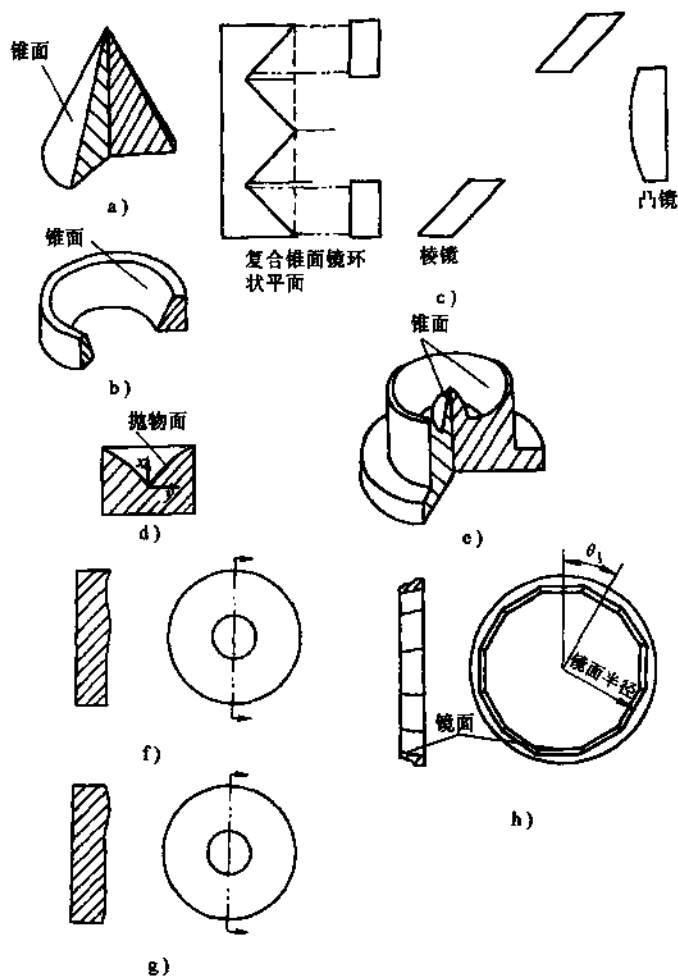


图 5-32 各种形状的光学部件

表 5-5 Moore 车床加工的激光反射镜精度 (Arnold 等)

1976 年

工 件		平面镜	曲面镜
精度项目		平面度/ μm	形状精度/ μm
直径/mm	< 152.4	0.3/直径	0.45
	< 635.0	1.2/直径	1.9
表面粗糙度/mm (P-V)		7.5 ~ 20	20 ~ 62.5

机床特点: 该机床使用了和 1 号车床相同结构的空气静压轴承主轴, 主轴由电动机通过带轮带动旋转, 呈水平布置, 主轴回转精度 $0.025\mu\text{m}$, 以保证达到很高的加工精度。导轨采用气浮导轨, 并用分辨力为 $0.01\mu\text{m}$ 的精密数控系统, 滑板工作台的双直线坐标 (X 、 Z 方向) 用双频激光测量系统作为工作台移动的位置测量及反馈, 回转工作台的 B 方向, 也用精密数控系统加以控制。金刚石刀具装在精密回转工作台上, 在加工各种非球曲面时, 刀具将垂直于加工表

面, 以提高所加工的非球曲面的精度和表面质量。Moore 车床对机床结构和性能做了较多改进, 如机床床身采用优质铸铁制造, 采用双 V 型结构滑板导轨, 提高了导轨的直线度, 全长直线度 $0.5\mu\text{m}$; 提高了滑板导轨和主轴的垂直度; 进行精密动平衡; 采用了消振和防振措施, 整台机床由放在机床床身下面的三个空气隔振垫支承, 以隔离外界振动的影响; 加强恒温控制, 使用恒温油浇淋机床中的各发热部件, 等等。

机床的加工精度: 在实验室加工铜、铝件获得了 $R_a 0.01\mu\text{m}$ 的表面粗糙度和 $0.25\mu\text{m}$ 的平面度。

Moore 机床是一台很成功的超精密机床, 美国 Moore 公司现在生产的 M-18AG 型超精密非球面车床, 仍继续采用上述基本结构形式。现在已生产了很多台, 除美国外, 其他国家也在使用。

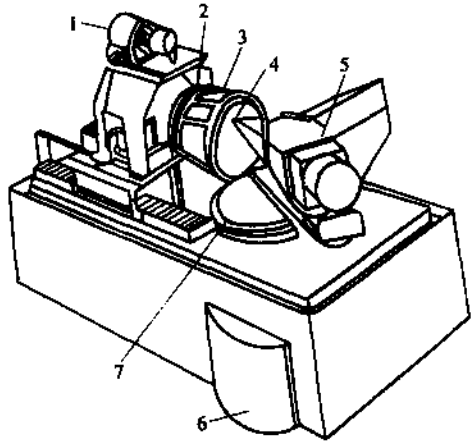


图 5-33 R- θ 车床 (Du Pont 3 号车床)

1—主轴驱动电动机 2—工件空气轴承主轴

3—工件夹具 4—刀具 5—刀架

6—空气隔振垫 7—回转工作台

4.4 R- θ 车床

美国 Union Carbide 公司 Y-12 工厂在 1972 年完成 R- θ 车床 (Du Pont 3 车床), 机床外观如图 5-33 所示。它可加工直径为 $\phi 50\text{mm} \sim \phi 400\text{mm}$ 的内外球面, 加工的形状精度为 $\pm 0.63\mu\text{m}$, 尺寸精度为 $\pm 2.5\mu\text{m}$, 加工表面粗糙度为 $R_a 0.025\mu\text{m}$ 。

机床特点: 机床采用了一种新的工艺方式, 不需要 NC 控制用范成法加工球面和抛物面。加工原理见图 5-34, 在机床上有两个空气轴承回转主轴, 一个用于夹持工件, 该主轴为水平轴; 一个是新增加的主轴, 用于安装刀具, 为垂直轴。刀具回转主轴可以转动角度 θ , 加工时工件作低速回转, 刀具作高速回转, 根据刀具设定角度 θ 的变化, 可以加工出不同曲率半径的球面。

$$R = \frac{d}{2\sin\theta}$$

式中 R ——球面半径;

d ——刀具回转直径。

机床是具有反馈的双坐标数控车床。刀具定位和转台定位分别使用激光干涉仪和旋转编码器, 通过数字控制进行工作。刀具回转台用力矩电动机直接驱动。滑板移动采用气体静压导轨, 用高精度滚珠丝杠驱动。机床安装在三个空气弹簧垫上, 以隔绝外来的振动。为了减少温度变化的影响, 采用液体喷淋冷却控制温升。

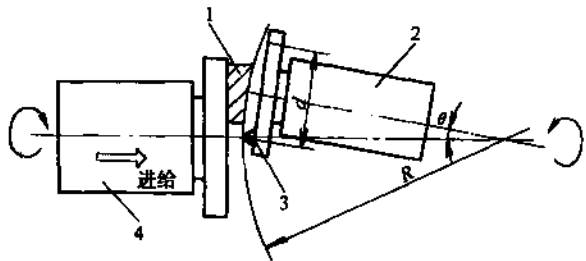


图 5-34 球面加工原理

1—凹面镜 2—工具轴 3—刀具 4—主轴

该机床所采用的空气轴承的结构如图 5-13 所示。它采用了两个半球面的空气轴承, 能自动调心, 故可得到较高的主轴回转精度。其回转精度为 $0.3\mu\text{m}$, 刚度为 $118\text{N}/\mu\text{m}$, 由静止状态到 $1000\text{r}/\text{min}$ 稳定状态过程中温升在 1.1°C 以内。

Union Carbide 公司 Y-12 工厂对它所使用的两种超精密车床加工光学零件时的性能作了试

验, 结果见表 5-6。

表 5-6 Union Carbide 公司 Y-12 工厂的超精密车床性能对比

		Moore	R-θ 车床
加工零件直径/mm		φ406 ~ 635	~ φ381
机械运动		X-Y-θ	R-θ
定位精度		X、Y: 0.0083μm θ: 0.15'	R: 0.0264μm θ: 1.24'
加工形状精度	平面	平面度 1.27μm/305mm (直径)	半径误差 < 0.762μm
	曲面	2.54μm/305mm (直径)	< 1.27μm
加工表面粗糙度	平面	7.6nm (P-V)	< 7.6nm (P-V)
	曲面	5.1 ~ 10.2nm (P-V)	10.2 ~ 15.2nm (P-V)

4.5 2m 镜面车床

在研究大输出功率气体激光核聚变时, 大多需要大口径的光学部件。Ex-cell-0 公司根据这一需要, 在 1976 年研制出用于加工直径达 2m 的金属反射镜的金刚石镜面切削车床。

Ex-cell-0 公司拥有制造最高精度的滚珠轴承的技术, 但对于加工直径为 2m 的光学部件来说, 滚珠轴承的回转精度是不够的, 它难于将回转中的温升抑制在某数值之内, 使加工的反射镜精度达不到要求, 因而就发展了新的空气轴承回转轴。这种车床有采用如图 5-13 所示结构主轴的 II-C 型卧式车床, 或采用如图 5-16 所示主轴结构的 III-B 型立式车床。能达到的径向跳动精度为 0.10 ~ 0.13μm, 端面圆跳动精度为 0.15 ~ 0.18μm, 以 2000 r/min 运转 8 h 的温升在 5.6℃ 以内, 径向刚度为 361N/μm。

4.6 LODTM 大型光学金刚石车床

美国国防部高等研究计划局(DARPA)投资 1300 万美元, 通过 LLNL 实验室和空军 Wright 航空研究所等单位合作, 用了 39 个月的时间, 于 1984 年研制成功这台大型金刚石切削车床 LODTM (Large Optical Diamond Turning Machine) 如图 5-35 所示。该机床能加工直径 1625mm、长 508mm、重量 1360kg 的大型金属反射镜等光学零件。

LODTM 车床应用了许多 80 年代的新技术, 主要特点有:

1) 机床主轴系采用液体静压轴承, 主轴用分离的径向轴承和推力轴承支承。为减少工件重量产生变形的影响, 机床采用立式结构, 这样可以采用面积较大的推力轴承, 保证机床有较高轴向刚度, 同时保证主轴有较高的回转精度。

2) 为提高机床运动位置测量系统的测量精度, 采用高分辨力(分辨力为 0.625nm)的 7 路双频激光测量系统, 用以检测刀具各方向移动的位置, 其中 4 路监测滑板在横梁上的运动, 3 路监测刀架垂直运动, 通过计算机(32 位电子计算机)运算可以精确知道刀尖的位置, 能在线测量滑板和刀架的歪斜并予以误差补偿, 因此该机床能够达到很高的加工精度。

3) 为减少热变形影响, 使用热膨胀系数小的钢材材料制作关键零部件, 用热交换器控制温度, 并且机床内各发热部分都使用大量恒温水(水温严格控制在 $20 \pm 0.0005^\circ\text{C}$)冷却。

4) 为减少振动影响, 机床采用大的地基, 整台机床用 4 个很大的空气隔振垫将机床架起来。这 4 个空气隔振垫中有 2 个是内部相通的, 受力时能自动平衡, 这样用四个空气隔振垫可

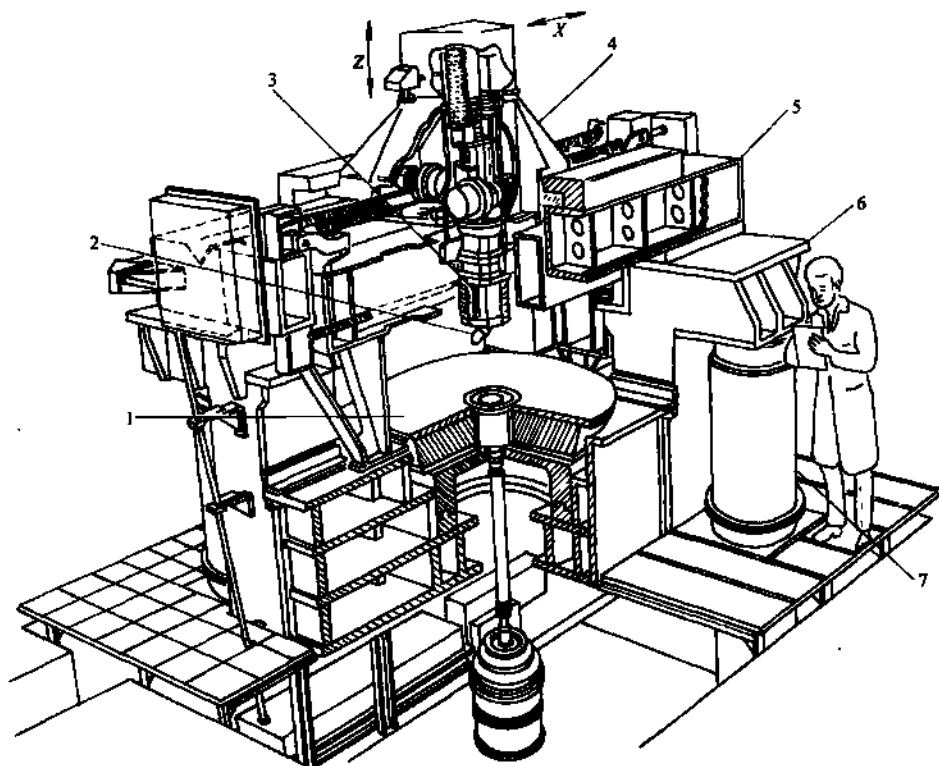


图 5-35 美国 LLNL 的立式大型光学金刚石车床 (LODTM)

1—主轴 2—高速刀具伺服机构 3—刀具轴 4—X 轴拖板 5—上部机架 6—主机架 7—气动支架

以起到三点支承一平面的效果。空气隔振垫是架在机床上较高的位置(如图 5-36 所示),空气隔离垫本身是放在很高的基础上的。为了避免机床受水泵振动的影响,恒温冷却水先用水泵打入储水罐,然后靠重力流到机床需要冷却的部位。

5) 该机床使用自制的静电电容式变位计测量工件变形,并用在线测量和误差补偿技术,使机床达到很高的精度,经美国国家标准局(NBS)检测,实测精度如表 5-7 所示,测得结果为:加工形状误差为 $0.025\mu\text{m}$,加工表面粗糙度为 $R_a 0.0042\mu\text{m}$ 。

机床的加工精度:加工件的圆度和平面度误差达到 $0.013\mu\text{m}$,加工表面粗糙度的指标为 $0.0042\mu\text{m}$ 。工件车削后可不经研磨就能在红外区光谱内应用。

LODTM 大型金刚石立式车床的研制成功,标志着超精密车床发展到一个新阶段,超精密金刚石车削技术已经成为制造大型光学零件的

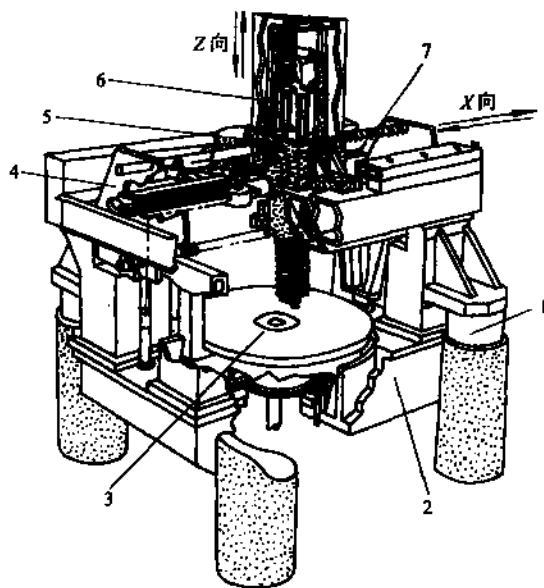


图 5-36 美国 LLNL 实验室 LODTM 大型光学金刚石车床的支承

1—隔振空气弹簧 2—床身 3—工作台 4—测量基准架 5—滑板 6—刀座 7—激光同路波纹管

重要手段。

表 5-7 LODIM 车床主要指标

主轴静态精度	径向跳动 $<0.025\mu\text{m}$, 端面圆跳动 $<0.051\mu\text{m}$
50r/min 时的回转精度	径向跳动 $<0.051\mu\text{m}$, 端面圆跳动 $<0.051\mu\text{m}$
导轨误差	定位误差 X 向 $<0.051\mu\text{m}$, Z 向 $<0.051\mu\text{m}$
	直线度误差 X 向 $<0.102\mu\text{m}$, Z 向 $<0.102\mu\text{m}$
激光测量系统综合误差	X 向 $<0.025\mu\text{m}$, Z 向 $<0.025\mu\text{m}$

4.7 DTM-3 型大型超精密车床

在美国能源部支持下, LLNL 实验室和高水平的联合碳化物公司 Y-12 工厂联合开发, 于 1983 年研制成功大型超精密金刚石车床 DTM-3 型(亦称 3 号机床)。图 5-37 所示为该机床的床身。它和 LODIM 大型超精密车床是现在世界上公认技术水平最高、精度最高的大型金刚石超精密车床。该机床可用于加工平面、球面及非球面, 如激光核聚变工程用的各种金属反射镜、红外线装置用零件以及大型天体望远镜(包括 X 光天体望远镜)用零件等。该机床可加工直径为 2130mm、重量 4500kg 的工件。

DTM-3 型大型超精密车床中最重要的问题是超精密位置的确定技术。采用了精密数控伺服方式, 控制部分为内装式分辨力 $0.01\mu\text{m}$ 为的 CNC 装置和多路激光干涉测长系统(分辨力为 2.5nm)精确测量定位。还采用了压电晶体误差补偿技术, 使加工精度达到 $0.025\mu\text{m}$ 。为了实现刀具的微量进给, 在 DC 伺服机构内装有压电微位移机构, 可实现纳米(nm)级微位移, 以进行加工误差修正。

机床的主要特点:

(1) 检测系统(Metrogy Loop)

1) 长距离测定系统。在真空中用 He-Ne 激光干涉仪, 分辨力 2.5nm 。

2) 短距离测定系统: 差动式电容测微仪。

3) 除自重外不受任何载荷, 具有独立的测量基准。

(2) 运动系统的控制

1) X 轴、Z 轴的驱动 由直流电动机、转速计与静压轴承 $\phi 50$ 的传输轴摩擦连接。

2) 修正误差用刀具微位移机构 在直流伺服机构内装有压电式微位移机构, 它由 PZT (PbZrO-PbTi 陶瓷)压电元件驱动(范围: $2.5\mu\text{m}$)并与电容测微仪组合后工作, 可实现纳米级微位移。

3) 滑动导轨 X 向导轨采用 V-平面导轨并进行强迫液体润滑; Z 向为平面空气静压导轨。X 向和 Z 向导轨均由直流电动机与静压轴承的 $\phi 50$ 摩擦驱动轮驱动。

4) 主轴 径向轴承采用高压液体静压主轴, 刚度高、承载能力强、动态性能好; 推力轴承采用空气静压, 柔性连接驱动方式, 交流变频电动机(为防止振动, 直接安装在地基台面上)。主轴刚度 $> 500\text{N}/\mu\text{m}$ 。

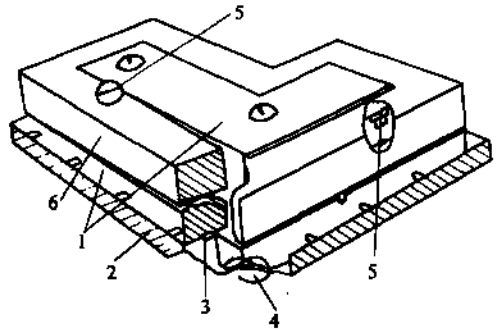


图 5-37 DTM-3 大型超精密

车床(3 号车床)床身

1—底座 2—冷却槽

3—底座静压支承 4—空气隔振垫

5—工作台静压支承 6—测定工作台

5) 电容传感器 分辨力 0.525nm, 直线性 0.1%。

6) 伺服系统 X 、 Z 轴传输轴摩擦驱动, 频带宽 10Hz, 最大送进量 2.5mm/s。 X 、 Z 轴的负荷补偿用波纹管的频带宽为 0.01Hz。刀架的压电陶瓷微量进给驱动系统的频带宽为 100Hz。

7) 温度控制系统(在 6m^3 空间内) 机床采用了高精度的恒温油淋浴系统, 用 $1.5\text{m}^3/\text{min}$ 恒温油喷淋冷却。流体温度控制可达 $20 \pm 0.0006^\circ\text{C}$, 空气温度控制可达 $20 \pm 0.005^\circ\text{C}$, 消除了加工中的热变形。

8) 机床底座为 $6.4\text{m} \times 4.6\text{m} \times 1.5\text{m}$ 的花岗岩(重量约 80 t, 价值 5 万美元), 并且底座用空气垫隔振, 可以隔离频率大于 1.5 ~ 2Hz 的外界振动, 隔振后轴承部件的相对振动振幅仅 2nm。

机床的加工精度为: 加工形状误差为 28nm (半径); 圆度和平面度为 12.5nm; 加工表面粗糙度为 $R_a 4.2\text{nm}$ 。

4.8 MSG-325 型超精密车床

MSG-325 型超精密车床是美国一家著名的生产超精密机床的公司——Pneumo 公司生产的。

机床特点: 机床整体布局与 Moore 机床不同, 采用 T 形布局, 即主轴箱下有导轨, 作 Z 向运动, 滑板作 X 向运动, 这样有利于提高精度。机床空气主轴的径向圆跳动和端面圆跳动精度均 $< 0.05\mu\text{m}$ 。床身、滑板均采用花岗岩制造, 床身用重量为 7 t 的 $2\text{m} \times 1.2\text{m} \times 0.6\text{m}$ 的花岗岩, 导轨为气浮导轨。机床用滚珠丝杠和分辨力为 $0.01\mu\text{m}$ 的双坐标精密数控系统驱动, 用 HP5501A 双频加工干涉仪精密测量位移, 作为闭环数控系统的反馈。使用精密圆弧刃金刚石刀具加工非球曲面的反射镜, 可以达到很高的形状精度和很低的表面粗糙度。现在, 国外已有很多公司生产的中小型超精密车床都采用类似的结构。

机床下用三个能自动找水平的空气隔振垫支承, 自动保持机床水平, 隔离频率 2Hz 以上的外界振动。

4.9 OAGM 2500 大型超精密车床

OAGM 2500 大型超精密机床是英国著名的精密加工公司——Cranfield Precision Engineering 公司(CUPE)在 1991 年和英国科学工程研究委员会(SERC)合作研制成功的。它与美国 LLNL 国家实验室的大型超精密机床 DTM-3 和 LODTM 是现在世界上公认的水平最高的超精密机床。图 5-38 为该机床的外观图。该机床有 $\phi 2500\text{mm}$ 的高精度回转工作台, 可用于精密磨削和坐标测量 X 射线天体望远镜的大型曲面反射镜, 最大加工尺寸为 $2500\text{mm} \times 2500\text{mm} \times 610\text{mm}$ 。

机床特点: 机床的 X 和 Y 向导轨采用液体静压导轨, Z 向的磨轴头和测量头采用空气轴承。床身采用型钢焊接结构, 中间用人造花岗岩填充, 可保证高刚度、高稳定性和很强的振动衰减能力。机床用精密数控驱动, 用分辨力为 2.5nm 的 ZYGO AXIOM 双频激光测量系统检测运动位置, 并用数控系统反馈控制。这台机床已使大型超精密机床发展成为极高精度的多功能机床。

当加工的曲面反射镜尺寸超过机床工作台尺寸时, 可将曲面反射镜分割成若干块, 并计算出曲面形状, 如图 5-39 所示。该机床具有三轴联动数控系统, 可以加工出偏置轴(即不对称)的曲面

反射镜块,再组合成大型的曲面反射镜。机床配备有测量头,可作为坐标测量机测量曲面形状。

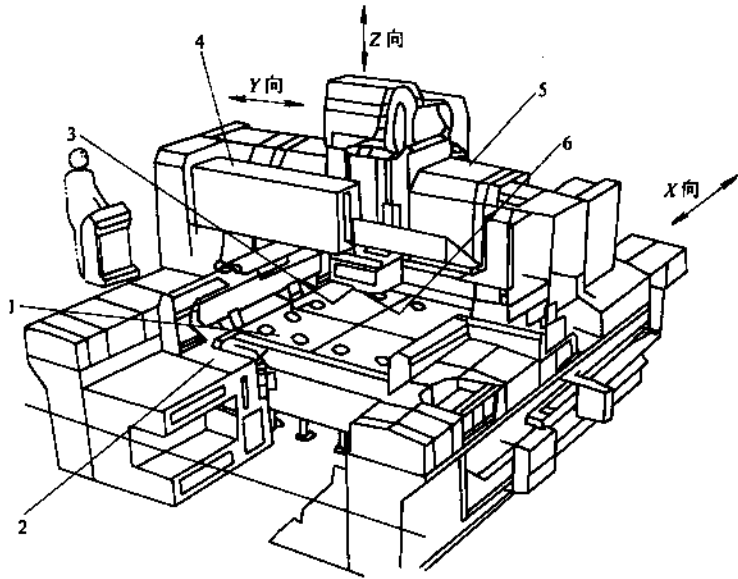


图 5-38 英国 Cranfield 公司的 OAGM 2500 大型超精密机床
1—工作台 2—测量基准架 3—测头 4—Y 向参考光束
5—滑板龙门架 6—砂轮轴

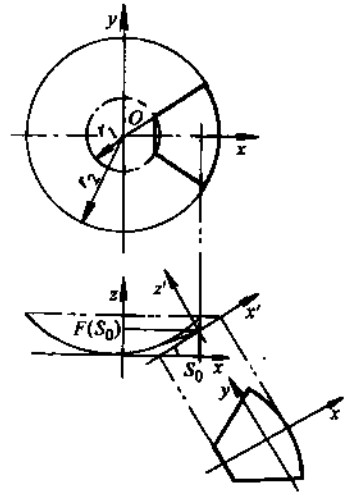


图 5-39 超规格曲面的分割

4.10 AHN10 型高效专用车削、磨削超精密机床

AHN10 型机床是日本 TOYOTA 公司生产的高效专用车削、磨削超精密机床。这台超精密机床用于加工非球曲面,如高精度塑料透镜的金属模,因模具用钢制造,需要磨削,故这机床可用于车削、铣削、磨削并带有精密测量装置。为实现这个目标,机床有一个可在 X 和 Y 向调整的刀架及作 B 轴转动的高精度转台,借助三轴精密数控,可以加工平面、球面和非球曲面。

机床特点:机床主轴用空气轴承,最大加工直径为 100mm;刀架设计成滑板结构,其 X 向为 250mm,Z 向为 200mm。直线移动分辨力为 $0.01\mu\text{m}$,并用激光测量反馈,定位精度全行程 $0.03\mu\text{m}$,轴回转分辨力为 $0.3''$ 。砂轮轴由气动透平驱动,转速为 100000r/min。刀具的切削刃或砂轮轮廓通过显微镜放大显示在屏幕上,易于定位,提高加工精度。有些塑料透镜模具的非球曲

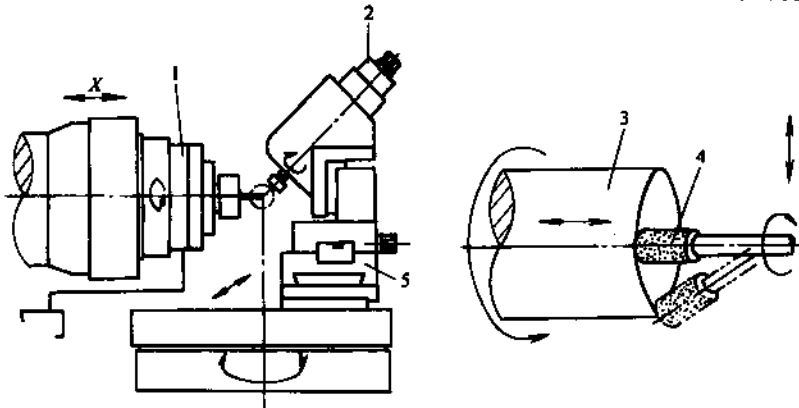


图 5-40 日本 AHN10 型机床磨模具情况
1—主轴 2—磨头主轴 3—工件 4—砂轮 5—刀架

面的曲率半径仅几毫米,用指状砂轮磨削时,砂轮轴相对于工件转成 $\pm 45^\circ$ 角,如图 5-40 所示。

在测量时,夹着工件(金属模)的主轴转 90° 成垂直向上状态,模具测量仪的测针下降到工件,左右移动进行测量,尺寸数据经过计算在屏幕上显示出来。

机床的加工精度:形状精度为 $0.05\mu\text{m}$,表面粗糙度为 $R_a 0.025\mu\text{m}$ 。

4.11 超精密铣床

日本的 FANUC 公司和电气通信大学合作研制的车床型超精密铣床是世界上首例用切削方法实现自由曲面微细加工。这种超精密切削加工技术使用切削刀具,可对包括金属在内的这种可切削材料进行微细加工,而且可利用 CAD/CAM 技术实现三维数控加工,具有生产率高、相对精度高的优点。图 5-41 是其结构示意图。该机床是在 X、Z、C 三轴控制车床上附加了一个可绕 Y 轴回轉的 B 轴,用于调整刀具轴线的空间位置。机床底座使用空气-油减振器,以隔离来自地基的振动和吸收机床自身产生的振动,使静态振幅衰减到纳米级。

机床的 X、Z 两轴采用气浮导轨。B、C 两轴采用径向推力气体静压轴承。工作台的导向结构为方形导轨,动力传递采用面节流型空气静压丝杠螺母副。螺母与工作台的滑动部件做成一体,丝杠与伺服马达做成一体,伺服马达采用空气轴承。转子和定子之间的间隙也用静压空气维持,B 轴由空气涡轮驱动,回轉工作台的动力传递由表面涂覆固体润滑材料的蜗轮蜗杆副完成。利用编码器实现工作台位置的全闭环控制,编码器分辨力为 64×10^6 脉冲/r。机床安装在防振的厂房内,室温为 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 。

机床的主要性能如下: X、Z 轴的最小分辨力为 1nm , C、B 轴的最小分辨力为 0.0001° 和 0.00001° ,当主轴的最大供气压力为 $6 \times 10^6\text{Pa}$ 时,回轉速度为 $55000\text{r}/\text{min}$ 。

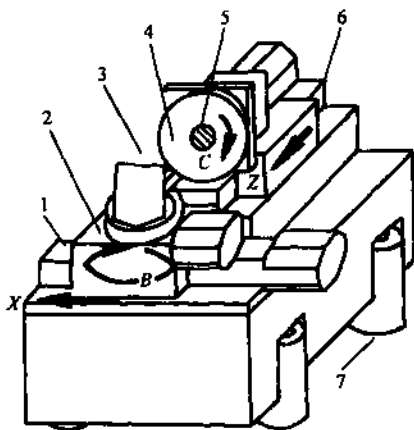


图 5-41 车床型超精密加工铣床结构
1—气浮导轨 2—B 工作台 3—空气主轴
4—金刚石刀具 5—工件 6—气浮导轨
7—空气-油减振器

第 2 篇 精密特种加工

第 6 章 精密特种加工

1 概述

1.1 特种加工含义

特种加工是相对于常规加工而言的,在国外称之为非传统性加工(Nontraditional Machining),或称非常规加工。它是指一些利用力、热、声、光、电、磁、原子、化学等能源的物理的、化学的非传统加工方法。

由于早在第二次世界大战后期就发明了电火花加工,因此出现了电加工的名称,以后陆续出现了电解加工、超声波加工等特种加工方法,但往往仍沿袭电加工这一名称,成立了电加工学会,一直到近几年才明确提出了特种加工的概念。

特种加工的概念应该是相对的,一些过去认为是特种加工的方法,如电火花加工、电解加工,现在已十分普遍,而新近出现的激光加工、快速成形制造又纳入特种加工范畴,其内容将随着加工技术的发展而变化。

1.2 特种加工方法的种类

特种加工方法的类别很多,根据加工机理和所采用的能源,可分为以下几类。

(1) 力学加工 应用机械能来进行加工,如磨粒流加工(AFM)、磨料喷射加工(AJM)、液体喷射加工(HDM)等。

(2) 电物理加工 利用电能转换为热能进行加工,如电火花加工(EDM)、电火花线切割加工(WEDM)、等离子体加工(PAM)、电子束加工(EBM)等;利用电能转换为机械能进行加工,如离子束加工(IBM)等。

(3) 电化学加工 利用电能转换为化学能进行加工,如电解加工(ECM)、电铸加工(ECM)、涂镀加工(EPM)等。

(4) 物理加工 利用声能转换为机械能进行加工,如超声波加工(USM);利用光能转换为热能进行加工,如激光束加工(LBM)。

(5) 化学加工 利用化学能或光能转换为化学能来进行加工,如化学铣削(CHM)、光刻加工(PCM)(即刻蚀加工、光化学加工)等。

(6) 复合加工 将常规加工方法和特种加工方法叠加在一起就形成复合加工,其中有一种特种加工与一种常规加工的复合加工,如电解磨削(ECG);有二种特种加工方法与一种常规加工方法的复合加工,如超声电解磨削(USECG);最多有四种加工方法叠加在一起的复合加工,如超声电火花电解磨削(USEDECG)等。

从材料加工成形机理来分析,特种加工又可分为去除加工、结合加工和变形加工。

去除加工又称分离加工,是从工件上去除一部分材料而成形。

结合加工是利用理化方法将不同材料或相同材料结合(Bonding)在一起,是一种堆积成形加工。按结合方法和结合强弱又可分为附着(Deposition)、注入(Injection)和连接(Jointed)三种。附着又称沉积,是在工件表面上覆盖一层物质,是一种弱结合,典型的加工方法是镀;注入是在工件表层上渗入某些元素,并与基体材料产生物化反应以改变工件表层材料的力学及机械性质,是一种强结合,典型的加工方法如氮化、渗碳等;接合是将两种材料通过物化方法连接在一起,如激光焊接、化学粘接等,近年才问世的快速成形制造(RPM)就是一种材料分层堆积制造方法,是一种连接法。

加工概念中不仅包含工件尺寸、形状的变化,还包含工件表面层粗糙度、材料的化学成分、组织结构、力学及物理性质的变化,有“处理”的含义。

变形加工又称流动加工,是利用力、热、分子运动等手段使工件产生变形,改变其尺寸、形状和性能。

表 6-1 表示了特种加工的范畴。

表 6-1 特种加工方法的范畴

分 类	加 工 机 理		加 工 方 法
去 除 加 工	力学加工		磨粒流加工磨料喷射加工、液体喷射加工
	电物理加工		电火花加工、电火花线切割加工、等离子体加工、电子束加工、离子束加工
	电化学加工		电解加工
	物理加工		超声波加工、激光加工
	化学加工		化学铣削、光刻加工
	复合加工		电解磨削、超声电解磨削、超声电火花电解磨削、化学机械抛光
结 合 加 工	附 着 加 工	物理加工	物理气相沉积, 离子镀
		热物理加工	蒸镀、熔化镀
		化学加工	化学气相沉积、化学镀
		电化学加工	电镀、电铸、刷镀
	注 入 加 工	物理加工	离子注入, 离子束外延
		热物理加工	晶体生长、分子束外延、渗碳、掺杂、烧结
		化学加工	氮化、氧化、活性化学反应
		电化学加工	阳极氧化
连 接 加 工		激光焊接化学粘接、快速成形制造	
变 形 加 工	热流动加工		锻造
	粘滞流动加工		铸造、压铸、注塑等液体流动加工
	分子定向加工		液晶定向

1.3 特种加工的特点

1) 特种加工主要不是依靠刀具和磨料、磨具来进行切削和磨削,而是利用电能、光能、声能、热能、化学能、磁能、分子动能等来加工金属和非金属材料,工件和工具之间无明显的

切削力，只有微小的作用力，在机理上与传统加工有很大不同。

2) 特种加工中，工具的硬度和强度可以低于工件的硬度和强度，因为它主要不是靠机械力来切削，适于加工高硬度材料、脆性材料等难加工材料，也适于加工精密微细零件、薄壁零件、弹性零件等易变形零件。又由于工具的损耗小，甚至不损耗，可加工复杂成形表面、型腔等。

3) 当前，特种加工已向精密加工方向发展，出现了精密特种加工，许多特种加工方法同时又是精密加工方法、微细加工方法，如电子束加工、离子束加工、激光束加工等就是精密特种加工；精密电火花加工的加工精度可达微米级(0.5~1 μm)，表面粗糙度可达镜面(R_a 0.02~0.012 μm)。

4) 特种加工中的能量易于转换和控制，工件在一次装夹中可实现粗、精加工，有利于保证加工精度，提高生产率。

5) 特种加工在加工概念的范畴上有很大扩展，包含了去除、结合和变形等加工和处理，特别是快速成形制造，采用分层堆积制造方法，对制造技术的发展有重要意义。

1.4 特种加工技术的应用范围

特种加工的应用十分广泛，表 6-2 表示了常用特种加工方法的综合比较与主要适用范围。

表 6-2 常用特种加工方法综合比较与主要适用范围

加工方法	可加工材料	工具损耗率 (%) 最低/平均	材料去除率 $/(mm^3/min)$ 平均/最高	可达到尺寸精度/mm 平均/最高	表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$ 平均/最小	棱角半径 /mm	加工斜度	主要适用范围
电火花加工 (EDM)	任何导电的金属材料，如硬质合金、耐热合金、不锈钢、淬火钢、钛合金	1/50	30/3000	0.05/0.005	6.3/0.1	0.03	< 10	从数微米的孔、槽到数米的超大型模具、工件等。如圆孔、方孔、异形孔、螺纹孔、微型孔、深孔以及冲模、锻模、压铸模、塑料模、拉丝模等。表面强化、刻字、涂覆
电火花线切割加工 (WEDM)	任何导电的金属材料，如硬质合金、耐热合金、不锈钢、淬火钢、钛合金	极小 (可补偿)	5/60	0.02/0.005	3.2/0.4			切割各种冲模、塑料模、片类零件、样板、喷丝板异形孔、磁钢、贵重稀有材料，也可切割半导体或非导体

(续)

加工方法	可加工材料	工具损耗率 (%) 最低/平均	材料去除率 $V/(mm^3/min)$ 平均/最高	可达到尺寸精度/mm 平均/最高	表面粗糙度 $R_a/\mu m$ 平均/最小	棱角半径/mm	加工斜度	主要适用范围
电解加工 (ECM)	任何导电金属材料, 如硬质合金、耐合金、不锈钢、淬火钢、钛合金	不损耗	100/10000	0.1/0.03	0.8/0.1	0.3	≥ 10	从小零件到 1t 重的超大型工件, 如仪表微型小轴、涡轮叶片、压气机转子叶片、机匣、炮管膛线、螺旋花键孔、各种异形孔、冲压膜、挤压模、铸造模、锻模等型面加工、抛光、切割、去毛刺等
电解磨削 (ECG)		1/50	1/100	0.02/0.001	0.8/0.02			难加工硬质合金刀具、涡轮叶片榫头、细长杆件、量具、轧辊、小孔、深孔等磨削
化学加工 (CHM)			20/-	0.07-	2.5/0.5	1.5		金属板材去除一定厚度大面积材料, 如飞机结构件、蒙皮等薄壁零件加工复杂型孔、金属表面蚀刻图案、花纹文字等
超声波加工 (USM)	任何脆性非金属及金属材料	0.1/10	1/50	0.03/0.005	0.4/0.1	0.03	0.005	加工硬脆材料, 如玻璃、云母、石英、宝石、金刚石等; 还可加工各种孔形、型腔、弯孔、切割、雕刻等
激光加工 (LBM)	任何材料	不损耗	瞬时去除率很高; 受功率限制, 平均去除率不高	0.01/0.001	6.3/0.1	0.25	$1^\circ \sim 2^\circ$	加工各种金属、半导体和非导体材料; 打孔、切割、焊接、划线、动平衡去除材料、热处理; 加工金刚石拉丝模、仪表宝石轴承、化纤喷丝头; 钛、镍、铜、铝、硅、石棉、玻璃等材料打微孔; 切割贵重材料、玻璃、石棉、复合材料、木材、皮革、橡胶等

(续)

加工方法	可加工材料	工具损耗率 (%) 最低/平均	材料去除率 $/(mm^3/min)$ 平均/最高	可达到尺寸精度/mm 平均/最高	表面粗糙度 $R_a/\mu m$ 平均/最小	棱角半径/mm	加工斜度	主要适用范围
电子束加工 (EBM)	任何材料	不损耗	瞬时去除率很高; 受功率限制, 平均去除率不高	0.01/0.001	6.3/0.1	0.25	$1^\circ \sim 2^\circ$	在各种难加工材料上打微孔、镀膜、焊接、曝光、切缝、蚀刻
离子束加工 (IBM)			很低	$>0.01\mu m$	>0.006			对零件表面进行超精加工、超微量加工、抛光、蚀刻、注入、镀膜等
等离子体加工 (PAM)			15000	1.5	粗		$1^\circ \sim 7^\circ$	焊接切割
磨料喷射加工 (AJM)		喷嘴损耗	20	0.05/~	0.15/1.6	0.10	0.005	切割、去毛刺、清理工件表面、刻蚀等。可加工玻璃、陶瓷等脆性材料, 亦可雕刻打孔、薄片等

注: 该表取自参考文献[16]

表 6-3 表示了几种常用的特种加工方法对工件材料的适用性。

表 6-3 特种加工对工件材料的适用性

加工方法	工件材料							
	铝	铜	超级合金	钛	难溶合金	陶瓷	塑料	玻璃
电解加工	良	优	优	良	良	不能加工	不能加工	不能加工
电火花加工	良	优	优	优	优	不能加工	不能加工	不能加工
电子束加工	良	良	良	良	优	优	良	良
等离子弧加工	优	优	优	良	劣	不能加工	劣	不能加工
激光加工	良	良	良	良	劣	优	良	良
超声加工	劣	良	劣	良	优	优	良	优
化学加工	优	优	良	良	劣	劣	劣	良
磨料喷射加工	良	良	优	良	优	优	良	优

2 电火花加工

电火花加工 (EDM-Electrical Discharge Machining) 又称放电加工、电蚀加工, 电脉冲加工, 它是在工具和工件之间不断产生脉冲火花放电, 利用瞬时火花放电所产生的局部高温蚀除金属材料。

2.1 电火花加工的基本原理、特点及分类

2.1.1 电火花加工的基本原理

图 6-1 是电火花加工原理和基本设备简图，由直流脉冲电源提供直流脉冲。正极性接法是将工件接阳极，工具接阴极；负极性接法是将工件接阴极，工具接阳极。工作时，工件电极和工具电极均浸泡在工作液中，工具电极在自动进给调节装置的驱动下缓缓下降，与工件电极保持一定的放电间隙，利用工件电极与工具电极之间脉冲性火花放电所产生的瞬时局部高温将金属工件蚀除，它是电力、热力、磁力和流体动力等综合作用的过程，一般可分为四个连续的加工阶段。

(1) 极间介质电离、击穿、形成放电通道 当脉冲电压加至工具电极与工件电极之间时，极间形成电场，由于两极的微观表面不平，极间距离是不均匀的，极间电场强度也是不均匀的，两极间相距最近的突出点或尖端处的电场强度最大。随着极间距离的缩小，液体介质中不可避免含有的导电杂质（如金属微粒、碳粒子等），以及一些自由电子，在电场作用下，在电场强度最大处产生搭桥，阴极表面产生场致电子发射，电子高速向阳极运动，撞击工作液介质中的分子和中性原子，形成碰撞电离。工作液介质被分解为负电子和正离子，形成雪崩式电离过程，极间被击穿，形成等离子体放电通道。通常，电场强度可达 $10^5 \text{V/mm} \sim 10^2 \text{V/mm}$ 。

(2) 极间放电、材料热蚀 极间介质被电离、击穿、形成放电通道后，通道间的负电子高速冲击阳极，正离子高速冲击阴极，电能变为动能，动能通过碰撞又转变为热能、磁能、声能、电磁波辐射能、光能等，但大部分转换为热能，产生火花放电，并伴有声响。由于放电通道受到磁场力和周围液体介质的压缩，通道截面小，电流密度可高达 $10^5 \sim 10^6 \text{A/cm}^2$ ，中心通道温度达 10000°C 以上，瞬时压力达 10^7Pa 。高温使两极放电点局部熔化或气化，形成过热金属。同时，通道中的介质汽化和热裂分解，如煤油等碳氢化合物将裂解为 H_2 、 CH_2 、 C_2H_2 、 C_2H_4 和游离碳等，水基工作物将裂解为 H_2 、 O_2 的分子或原子等；通道周围的工作液也会变热气化，形成气泡区。极间放电的电压和电流波形如图 6-2 所示，这时所用的脉冲为方波。

(3) 蚀除产物的抛出 极间放电所造成的介质热分解、电极材料熔化、气化热膨胀和局部微爆炸，使熔化、气化了电极材料蚀除物抛出，向四处飞溅，大部分抛入工作液中收缩为小颗粒，一小部分飞溅、镀覆、吸附在对面的电极表面上，如利用得当，可减少或补偿工具电极的损耗。当放电结束时，由于气泡壁上蒸汽冷凝及液体介质惯性作用，使气泡继续扩展，从而使气泡内压力急剧降低，甚至降低到大气压以下，形成局部真空，使在高压下溶解在熔化和过

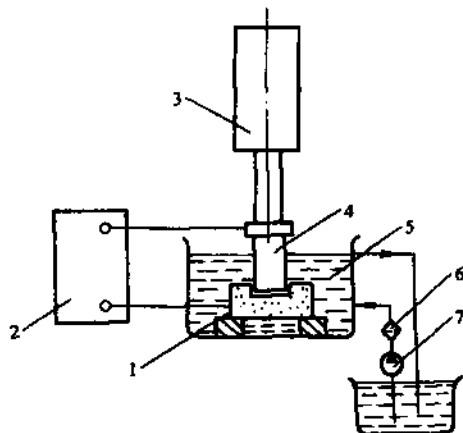


图 6-1 电火花加工原理和基本设备简图

1—工件电极 2—直流脉冲电源 3—自动进给调节装置 4—工具电极 5—工作液 6—过滤器 7—工作液泵

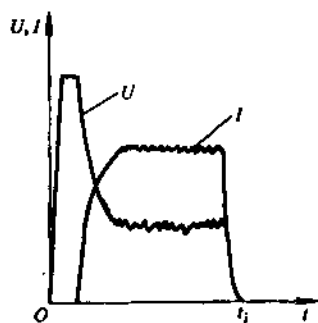


图 6-2 方波脉冲时极间放电电压和电流波形

热材料中的气体析出，熔融材料在低压下再汽化沸腾，从小坑中再次爆沸、飞溅而被抛出，形成球状小颗粒在工作液中凝固。电极表面形成放电凹坑。

(4) 极间介质的消电离 一次脉冲放电结束后，随着气泡收缩而破裂，带电粒子迅速减少，放电通道中的带电粒子复合为中性粒子，间隙介质恢复其绝缘强度，使极间介质消电离，成为绝缘状态，形成一段间隔时间，以免造成电弧放电。间隔时间的确定要考虑介质本身消电离的时间、蚀除物排离放电区域的难易程度等因素。

图 6-3 表示电火花加工的放电状态示意图和加工表面的形成，其中图 a 表示了放电间隙的状态；图 b 表示单脉冲放电所形成的凹坑；图 c 表示工件加工表面的形成，由于电火花加工是脉冲放电，其加工表面由无数个脉冲放电所形成的小凹坑组成，工具的轮廓和截面形状就在工件上形成。

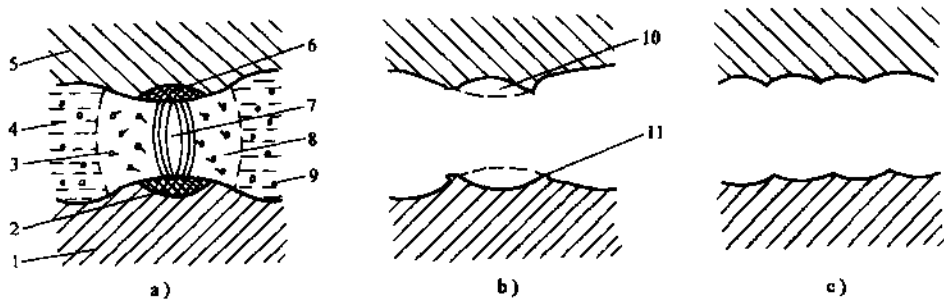


图 6-3 电火花加工放电状态示意图和加工表面的形成

- a) 放电间隙的状态 b) 单脉冲放电所形成的凹坑 c) 加工表面的形成
 1—工件电极 2—工件电极上抛出金属蚀除物区域 3—熔化的金属微粒
 4—工作液 5—工具电极 6—工具电极上抛出蚀除物区域
 7—放电通道 8—气泡 9—在工作液中凝固的金属微粒 10—凹坑 11—翻边凸起

2.1.2 电火花加工的特点及其应用

(1) 较软的工具电极材料加工较硬的工件材料 加工中的材料去除是靠电蚀作用实现的，材料的可加工性与其导电性和热学特性(熔点、沸点、热导率、比热容等)有关，与其力学性能几乎无关，因此，电火花加工主要适合于加工硬脆难加工材料。

(2) 复杂型面和特殊形状的加工 制作成形工具电极可直接加工复杂型面，或用简单的工具电极靠数控系统完成复杂形状加工。可用成形电极加工方孔等异形孔，以及用特殊运动轨迹加工曲孔等。

(3) 易变形零件及精密零件的加工 由于电火花加工几乎无切削力，故适于加工低刚度易变形的零件，进行精密加工和微细加工，精密电火花加工的精度可达 $0.5 \sim 1 \mu\text{m}$ ，表面粗糙度可达 $R_a 0.02 \sim 0.012 \mu\text{m}$ ，而且会向更精密的方向发展。由于工具电极有损耗，并多集中在尖角和底面，又由于最小角部半径有限制($R = 0.02\text{mm}$)，影响成形精度。

(4) 主要用于加工金属导电材料 加工非导体和半导体材料需要在特殊条件下，这是当前的研究方向，如用高电压法、电解液法可加工金刚石、立方氮化硼、红宝石、玻璃等超硬和硬脆非导电材料。

(5) 加工生产率较低 可采用特殊工作液、减少加工余量等方法来提高。

(6) 易于实现自动控制 直接利用电能加工，便于实现加工过程自动化。当前，电火花加

工绝大多数采用数控技术，几乎都是用数控电火花加工机床进行加工。

(7) 工具电极易于制造 由于电火花加工时，工具电极与工件不接触，几乎无作用力，因此，工具电极材料可用紫铜、石墨等材料，易于加工制造。但由于工具电极有损耗，制造电极的工作量也是很大的。

(8) 工件表面存在电蚀硬层 工件表面由众多放电凹坑组成，硬度较高，不易去除，影响后续工序加工。

2.1.3 电火花加工方法分类

按工具电极的形状、工具电极与工件电极的相对运动方式和用途，可将电火花加工归纳为五大类，即电火花成形加工(又称电火花成形穿孔加工)、电火花线切割加工、电火花磨削加工、电火花展成加工(即电火花同步共轭回转加工)、电火花表面处理。总的来说，电火花加工可分为电火花成形加工和电火花线切割加工两大类。图 6-4 表示了电火花加工的分类。

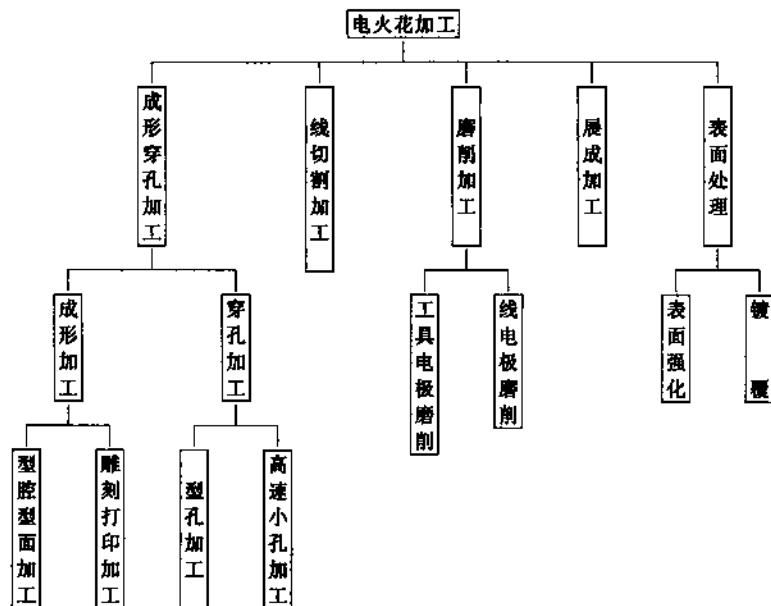


图 6-4 电火花加工分类

(1) 电火花成形穿孔加工 包括成形加工、穿孔加工等。

电火花成形加工一般是指三维型腔和型面加工，雕刻、打印、打标记也应包括在内，如图 6-5 所示。

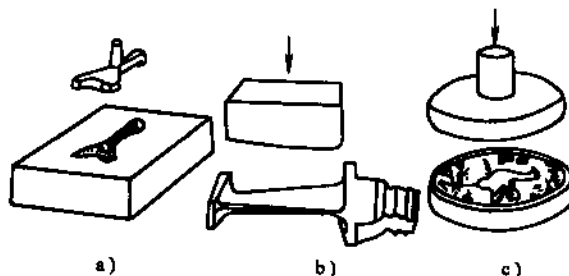


图 6-5 电火花成形加工

a) 型腔加工 b) 型面加工(叶片成形表面) c) 雕刻

电火花穿孔加工一般指二维型孔加工，片电极切割、侧面成形、反拷贝加工也应包括在内，如图 6-6 所示。同时还应包括为电火花线切割预穿丝孔、小深孔的电火花高速小孔加工，现已有专门机床。

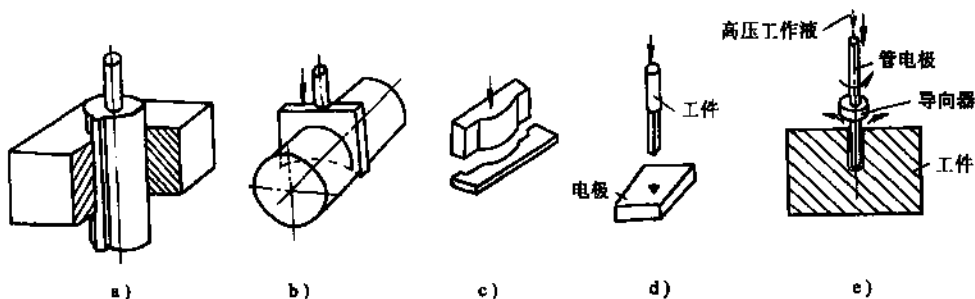


图 6-6 电火花穿孔加工

a) 型孔加工 b) 片电极切割

c) 侧面成形加工 d) 反拷贝加工 e) 高速小孔加工

(2) 电火花线切割加工 是一种用线状工具电极的电火花加工方法，可进行切形、切断、切窄缝等加工，如图 6-7 所示。

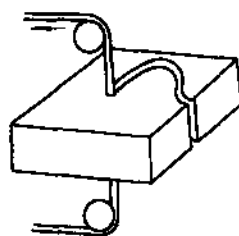


图 6-7 电火花线切割

(3) 电火花磨削 类似切削加工的种类，有电火花磨削、铣削、镗削等，可加工平面、外圆、内孔、成形表面，如图 6-8 所示。

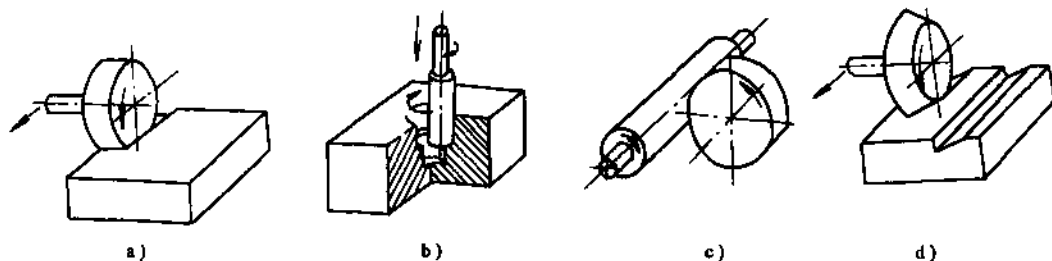


图 6-8 电火花磨削加工

a) 平面加工 b) 内圆加工 c) 外圆加工 d) 成形表面加工

(4) 电火花展成加工 是利用成形工具电极和工件电极作对应的展成运动实现成形加工，实际上是一种同步共轭回转加工，如图 6-9 所示为内齿轮齿面展成加工和螺旋面展成加工。

(5) 电火花表面处理 主要有电火花表面强化、镀覆等。

表 6-4 列出了各种电火花加工方法的运动分析、特点及应用，以及典型机床

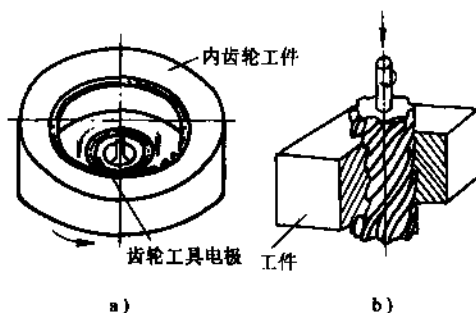


图 6-9 电火花展成加工

a) 内齿轮加工 b) 螺旋孔加工

表 6-4 各种电火花加工方法

加工方法		运动分析	特点及应用	典型机床	
成形穿孔加工	成形加工	型腔型面加工	工具和工件之间只要有一个相对的伺服进给运动 工具为成形电极, 与被加工表面有相同的截面或形状 利用数控系统, 可用简单工具电极通过 3~4 个坐标进给运动完成成形加工	型腔型面加工: 加工各种型腔模及各种带型面、型腔零件	D7125、D7140 等电火花成形机床
		雕刻打印加工		电火花刻字、雕刻图案、打印记	
	穿孔加工	型孔加工		型孔加工: 加工各种冲模、挤压模、粉末冶金模、各种异形孔、微孔等 片电极切割 侧面成形加工 反拷贝加工	D7125、D7140 等电火花成形机床
		高速小孔加工	用直径 0.3~3mm 的细管电极加工时电极回转, 管中通高压工作液	加工线切割预穿孔 加工深径比大的小孔 穿孔效率高, 可达 60mm/min	D7003A 电火花高速小孔加工机床
线切割加工		工具电极为丝状 快速走丝时, 丝状电极作高速往复运动; 慢速走丝时, 丝状电极作单方向慢速移动 工件装于工作台, 工作台在两个水平方向作进给运动 多坐标切割时, 丝架可绕两个水平轴作摆动	切割各种冲模 切割具有直纹面的零件, 包括两端面为不同大小或形状的直纹面零件	DK7725、DK7732 数控电火花切割机床	
磨削加工	工具电极磨削、铣削、镗削	工具和工件间有相对回转运动 工具和工件间有径向和轴向进给运动 类似磨、铣、镗等加工运动	加工高精度低表面粗糙度的小孔, 如拉丝模、挤压模、微型轴承内环、钻套等上的孔 加工外圆、小模数滚刀等 加工平面	D6310 电火花小孔内圆磨床	
	线电极磨削	采用线状电极 工件回转, 并作两个方向的进给运动	加工高精度低表面粗糙度的针状零件、小直径的轴类零件		
展成加工		成形工具电极与工件均作旋转运动, 以同步回转, 倍角速回转展成回转加工 工具对工件作径向和轴向进给运动	加工各种复杂型面零件, 如齿轮、螺紋、异形齿轮、螺紋环规、蜗轮蜗杆等 加工高精度、低表面粗糙度外回转体表面	JN-2、JN-8 内外螺紋电火花加工机床	
表面处理		工具在工件表面上振动 工具相对工件移动	运动导轨、刀具、量具和模具刃口表面强化和镀膜	D9105 电火花强化机	

2.2 电火花加工的基本规律

2.2.1 影响材料蚀除量的基本因素

(1) 极性效应 电火花加工过程中,无论是正极还是负极,都会受到不同程度的电蚀,由于工具和工件的正负极性接法不同而使得蚀除量不一样的现象,称为极性效应。通常将工件接脉冲电源的阳极,工具电极接阴极,称正极性加工;工件接阴极,工具电极接阳极,称负极性加工或反极性加工。一般不加说明时,都指正极性加工。

产生极性效应的原因很复杂,主要原因是在电火花放电过程中,阳极和阴极分别受到负电子和正离子的轰击和瞬时热源作用,在两极表面上所接受的能量不一样,从而熔化、气化抛除的蚀除量也不一样。另外,电极表面的吸附、镀覆的影响也不容忽视。

影响极性效应的因素很多,有脉宽、脉间、脉冲峰值电流、放电电压、工作液以及电极对材料等。就脉宽而言,当脉宽短时,由于电子质量轻、惯性小,很快就能以高速度轰击阳极,阳极蚀除量大。这时,离子由于质量大、惯性大,不如电子快,比电子要滞后一些才能轰击阴极,而由于是在短脉宽情况,故可能来不及发挥作用,或作用较小。又由于电子质量轻,轰击阳极的精度高、表面质量好,故适于电火花精加工。当脉宽长时,离子能获得高速轰击阴极,离子质量大,阴极蚀除量大,适于电火花粗加工和半精加工。

从极性效应可知:

1) 在电火花加工中,极性效应愈显著愈好,应充分加以应用。图 6-10 表示了脉宽与蚀除量之间的定性关系,在电火花精加工时,宜采用短脉宽正极性加工,以求得电子轰击的小蚀除量;在电火花粗加工和半精加工时,宜采用长脉宽负极性加工,以求得离子轰击的大蚀除量,提高加工生产率。

2) 电火花加工都采用直流脉冲电源,不用交流脉冲电源,否则极性效应等于零,增加了工具电极的损耗。

综上所述,应充分利用极性效应,正确选用极性、电极对材料和电参数等,使工件的蚀除速度快、蚀除量大、工具损耗小。

(2) 脉冲能量 在电火花加工中,蚀除量是指一段时间蚀除工件金属材料的体积或重量。单位时间的蚀除量称为蚀除速度。某一段时间内,总的蚀除量 M 等于其间有效脉冲数和单个脉冲蚀除量的乘积。

$$M = Nm$$

式中 M ——一段时间内的总蚀除量(g);蚀除量可用重量和体积两种单位表示;

N ——该段时间内的有效脉冲数(个);它与有效脉冲利用率有关;

m ——单个有效脉冲蚀除量(g)。

单个脉冲的蚀除量一般取决于单个脉冲能量 W_e ,在一定范围内成正比关系。

$$W_e = \int_0^{\mu} U_e(t) I_e(t) dt \approx \bar{U}_e \bar{I}_e t_e$$

式中 W_e ——单个脉冲能量(J);

\bar{U}_e ——间隙平均放电电压(V);

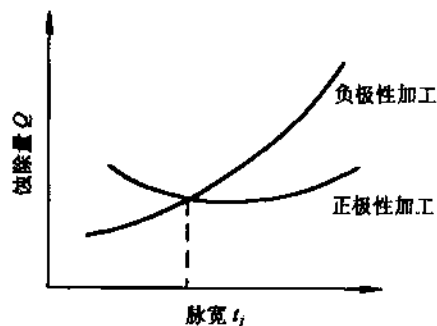


图 6-10 脉宽与蚀除量之间的定性关系

I_e ——间隙平均放电电流(A);

t_e ——放电时间(μs);

$U_e(t)$ ——间隙瞬时放电电压(V);

$I_e(t)$ ——间隙瞬时放电电流(A)。

$$m = K_m W_e = K_m \bar{U}_e \bar{I}_e t_e$$

式中 K_m ——与电极材料、脉冲参数、工作液等有关的工艺系数。电极对为铜—钢时, $K_m = 9.4 \times 10^{-11}$ 。

在阳极和阴极上, 单个脉冲的蚀除量 m 是不等的, 应分别计算。

由于放电间隙的负阻特性, 击穿后放电电压变化很小, 几乎是常数, 同时, 方波脉冲的 I_e 与放电峰值电流 \bar{I}_e 接近, 因此, 单个脉冲的能量主要取决于放电峰值电流 \bar{I}_e 和放电时间 t_e , 放电时间还可近似地用脉冲宽度 t_j 代替。

$$m = K_m \bar{U}_e \bar{I}_e t_j$$

式中 t_j ——脉冲宽度(μs)。

当电极对材料为紫铜—钢时, 放电电压为 20~25V; 电极材料对为石墨—钢时, 放电电压为 30~35V。

因此, 单个脉冲蚀除量 m 可分别写成

$$m = K_m (20 \sim 25) \bar{I}_e t_j$$

$$m = K_m (30 \sim 35) \bar{I}_e t_j$$

一段时间内的总蚀除量 M 为

$$M = Nm = K_m \lambda f_p \bar{U}_e \bar{I}_e t_j t$$

式中 λ ——频率比, 即有效脉冲利用率;

f_p ——脉冲频率(Hz);

t ——加工时间(s)

(3) 金属材料热学常数 热学常数是指熔点、沸点、热导率(导热系数)、比热容、熔化潜热、气化潜热等。常用材料的热学常数见表 6-5。

表 6-5 常用材料的热学常数

热学常数	材 料				
	铜	石墨	钢	钨	铝
熔点 $T_f/^\circ\text{C}$	1083	3727	1535	3410	657
沸点 $T_b/^\circ\text{C}$	2595	4830	3000	5930	2450
热导率(导热系数) $\lambda/[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$	3.998	0.800	0.816	1.700	2.378
比热容 $c/[\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})]^\text{①}$	393.6	1674.7	695.0	154.9	1004.8
熔化潜热 $q_f/(\text{J}/\text{kg})^\text{②}$	179258.4	—	209340	159098.4	385185.6
气化潜热 $q_g/(\text{J}/\text{kg})^\text{③}$	5304256.9	46054800	6290667	3391000	10894053.6
热扩散率 $a = \lambda/c_p \rho (0.86 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s})$	1.141×10^{-3}	2.171×10^{-4}	1.486×10^{-4}	5.686×10^{-4}	9.317×10^{-4}
密度 $\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	8.9	2.2	7.9	19.3	2.54

①比热容: 材料从原始温度到熔点, 每 1kg 材料温度升高 1K 所需热量。

②熔化潜热: 每熔化 1kg 材料所需的热量。

③气化潜热: 每气化 1kg 材料所需的热量。

当脉冲能量相同时，金属材料的熔点、沸点、比热容、熔化潜热、气化潜热愈高，电蚀愈困难，蚀除量愈小。金属材料的热导率愈大，热量散失愈多，蚀除量愈小。热扩散率的影响与热导率相同。

根据热学理论，放电痕熔化体积 V 可用下式求出：

$$V = \frac{Q}{c_p (T_r - T_0) + \rho q_r}$$

式中 V ——电极上脉冲放电痕熔化体积(cm^3)；

Q ——电极上脉冲放电区域集聚的热量 J；

c ——比热容($\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$)；

ρ ——密度(g/cm^3)；

T_r ——熔点($^{\circ}\text{C}$)；

T_0 ——原始温度($^{\circ}\text{C}$)；

q_r ——熔化潜热(J/kg)。

(4) 脉冲宽度 当在电极材料、脉冲能量等条件相同的情况下，脉冲宽度不同，蚀除量的差异很大。若用电蚀凹坑深度 h 表示蚀除量时，脉宽 t_j 与蚀除量的关系如图 6-11 所示。脉宽短时，热量来不及扩散，散失的热量减小，但抛出的金属中气化部分比例增大，耗用的气化热增加，总的结果是蚀除量减小；脉宽长时，放电峰值电流 \bar{I}_d 减小，散失的热量增加，从而使得蚀除量降低。因此，对各种材料均有最佳脉宽，这时蚀除量最大。对铜电极，其最佳脉宽 t_j' 如图所示。

不同材料，由于其热学常数不同，最佳脉宽各异，钢的熔点、沸点、比热容比铜高，其最佳脉宽比铜的要大。如果取最佳脉宽为 t_j' ，则钢电极蚀除量最大，而铜电极蚀除量很小，用铜作工具电极，则正好满足加工要求。

(5) 工作液 工作液的作用是形成火花击穿放电通道，对放电通道产生压缩作用，帮助蚀除物的抛出和排除，并对电极起冷却作用，因此对蚀除量影响较大。

目前，常用的工作液有 L-AN 油(全损耗系统用油)、煤油、去离子水、乳化液等。L-AN 油粘度大，有利于压缩放电通道，提高放电的能量密度，强化蚀除物的抛出，但放电产生的碳黑多，粘度大，对排屑不利，多用于粗加工。煤油粘度低，排屑条件好，多用于半精、精加工。水基工作液蚀除速度快，利于排屑，但绝缘强度低，易锈蚀机床，对放电通道的压缩作用差，蚀除量小；还会产生电化学阳极溶解和阴极电镀沉积，影响蚀除量。

(6) 加工过程的稳定性 加工深度大、加工型面复杂、电极对材料的配置、加工速度过低、电参数选择不当，均会影响加工过程稳定性，干扰以致破坏正常火花放电，降低有效脉冲利用率，影响蚀除量。

(7) 脉冲波形 脉冲放电电流波形对蚀除量影响较大，可参考图 6-2，当电流波形的前沿较陡时，电流上升率快，送能速度快，放电通道剧烈扩张，热流密度减小，蚀除量减小；当电流波形的前沿较缓时，电流上升率慢，热传导散失热量多，放电通道扩张缓慢，热流密度减

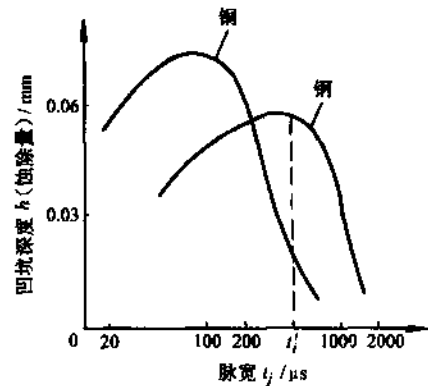


图 6-11 不同材料时脉宽与蚀除量的关系

小, 蚀除量也减小。

此外, 若电极材料瞬时熔化或气化而抛出的速度很高时, 会冲击到另一电极表面而使其蚀除量增加; 当抛出速度低时, 可能会粘附在另一电极表面上而使其蚀除量减小。

2.2.2 加工速度和损耗速度

电火花加工时, 工件和工具电极会同时遭到不同程度的电蚀, 单位时间内工件的蚀除量称为加工速度, 即生产率; 单位时间内工具电极的蚀除量称为损耗速度。

1. 加工速度

可用单位时间内蚀除物的体积或重量来表示(mm^3/min 或 g/min)。

$$v_w = M/t$$

$$v_w = K_m \bar{U}_e \bar{I}_e t_j \lambda f_p \cdot 60$$

式中 v_w ——加工速度(mm^3/min 或 g/min);

M ——加工时间 t 内的蚀除量(mm^3 或 g)。

影响加工速度的因素很多, 且相互之间有制约和矛盾。提高脉冲频率 f_p 、频率比(有效脉冲利用率) λ 、加大脉冲宽度 t_j 等均可提高加工速度, 但提高脉冲频率会减小脉冲间歇时间, 可能造成来不及消电离恢复绝缘, 易造成电弧放电; 加大脉冲宽度也会减小脉冲间歇时间, 有同样问题。增加单个脉冲能量可提高加工速度, 但会降低加工精度和增加表面粗糙度值, 只适用粗加工和半精加工。合理选择电极材料、电参数和工作液, 改善工作液的循环过滤方式等, 会提高有效脉冲利用率 λ 和工艺系数 K_m 。

电火花成形加工的加工速度如下:

粗加工($R_a 10 \sim 20\mu\text{m}$)时为 $200 \sim 1000\text{mm}^3/\text{min}$;

半精加工($R_a 2.5 \sim 10\mu\text{m}$)时为 $20 \sim 100\text{mm}^3/\text{min}$;

精加工($R_a 0.32 \sim 2.5\mu\text{m}$)时为 $10\text{mm}^3/\text{min}$ 以下。

2. 工具电极损耗速度 通常用相对损耗或称损耗比来衡量工具电极耐损耗程度。

$$\theta = \frac{v_e}{v_w} 100\%$$

式中 θ ——相对损耗, 可用电极对在体积、重量或长度上的相对损耗值来表示;

v_e ——工具电极的损耗速度(mm^3/min 、 g/min 或 mm/min);

v_w ——工件的加工速度(mm^3/min 、 g/min 或 mm/min)。

降低工具电极的损耗可以提高加工速度、延长工具电极使用期限等, 意义重大, 其主要措施有以下几方面:

(1) 正确选择极性 通常短脉宽、精加工时用正极性加工, 这时工件接阳极, 相对损耗约为 $20\% \sim 40\%$; 长脉宽、粗加工时用负极性加工, 这时工件接阴极, 相对损耗约为 1% , 图 6-12 是电极相对损耗与极性、脉宽的关系, 图中的曲线, 其试验条件是: 紫铜—铜电极对, 工具电极为 $\phi 6\text{mm}$ 紫铜, 工作液为煤油、矩形波脉冲电源、加工电流峰值为 10A 。

(2) 吸附效应的作用 用煤油之类的碳氢化合物作工作液时, 在放电过程中会发生热分解, 产生大量的碳, 并能和金属结合形成金属碳化物的微粒, 称为胶团, 呈中性。在电场作用下可能与其可动外层脱离, 形成带负电荷的碳胶粒, 向阳极移动, 并吸附在阳极表面, 即为吸附效应。若电极表面瞬时温度高于 400°C , 又低于其熔点, 且能保持一定时间, 就能形成一定厚度的化学吸附碳层, 通常称为黑膜, 对阳极起到保护和补偿作用, 实现阳极“低损耗”加

工，但必须是负极性加工。

(3) 工具电极材料的选择 钨、钼的熔点和沸点较高，损耗小，但价格贵，加工性能不好，除线电极外很少采用；铜、银的导热性好，损耗小，加工性能好，但银较贵，采用紫铜较多；石墨的热学性能好，有吸附效应，相对损耗小，易加工，应用广泛；铜钨、银钨合金等复合材料的损耗小，但成本高，加工性能较差，多用于精密电火花加工中。因此，常用的工具电极材料有紫铜、石墨。

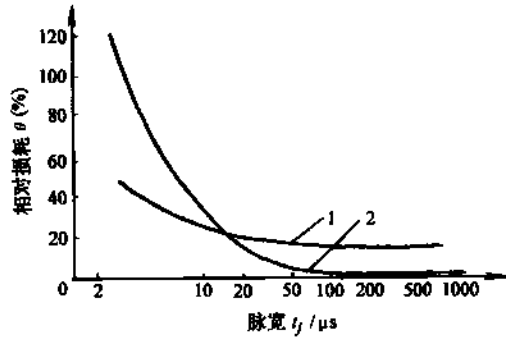


图 6-12 电极相对损耗与极性、脉宽的关系
1—正极性加工 2—负极性加工

(4) 脉冲电流增长率的限制 在放电初期，限制脉冲电流的增长率，使电流密度不致太高，从而电极表面温度不致过高而减少损耗。控制工具电极表面放电点的瞬时温度就可控制其损耗。

工具电极的损耗尚与工作液及其循环过滤、电极对配置、电参数等有关，有些影响因素相互有矛盾或制约，应综合考虑。

2.3 电火花成形加工设备

用电火花加工方法进行加工的机床统称为电火花加工机床，其中包括电火花成形加工机床、电火花线切割机床、电火花磨床、电火花高速小孔加工机床、电火花强化机等，常用的是电火花成形加工机床和电火花线切割机床。电火花加工机床的型号用 $D \times \times \times \times$ 表示，第一位符号 D 表示普通型、DM 表示精密型、DG 表示高精坐标型；第二、三位表示类型；第四、五位表示主参数。

现在，电火花成形加工机床、电火花线切割机床绝大多数为数控机床。数控电火花成形机床由主机和数控系统两大部分组成，主机又由机床部件、电源、工作液循环过滤系统等组成。

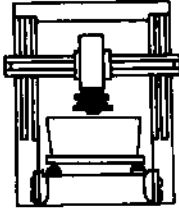
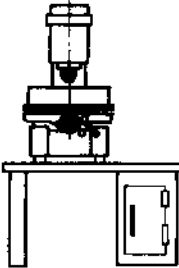
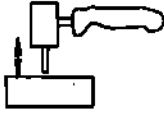
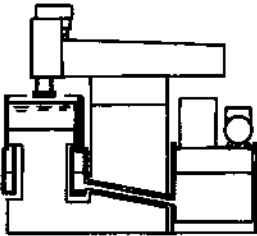
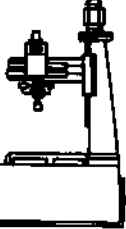
2.3.1 主机结构形式

主机由床身、立柱、主轴头、工作台等部件组成，其结构形式如表 6-6 所示。其中最普遍是立柱式，并已发展为加工中心，其上有自动换工具装置(工具库和机械手)，能自动换工具。

表 6-6 电火花成形加工机床结构形式

结构形式	特点	图示	应用
立柱式	刚性好，易于制造和装配，电极装夹方便，便于维修		广泛用于中小型机
加工中心	配有自动换工具装置，其工具库中存有多种工具，由数控程序控制通过机械手自动进行换刀		已逐渐用于复杂成形加工，但价格较高

(续)

结构形式	特点	图示	应用
龙门式	刚性好, 制造要求高		大型机, 近来扩展至中型机
台式	紧凑, 占地面积小, 刚度和精度均可满足使用要求		专用于小孔、槽加工
便携式	结构简单, 功率较小, 常用于加工对象难于移动之处		去除折断工具, 局部材料强化
滑枕式	制造方便, 刚性有保证, 油箱体积大, 工件装卸方便		中、大型机
悬臂式	导轨易磨损, 刚性及精度均较低		中型机, 渐趋淘汰

2.3.2 脉冲电源

1. 脉冲电源的作用及要求

脉冲电源的作用是将 50Hz、220V 或 380V 的交流工频电流转换为电火花加工所需要的频率较高的单向电脉冲，提供极间产生火花放电的能量。对脉冲电源的要求如下：

- 1) 有一定的脉冲放电能量。
- 2) 在峰值电流、脉冲宽度、脉冲频率等方面应有较宽的调节范围，以满足粗、半精、精加工的不同要求。

3) 脉冲应是单向的，能最大限度地利用极性效应，减少工具消耗。

4) 脉冲电压波形前沿应较陡，才能迅速将介质击穿，减少放电间隙大小、油污程度对脉宽和单个脉冲能量等参数的影响，如图 6-13 是两种不同陡度的电压波形前沿，其相应的电流波形差异很大。

5) 结构简单，可靠性好，操作调整方便，成本低。

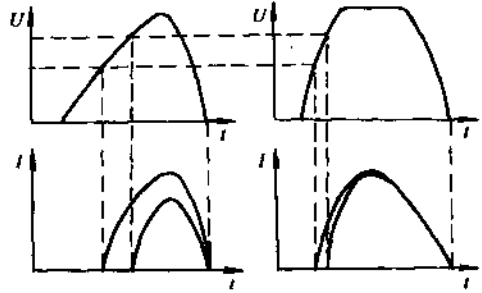


图 6-13 两种前沿不同陡度的电压波形及其相应的电流波形

2. 典型电火花加工脉冲电源

电火花加工脉冲电源种类繁多，按其作用原理、所用主要元件等，其分类如表 6-7 所示。总的可分为非独立式脉冲电源和独立式脉冲电源两大类，前者主要有弛张式脉冲电源，后者主要有电子管式、闸流管式、晶体管式、晶闸管式等，其典型线路、性能、特点和应用如表 6-8 所示。

表 6-7 电火花加工脉冲电源分类

按与放电间隙状态关系	按所用主要元件种类	按输出脉冲波形	按工作回路数目
非独立式	弛张式	矩形波	单回路
独立式	电子管式	振荡波	
可控(半独立)式	闸流管式	梳形波	多回路
	脉冲发电机式	三角形波	
	晶体管式	阶梯波	
	晶闸管式	正弦波	
	集成元件式		

(1) RC 线路脉冲电源 RC 线路是弛张式脉冲电源中最基本的一种线路，它由充电回路和放电回路构成，如图 6-14 所示。充电回路由直流电源 DC，充电电阻器 R (用于调节充电速度，同时限流以防电流过大造成电弧放电，又称限流电阻器)，电容器 C (储能作用) 所组成；放电回路由电容器 C、工件电极、工具电极和放电间隙所组成。

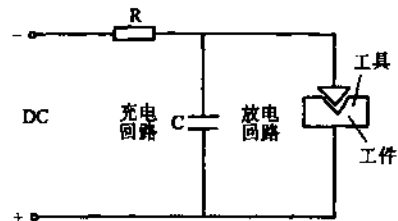
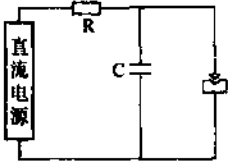
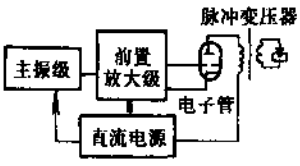
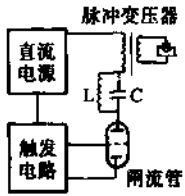
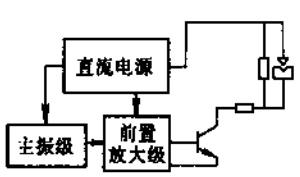
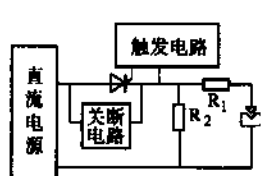


图 6-14 RC 线路脉冲电源

表 6-8 典型电火花加工脉冲电源性能、特点及其应用

类型	种类	典型电路	主要参数	单回路最大加工速度/ (mm^3/min)	最小粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	最小单面间隙/ μm	侧面斜度/ $(^\circ)$	特点及其应用
弛张式	RC RLC RLCL RLC-LC 等电路		电阻 20 ~ 1000 Ω 电容 0.005 ~ 6 μF 电感 0.25 ~ 0.4H 空载直流电压 100 ~ 350V	100	0.1	0.02	30	结构简单, 工作可靠, 使用和维修方便, 加工表面粗糙度值低 可控性差, 加工速度低, 工具电极损耗大 现主要用于微细精密加工和特殊材料加工
电子管式	双电子管、四电子管、多电子管等		频率 10 ~ 100kHz 脉冲宽度 1.5 ~ 15 μs 空载脉冲电压 80 ~ 180V	400	0.4	0.015	5 ~ 15	脉冲参数调节方便, 工艺指标稳定, 精加工时加工速度较高, 表面粗糙度值较小 脉冲参数调节范围有限, 工具电极损耗大, 多用于穿孔加工
闸流管式	单闸流管、双闸流管、四闸流管等		频率 10 ~ 60kHz 脉冲宽度 4 ~ 20 μs 空载脉冲电压 80 ~ 180V	400	0.8	0.02	10 ~ 20	线路比较简单, 工艺指标稳定, 精加工时加工速度较高 脉冲参数的调节与配合不易, 操作中要注意高电压, 工具电极损耗较大 多用于穿孔加工

(续)

类型	种类	典型电路	主要参数	单回路最大加工速度/ (mm^3/min)	最小粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	最小单面 间隙/ mm	侧面斜 度/($^\circ$)	特点及其应 用
晶体 管式	单回路、多回路、高低压回路、阶梯波、梳形波		频率 $0.25 \sim 100\text{kHz}$ 脉冲宽度 $2 \sim 200\mu\text{s}$ 空载脉冲高压 $150 \sim 350\text{V}$ 空载脉冲低压 $60 \sim 90\text{V}$ 最大 加工电流 1200A 以上	2000	0.8	0.02	5 ~ 30	脉冲参数 调节范围 广, 使用方 便, 易获得 低损耗, 易 实现自适应 控制和计算 机控制 线路较复 杂, 成本较 高 适用于多 种场合, 常 用多管并 联获得大功 率
晶 闸 管 式	单回路、多回路、高低压回路、前后尖峰波		频率 $0.25 \sim 20\text{kHz}$ 脉冲宽度 $5 \sim 1400\mu\text{s}$ 空载脉冲高压 $250 \sim 300\text{V}$ 空载脉冲低压 $60 \sim 80\text{V}$ 最大加 工电流 300A 以 上	4000	0.8	0.02	7 ~ 15	线路较简 单, 电参数 可调范围 大, 功率 大, 过载能 力强, 粗加 工时电极损 耗小 高频特性 稍差, 晶闸 管的关断和 可靠性使其 电源制造较 复杂 在大中型 机床上用于 粗中规范加 工

当接通直流电源后, 电容器 C 开始充电, 极间电压由零按指数曲线逐渐增加, 如图 6-15 所示的电压、电流波形图; 当电压升至放电间隙两端的击穿电压时, 间隙被击穿, 充电回路工作完毕。这时电容器 C 通过极间放电, 其电压按另一指数曲线下降, 同时极间有放电电流产生。当电容器 C 的能量放完, 间隙中的介质恢复绝缘, 电流中断, 如此放电回路工作完毕。此后电容再充电, 再放电, 周而复始, 一弛一张, 故称弛张式脉冲电源。

由于放电时，有寄生电感存在，当电压为零时，仍有电流继续流动，电容反向充电，形成反向脉冲电压和电流，出现负半波，呈负极性，使工具电极损耗，参见图 6-15。

RC 脉冲电源的主要参数有

$$f_p = \frac{1}{RC \ln \left(1 - \frac{1}{1 - \frac{U_0}{U}} \right)}$$

式中 f_p ——脉冲频率(Hz);
 R ——充电电阻，又称限流电阻(Ω);
 C ——电容(F);
 U ——直流电源电压(V);
 U_0 ——间隙击穿电压(V)。

$$E_0 = \frac{1}{2} CU_0^2$$

式中 E_0 ——电容器一次充电储存能量(J)。

$$\eta_d = \frac{1}{2} \frac{U_0}{E}$$

式中 η_d ——电能利用率。

$$P_m = 0.25 \frac{E^2}{R}$$

式中 P_m ——脉冲电源最大输出功率(W)。

RC 线路脉冲电源具有结构简单、工作可靠、成本低等特点。小功率时，脉冲频率高($f_p > 50\text{kHz}$)，脉冲宽度窄($t_j < 0.1\mu\text{s}$)，适合于精密加工和微细加工，其加工精度可达 IT7 级，表面粗糙度 $R_a 0.32 \sim 0.63\mu\text{m}$ 。但它的电能利用率低($\eta_d < 36\%$)；因其充电时间比放电时间长，生产率低；电极间隙状态、加工深度、金属屑排除、油污等影响脉冲频率、脉宽和脉冲能量，工艺参数不稳定，工具电极损耗大。

RC 线路脉冲电源是一个典型的基本型脉冲电源，由于上述缺点的存在，出现了许多改进型，如 RLC 线路、RLCL 线路等脉冲电源，分别如图 6-16、图 6-17 所示。

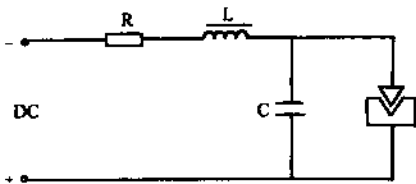


图 6-16 RLC 线路脉冲电源

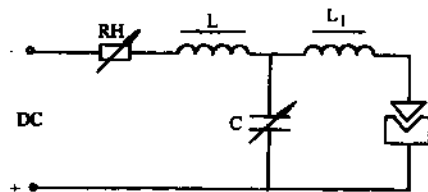


图 6-17 RLCL 线路脉冲电源

1) RLC 脉冲电源 在充电回路上加上一个电感器，它对直流电流阻力很小，但对交流电流或脉冲电流有感抗阻力，起限流作用，却又不致引起发热而消耗电能，故可提高电能利用率(可达 80%~92%)；同时，它可缩短电容器充电时间，提高充电电压，使生产率提高 1~2 倍。

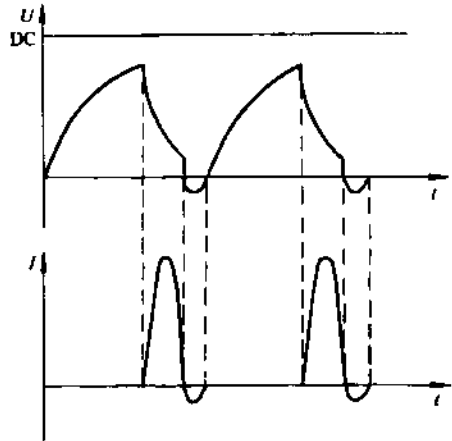


图 6-15 RC 线路脉冲电源
电压、电流波形

但是,当间隙短路后又瞬时断开时,电感器上将感应出很高的电压,因此电容器要耐压 1500V 以上,且要有较大的瞬时功率。

2) RLCL 脉冲电源 在充电回路和放电回路均加上一个电感器,在放电回路中的电感器可拉长放电过程,可在 RLC 脉冲电源的基础上再提高生产率 10% ~ 15%,降低工具电极损耗 10% ~ 15%。

(2) 独立式脉冲电源 独立式脉冲电源的脉冲参数与放电间隙的物理状态无关,不受间隙状态变化的影响而独立发生脉冲,它有电子管式、闸流管式、晶体管式和晶闸管式多种形式。

1) 电子管式 由主振级产生具有一定脉宽和频率的脉冲信号,经前置放大器放大后推动以电子管作为可控开关元件的功率输出级,由于电子管为高阻抗开关元件,主回路为高压小电流,要用脉冲变压器变换为低压大电流脉冲,才能用于电火花加工。因此,受到末级功率管和脉冲变压器的限制,脉宽比较窄,脉冲电流不大,能耗较大,多用于冲模穿孔等精加工。其原理图见表 6-8。

2) 闸流管式 用闸流管作为可控开关元件来发生脉冲。闸流管在阳极电压升高到一定值,栅极输入正脉冲时才能导通;脉冲电流为零,栅极电压为负时才能截止。当高压直流电源经过电感器向电容器充电到额定电压时,触发电路定时向闸流管的栅极输入一个正向触发脉冲信号,使闸流管导通,这时电容器所储高压电能,在极短时间内经脉冲变压器的初级绕组放电,次级绕组感应出低电压大电流的电脉冲给电极间隙,击穿介质而产生火花放电。脉冲结束,闸流管截止,放电间隙恢复绝缘。如此周而复始。其特点与应用和电子管式相同,目前都已很少采用。闸流管式脉冲电源原理图如表 6-8 所示。

3) 晶体管式 主振级为一不对称多谐振荡器,它发出一定脉宽和频率的矩形脉冲信号,又称脉冲源。信号经前置放大器放大后,推动末级功率晶体管开关电路,当导通时,直流电源加在电极间隙上,击穿介质进行放电加工,截止时,脉冲结束,介质恢复绝缘。如此周而复始。为了加大功率,功率极可采用多组大功率高频晶体管并联,精加工时用其中一组。为了防止放电间隙短路时损坏晶体管,每只晶体管均串联电阻,起限流作用及管间均流作用。晶体管脉冲电源脉冲频率高、参数易调节、波形好,易实现多回路加工和适应控制,在中小型冲模及型腔模具加工中应用较多,并在其基础上派生出多种脉冲电源,但其输出功率和加工速度不及晶闸管式脉冲电源。晶体管式脉冲电源原理图见表 6-8。

4) 晶闸管式 是利用晶闸管的导通和截止将直流电转变成脉冲电流。由直流电源、晶闸管、限流电阻器 R_1 及电极间隙串联组成主回路。当接通直流电源后,若触发电路中有正触发脉冲信号使晶闸管导通,则主回路工作,间隙介质被击穿而放电加工。当晶闸管导通达到所需脉宽时,关断电路起作用使晶闸管关断,完成一个脉冲过程。晶闸管式脉冲电源脉冲频率调节范围广、功率大、生产率高、工具电极损耗低、耗电量小,元件寿命长、无高压,操作方便,应用日益广泛,且在其基础上派生出多种脉冲电源。晶闸管式脉冲电源原理图如表 6-8 所示。

(3) 新型脉冲电源 为了达到高速、低耗、稳定加工,提高有效脉冲利用率,提高加工质量,降低表面粗糙度值,进行自适应控制等,出现了许多新型脉冲电源。

1) 高低压复合脉冲电源 如图 6-18 所示,放电间隙并联两个供电回路。其中高压回路的脉冲电压为 300V 左右,平均电流很小,主要起控制低压脉冲的放电击穿点,保证前沿击穿间隙的作用,又称为高压引燃回路;低压回路的脉冲电压为 60 ~ 80V,比较低,电流比较大,起蚀除金属,又称为加工回路。低压回路中的二极管用以阻止高压脉冲进入低压回路。高低压复合回路中的电压波形为在工作脉冲电压和高压脉冲的叠加,称为高低压复合脉冲,如图 6-19a 所示,

大大提高了脉冲的击穿率和利用率,使放电间隙变大,排屑良好,加工稳定。图中所示的三种高低压复合脉冲,图 b、c 的效果优于图 a,图 c 更好些。图中 Δt 为触发滞后时间,是可调的。

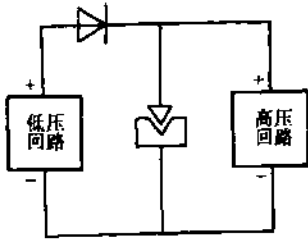


图 6-18 高低压复合脉冲电源

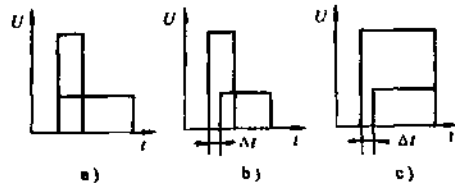


图 6-19 高低压复合脉冲的形式

a) 高低压脉冲同时触发

b) 低压脉冲, 滞后高压脉冲触发

c) 高压脉冲提前出发与低压同时结束

2) 多回路脉冲电源 如图 6-20 所示,它是在功率级上分割出互相绝缘的多个输出端,分别接到各个分割工具电极上,形成多个回路的放电加工。用于大面积、多型面、多工具的情况,如电动机的定子、转子冲模、筛孔等加工,可不依靠增大单个脉冲能量而致使表面粗糙度变坏来提高生产率。

3) 等脉冲电源 等脉冲电源是指每个脉冲在介质击穿后所释放的单个脉冲能量相等。这样可以保证表面粗糙度,并进一步在此基础上提高加工速度。对于独立式电源,虽然可以使电压脉宽和频率在加工中保持不变,但由于放电间隙物理状态总是不断变化,每个脉冲的击穿延时随机性很大而各不相同,因此影响了实际放电电流的脉宽,造成每个脉冲放电释放的能量不相等,影响加工表面粗糙度。

对于矩形波脉冲电流来说,由于每次放电过程的电流幅值基本相同,因此在等脉冲电源中表现为每个脉冲放电电流的持续时间相同。可利用火花击穿信号来控制电源的脉冲发生器,作为脉冲电流的起始时间,经过单稳延时一定时间后,立即中断脉冲输出,切断放电通道,完成一个脉冲输出,从而可获得等脉冲输出。

对于矩形波脉冲电流来说,由于每次放电过程的电流幅值基本相同,因此在等脉冲电源中表现为每个脉冲放电电流的持续时间相同。可利用火花击穿信号来控制电源的脉冲发生器,作为脉冲电流的起始时间,经过单稳延时一定时间后,立即中断脉冲输出,切断放电通道,完成一个脉冲输出,从而可获得等脉冲输出。

4) 自适应控制脉冲电源 自适应控制脉冲电源是根据给定目标,如保证一定的生产率,或保证一定的表面粗糙度,实时检测放电加工状态,与给定目标作比较,通过适应性控制装置的处理,得出校正参数,改变主振级或前置放大级的某些参数,以获得给定目标所应达到的效果,如图 7-21 所示。它实际上是一个自适应系统,能自动地调节有关脉冲参数,达到最佳稳定放电状态,保证给定目标。

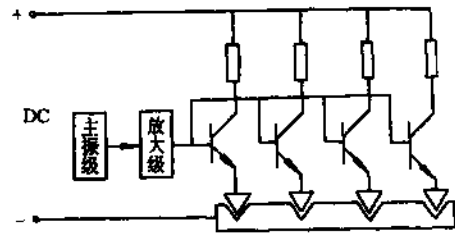


图 6-20 多回路脉冲电源

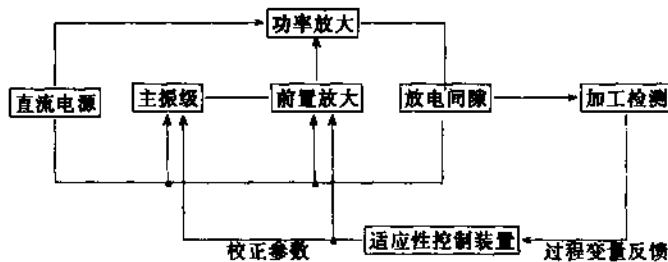


图 6-21 自适应控制脉冲电源

此外,尚有高频分组脉冲电源、梳形波脉冲电源、阶梯波脉冲电源、前后尖峰波脉冲电源等。

2.3.3 主轴头

主轴头即主轴单元或主轴系统,工具电极装于主轴端部,由控制系统带动在垂直方向进行进给伺服运动,包括进给速度调节、停止、回退(抬刀)等以保持放电间隙,它是影响电火花加工稳定性和保证加工质量的关键部件。

(1) 对主轴头的要求 主轴头是一个自动进给调节系统,对其要求有以下几点:

- 1) 有很宽的进给速度调节跟踪范围,以适应不同加工的需求。
- 2) 能够随着放电间隙的微小变化相应地灵敏快速调节,灵敏度高。
- 3) 低速性能好,无爬行;高速性能好,无超调;抗干扰能力强,能均匀、稳定地进给,稳定性好。有足够的空载进给速度和短路回升速度。

4) 结构简单,体积小,操作维修方便。

5) 由于电火花磨削加工、展成加工等技术以及加工中心的发展,主轴还有回转运动、自动换工具等功能要求,要求主轴有一定的转速范围,要有定位和自动夹紧工具等功能。

(2) 主轴头的基本组成 如图 6-22 所示,主轴头是一个自动调节系统。

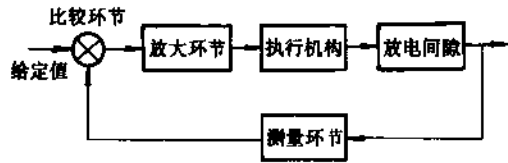


图 6-22 主轴头自动调节进给系统的基本组成

测量环节用来检测放电间隙,通常是用间接测量法来测量与放电间隙成比例关系的电参数,有平均值和峰值两种方式。比较环节的作用是将测量值与给定值进行比较,得出差值。放大环节的作用是将差值进行功率放大,以便得到能够推动执行元件的功率。

放电间隙的测量是一个关键难题。

对于弛张式脉冲电源,一般可采用平均值检测法,图 6-23 中表示了平均电压检测、平均工作电流检测和平均电压电流检测的原理图。图 a 是通过电位器检测放电间隙的平均电压;图 b 是通过电压 U 和限流电阻 R 检测放电间隙的平均工作电流;图 c 是通过测量电压 U 同时可检测放电间隙的平均电压和平均工作电流,线路复杂一些,但参考价值更大一些。

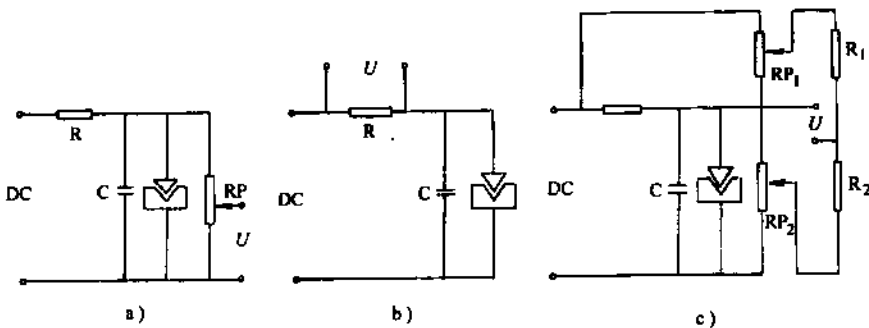


图 6-23 放电间隙的平均值检测法电路图

a) 平均电压检测法 b) 平均工作电流检测法 c) 平均电压电流检测法

对于独立式脉冲电源,由于在脉冲间歇期间,两极间的电压为零,平均电压很低,故对极

间距离变化的反映不及峰值电压灵敏,因此多用峰值检测法。图 6-24 是放电间隙峰值电压检测法电路图。图中电容器 C 为信号储存电容器,它充电快,放电慢,记录峰值大小;二极管 VD 的作用是阻止负半波和防止电容器 C 向放电间隙反向放电;稳压管 VS 的作用是阻止和滤除比其稳压值(19~20.5V)大的放电维持电压,控制了空载峰值电压。当放电间隙火花放电时,间隙脉冲电压 U_j 将通过电阻器 R_0 使电容器 C 充电,电容器 C 上的电压 $U_c = \int U_j dt$; 当放电间隙处于脉冲间隔时,电容器 C 通过电阻器 R_1 、电位器 RP 而放电,由于放电速度慢,可测得峰值电压大小。

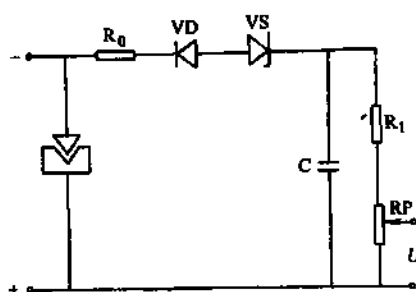


图 6-24 放电间隙的峰值电压检测法电路图

实际上放电间隙的测量应区别不同的放电状态,通常放电状态有空载、火花、短路三种,尚有电弧、不稳定电弧(电弧前兆)等状态,如果能直接测量放电状态则更合理。

(3) 主轴头类型、特点及应用 表 6-9 列出了按所用执行机构来分类的各种主轴头。

表 6-9 各种主轴头类型、特点及应用

类型	执行机构	特点	应用
电液式	喷嘴挡板式	承载能力强、刚度好 传动无间隙、惯性小,灵敏度高	80年代前应用广泛,以喷嘴挡板居多,现已被交流伺服电动机代替
	伺服滑阀式	需要配置液压系统,制造精度高,油的泄漏要充分注意	
电机式	直流力矩电动机	直接带动丝杠,结构简单,响应速度快,灵敏度高 低速时无爬行,低速性能好,工作可靠 噪声小,调速方便 力矩不能太大,须配测速发电机及控制装置	早期有应用 多用于小型电火花成形加工机床
	步进电动机	电动机结构简单,易于控制,工作可靠,用于开环数控系统,功率步进电动机可直接使用 低速性能好、灵敏度高 进给为步进式,不连续,若脉冲当量大,会影响放电过程及加工质量	功率步进电动机应用较多,多用于开环数控系统
	小惯量直流电动机	调速范围宽、低速性能好、运动平稳 转动惯量小、动态响应快、精度高,但难于与机床工作台相匹配	已被直流伺服电动机替代,主要是由于转动惯量小,不易与机床工作台匹配
电机式	直流伺服电动机	调速范围宽,可达 1:2000,低速性能好 转动惯量大,易与机床工作台匹配,工作稳定 转矩大,过载能力强,可直接与丝杠相连,传动结构简单,传动刚度好,精度高 快速动态响应性能好,噪声小 电刷和整流子要经常维护,结构复杂,容量受限制,电动机尺寸过大	应用比较广泛,曾一度为主流产品,由于性能不及交流伺服电动机,已逐渐被替代
	交流伺服电动机	其优点与直流伺服电动机相同,但无其缺点变频调速与矢量控制技术日趋成熟,价格低、节能	广泛应用,为主导产品价格逐年下降

早期的电火花成形机床,没有配置数控系统,因此,主轴头垂直方向的伺服进给系统大多采用喷嘴挡板式电液伺服系统,以保证稳定的火花放电状态。随着数控系统的发展,在电火花成形机床上采用了三坐标数控系统,不仅扩大了功能和应用范围,而且变手动为自动,提高了精度、性能和稳定性。因此,主轴头的垂直方向伺服进给系统逐步采用步进电动机、直流伺服电动机、交流伺服电动机,甚至交流伺服直线电动机,并将随着数控技术的发展而发展,现在生产的电火花成形机床几乎全是数控机床,有的还配有自适应控制系统。此外,电火花成形加工中心已经问世,它带有自动更换工具电极装置,该装置由工具库、机械手等组成,可按数控程序更换主轴头上的工具电极,应用多种形状和大小不同的标准工具电极来进行成形加工。

2.3.4 工作液循环过滤系统

(1) 工作液的作用 工作液的作用有以下几方面:

- 1) 压缩放电通道的区域,提高放电的能量密度,提高蚀除效果。
- 2) 加速极间介质的冷却和消电离过程,防止电弧放电。
- 3) 减少工具电极损耗,加强电极覆盖效应。
- 4) 加剧放电时的流体动力过程,以利于蚀除金属的抛出。
- 5) 通过工作液的流动,加速了蚀除金属的排出,以保持放电工作稳定。
- 6) 改变工件表面层的理化性质。

(2) 常用工作液 常用的工作液分油性和水溶性两大类,其中油性工作液主要有煤油、L-AN油、变压器油、锭子油等;水溶性工作液主要有去离子水、蒸馏水、乙醇水溶液等。通常,应用最多的是煤油和去离子水。

除通用的工作液,不少单位还研制了专用工作液,性能上各有特色。

表 6-10 列出了常用电火花加工工作液,表 6-11 列出了石油化工科学研究院生产的电火花成形加工专用油的性能规格。

表 6-10 常用电火花加工工作液

种 类	特 点	适用 场合
普通煤油	粘度低,排屑条件好,闪点较低,油气挥发大,有诱发火灾危险	广泛使用,更宜于半精和精加工
L-AN油,变压器油,锭子油	闪点较高,粘度较大,排屑困难,工作中分解的炭黑易粘在电极上产生结碳而造成拉弧烧伤,影响加工表面质量	大能量粗加工
电火花成形加工专用油	低粘度,高闪点,冷却性好,不含机械杂质,化学稳定性好,分馏工艺要求高,价格较贵	各种规范加工
去离子水 蒸馏水 乙醇水溶液	流动性、散热性好,不燃烧,无味,价廉,蚀除物易排除,但要加添加剂防锈。去离子装置复杂,影响价格	精加工、高速穿孔

表 6-11 电火花成形加工专用油性能规格

项 目	1号	2号	特1号
外观	清亮透明	清亮透明	无色透明
运动粘度(40℃)/(mm ² /s)	1.5~2.2	1.8~2.4	2.0~3.0
闪点(闭口)/℃, ≥	80	100	80
馏程:干点/℃, ≤	250	260	250
酸值/(KOH mol/kg), ≤	0.178	0.178	0.178
硫含量(质量分数)(%), ≤	0.05	0.05	0.05
水溶性酸、碱	无	无	无
机械杂质	无	无	无
水分	无	无	无

(3) 混粉工作液 从电火花加工机理可知, 要降低加工表面粗糙度, 就要减小单脉冲放电能量。对小面积电火花加工而言, 是非常有效的, 但对大面积电火花加工, 由于极间电容相应变大, 对放电能量的储能作用加强, 当极间电压达到击穿值进行脉冲放电时, 放电能量已远大于单个脉冲能量, 因此, 单纯依靠减小单脉冲放电能量效果有限。80 年代末, 日本学者研究出在工作液中添加一定数量的硅、铝、镍等微粉, 能有效降低电火花加工后的表面粗糙度值, 达到类似镜面的效果, 并已逐步用于生产, 形成混粉电火花加工技术。究其原理, 可能有以下几点:

1) 加工中放电间隙明显增大, 使放电对工件表面的冲击力减小, 从而使放电凹坑中蚀除抛出量减少, 形成较浅的放电凹坑。

2) 金属及半导体微粉与被加工表面之间将产生微放电, 形成分散式放电状况, 有效地防止放电凹坑的多次重叠, 使凹坑较浅。

3) 分散极间电容, 使极间电容减小, 从而有效地减小了放电脉冲能量。

4) 混粉工作液中的微粉对工件表面有抛光、磨料喷射加工等作用。

在油性和水溶性工作液中加一些添加剂以改善工作液的性能和效果是行之有效的, 如电极低损耗添加剂、提高加工速度添加剂、降低表面粗糙度添加剂等, 是值得研究开发的重要方向。

(4) 工作液循环与过滤系统 工作液循环系统如图 6-25 所示。可以冲油, 也可以抽油。

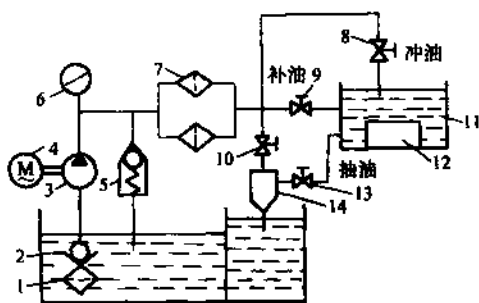


图 6-25 工作液循环系统

- 1—粗过滤器 2—单向阀 3—齿轮泵 4—电动机
5—压力阀 6—压力表 7—精过滤器 8—冲油
选择阀 9—快速进油控制阀 10—冲油选择
阀 11—工作台油槽 12—油杯 13—
抽油选择阀 14—射流抽吸管

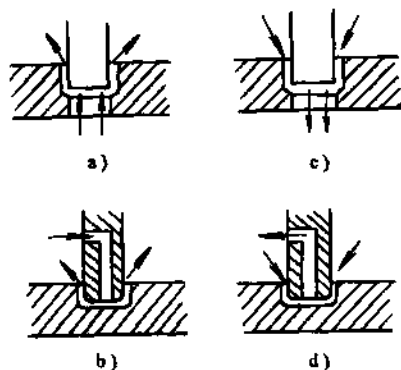


图 6-26 工作液循环基本方式

- a) 下冲油 b) 上冲油
c) 下抽油 d) 上抽油

1) 工作液循环方式 工作液的基本循环方式有下冲油、上冲油、下抽油和上抽油四种, 如图 6-26 所示。

新型数控电火花成形机床, 其工作液循环方式可根据具体加工情况由所编制的程序来控制。还可提供脉动式冲液方式, 其脉动周期可与电极抬升相配合, 既能充分排除蚀除物, 又能减小因冲压及流速过大对电极损耗和加工稳定性的影响。

2) 工作液的过滤 常用的液体过滤方式有介质过滤、离心分离和自然沉淀等, 电火花工作液大多采用介质过滤, 主要有网式、线隙式、纸质等过滤器, 其中压力管路纸质滤芯过滤器

用得最普遍。

2.3.5 辅助设备及配件

电火花成形机床的辅助设备及配件主要有电极夹头和平动头等。

(1) 电极夹头 在主轴头端部装夹和调整工具电极的装置,称为电极夹头。在电火花成形加工中心上,工具电极在主轴头上应能自动定位、夹紧、更换,结构比较复杂。

(2) 平动头 在电火花成形机床上使工具电极产生微小的平面运动以实现精加工的附件,称为平动头。使工具电极产生机械补偿运动的附件,称为补偿头。

平动头多用于单电极加工型腔时,可补偿粗精加工间放电间隙的差值,提高加工精度和加工稳定性,降低表面粗糙度,因此,前期生产的电火花成形机床多配有平动头,其承载电极最大质量为10~70kg,最大平动量为 $\pm 1 \sim \pm 2\text{mm}$ 。平动头的类型有圆周运动、平动、45°斜滑等方式,有手动、伺服运动和数控等多种控制系统。对于数控电火花成形机床,数控主轴头和数控工作台的运动可取代平动头的作用,不必再配置平动头。

2.4 工具电极

工具电极是电火花成形加工的工具。

2.4.1 工具电极的材料

电火花成形加工中,工具电极是一个关键,其材料应满足下列要求。

- 1) 导电性能良好。
- 2) 自身不易被电蚀,相对损耗小。
- 3) 有足够的机械强度,密度小,自重轻。
- 4) 加工制造容易。
- 5) 材料易于获得,且价格便宜。

常用工具电极材料及其优缺点和适用范围如表6-12所示。常用工具电极材料可分为单元素和合金两大类,最常用的是紫铜和石墨,有些材料如银等,由于价格昂贵,虽性能好,却不常用。

表 6-12 常用工具电极材料及其优缺点和适用范围

材 料	优 点	缺 点	适 用 范 围
石墨	电极可加工性好,制造容易 电火花加工性能好,电极损耗小 成本低	强度较低 加工表面粗糙度比紫铜电极加工要差 不宜用于穿孔加工,更不能用于有配合要求的穿孔加工 需要良好的工作液流动条件	主要用于加工模具型腔
紫铜	电火花加工性能好,加工稳定 电极相对损耗低 工件加工表面粗糙度低,加工精度高 强度高	成本比钢、铸铁、石墨等均高 机械加工性较差,小型、薄壁、空心电极加工尤其困难,不能采用磨削加工	加工中小型模具型腔、花纹或其他精密模具
黄铜	电火花加工性能好于紫铜,加工稳定 工件加工表面粗糙度低 强度高	成本较高 机械加工性尚好 电极损耗高于紫铜与石墨	精微穿孔时采用,多采用拉制成形管
锌锡合金	以浇铸为主要制造手段,容易成形便于重复使用	电极损耗大 不适合精细形状工件加工	低精度的批量生产

(续)

材 料	优 点	缺 点	适 用 范 围
钢	可与凸模一起制成整体, 电极是凸模的延长部分, 简化了电极制造, 强度高于铸铁 电极损耗比铸铁小 在相同电规准下, 工件加工表面粗糙度比铸铁加工略低 可用于有配合要求的冲裁模加工	电火花加工的稳定性很差, 生产率低 电极相对损耗比紫铜、石墨等大 工件表面形成的热影响层较厚	适于用线切割加工凸电极, 以此加工钢凹模或拉伸模
铸铁	可和凸模一起制造, 用于有配合要求的冲裁模加工 电火花加工性比钢电极略好, 加工稳定性好, 生产率高 成本低	要将铸铁电极和钢凸模连接在一起, 制造过程比钢电极复杂, 强度不如钢电极 电极相对损耗高于钢	用于制造冲裁模
铜钨合金	损耗低, 尤其适合精加工及加工硬质合金 刚性好 利用粉末冶金模具, 可制造具有精密形状的电极用于批量生产	成本较高 机械加工性尚好, 但原材由粉末冶金模压得到, 制造有一定难度	适用于复杂、精细、公差要求高的低损耗加工场合
银钨合金	电火花加工性能好, 加工稳定 电极相对损耗很低 加工精度高, 表面粗糙度低, 特别是加工圆角较其他电极材料加工要小 强度比铜更好, 电极刚度高	机械加工性较差, 制造困难 成本比其他电极材料均高	用于精密模具的低损耗加工
钨	强度高 损耗小	成本较高	加工小于 $\phi 0.25\text{mm}$ 的孔

注: 该表取自参考文献[16]。

常用工具电极材料的物理性能如表 6-13 所示。

表 6-13 常用工具电极材料的物理性能

材 料	熔点/℃	沸点/℃	电阻率/($\Omega \cdot \text{cm}$)	热导率/($\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$)	热扩散率/(m^2/s)	线膨胀系数/($1/^\circ\text{C}$)
紫铜	1083	2320	1.72×10^{-6}	390	1.12	16.5×10^{-6}
石墨		①	1300×10^{-6}	125		3.5×10^{-6}
钨	3400	5930	6×10^{-6}	160	0.55	4.5×10^{-6}
铜钨合金	3400		5.2×10^{-6}	150		
黄铜	935		6.5×10^{-6}	110	0.21	19.9×10^{-6}
钢	1535	2800	15×10^{-6}	50	0.14	10.5×10^{-6}
铝	660	2056	2.8×10^{-6}	210	0.85	24×10^{-6}

① 在 0.1MPa 气压下于 3550℃ 左右即升华。

2.4.2 工具电极的结构形式

工具电极的结构形式很多, 主要是考虑了电极加工制造、电火花成形加工工艺方法、工件

精度和表面粗糙度要求等。

以往的电火花成形机床,用整体电极、组合电极、镶拼电极、分解电极等较多。对于数控电火花成形机床,可采用标准电极和分解电极,用数控插补形成运动轨迹,可以简化工具电极的制造,提高加工精度。

表 6-14 列出了工具电极的结构形式、结构特点和应用范围。

表 6-14 工具电极的结构形式、结构特点和应用范围

结构形式	结构特点及应用范围
整体电极	适用于加工冲裁模、级进模、塑料模、模模等小型模具以及零件的局部。一般在其端面的重心位置用连接杆直接连接,体积极大或重量较重的电极,应尽量挖空或打孔,以减轻自重
组合电极	多个电极部件按一定要求固定在一起,组成一个整体。适用于加工复合模、级进模,有利于提高生产率和模具的尺寸精度
镶拼电极	当某些电极难以整体进行机械加工时,常常采用局部镶拼,以简化电极制作
阶梯电极	为使一个电极能完成粗精两个标准加工,制成阶梯电极。以尺寸小的部位进行粗加工,尺寸大的部位完成精加工。常采用化学腐蚀的方法,将电极腐蚀成阶梯状。由于一次加工要先后完成粗精加工,故只能用于穿孔加工
标准电极	由一套体元素标准电极组成,如三角形、方形、圆形、圆锥形等,并有系列大小,可在数控电火花成形机床按数控插补程序加工成形表面,也可用于电火花成形加工中心
分解电极	分为主电极和副电极,主电极加工型腔主要部分,副电极加工尖角、窄槽等部分
粗精电极	电极分为粗电极和精电极,粗电极进行粗加工,精电极进行精加工,最后的型腔精度由精电极保证,多用于精度要求高的型腔加工

2.4.3 工具电极的选择

工具电极的选择应考虑其材料、结构形式、相对损耗、被加工材料、形状、可加工性、成本等因素。就工具电极的材料选择而言,除考虑形状、相对损耗、可加工性、成本以外,与工件材料的关系十分密切。表 6-15 表示了工具电极材料的选择,表 6-16 列出了工具电极与工件材料的组合。从两个表中可以看出,通常用的工具电极材料为石墨和紫铜,对于微孔、小孔、窄缝、小槽等可用铜钨合金和钨。最合适的电极对材料有紫铜—钢、石墨—钢等,但要考虑极性问题。

表 6-15 工具电极材料的选择

材 料	常用形状	精加工相对角 部损耗(%)	精加工相对 端面损耗(%)	相对成本	可加工性	推荐应用	避免使用
专用石墨	块、杆、管、型材	20	1	低	最好	模具加工	
紫铜	型材、杆、片、 管、银件,冲压件	100	50	中	较好	孔、槽	
黄铜	与紫铜类似	142	100	低	好	型孔、型腔	高精度工件
钢 ^①	所有形状	100	50	低	最好	通孔	硬质合金
铜钨合金	型材、薄片、杆、管	33	12.5	中	尚可	槽、硬质合金	大面积
银钨合金	烧结件	12.5	8	高	尚可	小槽、孔及 精细形状	大面积
钨	线、杆、带	20	10	高	差	小孔	异形孔

① 某些铜损耗较大。

表 6-16 工具电极材料与工件材料的组合

电极材料	工件材料	工件极性	电极低损耗	电极材料	工件材料	工件极性	电极低损耗
紫铜	钢	-	○	石墨	紫铜	+	×
紫铜	紫铜	+	×	石墨	铝	-	○
紫铜	铝	-	○	石墨	黄铜	-	×
紫铜	黄铜	-	○	石墨	硬质合金	+	×
紫铜	钛青铜	-	○	黄铜	钢	+	×
紫铜	硬质合金	①	×	钢	钢	-	×
银钨合金	钢	-	○	银钨合金	钢	-	○
铜钨合金	紫铜	+	×	银钨合金	紫铜	+	×
铜钨合金	铜钨合金	+	×	银钨合金	铜钨合金	+	×
铜钨合金	银钨合金	+	×	银钨合金	银钨合金	+	×
铜钨合金	铝	-	○	银钨合金	铝	-	○
铜钨合金	黄铜	-	○	银钨合金	黄铜	-	○
铜钨合金	硬质合金	+	×	银钨合金	硬质合金	+	×
石墨	钢	②	○	银钨合金	钨	+	×

注：该表取自参考文献[16]。○可以；×不可以；+ 工件极性为正；- 工件极性为负。

① 紫铜加工硬质合金，通常粗加工时采用负极性，精加工时采用正极性。

② 石墨加工钢，通常型腔加工采用负极性，穿孔加工采用正极性，电极损耗1%以下时仅限于采用负极性。

2.5 电火花穿孔成形加工工艺

电火花穿孔成形加工包括穿孔加工和成形加工。穿孔加工主要有冲膜(凸凹模、卸料板、固定板)、挤压模(型孔)、小孔($\phi 0.01\text{mm} \sim \phi 3\text{mm}$ 圆孔和异形孔)、粉末冶金模及型孔零件等；型腔加工主要有型腔模(锻模、压铸模、塑料模、胶木模等)及型腔零件等。

2.5.1 影响加工精度的主要因素

影响电火花穿孔成形加工精度的影响因素很多，如表 6-17 所示。其主要影响因素有以下几方面。

表 6-17 影响加工精度的主要因素

影响因素	误差来源	具体误差项目	对加工精度造成影响
机床	几何精度、定位精度		尺寸精度 形状精度
	极间相对运动	平动、摇动、转动	
	热变形	主轴头上抬可达 0.05mm	
工具电极	形状和尺寸		尺寸精度 形状精度：圆角、加工斜度等
	材料	热膨胀	
	精度		
	放电加工时的稳定性		
	放电加工时的损耗	均匀损耗 不均匀损耗	

(续)

影响因素	误差来源	具体误差项目	对加工精度造成影响
工件	形状和尺寸	尖角、棱角, 不均匀蚀除	尺寸精度 形状精度: 圆角等
	材料	热变形	
放电间隙大小和一致性	电参数	脉宽、峰值电流	尺寸精度 形状精度: 圆角等
	工具电极	侧面轮廓	
		制造精度	
	二次放电		
	加工稳定性		
	工作液性能	粘度、介电系数	
工作液循环系统	流动性、排屑		
工作液	种类		尺寸精度 形状精度
	流动性		
	排屑方式		
电参数	脉宽		尺寸精度 形状精度
	峰值电流		
	单个脉冲能量		
	极性选择		

(1) 放电间隙的大小和一致性 图 6-27 表示了工具电极侧面轮廓对放电间隙的影响。图 6-28 表示了二次放电对放电间隙的影响, 二次放电是指在已加工表面由于蚀除物的阻塞和未能及时排除所造成的非正常放电。加工稳定性不好, 电极回升频繁, 放电间隙增大。工作液介电系数大, 流动性好, 排屑好, 放电间隙就小。放电间隙的大小和一致性直接影响了加工的尺寸精度和几何形状精度。

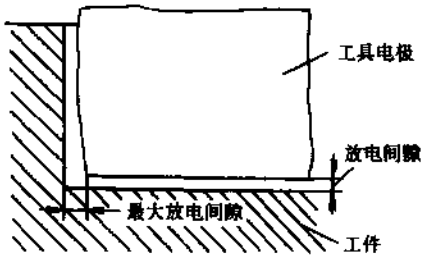


图 6-27 工具电极侧面轮廓对
放电间隙的影响

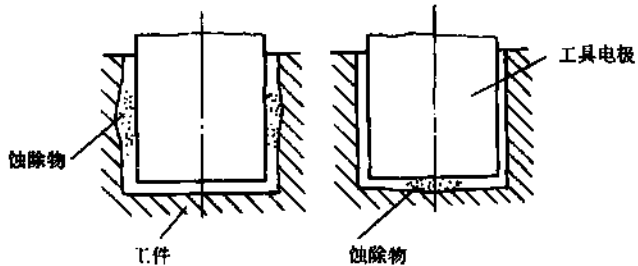


图 6-28 二次放电对放电间隙的影响

(2) 工具电极的损耗和工件的不均匀蚀除 工具电极下端部加工时间长, 损耗大; 工具电极入口处, 由于蚀除物存在的概率大, 二次放电的机率大, 因而产生加工斜度, 如图 6-29 所示。

电火花加工时, 工具电极的尖角和凹角处很难在工件上得到相应的形状, 而是形成圆角, 如图 6-30 所示。当工具电极有尖角时, 因尖端放电蚀除的机率大而损耗成为圆角; 另一方面,

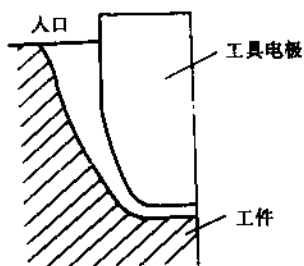


图 6-29 工具电极的不均匀磨损所造成的加工斜度

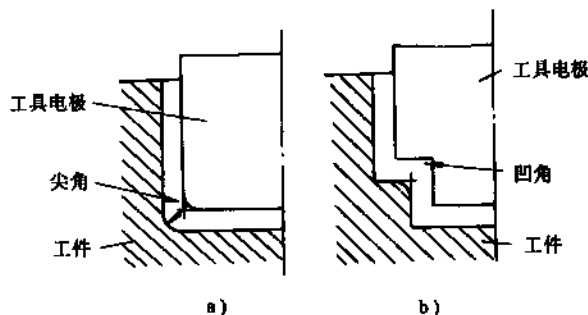


图 6-30 电火花成形加工时的圆角形成
a) 工具电极有尖角时 b) 工具电极有凹角时

由于放电间隙的等距性，工件上将加工出以工具电极尖角顶点为圆心、放电间隙为半径的圆弧，因此最后得到圆角，如图 a 所示。当工具电极有凹角时，工件上对应的尖角处放电蚀除的机率大而形成圆角，如图 b 所示。

(3) 热变形 工具电极和工件的热变形(如热膨胀)将直接影响加工精度，机床主轴头的热变形也会对加工精度造成影响。电火花成形加工时作用力极小，机床本身的刚度和强度对加工精度影响小，而热变形的影响是值得注意的，不可忽视，不少机床的主轴头上配有自动恒温装置。

(4) 排屑方式 工作液的循环方式对电火花加工形状有影响，图 6-31 表示了下冲油方式会造成加工斜度(图 a)；下抽油方式则好得多，但可能在水平方向造成斜度。

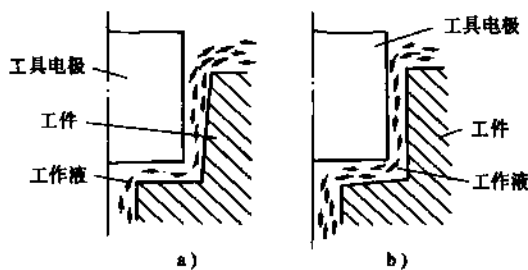


图 6-31 排屑方式对加工精度的影响
a) 下冲油式 b) 下抽油式

2.5.2 影响表面质量的主要因素

1. 电火花加工表面质量的涵义

电火花加工表面质量可包括表面粗糙度、表面变质层和表面层力学物理性质三方面。

(1) 表面粗糙度 电火花加工后的表面由无数无方向性的小凹坑和硬凸边所组成，与机械加工后的表面不同，没有切削或磨削所形成的方向性刀痕，便于保存润滑油而有利于提高润滑性和耐磨性。电火花加工粗糙度通常用微观不平度的平均算术偏差 R_a 表示。

(2) 表面变质层 材料表面层在火花放电的瞬时高温和工作液快速冷却作用下发生了很大

变化,其受影响部分可分为熔化凝固层和热影响层。

熔化凝固层位于工件表面最上层,对于碳钢来说,是一种树枝状的淬火铸造组织,由马氏体、残余奥氏体和某些碳化物组成,与内层结合不太牢固,在金相照片上呈白色,故又称白层,硬度高,厚度不超过0.1mm。

热影响层介于熔化凝固层与基体之间,未被熔化,但受高温影响,其金相组织发生变化,与基体无明确界限。对淬火钢来说,热影响层有再淬火区、高温回火区和低温回火区;对未淬火钢来说,热影响层主要为淬火区。

(3) 表面层力学物理性质 电火花加工后的表面层一般硬度较高,耐磨性较好,但存在微裂纹和残余应力,影响耐疲劳性,应采用回火、喷丸等处理。

2. 表面质量影响因素分析

影响电火花加工表面质量的因素很多,表6-18表示了影响加工表面质量的主要因素,其中影响较大的有以下几个方面。

(1) 单个脉冲能量 减小单个脉冲能量能有效提高表面质量,如降低表面粗糙度值,减少表面变质层、表面微裂纹和表层残余应力,但却会降低加工速度,影响生产率。

(2) 工作液 工作液的种类、清洁程度、流动性、添加剂等均对加工表面质量有很大影响,特别是混粉工作液有效地降低了表面粗糙度值,可达到镜面,并已用于实际生产。

表 6-18 影响加工表面质量的主要因素

影响因素	影响项目	具体影响项目	对表面质量造成影响
电参数	脉宽		表面粗糙度
	放电电流	峰值电流、平均电流	表面变质层; 熔化凝固层、
	极性选择		热影响层
	单个脉冲能量	加工速度	力学性质
工具电极	材料	与工件材料的关系	表面粗糙度
	表面粗糙度		
	放电加工时稳定性		
工件	材料	熔点	表面粗糙度
工作液	种类		表面粗糙度
	清洁程度		
	流动性	循环方式	
	添加剂	混粉工作液	
机床	进给运动平稳性		表面粗糙度
	极间相对运动	平动、摇动、转动	
放电间隙均匀性	电参数		表面粗糙度 表面变质层
	工具电极	侧面轮廓	
	二次放电		
	加工稳定性		
	工作液性能	粘度	
	工作液循环系统	流动性、排屑	

(3) 极间相对运动, 当工具电极和工件之间有相对运动时, 如平动、摇动、转动等, 能有效降低表面粗糙度。利用标准的工具电极在数控电火花成型机床上加工, 由于工具电极有旋转运动, 相当于电火花铣削或磨削, 使表面质量和加工精度均能得到提高。

(4) 加工稳定性 稳定的加工有助于放电间隙的均匀性, 可有效降低表面粗糙度值和表面变质层。

2.5.3 电火花穿孔加工工艺

电火花穿孔方法有: 间接法、直接法、混合法、二次电极法和阶梯电极法等。

(1) 间接法 工具电极与凸模分别制造, 用工具电极电火花加工凹模, 凹模与凸模间接配合得到间隙。通常用于精度较低的情况。

(2) 直接法 工具电极就是凸模, 用工具电极电火花加工出凹模, 切除工具电极有损耗部分, 凹凸模直接配合, 配合间隙均匀。

(3) 混合法 将工具电极和凸模连接在一起进行加工, 然后将工具电极与凸模分开, 用工具电极电火花加工出凹模, 用凸模与凹模配合, 达到配合间隙要求。

(4) 二次电极法 用一次电极加工出二次电极, 由一次电极和二次电极分别加工出有配合要求的冲模。这里有两种情况:

1) 一次电极为凹形 用一次电极反拷贝加工出凸模和凸形二次电极, 再用凸形二次电极加工出凹模, 凹凸模配合。用于凸模制造有困难的场合。通常加工精度较高。

2) 一次电极为凸形 用一次电极加工出凹模和凹形二次电极, 再用凹形二次电极加工出凸模, 凸凹模配合。用于凹模制造有困难的场合。通常加工精度较高。

(5) 阶梯电极法 将工具电极作成阶梯三段, 前段为粗加工段, 中段为精加工段, 后段为凸模, 各段都有均匀尺寸差, 用精加工段保证凹模的形状和尺寸, 电火花加工凹模完成后, 切除工具电极的前段和中段, 即可进行凸凹模配合。通常加工精度较高。

2.5.4 电火花型腔加工工艺

电火花型腔加工工艺方法有: 单电极直接加工、单电极平动加工、多电极加工、分解电极加工、标准电极数控加工等。

(1) 单电极直接加工 用一个电极由一个方向进给完成整个型腔加工, 电极本身可以是整体的、组合的、或镶拼的。主要用于无直壁及简单、小型腔加工。

(2) 单电极平动加工 采用单电极直接加工方法, 再利用平动头加工, 以提高加工精度, 加工精度通常可达 0.1mm。

(3) 多电极加工 采用多个形状相同、尺寸有差异的工具电极加工同一个型腔, 型腔精度决定于最后一个工具电极。主要用于因工具电极损耗而不能保证零件精度的场合。

(4) 分解电极加工 根据型腔的几何形状, 分解为主型腔和副型腔, 分别制作工具电极进行加工, 主要用于复杂型腔加工。

(5) 标准电极数控加工 用各种标准电极按数控程序插补加工出型腔。用于复杂型腔和精度高的型腔零件。

2.5.5 电火花加工参数和规准

(1) 电火花加工参数(又称电参数) 电火花加工参数主要是指脉宽、脉间和峰值电流三要素, 尚有进给速度、抬刀速度及抬刀高度等。

选择加工参数时, 首先确定加工面积, 其次是峰值电流, 继而是脉宽、脉间, 最后是进给速度、抬刀速度和抬刀高度等。选择参数时, 主要应考虑电极损耗、加工速度和表面粗糙度。

电极损耗主要影响加工精度，加工速度主要影响生产率，各因素之间还会存在矛盾。

(2) 电火花加工规准 电火花加工规准是指其加工参数的数值大小，可分为粗规准、中规准、精规准、微精规准四级。粗规准用于粗加工、中规准用于半精加工、精规准用于精加工，微精规准用于微细加工，修光刃口侧壁、降低表面粗糙度值。

2.5.6 精密、微细电火花加工

精密、微细电火花加工是当前电加工发展的重要方向，是将电火花加工技术用于精密加工、超精密加工和微细加工领域，对精密加工技术、纳米加工技术和微型机械等的发展具有重要意义。

(1) 精密、微细电火花加工的对象 主要有微孔、小孔、窄槽、窄缝、微型机械零件等。通常将微孔、小孔分为六级：小孔($\phi 1.5\text{mm} \sim \phi 3\text{mm}$)、次小孔($\phi 0.5\text{mm} \sim \phi 1.5\text{mm}$)、超小孔($\phi 0.1\text{mm} \sim \phi 0.5\text{mm}$)、微孔($\phi 0.01\text{mm} \sim \phi 0.1\text{mm}$)、次微孔($\phi 0.001\text{mm} \sim \phi 0.01\text{mm}$)、超微孔(小于 $\phi 0.001\text{mm}$)。

在微、小孔中，除圆孔外，加工异型孔是电火花加工的特长，如加工化纤喷丝板的异型孔，其槽宽为 $0.01 \sim 0.12\text{mm}$ ，槽宽公差为 $\pm 0.02\text{mm}$ ，孔壁表面粗糙度 $R_a < 0.32\mu\text{m}$ ，可用整体电极、单片扁电极组合、丝电极等方法加工。图 6-32 表示各种异形孔的径向断面形状。

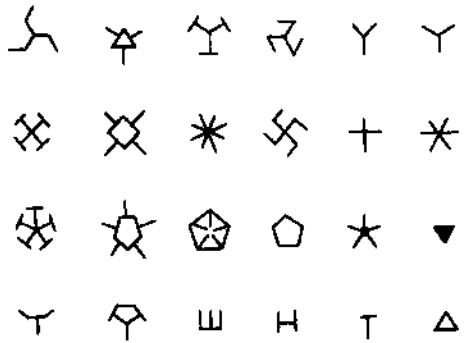


图 6-32 各种异形孔的径向断面形状

(2) 精密、微细电火花加工工艺、精密、微细电火花加工工艺和一般电火花加工时有所不同，主要表现在以下几方面：

- 1) 应有精密、微细电火花加工脉冲电源，可专门设计，能进行微精规准加工。
- 2) 应有相应的精密、微型电火花加工机床，该机床精度高，加工平稳性好。
- 3) 应选择微精电加工参数和规准进行加工。
- 4) 应选择损耗小、刚度好、易矫直、加工稳定的工具电极材料，以保证加工精度和表面质量，常用的电极材料有紫铜、黄铜、铜钨合金、钨等。

2.5.7 非金属材料电火花加工

电火花加工主要加工导电材料，对于半导体材料和非导体材料应有一些相应措施才能加工，这也是当前扩展电火花加工的方向之一。

(1) 半导体材料的电火花加工 当前可用电火花加工锗、硅、砷化镓、铋化镓等半导体材料，加工时应注意以下几方面。

1) 提高加工电压，如用 $50 \sim 400\text{V}$ 电压窄脉宽加工，单脉冲能量 $< 10^{-5}\text{J}$ ，否则易产生裂纹。

2) 选择相应的电极材料，如加工锗单晶时，可选择紫铜工具电极。

3) 由于在油性工作液中，表面易被碳污染；在水溶性工作液中，表面易形成非晶体的氧化膜，故多用去离子水，且电阻率保持在 $10^6\Omega \cdot \text{cm}$ 以上。

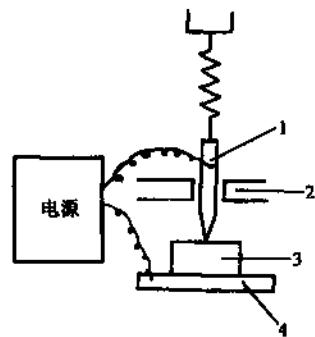


图 6-33 高电压法电火花加工

1—针状工具电极 2—导向器 3—工件 4—电极板

4) 半导体材料较脆, 装夹时应采用真空吸附等方法较好。

(2) 非导体材料电火花加工 一般采用高电压法和电解液法对玻璃、红宝石、金刚石等材料进行加工。

1) 高电压法 如图 6-33 所示, 针状工具电极 1 通过弹簧作用轻轻地压在工件 3 上, 并随加工过程自动进给, 不需要复杂的垂直方向进给机构, 工件 3 与电极板 4 相连。当极间加以 6000~12000V、频率为几十至几千兆赫的高频高电压或直流电压时, 尖电极附近的绝缘介质(大都为空气)被电离, 产生电晕放电。由于极间寄生电容的存在, 高频时可通过更大的电流, 使加工效果更强。通常用于加工金刚石。

由于聚晶金刚石是由人造金刚石晶体和各种添加剂在高温(1400℃)高压($6 \times 10^9 \text{Pa}$)下烧结而成, 本身具有一定的导电性, 可用普通电火花加工方法加工。

2) 电解液法 如图 6-34 所示, 工件置于电解液中, 针状工具电极 2 轻压于工件 6 上, 由砝码 3 调节压力大小, 并可随加工过程下移。电解电极 1 也置于电解液中。当极间加电压时, 尖电极周围产生气泡, 与电解液之间发生放电, 在与工件接触部分, 由于化学和热的作用而被蚀除。通常电压为 30~40V, 电解电极 1 接正极。多用于加工玻璃、红宝石等材料。

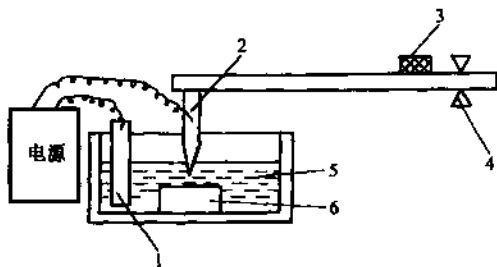


图 6-34 电解液法电火花加工
1—电解电极 2—工具电极 3—砝码
4—支点 5—电解液 6—工件

3 电火花线切割加工

3.1 电火花线切割加工原理、分类、特点及应用范围

3.1.1 电火花线切割加工原理

电火花线切割加工是通过线状工具电极与工件电极的相对运动, 对工件进行脉冲放电加工。脉冲电源的阳极接工件, 阴极接电极丝。电极丝在其轴向以一定的速度相对工件移动, 以使其能均匀低损耗, 并在电极丝与工件切缝之间喷射工作液, 也可以将电极丝和工件全部浸泡在工作液中加工。控制安装工件的工作台, 使其按一定的轨迹作纵向和横向的进给运动, 就能切割出一定形状和尺寸的工件。

3.1.2 电火花线切割加工的分类

按照控制系统的类型来分类, 电火花线切割加工可分为靠模仿形、光电跟踪和数字控制等三类, 现代的电火花线切割加工绝大部分都是数控的。

按照电极丝运动的快慢来分类, 电火花线切割加工可分为快速走丝和慢速走丝两大类, 或称为高速走丝和低速走丝两大类。

(1) 高速走丝线切割加工 高速走丝线切割加工的机床外形如图 6-35 所示, 其结构原理图如图 6-36 所示。电极丝绕在卷丝筒上, 通过丝架上的导丝轮形成锯弓状。卷丝筒装在走丝溜板上, 电动机带动卷丝筒作周期正、反转运动, 走丝溜板配合卷丝筒正、反转在卷丝筒轴向与卷丝筒一起作往复运动, 从而使电极丝得到周期往复运动, 走丝速度一般为 2.5~10m/s。电极丝使用一段时间后要更换新丝, 以免因损耗断丝而影响加工。

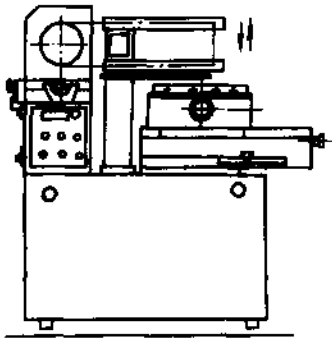


图 6-35 高速走丝线切割加工机床外形图

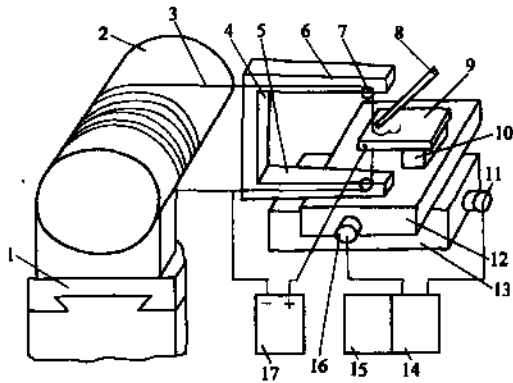


图 6-36 高速走丝线切割加工机床结构原理图
1—走丝滑板 2—卷丝筒 3—电极丝 4—丝架 5—下丝臂
6—上丝臂 7—导轮 8—工作液喷嘴 9—工件 10—绝缘垫块
11、16—伺服电动机 12—工作台 13—溜板
14—伺服电动机电源 15—数控装置 17—脉冲电源

(2) 低速走丝线切割加工 低速走丝线切割加工的机床外形如图 6-37 所示，其结构原理图如图 6-38 所示。以成卷铜丝作为电极丝，经张紧机构、导轮、导向装置形成锯弓状，走丝作单方向运动，走丝速度一般低于 0.2m/s ，电极丝为一次性使用。电极丝走丝平稳无振动，损耗小，加工精度高、表面粗糙度低。断丝可自动停车报警，并有气动自动穿丝装置，为当前国外的主流产品，也是线切割机床的发展方向。

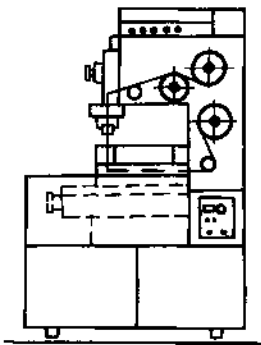


图 6-37 低速走丝线切割加工机床外形图

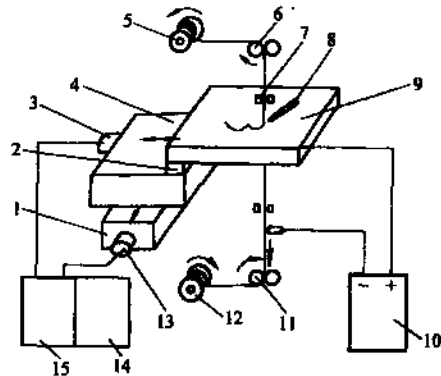


图 6-38 低速走丝线切割加工机床结构原理图
1—溜板 2—绝缘垫块 3、13—伺服电动机 4—工作台 5—放丝卷筒
6—导轮和张紧机构 7—导向装置 8—工作液喷嘴 9—工件
10—脉冲电源 11—导轮和张紧机构 12—收丝卷筒
14—数控装置 15—伺服电动机电源

3.1.3 电火花线切割加工的特点

除电火花加工的共性特点外，其本身尚有以下一些特点。

1) 绝大多数的电火花线切割机床都是数字控制的，只要输入编制的数控程序，便可加工各种形状零件，不必制作成形电极。

2) 主要加工二维平面零件，四坐标数控电火花线切割机床(x, y 两坐标移动和绕 x, y 轴的

转动),可加工锥面和复杂直纹表面,如图6-39所示。

3) 电极丝直径很细,为 $\phi 0.025\text{mm} \sim \phi 0.3\text{mm}$,最细可达 $\phi 0.003\text{mm}$,可切割微细异形孔、窄缝、小尖角、小内角、小圆角等复杂形状的零件。由于切缝小、还可套裁,故材料利用率很高。

4) 由于电极丝与工件之间始终有相对运动,特别是高速走丝,其相对运动很快,因此一般没有稳定电弧放电状态,可以认为其放电间隙状态由正常火花放电,开路和短路三种状态组成,往往在单个脉冲内有多种放电状态出现,有“微开路”、“微短路”现象。

5) 电极丝在加工中是移动的,高速走丝时,电极丝重复使用;低速走丝时,电极丝一次使用,因此单位长度电极丝损耗很少,从而对加工的影响小。线切割由于是小面积加工,因此面积效应显著。

6) 采用水溶性工作液,高速走丝多用乳化液,低速走丝多用去离子水,不易起火,易于实现安全无人连续运转。但由于水溶性工作液电阻率远比煤油小,因而在开路状态下,仍有明显的电解电流。

7) 依靠数控功能,控制电极丝的轨迹和偏移计算,可方便地调整凹凸模具的配合间隙;通过锥度切割功能,有可能实现凹凸模具一次同时加工。

8) 电火花线切割时,电极丝虽处于张紧状态,但仍然是柔性的,当电极丝与工件接近到通常的放电间隙($8 \sim 10\mu\text{m}$)时,并不发生火花放电;当电极丝继续接近已接触工件时,仍不发生火花放电;直至当工件将电极丝顶弯一定距离(几微米至几十微米),才发生正常的火花放电,这种情况称之为“疏松接触”式轻压放电现象。究其原因,可以认为,在电极丝和工件之间存在着由某种电化学产生的绝缘薄膜介质,在电极丝被顶弯受压和电极丝相对工件移动摩擦作用下,才能使这种薄膜减薄而被击穿,产生火花放电。火花放电所产生的爆炸力可得使电极丝局部振动而脱离接触,但很快就恢复,因此,总体上是疏松接触轻压放电。

图6-40表示了电火花线切割时的放电电压、电流波形。其中图a是高速走丝时的情况,其放电电压、电流波形与电火花成形加工基本相似,但由于电极丝的高速运动,在一次脉宽内

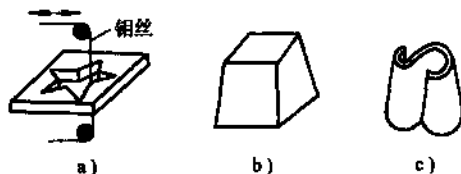


图6-39 数控电火花线切割加工的零件

a) 二维图形平面零件 b) 斜直纹表面立方体 c) 斜直纹表面曲线体

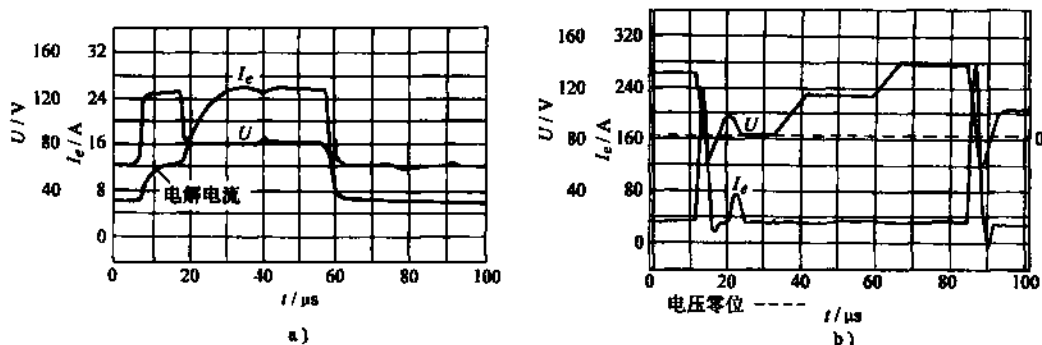


图6-40 电火花线切割时的放电电压、电流波形

a) 高速走丝 b) 低速走丝

可能有开路、正常火花放电、短路多次多种形式的状态转换；由于多采用乳化液为工作液，其电阻率不够大，比煤油和去离子水低得多，有电化学反应，产生电解电流，在开路状态仍有明显的极间电流；由于电极丝的高速运动，没有稳定的拉弧状态。图 b 是低速走丝时的电压，电流波形，这时走丝速度很低，为了达到好的工艺效果而又不断丝，通常采用窄脉宽、大峰值电流的“硬脉冲”加工，脉宽只有几微秒，峰值电流可达 80 ~ 300A。同时工作液主要用电阻率可控的去离子水，易排屑而不易短路，冷却条件好。

3.1.4 电火花线切割加工的应用范围

电火花线切割的应用十分广泛，归纳起来有以下几方面。

(1) 模具加工 可加工冲模的凹模、凸模、固定板和卸料板、粉末冶金模、镶拼型腔模、拉丝模、波纹板成形模和冷拔模等平面形状和立体形状金属模具。

(2) 微细槽、缝、孔加工 可加工喷丝板异形孔、射流元件、激光器件等的微孔、槽及缝等。

(3) 工量具加工 可加工成形刀具、样板等。

(4) 电火花成形加工用电极加工 如微细复杂形状电极、带锥度型腔加工用电极和穿孔加工用电极等。

(5) 试制件及零件加工 如电机硅钢片定转子铁心加工、凸轮零件加工、材料试验样件、稀有、贵重金属的切割等。

可以看出，电火花线切割加工是模具制造、精密零件制造、微细加工、新产品试制等的重要加工手段。

3.2 电火花线切割加工设备

3.2.1 高速走丝电火花线切割机床

高速走丝电火花线切割机床由主机、脉冲电源、数控系统和工作液循环过滤系统四大部分组成，见图 6-36。

1. 主机

主机由床身、工作台、贮丝机构、丝架(锥度切割装置)、机床电器控制系统、夹具、附件等构成。

工作台中，导轨的形式有滑动导轨和滚动导轨，传动装置用交流伺服电动机带动滚珠丝杠。近年来，有用直线电动机直接驱动，电动机本身有导轨，无丝杠，无间隙，为“零传动”。

(1) 贮丝机构 贮丝机构是关键部件之一，近年来有一些发展，如图 6-41 所示。

1) 单机高速往复走丝方式的贮丝机构(图 a) 由走丝溜板、卷丝筒、丝架等所组成(见图 6-36)，是最早出现的而被广泛采用的一种结构，此结构简单，但绕丝少往返频繁，振动大，丝损快，影响加工精度和表面粗糙度。

2) 双机高速往复走丝方式的贮丝机构(图 b)由两个电动机分别作正、反转来走丝，结构较复杂，但绕丝长，往返次数少，振动较小，丝损较慢，有利于提高加工精度，降低表面粗糙度值，但走丝振动问题基本上未解决。

3) 单机高速横向往复走丝方式的贮丝机构(图 c) 其特点是在布局上采用卷丝筒在上，丝架在下的结构，走丝系统配置了两级张紧机构，第一级用重锤机构，第二级用电压控制的低惯量的电磁制动器，使电极丝处于合适的张紧状态，减少振动；同时，尽量缩短左右两个导向装置的距离，提高电极丝的刚度。从而可以提高加工精度，降低表面粗糙度值。

4) 自旋式走丝方式的贮丝机构(图 d) 高速走丝的致命弱点是电极丝振动大, 往返走丝不平稳, 因此新近研究出一种自旋式电火花线切割机床, 其方案是较大程度地降低走丝速度, 电极丝旋转, 并辅以从两端强迫冲液, 能够达到很高的加工精度和很低的表面粗糙度值, 但其结构复杂, 制造精度要求高, 在思路上有新颖性。

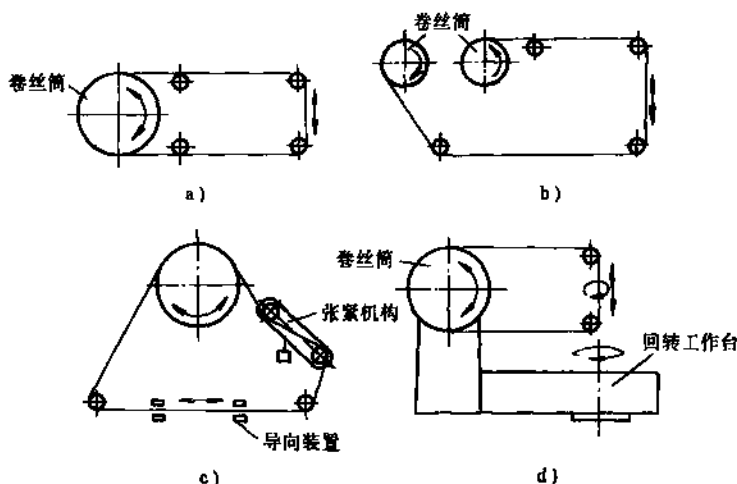


图 6-41 贮丝机构的各种形式

- a) 单机往复走丝 b) 双机往复走丝
c) 单机横向往复走丝 d) 自旋式走丝

(2) 丝架 丝架也是一个关键部件, 它有单柱支撑双臂悬伸式, 跨距可调双臂悬伸式、龙门式和偏移式等。其中偏移式是为了切割有锥度的直纹表面, 有三种实现方法, 如图 6-42 所示。

1) 单丝臂平动法(图 a) 若使上丝臂在 y 向平移, 可得到丝架绕 x 轴的摆动, 即坐标 A , 同理, 下丝臂在 y 向平移也可得到; 若使上丝臂在 x 向平移, 可得到丝架绕 y 轴的摆动, 即坐标 B , 同理, 下丝臂在 y 向平移也可得到。此法锥度不能太大, 否则导轮易损。

2) 双丝臂平动法(图 b) 上、下丝臂同时从两导轮中心连线分别左、右等量移动, 可得到摆动。此法比图 6-42a 所示方法好。

3) 丝臂平动丝架摆动法(图 c) 上下丝臂在 y 向同时反向平移得到坐标 A ; 整个丝架绕两导轮中心连线的中点摆动得到坐标 B 。这种方法加工锥度时, 导轮不会偏载, 因此不会影响其磨损, 最大锥度可达 $\pm 3^\circ$, 这种方法应用较多。

从上述方法知道, 要实现锥度切割, 就要 4 轴数控联动, 不仅机床结构要复杂许多, 而且

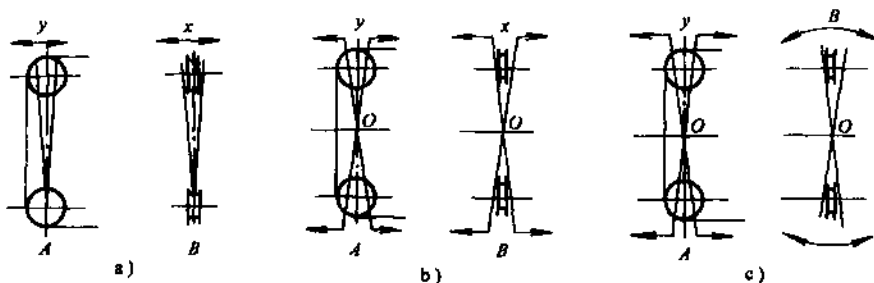


图 6-42 电火花线切割锥度的方法

- a) 单丝臂平动法 b) 双丝臂平动法 c) 丝臂平动丝架摆动法

数控系统也比较复杂。

导轮组合件也是关键件，从结构上可分为单支承(悬臂)和双支承两种。由于导轮总是和电极丝摩擦，易磨损，使用寿命短，现在多用陶瓷、金刚石等耐磨材料制作导轮。

2. 脉冲电源

由直流电源、脉冲发生器、前置放大器、功率放大器、脉冲参数调节器等组成。

电火花线切割加工脉冲电源在原理上与电火花成形加工相同，只是由于电极丝允许承载的电流限制和加工表面粗糙度的要求，其脉宽较窄(2~60 μ s)，单个脉冲能量较小，平均电流较小(1~5A)，且都采用正极性加工。

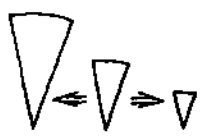
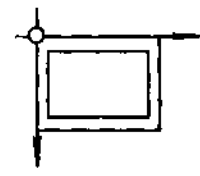
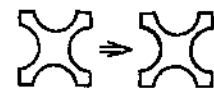
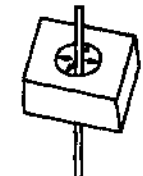
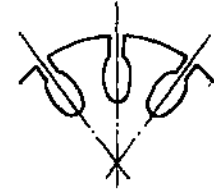
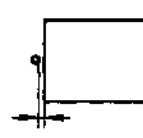
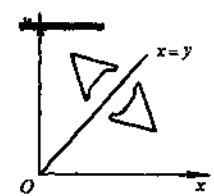

脉冲电源的形式很多，有晶体管矩形波脉冲电源、高频分组脉冲电源、可控 RC 微精加工脉冲电源、VMOS 管式脉冲电源等。

3. 数控系统


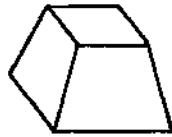
目前，多用微型计算机数控系统，功能比较强，并配有自动编程软件。

(1) 数控系统的功能 除一般的通用数控系统功能外，还针对电火花线切割加工的需求开发了一些功能，如保持平均放电间隙的进给控制，短路自动回退，图形的缩放、移位、旋转、对称，适应控制等，如表 6-19 所示。

表 6-19 电火花线切割加工数控系统的功能

功 能	图 示	功 能	图 示
图形缩放		自动回原点	
图形移位		自动找圆孔中心	
图形旋转		自动端面定位	
轴对称(镜像)		电极丝偏移(丝径补偿)	

(续)

功能	图 示	功能	图 示
图形重复		锥面控制	
图形实时显示		坐标间隙补偿	
停电记忆自动恢复		进给控制	
短路自动回退		适应控制	
断点设置		自动编程	
系统自检		其他	

(2) 自动编程系统 自动编程分为两个阶段,如图 6-43 所示。

1) 编制源程序阶段 用自动编程语言(APT)编制源程序,输入零件图和线切割工艺后可由计算机自动完成。

2) 编制目标程序阶段 由于数控机床的数控系统不能直接执行源程序,因此要将源程序输入到通用计算机中,通过编译程序或解释程序翻译成机器语言,经前置处理得到电极丝运动轨迹,再经后置处理得到用国际标准化组织颁布的数控代码所编写的数控程序,称为目标程序或结果程序。该目标程序即为具体的所用电火花线切割机床的数控程序,可用以进行数控电火花线切割。

(3) 手工编制数控程序 手工编程时,可直接编制数控加工用的目标程序,这时可根据零件图和线切割工艺,用 ISO 数控代码和程序格式逐条程序编写,工作量大、麻烦、易出错。早期生产的数控线切割机床所用的是 3B 数控代码,现在已被 ISO 代替。

4. 工作液循环过滤系统

与电火花成形加工的工作液循环过滤系统基本相同,大多数电火花线切割机床的工作液都采用喷淋式,为了喷淋效果好,可采用不同角度的多喷嘴系统。新近出产的线切割机床采用了全浸式工作液系统,效果更好。

3.2.2 低速走丝电火花线切割机床

低速走丝电火花线切割机床由主机、脉冲电源、数控系统和工作液循环过滤系统和一些附件组成(见图 6-38)。由于是低速走丝,所以在结构上与高速走丝电火花线切割机床有较大差异,如送丝机构、锥度切割机构等。低速走丝电火花线切割机床有许多功能装置,如打穿丝孔装置、自动穿丝装置、自动去芯装置、电极丝垂直度校正器、张力测力计等。

1. 主机

主机由床身、立柱、工作台、送丝机构、锥度切割装置、机床电器控制系统、夹具、附件

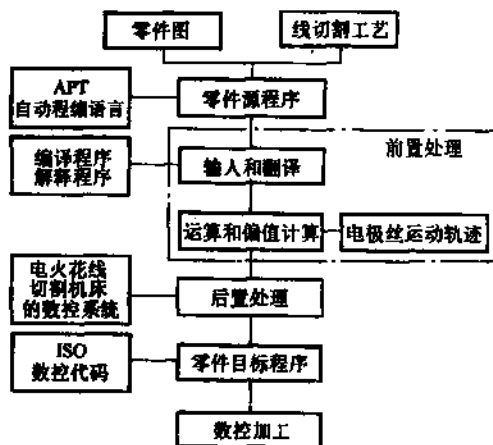


图 6-43 自动编程过程

等构成。

送丝机构是关键部件之一，图 6-44 表示了低速走丝的一种送丝机构，整卷的电极丝由放丝卷筒 11 送出，经张力装置、导向装置到工件处，再经滑轮 1、卷丝轮 14 和压紧轮 15 夹住，靠卷丝轮的等速回转使电极丝以一定的速度移动。废电极丝经排丝定向装置 13 收集到收丝卷筒 12 上或送到专门的收集器中。电极丝的张力由机械式或电磁式的制动轮 9 来设置。送丝路径上还装有一二个断丝检测微动开关，实现断丝报警和自动停车。

为了减轻电极丝的振动，应使上下导向器之间的跨度尽可能小，为了耐磨以保持精度，导向器采用 V 形蓝宝石或圆孔金刚石模结构。在导向器旁装有引电器，工作液一般通过引电区和导向器再进入加工区，从而使电极丝的全部通电部分都能冷却。近年生产的机床有自动穿丝机构，可使电极丝经一端导向器穿过工件的穿丝孔被送到另一端导向器。另外，有些机床在通过加工区后的回丝部分采用胶带夹送方式，以避免回丝过程中外力干扰对加工区丝张力的影响。

锥度切割装置在低速走丝线切割机床上广泛采用，实现的方法较多，现介绍两种。

(1) 数控四轴联动锥度切割装置 如图 6-45 所示，由上导向器作 U 、 V 轴驱动，与工作台的 X 、 Y 轴驱动构成数控四轴联动，在相应软件支持下，便可进行上下异形截面形状的切割。最大切割锥度一般为 $\pm 15^\circ \sim \pm 30^\circ$ 。在数控电火花线切割机床中比较常见。

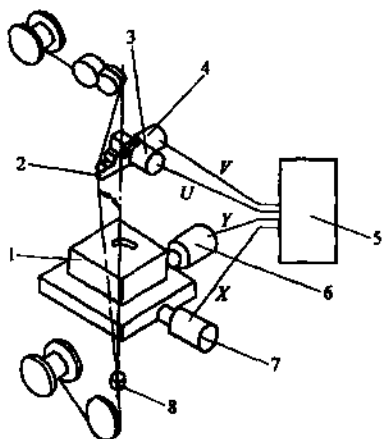


图 6-45 数控四轴联动锥度切割装置

1—工作台 2—上导向器 3— U 轴驱动电动机 4— V 轴驱动电动机 5—数控装置 6— Y 轴驱动电动机 7— X 轴驱动电动机 8—下导向器

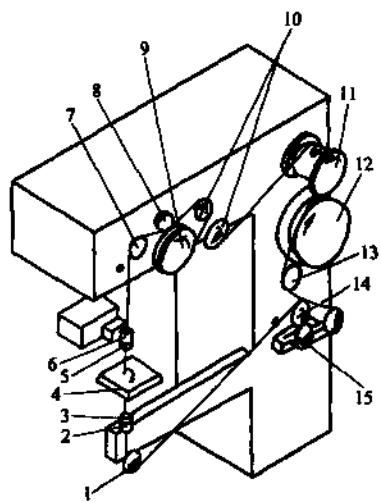


图 6-44 低速走丝线切割的送丝机构

1、10—滑轮 2、6—引电器 3、5—导向器 4—工件 7—滑轮 8—电极丝压紧轮 9—制动轮 11—放丝卷筒 12—收丝卷筒 13—排丝定向装置 14—卷丝轮 15—电极丝压紧轮

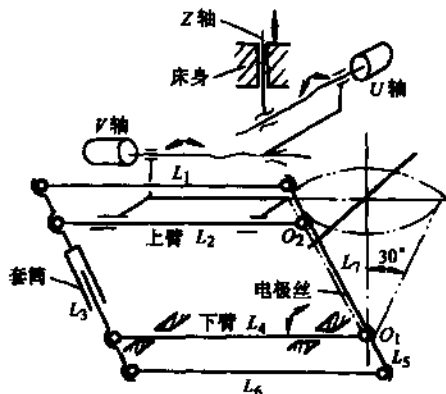


图 6-46 四连杆机构锥度切割装置

(2) 四连杆机构锥度切割装置 如图 6-46 所示，由 U 、 V 轴电动机驱动 L_2 — L_3 — L_4 —电

极丝所组成的四连杆机构实现锥度切割。工作液的上下喷嘴分别设置在连杆 L_1 和 L_5 上, 构成了 $L_1-L_3-L_2-L_1$ 和 $L_4-L_3-L_6-L_5$ 两个联动的四连杆机构实现同轴冲液。如果将丝架上下臂的两个导向器设在四连杆机构的球心 O_1 和 O_2 上时, 则在进行锥度切割时, 无原理误差。

2. 脉冲电源

低速走丝平稳可靠, 但排除蚀除物困难, 要提高加工效果, 改进脉冲电源是一个重要方面, 有以下一些举措。

1) 采用短脉宽、高峰值电流正极性加工。在粗加工时广泛采用。

2) 粗加工有时外加静电场或弱功率电压, 用以补偿放电力, 改善因电极丝滞后而出现的塌角现象。

3) 在用水溶性工作液时, 电源的直流分量产生的电解作用易在加工面上生成软化层, 使间隙电压的平均值等于零, 这种电路能抑制这种现象。

4) 精加工时采用极短脉宽(百纳秒级)和单个脉冲能量(几个微焦耳), 可显著改善加工表面质量。

5) 适应控制进给速度, 实时监视放电间隙状态。

在设计脉冲电源时, 应能满足以上举措的要求。

低速走丝的常用脉冲电源有 RC 式、晶体管式、并联电容式、无电解作用式、高频交流式电源等。其中并联电容式电源是实现短脉宽高峰值电流并有晶体管放电电路易控制的特点, 已被广泛采用; 无电解作用式电源能使间隙电压的平均值等于零; 而高频交流式电源可得到微小的放电能量, 用于微细精表面加工。

3. 数控系统

基本上与高速走丝相同, 但其功能更多些。

4. 工作液循环过滤系统

由于常用的工作液是去离子水, 故在工作液循环过滤系统中除一般液压元件外, 尚有离子交换树脂纯水器、电阻率控制装置、电阻率检测电极等, 以提供有一定电阻率的去离子水。

3.3 电极丝

1. 对电极丝的基本要求

对电极丝的要求有以下几点:

- 1) 易放电, 能承受大电流密度, 电阻率小, 加工效率高, 工作稳定。
- 2) 抗拉强度高、伸长率小、热膨胀小, 能承受张力, 不易断丝, 寿命长。
- 3) 熔点高。
- 4) 表面不易氧化、变质, 能长期保存。
- 5) 直线性好, 便于穿丝。
- 6) 丝径精度高, 表面光滑无缺陷。
- 7) 价格便宜, 规格齐全, 便于选用。

2. 主要品种规格

高速走丝时多用钼丝和钼钨合金丝, 如表 6-20 和表 6-21 所示。

表 6-20 钼丝牌号, 化学成分(质量分数)

牌 号	钼含量 % (%)	其他元素总和 % (%)	其他元素中每种元素含量 % (%)	添加元素 (Ca、Mg) 等余量 (%)
Mo1, Mo1 δ	99.93	0.07	0.01	
Mo3, Mo3 δ	99.73	0.07	0.01	0.01 ~ 0.20

注：“ δ ”为有伸长率符号，Mo1为纯钼牌号，Mo3为添加元素钼牌号。

表 6-21 钼钨合金丝牌号, 化学成分

牌 号	化学成分的质量分数 (%)		
	钼	钨	杂质总含量不大于
MoW50	50 \pm 1	余量	0.1
MoW20	80 \pm 1	余量	0.1

低速走丝时多用钢丝、黄铜丝、黄铜加铝、黄铜加锌、黄铜镀锌等，如表 7-22 所示。对于精密电火花线切割也可用钼丝、钨丝。

表 6-22 低速走丝用电极丝品种及特性

电极丝材料	状 态	相对电导率 (%)	熔 点 / $^{\circ}\text{C}$	抗拉强度 / (N/mm^2)
铜	软	100	1083	230 ~ 270
铜	硬	96 ~ 98	1083	450 ~ 500
黄铜	软	24 ~ 25	930	450 ~ 520
黄铜	硬	23 ~ 24	930	980 ~ 1050
黄铜加铝	软	24 ~ 25	920	600 ~ 700
黄铜加铝	硬	23 ~ 24	920	1050 ~ 1100
黄铜加锌	软	22 ~ 24	锌 419	450 ~ 500
黄铜镀锌	硬	22 ~ 24	锌 419	800 ~ 850
钼	硬	30	2625	1400 ~ 2500
钨	硬	25	3410	3000 ~ 3500

目前，国产的电极丝的丝径规格(mm)有 0.10、0.15、0.20、0.25、0.30、0.33、0.35 等，丝径误差一般在 $\pm 2\mu\text{m}$ 以内。国外生产的电极丝，丝径最小可达 0.03mm，甚至可达 0.003mm ~ 0.01mm，用于精密微细线切割。

3.4 电火花线切割工艺

3.4.1 电火花线切割加工的工艺指标

电火花线切割加工的主要工艺指标有以下几项。

(1) 切割速度 在保持一定的表面粗糙度要求下，单位时间内电极丝中心线在工件上切割的面积总和称为切割速度，单位为 mm^2/min 。通常高速走丝的切割速度为 40 ~ 80 mm^2/min ，最高可达 216 mm^2/min ($R_a 6.3\mu\text{m}$)；低速走丝的切割速度可达 300 mm^2/min ($R_a 3.2\mu\text{m}$)。

(2) 表面粗糙度 一般用轮廓算术平均偏差 R_a (μm) 来表示。高速走丝一般为 $R_a 5 \sim 2.5\mu\text{m}$, 最佳能达 $R_a 0.6\mu\text{m}$; 低速走丝一般为 $R_a 1.25\mu\text{m}$, 最佳可达 $R_a 0.2\mu\text{m}$ 。

(3) 电极丝损耗 高速走丝时, 用电极丝在切割 10000mm^2 面积后其直径的减少量来表示, 一般铝丝的损耗小于 0.01mm ; 低速走丝时, 由于电极丝为一次性使用, 一般可不考虑其损耗。

(4) 加工精度 包括尺寸、形状和位置三方面, 通常快速走丝为 $0.01 \sim 0.02\text{mm}$; 低速走丝为 $0.005 \sim 0.002\text{mm}$ 。

此外, 尚有最大切割厚度、最小切缝宽度、最小圆角等。

3.4.2 影响电火花线切割工艺指标的因素

1. 影响加工精度的因素

在电火花切割中, 影响加工精度的因素很多, 主要有机床、脉冲电源、控制系统、工作液、电极丝、工件材料、电参数、切割工艺方法等。

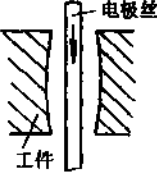
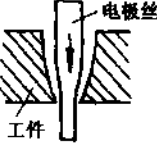
(1) 尺寸精度 主要与机床定位精度、重复定位精度、电极丝坐标定位、电极丝对工作台的垂直度、工作液温度保持、放电工作的稳定性等有关。

电极丝的坐标定位是一个难题, 通常可用火花法、电阻法等方法。火花法是以电极丝逼近工件基准面出现火花时为准。电阻法是测量电极丝与工件间的电阻, 可用电表或讯响器来检示。当然最简单的是目视法。

(2) 形状精度 在线切割加工中除一般的形状精度外, 易出现的形状精度有切缝宽度、角部精度(塌角圆角)、圆度、直线度(鼓形量)、上下端面尺寸差等, 表 6-23 表示了出现这些现象的影响因素。

表 6-23 电火花线切割中影响工件形状精度的因素

形状精度	图示	影响因素
切缝宽度 (放电间隙)		平均加工电压升高, 开路电压增高, 切缝宽度增大 进给速度快, 切缝宽度减小 电极丝振动大, 挠曲大, 切缝宽度增大 工作液电阻率大, 切缝宽度减小
角部精度		放电能量大, 放电排斥力就大, 角部误差大 导向器跨度大, 电极丝滞后量大, 角部误差大 电极丝张力大, 电极丝滞后量小, 角部误差小 在拐角处, 降低走丝速度, 可减小角部误差 在编程中改变拐角处的电极丝轨迹, 可减小角部误差
圆度		导向器的间隙大, 圆度误差大 机床进给系统中的系统误差

形状精度	图 示	影 响 因 素
直线度		<p>电极丝振动大, 鼓形量增大</p> <p>减小放电能量, 可减小放电排斥力, 使鼓形量减小</p> <p>局部电阻率改变, 放电间隙中上、中、下部放电不一样, 减小电阻率可减小鼓形量</p> <p>进给速度大, 鼓形量减小</p> <p>放电间隙中蚀除物排出不畅, 中部产生二次放电</p> <p>加大电极丝张力, 缩小导向器跨度, 能有效减小鼓形量</p>
上下端面尺寸差		<p>放电能量大, 电极损耗大, 工件上下端面尺寸差大</p> <p>电极丝走丝速度过低, 电极丝损耗大, 工件上下端面尺寸差大</p>

(3) 位置精度 一般与机床的精度关系较大, 影响形状精度的一些因素对位置精度也有影响。

2. 影响加工表面质量的因素

电火花线切割时, 表面质量包括表面粗糙度、表面变质层、表面缺陷等。影响表面质量的因素很多, 如放电能量、切割速度、电极丝跨度和张力、走丝速度、工作液等, 表 6-24 表示了影响工件表面质量的因素。

表 6-24 电火花切割中影响工件表面质量的因素

表面质量	影 响 因 素
表面粗糙度	<p>放电能量大, 使工件表面粗糙度增高</p> <p>切割速度高, 使工件表面粗糙度增高</p> <p>电极丝张力变动大, 表面粗糙度增高</p> <p>去离子水工作液的电解效应使工件表面粗糙度变好(工件为铜或铜)</p>
表面变质层	<p>放电能量大, 工件表面显微硬度减小, 表面层残余应力增加</p> <p>切割速度高, 工件表面变质层深、不连续、不均匀、表面裂纹多且深</p> <p>在油性工作液中, 因渗碳表面硬度增高</p> <p>在水溶性工作液中, 表面熔化层有大量残余奥氏体使显微硬度降低</p> <p>多次切割时, 随着放电能量减小, 工件表面显微硬度可以提高</p> <p>在水溶性工作液用粗规范进行铜电极丝电火花加工铜时, 工件表面有铜粘结层, 硬度较低</p>
表面缺陷	<p>条纹</p> <p>走丝机构工作不正常, 引起张力变化, 引起电极丝振动</p> <p>高速走丝时, 电极丝往复运动</p> <p>压紧轮、导轮组合因制造精度不够或磨损, 工作不正常使走丝速度变化</p> <p>工作台进给速度不稳定</p> <p>放电不稳定, 有周期或非周期电压波动</p>
	<p>针孔</p> <p>水溶性工作液的电解作用</p> <p>增大走丝速度</p>

3. 影响切割速度的因素

影响切割速度的因素主要有以下几项。

(1) 面积效应 电火花线切割的加工面积主要由工件厚度和电极丝直径决定。加工面积大时,可采用较高电流,从而可提高切割速度,但当厚度太大时,由于工作条件变差,如电极丝跨度大,刚性差,蚀除物排出困难等,切割速度反而下降。

(2) 电极丝张力 电极丝张力大时其振动的振幅减小,放电效率相对提高,可提高切割速度。

(3) 走丝速度 走丝速度高,可减少断丝和短路机会,可提高切割速度,但走丝速度提高会使电极丝的振动增加,又会影响切割速度。

(4) 工作液 在用黄铜电极丝加工钢时,工作液的电阻率宜低,可提高切割速度,但加工硬质合金时则反之。增大工作液的压力与流速,排出蚀除物容易,可提高切割速度,但过高反而会引起电极丝振动,影响切割速度,因此可以维持层流为限。

(5) 电极丝材料 不同电极丝材料的切割速度不同,如黄铜丝比钼丝要高些。

(6) 工件材料 不同工件材料的切割速度不同,铜的切割速度高于钢,钢高于铜钨合金,铜钨合金又高于硬质合金。

(7) 电参数 电参数影响放电能量,放电能量大能提高切割速度。

(8) 脉冲电源工作方式。

3.4.3 电火花线切割工艺方法

(1) 多维切割 现代生产的电火花线切割机床多有多维切割功能,如有锥面切割装置,并可配数控转台,可进行分度加工、多位加工,进行四轴联动或五轴联动加工。

(2) 多次切割 多次切割是提高切割精度的一种方法,采用逐次减小放电能量、利用同一轨迹程序加偏移量进行多次切割,最多可达8次。多次切割可以去除凸尖、降低表面粗糙度值、改善表面变质层,减小残余应力,提高加工精度,但生产率有所降低。当然,进行多次切割必须有丝径补偿功能。

(3) 电极丝回转切割 电极丝回转切割能提高加工精度,降低表面粗糙度值。同时可以进行电火花磨削,可以磨削极细的针状零件和轴类零件。

3.4.4 高速走丝和低速走丝两种线切割方式的对比

当前,存在着高速走丝和低速走丝两种线切割机床,国内生产高速走丝线切割机床已有多年的历史,积累了不少经验,也占有不少市场。而国外,如日本、瑞士等国就只生产低速走丝线切割机床,因此处于竞争局面,现就这两种线切割方式进行对比,如表6-25所示。

表6-25 高速走丝和低速走丝两种线切割方式的对比

项目 \ 机型	高速走丝式	低速走丝式
走丝速度	$\geq 2.5\text{m/s}$, 常用8~10m/s	$< 2.5\text{m/s}$, 常用值 $< 0.25\text{m/s}$
电极丝材料	钼丝、钨钼丝	黄铜丝、铜丝、以铜为主体的合金或镀复材料
电极丝直径	$> \phi 0.05\text{mm}$	$\phi 0.025 \sim 0.3\text{mm}$
电极丝张力	靠绕丝预紧力, 不平衡	可调, 通常2.0~25N
穿丝方式	只能手工	手工, 可自动
电极丝工作状态	往复运行, 反复使用	单向运行, 一次性使用

(续)

项目	高速走丝式	低速走丝式
电极丝长度	数百米	数千米
电极丝振动	较大	较小
走丝系统结构	较简单	复杂
导轮(导向器)寿命	较短	较长
工作液	特制乳化液或水基工作液	去离子水, 个别场合用煤油
工作液电阻率	0.5 ~ 50kΩ·cm	10 ~ 200kΩ·cm
过滤能力		1 ~ 5μm
单边加工间隙	0.01 ~ 0.03mm	通常0.04 ~ 0.12mm, 最小0.01mm
加工工件形状功能	二维切割及锥面切割, 锥角 < 6° 无拐角处理功能	二维切割及多种锥面切割, 如等锥度、尖角、等半径、扭曲形、上下异形锥角大, 可达 ±15° ~ ±30° 有拐角处理功能
加工精度	圆度 0.006 ~ 0.008mm (φ10mm) 直线度 0.0025/50 尺寸精度 0.01 ~ 0.015mm	圆度 0.007mm (φ15mm) 直线度 0.005/120 尺寸精度 ±0.005mm; ±0.002mm (多次切割)
表面粗糙度	R _a 0.6μm	R _a 0.16μm (多次切割) R _a 0.09μm (用超光电源)
最大切割厚度	610mm	350 ~ 400mm
最小切缝	> 0.10mm	0.0045 ~ 0.014mm (丝径 0.003 ~ 0.01mm) 0.035 ~ 0.04mm (丝径 0.03mm)
计算机数控系统	一般功能	功能强, 能自动编程 可与计算机辅助设计、计算机辅助工艺过程设计集成 有工艺数据库
机床价格	便宜	昂贵
产地	国内	国内及国外

4 电解加工

电解加工是电化学加工中去除方法的一种。在电化学加工中, 还有电镀、电铸等结合加工以及电化学机械复合加工。

4.1 电解加工基本原理、特点及应用

电解加工是一种“电化学阳极溶解”或“电化学腐蚀”加工, 因此应先论述电化学加工原理。

4.1.1 电化学加工的基本原理

1. 电化学反应过程

将两金属片插入导电溶液接上直流电源,如图 6-47 所示,则导线和溶液中均有电流通过。金属片两极间是在外电场作用下靠自由电子按一定方向移动而导电的,是电子导体,或称为第一类导体。导电溶液是靠溶液中的电解质分子离解为正离子和负离子,作定向移动而导电的,是离子导体,或称为第二类导体。

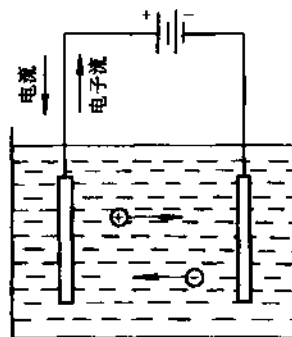


图 6-47 电化学反应过程

当外接直流电源两类导体构成通路时,溶液中的正、负离子所带电荷相等,分布均匀,溶液呈中性。正离子移向阴极,在阴极上得到电子而进行还原反应;负离子移向阳极,在阳极上失掉电子而进行氧化反应,也可能是阳极金属原子失掉电子而成为正离子进入溶液。这种溶液中的正、负离子的定向移动称为电荷迁移。在两极表面上发生的交换电子(得失电子)的反应称为电化学反应。利用电化作用对金属进行加工的方法,称为电化学加工,它主要分为电解和电镀两大类,电镀是电解的反过程。

2. 电解质溶液

凡溶于水后能导电的物质称为电解质,如酸、碱、盐等。电解质与水形成的溶液称为电解质溶液,简称电解液。电解液中,电解质的含量称为电解液浓度,一般以质量分数(%)或物质的量浓度表示。

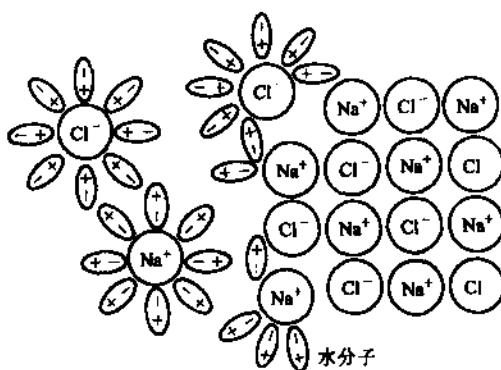
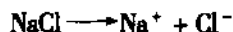


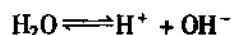
图 6-48 NaCl 晶体在水中电离示意图

电解质溶于水后,其分子将可逆地离解为带正电荷的正离子和带负电荷的负离子。例如 NaCl 是一种电解质,它由相间排列的 Na^+ 离子和 Cl^- 离子组成,是离子型晶体。在水中,由于其离子之间的静电作用大大减弱,离子被水分子拉入溶液中,每个钠离子和氯离子周围均吸附了一些水分子,形成水化离子,这一过程称为电离,如图 6-48 所示,其电离方程式为



NaCl 和强酸、强碱等都能 100% 电离,为强电解质,导电能力强。

水是弱电解质,能离解为带正电荷的氢离子 H^+ 和带负电荷的氢氧根离子 OH^- , 即



当这种反应处于动平衡时,纯水中 H^+ 离子和 OH^- 离子的浓度保持不变,而且正负离子浓度相等,故纯水的酸碱度呈中性。

在盐水溶液中, H^+ 离子的浓度 $[\text{H}^+]$ 等于 OH^- 离子的浓度 $[\text{OH}^-]$, 故溶液呈中性。在酸、碱水溶液中, $[\text{H}^+] \neq [\text{OH}^-]$, 但在 22°C 时,其乘积仍然不变,即 $[\text{H}^+] \cdot [\text{OH}^-] = 10^{-14}$ 。当在水中加硫酸(H_2SO_4)时, $[\text{H}^+] > 10^{-7}$, $[\text{OH}^-] < 10^{-7}$, $[\text{H}^+] > [\text{OH}^-]$, 溶液呈酸性;当在水中加氢氧化钠(NaOH)时,则 $[\text{OH}^-] > [\text{H}^+]$, 溶液呈碱性。

由此可见,只要用 $[\text{H}^+]$ 和 $[\text{OH}^-]$ 中的一个值就能表示水溶液的酸碱性,习惯上用 $[\text{H}^+]$, 但直接表示不方便,故常用氢离子浓度的负对数来表示,即 $\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$, 称为 pH 值(酸

度值), 可用试纸检查。

pH=7, 溶液呈中性, 即 $[H^+] = 10^{-7} g/L$;

pH<7, 溶液呈酸性, 即 $[H^+] > 10^{-7} g/L$;

pH>7, 溶液呈碱性, 即 $[H^+] < 10^{-7} g/L$ 。

电解质溶液用中性的、酸性的、碱性的均可, 它是电化学加工的必备条件之一。

3. 电极电位

如图 6-47 所示, 当电解质溶液中有电流 I 通过时, 在两极上的外加直流电压 U 并不等于电解液中的电阻压降。这是由于电极与电解液界面上存在电位差, 形成反电动势, 这种金属和溶液界面上的电位差称为该金属的电极电位, 它是反映金属电极得失电子能力的一种标志。图 6-49 表示了电极电位的分布情况。

$$U = IR + E_{\text{阳}} + E_{\text{阴}}$$

式中 U ——直流电源电压;

I ——电解质溶液中的电流;

R ——两极间电解液的电阻;

$E_{\text{阳}}$ ——阳极的电极电位;

$E_{\text{阴}}$ ——阴极的电极电位。

电极电位的形成可通过将铁(Fe)插入 $FeCl_2$ 水溶液中所发生的界面变化为例来进行说明。

由于铁离子在金属晶体中的能级大于在溶液中成为水化离子的能力, 即金属离子存在于溶液中比在金属晶体中更稳定, 因此, 铁离子与水分子结合, 成为水化离子到溶液中, 而电子则留于金属表面上。从而使得金属表层有多余电子而带负电, 溶液中有多余铁离子而带正电。



随着 Fe^{+2} 的增加, 金属上负电荷增加, 溶液中正电荷增加, 由于静电引力的作用, 铁离子的溶解速度逐渐减慢, 而且出现 Fe^{+2} 沉积到金属表面的趋向, 即



随着 Fe^{+2} 返回金属表面的增加, 最后这两种相反过程达到了动态平衡。从而使金属表面带负电, 溶液带正电, 形成双电层, 即在金属和溶液之间形成电位差, 这就是电极电位, 或称平衡电极电位, 如图 6-50a 所示。

若将铜(Cu)放入 $CuSO_4$ 溶液中, 由于铜离子在金属中的能级小于在溶液中成为水化离子的能级, 因此 Cu^{+2} 沉积到金属表面的速度大, 从而使金属铜表面带正电, 溶液带负电, 形成双电层, 也形成电位差, 如图 6-50b 所示。

由此可知, 根据金属与水溶液的能级大小, 会出现两种双电层情况, 如图 6-50 所示。

目前, 尚无方法直接测得金属的绝对电极电位, 但可用盐桥方法测出两种不同金属电极间的电位差, 因此, 可以氢的电极电位作为基准来测量其他金属电极的电极电位。表 6-26 为一

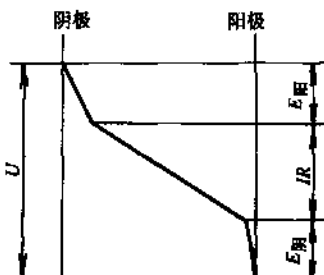


图 6-49 电极电位的分布情况

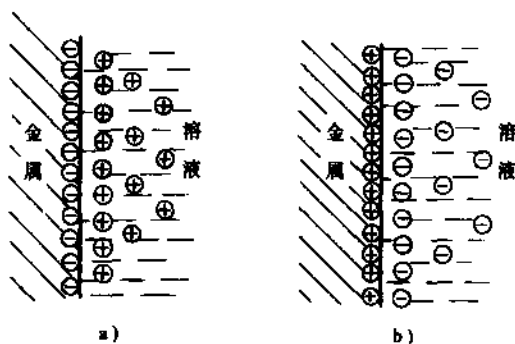


图 6-50 双电层示意图

a) 活泼金属的双电层 b) 不活泼金属的双电层

些元素的标准电极电位，即在 25℃时，把金属放在该金属离子有效含量为 1g/L 的溶液中，该金属的电极电位与标准氢电极的电极电位的差值，用 E° 表示。

当离子浓度改变时，电极电位也随着变化，可用“能斯特公式”换算

$$E' = E^\circ \pm \frac{0.059}{n} \log a$$

式中 E' ——平衡电极电位(V)；

E° ——标准电极电位(V)；

n ——电极反应得失电子数，即离子价数；

a ——离子的有效浓度。

公式设定为 25℃，“+”号用于计算金属，“-”号用于计算非金属的电极电位。

表 6-26 一些元素的标准电极电位(25℃)

元素氧化态/还原态	电 极 反 应	电 极 电 位
Li ⁺ /Li	Li ⁺ + e ⁻ ⇌ Li	-3.01
Rb ⁺ /Rb	Rb ⁺ + e ⁻ ⇌ Rb	-2.98
K ⁺ /K	K ⁺ + e ⁻ ⇌ K	-2.925
Ba ²⁺ /Ba	Ba ²⁺ + 2e ⁻ ⇌ Ba	-2.92
Ca ²⁺ /Ca	Ca ²⁺ + 2e ⁻ ⇌ Ca	-2.84
Na ⁺ /Na	Na ⁺ + e ⁻ ⇌ Na	-2.713
Mg ²⁺ /Mg	Mg ²⁺ + 2e ⁻ ⇌ Mg	-2.38
Ti ²⁺ /Ti	Ti ²⁺ + 2e ⁻ ⇌ Ti	-1.75
Al ³⁺ /Al	Al ³⁺ + 3e ⁻ ⇌ Al	-1.66
V ³⁺ /V	V ³⁺ + 3e ⁻ ⇌ V	-1.5
Mn ²⁺ /Mn	Mn ²⁺ + 2e ⁻ ⇌ Mn	-1.05
Zn ²⁺ /Zn	Zn ²⁺ + 2e ⁻ ⇌ Zn	-0.763
Cr ³⁺ /Cr	Cr ³⁺ + 3e ⁻ ⇌ Cr	-0.71
Fe ²⁺ /Fe	Fe ²⁺ + 2e ⁻ ⇌ Fe	-0.44
Cd ²⁺ /Cd	Cd ²⁺ + 2e ⁻ ⇌ Cd	-0.402
Co ²⁺ /Co	Co ²⁺ + 2e ⁻ ⇌ Co	-0.27
Ni ²⁺ /Ni	Ni ²⁺ + 2e ⁻ ⇌ Ni	-0.23
Mo ³⁺ /Mo	Mo ³⁺ + 3e ⁻ ⇌ Mo	-0.20
Su ²⁺ /Sn	Su ²⁺ + 2e ⁻ ⇌ Sn	-0.140
Pb ²⁺ /Pb	Pb ²⁺ + 2e ⁻ ⇌ Pb	-0.126
Fe ³⁺ /Fe	Fe ³⁺ + 3e ⁻ ⇌ Fe	-0.036
H ⁺ /H	2H ⁺ + 2e ⁻ ⇌ H ₂	0
S/S ⁻²	S + 2H ⁺ + 2e ⁻ ⇌ H ₂ S	+0.141
Cu ²⁺ /Cu	Cu ²⁺ + 2e ⁻ ⇌ eCu	+0.34

元素氧化态/还原态	电 极 反 应	电 极 电 位
O_2/OH^-	$H_2O + \frac{1}{2}O_2 + 2e \rightleftharpoons 2OH^-$	+ 0.401
Cu^+/Cu	$Cu^+ + e \rightleftharpoons Cu$	+ 0.522
I_2/I^-	$I_2 + 2e \rightleftharpoons 2I^-$	+ 0.535
Fe^{+3}/Fe^{+2}	$Fe^{+3} + e \rightleftharpoons Fe^{+2}$	+ 0.771
Hg^{+2}/Hg	$Hg^{+2} + 2e \rightleftharpoons Hg$	+ 0.7961
Ag^+/Ag	$Ag^+ + e \rightleftharpoons Ag$	+ 0.7996
Br_2/Br^-	$Br_2 + 2e \rightleftharpoons 2Br^-$	+ 1.065
Mn^{+4}/Mn^{+2}	$MnO_2 + 4H^+ + 2e \rightleftharpoons Mn^{+2} + 2H_2O$	+ 1.208
Cr^{+6}/Cr^{+3}	$Cr_2O_7^{2-} + 14H^+ + 6e \rightleftharpoons 2Cr^{+3} + 7H_2O$	+ 1.33
Cl_2/Cl^-	$Cl_2 + 2e \rightleftharpoons 2Cl^-$	+ 1.3583
Mn^{+7}/Mn^{+2}	$MnO_4^- + 8H^+ + 5e \rightleftharpoons Mn^{+2} + 4H_2O$	+ 1.491
S^{+7}/S^{+6}	$S_2O_8^{2-} + 2e \rightleftharpoons 2SO_4^{2-}$	+ 2.01
F_2/F^-	$F_2 + 2e \rightleftharpoons 2F^-$	+ 2.87

4. 电极反应

当将两电极插入电解质溶液而外加电压未通电时，电极处于平衡电极电位状态，通电后则电极间将产生放电反应，称为电极反应。

电化学加工中，电极反应是相当复杂的，其主要原因有：工件材料一般不是纯金属，而是合金，其金相组织也不完全均匀一致；电解质溶液往往不是该金属盐的溶液，且含有多种成分；电解质溶液的浓度、温度、压力、流速等对电解过程均有影响。

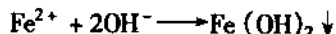
现以铁在氯化钠电解液中进行电解为例分析电极间的反应过程。

NaCl 和 H_2O 离解，电解液中存在着 H^+ 、 OH^- 、 Na^+ 、 Cl^- 四种离子，将发生如下反应。

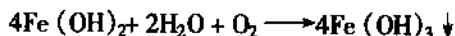
(1) 阳极反应 阳极上发生铁的溶解，Fe 一般以 Fe^{2+} 的形式进入电解液，为氧化反应。



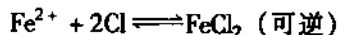
溶解于电解液中的 Fe^{2+} 和 OH^- 化合，生成 $Fe(OH)_2$ ，在水溶液中溶解度很低，为墨绿色的絮状物，产生沉淀，随电解液被带走。



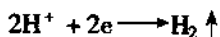
$Fe(OH)_2$ 又和电解液中及空气中的氧发生化学作用生成 $Fe(OH)_3$ ，为红棕色的沉淀物(铁锈)，随电解液被带走。



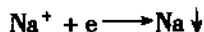
另外还可能发生



(2) 阴极反应 由于阴极积存大量多余电子，使电解液中带正电荷的氢离子被吸引到阴极表面，从阴极得到电子形成氢气而析出。

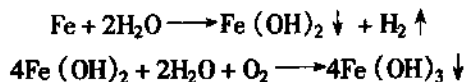


带正电荷的钠离子被吸引到阴极表面，得到电子而析出 Na。



由于钠的电极电位为 -2.713V ，比氢低，按电极反应的基本原理，电极电位最正的离子先在阴极反应，因此，在阴极上只能析出氢，而不可能沉淀出钠。

(3) 综合反应 可写成



由此可见，电极反应中，阳极的铁不断被溶解，最后生成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ；阴极生成 H_2 。电解液中的水不断被消耗，要定期补充，才可长期使用；而 Na^+ 和 Cl^- 并无消耗，不必补充。

5. 电极的极化

将两电极插入电解质溶液未通电流时，电极处于平衡电极电位状态，通电后，电极的平衡状态遭到破坏，阳极电位向正方向增大，阴极电位向负方向增大，这种现象称为极化，如图 6-51 所示。

极化后的电极电位与平衡电极电位的差值称为超电位。随着电流密度的增加，超电位也增加。当电极反应平衡时，阴、阳极平衡电极电位之和，称为分解电压，其值随电流密度的加大而加大。

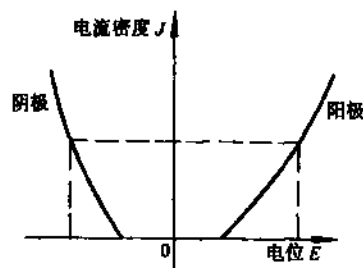


图 6-51 电极的极化曲线

(1) 电极过程 电极的极化是由电极过程的内部运动所决定的。

1) 电解加工时的阳极过程

a. 金属原子在外电场的作用下，克服金属晶体的作用力而失去电子，成为金属离子，为电化学反应。

b. 金属离子与水分子结合成为水化离子，为电化学反应。

c. 金属水化离子从阳极表面液层扩散，离开阳极表面区域，为离子的扩散与迁移过程。

2) 电解过程中的阴极过程

a. 溶液中的水化氢离子(H_3O^+)向阴极扩散，进入双电层后达阴极表面，为离子的扩散与迁移过程。

b. 水化氢离子脱水， $\text{H}_3\text{O}^+ \longrightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{H}^+$ ，为电化学反应。

c. 氢离子在阴极表面获得电子成为氢原子， $\text{H}^+ + e \longrightarrow \text{H}$ ，吸附在阴极表面，为电化学反应。

d. 氢原子复合成氢分子， $\text{H} + \text{H} \longrightarrow \text{H}_2$ ，为电化学反应。

e. 氢分子聚集成氢气泡析出，为电化学反应。

阴极和阳极的电化学反应同时产生，阳极失去电子数、阴极得到电子数、外电路电子数三者相等。在电解过程中，阳极和阴极都存在离子的扩散与迁移过程、电化学反应两种过程。

(2) 浓差极化 在电极过程中，因离子的扩散与迁移缓慢而引起的电极极化，称为浓差极化。

在阳极过程中，金属离子要越过双电层，才能向外迁移与扩散，但当金属离子生成、水化离子合成的电化学反应很快，而电极表面溶层中金属离子的扩散与迁移速度较慢，来不及扩散到溶液中去，从而在阳极表面造成金属离子堆积，使其电位增高，即阳极电位正移，这就是产

生浓差极化的原因。

在阴极过程中，由于水化氢离子的移动速度很快，因此，阴极表面的浓差极化一般很小。

由上述造成浓差极化的原因可知，凡能加速电极表面离子的扩散与迁移速度的措施，均可以减小浓差极化，如增高电解液温度、提高电解液的流速等。

(3) 电化学极化 在电极过程中，因电化学反应缓慢而造成的电极极化，称为电化学极化。

在阳极过程中，金属溶解的电化学极化一般很小，但当阳极上产生析氧反应时，会产生严重的电化学极化。

在阴极过程中，电化学反应是比较缓慢的，从电源流入的电子来不及转移给电解液中的氢离子 H^+ ，因此在阴极上积累了过多的电子，使阴极电位负移，造成电化学极化。

电化学极化主要取决于电极材料和电解液成分、温度和电流密度，温度升高、电流密度减小，均会减小电化学极化，但与电解液的流速关系不大。

6. 金属溶解的活化、钝化、超钝化状态

(1) 钝化状态 电流密度和金属溶解作用随着阳极电位正向提高而剧减，甚至完全停止溶解呈稳定状态，此时阳极表面处于钝化状态，其溶解称为钝化溶解。

产生钝化的原因有成相理论和吸附理论两种说法。成相理论认为，金属与溶液作用后在其表面形成一层紧密的极薄粘膜，通常由氧化物、氢氧化物或盐组成，使金属表面失去了原有的活泼性质，从而溶解过程减慢。吸附理论认为，金属表面由于形成了氧的吸附层而引起钝化。实际上两者兼而有之。钝化状态时可以形成平滑光泽的电解表面。

(2) 活化状态 电流密度和金属溶解作用随阳极电位正向提高而增长，此时的阳极表面处于活化状态，其阳极溶解称为活化溶解。

金属钝化膜生成后，可采取溶液加热、通入还原性气体、加入某些活性离子、机械摩擦等方法来破坏，这一过程称为活化过程。在这些措施中，溶液加热温度不能过高，否则会引起电解液过快蒸发、绝缘材料膨胀、软化和损坏等问题；氯离子 Cl^- 具有很强的活化能力，它与大多数金属的亲合力比氧大， Cl^- 吸附在电极上使钝化膜中的氧排出，活化效果好，因此，用 $NaCl$ 电解液电解效率高；电解磨削就是可利用机械摩擦来破坏钝化膜，使金属表面处于活化状态。活化状态下的阳极表面比较粗糙。

(3) 超钝化状态 钝化后电流密度随阳极电位继续提高又重新增大，称为超钝化状态，此时的溶解称超钝化溶解。超钝化状态的形成主要有钝化膜重新溶解或剥落、阳极电位达到其他电极反应的电位等，电解液中电解质含量越大，阳极电位越正，越容易转向超钝化。超钝化状态可获得光滑平整的表面。

4.1.2 电解加工基本原理

电解加工是在工具和工件之间接上电压为 $6 \sim 24V$ 的外加直流电源，工件接阳极，工具接阴极，极间间隙保持 $0.1 \sim 1mm$ ，在间隙处通以 $5 \sim 60m/s$ 、 $0.5 \sim 2MPa$ 的高速流动电解液，形成极间导电通路，产生电流，工件阳极表面的材料不断产生溶解，其溶解物被高速流动的电解液及时冲走，工具阴极不断进给，保持极间间隙，其加工示意图如图 6-52 所示。工具电极一般用铜或不锈钢等材料制成，电解液多用中性 Na -

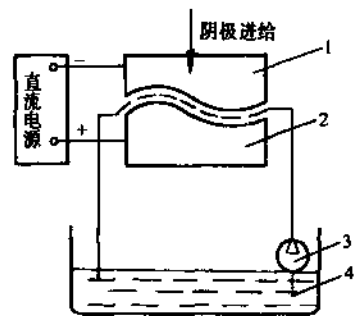


图 6-52 电解加工示意图

1—工具阴极 2—工件
阳极 3—泵 4—电解质溶液

Cl、NaNO₃ 等溶液。可见电解加工的基本原理是电化学阳极溶解，是电化学反应过程，它包括电解质在水中的电离及其放电反应、电极材料的放电反应和电极间的放电反应。

电解加工时，工具阴极与工件阳极不接触，开始，工具与工件形状不一致，相近的部位电流密度大，阳极溶解快，由于阴极不断进给，最后阳极与阴极的形状相近。

4.1.3 电解加工的特点与应用

1. 电解加工的特点

- 1) 加工范围广，不受金属材料本身硬度和强度的限制，可加工淬火钢、硬质合金、不锈钢、耐热钢及韧性金属材料。
- 2) 可加工各型面、型孔、型腔、直孔、弯孔、打标记、去毛刺、抛光以及各种电解机械复合加工，如电解磨削、珩磨、研磨等。
- 3) 生产率高，约为电火花加工的 5~10 倍，且不直接受加工精度和表面粗糙度的限制。
- 4) 工具阴极在理论上无损耗，可长期使用。由于工具损耗小，可达到的平均加工精度为 $\pm 0.1\text{mm}$ ，但棱角、小圆角 ($r < 0.2\text{mm}$) 很难加工出来，加工精度不及电火花加工。
- 5) 加工表面质量好，表面粗糙度可达 $R_a 1.25 \sim 0.2\mu\text{m}$ ，表面无毛刺、残余应力和变质层。
- 6) 电解液大多采用中性电解液 (如 NaCl、NaNO₃ 等)、酸性电解液 (如 HCl、HNO₃、H₂SO₄ 等)，对机床有腐蚀，对环境有污染，因此设备要求防腐蚀，环境要求防污染，应配置废水处理系统。

2. 电解加工方法及其应用

电解加工总的可分为电化学阳极溶解加工和电化学与机械或电热复合加工，如图 6-53 所示。除一些基本加工方法外，尚有振动进给脉冲电流电解加工、充气电解加工等。各种电解加工的工艺特征和应用范围如表 6-27 所示。应用电解加工可加工各种模具、叶片、枪管、炮筒内膛线、以及印刷、印染滚筒、轧辊表面花纹等。

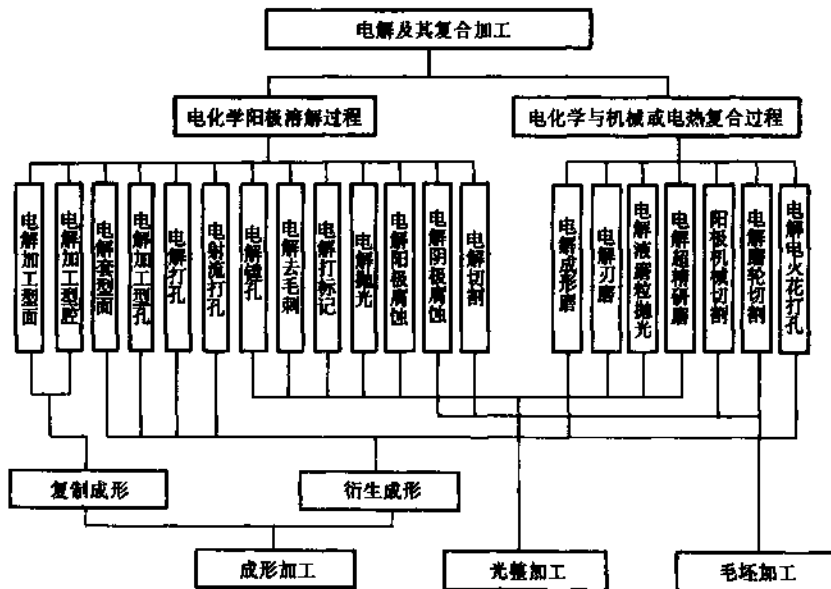

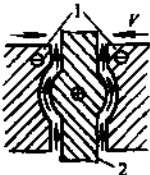
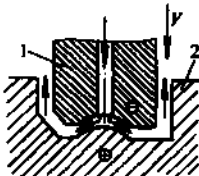
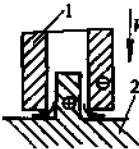
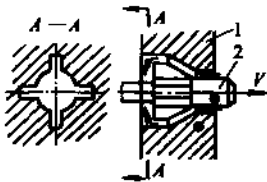
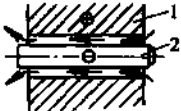
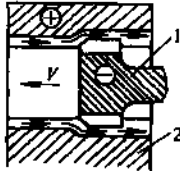
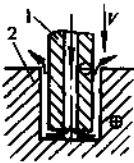
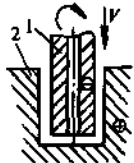
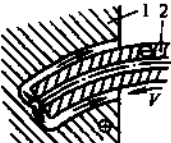
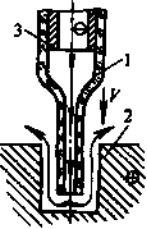




图 6-53 电解加工的各种方法

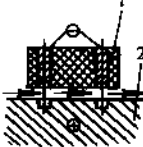
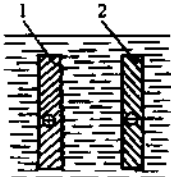
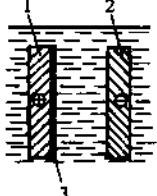
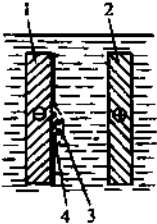

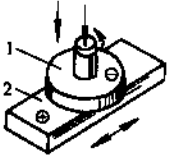
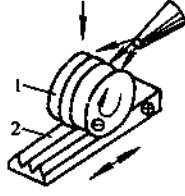
表 6-27 各种电解加工的工艺特征和应用范围

名称	运动示意图	工艺特征	应用范围
电解加工型面		<p>工具电极 1 以恒定速度 V 进给维持小而恒定的极间间隙</p> <p>电解液在压力下高速侧流入极间间隙</p> <p>工件 2 阳极溶解, 按工具电极 1 形状复制成形</p> <p>工具电极 1 不损耗</p>	外型面单面加工
		<p>工具电极 1 以恒定速度 V 进给维持小而恒定的极间间隙</p> <p>电解液在压力下高速侧流入极间间隙</p> <p>工件 2 阳极溶解, 按工具电极 1 形状复制成形</p> <p>工具电极 1 不损耗</p>	外型面双面加工
电解加工型腔		<p>工具电极 1 以设定的速度 V 进给维持设定的极间间隙</p> <p>电解液在压力下高速正流或反流通过工具电极 1 或水套进入极间间隙</p> <p>工件 2 阳极溶解, 按工具电极 1 形状复制成形</p> <p>工具电极 1 不损耗</p>	复杂型腔成形
电解套型面		<p>工具电极 1 恒速进给</p> <p>电解液在压力下高速正流或反流通过工具电极 1 或水套进入极间间隙</p> <p>工件 2 阳极溶解, 按电极内刃边缘型线衍生成形</p> <p>工具电极 1 不损耗</p>	不变截面二维型面成形
电解加工型孔		<p>工具电极 1 以设定的速度三面进给</p> <p>电解液在压力下高速正流通过工具电极 1 进入极间间隙</p> <p>工件 2 阳极溶解, 按工具电极 1 后端外刃边缘型线衍生成形</p> <p>工具电极 1 不损耗</p>	在毛坯预孔的基础上成形键槽、弧面、渐开线面
电解光孔		<p>固定工具电极 1</p> <p>电解液在压力下通过工具电极 1 高速进入极间间隙</p> <p>工件 2 阳极溶解, 按工具电极 1 形状复制成形</p> <p>工具电极 1 不损耗</p>	降低预孔的表面粗糙度及提高其几何精度
电解键孔		<p>工具电极 1 以设定速度 V 进给</p> <p>电解液从预孔进入加工间隙</p> <p>工件 2 阳极溶解, 按工具电极 1 最大外圆周边衍生成形</p> <p>工具电极 1 不损耗</p>	有余量的预孔加工, 达到要求的孔径

(续)

名称	运动示意图	工艺特征	应用范围
电解 打孔		<p>工具电极 1 以恒速 V 进给 电解液在较高的压力下正流通过工具电极 1, 进入端面间隙, 再经侧隙流出 工件 2 阳极溶解, 按工具电极 1 端面外刃边衍生成形</p>	异型或圆孔加工 群孔加工
		<p>工具电极 1 以恒速 V 进给, 同时以 n 旋转 电解液在较高的压力下正流通过工具电极 1 进入端面间隙, 再经侧隙流出 工件 2 阳极溶解, 按工具电极 1 端面外刃边衍生成形</p>	深小孔加工 $D_{\min} = 0.5\text{mm}$
		<p>圆弧轴心工具电极 1 以恒定切线速度圆周进给 电解液在较高压力下正流通过工具电极 1 进入端面间隙, 再经侧隙流出 工件 2 阳极溶解, 按工具电极 1 端面外刃边衍生成形</p>	圆弧轴心线的型腔、型孔或圆孔的加工
电射流 打孔		<p>工具电极 3 和玻璃喷嘴 1 以恒速 V 进给 电解液在较高压力下正流通过工具电极 3 进入玻璃喷嘴 3 的端面间隙, 再经侧隙流出 工件 2 在高电压下阳极溶解成形</p>	深小孔加工 $D_{\min} = 0.125\text{mm}$ $L/D = 50$
		<p>固定式铂喷嘴电极 1 高压电解液束喷入工件 2 工件 2 在高电压下阳极溶解成形</p>	极小孔加工 $D_{\min} = 0.05\text{mm}$ $L/D = 30$
电解 打标记		<p>毛坯打印区浸湿电解液, 固定工具电极加工标记处轻度阳极腐蚀, 深度浅, 外廓为深色 工具电极 1 不损耗</p>	常温及低湿度下工作的零件打印

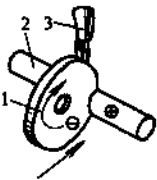
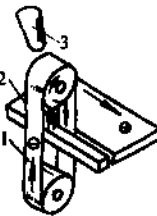
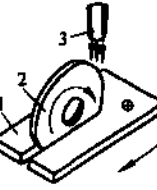
(续)

名称	运动示意图	工艺特征	应用范围
电解打标记		<p>电解液流经工具电极1与零件2打印区之间, 固定工具电极加工</p> <p>标记符处阳极溶解深度为0.1~0.2mm</p> <p>工具电极1不损耗</p>	要经受加热、氧化等过程的零件的打印
电解阳极腐蚀		<p>工具2与毛坯1均浸泡在静止或轻度搅拌的电解液中</p> <p>毛坯1为阳极, 工具2为阴极</p> <p>毛坯表面氧化皮靠阳极溶解去除</p> <p>工具2损耗小</p>	薄氧化皮去除
电解抛光		<p>工具2与毛坯1均浸泡在静止或轻度搅拌的电解液中</p> <p>毛坯1为阳极, 工具2为阴极</p> <p>毛坯表面微观不平度的去除是由于峰顶的溶解强于谷底</p> <p>工具2不损耗</p>	降低表面粗糙度, 使其具有镜面光度
电解阴极腐蚀		<p>工具2与毛坯1均浸泡在静止或轻度搅拌的电解液中</p> <p>毛坯1为阴极, 工具2为阳极</p> <p>氧化皮3借助于阴极表面析出的氢气泡4崩落</p> <p>工具2损耗急剧</p>	厚氧化皮去除
电解去毛刺		<p>固定工具电极加工, 工具电极1仅相对尖边处暴露, 其他部位被绝缘</p> <p>电解液进入极间区</p> <p>尖边或毛刺集中的电场的作用阳极溶解而倒圆</p>	可达性差的部位的尖边倒圆或去除毛刺
电解磨		<p>导电磨轮1接阴极, 其端面切入工件2</p> <p>电解液通过工具的中心孔压入磨轮的内腔, 借离心力作用甩入磨轮端面与被加工面间</p> <p>工件材料是靠阳极溶解和磨粒的机械磨削双重作用去除</p> <p>磨轮损耗较小</p>	磨削难加工合金表面
		<p>导电成形磨轮1在全型横截面深度上切入被加工面, 纵向进给</p> <p>电解液由喷嘴喷到磨轮周围, 可靠旋转作用带入加工区</p> <p>工件材料2在阳极溶解和磨粒的机械磨削双重作用下去除</p> <p>磨轮损耗较小</p>	难加工合金二维型面磨削

(续)

名称	运动示意图	工艺特征	应用范围
电解刃磨		<p>导电磨轮 1 接阴极, 刀具 2 的刃磨面切入磨轮端面 电解液由喷嘴 3 喷至磨轮端面 刀具材料在阳极溶解和磨削的双重作用下去除 磨轮损耗较小</p>	<p>刃磨焊接的硬质合金刀片(车刀, 铣刀等)</p>
电解超精研磨		<p>工具阴极 2 固定, 工件阳极 1 作圆周送进, 研磨器 4 作纵向往返运动, 电解液由喷嘴 3 喷向极间间隙 电解过程在阳极形成钝化膜, 研磨器优先去除加工面峰顶的钝化膜加速阳极溶解, 光整加工面 研磨器 4 损耗不大</p>	<p>用于韧性金属材料的表面光整加工</p>
电解珩磨		<p>珩磨头 1 接阴极与磨条 2 共以 n 作旋转并以 V 作往返运动 电解液进入磨头与工件 3 之间 磨条 2 损耗不大</p>	<p>珩磨内、外表面</p>
电解液磨粒抛光		<p>工具 1、毛坯 2 浸泡在含磨粒电解液中, 电解液靠工具 1 的旋转而更新 工件表面的抛光借助于阳极钝化溶解, 辅以磨粒去除钝化膜的机械作用</p>	<p>用于韧性金属表面的抛光</p>
电解液磨粒抛光		<p>滚筒阴极 1 旋转, 带动工件 3 及磨料 2 运动 电解液频繁更新 工件外表面材料借助于阳极溶解及磨削双重作用抛光, 尖边倒圆 阳极 4 损耗</p>	<p>小零件成批尖边倒圆及抛光</p>

(续)

名称	运动示意图	工艺特征	应用范围
电解磨轮切割		磨轮1旋转并向工件2的整个厚度切入进给 电解液喷到旋转的磨轮上,被带入到加工区 切割是借助于阳极溶解及金刚石切削双重作用 磨轮损耗很小	大尺寸的难加工金属和合金毛坯切割
阳极机械切割		带状工具1旋转并将喷在其上的电解液带入加工区 工件2的全部厚度均切入工具 工件切割除阳极溶解、机械切割外尚有电热作用 工具损耗大	
电解切割		工件1进给,旋转的工具阴极2切入毛坯的全部厚度 电解液由喷嘴3喷到旋转的工具上,被带入加工区 切割仅是阳极溶解作用 工具无损耗	小尺寸的难加工金属和合金的毛坯切割

注:该表取自参考文献[16]。

4.2 电解加工中的基本规律

4.2.1 加工速度及其影响因素

电解加工中,加工速度的表示方法有三种,它们从不同角度代表了生产率。

体积加工速度 V_v : 单位时间内去除工件材料的体积量,单位为 mm^3/min ;

质量加工速度 V_m : 单位时间内去除工件材料的质量,单位为 g/min ;

深度加工速度 V_l : 单位时间内在工件深度方向去除工件材料的长度,又可称为长度加工速度,单位为 mm/min 。

影响加工速度的因素主要有工件材料的电化学当量、电流密度、电解液状态及电极间隙(加工间隙)、电流效率等。

(1) 金属的电化学当量 电解时电极上溶解或析出物质的量,与电解电流和电解时间成正比,亦即与电荷成正比,其比例系数称为电化学当量,可用法拉第第一定律(电解定律)表示:

$$m = KQ = KIt \quad (\text{用质量计})$$

$$V = \omega Q = \omega It \quad (\text{用体积计})$$

式中 m ——电极上溶解或析出物质的质量(g);

V ——电极上溶解或析出物质的体积(mm^3);

K ——被电解物质的质量电化学当量 [$\text{g}/(\text{A} \cdot \text{min})$];

ω ——被电解物质的体积电化学当量 [$\text{mm}^3/(\text{A}\cdot\text{min})$] ;

Q ——通过电荷 ($\text{C}/60$) ;

I ——电解电流 (A) ;

t ——电解时间 (min) 。

常见金属的电化学当量如表 6-28 所示。

表 6-28 常见金属的电化学当量

名称	相对原子质量	密度/(g/cm^3)	原子价	质量电化学当量 $K/(\text{g}/(\text{A}\cdot\text{min}))$	体积电化学当量 $\omega/(\text{mm}^3/(\text{A}\cdot\text{min}))$
Fe	55.85	7.866 (20°)	2	0.01736	2.215
			3	0.01157	1.471
Cr	52.01	7.138 (25°)	2	0.01078	1.511
Ni	58.69	8.90 (25°)	2	0.01825	2.050
			3	0.01216	1.364
Mn	54.93	7.3 (20°)	2	0.01708	2.340
			3	0.01139	1.560
Si	28.06	2.33 (0°)	3	0.00419	2.495
Mo	95.95	10.23 (17°)	3	0.01989	1.944
V	50.95	5.98 (18°)	3	0.01056	1.766
			5	0.00634	1.060
Ti	47.90	4.526 (20°)	3	0.00993	2.194
			4	0.00745	1.645
Co	58.94	8.83 (25°)	2	0.01832	2.075
			3	0.01222	1.384
Cu	63.54	8.93 (25°)	1	0.03951	4.424
			2	0.01976	2.216
Al	29.97	2.69 (20°)	3	0.00599	2.079
Mg	24.32	1.737 (25°)	2	0.00756	4.352
Zn	65.38	7.140 (16°)	2	0.02033	2.847
W	183.92	19.24 (20°)	6	0.01877	0.976
			8	0.01430	0.744
Pb	207.21	11.34 (20°)	2	0.0644	5.683
Sn	118.70	7.234 (18°)	2	0.0369	5.102
			4	0.0185	2.551
Sb	121.76	6.69 (17°)	3	0.0252	3.773
Cd	112.41	8.618 (20°)	2	0.0350	4.602
Zr	91.22	6.52 (25°)	4	0.0142	2.176
Ge	72.60	5.459 (20°)	4	0.0113	2.068

从法拉第第二定律可知

$$K = A/nF$$

式中 A ——相对原子质量；

n ——原子价；

F ——法拉第常数，即溶解或析出任何 1g 当量物质所需的电荷，与物质的自身性质无关，实验得到 $F \approx 96500\text{C}$ 。

体积电化学当量可由质量电化学当量通过密度来进行换算。

电极上溶解或析出物质的深度可通过体积和电极面积来换算，深度加工速度等于工具阴极

的进给速度，简称加工速度或蚀除速度。

(2) 电流效率 由于在电解加工中，电极反应比较复杂，实际工件阳极的蚀除量要小于或大于理论值，由此引入电流效率 η

$$\eta = \frac{\text{金属实际溶解或析出量}}{\text{金属理论溶解或析出量}} 100\%$$

因此，上述的实际溶解或析出量为

$$m = \eta KIt$$

$$V = \eta \rho \nu t$$

影响电流效率的因素较多，主要有以下几方面：

1) 阳极有副反应 如硝酸钠电解液加工钢时有氧气析出，另外有些情况有氯气等析出。

2) 元素有两个以上原子价 铁有二价、三价，铬有三价、六价等，实际电解中可能以高价离子溶解，也可能以低价离子溶解。

3) 金属材料成分及金相组织 金属材料中含有硫、碳、碳化铁等电化学反应中活性差、难电解的微粒或产生了晶间腐蚀，在合金晶粒边缘先电解，由电解液把这些微粒冲刷成块状脱落。

当实际阳极溶解的金属原子价高于计算时所用值，或有其他副反应等，消耗了电能，电流效率 $\eta < 100\%$ 。

当实际阳极溶解的金属原子价低于计算时所用值，或有块状脱落等，节省了一部分电能，电流效率 $\eta > 100\%$ 。

(3) 电流密度 电流为电流密度与加工面积的乘积，因此

$$V = \eta \rho \nu t = \eta \rho J A t$$

式中 J ——电流密度(A/cm²)；

A ——加工面积(cm²)。

若电解加工中的加工面积不变时，则

$$V = Ah$$

$$V_1 = \frac{h}{t} = \frac{V}{At} = \eta \rho J$$

式中 h ——蚀除金属的深度(cm)。

V_1 为深度加工速度，它等于阴极的进给速度，与电流密度成正比，通常电解加工的电流密度为 10~100A/cm²。

电流密度体现了单位时间内单位面积上所通过的电荷，它实际上决定于电源电压、电极间隙、电解液的电导率等。

(4) 电极间隙 电极间隙越小、电解液的电导率越小，电流密度就越大，蚀除速度越高。

$$I = \frac{U_R}{R} = \frac{U_R \gamma A}{\Delta}$$

$$J = \frac{I}{A} = \frac{U_R \gamma}{\Delta}$$

$$V_1 = \eta \rho \gamma U_R / \Delta$$

式中 U_R ——电解液的电阻压降(V)；

γ ——电解液的电导率(S/m)， $S = 1/\Omega$ ；

Δ ——电极间隙(m)。

由电极电位的分布可知

$$U = IR + E_{\text{阳}} + E_{\text{阴}}$$

$$U_R = IR = U - (E_{\text{阳}} + E_{\text{阴}})$$

由于 $E_{\text{阳}}$ 和 $E_{\text{阴}}$ 一般为 2~3V, 相对于直流电源电压 U 不大, 故可简化计算, 则

$$V_i = \eta\omega\gamma U/\Delta$$

当工件材料、电解液参数、电源电压均不变时, $\eta\omega\gamma U$ 可视为常数, 蚀除速度与电极间隙成反比, 蚀除速度与电极间隙的乘积为常数, 称为双曲线常数, V_i 与 Δ 成双曲线关系。

4.2.2 加工精度及其影响因素

1. 加工精度

电解加工的加工精度包括三个方面的内容:

(1) 复制精度 工件的尺寸和形状相对于阴极型面的偏差量称为复制精度, 其影响因素主要有电极间隙及其分布的不均匀性、阴极和工件的安装误差、工件装卸时的变形等。

(2) 绝对精度 工件的尺寸和形状相对于设计图样要求的偏差量称为绝对精度, 其影响因素有电极间隙的大小和均匀性、阴极的型面精度等, 实际上它是复制精度和阴极型面精度的组合。

(3) 重复精度 用同一工具阴极加工的一批工件之间尺寸和形状的偏差量称为重复精度, 其影响因素主要有电极间隙的不稳定性、工件的装夹误差等。

2. 影响加工精度的因素

由上述分析可知, 影响加工精度的主要因素有电极间隙的大小、均匀性和稳定性, 工具阴极的型面精度、装夹精度, 工装、机床精度, 电解液的种类、流速、流向、浓度、温度, 工件材料组织, 以及加工工艺参数等, 极其复杂。现主要分析电极间隙的影响。

电解加工时, 工件与阴极各表面的间隙可能不等, 在设计工具阴极时要研究电极间隙的大小和变化规律, 蚀除速度、工具阴极进给速度和电极间隙的关系。

(1) 端面平衡间隙 如图 6-54 所示, 电解加工时, 工具阴极以恒定进给速度 V_f 下降, 开始间隙为 Δ_0 , 蚀除速度 $V_i = \eta\omega\gamma U_R/\Delta_0$, Δ_0 越大, V_i 越小, 这时 $V_f > V_i$; 随着电极间隙 Δ 的逐渐减小, V_i 逐渐增大, 到一定时候到达平衡状态, 得到端面平衡间隙 Δ_b 。

$$\Delta_b = \eta\omega\gamma U_R/V_f$$

可见端面平衡间隙决定于所选电源电压和阴极进给速度, 端面平衡间隙一般为 0.10~0.80mm, 比较合适的为 0.25~0.30mm。

端面平衡间隙越小, 加工精度越高; 但端面平衡间隙大些, 加工比较稳定, 不易发生火花或短路。

(2) 法向平衡间隙 当阴极表面与其进给方向不垂直而成一斜角时, 则有法向平衡间隙 Δ_c , 这时法向进给分速度 V_n 为

$$V_n = V_f \cos\theta$$

$$\Delta_c = \eta\omega\gamma U_R/V_n \cos\theta = \Delta_b/\cos\theta$$

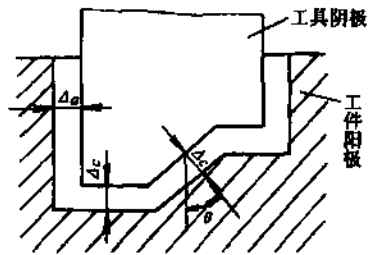


图 6-54 电极间隙

式中 θ ——斜面的法线方向与阴极进给方向的夹角。如图 6-54 所示。

值得注意的是, Δ_c 为法向平衡间隙, 有可能产生端面平衡间隙和法向平衡间隙不一致的情况, 即法向已达到平衡间隙时, 端面间隙可能尚未达到平衡状态。

(3) 侧面间隙 电解加工型孔时, 决定尺寸和形状精度的主要是侧面间隙, 若阴极侧面无绝缘, 则将形成“喇叭口”, 如图 6-55 所示。侧面间隙 Δ_s 将随进给深度 h 而异, 两者为抛物线关系。

影响电极间隙的因素可归纳如下:

- 1) 工具阴极的进给速度。
- 2) 电解液的成分、流向、温度等, 影响电流效率 η 、电导率 γ 等。
- 3) 工件材料的金相组织, 影响电极表面的钝化、活化状态等。

4) 电极间隙内的工具阴极形状、电场强度的分布状态, 将影响电流密度的均匀性。在工件尖角处, 电力线比较集中, 电流密度较大, 溶解快; 凹角处, 电力线比较稀疏, 电流密度较小, 溶解慢, 因此形成圆角, 如图 6-56 所示。所以, 电解加工时, 很难获得尖棱尖角。

5) 加工电压的选择及其稳定, 电压值越大, 端面平衡间隙越大。

在电解加工时, 应考虑电极间隙来设计工具阴极的尺寸和形状。

4.2.3 表面质量及其影响因素

电解加工的表面质量包括表面粗糙度和表面层力学物理性质, 由于电解加工是阳极溶解加工原理, 无切削力和切削热的影响, 但也可能出现一些表面缺陷, 如流纹、短路烧伤、晶间腐蚀、裂纹、麻点、黑膜等。

影响表面质量的主要因素有以下几方面。

(1) 工具阴极的表面质量 工具阴极表面粗糙状况和表面缺陷, 如条纹、刻痕等都会复印到工件表面, 因此, 阴极表面应光洁、无缺陷、表面粗糙度低。

(2) 工件材料的合金成分、金相组织和热处理状态 合金成分多、含杂质多, 金相组织不均匀, 结晶粗大等, 都会造成溶解蚀除速度的差别, 影响表面粗糙度。若工件材料在轧制过程中纤维状态严重, 带有条状金相组织, 非金属夹杂物呈纤维条状, 则将在工件表面产生条纹。采用高温均匀化退火, 球化退火, 减少非金属夹杂物, 多向反复压轧等措施, 均可改善工件表面质量。

(3) 工艺参数 主要是电流密度, 通常电流密度较高有利于阳极的均匀溶解。

(4) 电解液 电解液的流速、流向、温度等影响较大。电解液流速过高, 可能引起流场不均, 局部形成真空, 造成溶解不均匀, 影响表面质量。电解液流速过低, 造成蚀除物排除不畅, 或排除不及时, 氢气泡分布不均, 或电极间隙内电解液局部沸腾汽化, 产生表面缺陷。当电解液流速较低, 电流密度过高时, 易产生与液流方向一致的不均匀溶解, 在工件表面形成细

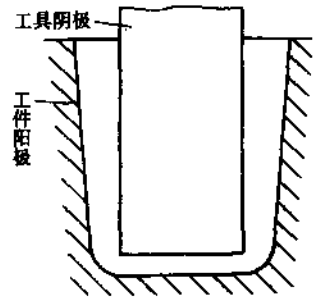


图 6-55 侧面间隙及其所形成的“喇叭口”

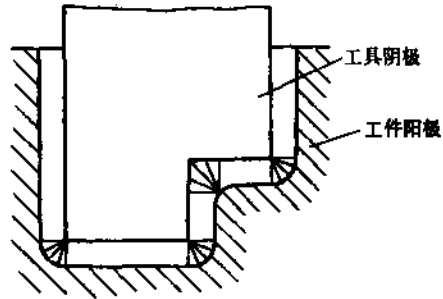


图 6-56 电解加工时的棱角变圆现象

长沟痕状纵向条纹。当电解液流速过低，电流密度过高，电极极化严重，工件表面形成不均匀钝化膜，其破损处产生不均匀溶解，顺液流方向，出现头大尾小呈蝌蚪状的凹坑，即麻点。电解液温度过高，会引起工件表面的局部剥落；电解液温度过低，钝化严重，引起工件表面不均匀溶解或形成黑膜。电解液过滤不干净、混有微粒杂质，可能被吸附在工件表面上形成绝缘质点，出现点状凸起，或形成短路，造成点状烧伤。

其他影响因素，如工件表面的洁净状况，当有油污，就会削弱溶解，产生凸起；电解加工后的表面未清洗干净，也可能产生小凹坑腐蚀等。

4.3 电解加工机床

4.3.1 电解加工机床的组成和要求

电解加工机床由主机、电源、电解液系统和控制系统所组成，如图 6-57 所示，一种立式单头电解加工机床的外观图如图 6-58 所示。

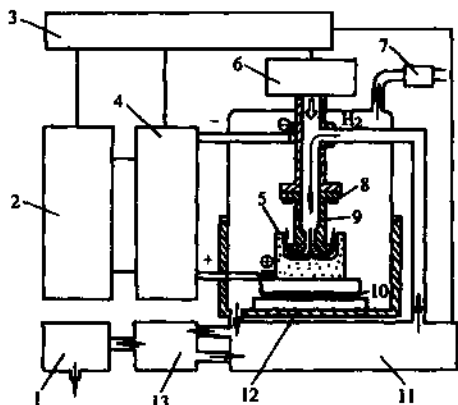


图 6-57 电解加工机床的组成示意图

1—电解液废液处理系统 2—快速短路保护 3—控制系统
4—直流电源 5—工件阳极 6—进给系统 7—抽
风机 8—工具阴极 9、10—绝缘层 11—电解液
输液系统 12—阳极座 13—电解液净化系统

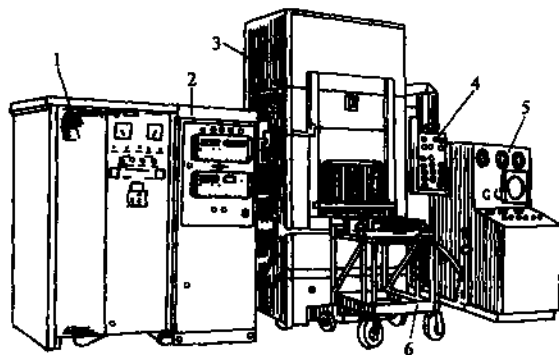


图 6-58 一种立式单头电解加工机床

1—控制柜 2—直流电源 3—机床主机
4—机床操纵台 5—电解液系统控制台
6—装卸传输工件手推车

电解加工机床分立式和卧式两大类，其中卧式又有单头、双头、三头多种。双头可同时加工工件的两个表面，如叶片的叶盆和叶背；三头可同时加工工件的三个表面，如叶片的型面和根部、凸台的转接端面。

电解加工机床的工作条件比较特殊，处于腐蚀性、爆炸性(生成 H_2)、极间剧变的电、磁场、高速气、液两相流的干扰性较强环境和较小的极间加工间隙，因此对电解加工机床提出以下一些要求。

- 1) 机床应精度高、刚性好，有很好的进给速度特性。
- 2) 电气抗干扰能力强，控制功能强，能保持电极间隙的稳定，不产生钝化、短路等异常现象。
- 3) 耐腐蚀性好。
- 4) 自动化程度高，现在生产的机床多为数字控制，并配有自适应控制系统。
- 5) 安全、可靠。

4.3.2 机床主机

电解加工机床主机由床身、滑枕头、工作台、进给系统、工作箱、导电系统等部分组成。床身有箱型、架型、框型等结构。

滑枕头有滑动导轨、静压导轨、滚动导轨等形式，要求刚性好、精度高、运动灵活平稳，现代生产的机床采用滚动体组件——镶钢导轨较为普遍。

工作台要求刚度高，精度高，耐蚀，绝缘，现多采用花岗石和不锈钢材料。

进给系统有液电类、机电类等，现在多用交流伺服系统。

工作箱要求密封性好，耐腐蚀，电、液、气接口简便可靠无泄漏，箱内夹具电极应安装方便，定位精度高。工作箱大多用玻璃钢或不锈钢等制作。

导电系统采用空心水冷电缆、汇流条或实心电缆，视电流密度的高低、机床大小来选择，要求传导时不过热，耐腐蚀。

4.3.3 电解加工电源

(1) 电解加工电源的基本要求

1) 电源输出 一般电压为 10~20V，连续可调，并能在此电压范围内输出额定电流。脉冲电源波形以方波最好，波顶纹波系数 $\leq 5\%$ 。

2) 稳压 在电网电压波动 $\pm 10\%$ 、频率波动 $\pm 5\%$ 和负载变化 $0\% \sim 100\%$ 时，输出电压变化 $\leq \pm 1\%$ 。

3) 可靠性 运行稳定可靠，有短路保护，耐腐蚀密封，抗干扰性强。

(2) 电解加工电源分类、特点及应用范围如表 6-29 所示。

表 6-29 电解加工电源分类、特点及应用范围

类别	类型	特点	应用范围
电源波形分类	直流电源	加工效率高 可输出的容量大，可达 40000A 加工整平比较低，加工遗传误差较大	大件大面积加工 粗加工，半精加工
	方波	加工复制精度高，整平比高 加工效率较低 容量受限，目前国内最大为 3000A 成本较高	小件精加工
	脉冲电源 截断的正弦波	加工精度介于直流与方波之间 加工效率低 容量较方波为大，但受电网功率因素限制 电压及频率可调范围较窄 可以作为脉流、直流两用 较简单，成本较低	中小件半精加工
	正弦半波	频率、脉空系数不可调 加工频率及精度较前二者均差 对电网功率因素三相平衡均有较大影响 简便、成本低	只能用于小容量加工。早期采用，现不宜再推广

(续)

类别	类型	特点	应用范围
主回路方式分类	直流发电机组	占地面积大、噪声大、需隔离 效率较低 调节灵敏度低, 短路保护时间长	早期采用, 现已淘汰
	硅整流器	可靠性、稳定性好, 效率高 调节灵敏度较低, 短路保护时间较长 稳压精度不够高 耗铜、耗铁较大	中期采用, 国内生产现场仍占一定比例
	晶闸管电源	灵敏度高, 短路保护时间较短 稳压精度高 效率较高; 节铜、节铁 早期稳定性、可靠性较差, 现已解决	国外电解加工生产全都采用此类型 国内现亦占相当比例, 建议推广
	利用高压电容放电关断晶闸管以斩波成方波波形	可关断最大电流受限(目前只达 3000A) 体积较大, 成本较高 频率较低	国内生产现场使用的均是此类型, 适于中小件精密加工
	小开通角的多相晶闸管整流	同截断的正弦波的特征	国内刚投入试用, 可以用于中等尺寸零件的半精加工

注: 该表取自参考文献[16]。

4.3.4 电解液系统

(1) 电解液系统的要求

- 1) 提供一定压力、流量、温度的稳定电解液到工作区, 应有自动调整和恒定装置, 如调整压力、流量、温度, 保持浓度(因水分会蒸发), 恒温等。
- 2) 对颗粒杂质、电解产物(蚀除物)应能过滤净化。
- 3) 废液、废气处理。
- 4) 系统应耐腐蚀、防漏、噪声小, 使用清理方便, 耐用。

(2) 电解液系统的组成 电解液系统由输液系统、净化系统、废液处理系统、气体收集系统等组成。输液系统应有压力、流量、温度、浓度、pH 值调节装置, 能进行自动控制。气体收集系统收集电解加工时电化学反应产生的气体, 如 H_2 等。废液处理系统可通过过滤后排放干渣, 并通过还原处理回收亚硝酸根和铬等有用物质。

4.3.5 控制系统

电解加工的控制系統有继电系统、程序控制器和数控系统等类型, 目前已向可编程序控制器和微机数控系统发展。

控制系统由加工循环控制、参数控制、保护控制三部分组成。

(1) 加工循环控制 主要是针对电解加工的工作循环过程, 使机床的各个系统动作能够协调有序, 保证电解加工顺利完成。

(2) 参数控制 主要是控制电极间隙(加工间隙), 有直接控制和间接控制两种方法, 直接控制难度大, 现多采用间接控制法, 即通过控制影响电极间隙的主要参数来控制电极间隙。

- 1) 恒参数控制 分别控制电压、电流、工具阴极进给速度、电解液压力、流量、温度、

浓度等参数来保持电极间隙恒定的预选值,或给定的函数变化值,这是目前应用比较广泛的方法。

2) 自适应控制 取电解液的电导率为评价指标,以电压、电流、工具阴极进给速度为控制参数,自适应控制(补偿、校正)电导率变化所引起的电极间隙变化,从而保证电极间隙的要求。

4.4 电解质溶液

4.4.1 电解液的作用和基本要求

电解液的主要作用有:

- 1) 电解液与工件阳极、工具阴极构成电化学反应的电极体系,起导电介质传递电流作用。
- 2) 在电场作用下进行电化学反应,使阳极溶解能不断地顺利而有控进行。
- 3) 及时带走电极间隙中产生的电解产物和热量,起更新和冷却作用。

对电解液的基本要求有:

1) 电导率高、溶解度大,以使用较低的加工电压得到较高的加工电流,以高电流密度得到高的加工速度;粘度低,以便在较低的压力得到较高的流速和流动性;比热容高,以减少温升。

2) 为保证工具阴极的尺寸和形状不变,电解液的阳离子不应在阴极表面产生放电沉积,只有析出气体的反应;使金属阳极以低价离子溶入电解液,以使用较低的电流得到较高的蚀除速度;阳极溶解应均匀,为阳极的唯一反应,无副反应,不产生难溶性钝化膜,以利于提高电流效率和加工质量;杂散腐蚀小,电流效率呈非线性特性,以利于提高加工精度和表面质量。

3) 电解液稳定性好,消耗性成分少,易补充,且腐蚀性小,安全而无毒害。

4) 价格低廉,供应方便。

4.4.2 电解液的种类、性能、特点和应用范围

1. 电解液的种类

电解液的种类如表 6-30 所示。

表 6-30 电解液分类、特点和应用范围

分类	类别	特点	使用范围
按酸碱性分类	中性电解液: NaCl 以及含 Na ⁺ 、K ⁺ 等的含气酸盐水溶液如 NaNO ₃ , NaClO ₃ 等	组分不消耗,净化后可循环使用,寿命长 腐蚀性小 安全、可靠 电解产物为氢氧化物,不溶解,要进行净化处理	应用范围最广,型面、型腔、型孔均用此类 美国以 NaCl 居多,英国以 NaNO ₃ 居多
	酸性电解液: H ₂ SO ₄ 、HCl 等无机酸水溶液	电导率高 能溶解电解产物,有利于排除 腐蚀性大,不利于设备及人体 成分变化快	主要用于微孔和小孔加工
	碱性电解液: NaOH	加工铈、铟等类金属时,其氧化物可以与 NaOH 作用生成可溶性铈酸或铟酸 一般常用金属在此类电解液中表面产生致密的不溶性阳极膜,使工件表面难于溶解,故不能用此类电解液 对金属无腐蚀作用,但对人体危害较大	加工铈、铟 作附加添加剂,增强对碳化物相的溶解

(续)

分类	类别	特点	使用范围
按 组 成 分 类	单一组分电解液	使用性能较稳定 调整浓度较简便 对电解加工性较差的材料如钛合金等加工效果较差	广泛用于生产
	复合电解液: 主要有 NaCl 为基和 NaNO ₃ 为基两大类	可以针对不同加工要求调整其组分以得到较佳的加工性能, 例如加工铁基金属的非线性效应, 加工钛合金时的活化效应等 组合调整较复杂 使用性能不如单一组分电解液稳定, 需经常调整	是近年电解液的发展趋势, 已广泛应用在钛合金, 铁基合金加工中, 效果良好 NaNO ₃ 为基的复合电解液有较好的发展前景
按 浓 度 分 类	高浓度电解液(接近饱和浓度)	电导率高, 可以采用高电流密度, 高参数, 达到高效加工 散蚀能力强, 加工精度较低, 杂散腐蚀较重	用于粗加工, 半精加工
	低浓度电解液(浓度 < 10%)	散蚀能力弱, 加工精度高, 杂散腐蚀轻 活化能力较强, 加工钛合金效果较好 电导率较低, 电流密度低, 只能用低参数, 效率较低	用于精加工及钛合金加工

2. 常用电解液

常用的电解液是按酸碱度分类的中性盐溶液, 而其中有 NaCl、NaNO₃、NaClO₃ 三种, 其性能、特点和应用范围的对比如表 6-31 所示。

表 6-31 三种中性电解液比较

项目	NaCl	NaNO ₃	NaClO ₃
常用含量	250g/L 以内	500g/L 以内	450g/L 以内
加工速度	高	中	低
表面粗糙度	与电流密度、流速及加工材料有关, 一般为 $R_a 0.8 - 6.3 \mu m$	在同样条件下低于 NaCl 电解液	低于 NaCl 和 NaNO ₃
加工精度	较低	较高	高
表面质量	加工镍基合金易产生晶界腐蚀, 加工钛合金易产生麻点	一般不产生晶界腐蚀, 但电流密度低时也会产生点蚀	杂散腐蚀最小, 一般也不会产生点蚀, 已加工面耐蚀性较好
腐蚀性	强, 杂散腐蚀大	较弱, 杂散腐蚀较小	弱, 杂散腐蚀小
安全性	安全、无毒	助燃(氧化剂)	助燃(强氧化剂)
稳定性	加工过程较稳定, 组分及性能基本不变	加工过程 pH 值缓慢增加, 应定时调整使之 ≤ 9	加工过程缓慢分解 $Cl^- \uparrow ClO_3^- \downarrow$, 故加工一段时间后要适当补充电解质
成本	低	中(价格为 NaCl 的 2.5 倍)	高(价格为 NaCl 的 6 倍)
适用范围	精度要求不很高的, 铁基合金, 镍基、钴基合金等, 适用范围最广	精度要求较高的铁基、镍基、钴基合金 有色金属(铜、铝等)	加工精度要求较高的零件 固定阴极加工

为了改善电解液的性能，可以加入一些添加剂，如改善表面质量的络合剂、光亮剂、减轻对设备腐蚀的缓蚀剂等；或采用复合电解液。

复合电解液的性能比单一组分的电解液的性能好，易于满足各种加工的要求。在复合电解液中，各组分起不同的作用，如

1) 硝酸钠(NaNO_3)、硝酸钾(KNO_3) 具有较高的电导率，能与多种金属材料产生阳极溶解反应，是一种主要成分。

2) 亚硝酸钠(NaNO_2)、磷酸氢二钠(Na_2HPO_4) 具有防腐蚀作用，是防腐添加剂。

3) 酒石酸钾钠($\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6\text{KNa}$)、柠檬酸钠($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$)等 可对铁、镍、钴等金属离子起络合作用，易使电解产物溶解，改善表面质量。

4) 甘油($\text{C}_3\text{H}_5(\text{OH})_3$) 可降低表面粗糙度值。

复合电解液又称为混合电解液，是当前电解液的发展方向，应用比较广泛。

电解液的种类和性能集中地表现在其配方上，有现成的商品出售，也可自行配制，有条件的工厂、研究所应自配更能满足要求。电解液的性能、特点能否发挥出来与其参数选择和工作状况有关，应注意电解液在使用中的成分变化，定期检测，及时调整和补充。

3. 电解液的特性分析

主要从散蚀能力、电流效率和非线性特性三方面来分析常用的 NaCl 、 NaNO_3 、 NaClO_3 三种电解液的成形精度。

(1) 散蚀能力 NaCl 电解液电解能力强，杂散腐蚀大，成形精度不高，如图 6-59a 所示，当工具阴极侧面不绝缘时，工件侧面呈抛物线喇叭口，内芯只剩下一个小锥；而使用 NaNO_3 、 NaClO_3 钝化性电解液，其杂散腐蚀小，蚀除作用可控到一定范围，成形精度高，如图 6-59b 所示。

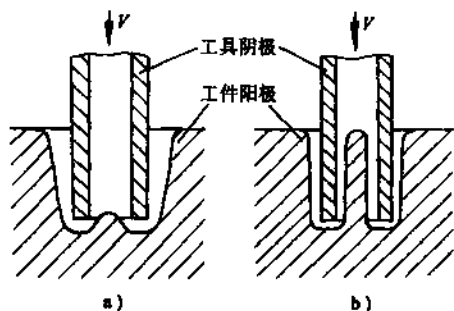


图 6-59 电解液散蚀能力对成形精度的影响
a) NaCl 电解液 b) NaNO_3 、 NaClO_3 电解液

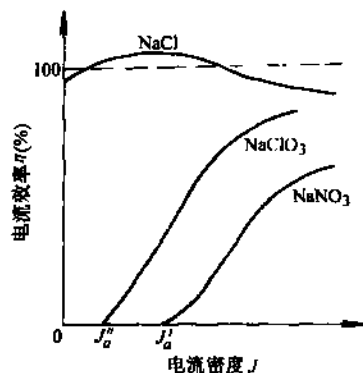


图 6-60 电解液的电流效率与
电流密度的关系曲线

(2) 电流效率 NaCl 电解液的电流效率 η 大体上是一个接近 100% 的常数，不仅不随阳极材料、电解液浓度和温度而变化，而且在一定范围内也不随电流密度 J 而变化，如图 6-60 所示。 NaNO_3 、 NaClO_3 电解液的电流效率不仅随阳极材料、电解液浓度和温度而变化，而且随电流密度大幅度变化，如图 6-60 所示。可以看出，当电流密度分别小于 J_a' 、 J_a'' 时，电解作用停止，即侧面间隙达到一定值时(0.78mm)，侧面被保护起来，此临界间隙称为“切断间隙”，此时的电流密度 J_a 称为“切断电流密度”，由此可知 NaNO_3 、 NaClO_3 电解液成形精度高。

(3) 非线性特性 从加工速度 V 和电流密度 J 的关系可知, NaCl 电解液的 $V-J$ 曲线为一过原点的直线, 电流密度为零时, 加工速度也为零; NaNO_3 、 NaClO_3 电解液的 $V-J$ 曲线为不通原点的曲线, 当电流密度分别小于 J'_a 、 J''_a 时, 加工速度为零, 这些电解液称为非线性电解液, 如图 6-61 所示。可见电流密度临界值 J_a (切断电流密度) 和临界间隙 Δ_a (切断间隙) 是非线性电解液的两个重要特性指标, J_a 越大, 成形精度越高。 J_a 值与电解液的成分、浓度、温度及阳极金属材料等有关, 不是定值, 可通过试验得到。

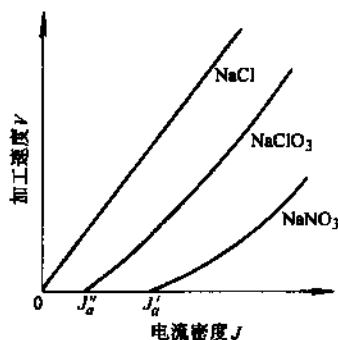


图 6-61 电解液的加工速度与电流密度的关系曲线

4.4.3 电解液参数的选择

电解液参数主要有成分(配方)、温度、浓度、酸度值(pH 值)、粘度等, 它们对电解加工过程的影响显著, 应认真选择。

(1) 电解液成分(配方)及电参数 如表 6-32 所示, 列出了常用金属材料的电解液配方及电参数, 作为参考。

表 6-32 电解液配方及电参数

电 解 液 配 方	加 工 材 料	电压/V	电流密度/(A/cm ²)
10% ~ 18% NaCl 10% ~ 18% NaCl + 10% ~ 25% NaNO ₃ 20% NaNO ₃ + 3% ~ 10% NaClO ₃ 20% ~ 30% NaNO ₃ 4% ~ 10% NaCl + 4% ~ 10% NaBr	碳钢、合金钢、不锈钢、耐热钢、钛合金等	5 ~ 15	10 ~ 200
15% NaCl + 15% NaOH + 20% 酒石酸 5% NaNO ₃ + 5% NaF + 3% Na ₂ WO ₄ + 0.1% NaNO ₂	硬质合金	15 ~ 25	50 ~ 100
18% ~ 20% NH ₄ Cl 12% ~ 30% NaNO ₃ 20% ~ 25% NaNO ₃ + 3% ~ 5% NaCl	铜、黄铜、铜合金、铝合金	15 ~ 25	10 ~ 100

注: 配方中百分含量均指质量分数。

(2) 浓度 电解液浓度越大, 电导率越大, 生产率高, 但杂散腐蚀大。一般 NaCl 电解液 NaCl 的质量分数为 10% ~ 20%, 加工精度要求高时取低值, 生产率要求高时取高值; NaNO_3 、 NaClO_3 电解液由于其溶解度较大, 电解质的质量分数可取 20% ~ 30%, 超过 30% 后, 其非线性较差。电解加工过程中, 要注意由于水的分解、蒸发和电解质的分解所引起的电解液浓度变化, 保持其稳定性, 以保证加工精度的稳定性。

(3) 温度 电解液的温度越高, 电导率越大, 生产率高, 但可能受到电极间隙内电解液沸腾、绝缘材料等限制, 一般为 30℃ ~ 40℃, 不超过 60℃。电解加工过程中, 应注意电解液温度变化对加工精度的影响, 保持其稳定性。

(4) 粘度 电解液的粘度会直接影响电极间隙中的电解液流动特性。加工过程中溶液内金属氢氧化物含量增加, 会使粘度增加; 温度增加, 会使电解液粘度降低, 应注意保持粘度的稳定性。

(5) 酸度值(pH 值) 电解液中的 pH 值增加会增大碱性, 使许多金属元素的溶解条件变化, 应注意控制 pH 值。电解加工过程中, 水被电离并使氢离子在阴极放电, 溶液中的 OH^- 离

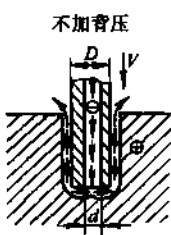
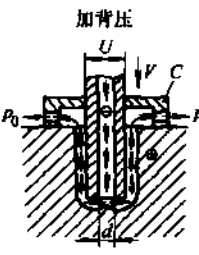
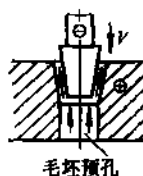
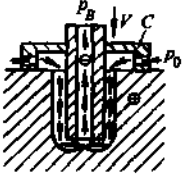
子增加会引起 pH 值增加。

4.4.4 电解液的流速、流向和水口布局

(1) 电解液的流速 电解加工过程中, 电解液要有一定的流速, 以便把金属氢氧化物、氢气等电解产物冲走, 并带走电极间隙的大量热量。电解液的流速一般为 10m/s , 电流密度增大时, 流速要相应增加。流速由输液系统中的压力阀来调节。

(2) 电解液的流向 电解液的流向有正流式、反流式、侧流式和静液式四种, 又可分别称为正水、反水、侧水和静水, 表 6-33 列出了它们的特点和应用范围。

表 6-33 电解液的流向方式

类型	示意图	特点	主要应用范围
正流式	 <p>不加背压</p>	<p>通过工具电极上的出水槽控制流场的分布 流场不均匀, 底面易产生条纹或空穴现象 加工面相应出水槽处有残留凸起 工具阴极较复杂, 夹具较简单 加工精度及稳定性较差 经济、简便</p>	<p>小孔加工多用 中等复杂程度型腔以及加工精度要求不严的型腔 混气加工型腔</p>
	 <p>加背压</p>	<p>通过水套可加背压, 改善流场, 加工精度和表面粗糙度均可改善 水套结构复杂些 电解加工过程比不加背压的稳定</p>	<p>中等复杂程度加工精度和表面粗糙度有一定要求的型腔 混气加工型腔</p>
	 <p>毛坯预孔</p>	<p>通过毛坯预孔进水 加工面不残留凸起 工具阴极较简单</p>	<p>有预孔的零件加工, 如电解镗孔等</p>
反流式		<p>通水套及工具电极上的入水槽控制流场, 可以加背压 流场均匀、稳定, 不会产生空穴, 加工表面粗糙度较低 间隙较正流式大、均匀、稳定, 故加工精度较高 工具阴极与水套结构较复杂, 成本较高</p>	<p>复杂型腔 较精密的型孔, 如花键孔等</p>

(续)

类型	示意图	特点	主要应用范围
侧流式		<p>通过进、出口导流段 A 以及侧壁密封控制流场的分布, 较易得到均匀流场</p> <p>加工表面粗糙度较低, 底面无残留凸起</p> <p>工具阴极较简单, 夹具较复杂</p> <p>出口加背压可防止出口处流场不均</p>	<p>平面及型面加工, 如叶片加工</p> <p>浅型腔加工</p> <p>流线型型腔加工, 如叶片锻模</p>
静液式		<p>电极-工件浸泡于静止或轻微搅拌的电解液中</p> <p>也可通过工具使加工面浸润电解液</p>	<p>电解光整加工</p> <p>电解打毛刺</p> <p>电解打标记</p>

注: 1. 表中插图符号说明: A—进口导流段; B—出口导流段; p_0 —进口压力; p_e —出口压力; V—进给速度; C—水套。

2. 该表取自参考文献[16]。

(3) 电解液的出水口布局 出水口的形状一般分为窄槽和孔两类, 在布局上应根据所加工型腔的结构来设计, 使流场均匀, 避免产生死水区, 造成

不均匀电解, 甚至产生火花和短路。电解加工区的流场, 可用流线来分析, 流线是液体质点运动轨迹曲线, 它不能相互交割, 其紧密程度表示流速的大小。死水区是指电解液不能到达的区域。图 6-52 表示了出水口布局对流场的影响, 图 a 的布局中会产生死水区(图中划 + 号的部分), 图 b 的布局就改进了。图 6-63 表示了流线夹角小于 90° 时

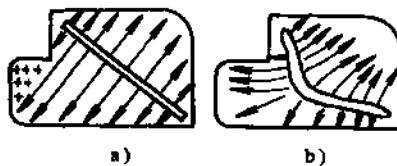


图 6-52 出水口布局对流场的影响

所形成的死水区, 图 a 为正流、图 c 为反流时, 由于出水口布局不当所形成的死水区, 这时流线在端面间隙内的相交夹角等于或小于 90° , 因此正向流动接近出液槽的流体, 反向流动接近端面边缘的流体将受到抑制, 使流速下降或停流, 该处的氢气、金属氢氧化物等电解产物不易被冲走, 温度会因此上升, 造成溶解速度下降, 甚至有死水区出现。改变出液槽的形状(图 b), 或增加一条回流槽(图 d)就可以消除上述现象。

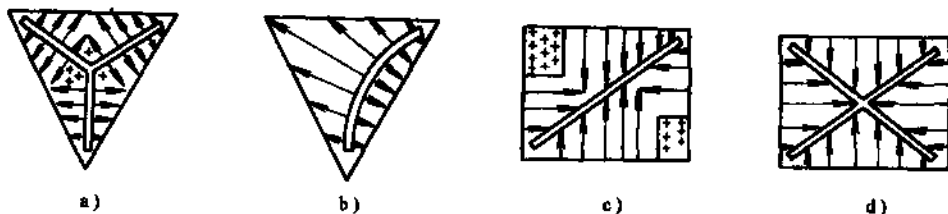


图 6-63 流线夹角小于 90° 时死水区的形成和消除

a) 正向流动时死水区的形成 b) 正向流动时死水区的消除
c) 反向流动时死水区的形成 d) 反向流动时死水区的消除

4.5 电解加工工艺方法

4.5.1 电解加工工艺过程设计

电解加工工艺过程设计的步骤如下:

- 1) 根据给定工件的材料、形状、尺寸和精度、表面粗糙度要求等工艺条件选择合适的电解液, 包括成分、浓度、温度、压力、流速和流量等。
- 2) 选择电参数, 包括电压、电流, 相对于加工面积所能达到的电流密度等。
- 3) 选择合适的电解加工机床。
- 4) 设计工具阴极, 包括形状、尺寸(主要是平衡间隙)、出水方式、出液槽或出液孔等结构, 以及和机床滑枕的连接等。
- 5) 设计工件夹具。
- 6) 选择合适的加工参数, 保证加工质量和生产率, 主要有电极间隙、加工速度、电流密度、电解液参数的再确认等。

4.5.2 脉冲电流电解加工

脉冲电流电解加工是一种提高加工精度的有效方法, 受到了国内外的重视。

(1) 脉冲电流电解加工的特点

- 1) 脉冲电流是间歇通断电, 因此是间歇加工, 脉间去极化, 使间隙内参数均匀, 电蚀物有足够时间排除, 电解液迅速得到更新, 改善了流场, 提高了加工稳定性。
- 2) 脉冲电流电解加工的阳极表面形成了与直流加工不同的钝化膜, 使 $\eta-J$ 和 $V-J$ 曲线右移, 增强了非线性。
- 3) 脉冲前沿阴极突发的析氧反应引起电解液出现脉动压力波, 对间隙流场起搅拌作用, 使流场均匀, 提高了加工精度。
- 4) 由于电极间隙内电场稳定均匀, 非线性作用强, 因此可以用小间隙(0.02 ~ 0.05mm)电解加工, 提高了加工精度, 易于实现小余量光整加工和精加工。
- 5) 脉冲电流电解加工的电流效率比直流电解加工高, $\eta = 0.93 \sim 1.02$, 但其平均电流较低, 因此加工速度比直流电解加工低。

(2) 脉冲电流电解加工的应用

1) 加工精度可达 $\pm 0.02 \sim \pm 0.06\text{mm}$, 视加工面积大小而定 ($15 \sim 75\text{cm}^2$); 加工微细孔为 $\phi 0.05 \pm 0.0011\text{mm}$, 微细槽的槽宽为 $0.08^{+0.005}_0\text{mm}$ 。

2) 整平比高, 如图 6-64 所示, 设工件阳极的平面度为 δ , 电极间隙为 Δ , 由于电极间隙 Δ 小, 则 δ/Δ 比值增大, δ/Δ 比值称为整平比, 脉冲电流电解加工的整平比可达 10 ~ 15, 而直流电解加工 ≤ 3 。

3) 加工表面粗糙度可达 $R_a 0.07\mu\text{m}$ 。

4) 加工效率比直流电解加工低 1 倍多。

5) 脉冲电流电解加工多用于加工精密中小零件、微细加工零件、叶片、精密锻模、玻璃模、精密花键孔等。

4.5.3 混气电解加工

(1) 混气电解加工的原理和特点 混气电解加工又称充气电解加工, 是将一定压力的空气、氮气或二氧化碳等气体用混气装置与电解液混合在一起, 形成均匀的气液混合物, 送入电极间隙进行电解加工。

混气电解加工的特点有:

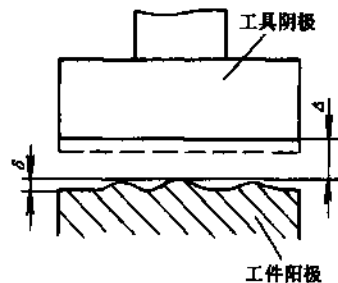


图 6-64 电解加工的整平作用

1) 增加了电解液的电阻率。由于气体是不导电的,所以混气电解液的电阻率高,且随压力的变化而变化,间隙大处压力低,气泡大,电阻率大,电解作用小;间隙小处压力高,气泡小,电阻率低,电解作用大。从而可以减小电极间隙,提高加工精度和整平效果。

2) 减少杂散腐蚀。

3) 电流密度与电流效率不成线性关系,使电解液的非线性提高,电流密度减少到一定值时,电解作用停止,产生切断间隙(0.85~1.3mm),保证了加工精度。

4) 降低了电解液的密度和粘度,使流速增加,流场均匀,消除死水区,减少短路,提高了加工稳定性。

5) 由于电阻率显著增加,电流密度下降,其生产率比不混气电解加工将下降 1/3~1/2。

6) 需要一套气液混合装置、供气设备、管路和抽风设备。

(2) 混气电解加工装置 其示意图如图 6-65 所示,要求使气液混合尽量均匀,达到雾化程度。目前,气液混合器种类很多,结构各异,从结构原理上可分为小孔式和锥管式,小孔式混合均匀、结构简单、制造方便。混气腔的结构是关键,尚有一次混气和二次混气结构,图 6-65 所示为一次混气锥管式混气装置。

(3) 气液混合比 气液混合比是指混入电解液的气体流量和电解液流量之比,是混气电解加工中的一个重要参数,对电解加工的影响很大。

由于气体的体积随压力而变化,通常用一个大气压(即 10^5Pa)和 20°C 的标准状态下的气液混合比来计算。

$$Z = q_{\text{气}} / q_{\text{液}}$$

式中 Z ——气液混合比;

$q_{\text{气}}$ ——气体流量(m^3/h);

$q_{\text{液}}$ ——电解液流量(m^3/h)。

若不在标准状态下,则可用下式计算:

$$Z = \alpha q_{\text{气}} / q_{\text{液}} = q_{\text{气}} / \sqrt{p+1} q_{\text{液}}$$

式中 α ——加工压力下的修正系数;

p ——加工时的气体压力(Pa)。

混气电解加工时,气液混合比越高,非线性性能越好;但气液混合比过高,非线性效果反不显著,且因含气量过大,间隙电阻率过大,电解作用过弱而产生火花或短路。在型腔模加工中,一般取 $Z = 1 \sim 3$ (气压为 $0.4 \sim 0.5\text{MPa}$),在叶片加工中,一般取 $Z = 0.7 \sim 2$ 。

通常压缩空气由统一气源提供,气压为 $0.4 \sim 0.5\text{MPa}$,此时电解液的压力应比气压低 0.05MPa ,以避免电解液反灌入气体管路。

4.6 电解磨削

4.6.1 电解磨削的基本原理、特点和应用范围

(1) 电解磨削的基本原理 电解磨削是电化学机械加工的一种方法,是电解加工和磨削加

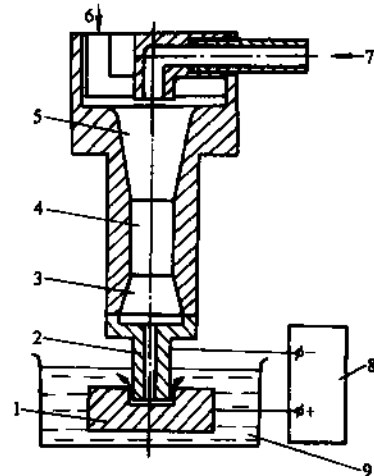


图 6-65 混气电解加工示意图

- 1—工件 2—工具阴极
3—气液扩散部 4—气液混合部
5—气液引导部 6—电解液入口
7—气源入口 8—直流电源
9—电解液

工的复合加工。

电解磨削时，导电砂轮与工件直接接触，导电砂轮接阴极，工件接阳极，极间由喷嘴喷射电解液。当接通直流电源时，工件表面产生阳极溶解，产生硬度远比阳极金属低的钝化膜，并不断被高速回轮的导电磨轮所刮除，因此阳极溶解和刮除连续进行，实现了加工。

(2) 电解磨削的特点及其应用范围

1) 加工范围广，被加工材料不受力学性能的限制，可加工硬质合金、合金钢、钛合金、不锈钢、碳钢等。

2) 导电砂轮用磨料和铜粉制成，磨料应高于铜基体表面，砂轮磨损小，易保持尺寸和形状。

3) 表面粗糙度值低，可达 $R_a 0.2\mu\text{m}$ 或更小。表面无应力，无毛刺，表面缺陷少。

4) 磨削效率高，特别是对接触面积大、难加工材料，效率更明显。

5) 应采用腐蚀性小的 NaNO_3 、 NaNO_2 等混合电解液较好。

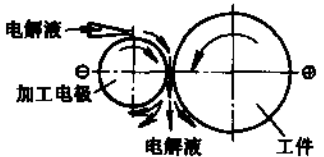
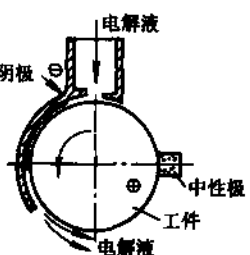

6) 加工精度不及精密磨削，设备投资较大，且有安全、防蚀、防护要求。

电解磨削可用于加工叶片的叶冠和榫头、喷嘴、注射针头、刀具及金属蜂窝结构件等。

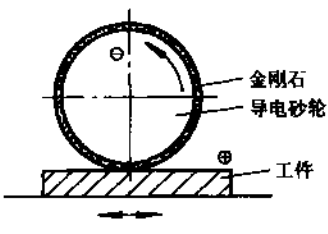
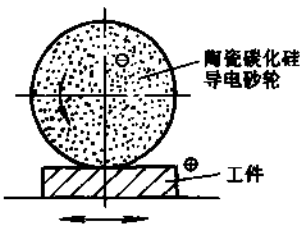
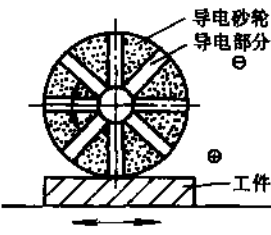
4.6.2 电解磨削方法

常用电解磨削方法可以分为阴极法、中极法、复合法、通电磨削法等。表 6-34 表示了这些加工方法的工艺特点及其应用。图 6-66 表示了利用中间电极法进行外圆加工和内圆加工的情况。

表 6-34 各种电解磨削方法的工艺特点及其应用

电解磨削方法	工作简图	工艺特点	应用
阴极法		石墨电极旋转。依靠电极旋转带动电解液冲洗或极间加脉冲电压去除阳极钝化膜	用于精度要求不高的平面磨削或成形磨削
中极法		阴极与中性极同时擦过工件表面，阴极靠脉冲放电和中性极靠机械刮削同时作用去除阳极钝化膜 由于阳极与阴极间隙难于做得很小，故难于获得比较高的电流密度	一般作为电解超精加工用
复合法		用金属结合剂金刚石磨轮、电镀或化学镀导电磨轮或含磨粒的石墨磨轮进行有电解作用和机械磨削作用的缓进给深磨。按加工条件，机械磨削量约占总去除量的 20%~30%。为弥补电解精度不足和获得光泽表面，最后可进行断电磨削	用于硬质合金工具磨削和高温合金、刚性差的零件的成形磨削

(续)

电解磨削方法	工作简图	工艺特点	应用
导电磨削法		利用放电把附着在金刚石砂轮上的被切削材料去除, 以提高磨轮锋锐度, 进行小切削深度快速往复磨削	俄罗斯有刀头磨床, 端面铣刀磨床和内、外圆磨床
		将电能加在磨削部位, 用小切削深度、快速给与普通磨削相同。目的在于使砂轮有自净作用, 防止堵塞, 减少修整次数, 明显提高磨削比	不锈钢轴沟槽, 涡轮叶片榫头, 铁硅铝磁合金, 铜合金管材等
		砂轮沿径向附有数毫米宽的导电部分。由于砂轮旋转, 形成断续的直流脉冲电流通电磨削	日本 NSG-52ACE 即为该种磨床, 可用于硬质合金、不锈钢和磁合金磨削

注: 该表取自参考文献[16]。

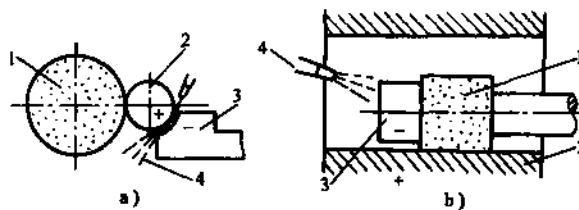


图 6-66 中极法电解磨削

a) 外圆加工 b) 内圆加工

1—普通砂轮 2—工件阳极 3—中间电极(阴极) 4—电解液

4.6.3 其他电解机械复合加工方法

主要有电解珩磨、电解研磨、电解超级加工、电解珩齿、电解抛光等。

(1) 电解珩磨 对于小孔、深孔、薄壁套筒等零件, 可用电解珩磨, 图 6-67 所示为电解珩磨深孔。

(2) 电解研磨 电解研磨可以得到极低的表面粗糙度值, 并可得到较高的效率。

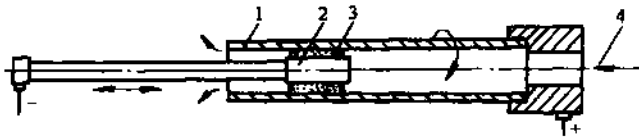


图 6-67 电解研磨深孔

1—工件阳极 2—研磨头(阴极) 3—研磨条 4—电解液

电解研磨可分为固定磨料加工和离散磨料加工两种。图 6-68 表示了一种固定磨料加工方式。固定磨料加工是先将磨料粘在无纺布上，再将粘有磨料的无纺布包覆在工具阴极上，无纺布的厚度即为电极间隙，加工一段时间后，应更换新的粘有磨料的无纺布。游离磨料电解研磨是在工具阴极上只包覆无纺布，而将磨料悬浮于电解液中呈自由状态，这种电解研磨由于研磨轨迹复杂而不重复，能得到更低的表面粗糙度值。

4.7 电镀加工

电镀加工是一种电化学加工方法，它是利用在电场作用下电镀液中的金属正离子镀覆沉积到阴极上的加工过程，因此，它和电解加工的过程正好相反。

电镀加工的主要目的是表面防锈蚀、表面装饰、美观，镀层厚度一般为 0.01 ~ 0.05mm，镀覆的材料有铬、镍等，应用十分广泛。值得注意的是，近年来从电镀范畴发展起来的电铸、刷镀、复合镀等加工，对精密加工、微细加工和特种加工的发展有重要作用。

4.7.1 电铸

1. 电铸加工的原理、特点和应用

(1) 电铸加工的原理 如图 6-69 所示，以可导电的原模作阴极，电铸材料作阳极，两极均浸入电铸液中，当在两极上通入直流电源后，阳极上的金属原子失去电子成为正金属离子进入电铸液，向阴极流动，并在阴极上获得电子成为金属原子沉积在原模表面上，经过一定时间，阴极原模上的电铸层逐渐加厚并达到预定厚度，即可停止，取出阴极原模，进行脱模，即可获得与原模型面凹凸相反的电铸件。

(2) 电铸加工的特点和应用

1) 能复制复杂型面和细微纹路，镀层厚度为 0.05 ~ 5mm 或更厚，尺寸精度高，表面粗糙度可低于 $R_a 0.1\mu\text{m}$ 。

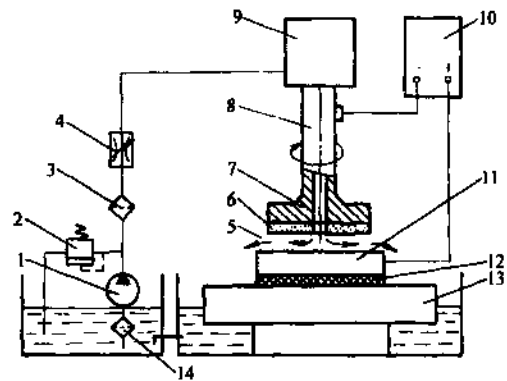


图 6-68 电解研磨加工

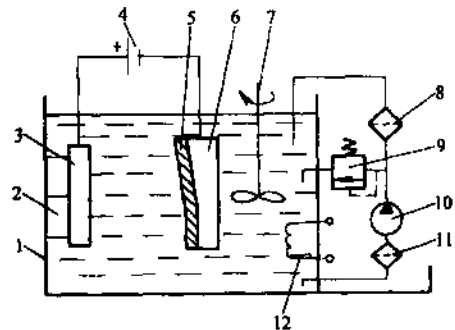
1—液压泵 2—溢流阀 3—过滤器 4—节流阀
5—电解液 6—研具 7—工具阴极 8—主轴
9—变速箱 10—电流电源 11—工件阳极
12—绝缘层 13—工作台 14—粗过滤器

图 6-69 电铸加工原理图

1—电铸槽 2—电铸液 3—阳极(电铸材料) 4—直
流电源 5—电铸层 6—阴极(原模) 7—搅
拌器 8—精过滤器 9—溢流阀 10—液压
泵 11—粗过滤器 12—加热器

2) 用同一原模生产的电铸件尺寸形状一致性好。

3) 适应性强, 可用石膏、石蜡、环氧树脂等作原模材料, 可由内(外)表面复制外(内)表面, 也可由内(外)表面通过复制外(内)表面, 再复制内(外表面)。

电铸加工主要用于制造注塑模具、工具电极、钟表零件、异形孔喷嘴、波导管等空心、薄壁零件、以及表面轮廓花纹、印刷版、唱片原版、筛网、剃须刀网罩等。

2. 电铸加工的工艺过程 如图 6-70 所示。

(1) 原模设计与材料选择 原模分为临时性原模和永久性原模两大类, 视零件的形状、精度、表面粗糙度、生产数量来选择。一般精度低、表面粗糙、形状复杂、脱模困难、生产数量少用临时性原模; 精度高、表面粗糙度低、生产量大可选永久性原模。

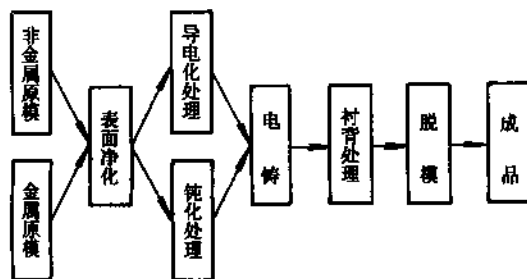


图 6-70 电铸加工工艺过程

原模设计时应考虑零件的结构、精度、电铸工艺性、如内、外棱角应采用尽量大的过渡圆弧, 以避免电镀层内棱角处太薄而外棱角处过厚; 一般脱模斜度不小于 $1^{\circ} \sim 3^{\circ}$, 若不允许有斜度, 则应选择与电铸材料热膨胀系数相差较大的材料作原模, 以使用加热或冷却方法脱模; 若零件表面粗糙度要求一般, 原模的表面粗糙度应达到 $R_a 0.4 \sim 0.2 \mu\text{m}$, 以便脱模; 形状复杂难于脱模的零件, 可采用组合式原模; 原模应设计电铸后切口, 以便脱模后切去。

临时性原模可选用铝、低熔点合金、蜡、石膏、聚苯乙烯或热塑性塑料等材料; 永久性原模可选用碳素钢、不锈钢、镍、黄铜、青铜、金属表面镀铬、玻璃、环氧树脂或热固性塑料等材料。

(2) 原模电铸前预处理 其目的是便于电铸和电铸后的脱模; 它包括清洗、导电化或钝化处理。

清洗是要去掉表面的脏物和油污, 保证均匀电铸, 可用有机清洗剂、酸洗、碱洗、阴极电解清洗等。

对非金属原模要进行导电化处理, 如用极细的石墨、铜或银粉末混以胶合剂制成导电漆, 涂敷在原模表面; 在原模表面上用化学镀方法镀上薄层铜、镍或银; 用真空镀膜或阴极溅射方法镀上金、银或铂等薄膜。

对金属原模表面要进行钝化处理, 即在重铬酸盐溶液中处理, 形成一层不牢固的钝化膜, 以便电铸后易于脱模。

(3) 电铸液 电铸常用的金属有铜、镍、铁等, 其所用电铸液应相应为含有电铸金属离子的硫酸盐、氨基磺酸盐、氟硼酸盐和氯化物等水溶液。例如, 铜电铸液有硫酸盐溶液、氟硼酸盐溶液、焦磷酸盐溶液等。

电铸过程中, 要注意以下几点:

1) 严格控制电铸液成分、浓度、酸度值(pH值)、温度、电流密度等参数, 开始通电时电流宜小, 逐渐增加, 中途不宜停电, 以免产生分层、起皱、开裂、变形、剥落等缺陷。

2) 电铸件凸出部分电场强, 镀层厚, 凹入部分电场弱, 镀层薄。为了镀层厚薄均匀, 凸出部分应加屏蔽, 凹入部分可装辅助阳极。

3) 连续搅拌、连续过滤电铸液, 可降低浓差极化, 增大电流密度, 缩短电铸时间, 避免产生针孔、瘤斑、凹坑、表面粗糙等缺陷。

(4) 电铸件的衬背 某些电铸件,如塑料模具、印刷制版等,电铸成型后需要用浇铸铝—锡合金或热固性塑料等衬背加固,再进行机械加工至一定尺寸。对结构零件也可以在其外表面包覆树脂进行加固。

(5) 脱模 电铸件的脱模可用锤击、压出、冷热胀缩分离、薄刃撕剥、加热熔化原模、化学溶解原模、打碎原模等方法。

3. 电铸设备

设备主要由电铸槽、直流电源、搅拌器、过滤器、恒温电铸液循环系统等。

电铸槽用铅板、塑料、橡胶等耐蚀材料作衬里。直流电源一般用品闸管直流电源,电压3~20V可调,电流密度为15~30A/dm²。电铸液的过滤速度以每小时更换循环2~4次为宜。

4.7.2 刷镀

1. 刷镀加工原理、特点和应用

(1) 刷镀加工原理 刷镀又称涂镀或无槽电镀,是在金属工件表面局部快速电化学沉积金属的方法。如图6-71所示,刷镀时,工件接阴极,镀笔接阳极,镀笔端部为不溶性石墨电极,其外包有一层脱脂棉,外面再包一层耐磨涤纶套,脱脂棉内饱蘸镀液,工件回转,并从喷嘴中喷洒镀液,镀液中的金属正离子在电场作用在阴极表面获得电子而沉积,可得到0.001~0.5mm以上厚度的镀层。

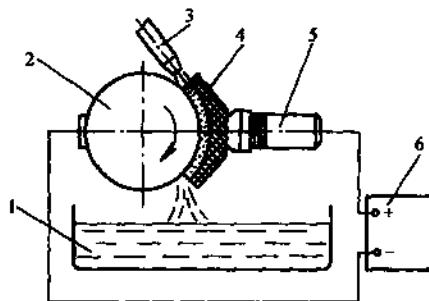


图 6-71 刷镀加工原理图

1—镀液 2—工件(阴极) 3—镀液喷嘴
4—棉套 5—镀笔 6—直流电源

(2) 刷镀的特点

1) 不需要镀槽,设备简单,机动灵活,可对局部表面进行刷镀。

2) 刷镀时,镀笔相对于工件运动,镀笔与工件接触处只发生放电结晶,不会同时发生金属离子的还原结晶,因此,阴极区不会出现金属离子贫乏现象,氢气也易于逸出,所以允许使用比槽镀大到几十倍的电流密度和金属离子浓度,从而刷镀比槽镀的加工速度快20~50倍。

3) 刷镀液种类多,可刷镀金、银、铜、铁、锡、镍、钨、钼等多种金属,可一机多用,易于更改镀材,并易多层复合镀层。

4) 镀层与基体金属的结合力强,镀层厚度易于控制。

(3) 刷镀的应用

1) 修复零件磨损表面,恢复其尺寸和几何形状;实施尺寸超差工件的补救。

2) 填补零件表面上的划伤、孔洞、凹坑斑蚀等缺陷。

3) 修复零件表面的防护层,如镀锌、镀铬等。

4) 零件局部表面的耐磨、耐腐蚀、装饰美观的镀层,用以改善表面性能、降低表面粗糙度。

2. 刷镀工艺过程

刷镀一般可分为以下几个步骤。

(1) 表面预处理 对刷镀工作的质量影响很大,包含以下过程。

1) 表面预加工,去除表面上的毛刺、不平度高度、锥度、疲劳层,对深的划伤、腐蚀斑痕要打磨露出基体金属,表面粗糙度 $R_a < 2.5\mu\text{m}$ 。

2) 除油、除锈。可采用化学除油或溶剂除油;可采用喷砂、砂布打磨或酸洗除锈。

3) 电净处理。对钢铁等材料工件接阴极,加直流电压8~12V,阴极上产生氢气泡使表面

油污脱落去除。对有色金属等材料工件接阳极，可进行阳极表面溶解(电解)。

4) 活化处理，用于去除工件表面的氧化膜、钝化膜或析出的碳元素微粒黑膜。有专门的活化液，工件接阴极或阳极，活化后用水洗净，表面呈均匀银灰色，无花斑。

(2) 镀底层 为了提高工作镀层与基体金属的结合强度，需先用特殊镍、碱铜、或低氢脆铜镀液预镀一层厚为 0.001~0.002mm 的底层。

(3) 镀尺寸镀层 若待镀工件因磨损所需镀层厚度较大时，单一金属镀层会产生内应力增大，晶粒变粗，强度下降，裂纹和自然脱落等问题，这时要用不同镀层交替迭加来增加尺寸，称为尺寸镀层。

(4) 镀工作镀层 工作镀层是表面最终镀层，其作用是满足表面力学和机械性能等要求，如要求耐磨可镀一层镍—钨合金，要求光泽可镀一层半光亮镍。

3. 刷镀设备

刷镀设备主要有电源、镀笔、镀液系统等。

(1) 直流电源 电压 3~30V 无级可调，电流 30~100A，视功率而定。电源应附有安培小时计，以便自动控制镀层厚度；电源应能方便地改变极性，以便在镀前预处理中对工件表面进行反接电解处理；应有短路快速切断保护和过载保护功能。研究表明，用脉冲电源比直流电源可获得更好的致密性镀层。

(2) 镀笔 由阳极和手柄两部分组成。阳极采用不溶性的石墨块组成，有不同大小形状，外包一层脱脂棉，在其外再包一层耐磨漆棉套。对于窄缝、狭槽、小孔、深孔等表面刷镀，考虑石墨强度不够，可用钝性金属铂等制作阳极。镀笔分为大、中、小、回转型四种。

(3) 镀液 根据所镀金属和要求有多种供选择，一般金属离子浓度较高，由所镀材料硫酸盐、少量添加剂等组成，接近中性，无毒，以免损伤皮肤。

刷镀时，镀笔与工件的相对运动速度不要太低，否则易出现焦糊斑痕或镀层疏松。温度应在 50℃左右为好，温度太低，会使镀层结合力变差。

4.7.3 复合镀

1. 复合镀的原理

在金属工件表面电镀时，将磨料作为镀层的一部分被一起镀覆，称之为复合镀。

2. 复合镀的类型、特点和应用

根据复合镀层的功能、磨料尺寸的不同，一般可分为以下两类。

(1) 耐磨层复合镀 电镀时，随着镀液中的金属镍或钴离子镀到金属工件表面的同时，镀液中带有极性的微粉级磨料与金属离子络合成离子团也镀到工件表面上，使镀层内均匀分布着许多微粉级硬点，增加了镀层的耐磨性，一般多用于高耐磨零件的表面处理。

(2) 切削层复合镀 磨料一般为人造金刚石或立方氮化硼超硬磨料，电镀时，通过镀液在被镀工件表面上均匀分布一层超硬磨料，控制镀层厚度，使紧靠工件表面的一层磨料被包覆、镶嵌磨粒尺寸的一半左右，形成了一层切削层，又称为镶嵌镀。一般用于制作超硬磨料电镀工具，如油石、铰刀、套料刀、小孔钻等。

5 电子束加工

5.1 电子束的热效应及其加工

电子束加工是利用电子束的高能量密度进行打孔、切槽、光刻等工作。电子是一个非常小

的粒子(半径为 $2.8 \times 10^{-12} \text{mm}$), 质量很小($9 \times 10^{-29} \text{g}$), 但其能量很高, 可达几千电子伏(eV)。电子束可以聚焦到直径为 $1 \sim 2 \mu\text{m}$, 因此有很高的能量密度, 可达 10^9W/cm^2 。高速高能量密度的电子束冲击到工件材料上时, 在几分之一微秒的瞬时, 入射电子与原子相互作用(碰撞), 在发生能量变换的同时, 有些电子向材料内部深入, 有些电子发生弹性碰撞被反射出去, 成为反射电子。在电子与原子的碰撞中, 使原子振动产生发热现象, 虽然还产生二次电子、荧光、X射线等, 占用了一部分能量, 但可以认为几乎所有的能量都变成了热能。由于电子束的能量密度高、作用时间短, 所产生的热量来不及传导扩散就将工件被冲击部分局部熔化、气化、蒸发成为雾状粒子而飞散, 这是电子束的热效应, 电子束加工就是靠电子束的热效应现象。高能电子束具有很强的穿透能力, 穿透深度为几微米甚至几十微米, 如工作电压为 50kV 时, 加工铝的穿透深度为 $10 \mu\text{m}$, 而且以热的形式传输到相当大的区域。电子束的加工过程可用如图 6-72 所示模型来说明。

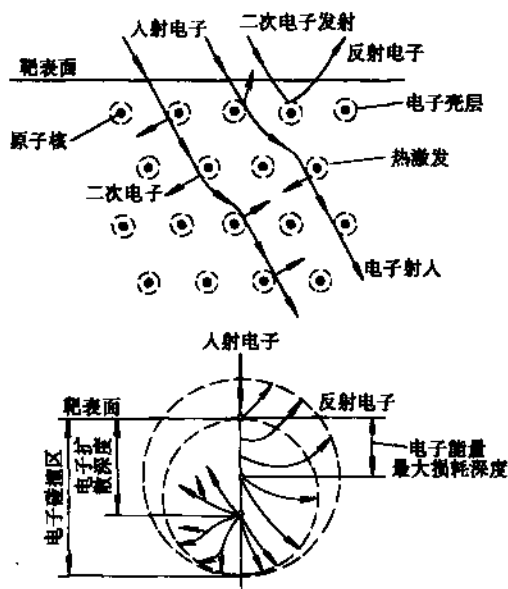


图 6-72 电子束加工过程模型

电子束照射在工件表面上的功率密度 q 有如下关系:

$$q = VI/\pi r^2$$

式中 q ——功率密度(W/cm^2);
 V ——工作电压(V);
 I ——电流(A);
 r ——电子束斑半径(cm)。

例如: 设 $V = 150 \text{kV}$, $I = 10 \text{mA}$, $r = 0.01 \text{cm}$, 则电子束照射在工件表面的功率密度 q 约为 $5 \times 10^6 \text{W/cm}^2$, 足以使任何材料气化和蒸发, 如钨的熔化温度高达 3410°C , 气化的所需功率密度为 $0.1 \times 10^6 \text{W/cm}^2$, 可见电子束的能量是非常高的。

利用电子束的热效应可进行打孔、切槽、焊接、淬火等工作。要说明电子束的这些加工方法, 就必须分析在照射时材料表面的温度分布(如图 6-73 所示)。设工件为半无限大物体, 热学常数为定值, 在电子束连续照射无限长时, 其中心部分达到热平衡温度, 称饱和温度 θ_0 ,

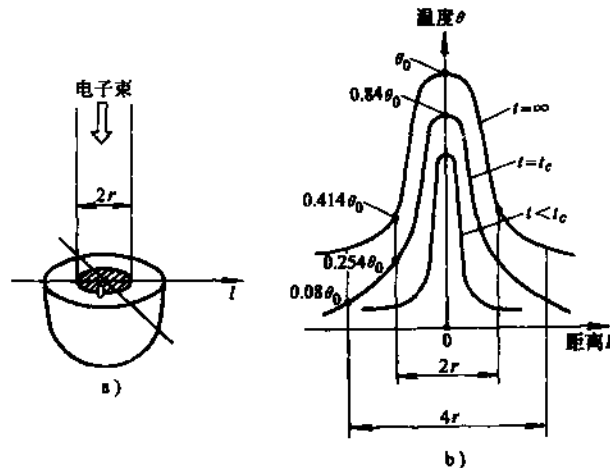


图 6-73 电子束照射下材料表面的温度分布

a) 工件模型 b) 温度分布

θ_0 —饱和温度 t_c —基准时间

其关系式为

$$\theta_0 = \phi / \pi \lambda r$$

式中 θ_0 ——饱和温度(°C)；
 ϕ ——电子束输入热流量(W)；
 λ ——材料热导率[W/(m·K)]；
 r ——电子束斑半径(m)。

上式中， λ 的温度单位是表示温度差和温度间隔，故 $1\text{K} = 1^\circ\text{C}$ 。

从温度分布图中可以看出，经过 t_c 时间后，工件被照中心部分的温度将上升到饱和温度的 84%，而在离中心两倍束斑半径的地方，温度上升甚少，只有饱和温度的 8%，这样就可以做到只使电子束照射区(2r)蒸发，而其他地方保持较低的温度。时间 t_c 称之为基准时间，其关系式为

$$t_c = \pi r^2 \rho c / \lambda$$

式中 t_c ——电子束照射基准时间(s)；
 ρ ——材料密度(kg/m³)；
 c ——材料比热容(J/kg·K)，该单位可转换为 W·s/(kg·K)。

电子束加工所需的功率密度和基准时间与工件材料有关，如设电子束斑半径为 0.01cm，则加工铜时要求功率密度为 $1.4 \times 10^6 \text{W/cm}^2$ ，照射基准时间为 0.3ms；加工玻璃时要求功率密度为 $3.6 \times 10^6 \text{W/cm}^2$ ，照射基准时间为 0.55ms。

图 6-74 表示了利用电子束热效应进行的各种加工。在低功率密度照射时，电子束中心部分的饱和温度在熔化温度附近，这时蒸发缓慢且熔化坑较大，可作电子束熔凝处理，提高表层的硬度和强度，是一种表面改性技术。用中等功率密度照射时，出现熔化、气化和蒸发，如果材料是透明的，可以看到一些气泡状的东西，这些气泡在照射完后会保持原状固化，中等功率密度照射可用于电子束焊接。用高功率密度照射时，电子束中心部分的饱和温度远远超过蒸发温度，由于气泡内的压力大于熔化层表面张力，使材料从电子束的入口处排除出去，并有效地

向深度方向加工，这就是电子束打孔的情况，对于一般金属材料，功率密度需要 $10^6 \sim 10^9 \text{W/cm}^2$ 。高功率密度电子束除打孔、切槽外，在集成电路薄膜元件制作中，利用蒸发可获得高纯度的沉积薄膜。

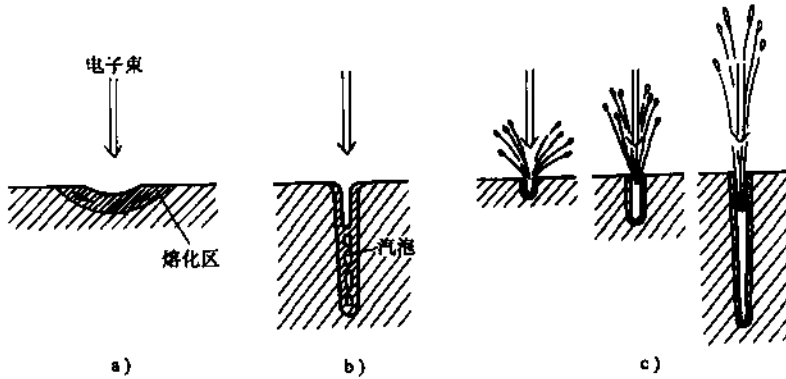


图 6-74 利用电子束热效应的加工

a) 低功率密度照射 b) 中等功率密度照射 c) 高功率密度照射

5.2 电子束的化学效应及其加工

用功率密度相当低的电子束照射高分子材料时，即使几乎不会引起材料表面温度的上升，也会由于入射电子和高分子相碰使其分子链切断或重新聚合，从而使材料的分子量和化学性质产生变化，这就是电子束的化学效应。利用这一效应可进行电子束光刻。

在电子束光刻中，电子束主要用来曝光，它有两种方式。一种为电子束扫描曝光，另一种是电子束投影曝光。

5.2.1 电子束扫描曝光

它是利用图形发生器，将聚焦在 $1\mu\text{m}$ 以内的电子束在大约 $0.5 \sim 5\text{mm}$ 的范围内自由扫描，在光致抗蚀剂上绘制图形，这种方法称之为写图，它主要用于掩膜或基片的图形制作。常用的光致抗蚀剂有聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA 胶)，当加速电压为 20kV 的电子束以电通密度为 10^{-8}C/cm^2 的剂量照射到厚度为 $0.3 \sim 1\mu\text{m}$ 的 PMMA 胶上，则分子量为 10 万的 PMMA 胶大分子就会被切割成分子量为原来的 $1/20$ 左右的分子。由于照射处和未照射处的分子量不同，因此按规定图形扫描曝光，就在光致抗蚀剂涂层上产生潜像，选择合适的显影液，由于分子量不同而溶解速度不一样，潜像就会显示出来。由于分子的体积很小，能在上述光致抗蚀剂上制成最小尺寸为 $0.1 \sim 1\mu\text{m}$ 的图形，质量、效率均很高。图 6-75 为较常用的电子束扫描曝光系统的框图，除电子束的基本系统外，还有测定工件位置的激光系统、扫描用的数模转换系统和束流位置的对准系统等。

5.2.2 电子束投影曝光

它是利用电子束作为光源，使它通过原版，再以 $1/5 \sim 1/10$ 的比例缩小投影到光致抗蚀剂上进行图形的曝光。这种方法的原理是缩小投影复印，故又称之为电子束复印。其优点是图形精度高(图形分辨力可达 $0.5\mu\text{m}$)，速度快，生产率高，成本低，可在基片或掩膜上复印。图 6-76 表示了一种缩小投影型电子曝光装置。

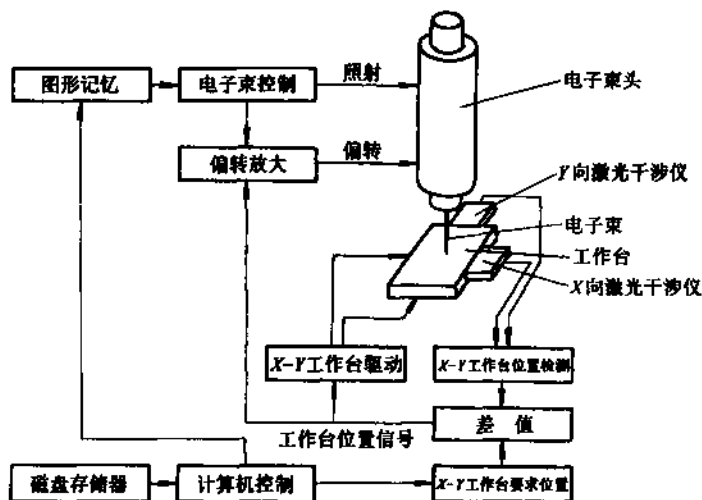


图 6-75 电子束扫描曝光系统框图

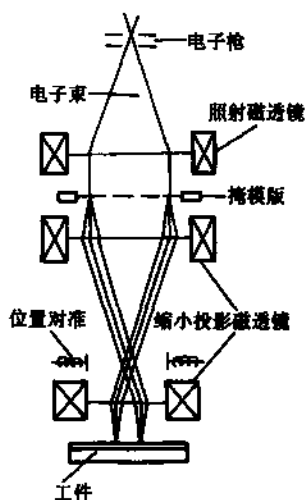


图 6-76 缩小投影型电子曝光装置

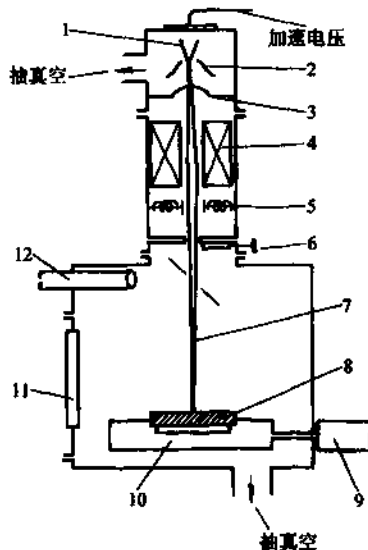


图 6-77 电子束加工装置
 1—阴极 2—控制栅极 3—加速阳极 4—束流聚焦控制装置 5—束流位置控制装置 6—更换工件时的截止网 7—电子束 8—工件 9—驱动电动机 10—移动工作台 11—工件更换及观察窗 12—观察镜

5.3 电子束加工装置

电子束加工装置主要由电子枪系统、真空系统、控制系统和电源系统等组成，如图 6-77 所示。

电子枪用来发射高速电子流，它是在真空条件下，利用电流加热阴极 1 发射电子束，经控制栅极 2 初步聚焦后，由加速阳极 3 加速。阴极可用纯钨、钨钼、碳化钨等材料制成。控制栅

极为中间有孔的圆筒，在其上加比阴极较负的偏压，起束流强度控制和初步聚焦作用。在加速阳极上加比阴极为正的高压，起吸引和加速电子流的作用。

真空系统是抽真空，真空度为 $1.33 \times (10^{-2} \sim 10^{-4}) \text{Pa}$ ，因为在真空中电子才能高速运动，发射阴极不会在高温下被氧化，同时也防止被加工表面和金属蒸气氧化。为了消除加工时金属蒸气对电子发射不稳定的影响，电子束加工多采用开式真空系统，即不断地抽出加工中产生的金属蒸气。

控制系统由聚焦装置、偏转装置和工作台位移装置等组成，控制电子束束斑大小、方向和工件位移。

电源系统提供稳压电源、各种控制电压及加速电压。

5.4 电子束加工的特点及应用

电子束加工与其他加工方法相比，有许多特点。

1) 束径小、能量密度高 电子束能够极其微细的聚焦，束径可达 $100 \sim 0.01 \mu\text{m}$ 范围。同时，最小束径的电子束长度可达其束径的几十倍，故能适于深孔加工。

2) 被加工对象范围广 电子束加工是靠热效应和化学效应，热影响范围可以很小，又是在真空中进行，加工处化学纯度高，故适于加工各种硬、脆、韧性金属和非金属材料、热敏材料、易氧化金属及合金、高纯度半导体材料等。由于在加工时工件上很少产生应力和变形，故适于加工易变形零件。

3) 加工速度快、效率高

4) 控制性能好，易于实现自动化 可通过磁场或电场对电子束的强度、束径、位置进行迅速准确地控制，且自动化程度高。易于加工图形、圆孔、异形孔、盲孔、锥孔、弯孔及狭缝等。

电子束加工的应用范围很广，可用来打各种孔、切槽、焊接、光刻、表面改性等，它既是一种精密加工方法，又是一种重要的微细加工方法。近年来，出现了多脉冲电子束照射等技术，使电子束加工有了更进一步的发展。

6 离子束加工

6.1 离子束的力效应及溅射现象

离子束加工是在真空条件下，将氩(Ar)、氪(Kr)、氙(Xe)等惰性气体通过离子源产生离子束，经加速、集束、聚焦后，射到被加工表面上以实现各种加工的方法。

原子是由原子核和围绕原子核运动的各层轨道上的电子组成，呈中性。原子电离后成为离子，失去外层电子的原子变成带正电荷的正(阳)离子，获得多余电子的原子变成带负电荷的负(阴)离子。可见离子的质量远远大于电子的质量，如一个氩离子的质量是电子质量的 7.2 万倍，离子在电场中的加速过程比电子慢，速度也较低，但一旦加速后，具有远远高于电子的动能，高达 10keV 量级，因此离子束加工是通过弹性碰撞，轰击工件表面，其穿透能力很强，一个具有 1keV 能量的离子，其穿透深度通过电子衍射条纹估算为 $5 \mu\text{m}$ 。加工时被加工表面层不产生热量，不引起机械应力和损伤。因此离子束加工是通过其力效应来进行的，与电子束加工形成鲜明的对比。

质量大动能高的离子冲击工件表面时，将产生弹性碰撞，将能量传递给工件材料的原子、

分子，其中一部分能量使原子、分子产生溅射，被抛出工件表面，这称为离子束溅射现象，其余能量将转变为材料晶格的振动。

离子碰撞过程可用图 6-78 所示模型来说明，有以下几种情况：

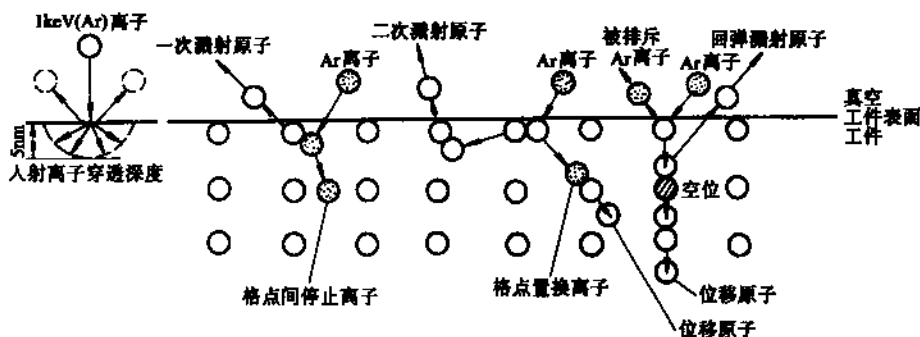


图 6-78 离子碰撞过程模型

- (1) 一次溅射 由离子直接碰撞工件表面的原(分)子，使该原(分)子分离出工件表面。
- (2) 二次溅射 由离子碰撞材料中的原(分)子，这个原(分)子又去碰撞别的原(分)子，而使后来被撞的原(分)子分离出工件表面。
- (3) 回弹溅射 有些受到离子碰撞的原(分)子，又去碰撞别的原(分)子，但自己却被反弹出工件表面外。这种情况是反向溅射或背散射。
- (4) 排斥离子 有些离子在碰撞原(分)子时，自己反被弹出工件表面外，成为被排斥的离子。可见这种情况下没有溅射去除作用。
- (5) 置换离子 离子撞击工件表面时被留于表面层材料中，成为置换离子。这种情况也无溅射去除作用。

现以最简单的直线弹性碰撞为例，在一次碰撞中所传递的动能可用下式表示。

$$E = 4E_0m_0m/(m_0 + m)^2$$

式中 E ——传递给原(分)子的能量(eV)；

E_0 ——入射离子能量(eV)；

m_0 ——入射离子质量(u)；

m ——被撞击的相对原(分)子质量(u)。

由上式可知，当 $m_0 \approx m$ 时， $E \approx E_0$ ，溅射效果最好。现举一例子来具体说明，若用原子量分别为 40、89、131 的 Ar、Kr、Xe 作为加工用的离子，对玻璃材料 SiO_2 进行溅射加工，由于 Si 的原子量为 28， O_2 的相对分子质量为 $16 \times 2 = 32$ ，那么，如果以 Si 原子和 O_2 分子的形式溅射去除，则选用 Ar 的加工效率将最好，因为 Ar 的原子量与 Si 的原子量和 O_2 的分子量比较接近。

图 6-79 表示了上述例子中三种离子的能量与溅射率的关系，溅射率是指被一个入射离子所去除的原子或分子数，可以看出，Ar 的溅射率最高，Kr 次之，Xe 最低。同时还可以看出，随着离子能量的增加，溅射率可以达到饱

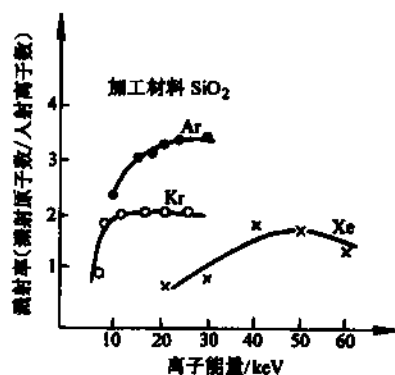


图 6-79 离子能量与溅射率

和,甚至还有逐渐下降的趋势,这是由于当离子能量较小时,入射离子与工件表面原子、分子的碰撞,以直接弹性碰撞为主,处于溅射去除为主的状态,随着离子能量的增加,溅射率越高。但当离子能量超过一定值后,入射离子会深入到工件材料内部一定深度,在那里进行能量交换,速度有所降低,碰撞的机率增加,由此而产生的非弹性碰撞增加,所以溅射率达到饱和状态。如果采用高能离子轰击工件表面,则打进材料中的离子,其电荷可能被中和,变成置换原子或成为晶格间的填隙原子,而被残留在工件表层材料中,这就是离子注入的情况。这时溅射率可能会有所下降。

离子束的入射角与溅射率也有关,由图 6-80 中的实验曲线可知,当入射角为 0° (即与表面垂直)时,溅射率最低。随着入射角的增加,溅射率逐渐增加。图中还表示了入射角与相对溅射速度的关系。相对溅射速度是指相对于离子束的单位面积电流,在加工表面垂直方向上的加工速度,加工速度用单位时间内的加工深度或体积来表示。图中,离子束的单位面积电流,即电流密度,其单位用 A/cm^2 表示,加工速度用单位时间内的深度表示,单位为 cm/s 。可见在入射角近 60° 时,相对溅射速度最大。在实际加工时,选择入射角是十分重要的,不仅要考虑溅射率、相对溅射速度,而且要考虑表面粗糙度等问题。

6.2 离子束加工方法

离子束加工方法有离子束溅射去除加工、离子束溅射镀膜加工、离子束注入加工和离子束曝光等。

(1) 离子束溅射去除加工 离子束溅射去除加工可简称为离子束去除加工,其加工原理是利用离子溅射,主要是一次溅射和二次溅射,它是一种最典型的原子、分子加工单位的微细加工方法和超精密加工方法。图 6-81a 是离子束去除加工装置的结构原理图,它由双等离子体离子源、双真空室、聚焦装置、工作台、电源等组成。首先把 Ar、Kr、Xe 等惰性气体充入低真空(1.3Pa)的离子室中,通过阴极 2 与阳极 5 之间的低气压直流电弧放电,使之在阳极以上的空间被电离,成为等离子体。中间电极 3 的电位比阳极 5 低,两者都由软铁制成,和电磁线圈 4 形成很强的轴向磁场,所以以中间电极为界,在阴极和中间电极、中间电极和阳极之间形成两个等离子体区。前者的等离子体密度较低,后者在非均匀强磁场的压缩下,在阳极孔处形成了高密度的等离子体。经过控制电极 7 和引出电极 8,只将正离子拉出呈束状并加速,从阳极小孔进入高真空区(1.3×10^{-6} Pa),再通过静电透镜所构成的聚焦装置 10 聚成高密度细束的离子束,轰击工件表面。工件装于工作台上的摆动装置或回转装置上,可进行双坐标直线位移、绕垂直轴的转动和绕水平轴的摆动。离子束溅射去除加工可用于非球面透镜的成形、金刚石刀具和压头的刃磨、大规模集成电路芯片图形的刻蚀等,可加工金属和非金属材料。所谓离子铣、离子磨(离子减薄)、离子研磨抛光等都是离子束溅射去除的具体加工方法。

图 6-81b 是离子束溅射去除加工非球面透镜的原理图,该装置装在图 6-81a 中的工作台

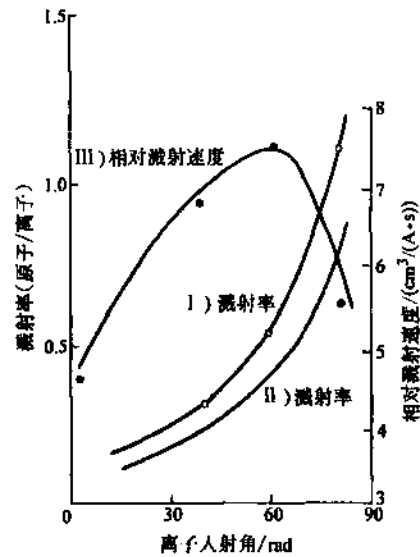


图 6-80 离子入射角和溅射率
I、III—10KeV Ar 离子加工 BK-7 玻璃
II—50KeV Ar 离子加工 SiO_2 玻璃

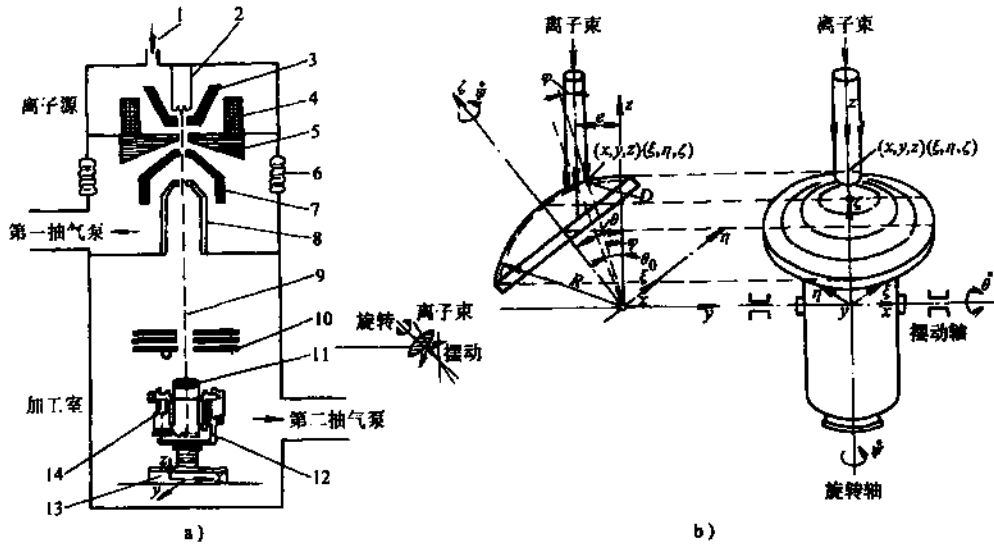


图 6-81 离子束去除加工装置及加工非球面的原理

a) 离子束去除加工装置 b) 离子束加工非球面原理

1—惰性气体入口 2—阴极 3—中间电极 4—电磁线圈 5—阳极 6—绝缘子

7—控制电极 8—引出电极 9—离子束 10—聚焦装置 11—工件

12—摆动装置 13—工作台 14—回转装置

上, 因此具有 x 、 y 、 z 三坐标移动的运动系; 该装置本身又有绕 x 轴的摆动和绕 z 轴的旋转两个运动系, 摆动速度为 θ , 旋转速度为 ψ 。将所要加工的轴对称非球面透镜选出毛坯, 毛坯为凸面半径为 R 的近似球面透镜, 毛坯安装时, 应使其球面中心与摆动轴重合, 其光轴与旋转轴重合, 图中所示这时旋转轴已不在 z 轴上。

设 (ξ, η, ζ) 为在透镜毛坯上固定坐标系中表示加工点的坐标, 其中 ζ 为光轴(旋转轴), ξ 、 η 为与之垂直的坐标轴; (x, y, z) 为空间固定坐标系中加工点的坐标; D 为加工深度, 为所要求的非球面透镜和透镜毛坯各加工点在 ζ 轴上的差。可以看出, 每个加工点的位置可同时用 (x, y, z) 和 (ξ, η, ζ) 两种坐标表示。

从图中可知, 加工点处的离子束入射中心角为 θ_0 , 此时离子束的轴线偏移摆动轴的距离为 e , $e = R \sin \theta_0$, 而每个加工点的入射角为 φ , $\varphi = \arctan(\sqrt{x^2 + y^2}/z)$ 。如果在摆动面上使离子束的轴线偏移摆动轴适当距离, 则无论怎样摆动或旋转透镜都可使离子束对所加工透镜中心的人射角不变化。

(2) 离子束溅射镀膜加工 离子束溅射镀膜加工是一种原子、分子级的附着加工, 所以有时又称之为离子束溅射附着加工。用被加速了的离子从靶材上打出原子和分子, 并将它们附着到工件表面上形成镀膜。镀膜材料置于靶位上, 靶面与离子束的方向成一定角度, 工件被镀表面与溅射原子、分子方向垂直, 如图 6-82 所示。由于离子溅射出来的中性原子、分子有相当大的动能, 所以这种镀膜比蒸镀、电镀有较高

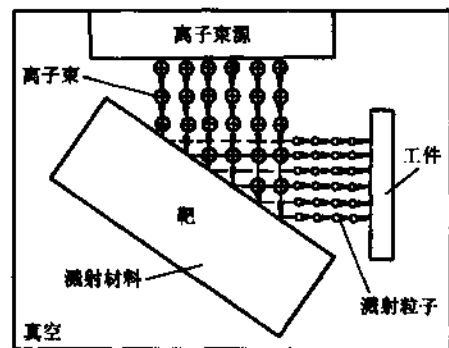


图 6-82 离子束溅射镀膜加工原理图

的附着力，效率也比较高。它又是一种干式镀膜，因此应用广泛，如在表壳上离子镀氮化钛，呈金黄色，又美观又耐磨；在刀具、工具上离子镀氮化钛，可提高寿命1~2倍。溅射镀膜可在金属、非金属(如纸、聚四氟乙烯塑料等)上制作金属化合物薄膜、合金薄膜和氧化薄膜等。

(3) 离子束注入加工 离子束注入加工就是将所要注入的元素进行电离，并将正离子分离和加速，形成具有数十万电子伏特的高能离子流，轰击工件表面，离子因动能很大，被打入表层内，其电荷被中和，成为置换原子或晶格间的填隙原子，被留于表层中，使材料的化学成分、结构、性能产生变化。离子注入可用于半导体材料掺杂，金属材料改性等方面。如在单晶硅中注入磷或硼等杂质，已用于晶体管、集成电路、太阳能电池等制作中。金属材料改性是一种表面处理，如将氧离子注入铁中，形成 Fe_3O_4 ，可增加耐酸性；将氮离子注入高速钢刀具切削刃处，可提高刀具寿命；将铌离子注入锡中，形成 Nb_3O_4 ，可得超导表面等。

(4) 离子束曝光 离子束曝光的优点是有高灵敏度和分辨力。由于离子质量远大于电子，在基片上产生背散作用小，引起的邻近效应也小，因此能够对线宽小于 $0.1\mu m$ 的精密微细图形曝光。同时，由于离子直径、质量比电子大，射入抗蚀剂后受到的阻力也大，离子在抗蚀剂层内的射程也短，离子能量能被抗蚀剂充分吸收，这就提高了抗蚀剂的灵敏度。实验证明，在相同抗蚀剂时，离子束曝光的灵敏度比电子束曝光的灵敏度要高一个数量级以上，由此曝光时间可大为缩短。可以认为，离子束写图和复印是很有前途的。

6.3 离子束加工装置

离子束加工装置与电子束装置基本类似，是由离子源、真空系统、控制系统、电源等部分组成。

离子源又称离子枪、其作用是产生离子束。其原理是将惰性气体充入真空室中，利用高频放电、高速电子撞击、电弧放电等方法，使惰性气体被电离为等离子体，并在强电场作用下将正离子从离子源出口孔引出成束。所谓等离子体是由数量相等的正离子与负电子所组成的混合物，呈中性，在物理学上称之为除固、液、气三态外的物质第四态。

离子源有多种类型以适应不同的用途，离子产生的方式也各有不同，有通过放电、高速电子撞击、高温、强光、放射线照射等方法将中性原子电离。常用的离子源主要有双等离子体型、离子簇射(流)型和高频等离子体型等。

(1) 双等离子体型离子源 它是利用阴极和阳极间的直流电弧放电，使氩、氮、氙等惰性气体在阳极小孔以上的低真空中离子化。其结构原理图如图6-83所示，等离子体的形成和受非均匀磁场的压缩过程如图6-84所示。双等离子体的意思是指以中间电极为界，形成两个等离子体区。这种离子源可获得高密度的等离子体，电离效率可达50%~90%，使用非常广泛。图6-81所述就是这种离子源的离子束去除加工装置。

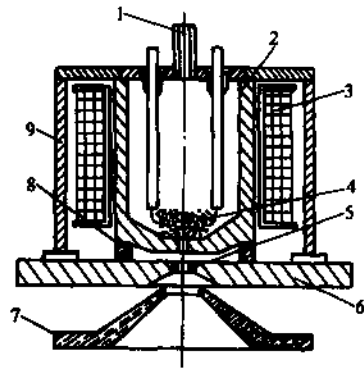


图 6-83 双等离子体离子源结构原理图

- 1—气体入口 2—中间电极 3—电磁线圈
4—阴极 5—阳极(铂) 6—阳极板(软铁) 7—引出电极(不锈钢) 8—绝缘环 9—导磁环(铁)

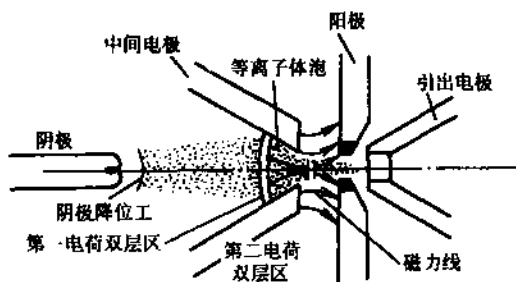


图 6-84 双等离子体的形成过程

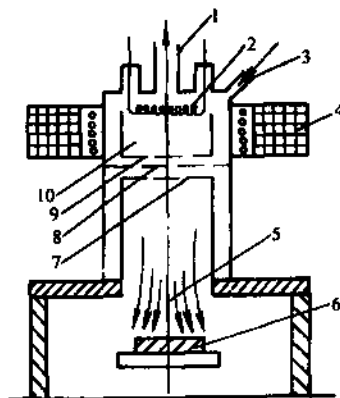


图 6-85 离子流型离子源

- 1—真空抽气口 2—热阴极灯丝 3—惰性气体入口
4—电磁线圈 5—离子束流 6—工件 7—阴极
8—电子抑制栅 9—阳极 10—电离室

(2) 离子簇射(流)型离子源 又称之为考夫曼型离子源, 其原理图示于图 6-85, 由热阴极灯丝 2 发射电子, 在阳极 9 的吸引下, 电子向下方的阴极 7 移动, 同时受电磁线圈 4 的磁场偏转作用作螺旋运动前进。惰性气体 Ar 由入口 3 进入电离室 10, 受高速电子的撞击而被电离成离子。由阴极 7、阳极 9 和电子抑制栅 8 三个电极片组成静电透镜, 三个极片上有几百个相互对准的小孔, 离子便由孔中通过, 而电子却被挡回去, 从而形成平行束流而引出, 所以也称之为离子流装置, 它是一种大口径、大容量的离子源, 离子流直径可达 50~300mm, 密度比离子束低些, 但均匀稳定, 广泛用于集成电路的刻蚀。

(3) 高频等离子体离子源 简称高频离子源, 它是利用高频振荡器在放电室中产生高频电磁场, 以加速自由电子与惰性气体原子进行碰撞, 使之电离而产生等离子体。其特点是可以获得金属离子、化学性质活泼的气体离子, 与其他离子源相比, 其束流强度较低。

6.4 离子束加工的特点及应用

离子束加工在微细加工和精密加工中是一种最有前途的原子、分子加工单位的加工方法。其特点可归纳如下。

(1) 加工精度和表面质量高 离子束加工是靠微观力效应, 被加工表面层不产生热量, 不引起机械应力和损伤。离子束斑直径可达 $1\mu\text{m}$ 以内, 加工精度可达 nm 级。

(2) 加工材料广泛 可对各种材料进行加工。由于加工原理是力效应, 故对脆性、半导体、高分子等材料都可加工。由于加工是在真空下进行, 故适于加工易氧化的金属、合金和半导体材料等。

(3) 加工方法丰富 离子束加工可进行去除、镀膜、注入等加工, 利用这些加工原理出现了多种多样的具体方法, 如成形、刻蚀、减薄、曝光等, 在集成电路制作中占有极其重要的地位。

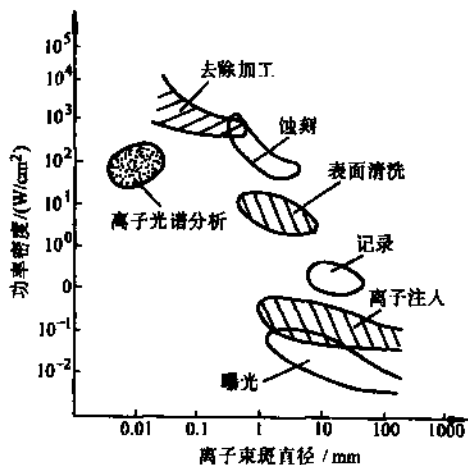


图 6-86 离子束的应用范围

(4) 控制性能好, 易于实现自动化

(5) 应用范围广泛 可根据加工要求选择离子束的束斑直径和能量密度, 直径小、能量密度大的离子束用于去除加工; 直径大、能量密度较低时适于镀膜、刻蚀; 而直径大、能量强的离子束适于注入加工。离子束的应用, 除加工外, 尚可用于分析, 记录等, 其应用范围可用图 6-86 表示。

7 激光束加工

7.1 激光的产生过程及特性

激光是通过原子受激辐射发光和共振放大而形成的。

原子由原子核和电子组成。电子绕原子核转动而具有动能; 电子被原子核吸引而具有势能。两种能量的总和为原子的内能。如果由于外界的作用, 使电子与原子核的距离增大或缩小, 则原子的内能也随之增大或减小。因此原子具有一些不连续分布的能级, 电子在最靠近原子核的轨道上转动时是稳定的, 这时原子所处的能级为基态。当有外界能量传入, 如光照射, 则电子运行轨道半径扩大, 原子内能增加, 被激发到能量更高能级, 这时称之为激发态或高能态。每种原子都有自身的基态和不连续分布的多级高能态。被激发到高能级的原子是不稳定的, 总是力图回到低能级去。原子从高能级到低能级的过程称为跃迁。当原子跃迁时, 其能量差则以光的形式辐射出来, 这就是原子发光, 是自发辐射的光, 又称荧光。如果在原子跃迁时是受到外来光子(具有一定能量以光速运动的粒子)的诱发, 原子就会发射一个与入射光子的频率、相位、传播方向、偏振方向完全相同的光子, 这就是受激辐射的光。

原子被激发到高能级后, 会很快跃迁回低能级, 它停在高能级的时间称为原子在该能级的平均寿命。氢、氦、氩原子, 铷离子和二氧化碳分子等在外来能量的激发下, 使处于高能级的原子数大于低能级的原子数, 这种状态称为粒子数反转。这时, 在外来光子的刺激下, 产生受激辐射发光, 这些光子通过谐振腔的作用产生放大, 受激辐射越来越强, 光速密度不断增大, 形成了激光。图 6-87 表示了粒子数反转的建立和激光形成, 是以红宝石(含 0.05% 的 Cr^{3+} 离子的 Al_2O_3 人工晶体)为例, 当红宝石受脉冲氙灯照射时, 处于基态 E_1 的铬离子大量被激发到 E_3 状态, 由于 E_3 状态寿命极短, 很快地跃迁到寿命较长的亚稳态 E_2 , 产生自发辐射, 但实现了 E_2 对 E_1 能级的粒子数反转, 这时若有能量为 $E_2 - E_1$ 大小的光子诱发, 就会产生 E_2 对基态 E_1 的受激辐射跃迁而形成激光。

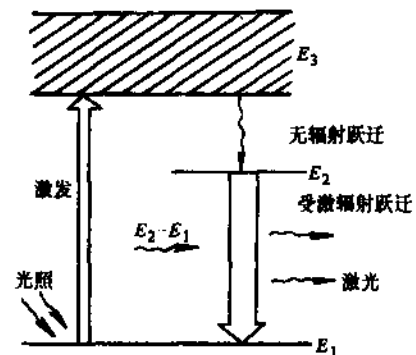


图 6-87 粒子数反转的建立和激光形成

激光除具有普通光的反射、折射、绕射和干涉等共性外, 尚有一些特有的特性:

- 1) 强度高、亮度大;
- 2) 单色性好, 波长谱线宽度狭窄;
- 3) 相干性好, 相干长度长;
- 4) 方向性好, 发散角可达 0.1mrad , 光束直径可聚到 0.01mm 。

激光的上述四个特点是相互联系的。

7.2 激光加工机理

当能量密度极高的激光束照射在加工表面上时，一部分从材料表面反射，一部分透入材料内其光能被吸收，并转换为热能，使照射区域的温度迅速升高、熔化、气化和熔融溅出而去除材料，如打孔、切割、电阻微调、动平衡等。可以说，激光加工的机理是热效应。

激光加工的加工方法不同，被加工材料不同，其加工机理也不尽相同。如激光焊接时只要求将材料加热到熔化程度而不要求去除；激光热处理只要求材料加热到相变温度。一般非金属材料的反射率比金属低得多，故吸收的激光能量也多。有机材料一般具有较低的软化点和熔点，有些有机材料在吸收了激光能量后，内部分子产生激烈振荡，致使靠聚合作用而形成的大分子被解聚，部分材料变成气态，如激光切割有机玻璃时就是这样；在激光加工硬塑料、木材、皮革等有机材料时会产生高分子沉积和加工边缘碳化。陶瓷、玻璃等无机非金属材料，光能吸收率高，但热导性差，激光加工时易产生热应力、裂纹，甚至破碎；但石英材料由于热膨胀系数很小，激光切割和焊接就不成问题。

分析激光加工过程，影响加工的主要因素有激光照射焦面上的能量分布、发射角、焦距、最小束斑直径、被加工材料等。

图 6-88 是激光照射时焦面上能量分布情况，将波长为 λ 、束径为 d 、输出面上功率大小为 P 的平行光线，用焦距为 f 的透镜聚焦，则能得到同心圆状的衍射象。由衍射理论可知，在这个焦点平面上，其能量分布是不均匀的，在束径中心，即焦点上的辐照度 E_0 用下式表示

$$E_0 = \frac{\pi}{4} \frac{d^2}{\lambda^2 f^2} P$$

而离中心愈远，则光照度愈弱。

从图中所示能量的分布状态可以看出，使得辐照度第一次为零的分布半径为 r_1 ，它可由下式得到：

$$r_1 = 1.22 \frac{\lambda f}{d}$$

可见，在半径 r_1 的圆面积上集中了全部光通量的 84.6%。由上式可得到激光照射聚焦时在焦面上的束斑直径为

$$d_1 = 2.44 \frac{\lambda f}{d}$$

考虑到发射角 θ 的影响，如图 6-89 所示，则束斑直径为

$$\begin{aligned} d_1 &= f\theta \\ \theta &= 2.44 \frac{\lambda}{d} \end{aligned}$$

由于激光有非常好的相干性、单色性、方向性，从激光器发出的全部光通量虽然不大，但进入谐振腔的光都是以固定波长，向固定方向发射，因此聚焦后就能获得非常大的功率密度，如红宝石激光聚焦时，

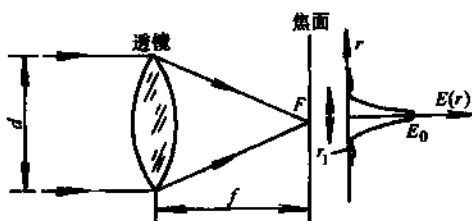


图 6-88 激光照射焦面上的能量分布

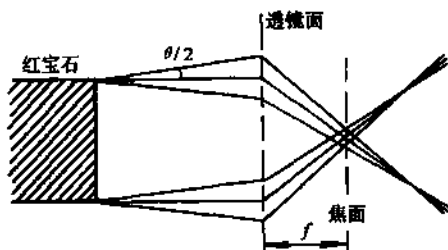


图 6-89 发散角与束斑直径

其焦点上的功率密度可达 10^9W/cm^2 ，如果将金属材料放在焦点上，其表面温度将被加热到 10^4℃ 。

7.3 激光加工方法

激光微细加工方法很多，应用范围广泛，可归纳为激光去除加工、激光表面改性和激光焊接等几类，具体的加工方法有打孔、切割、微调、动平衡、刻蚀、固态相变、合金化、涂敷、熔凝、焊接、激光存储(光盘)等。

7.3.1 激光打孔

利用激光束可对各种材料加工小孔和微孔，最小孔径达几微米，深度可达直径的 50 倍。激光打孔的过程是热物理现象综合的结果，孔的形成过程如图 6-90 所示。激光打孔时，用高功率密度脉冲激光源，影响加工质量的因素有激光束的参数(能量、脉宽)、波形、焦距、偏焦量(指工件表面与透镜焦平面的偏离量)、脉冲次数、被加工材料等。典型激光打孔的例子有液压泵喷嘴小孔、化纤喷丝板小孔、碳化钨劈刀引线小孔等激光加工。

考虑了激光聚焦因素后，激光打孔时，其孔径 d 与深度 h 可用下式估算：

$$d = 2 \left[\frac{3E}{\pi (L_B + 2L_m)} \right]^{1/3}$$

$$h = \left[\frac{3E}{\pi \tan^2 \varphi (L_B + 2L_m)} \right]^{1/3}$$

式中 E ——激光脉冲能量(J)；

L_B ——材料气化热体积热值(J/cm^3)；

L_m ——材料熔化热体积热值(J/cm^3)；

φ ——光束照射材料表面时的发散半角，当材料处于透镜焦平面时， $\varphi = 0$ (°)。

上两式只能作为实际使用时的参考。

7.3.2 激光切割

激光切割常用二氧化碳气体激光器，连续或脉冲方式，所切割的切缝窄、边缘质量好，几乎无切割残渣，切割速度快，可切割金属、玻璃、石英、木材、布匹、纸张等各种材料，还可用来半导体材料的划片。

7.3.3 激光微调

激光微调主要用于调整电路中某些元件的参数，以保证电路的技术指标。当前是指对电阻的微调。在微电子电路中，一般多采用薄膜电阻和厚膜电阻两种电阻，前者厚度为数十纳米至数微米，常用钽或镍铬合金，通过真空蒸镀制作，后者厚度为数微米至数十微米，主要用钯、钎、氧化铈等，由浆料印刷法制作。两种电阻在微调前的阻值偏差可达 5%~25%，而很多电路却要求 < 1%。传统的微调方法是用机械磨蚀(对厚膜)和电火花蚀除(对薄膜)，精度和效率均较低。

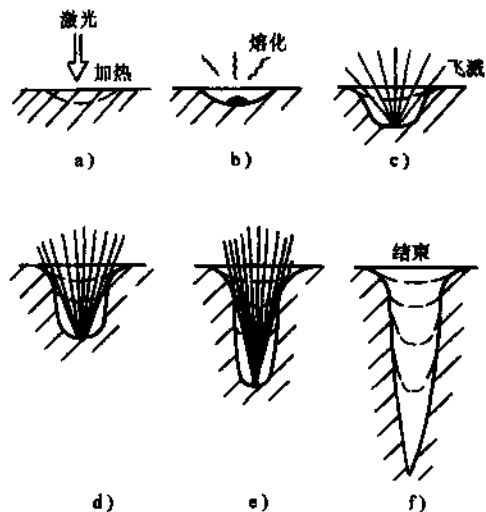


图 6-90 激光打孔时孔的形成过程

激光微调电阻可采用两种方法，一是对电阻进行无损伤照射，使膜的结构变化，从而改变阻值；另一是对电阻进行高能量照射，使部分电阻膜气化去除，从而减小导电膜的截面来增加阻值。目前后一种加工方法用得较多。激光微调精度一般为0.05%，可达0.02%或更小。由于是在非机械接触下工作，适合于加工硬脆材料。激光微调速度快、效率高、无污染，易于动态测量，实现自动化。

7.3.4 激光表面改性

利用激光对材料表面进行处理可改变其物理结构、化学成分和金相组织，从而改善材料表面的物理、力学、化学性质，如硬度、耐磨性、耐疲劳性、耐腐蚀性等，称之为激光表面改性技术。现在，激光表面改性方法有激光固态相变硬化(也叫激光淬火)、合金化、涂敷、熔凝等。激光合金化是在廉价材料的表面上添加新的合金元素，用高能激光辐照使基体表层与合金元素融合形成新的合金层，提高表面硬度和耐磨性，增加的合金元素可以有Cr、Ni、W、Ti、Mo等。激光熔凝又称“上光”，它是利用高能量密度的激光束照射金属表面，使表层发生快速熔化，并造成熔化表层和基体之间很大的温度梯度，激光照射离去后，熔化表层快速冷却而凝固，形成极细的晶体结构，可以减少金属表层的化学偏析、熔合其缺陷或裂纹，提高了硬度、强度和抗腐蚀性，对铸造零件表面改性和焊缝的改性效果十分显著。

7.3.5 激光存储

激光存储是利用激光进行视频、音频、文字资料、计算机信息等的存取。

激光电视唱片的制作可分为原版录制和复制两个过程，其制造工艺过程如图6-91所示。在原版录制时，是将镀有薄金属膜的玻璃圆盘旋转，经调制的激光束相应地沿着玻璃圆盘的半径方向缓慢地由内向外移动，激光束便相应地熔化金属层，使图象与声音记录下来。因此，其加工机理是用激光热效应，是激光去除加工。选用玻璃作基盘是因为玻璃质地均匀，经精密磨削、精密研磨、化学清洗可消除表面缺陷，然后进行真空蒸镀约 $0.1\mu\text{m}$ 厚的金属膜备用。信息是以在金属膜上打出小坑的形式记录下来，坑宽约 $0.4\mu\text{m}$ ，坑深约 $0.1\mu\text{m}$ 。信息轨迹是一条螺距为 $1.6\sim 1.8\mu\text{m}$ 的螺线。

光盘存储与磁盘存储相比，有存储密度高、数据存取速度快(达0.1s左右)、存储寿命长(非接触存取，存储介质表面上有保护层)。其记录方式有回放专用式(相当于只读存储器)、一

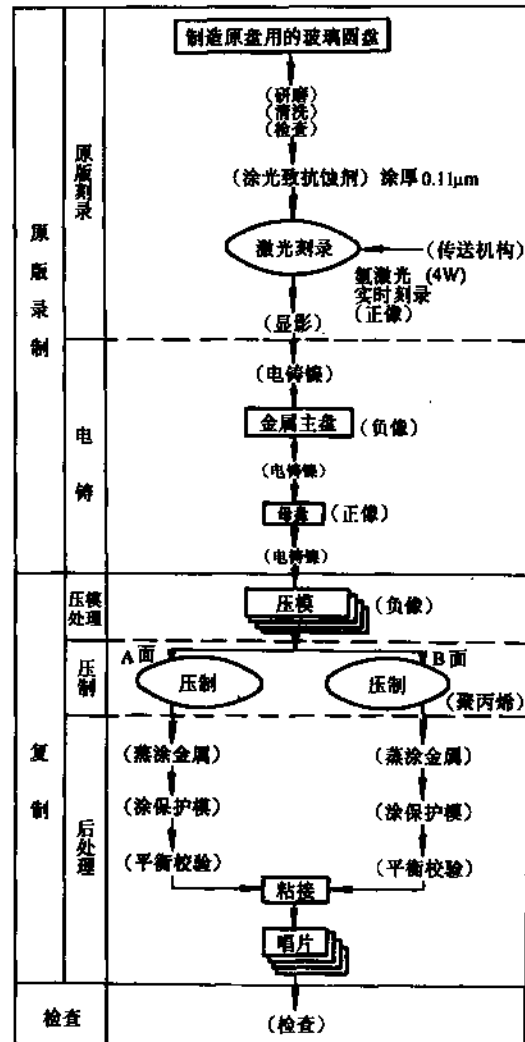


图 6-91 激光电视唱片的制造工艺过程

次写入式(相当于可编程序存储器)、可擦除式(相当于可抹、可编程存储器 and 随机存储器)。光盘的信息记录通常是采用双态信号的方式来进行,即在光盘上记录一系列“有”与“无”或“高”与“低”等两种互不相同的状态。光盘的记录方式有改变信息面几何结构和改变信息面物理性质两类,每一类光盘又根据双态信号的形式不同有不同的型式,如图 6-92 所示。

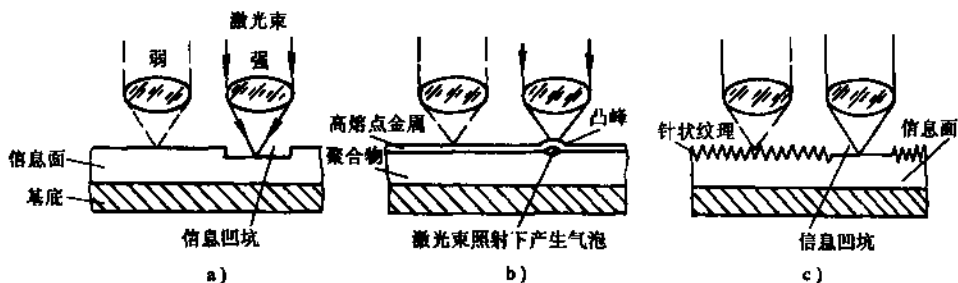


图 6-92 改变信息面几何结构的光盘记录型式

a) 凹坑型 b) 起泡型 c) 纹理型

7.4 激光加工设备

激光加工设备主要由激光器、电源、光学系统和机械系统等组成,图 6-93 是一台 YAG 激光加工机的结构简图。

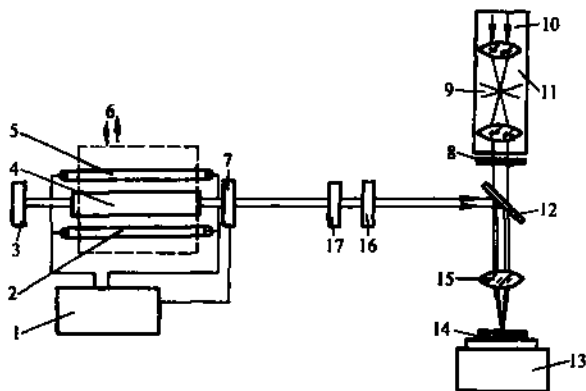


图 6-93 YAG 激光加工机的结构简图

1—电源及控制部分 2、5—氙灯 3—反射镜 4—YAG 棒 6—冷却水 7—快门 8—保护滤色镜 9—十字线 10—光源
11—显微镜 12—分光镜 13—工作台 14—工件
15—聚光镜 16—输出镜 17—光阑

7.4.1 激光器

又称激光发生器,其种类很多。激光器的作用是把电能转变为光能,产生所需要的激光束。根据产生激光的材料种类不同,激光可分为固体激光、气体激光、液体激光和半导体激光。作为激光加工机,目前主要用固体激光和气体激光,实用的激光器及其性能如表 6-35 所示。

表 6-35 激光器及其性能

种类	工作物质	基体	激活离子	激光波长/ μm	发散角/rad	输出方式	输出能量或功率	主要用途
固体	红宝石	Al_2O_3	Cr^{3+}	0.6943	$10^{-2} \sim 10^{-3}$	脉冲	几~几十焦	打孔、焊接
	钕玻璃	玻璃	Nd^{3+}	1.065		脉冲		打孔、焊接
	掺钕钇铝石榴石 (YAG)	$\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$	Nd^{3+}	1.065		脉冲	打孔、切割、微调、刻蚀、焊接	
气体	二氧化碳	$\text{CO}_2 - \text{He} - \text{N}_2$	CO_2	10.63		连续	$10^2 \sim 10^3 \text{W}$	切割、微调、焊接、表面改性
						脉冲	几焦	
						连续	几十~几千瓦	

固体激光器由工作物质、光泵、滤光管、滤光液、冷却水、聚光器和谐振腔等组成,如图 6-94a 所示。常用的工作物质有红宝石、钕玻璃、YAG 等。光泵的作用是使工作物质产生粒子数反转,目前对上述工作物质都是用氙灯作光泵,脉冲工作状态的氙灯有脉冲式和重复脉冲式两种,前者只能每隔几十秒工作一次,后者可以每秒工作几次至十几次,但需要水冷却。由于氙灯发出的光波中,有一些紫外线成分,对钕玻璃、YAG 等有害,使激光器的效率下降,故用玻璃套管和重铬酸钾溶液来吸收。聚光器的作用是把氙灯发出的光能聚集在工作物质上,对它的要求是效率高,能把氙灯发出的 80% 左右的光能集中在工作物质上,而且聚光均匀,散热好,内壁反射率高,结构紧凑,常用的有球形、圆柱形、椭圆柱形和紧包裹形等,如图 6-94b 所示,其中圆柱形因制造方便,用得较多。其内壁一般要抛光到表面粗糙度 $R_a 0.025 \mu\text{m}$,

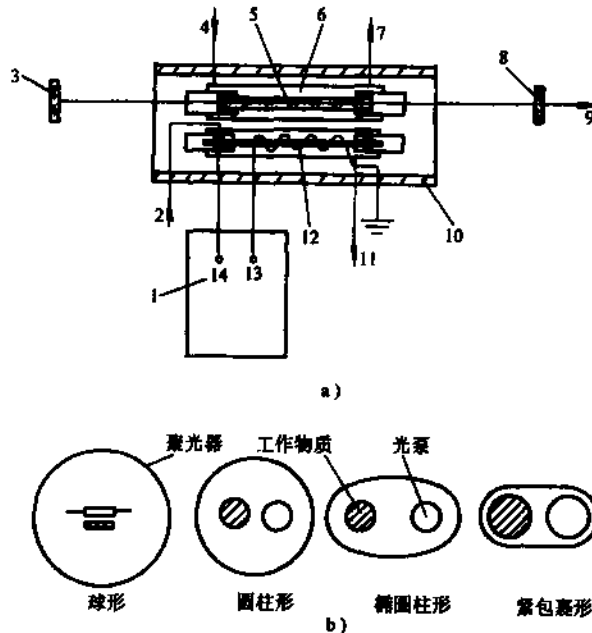


图 6-94 固体激光器结构示意图

a) 固体激光器总体结构 b) 聚光器结构

- 1—电源 2—冷却水 3—全反射镜 4—冷却水 5—工作物质 6—玻璃套管 7—冷却水 8—部分反射镜 9—激光束 10—聚光器
11—冷却水 12—氙灯 13—触发器 14—电容组

并蒸镀金膜或银膜。谐振腔又称光学共振腔，它使受激辐射光在输出轴方向上多次往复反射，互相激发，链锁反应，起放大和改善激光的作用。谐振腔的结构是在工作物质的两端各放一块相互平行的反射镜，其中一块做成全反射，另一块做成部分反射，激光就由此端输出。正确设计反射率和谐振腔长度，就可得到光学谐振，从而得到单色性和方向性很好的激光。

气体激光器的工作物质有氩-氟、二氧化碳等，它是将一定比例的氩-氟混合气体或二氧化碳-氟-氩等气体封入已抽真空的玻璃管中，管的两端各装一块反射镜，形成谐振腔，在端部封入电极，通入千伏以上高电压，产生气体放电。大功率激光器可以做成折叠式，图 6-95 是二氧化碳激光器的结构示意图。

7.4.2 电源

为各个系统提供能源，其中主要是根据加工工艺要求，为各类激光器提供所需要的能量。由于各类激光器的工作特点不同，电源的种类很多，如固体激光器电源有连续和脉冲两种。常用的固体激光器脉冲电源由调压、升压、整流、充放电、触发器及一些辅助电路所组成。总的说来，激光器电源应包括电压控制、时间控制、触发器、储能电容器等几部分。

7.4.3 光学系统

是影响激光加工质量的重要因素之一，其作用是把激光引入聚焦物镜并聚焦在加工工件上，它由激光聚焦系统、观察瞄准系统和显示系统组成。

7.4.4 机械系统

它是整个激光加工设备的总成，要求高精度、高刚度、易调整，其组成包括基座、坐标精密工作台和机电传动控制装置等。先进的激光加工设备已采用数控系统来实现自动化。

7.5 激光加工的特点及应用

激光加工的特点非常突出，归纳有：

(1) 加工精度高 激光束斑直径可达 $1\mu\text{m}$ 以下，可进行超微细加工，同时它又是非接触工作方式，力、热变形非常小，易保证高加工精度。

(2) 加工材料范围广 激光可加工各种金属和非金属材料。对陶瓷、玻璃、宝石、金刚石、硬质合金、石英等难加工材料用激光加工非常有效。对于一些透明材料，也可通过色化或打毛等措施后进行加工。

(3) 加工性能好 激光加工可以将工件离开加工机进行。不需要真空，也不需要 X 射线进行防护。可透过玻璃等透明材料进行加工，对某

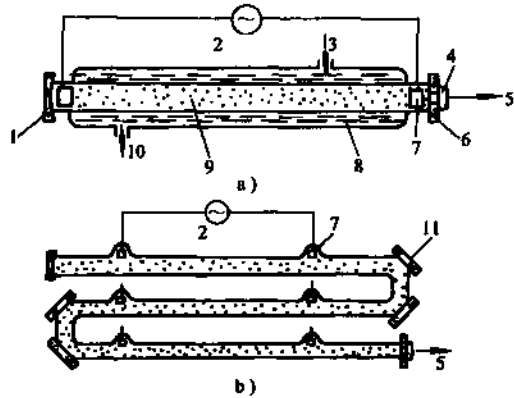


图 6-95 二氧化碳激光器的结构示意图

a) 普通式 b) 折叠式

- 1—反射镜 2—交流电源 3—进水口 4—红外材料
- 5—激光 6—反射镜 7—电极 8—冷却水
- 9—放电管 10—出水口 11—全反射镜

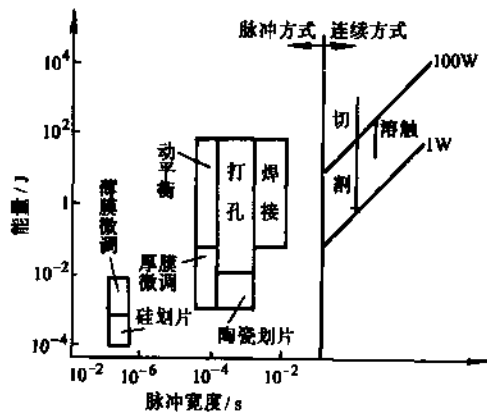


图 6-96 激光加工的各种应用

些特殊情况(如真空)下加工比较方便。不需要工具,可通过调整光束大小、能量、脉宽等参数进行打孔、切割、焊接等不同工作。

(4) 加工速度快、效率高

(5) 价格昂贵

激光加工的应用范围非常广泛,图 6-96 集中表现了其各种加工方法中的所需能量和脉冲宽度,它是一种非常有前途的精密特种加工和微细加工方法。

8 光刻加工

光刻加工又称光刻蚀加工或刻蚀加工,简称刻蚀。当前,光刻加工技术主要用于制作集成电路、微型机械等高精度微细线条所构成的高密度微细复杂图形,是纳米加工的一种重要加工手段。光刻加工的原理近似于照像制版,其关键技术是原版制作、曝光和刻蚀。

光刻加工可分为两个阶段,第一阶段为原版制作,生成微细复杂图形的工作原版或工作掩膜,为光刻加工时用;第二阶段为光刻。

8.1 工作原版制作

原版制作过程如图 6-97 所示,其主要工序如下。

(1) 原图绘制 根据设计图样,在绘图机上,用刻图刀在一种叫红膜的材料上刻成,一般要比最终要求的图象放大几倍到几百倍。红膜是在透明或半透明的聚脂薄膜表面上涂敷一层可剥离的红色醋酸乙烯树脂保护膜而制成。刻图刀将保护膜刻透后,剥去不需要的那一部保护膜,即可形成所需红色图象构成的原图。

(2) 缩版、殖版制作 将原图用缩放机缩成规定的尺寸,即成缩版。缩版视原图放大倍数有时要多次重复缩小才能得到。如果要大量生产同一形状制品,可用缩图在分步重复照相机上制成多个相同图形排列的殖版。

(3) 工作原版或工作掩膜制作 缩版、殖版可直接用于光刻加工,但一般都作为母版保存,而是从母版复印形成复制版,成为光刻加工时的原版,称工作原版或工作掩膜(版)。

原版的制作是光刻加工技术的关键,其尺寸精度、图象对比度、照片的浓淡、深浅等都将直接影响光刻加工的质量。

8.2 光刻

光刻过程如图 6-98 所示,其主要工序如下。

1. 涂胶

把光致抗蚀剂(俗称光刻胶)涂敷在半导体基片的氧化膜上的过程称为涂胶。光刻胶可分为正性胶和负性胶,在显影图中被光照部分的胶层被去除,形成“窗口”,为负性胶,反之为正性胶。涂胶要求薄厚均匀,常用的涂胶方法有旋转(离心)甩涂、浸渍、喷涂和印刷等,有专门

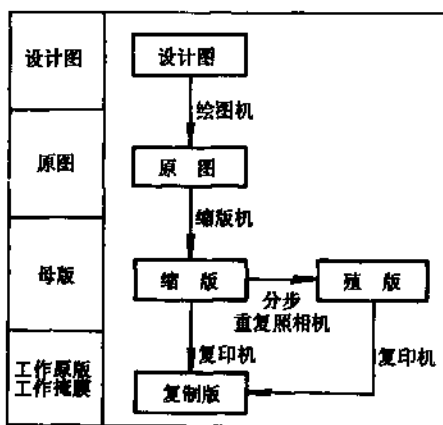


图 6-97 原版制作过程

设备。

2. 曝光

利用光源发出的光束，经工作掩膜在光致抗蚀剂涂层上成象，即为曝光。这种曝光称为投影曝光，又称为复印。常用的光源有电子束、X射线、远紫外线(准分子激光)、离子束等。从投影方式上可分为接触式、接近式、反射式等。上述的原版就是用于投影曝光的。

还有一种曝光是将光束聚焦形成细小束斑，通过数控扫描，在光致抗蚀剂涂层上绘制图形，称为扫描曝光，又称为写图。这种曝光不需预制工作原版，但要设计编制扫描轨迹程序。常用的光源有电子束、离子束。

上述两种曝光方式统称为曝光。

3. 显影与烘片

(1) 显影 曝光后的光致抗蚀剂，其分子结构产生化学变化，在特定溶剂或水中的溶解度也不同，利用曝光区和非曝光区的这一差异，可在特定溶剂中把曝光图形呈现出来，这就是显影。

(2) 烘片 有些光致抗蚀剂在显影干燥后，要进行 $200^{\circ}\text{C} \sim 250^{\circ}\text{C}$ 的高温处理，使它发生热聚合作用，以提高强度，称为烘片。

4. 刻蚀

利用化学或物理方法，将没有光致抗蚀剂部分的氧化膜去除，称之为刻蚀。刻蚀的方法很多，有化学刻蚀、离子刻蚀、电解刻蚀等。

刻蚀不仅是沿厚度方向，而且也可沿横向进行，称之为侧面刻蚀，如图 6-99 所示。若以 w 表示侧面刻蚀量，以 h 表示刻蚀深度，则刻蚀系数 $c_f = h/w$ 。侧面刻蚀越小，刻蚀系数越大，制品尺寸精度就越高，精度稳定性也越好。由于有侧面刻蚀现象，使刻蚀成的窗口比光致抗蚀剂窗口大，因此在设计时要进行修正。

双面刻蚀比单面刻蚀的侧面刻蚀量明显减小，时间也短，当光刻贯通窗口时多采用双面刻蚀(见图 6-99b)。

5. 剥膜与检查

(1) 剥膜 用剥膜液去除光致抗蚀剂的处理称为剥膜。

(2) 检查 剥膜后，将工件洗净、修整，进行外观、线条尺寸、间隔尺寸、断面形状、物理性能、电学性能等质量检查。

9 超声加工

超声加工也称为超声波加工。

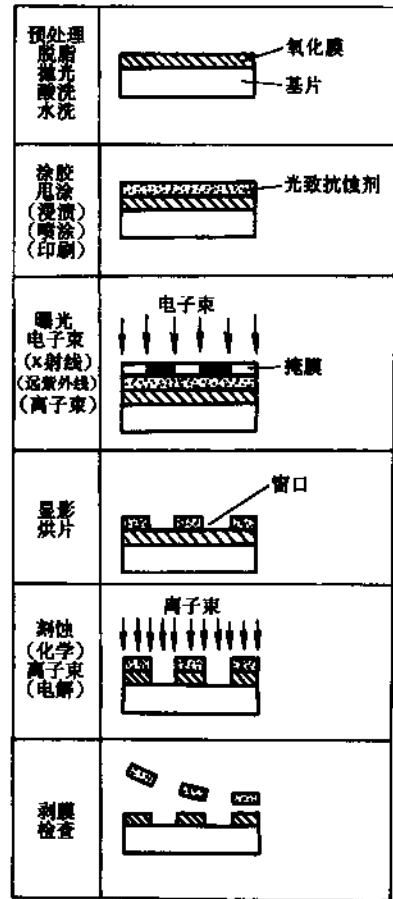


图 6-98 光刻过程

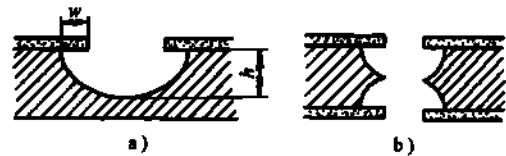


图 6-99 侧面刻蚀现象

a) 侧面刻蚀 b) 双面刻蚀

9.1 超声加工的基本原理和特点

9.1.1 超声加工的基本原理

超声加工是利用工具端面作超声振动,通过工具与工件之间的磨料悬浮液的作用而进行的一种加工,如图 6-100 所示。加工时,工具轻压在工件上,在工具和工件之间加入磨料和水或煤油等液体的悬浮液,当超声换能器产生频率为 16000Hz 以上的超声频轴向振动时,通过变幅杆将振幅放大到 0.05~0.1mm,驱动工具端面作轴向超声振动,产生以下作用。

(1) 机械撞击和抛磨作用 工具端面作轴向超声振动时,将撞击工作液中悬浮的磨粒以很大的速度和加速度不断地撞击、抛磨被加工表面,使其材料产生裂纹、破碎,被粉碎成很细的微粒而分离出来,由于是超声频振动,所以有相当的加工速度。

(2) 空化作用 当工具端面以很大的加速度离开工件表面时,加工间隙内形成负压和局部真空,在工作液内形成许多微空腔(空泡),而当工具端面的超声振动使它又以很大的加速度接近工件表面时,空泡被压闭合,造成极强的液压冲击波,强化了加工过程。

(3) 液压冲击波的胀裂作用 工作液受工具端面超声振动,产生了高频、交变的液压正负冲击波,促使工作液渗入被加工材料的微裂缝中,加剧了机械破坏作用。

由此可见,超声加工是磨料的机械撞击和抛磨、空化和液压冲击等综合作用,但以机械撞击和抛磨作用为主。

9.1.2 超声加工的特点

1) 适合于加工各种硬脆材料和不导电的非金属材料,如石英、陶瓷、玻璃、石墨、宝石、金刚石等;还可加工淬火钢、硬质合金等硬质金属材料。

2) 加工过程中受力小、热影响小,加工精度高,可达 0.01~0.02mm,被加工表面无残余应力,无破坏层,表面粗糙度值低,可达 $R_a 1 \sim 0.1 \mu\text{m}$ 。

3) 加工中力、热作用小,加工力很小,可加工薄壁、薄片、窄缝、易变形零件。

4) 可加工各种复杂形状型孔、型面、型腔,还可进行切割、套料和雕刻等。

5) 超声加工机床结构比较简单,操作、维修方便。

6) 生产率较低。

9.2 超声加工设备

超声加工设备主要由超声发生器(超声电源)、超声振动系统、机床本体、工作液循环系统所组成,构成超声加工机床。

9.2.1 超声发生器

超声发生器又称超声波发生器、超声频发生器。其作用是将 50Hz 的工频交流转变为有一

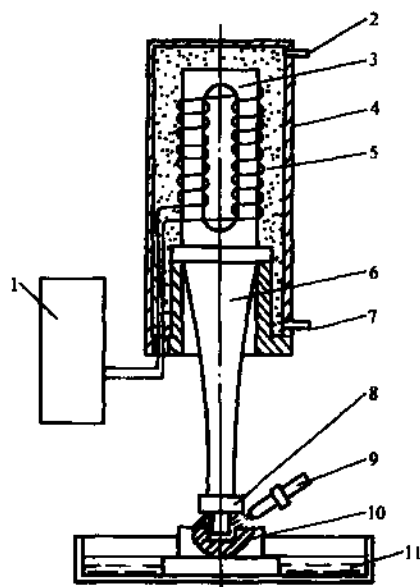


图 6-100 超声加工原理示意图

1—超声波发生器 2—冷却水入口 3—换能器
4—外罩 5—循环冷却水 6—变幅杆 7—冷却水出口
8—工具 9—工作液(磨料悬浮液) 10—工件 11—工作槽

定功率的超声频振荡，一般为16000~25000Hz，以供给工具端面超声振动和去除被加工材料的能量。一般输出功率为0.04~4kW。

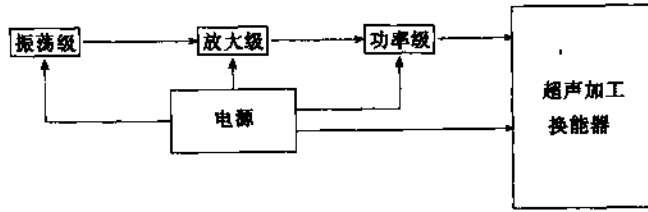


图 6-101 超声发生器组成框图

超声发生器一般由电源、振荡级、放大级和功率级组成，如图 6-101 所示。对超声发生器的要求有：

- 1) 输出功率和频率在一定范围内连续可调，以适应不同加工对象的要求。
- 2) 输出阻抗与配置的超声加工换能器输入阻抗相匹配。
- 3) 最好具有对共振频率自动跟踪和自动微调功能，以保证最佳加工效果。
- 4) 结构简单，工作稳定可靠，维修方便，体积小，价格便宜。

超声发生器电源所用高频发生器视功率不同，有晶体管式和电子管式，并逐渐被晶体管取代。振荡级由晶体三极管或电子管接成电感反馈振荡电路，调节电容量来改变振荡频率，以便调节输出的超声频率。振荡级的输出经耦合至电压放大级进行放大后，利用变压器倒相输入到末级功率放大管，经输出变压器输至换能器。

9.2.2 超声振动系统

超声振动系统的作用是将超声发生器输出的超声频电振荡转换并放大具有一定振幅的机械振动。超声振动系统由换能器和变幅杆组成，装在变幅杆端部的工具，作为变幅杆的负载，也作为超声振动系统的一部分。超声振动系统又称为声学系统或声学部件。

1. 超声换能器

超声换能器的作用是把超声频电振荡转换成机械振动。由于实现的原理不同，目前有磁致伸缩效应和压电效应两种方法。

(1) 磁致伸缩效应换能器 铁、镍、钴及其合金等材料，其长度能随所处的磁场强度变化而伸缩的现象称为磁致伸缩效应。几种材料的磁致伸缩曲线如图 6-102 所示，其中镍相对缩短较大，镍铁相对伸长较大。

常用的磁致伸缩效应换能器有窗式、环式两种。常用的磁致伸缩材料有两类：一类是金属及其合金，如镍、铁钴合金、铝铁合金等；另一类是铁氧体，如镍铜系、镍锌系铁氧体等。图 6-103 为由

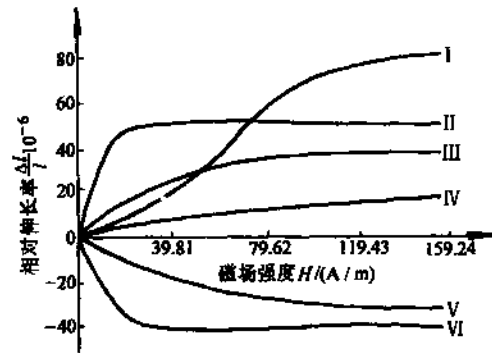


图 6-102 几种材料的磁致伸缩曲线

- I—75%镍+25%铁 II—49%钴+2%钒+49%镍
 III—6%镍+94%铁 IV—29%镍+71%铁 V—退火钴 VI—镍

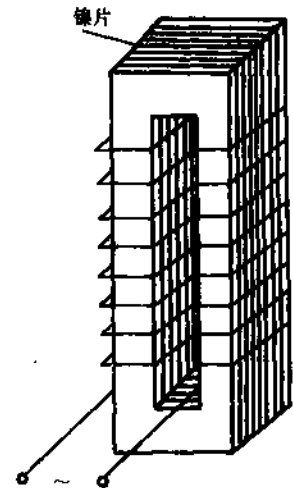


图 6-103 磁致伸缩换能器

纯镍片叠成的单窗式换能器，为了减少高频涡流损耗，用镍片叠成封闭磁路，在两芯柱上绕以同向线圈，通入高频电流。这种换能器有较大的输出功率，机械强度好，但涡流发热损失大，能量转换效率低，需要水冷或风冷，否则温度升高会使磁致伸缩变小甚至消失，也会烧坏线圈的绝缘材料。

若通入线圈中的电流是交流正弦波形，则每一周波的正半波和负半波将引起磁场的两次大小变化，使换能器伸缩两次，出现倍频现象。倍频现象使共振长度变短，振动节奏模糊，对超声加工有不利影响。因此，在换能器的交流励磁电路要加入一个恒定的直流磁场，即迭加一个直流分量，使它成为脉动直流励磁电流。

镍片换能器的长度应等超声波半波长或其整倍数，使它处于共振状态。

(2) 压电效应换能器 石英晶体、钛酸钡($BaTiO_3$)、锆钛酸铅($ZrPbTiO_3$)等物质在受到机械压缩或拉伸变形时，其两端面上会产生一定电荷，形成一定的电势，这一现象称为正压电效应，简称压电效应。反之，当这些物质的两端面上加上一定的电压时，则会产生一定的机械伸缩，称之为负压电效应。石英晶体(压电晶体)的压电伸缩量只有 $0.01\mu m$ (3000V 时)，钛酸钡(压电陶瓷)的压电效应比石英晶体大 20~30 倍，但机械强度和效率较低，锆钛酸铅(压电陶瓷)工作电压低，位移量大，45mm 长的器件外加 300V 电压时，可产生 $25\mu m$ 的位移，分辨力为 $0.08\mu m/V$ ，推力大于 100N，同时再现性好，无剩余变形和老化现象，因此应用广泛。压电材料一般制成圆形或长方形薄片，两面镀银，先加高压直流电进行极化，一面为正极，另一面为负极。若一片的伸缩量不够，可以多片叠加使用。

图 6-104 为一种压电陶瓷换能器，压电陶瓷由两片叠在一起，正极在中间，负极在两端，用螺钉夹紧在上、下端块之间，上端块与机床主轴相接，下端块与变幅杆相连，正极必须与机床主轴绝缘。为了导电接线方便，在压电陶瓷的正、负极各压一片导电镍片。

压电陶瓷片的自振频率与其厚度、上、下端块质量、夹紧力等成反比，应注意使压电陶瓷片处于共振状态，其厚度应为超声波半波长或其整倍数。

2. 变幅杆

由于超声换能器所能输出超声波的振幅很小，即使在共振条件下也只有 $0.005 \sim 0.01mm$ ，不能直接用来超声加工，因此要借助变幅杆将其振幅放大为 $0.01 \sim 0.1mm$ ，几种常用的变幅杆形状如图 6-105 所示。变幅杆除图示的几种单一型外，还可设计为复合型。

变幅杆的设计主要有以下两个问题：

(1) 变幅杆的振幅放大 变幅杆是通过其每一截面的振动能量不变这一理论来放大振幅的。设略去声波传播损耗，则声波在变幅杆中传播时，其振动能量不变。振动能量用能量密度来衡量，即通过垂直于波的传播方向上单位面积的能量，

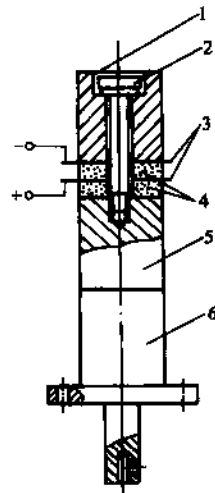


图 6-104 压电陶瓷换能器
1—上端块 2—压紧螺钉 3—导电镍片 4—压电陶瓷片 5—下端块 6—变幅杆

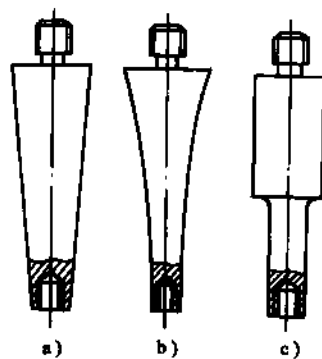


图 6-105 几种变幅杆
a) 锥形 b) 指数形 c) 阶梯形

$$J = \frac{1}{2} \rho c (\omega A)^2$$

式中 J ——能量密度(W/cm^2);
 ρ ——弹性介质的密度(kg/m^3);
 c ——弹性介质中的波速(m/s);
 A ——振动的振幅(mm);
 ω ——圆频率, $\omega = 2\pi f$ (rad/s);
 f ——频率(Hz)。

$$A = \sqrt{2J/\rho c \omega^2} = \sqrt{2J/K}$$

式中的 $K = \rho c \omega^2$, 当变幅杆的材料已定时, K 为常数, 可见其截面越小, 能量密度就越大, 振动的振幅也越大, 从而通过变幅杆放大了振幅。

(2) 变幅杆的共振 当变幅杆的固有振动频率和外激振动频率相等或为倍数时, 则处于共振状态, 可获较大的振幅和声强。

如图 6-106 所示, 当超声波从杆的一端向另一端传播时, 在杆的端部将发生波的反射, 因此在有限的弹性体中, 同时存在着两个频率相同、振幅相同而方向相反的波, 即入射波和反射波。两波从相反的相位会合时产生干涉, 两波从相同的相位会合时产生共振。

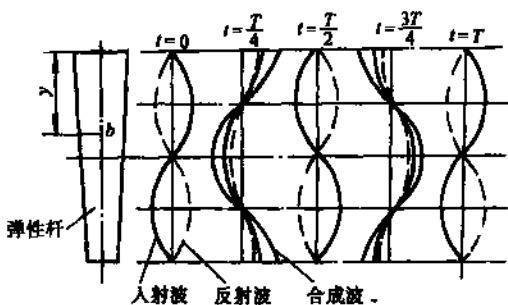


图 6-106 弹性杆中各质点的振动情况

取弹性杆上任一点 b , b 点距入射端的距离为 y , 则入射波和反射波在 b 点的位移分别为 $a_{\text{入}}$ 、 $a_{\text{反}}$, 由下面两式计算:

$$a_{\text{入}} = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{y}{\lambda} \right)$$

$$a_{\text{反}} = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} + \frac{y}{\lambda} \right)$$

两波在 b 点的合成位移为

$$a_b = a_{\text{入}} + a_{\text{反}} = 2A \cos \frac{2\pi y}{\lambda} \sin \frac{2\pi t}{T}$$

式中 λ ——振动波长;
 T ——振动周期;
 A ——振动振幅;
 t ——振动的某一时刻。

可见, 当 $y = i \frac{\lambda}{2}$ 时, a_b 最大, b 点为波腹; $y = (2i+1) \frac{\lambda}{4}$ 时, a_b 为零, b 点为波节, $i = 0, 1, 2, 3, \dots$ 正整数。因此, 弹性杆在振动时, 不是整个杆在进行振动, 而是杆上某些地方振动大, 某些地方不振动。如果将弹性杆的长度设计成声波半波长或半波长的整数倍, 则其端部将处于大振幅共振状态, 同时将弹性杆的支持点选择在波节处, 因为这点不振动。

设变幅杆的长度为 L , 则

$$L = i \frac{\lambda}{2} = i \frac{1}{2} \frac{c}{f}$$

超声波在钢中的传播速度 $c = 5050\text{m/s}$, 超声波频率为 $16000 \sim 25000\text{Hz}$, 则可算出超声波在钢中传播的波长 $\lambda = 0.2 \sim 0.31\text{m}$, 由此可设计出变幅杆的长度, 通常为 $100 \sim 160\text{mm}$ 。

在几种变幅杆中, 锥形变幅杆机械强度大, 放大倍数为 $5 \sim 10$ 倍, 设计简单, 制造容易; 但半波共振长度最大。指数形变幅杆能传递较大功率, 共振频率范围较宽, 放大倍数为 $10 \sim 20$ 倍, 受负载后, 放大倍数变化小; 但制造困难些, 截面不能变化太大, 否则振动传播受阻。阶梯形变幅杆半波共振长度最短, 振幅放大倍数可达 20 倍, 设计简单, 制造容易; 但共振频率范围小, 有负载时放大倍数很快减小, 截面突变处应力较大。

3. 工具

工具的形状和尺寸决定于被加工表面的要求, 要考虑加工间隙, 间隙至少要稍大于磨粒的直径。

整个超声系统要注意换能器、变幅杆、工具之间连接的紧密性, 绝不允许存在间隙, 否则会使超声波严重衰减, 有时采用焊接方法相连, 或表面涂凡士林油后再机械固紧。另外, 应选择波节点处安装在机床上, 不会使整个机床受超声振动影响。

9.2.3 超声加工机床

超声加工机床比较简单, 由立柱、工作台、主轴头等构成。主轴头装在立柱上, 可调整上下工作位置; 主轴头内的主轴在滚动导轨支承下能灵活、精密地上下运动, 其上接有平衡重锤调节对工件的压力。超声振动系统装在主轴上, 工件装在工作台上。加工时, 将工具、变幅杆、换能器、主轴等轻压在工件表面上, 靠平衡重锤调节其压力大小, 接上超声发生器, 通上工作液, 即可进行超声加工。

9.2.4 工作液及其循环系统

简单的超声加工, 其工作液是靠人工输送的, 即定时抬起工具, 补充和更新磨料悬浮液。加工时间长的超声加工, 最好用液压泵将磨料悬浮液通过喷嘴喷至加工间隙处。加工深孔时, 应定时抬起工具, 以利用于工作液的更新和补充。

工作液中, 常用的磨料有氧化铝、碳化硅、碳化硼等, 粒度大小视要求的加工表面粗糙度和加工效率等而定, 常用的液体是水, 有时也用煤油或 L-AN 牌号的油。

9.3 超声加工工艺

9.3.1 加工速度及其影响因素

加工速度是指单位时间内所去除的工件材料量, 以 g/min 、 mm^3/min 或 mm^3/min 表示。其影响因素有工具振动频率、振幅; 工具与工件之间的静压力, 工具与工件材料; 加工尺寸、深度; 磨料种类和粒度; 工作液的磨料含量等。加工速度最大可达 $2000 \sim 4000\text{mm}^3/\text{min}$ 。

(1) 工具的振幅和频率 一般振幅在 $0.01 \sim 0.1\text{mm}$, 频率在 $16000 \sim 25000\text{Hz}$, 应将频率调至共振频率, 以便获得最大振幅。振幅过大、频率过高会使工具和变幅杆承受内应力增大, 超过疲劳强度, 降低使用寿命, 增大工具消耗。

(2) 进给压力 超声加工时, 工具与工件之间应有一合适的静压力, 如用圆形实心工具在玻璃上加工面积为 $5 \sim 13\text{mm}^2$ 的孔时, 最佳进给静压力为 4000kPa , 而加工面积为 20mm^2 以上时, 则最佳进给静压力为 $2000 \sim 3000\text{kPa}$ 。静压力主要影响加工间隙, 静压力过大使加工间隙减小, 不利于工作液的更新和补充; 静压力过小使加工间隙增大, 减弱了磨料对工件的打击力度, 两者都会降低生产率。

(3) 磨料的种类和粒度 磨料的硬度高, 加工速度快。磨料的粒度小(磨粒大), 加工速度

快。一般加工金刚石、宝石时,可用金刚石磨料;加工硬质合金、淬火锅时,可用碳化硼、碳化硅磨料;加工玻璃、石英、半导体等材料可用刚玉类磨料,原则上是被加工材越硬脆,磨料硬度应越高。

(4) 被加工材料 被加工材料越脆,受冲击载荷能力越低,越易被超声去除加工。若以玻璃的加工生产率为100%时,则锗、硅半导体单晶为200%~250%、石英为50%、硬质合金为2%~3%、淬火锅为1%、普通钢<1%。

(5) 工作液磨料含量 工作液中的磨料太少,会造成加工区磨料少,甚至局部无磨料情况,使加工速度下降。工作液磨料含量增加会使加工速度增加,但含量太高,会使加工间隙的工作液循环受阻,影响磨料的打击作用,导致加工速度下降。通常所用磨料与水的比例为0.5~1。

提高加工速度的方法有:

1) 用真空抽吸法方式提供工作液,可使加工间隙中保持充足的锐利磨料参与加工,提高加工率度3~5倍。

2) 采用超声旋转加工,加工时工具的频率为20000~45000Hz、振幅为0.005~0.01mm、工具转速150~1500r/min,用聚晶金刚石工具,其加工速度可提高7~9倍,而工具损耗可减少1/3~1/4,效果显著。

9.3.2 加工精度及其影响因素

超声加工精度的主要影响因素有加工尺寸及形状、加工深度、被加工材料、磨料粒度、工具的精度及其损耗、工具的横向振动大小,以及机床、夹具的精度等,一般加工精度可达 $\pm 0.02 \sim \pm 0.05\text{mm}$ 。

加工精度与磨料粒度关系较大,磨料颗粒越小,加工精度越高。以加工孔为例,一般加工出的孔,其尺寸比工具扩大约为磨粒直径的两倍。

工具的损耗会直接影响加工精度,工具的损耗与被加工材料、加工速度等有关,表6-36表示了用铁钴钨合金工具材料切割玻璃、硅等材料时的加工速度和工具损耗。由表可知,在工具长度上的相对损耗是很大的。工具在侧面上的损耗远比其长度上要小,但对加工精度的影响是不容忽视的。

表 6-36 不同材料的加工速度及工具损耗

加工材料	光学玻璃	钠玻璃	硅	玛瑙	刚玉	硬质合金 YG8	碳化硼
切削速度/(mm/min)	19	15	8.2	4.8	1.15	0.75	0.83
工具长度相对损耗 (%)	4.6	4.2	9	12.1	50.5	73	202

注:工具材料:铁钴钨合金,工具厚度:0.2mm。

工具制造或安装偏心,工具形状不对称时,加工时易产生横向振动(侧振),降低加工精度。

利用真空抽吸法、内冲法提供工作液,能提高加工精度,特别是减小锥度。

采用超声旋转加工圆孔时,可以有效地提高圆度和锥度。

9.3.3 表面质量及其影响因素

影响超声加工表面粗糙度的因素主要有磨料粒度、被加工材料、工具的振幅,工作液的成

分和性能等，一般表面粗糙度为 $R_a 1.6\mu\text{m}$ ，最高可达 $R_a 0.4 \sim 0.1\mu\text{m}$ 。

磨粒尺寸小，工件材料硬度高、超声振动振幅小，可得到较低的表面粗糙度值；用煤油或 L-AN 牌号的油与磨料混合的工作液可改善表面粗糙度，其影响比较复杂。

超声加工可得到比较好的表面层力学性质，表面不会产生烧伤等变质层，可提高表面硬度和疲劳强度。

9.4 超声加工的应用

超声加工的应用范围很广，可归纳为以下几个方面。

9.4.1 超声成形加工

超声加工可用来加工各种导体、半导体、非导体材料，金属和非金属材料，如玻璃、石英、宝石、锗、硅、淬火钢、硬质合金、陶瓷等。可进行各种冲模、拉丝模、塑料模的型孔、型腔加工和超声抛光光整加工，半导体材料切割加工，以及超声旋转加工圆孔等。

(1) 型孔、型腔加工 主要加工圆孔、异形孔、型腔、套料、弯孔、微细孔等。

(2) 切割加工 主要用来切割单晶硅片等，如图 6-107 所示。工具用薄钢片或磷青铜片多片铆合构成，再焊接在变幅杆上，如图 6-108 所示，导向片起切割时的定位作用，一次可切割 10~20 片。切割时可先在一个方向切割后，将工具转 90° 进行二次切割，即可得到半导体方块。

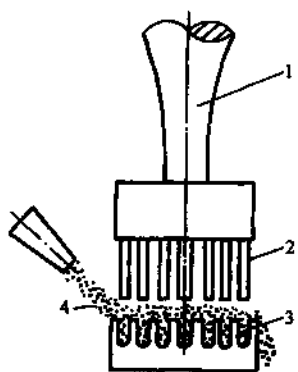


图 6-107 超声多片切割单晶体

1—变幅杆 2—工具(薄钢片)
3—工件(单晶硅) 4—工作液

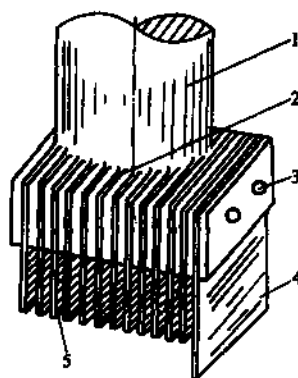


图 6-108 超声切割工具

1—变幅杆 2—焊缝 3—铆钉
4—导向片 5—薄钢片

9.4.2 超声旋转加工

超声旋转加工是在加工时，工具作高速旋转运动，工具多用聚晶金刚石或电镀金刚石，由于有了工具旋转，增加了磨料的旋转刻划作用，增加了表面裂纹而易于加工，提高了加工速度和加工精度，加大了加工深度，便于加工深小孔或细长棒的套料加工。

超声旋转加工可进行钻削、铣削和磨削加工，扩大了加工范围。

9.4.3 超声复合加工

超声加工可与多种加工复合，进行超声复合加工。

(1) 超声振动切削加工 如图 6-109 所示，将超声振动和车削结合起来，可以降低切削力，降低表面粗糙度值，提高加工效率和刀具耐用度，多用于对耐热钢、不锈钢等难加工材料

进行车削、钻孔、攻螺纹等。

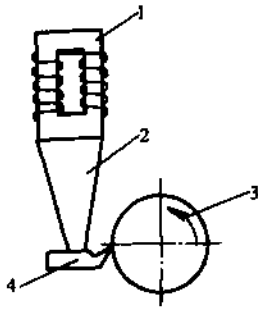


图 6-109 超声振动切削加工

1—换能器 2—变幅杆
3—工件 4—刀具

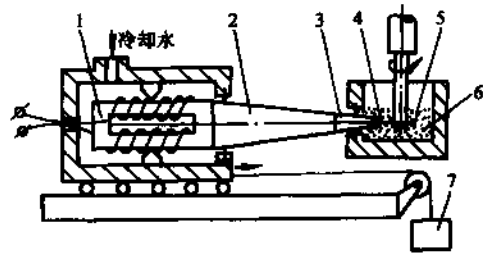


图 6-110 超声切割复合加工金刚石

1—换能器 2—变幅杆 3—夹具 4—工件
(金刚石) 5—切割圆片(工
具) 6—工作液 7—重锤

超声振动切削加工中尚有超声振动磨削加工、超声振动珩磨加工、超声振动油石研磨加工、超声振动抛光加工等。

图 6-110 表示了一种超声切割复合加工金刚石，金刚石工件装在夹具的端部并作超声振动，切割圆片(工具)装在一垂直轴上作旋转运动，并和工件一起浸入金刚砂磨料悬浮液中，由重锤产生给进压力。

(2)超声电解复合加工 将超声加工与电加工结合起来，形成复合加工，如图 6-111 所示，为超声电解复合加工小孔，其特点是工作液为混有磨料的电解液，加工时，接上直流电源，就会有超声加工和电解加工两种作用。

类似的加工方法尚有超声电解抛光复合加工，利用导电油石，具有超声振动、电解、抛光三重作用，油石自砺性好，钝化膜去除快，金属表面活性强，降低了表面粗糙度值，有很好的平整效果。

9.4.4 超声清洗

超声清洗的原理主要是超声振动在液体中产生的交变冲击波和空化作用。当超声波在液体中传播时，液体分子的往复高频振动会产生正负交变的冲击波。当声强达到一定值时，液体中急剧增长因空化产生的微小气泡，并瞬时强烈闭合，产生的微冲击波使被清洗物表面的污物从被清洗表面脱落，由于空化微小气泡数量极多，能钻到各个角落，因此能将窄缝、细小深孔、弯孔等处污物清洗干净，有很好的清洗效果和很高的清洗效率。

图 6-112 是一种超声清洗装置，它采用压电陶瓷换能器。

常用的清洗液有水、汽油、煤油、酒精、丙酮等，视被清洗物而定。

超声清洗常用来清洗喷丝板、手表整体机芯、喷油嘴、微型齿轮、微型轴承、印刷线路板、集成电路芯片、微电子器件等。

9.4.5 超声焊接

超声焊接的原理是利用超声振动去除工件表面的氧化膜，露出本体，在表面分子高速振动

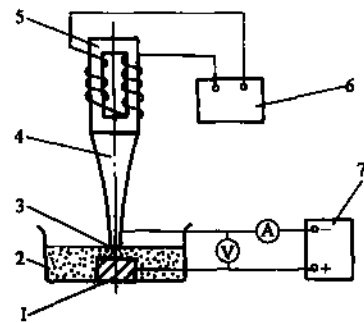


图 6-111 超声电解复合加工小孔

1—工件 2—混有磨料的电解液 3—工具
4—变幅杆 5—换能器 6—超声发
生器 7—直流电源

撞击下，摩擦发热，使两个被焊工件表面产生亲和作用而粘接在一起。

超声焊接可焊接某些金属，特别是表面易生成氧化膜的铝材，包括相同金属和不相同的成对金属，如铝—铜、铁—铜、铁—铝等；还可焊接尼龙、塑料等；并可在非金属表面上挂接一些金属，涂敷熔化金属薄层，如在陶瓷表面上挂锡、银等。

超声焊接有以下优点：

- 1) 焊接时无需加热，对焊接件本身的理化性质影响很小。
- 2) 焊接时无电弧、火焰产生，无需焊剂，故不会产生飞溅、污染、渗透等现象，使焊接件表面整洁美观，保持其纯洁度。
- 3) 焊接时不通过电流，不会发生熔化而烧毁焊件。
- 4) 焊接速度快，生产率高。

超声焊接按超声振动方式可分为切向振动和纵向振动两种，前者用于金属材料，后者用于塑料和化纤制品。超声焊接机的输出功率一般从一瓦至几千瓦。

图 6-113 所示为用于半导体器件生产中焊接晶体管、集成电路引线的小功率超声压焊机，功率为 3W。在变幅杆端部装有辟刀(工具)，施加一定压力将铝丝压在焊件上，当变幅杆作超声振动时，就可在铝丝和焊件间产生摩擦等一系列作用，使铝丝牢固地焊在焊件上。

9.4.6 超声的其他应用

(1) 超声探伤 利用超声振动可探测零件内部的裂纹等缺陷。

(2) 超声测距 利用超声波的定向发射、反射等特性，可进行测量距离、深度和厚度。

(3) 超声体检 利用超声波进行人体脏器检查。

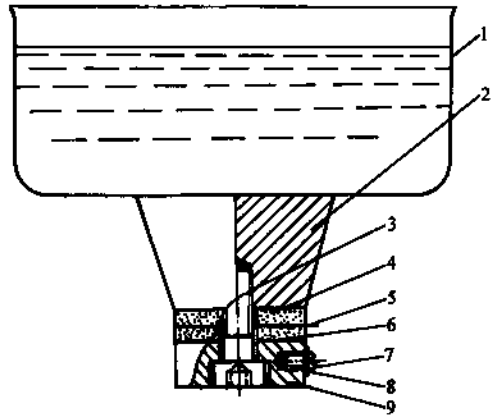


图 6-112 超声清洗装置

- 1—清洗槽 2—硬铝合金变幅杆 3—压紧螺钉
4—压电陶瓷换能器 5—镍片(+) 6—镍片(-)
7—接线螺钉 8—垫圈 9—铜垫块

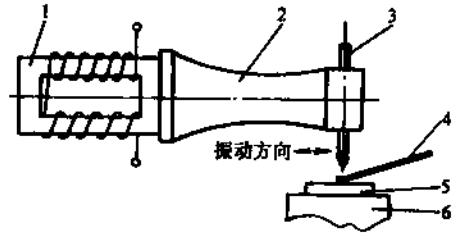


图 6-113 超声压焊机原理图

- 1—换能器 2—变幅杆 3—辟刀(工具)
4—铝丝 5—焊件 6—工作台

第3篇 微细加工与微型机械

第7章 微细加工技术

在机械工程领域,提高加工精度,研制精密机械,一直是一个主要的研究方向,但是机械自身的微小化未曾得到重视。这与科学技术的发展水平有关,一方面尚未有对微小型化的迫切需求,另一方面利用传统的机械加工在技术上也很难实现。在工业技术方面,手表中的零部件是人类利用传统的机械加工方法实现的最小型机械,其尺度在毫米量级。人类制作、使用的尺寸在1mm以下的工具、机械还几乎不曾存在。

机械只有当其部件具有互换性、可能大批量和多种类地生产时我们才称之为机械。而利用传统的机械加工、顺序组装工艺,即使得到尺寸1mm以下的部件,这些部件的加工精度也可能达到1 μ m,但是装配后的机械尺寸都不在1mm以下。微型机械的实现有赖于新的加工和组装概念。

在微电子技术领域,从AT&T贝尔研究所最初开发的晶体管开始,经过约50年日渐成熟的以硅为主要材料的半导体微细加工技术,成功地提高了电路的集成度,使计算机、信息领域取得了惊人的进展。80年代后期,正是由于半导体微细加工技术的日臻成熟,使微米级尺寸的可动机械构件的制作成为可能。VLSI等的批量制作(Batch Fabrication)工艺及其中的预组装(Preassembly)方式,以及生物中分子级的自组装(self-assembly)等为微型机械的实现提示出可行的途径。

可以说,正是制造技术的进步及相关基础技术的成熟,导致了微型机电系统/微型机械技术领域的崛起。而同时微型机电系统/微型机械技术领域的发展,又促进了硅微细加工、LIGA工艺、微细电火花加工以及光成形等微细加工技术的进一步研究开发。

微型机械研究的兴起源于微电子技术领域。由于这种历史原因,迄今硅微细加工技术在微型机械制造中占据主要位置。硅微细加工的优点在于适合传感器的制作及与电路集成,而其缺点为成形结构形状有限、不利于致动器的制作。LIGA工艺在对各种材料和深度加工方面比硅微细加工有明显的优势,但其明显缺点是X射线曝光及X射线掩膜版等的加工费用昂贵。位于现行机械加工延伸线上的微细加工技术也在迅速向着微米级发展,作为适合微小机械部件的加工技术,微细电火花加工、激光加工以及离子束加工等亦显现出各自的特点。结合硅微细加工技术批量制作及与电路集成的思想,进一步的研究开发有可能产生微型机械制造技术的新概念和新途径。

硅基半导体加工技术、LIGA工艺、微细电火花加工以及微型立体激光成形是当今具有代表性的微型机械制造技术。同时人们亦在积极尝试其他特种微细机械加工及集束加工技术等应用于微型机械制造。

1 半导体微细加工技术

半导体加工技术的核心是光刻(photo lithography),基本工艺方法是沉积与刻蚀的巧妙结合。基于这种加工方法的微型机械的复杂程度的概念有别于传统的机械,即既不依赖所含部件的

数量,也不取决于每个部件设计的复杂程度,而是与制作过程中所需的加工工序相关。

光刻的基本过程如图 7-1 所示,其基本工序包括曝光、显影和刻蚀。在光刻加工之前预先设计制作出掩模板,光刻掩模板决定后续加工的图形。加工时,首先在基板上沉积成膜材料,甩涂感光胶(photo register)并进行曝光。然后显影,曝光部分溶解而光线未照射到的部分保留的感光胶称为正胶,曝光部分图形保留而光线未照射到的部分显影溶解的感光胶称为负胶。利用显影的感光胶图形作为刻蚀掩膜(etching mask),就可以使其下面的材料受刻蚀掩膜保护的部分保留下来,有选择地溶解、除去基板上沉积的成膜材料甚至基板材料。再去除刻蚀掩膜层即可得到所期望加工的结构。

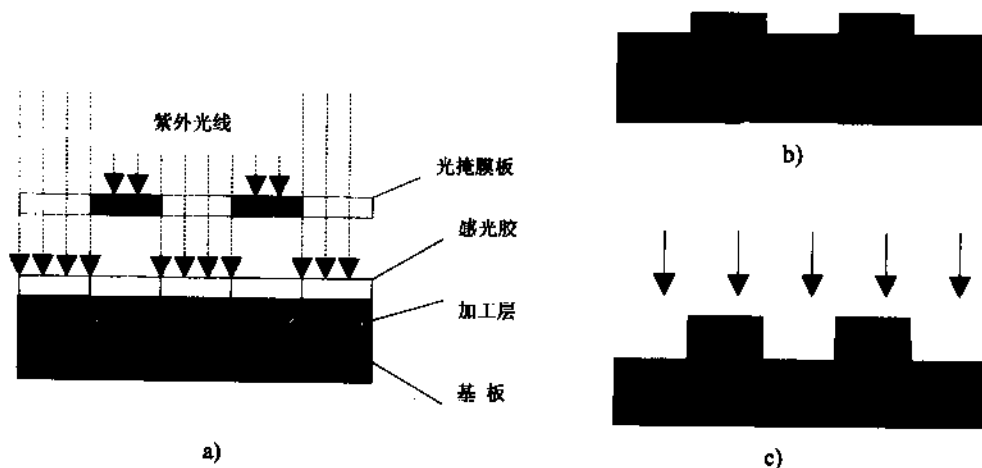


图 7-1 光刻基本过程

用于微型机械制作的半导体加工技术包括氧化、掺杂、化学和物理气相沉积、金属真空镀膜等添加加工,和干法刻蚀(等离子体刻蚀、反应离子刻蚀)、湿法刻蚀(等向性刻蚀、异向性刻蚀、掺杂自停止刻蚀、牺牲层刻蚀)等去除加工方法。又分类为以硅基板整体厚度为加工对象的体硅微加工法(bulk micro machining)和在基板表面上进行的表面微加工法(surface micromachining)。

1.1 氧化、掺杂与沉积

将 Si 基板置于氧气或水蒸气中高温加热(1050~1100℃),其表面就会形成一层厚度均匀的氧化膜(SiO_2)。水蒸气中的湿氧化比在干氧中的氧化速度快。通常氧化厚度不超过 $1\mu\text{m}$ 。除热氧化外,在等离子体或电解液中亦可进行阳极氧化。阳极氧化在室温下就可实现,氧化膜厚度由所加电压决定。阳极氧化不仅限于 Si,还可在 Al、Ta、Ti 等材料上形成品质优良的氧化膜。

掺杂常用扩散和离子注入等方法实现。在微型机械制造中,掺杂自停止刻蚀是一种留下扩散掺杂层的掺杂浓度选择刻蚀工艺。离子注入可控制薄膜的杨氏模量和内应力。

化学气相沉积(CVD:chemical vapor deposition)是将低温气化的物质在气化室内加热,使其在基板上反应或分解,沉积生成物于基板上的技术。沉积材料包括单晶硅、多晶硅、 SiO_2 、 Si_3N_4 以及 PSG、金属等。依据实现方法,CVD 分为常压 CVD、减压 CVD 以及等离子体 CVD 等。硅外延也是一种化学气相沉积过程。

物理气相沉积(PVD:physical vapor deposition)包括真空蒸发沉积法以及溅射法等,是不伴随化学反应的物理气相沉积技术。真空蒸发沉积是在高真空中将材料加热使其蒸发,沉积金属膜

的场合较多,使用电子束加热,能够使高熔点材料蒸发。溅射是在低真空的电极间产生 Ar 等的等离子体,利用离子的能量将阴极的材料喷射到阳极的基板表面沉积成膜的技术,能够沉积金属、化合物、合金等许多材料。

1.2 刻蚀(etching)

刻蚀工艺是微型机械的关键成形技术。其中的湿法刻蚀主要有等向性刻蚀、结晶异向性刻蚀和掺杂浓度选择刻蚀;干法刻蚀包括等离子体刻蚀和离子刻蚀;积极利用侧面蚀除,在等向性刻蚀的基础上发展出来的牺牲层刻蚀是制作复杂的立体形状的有效方法。

(1) 湿法刻蚀(wet etching) 在以几乎相同的速度蚀除基板的露出面的等向性刻蚀(isotropic etching)中,腐蚀液和掩膜的选择至关重要,以 SiO_2 作掩膜,使用 HF-HNO_3 系的腐蚀溶液可进行 Si 的等向性刻蚀加工。这种刻蚀方法在向下蚀除掩膜下方材料的同时,亦发生侧面的无益蚀除。但积极利用这种侧面刻蚀的牺牲层刻蚀(sacrificial layer etching)确是制作复杂的立体形状的有效方法。利用这种技术侧面蚀除、牺牲掉下层材料,留取其上沉积的不同材料层,通过巧妙的组合能够制作出立体的可动结构。

(2) 结晶异向性刻蚀(anisotropic etching) 它是利用被加工材料依据结晶面蚀除速度各异的性质的刻蚀方法。设计一定的掩膜形状,使侧面蚀除量很小,从而能够加工出 V 形或矩形槽等。在硅的结晶构造中,表面原子非结合键数在(100)面为 2,而在(111)面为 1。这意味着(111)面比(100)面不易蚀除,蚀除速度相差可达 200 倍。利用这种差别,可能保持(111)面几乎不溶解。硅的腐蚀液常用 KOH 水溶液,EPW(ethylene diamine, pyrocatechol, and water), 联胺以及 HNA(HF, HNO_3 , and acetic acid CH_3OH)等。使用 KOH 腐蚀液时,掩膜的 SiO_2 也有一定程度的溶解,因此蚀刻 $200\mu\text{m}$ 以上的 Si 时,须使用 Si_3N_4 作掩膜。

(3) 掺杂浓度选择刻蚀 利用刻蚀速度依赖掺杂浓度的性质,能够有选择地蚀除特定的被加工层,应用于形成薄膜等。硅加工时,这种刻蚀的方法有多种。例如增加 $\text{HF-HNO}_3\text{-CH}_3\text{COOH}$ 系中 CH_3COOH 的成分,选择蚀除掺杂物在 10^{19} 个原子/ cm^3 以上的高浓度重掺杂层;在约 5%(体积分数)HF 溶液中电解刻蚀 Si 时,保留 P 型层的方法;利用高浓度(10^{20} 个原子/ cm^3 以上)掺杂的 P⁺ 层不溶于结晶异向性腐蚀液的方法;以及利用 PN 结的电化学刻蚀自停止法等。

(4) 干法刻蚀(dry etching) 是在气体中利用反应性气体、等离子体等进行刻蚀加工的方法。常用等离子体刻蚀和离子刻蚀

1) 等离子体刻蚀(plasma etching) 是利用反应性气体的等离子体中具有高能量的反应性离子游离基进行刻蚀的方法。与后述的离子刻蚀相比,虽然是等向性刻蚀,但使用同样厚的掩膜可实现较深的刻蚀加工。用微波产生高密度的等离子体,刻蚀速度可达 $15\mu\text{m}/\text{min}$ 。

2) 离子刻蚀 是一种不依赖被加工材料结晶面的有向性刻蚀。除利用 Ar 离子等不活泼离子的动能产生的物理作用进行刻蚀之外,还有利用反应性离子的化学和物理作用,提高刻蚀速度,进行选择性的刻蚀。后者称为反应性离子刻蚀(RIE:reactive ion etching),虽不及湿法刻蚀、等离子体刻蚀的方向选择性好,一般也能进行数十微米深的刻蚀。以厚 $1\mu\text{m}$ 的 Al 作为掩膜,能够加工 Si 至 $40\mu\text{m}$ 深。

1.3 加工实例

表面微加工法是集上述加工技术之大成的典型工艺。图 7-2 所示为一直径约 $10\mu\text{m}$ 、厚 $1\mu\text{m}$

的多晶硅铰链结构及其制作工艺。图 7-2a 中的最上部可在平面内自由旋转。与多晶硅相比, PSG 容易被蚀除。因此, 可以多晶硅为结构材料, PSG 为牺牲层材料, 将 PSG 层和各种形状的多晶硅层顺序沉积光刻, 最后蚀除掉 PSG 层, 即可得到可动的多晶硅部件。如图 7-2b 所示, 首先在第 1 层的 PSG 上沉积第 2 层的固定用多晶硅膜, 用光刻和 RIE 将其加工成环状; 然后, 湿法蚀除第 1 层的 PSG, 使横向至多晶硅层下内侧, 并全部覆盖第 3 薄层 PSG; 进而用 CVD 沉积第 4 层的多晶硅, 再用 RIE 将其加工出臂形, 最后将第 2、4 层的多晶硅之间的 PSG 用 HF 水溶液除去, 臂即可自由转动。这种表面微加工法的开发, 使得无组装制造可动的微结构的预组装 (Preassembly) 成为可能。

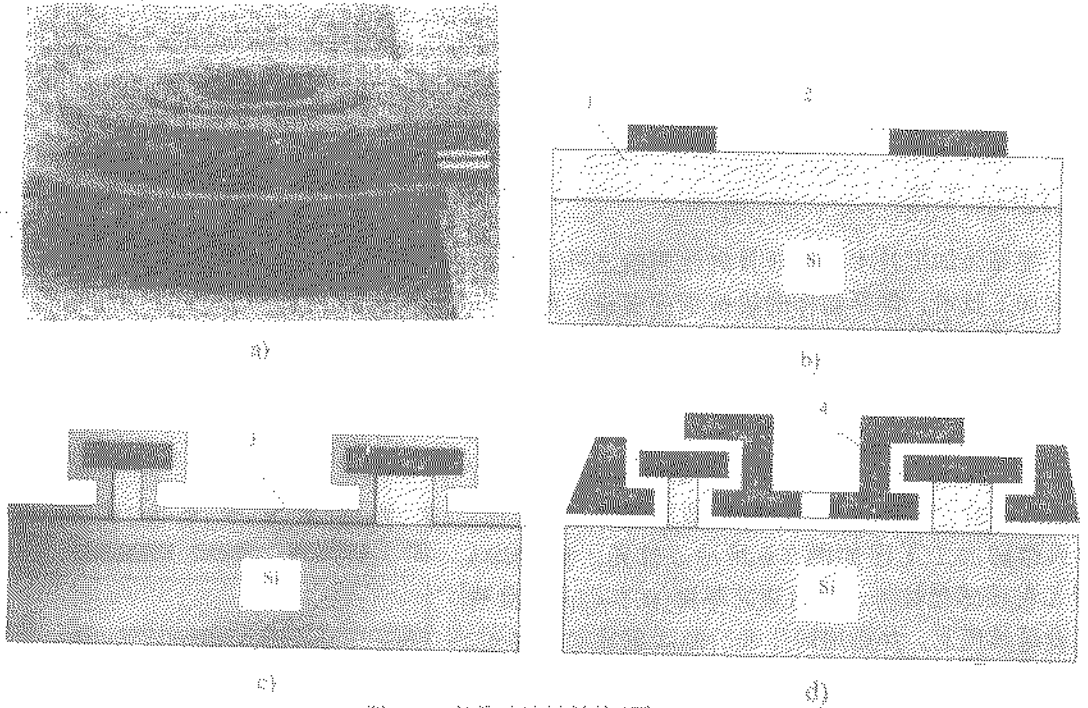


图 7-2 多晶硅铰链结构(层 1:PSG
层 2:多晶硅 层 3:PSG 层 4:多晶硅)

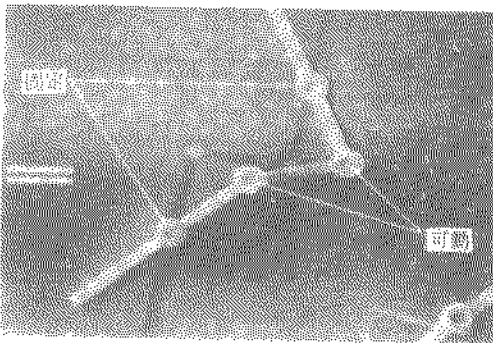


图 7-3 连杆机构

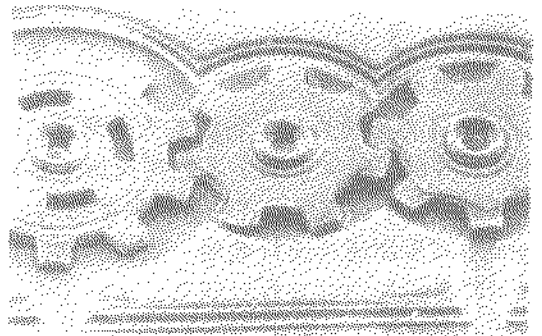


图 7-4 齿轮传动机构

图 7-3 所示为四个上述的铰链连接而成的连杆机构, 上下两侧的两个铰链的中心轴固定在基板上, 中间的两个轴与基板分离可以自由移动, 从基板上留下的阴影可以看到连杆机构的移

动。

图 7-4 所示的直径 125 ~ 185 μm 的多晶硅齿轮是 AT&T 和 MIT 制作的微型机械的初期代表作。制作出的三个齿轮处于相互啮合的形态,每个齿轮能够围绕各自的轴心自由回转,齿轮的靠近轴的部分,上下环状的凸起减小接触面积,抑制摩擦的影响。

体硅微加工法的典型代表是结晶异向性刻蚀加工。图 7-5 所示为在大小 75mm 的硅基片上异向刻蚀出二维分布 1600 个微小孔的载板,用于细胞融合和培养。使各微小孔分别装入一个细胞,然后使同样配置 1600 个微小凹槽的细胞融合板(室腔板)对准载板接受其中的细胞。进行上述操作两次,即可将适当组合的两种细胞装填在凹腔中,施加短且高脉冲电压即使两细胞融合。

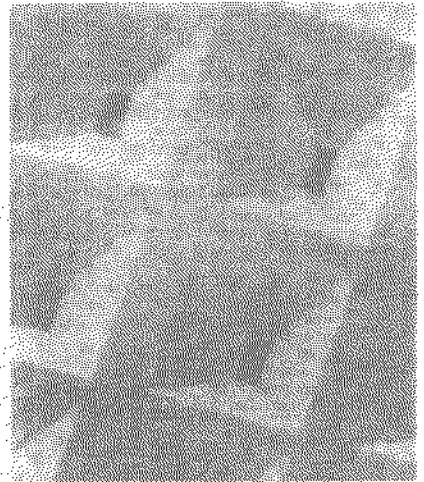


图 7-5 微小孔载板

2 LIGA 工艺

半导体加工技术除体硅异向性刻蚀之外,基本上属于表面加工技术,即所制作的机械结构多是二维的。为得到三维的立体结构,有赖于高深宽比刻蚀工艺以及低温融接技术等。

LIGA 是德语 Lithograph Galvanformung und Abformung 的简称,是一种使用 X 射线的深度光刻与电镀相结合,实现高深宽比的微细构造的成形方法。其典型的加工工序如图 7-6 所示。首先,将 PMMA 等 X 射线感光材料,以期望的厚度(0.1 ~ 1mm)涂敷在金属基板上,然后用同步辐射的 X 射线对其曝光。X 射线具有良好的平行性,显影分辨率、穿透性能,对于数百微米厚的感光膜,能以优于 1 μm 的精度曝光。然后经显像可得到感光膜的结构。继而在感光膜的结构空间内电镀镍、铜、金等金属即制成微小的金属结构。若再以这种金属结构作为模具,还可以注射成形塑料制品等。

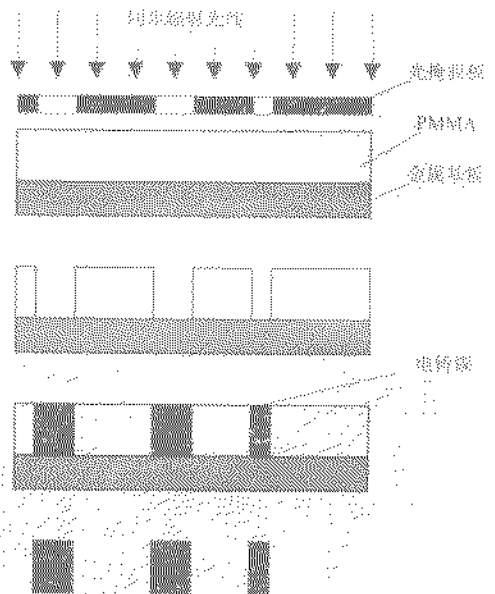


图 7-6 LIGA 工艺

LIGA 工艺的特点在于能够实现高深宽比的垂直构造体,突破了半导体加工工艺对被加工材料的局限。其魅力在于能够得到各种材料的微结构。而且,虽然使用同步加速器进行光刻一次成本高,但是一次曝光所得结构能够有数种制品,这对于低成本的大量生产亦具很大意义。

图 7-7 所示是用 X 射线光刻制造的蜂窝结构,相对于高度 350 μm ,其壁厚仅为 4 μm ,具有非常大的深宽比,孔的大小为 80 μm 。图 7-8 所示为将牺牲层技术导入 LIGA 工艺制作的可动结构的例子。气动涡轮的下边先形成金属钛(Ti)层并且最后蚀除掉,以使涡轮与基板分离。涡轮套在固定轴上可以自由回转。

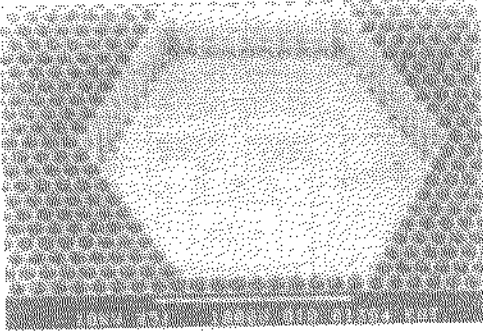


图 7-7 蜂窝结构

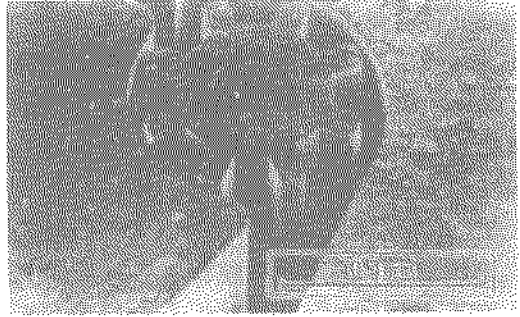


图 7-8 气动涡轮

3 特种微细加工技术

现行机械加工技术向着微小极限方向的发展,也取得了令人瞩目的成就。这些微细加工技术与半导体微细加工技术相比,在三维复杂结构成形方面有明显优势,其批量制作可以通过模具加工、电铸、注塑等方法实现。但在与电路集成方面有待探讨。

3.1 微细电火花加工(Micro EDM:micro electro discharge machining)

电火花加工是利用工件和工具电极之间的脉冲性火花放电,产生瞬间高温使工件材料局部熔化和气化,从而达到蚀除加工的目的。电火花加工的特征是加工力小,其加工精度主要取决于电气诸量而非机械装置,并能够加工极硬的导电性材料和复杂形状。电火花加工由于其非机械接触加工的特点适合微细加工。微细电火花加工由于电流小,亦能够加工硅等半导体高阻抗材料。

实现微细电火花加工的关键在于微小轴(工具电极)的在线制作、微小能量放电电源、工具电极的微量伺服进给、加工状态检测与系统控制以及加工工艺方法等。

日本东京大学率先开发出的微小电极线电火花磨削(WEDG:wire electro discharge grinding)方法为微细电火花加工开辟了一可能途径。如图 7-9 所示,其加工原理基于丝线和被加工轴之间的电火花线切割和电极反拷方法的优化结合。被加工轴(工具电极)的成形通过主轴的进给和旋转运动以及线电火花磨削丝的移动实现。丝线的移动实时补偿其电火花加工所致的直径损耗,弥补了反拷加工工具电极轴时难以保持所需形状的优点。而走丝导块保证丝线和被加工轴之间的径向位置,与线切割加工相比避免了丝线刚度低引起的加工误差。这种采用精密旋转主轴头与线电火花磨削走丝机构相结合的在线制作微小工具电极的方法,与金属丝矫直、毛细管拉拔或金属块反拷等方法相比,容易得到更小尺寸的电轴且易保证较高的尺寸和形状精度。

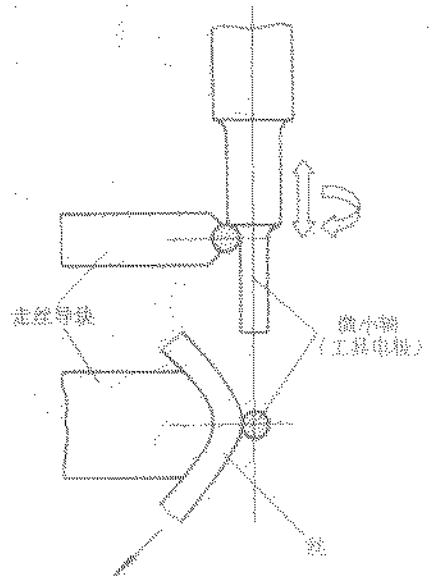


图 7-9 微小电极线电火花磨削制作原理

在电极的精密伺服进给以及加工状态的检测控制方面，清华大学研究开发了一种如图 7-10 所示的采用蠕动式微进给机构的微细电火花加工装置。该加工装置的技术特点是蠕动式微进给机构直接驱动控制旋转主轴头的轴向进给运动，精密旋转主轴头与线电火花磨削走丝机构相结合制作微小轴(工具电极)，采用 RC 脉冲式微小能量电火花电源并利用平均充放电电流进行加工状态的检测。加工过程中主控计算机根据由检测回路反馈的电流值识别出加工状态，经驱动电路控制轴向伺服进给运动，保持最佳加工状态。

图 7-11a、b 所示分别为线电火花磨削加工出的 $\phi 38\mu\text{m} \times 0.6\text{mm}$ 微小圆轴和 $55\mu\text{m} \times 55\mu\text{m} \times 0.4\text{mm}$ 微小方轴。图 7-12a、b 所示是使工具电极随主轴旋转，利用微小圆轴在厚度为 0.2mm 不锈钢片上加工出的直径 $44\mu\text{m}$ 微小孔，以及在单晶硅材料上加工出的微小文字结构。

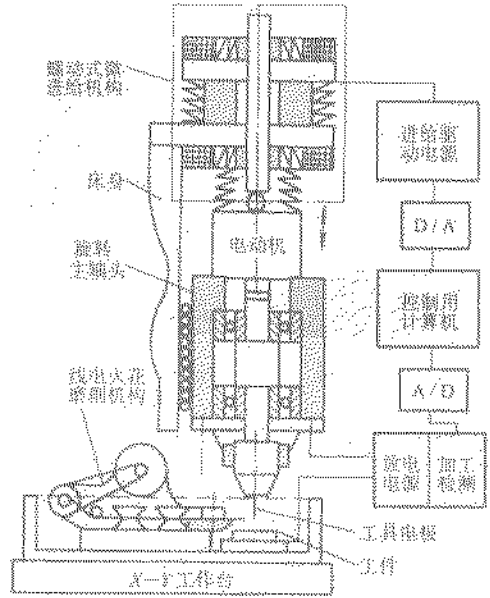
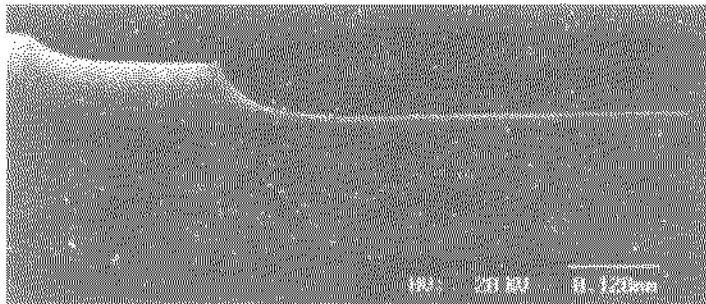
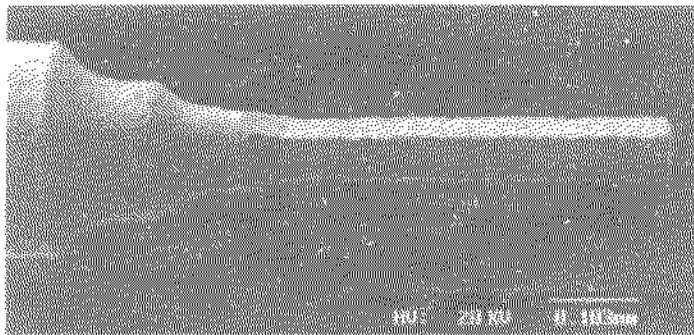


图 7-10 微细电火花加工装置构成



a)



b)

图 7-11 微小轴

利用简单形状工具电极，采用选择电极端部放电扫描加工的方法，是三维微小结构的微细电火花加工的一可行途径。图 7-13a 所示是日本东京大学用电极端部放电扫描加工的方法制作出的微小型汽车外形模具；图 7-13b 是将模具加热至 200℃ 注塑成形的微小型汽车外形。

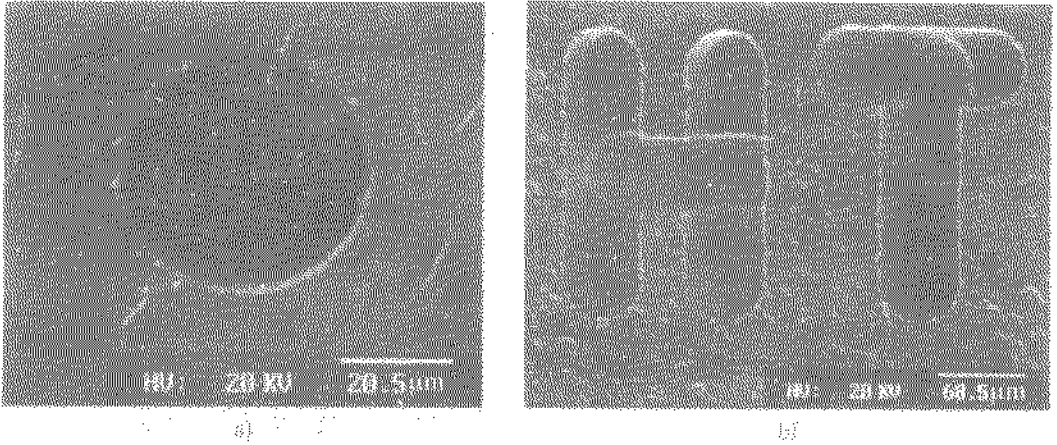


图 7-12 微小结构

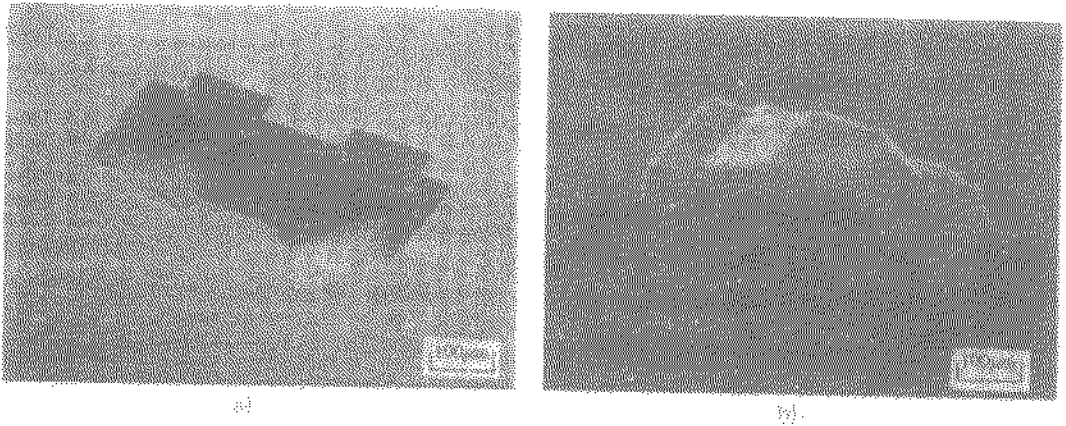


图 7-13 微小三维结构

对微细电火花加工技术的不断研究探索,已使其在与微型机械制造结合及实用化方面取得了长足进展,其加工对象由简单的圆截面微小轴、孔扩展到复杂的微小三维结构。

3.2 光成形微细加工

光成形加工已被尝试用于微细结构的制作,无疑为制作三维立体微结构提供一有益途径。光成形加工首先利用一种紫外光硬化树脂作为被加工材料,当树脂受到紫外线照射时,可由液态变为固态,控制曝光方式,即可成形各种三维结构。

图 7-14 所示为一激光成形微细加工装置和加工原理示意图。聚焦的紫外光斑依靠 (X, Y, Z) 3 坐标工作台的运动扫描硬化一层树脂,然后 Z 向运动调节光斑聚焦位置,扫描硬化相邻层树脂。三维结构的成形由这样一层的二维形状堆叠而成。成形尺寸和精度主要取决于光硬化树脂的光敏分辨率、光源聚焦精度、机械结构 (X, Y, Z) 方向的运动控制精度以及液态树脂

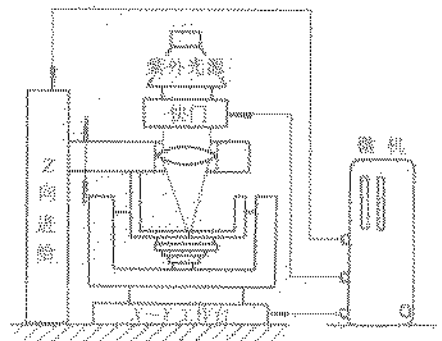


图 7-14 激光成形微细加工

的粘性等。以树脂结构为模具，可进一步电铸金属结构。

光成形微细加工具有许多工艺方法无可比拟的特点；可加工成形树脂或金属材料的高深宽比三维结构，无需工具或掩模版制作、成形快捷等。但聚焦光斑大小应与扫描间隔匹配，光斑小于扫描间隔时结构容易断裂，反之影响成形尺寸精度。

图 7-15 所示为一由光纤阵列组成的激光成形批量制作微细加工系统示意图。该系统设计以简单易于微小型化的光学系统实现安全、低成本、高效率的高深宽比三维结构成形。

通常光成形微细加工方法难以制作自组装的可动结构，新近研究开发出的点聚焦扫描加工三维成形方法在制作可动结构方面有所突破。一般光成形加工时树脂感光即硬化，而点聚焦光成形方法是使树脂硬化仅限于紫外光聚焦点上。这就使其加工成形可以不使用基板，加工分辨率取决于光聚焦点的大小，可直接制作出自组装可动结构，并消除了液体树脂粘性和表面张力的不利影响。图 7-16 所示是利用点聚焦成形加工出的外径为 $\phi 50\mu\text{m}$ 的可动齿轮。

3.3 其他微细加工方法

机械切削加工，由于切削力的产生，一般认为不适于微型机械的加工制作。但超精密加工已成功地制作出尺寸在 $10\sim 100\mu\text{m}$ 的微小三维构件，图 7-17a、b 所示分别为阶梯轴和螺纹。机械加工出的三维微小构件与压电薄膜的热液制作结合，试制出振动陀螺结构。超精密切削加工亦可应用于三维复杂形状的微小型致动器的制作。

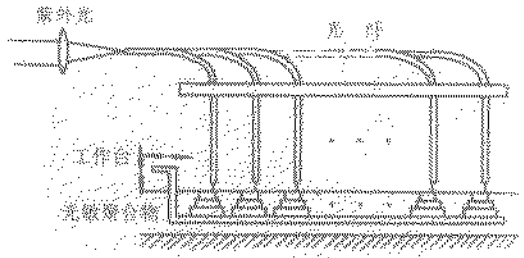


图 7-15 光纤阵列批量加工系统

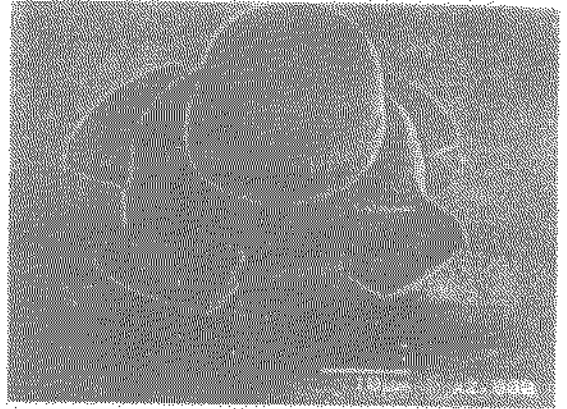
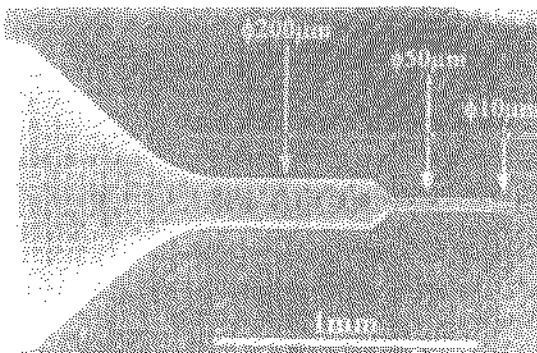
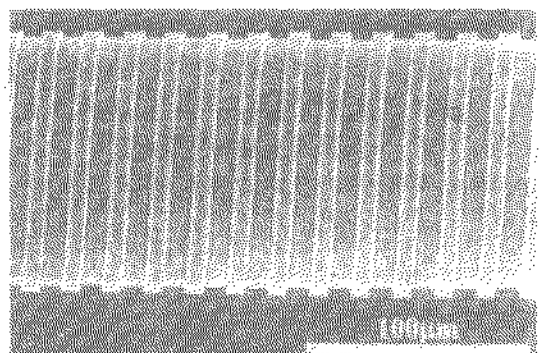


图 7-16 外径为 $\phi 50\mu\text{m}$ 的可动齿轮



a)



b)

图 7-17 微型阶梯轴和螺纹

在微细电火花加工装置和方法研究开发的基础上,针对玻璃、硅基材料等的加工,微细超声加工技术得到开发。图 7-18 所示为在单晶硅上超声加工出的三维微小结构示例。

以制作微型构件的模具和 X 射线光刻掩模版为应用背景的铣削加工工艺,采用聚焦离子束(FIB: focused ion beam)加工高速钢材料的铣削刀具,加工出直径为 22 ~ 100 μm 的微小铣刀。图 7-19 所示为微小铣刀前端显微照片。进行机械的微细铣削加工,对机床结构运动精度及其控制均提出了很高要求,尤其是主轴旋转精度需要特殊的机构设计来保证。以主轴转速 19000r/min,在 PMMA (polymethyl methacrylate)材料上加工的螺旋槽的一部分如图 7-20 所示,图中槽厚约为 8 μm ,高度为 62 μm ,深宽比接近 8。

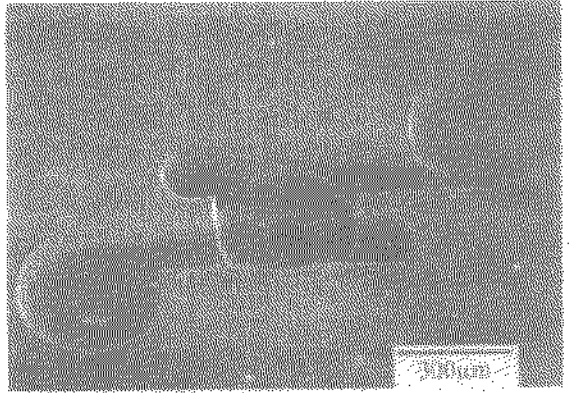


图 7-18 超声加工出的单晶硅三维微小结构

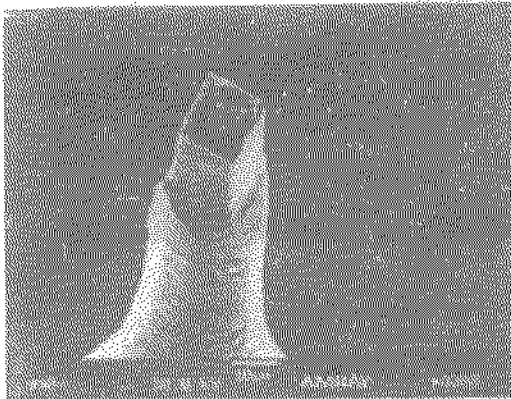


图 7-19 微小铣刀前端显微照片

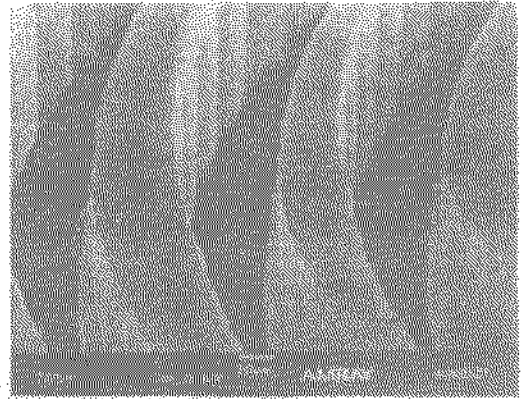


图 7-20 螺旋槽的一部分

在 PMMA 上可直接电铸成形微小构件,亦可电铸金(Au)制作 X 射线光刻掩模版,作为光刻工艺的辅助手段。

在极限的微细加工方面,应用扫描隧道显微镜(STM: scanning tunneling microscope)技术,在探针尖端进行原子、分子级表面加工的 STM 加工技术亦获得重大进展。C. Binnig 和 H. Rohrer 发明的扫描隧道显微镜不但使人们可以以单个原子的分辨率观测物体的表面结构,而且也以为单个原子为加工单位的加工提供一可能途径。

STM 将非常尖锐的金属探针接近试件表面至 1nm 左右,施加电压时隧道电流产生,隧道电流每隔 0.1nm 变化一个数量级。保持电流一定,扫描试件表面,即可分辨出表面结构。一般隧道电流通过探针尖端的一个原子,因而其横向分辨率为原子级尺寸。

应用 STM 技术,可利用接近试验材料表面的探针尖端的高电场,切断原子间的结合并蒸发掉原子。IBM 进行了在极低温下移动 Xe 原子的实验;日本日立制作所在室温下,从 MoS_2 表面将硫磺原子逐个剥离去,在 2nm 见方的 MoS_2 表面上加工出「PEACE'91 HCRL」的字样。试验研究表明,利用 STM 加工技术已可以进行单个原子的去除、添加和移动。

通常的 STM 加工或广义的 SPM (scanning probe microscope)加工之明显缺点是加工区域和速

度过小。电化学加工或光刻加工与 SPM 加工的结合可有效地解决这一问题。SPM 探针电化学加工的关键是探针尖端局部导电区域的控制处理,即探针除尖端外镀绝缘层。这种加工原理基于法拉第电流而非隧道电流。图 7-21a 所示为用 pt-Ir 合金探针在 Cr 基板上电解加工出的笔划宽 $200\sim 300\text{nm}$, 深 100nm 的正字图形;图 7-21b 所示为在 Au 基板上电化学沉积的 $\phi 300\text{nm} \times 200\text{nm}$ 的金属 Ni 的突起形状。利用光纤作为探针,安装在原子力显微镜(AFM;atomic force microscope)上的扫描近场光学/原子力显微镜进行的探针光刻加工,其近场光学原理可以使线宽精度突破光衍射极限精度。图 7-22 所示为用波长 488 nm 的 Ar 离子激光通过光纤在基板上对 400nm 厚的感光胶曝光,刻蚀出的字母图形。每个字母大小为 $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$, 线宽 300nm , 刻蚀深度为 10nm 。

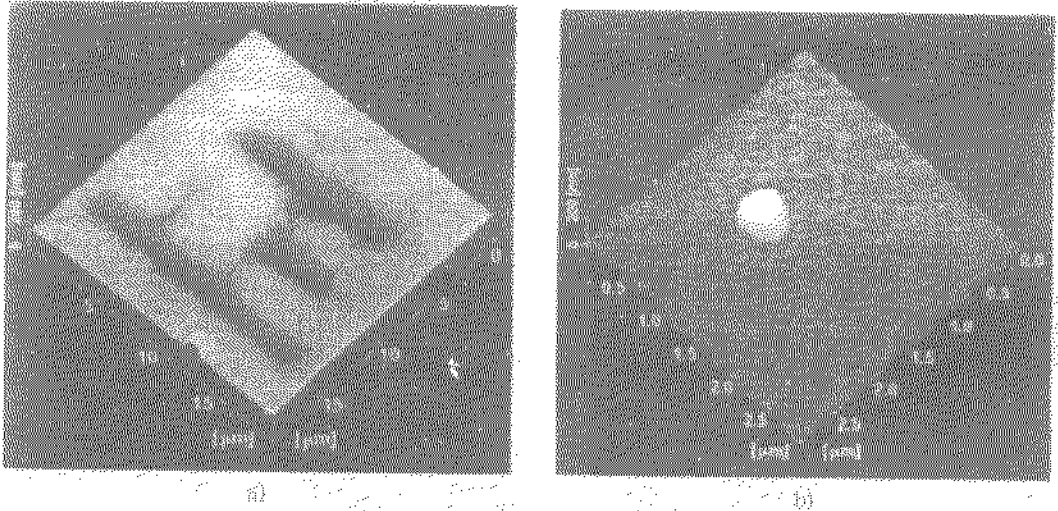


图 7-21 SPM 探针电化学加工示例

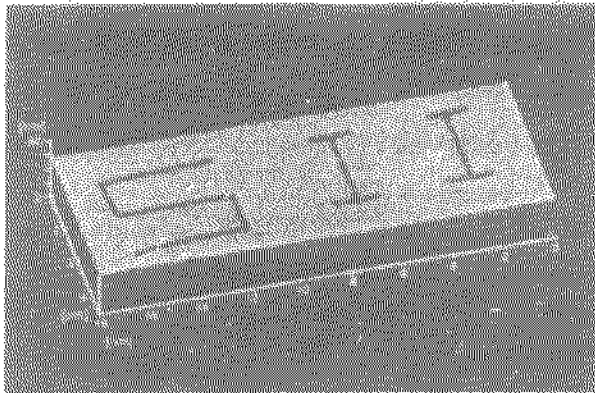


图 7-22 SPM 探针光刻加工示例

4 粘接装配技术

4.1 粘接技术

在半导体微细加工的基础上,为将微细构件进一步组装成立体结构,硅、玻璃等基板的接合技术极为重要。粘接要求接合部分不发生变形,保持尺寸精度。常用的粘接技术包括粘接、

融接、固相压接等。硅的直接键合以及硅和玻璃的阳极键合与半导体微细加工技术比较适配。

粘接是在基板间夹入粘结剂的接合方法。粘结剂分为使用聚合物等的有机材料，和玻璃等的无机材料两种情况。通常用于精度要求不高的场合。

融接是将玻璃基板迭合，在真空中加热接触面至熔融粘着温度，玻璃基板能够在一定的容许变形范围内接合在一起的方法。利用 Au 与 Si 在约 370℃ 达共晶状态，Si 基板间可以介入 Au 薄膜接合。这也是一种粘接或扩散接合。但由于 Si 基板表面一部分成为熔融状态，故认为是融接。

固相压接包括阳极键合、直接键合和扩散键合等。为保持尺寸精度，使平滑表面紧密接触。在固相状态使其接合是一有效途径。

阳极键合使硅基板与具有相近热膨胀系数的硼硅酸耐热玻璃 (pyrex glass) 的平滑表面相迭在一起，加热至 300~400℃ 并在玻璃一侧加 500V 左右的负电压，从而玻璃和硅之间产生很大的静电引力，导致接触面达到化学接合。这种室温接合的特点使得不同热膨胀系数的材料的接合在原理上成为可能。

直接键合是将具有极平滑表面的基板相迭合，产生接触面原子间力的接合的接合方法；能够直接或介入 SiO_2 接合 Si 基板。而扩散键合是在不使母材熔融、不发生显著塑性变形的前提下，施加适当程度的压力和温度，利用接合面间产生原子扩散，在固相状态下的一种接合方法。高温和加压产生的塑性变形使接触面积加大，利用界面间原子的凝聚力可达到接合。

4.2 微操作装配技术

无论对于何种微细加工技术，尽管在一定程度上可实现自组装，但具有复杂立体结构的功能较强的微型机械/微型机电系统最终离不开微操作装配技术的支持。由于微型机械尺寸的微小化，一方面使人们的操作变得困难，另一方面微小构件之间的联接方式亦发生了很大改变。

新的宏/微接口装置的开发有助于人类世界与微观世界间的动作联系。室温表面激活粘接 (SAB: surface activated bonding) 技术及其微操作装配装置的研究具有一定的典型意义。SAB 的原理是利用高真空超净表面间原子的接触引力实现不同材料的粘接，与通常的扩散粘接方法相比大幅度降低粘接温度。其粘接操作采用 SEM 观测，由压电驱动马达和 SMA 弹性机构等构成的 12 自由度微操作系统执行粘接装配所要求的移动调节和对准定位等精微动作。

图 7-23 所示为在硅基底上进行微细电火花加工和微细超声加工，在线装配出的气动涡轮的设计结构和实物照片。在同一次装夹中完成加工和装配，避免了安装误差的产生，提高了对准定位精度，从而可使零部件加工 + 组装的机械方式亦适用于微型机械/微型机电系统。

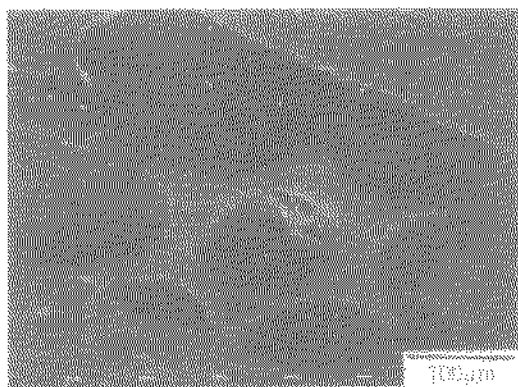
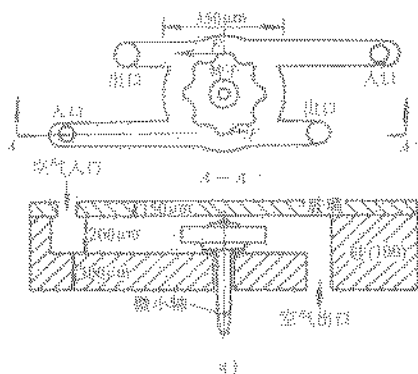


图 7-23 气动涡轮

在硅微细加工技术方面，三维立体结构的组装成形方法有新的创意。仿照折纸工艺，以多晶硅结构作为刚体件，以聚酰亚胺(polyimide)材料作为弹性连接件制作的立体框架如图 7-24 所示。这种结构是将多晶硅薄膜下的牺牲层蚀除后折叠而成，依然需要手工操作，不能形成自组装。相对于此，图 7-25 所示的三维结构成形采用了内置微型致动器的方法，其制作过程是将平面结构制成后，利用微型致动器所产生的力使结构向上弹性变形，之后通电加热使其产生永久变形。这种工艺避免了外部实施的微操作，是在微型机械尺寸范围内三维结构的完全自我构筑。

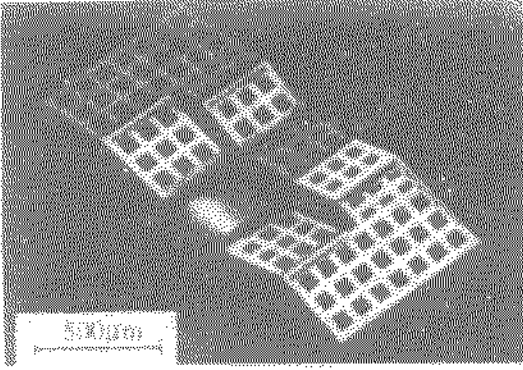


图 7-24 三维折叠立体结构



图 7-25 自我构筑三维结构

第 8 章 微型机械与微型机电系统

1 概述

1965 年的诺贝尔物理奖获得者 Richard P. Feynman 曾于 1959 年 12 月 26 日在美国物理学会的年会上作了一次题为 “There’s plenty of room at the bottom” 的演讲, 以出众的好奇心和想象力、超前技术发展水平预见性地向人们揭示了一个新的研究方向和机遇, 指出了微小化的实现手段及其潜在的应用前景, 对当今微型机械研究领域的崛起发展具有深远的历史意义和影响。

在实验物理研究方面, Kamerlingh Onnes 开创了低温物理研究领域的先河; Percy Bridgman 开创了高压研究领域; 高真空研究领域也随之得到开发。在这些研究领域人们似乎可以无止境地向着更极限的方面探索。Feynman 指出与此类同而实际上有许多不同的一个新的领域人们尚未触及的微小化研究领域, 即微型机械将会出现。这个领域并不涉及基础物理学的问题, 而是像固体物理那样展示许多新的现象, 特别重要的一点是它将有大量的技术应用。

1983 年 2 月 23 日 Feynman 又作了一次演讲, 对 23 年前的讲演作了回顾修正。强调出用牺牲层方法制作微型静电马达的途径, 指出了微型机械中摩擦和接触粘附的重要影响; 探讨了微型机械可能的应用, 重点阐述了利用原子寄存及量子跃变运算的未来计算机的可行性。可以说当今微型机械的研究开发在很大程度上是实践了 Feynman 的思想和方法, 并逐步朝向所预言的原子级的极限微型机械发展。

1962 年第一个硅压力传感器问世, 在之后的 70 年代, 一部分初期的微型机械构件在不同程度上试制成功。虽然这些构件的运动形式仅限于弹性弯曲变形, 但已有效地应用于硅压力传感器和加速度计。1983 年, California 大学 Berkeley 分校的一位研究生 Roger T. Howe 开发出牺牲层刻蚀工艺, 从而使制作复杂结构的微型可动机械部件成为可能。有了在硅基片上制作微型机械构件并使其运动形式不受拘束的手段, 人们自然会想到设计微运动系统, 这相应地需要微致动。1988 年夏, 也是在 UC Berkeley, 二位研究生 Long-shen Fan 和 Yu-chong Tai 制作出世界上第一个平面结构的微型静电马达。基于硅微细加工技术, 这些数十微米大小的机械构件、静电马达、以及各种微型致动器等的研究成果的发表问世, 引起世界各主要国家众多部门和学科对微型机械研究的极大关注, 使微型机械研究进入一迅速发展时期。

美国国家自然科学基金会 (NSF) 于 1988 年前后最先注意到从应用于大规模集成电路的半导体加工技术中衍生出的微型机电系统 (MEMS: Micro Electro Mechanical Systems), 召开了三次专题讨论会, 汇编了一份题为 “Small Machines, Large Opportunities” 的综合报告书, 这份小册子基本包容了微型机械的构想、概念。基于这份报告书, NSF 开始了对微型机电系统研究开发的较大规模资助。

日本通商产业省工业技术院 1991 年开始一项为期 10 年的「微型机械技术」大型研究开发计划。计划研究开发用于人体内以及工业设备管道内等狭小场所的、能够进行诊治或检修的微小机械, 以适应发电设施等产业系统的高科技化、精密化、复杂化所带来的检修的高速度和高难度的要求, 以及在医疗诊断或手术中最小程度地伤害人体, 完成微细且复杂的作业造福人类。

欧洲主要工业国家和我国等亦相继立项资助微型机械的研究开发。微型机械所具有的特点：体积小、重量轻、性能稳定；有利于大批量生产，降低生产成本；惯性小、耗能低；谐振频率高、响应时间短；集约高技术成果，附加价值高等，使其拥有广泛的应用领域和潜在的应用前景。微型机械研究可能导致基础技术的巨大进步，开辟新的产业市场，其应用将波及工业、通讯和信息处理、国防、航空航天、航海、医学和生物工程、农业和家庭服务等领域。因此吸引着各国对微型机械研究开发的积极投入。

顾名思义，微型机械在尺度上应在 1mm 以下。但考虑到现在的技术水准，微型机械在广义上包含了尺寸为 1~10mm 的小型机械、1 μ m~1mm 的狭义的微型机械、以及 1nm~1 μ m 的纳米机械。其主要实现途径涉及追求极限的机械加工方法、半导体加工技术、借助于生物构造和分子组装的纳米技术(Nanotechnology)等。

微型机械作为新崛起的研究领域处于快速发展之中。截止 80 年代初，前期有关微型机械的研究成果集约在论文“Silicon as a Mechanical Material”中。之后每年召开的 IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) 国际会议论文集比较集中反映了微型机械的主要研究成果。有关微型机械的名称在迄今的科技文献中曾出现过微型机构(Micromechanism)、微型机械学(Micromechanics)、微型动力学(Microdynamics)、微型机械电子学(Micromechatronics)、微型机电系统(MEMS: Microelectromechanical Systems)、微型机械(Micromachine)、微型系统(Microsystems)等。微型机电系统(MEMS)在美国和国际上较为通用，日本用微型机械(Micromachine)较多，欧洲惯用微型系统(Microsystems)。本文为叙述统一起见，通称之为微型机械。实际上在我国微型机械的称谓包含了微型机电系统(MEMS)等的内容。

微型机械不仅仅是机械的简单微小化，是涉及到许多学科和技术的前沿交叉学科研究领域。其基本特点是旨在实现基于批量制作方式的由微型传感器、致动器和电路等集成的系统。以半导体加工技术的成熟和超精密机械加工技术的进步为背景，微型机械的研究近年来已被积极地推进到一重要的发展阶段。随着微型机械的研究进展，其在机、电、光等系统集成方面的内涵将更加丰富。

微型机械研究集约了当今科学技术的尖端成果并涉及多种学科。例如微型机械 CAD、加工制作方法、材料与材料力学、流体力学、摩擦与润滑、微小能源、宏/微接口技术、检测方法、非线性系统控制、系统集成以及实用化研究等等。涉及到材料和力学、机械工程、光学、信息科学、电子和电气工程、应用物理、化学工程、生物工程、自动控制、系统工程学等几乎全部的工程科学以及一些基础科学。

迄今微型机械的研究尚比较集中于基础技术的开发实现。前述的制造技术的研究开发是其中的基础重点之一，实现高深宽比三维微型结构的微细加工方法不断得到开发、改进；微型传感器易与信号处理电路集成一体，并迅速走向应用，其研究开发相当活跃；微型致动器作为微型机械的能量转换的关键执行器件，一直是微型机械的一主要研究方向；微型泵、阀及微量流体控制系统由于其潜在的应用背景，亦是微型机械研究中一具有特色的分支；随着微型机械研究开发的进展，微型机械由典型部件的实现逐渐趋向机电系统集成。关于微小领域的摩擦学、微流体力学、机构设计等基础理论和实验研究逐渐开始；与现代科学技术的发展相适应，微型机械的研究成果与应用的结合在加快，微型机械的应用研究对促进微型机械研究进程举足轻重。

利用硅微细加工技术(silicon process)制作微小机械结构首先从传感器开始。美国 California 大学 Berkeley 分校截止 1987 年制作的全部微小结构(microstructures)，如微细梁式加速度计、多

晶硅接触传感器、多晶硅桥式风速计、化学反应传感器、微小麦克风、接触传感器阵列等，几乎全是应用于传感器的。之后表面微细加工方法开始应用于不以传感器为目标的机械可动部件的制作，AT&T与MIT较早制作出微型铰链、连杆机构以及齿轮、气动涡轮等机械结构等。

自California大学Berkeley分校研制成功微型静电马达以来，微型机械/微型机电系统的研究开发进入了加速发展阶段。伴随着微细加工技术水平的提高，复杂结构的微型机械逐渐得以实现，各种新颖的微型传感器和微型致动器不断出现，同时微型机械/微型机电系统的应用在不断拓宽，微型机械/微型机电系统的研究开发活动在多方位展开。

时至今日，微型压力传感器、微型加速度计已相继产品化，微型陀螺成为微型传感器中又一主要的产品化目标。基于微量流体控制器件和系统与微型化学、生物传感器的结合，生物芯片的研究开发具有独特的应用背景。微型机械/微型机电系统在光学信息领域的应用亦引人注目。微型传感器、微型致动器及其集成的微型机电系统与应用背景的结合愈来愈紧密，像最初微型静电马达那样靠其新颖性令人惊奇的时代已经过去，微型机械/微型机电系统在朝向实用方面推进。

微型机械/微型机电系统研究仍处于迅速发展时期，与不同学科的交叉和应用的结合都可能产生相应的分支以及研究开发热点。本章内容并不打算涉猎微型机械/微型机电系统的方方面面，而是试图通过典型实例，重点介绍微型传感器、微型致动器以及微量流体控制器件与系统，以求对微型机械/微型机电系统有基本的了解。

2 微型传感器

最具代表性的有微型压力传感器、加速度传感器和陀螺仪。此外，还有微型应变传感器、流量传感器、麦克风、编码器、生物及化学传感器等。

微型传感器由于在形状、尺寸上的缩小，使其可靠性显著提高，并有可能实现大批量生产从而降低成本。但更重要的是为传感器与信号处理电路集成一体，为实现智能化提供了可能。

2.1 微型压力和流量传感器

微型压力传感器在80年代初已大量应用于汽车排气控制。微型压力传感器的基本结构原理如图8-1所示。利用异向性刻蚀方法在单晶硅上制作出薄膜结构，并在单晶硅薄膜上掺杂制作出检测用应变电阻。当有压力作用其上时，单晶硅薄膜在一定范围内与压力成比例地变形，变形量通过应变电阻由桥式电路检测，从而得知被测压力。

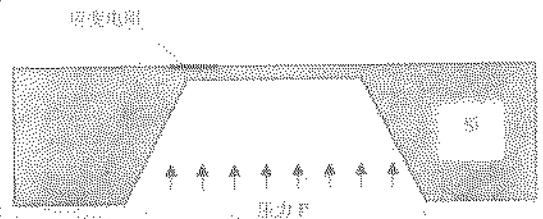


图 8-1 微型压力传感器示意图

图8-2所示为微型薄膜压力传感器与CMOS信号处理电路集成制作，在一面积为 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ 的硅片上，传感器单元以 $250\mu\text{m}$ 的间隔构成了 32×32 (1024个)的传感器阵列。压力传感器的薄膜尺寸为 $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ ，阵列包含的晶体管数约为16000个，压力灵敏度 $12\text{mV}/100\text{kPa}$ ，周波拍频 4MHz ，电源电压 5V 。这种集成化了的压力传感器可能应用于精密作业机器人的触觉器、以及测量喷嘴等微小区域的压力分布。

在微流范围，流速或流量的可行的检测原理包括压力差和热流动两种方法，而对于微量液体流动和气体流动，热检测更胜一筹。热检测式的微流量传感器的基本结构原理如图8-3所

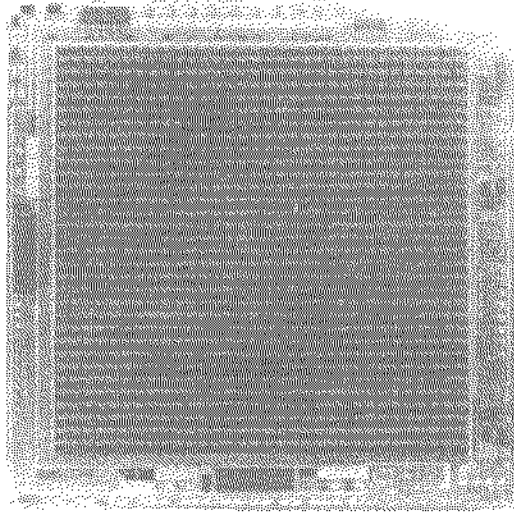


图 8-2 微型薄膜压力传感器阵列

示, 发热元件及其上下沿流动方向的热敏元件 T1、T2 制作在硅膜等结构上, 热检测方式主要有热线、热传递和热飞行时间检测等。热线式利用 T1 检测温度, 控制温度或加热电流恒定, 通过相应的电力消耗或达到的温度就可以检测出流速, 在这种方式中, 流道的几何参数影响需要进行补偿; 在热传递检测方式中, 被加热的流体随流动带向下游, 测量 T1 和 T2 的温差即可得知流速; 在热飞行时间检测方式中, 在发热元件处脉冲加热, 当热脉冲信号到达 T2 时, 测量其间的时间间隔, 从而测得流速。

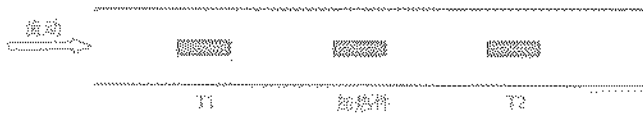


图 8-3 热式微量流体传感原理

图 8-4 所示为一热式微量流体传感器的截面结构, 热电偶由多晶硅和金膜构成, 多晶硅同时作为发热件。硅杯薄膜部分的面积为 $600\mu\text{m}$ 见方, 发热元件分别设计宽为 $5\mu\text{m}$ 和 $15\mu\text{m}$, 热敏元件和发热元件的距离分别为 $10\mu\text{m}$ 、 $75\mu\text{m}$ 和 $150\mu\text{m}$ 。流速测量范围为 $0.1 \sim 150\text{mm/s}$ 。

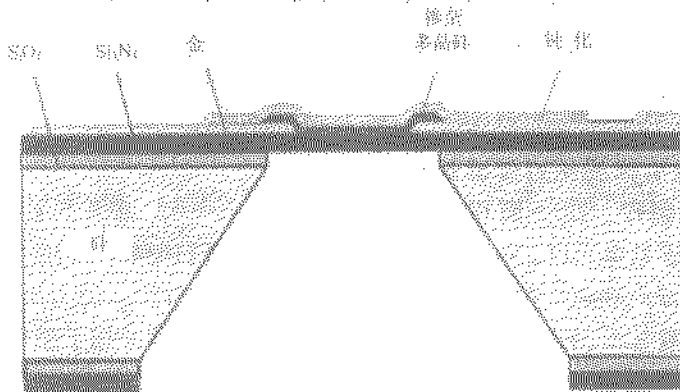


图 8-4 热式微量流体传感器结构

瑞士 Neuchatel 大学研制的微量流体传感器如图 8-5 所示, 当液体流经流量传感器的悬臂梁端部的窄缝时, 液体的粘滞力使悬臂梁变形, 由应变片检测出口流量。硅微细加工的流量传感器的悬臂梁的尺寸为 $30\mu\text{m} \times 1\text{mm} \times 3\text{mm}$, 检测范围为 $5 \sim 500\mu\text{L}/\text{min}$, 可达到纳升级分辨力。

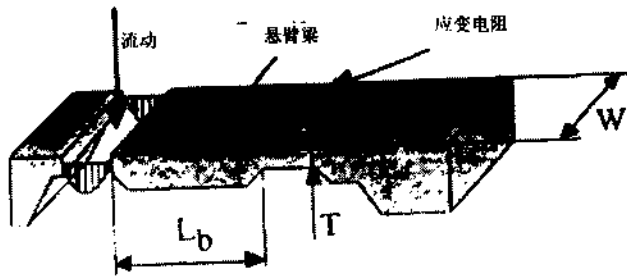


图 8-5 窄缝结构微量流体传感器

2.2 微型加速度传感器

微型加速度传感器的结构原理类似于地震仪, 如图 8-6 所示, 核心部分是一弹性支撑的质量块, 当受到加速度作用时, 惯性力使质量块和支撑弹簧产生位移变形。加速度的检测有两种途径, 一种是通过直接测量出位移变形量; 另一种是通过集成微型致动器平衡掉惯性力, 保持质量块不产生位移。

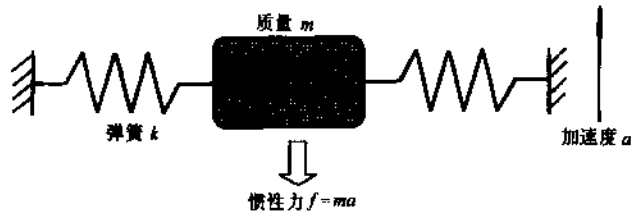


图 8-6 微型加速度传感器的结构原理

在前一种途径中, 可以像微型压力传感器一样采用应变计, 亦可在质量块上下对称配置检测电极, 根据其间隙的变化导致的静电电容的变化检测出加速度, 后一种途径属于反馈控制方法, 常用静电致动器平衡惯性力, 其结构多与静电电容检测所用相同。

加速度的检测还可利用谐振原理, 如果使质量块和支撑弹簧处于谐振状态, 当有惯性力作用时谐振频率发生变化, 由此可检测出加速度值。

利用谐振原理的微型传感器还涉及化学、力、压力传感器等, 基本结构与微型加速度传感器相同。例如在质量块上成膜与被测气体易于反应的特定物质, 质量块质量的变化使谐振频率变化, 从而可以作为化学传感器。力或压力传感器一般利用了支撑弹簧张力导致谐振频率的变化。与电压或电流值相比, 测量谐振频率可达到更高的分辨力, 因此谐振原理传感器在微型传感器中前景看好。

Stanford 大学最初制作的微型加速度传感器如图 8-7 所示, 采用硅悬臂质量块结构, 检测应变电阻。内部密封硅油以保证合适的阻尼特性, 从而防止悬臂梁的振动, 并且提高耐冲击性能。为减小敏感轴之外方向上的灵敏度, 在结构设计上使质量块重心位于应变电阻所在梁的延伸线上。

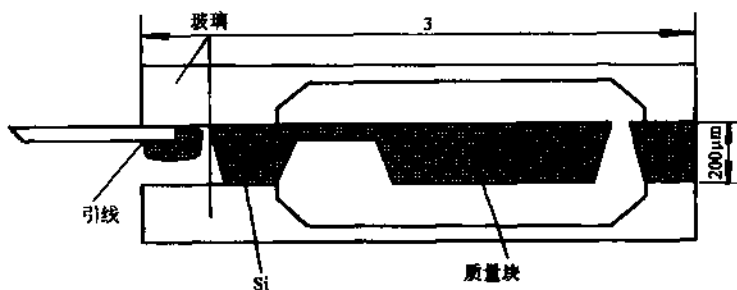


图 8-7 微型加速度传感器结构

图 8-8 所示为 PWM 静电伺服微型加速度传感器的结构原理，加速度通过悬臂质量块的位移引起上下电容容量的变化被检测出。当施加电压时，电容电极亦具有作为静电致动器的功能。因此，可以用静电引力平衡掉加速度产生的力，构成伺服系统保持质量块处于中间位置不变。在此利用脉宽调制(PWM)方法控制加于电极上的致动电压，而电压的时间域脉宽与被测加速度成正比。该加速度传感器不但有利于解决悬臂梁厚度的制作误差所致灵敏度难以一致的问题，而且具有可用电信号改变测量范围、扩展频带宽度的特点。

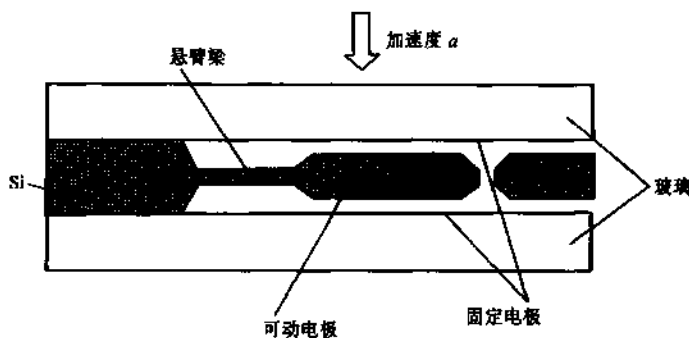


图 8-8 PWM 静电伺服微型加速度传感器

Cornell 大学研制的微型近场隧道加速度传感器如图 8-9 所示。采用近场隧道探针显微镜的传感原理，可使微型加速度计的性能在灵敏度和谐振频率上大幅提高。

理论上，将探针与加速度传感器的弹性支撑的质量块相距到 1nm ，如果施加 100mV 很小的偏压，就会产生隧道电流。加速度导致弹性支撑的质量块发生位移，引起隧道电流按指数关系变化，这就是近场隧道加速度传感器的基本原理。为改善传感器动态性能，通常采用力反馈保持隧道电流(1nA)的恒定。若选择静电力控制质量块的位置以保持隧道电流恒定，作用在质量块上的静电力和惯性力的合力必须为一常数。因此，加速度引起的惯性力的变化可以通过静电平衡力的改变检测出。

横向近场隧道加速度传感器的基本设计如图 8-9a 所示，探针前端的局部照片如图 8-9b 所示，这里制作的探针实际上是一个薄臂梁。 $7\mu\text{g}$ 的质量块由四根长 $200\mu\text{m}$ 、宽 $2\mu\text{m}$ 、高 $13\mu\text{m}$ 的弹性杆支撑，探针与质量块的间距为 $1.2\mu\text{m}$ 。具有 500 梳齿的静电梳状致动器 A 在 15V 偏压驱动下可使探针与质量块的间距消除，分别具有 50、5 个梳齿的致动器 B 和 C 进行质量块运动的精微控制。

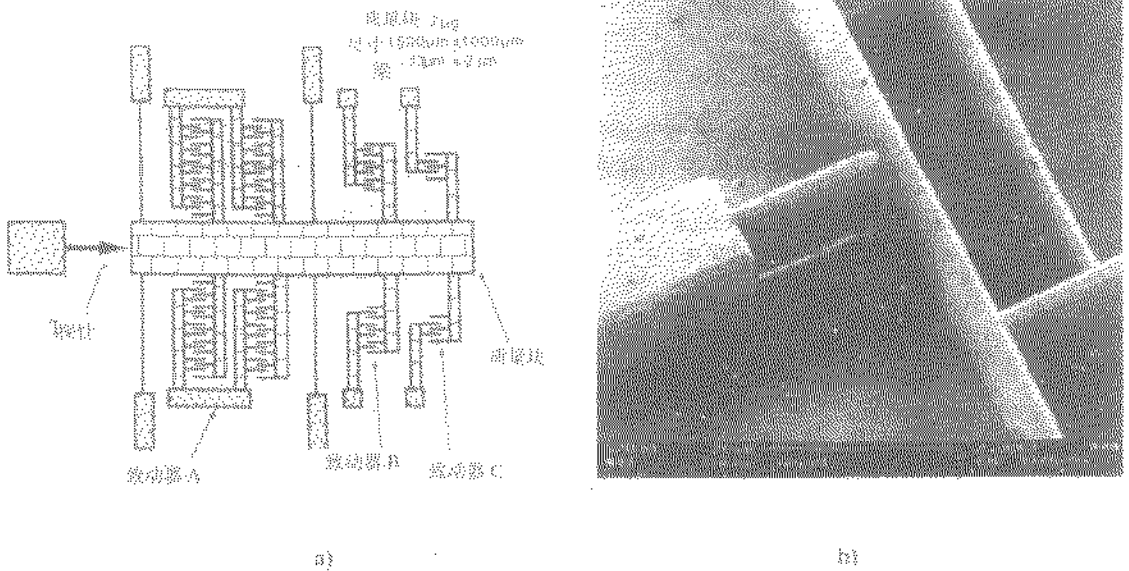


图 8-9 近场隧道加速度传感器

2.3 微型陀螺仪

低成本的硅微型陀螺仪(角速度传感器)可望应用于汽车上的防撞气囊系统和自动刹车系统、以及摄像机的颤动补偿等。

在用于角速度检测的微型陀螺仪中,其激励原理主要涉及压电、静电和电磁致动,其检测方法通常包括压阻、压电和电容传感等。

以地球和空间应用为目标,研究开发惯性导航系统达 50 余年的美国 Charles Stark Draper 实验室较早采用硅微细加工制造陀螺仪。通常机械陀螺采用旋转轮作为惯性件,考虑到摩擦力的影响,微型陀螺更适宜采用无相对摩擦的振动原理。常规的音叉陀螺早已实际应用多年并且技术成熟,其微型化首先得到尝试。Draper 最初在硅片上电蚀镍作为振动件,改进了的第二代采用单晶硅和玻璃材料,第三代是在硅上制作多晶硅结构。图 3-10 所示为梳状致动音叉陀螺仪的结构原理,其中振动速度 $V = \omega y_A$ 是致动角频率 ω 和振幅 y_A 之积。输入角速度 Ω 产生的哥氏力(Coriolis Force) F_1 和 F_2 使振动质量块相对基底一个趋向上方,一个向下。该陀螺仪振动部分的尺寸约为 1mm,输出信号由质量块和基底之间的电容传感器检测。在进一步改进机械结构和电子驱动检测电路的基础上,可能达到 60Hz 带宽 1.745rad/h 的性能指标。

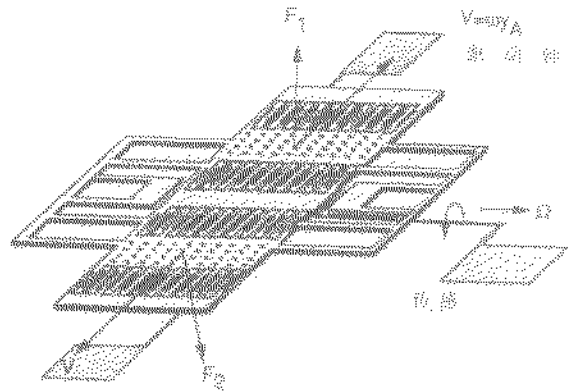


图 8-10 微型梳状致动音叉陀螺仪

图 8-11 所示为一种采用压阻传感、电磁致动的谐振陀螺仪的结构原理。该设计特点之一是与已经实际应用的微型压力传感器和加速度传感器的检测和制作,甚或封装工艺兼容。工作原理基于音叉原理,如图 8-11a 所示,使两个音叉臂在所处平面内反相振动,当一旋转运动加于音叉平行轴线时,由于哥氏力的作用音叉振动将偏离其所处平面,测量该偏差变形值即可测

图 8-11 所示为一种采用压阻传感、电磁致动的谐振陀螺仪的结构原理。该设计特点之一是与已经实际应用的微型压力传感器和加速度传感器的检测和制作,甚或封装工艺兼容。工作原理基于音叉原理,如图 8-11a 所示,使两个音叉臂在所处平面内反相振动,当一旋转运动加于音叉平行轴线时,由于哥氏力的作用音叉振动将偏离其所处平面,测量该偏差变形值即可测

出哥氏力的大小从而检测出旋转速率。哥氏力 F_c 与音叉质量 m 、反相振动速度 v 和旋转角速度 Ω 的关系如下：

$$F_c = 2\Omega mv$$

结构设计如图 8-11b 所示，当旋转运动加于陀螺仪时，由哥氏力导致的两质量块超出其平面的振动被置于支撑臂上的 P 型应变电阻感知，并经构成的惠斯登 (Wheatstone) 电桥检测。电磁激励原理亦见图 8-11b，当交变电流 I 通过位于质量块上的长为 L 的导线时，电流与其垂直的磁场 B 作用产生洛伦兹力 F_L ：

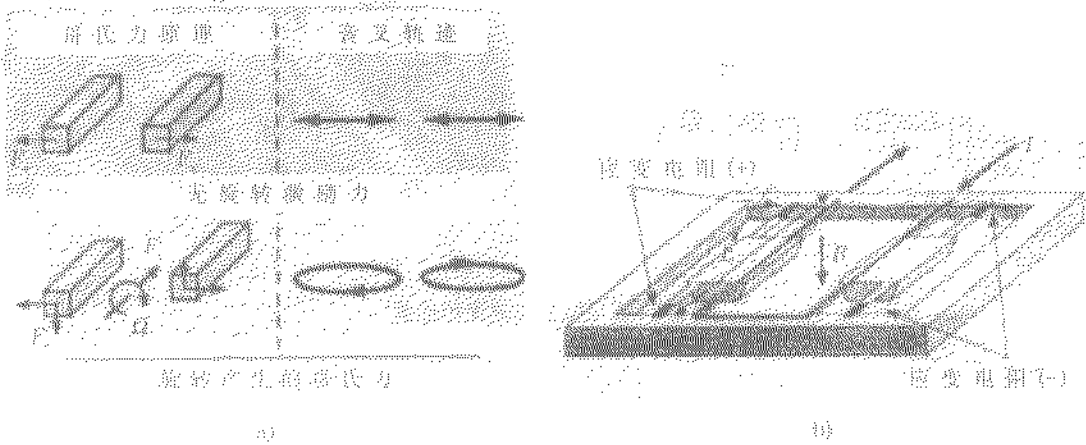


图 8-11 微型电磁振动谐振陀螺仪

$$F_L = I \cdot B$$

电流导线的 U 形设计保证了两个质量块的反相振动。

在角速度变化为 $-13.0875 \sim 13.0875 \text{ rad/s}$ 的测量实验中，陀螺仪样机的输出非线性仅为 $0.04\% \sim 0.19\%$ ，而对于质量块尺寸为 $2000 \mu\text{m} \times 1000 \mu\text{m} \times 360 \mu\text{m}$ 的陀螺仪，其分辨率为 $229.226 \text{ mV}/(\text{rad/s})$ 。

微型陀螺仪对于汽车应用一般所要求的分辨率和偏置稳定性约为 0.001745 rad/s ，但对于惯性导航以及一些家电产品应用，则需要优于 $0.01745 \sim 0.1745 \text{ rad/h}$ 。使微型陀螺仪达到这样高的精度并不容易，需要新的设计和技术开发。

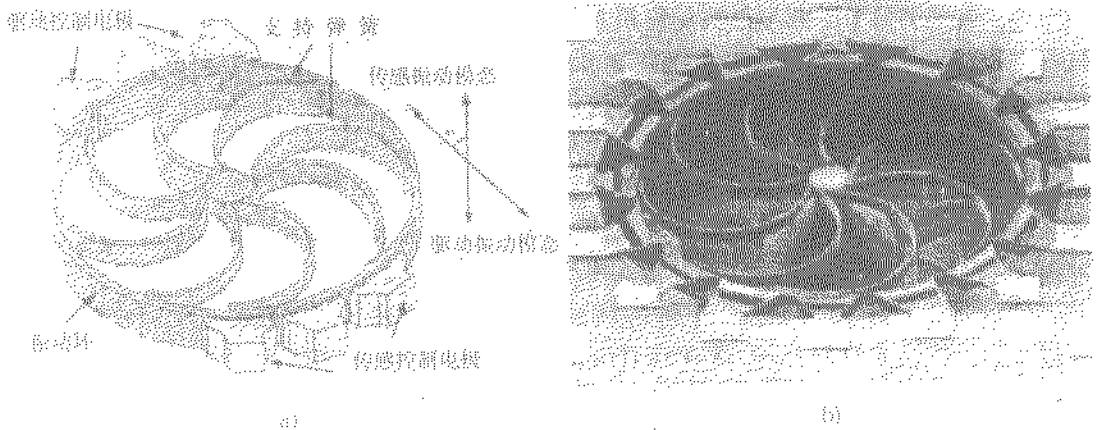


图 8-12 微型环状陀螺仪

a) 陀螺仪的结构 b) 陀螺仪的实物照片

图 8-12a、b 所示为一环状振动陀螺的结构设计和实物照片，该陀螺主要由一个圆环、半圆形弹性支撑、以及驱动、传感和控制电极组成。圆环受静电力驱动以固定振幅在椭圆形的一

阶挠曲模态振动, 当受旋转时, 哥氏力的能量使一阶挠曲模态振动改变为偏转 45° 的二阶挠曲模态振动, 引起振幅线性变化, 用电容检测出振幅的改变, 从而可知相应的角速度。

环形结构的对称性使其对伪振动不敏感; 由于两个具有相同谐振频率的挠曲模态振动用于检测旋转运动, 陀螺的灵敏度被结构的品质因数放大, 即灵敏度更高; 又由于挠曲模态振动受同样温度影响, 振动圆环对温度变化不敏感。

3 微型致动器

微型致动器指将电能转换为机械运动的微型换能器。就致动原理而言, 包括静电、电磁、压电、超声、形状记忆合金、化学、热和光致动等。随着微型机械加工技术的研究开发, 各种各样新颖的微型构件、机构或系统不断问世, 愈加突出微型致动器作为驱动源的核心地位。

当机械的微小化达到 1mm 以下的尺寸领域时, 支配机械运动的物理环境发生变化。若物体的特征尺寸 L 缩小至 $1/10$ 时, 体积 V 变小至 $1/1000$, 而表面积 S 则为 $1/100$ 。即随着尺寸 L 的减小, 相对而言与体积有关的惯性力变小, 与表面积成正比的粘性力所占比重变大。因此, 在微小物体的运动中, 摩擦或流体的粘滞阻抗成为主要影响因素, 微小世界的尺寸效应 (scaling) 显著。

从驱动方面考虑, 与尺寸的 3 次方以下成比例关系的驱动原理可以使致动器单位体积的力输出随尺寸减小反而增大、提高致动效率。在常规或宏观机电系统中, 电磁→机械能量转换方式的致动器——电驱马达的应用最为普遍。与电磁能量转换相比, 静电型换能机构由于能量密度低而很少实际应用。但是, 随着微小化, 静电换能显示出其优越之处, 因为固体绝缘材料的击穿电场强度随着绝缘厚度变薄而上升。例如, 对于 SiO_2 很容易得到 $2\text{MV}/\text{cm}$ 的绝缘击穿强度, 这可以换算为 $7 \times 10^5 \text{J}/\text{m}^3$ 的能量密度, 与 1.3T 磁场能量密度相当, 对应的静电引力可达 0.65MPa 。也由于其电压驱动、易于集成和控制的特点, 以及半导体微细加工技术的发展, 特别是牺牲层刻蚀技术的开发, 为静电致动器的研制提供了可能的技术背景, 使静电致动在微型致动器的研究开发中占据突出位置。

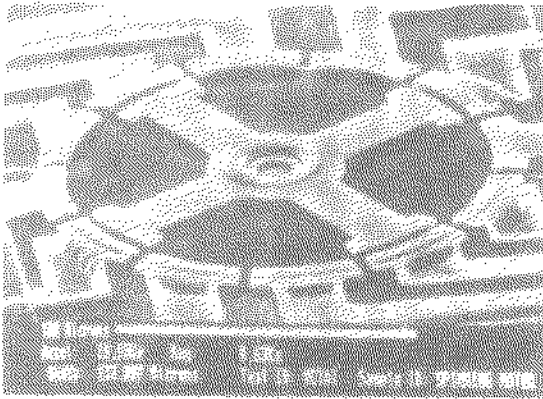
根据尺寸效应分析, 在微致动中, 静电力、热膨胀力等可能优于电磁力。基于静电、压电、形状记忆合金、热膨胀等多种原理的微型致动器与半导体加工、LIGA 工艺、特种微细加工技术等不同实现手段结合表现出各自的特色。微型致动器的研究开发无论从致动原理还是运动形式上, 呈现出各种各样、多姿多态。

3.1 微型旋转/角位移致动器

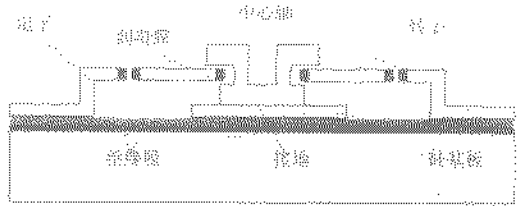
美国 California 大学 Berkeley 分校率先制作出的微型静电同步马达如图 8-13 所示, 图 8-13a 为其扫描电子显微镜 (SEM) 照片, 图 8-13b 为剖面结构示意图。如图所示, 十字形的转子直径为 $120\mu\text{m}$, 定子配置在其外围, 并被分割为 12 个电极。相邻每三个电极联接在一起, 构成三相四电极的静电马达。利用结构材料层和牺牲层的巧妙组合, 转子嵌入中心轴槽中, 悬浮于基板之上与基板不接触, 定子电极的高度与转子相同或稍高, 以避免转子受向下的力。转子的轴与其接触部生长有 Si_3N_4 膜, 以减少摩擦。

该微型静电同步马达的转子和定子的间隔为 $2\mu\text{m}$ 。顺序施加电压于三相定子, 受静电引力作用转子连续转动。施加 200V 电压得到 $150\text{r}/\text{min}$ 的转速。由于摩擦的影响, 仅达到了理想性能的千分之一, 理论计算上 200V 电压时, 应有 $120000\text{r}/\text{min}$ 的转速。

MIT 亦进行了微型静电同步马达的研究, 改进制作出直径 $100\mu\text{m}$, 厚 $2\mu\text{m}$ 的多晶硅微型静



a)



b)

图 8-13 微型静电马达

a) 静电同步马达照片 b) 静电同步马达结构示意图

电同步马达并进行了动作分析，详细地讨论了制作过程。大量成功地制作出长时间可靠转动的马达，在一个硅片上一次制作出 7000 个微型马达，MIT 的马达与 UCB 相比转速由 300r/min 达到 1000r/min 以上，寿命由 3min 延长至 168h 以上。

清华大学研制出的微型静电马达，直径为 120 μm ，间隙 2~4 μm ，最低起动电压 93V，最高转速 239r/min，寿命 10 万转以上。为减小摩擦，设计了线接触的曲颈状轴承结构，在转子下的硅衬底上集成了光伏器件，为转速与动特性测量提供了方便。

微型致动器特别是微型马达面临的最大问题是摩擦力大，轴向尺寸小，几乎无输出功率。在旋转型致动器中为减小摩擦开发了滚动结构，变滑动摩擦为滚动摩擦。图 8-14 所示为一种滚动式微型马达，其转子直径 495 μm ，外镀 30.5 μm 厚的绝缘氧化膜。电火花加工的定子内径 572 μm ，外径 1.6mm，高约为 10mm，分为 8 瓣沿圆周均布。转子接地，在定子和转子间施加电压，静电引力使转子沿定子内径而滚动。当施加电压 300V 时，自转转速可达 50~15500r/min，输出力矩为 $1.3 \times 10^{-6} \text{N}\cdot\text{m}$ 。

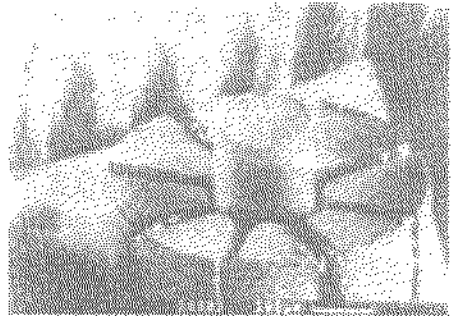


图 8-14 滚动式微型马达

美国 MIT 利用表面微细加工工艺制作出直径 100 μm 的滚动马达，如图 8-15 所示，该马达的设计与通常的滚动马达不同。转子绕中心轴而不是沿外圈定子滚动，因此省去了转子与定子间的绝缘层。与通常的滚动马达相比，该马达转子转动方向与驱动信号一致，减速比与定子内径无关，而由中心轴径及其与转子的间隙决定，增大减速比并不直接导致输出力矩的增大。转子与轴径间隙小可减小相对滑动，减小转子摆幅，减小气隙击穿的可能性，由此引起的力矩的减小可通过增大轴径来补偿。

硅微细加工平面工艺的特点不利于线圈的绕制，限制了微型电磁马达的实现。美国 CIT 巧妙地设计了如图 8-16a 所示的平面线圈结构，实现了一种如图 8-16b 所示的集成制作在硅片上的电磁式微型马

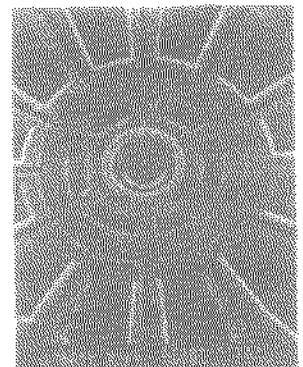


图 8-15 内滚动式微型马达

达。以聚酰亚胺为构造材料和电镀模具，制作出直径 $500\mu\text{m}$ 、高 $40\mu\text{m}$ 的铁镍合金转子和高为 $120\mu\text{m}$ 的铁镍合金定子。当以 500mA 的电流施加于单个定子时，转子旋转 12° ；当顺序施加三相脉冲电流 200mA 于定子时，马达转子连续旋转。马达的旋转速度和方向可分别由驱动电源的频率和相位调节。已观测到的连续旋转速度达 $500\text{r}/\text{min}$ ，但这并不是该马达的最高转速，仅因所用控制器的输出频率有限。在 500mA 驱动电流的情况下，预计该马达的输出力矩为 $1.2 \times 10^{-6}\text{N}\cdot\text{m}$ 。

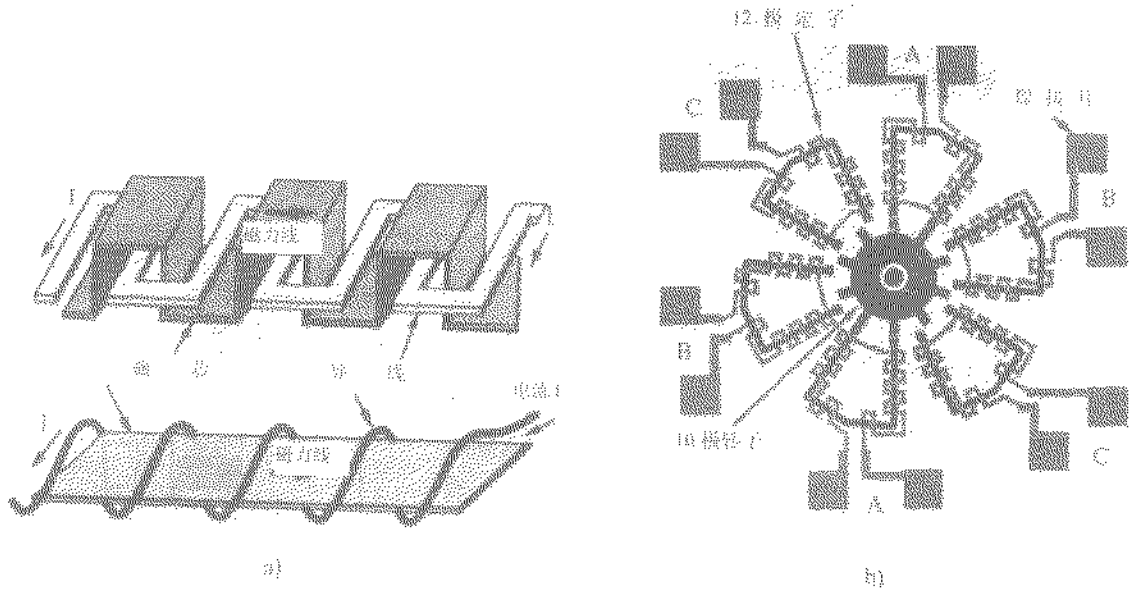


图 8-16 微型电磁马达

a) 平面线圈结构 b) 电磁式微型马达

日本东芝电气公司制成直径仅有 0.80mm 的电磁式马达。该马达采用线圈与磁铁轴向配置的构造以减小径向尺寸，其中 $\phi 0.25\text{mm}$ 的线圈利用录像头线圈的绕线技术，在直径 0.1mm 的铁心上绕 20 匝 $\phi 0.03\text{mm}$ 的导线制成。磁铁等部件利用精密数控及微细线切割电火花加工实现。在 1.7V 的驱动电压下，实现转速 $60 \sim 10000\text{r}/\text{min}$ 。

3.2 微型直线/振动型致动器

在旋转型致动器中，为减小摩擦，采取了在相对运动接触面间选择减摩材料、变滑动为滚动等措施。而在直线运动致动器中，弹性变形、磁悬浮或气浮等方式将有效减小或消除摩擦的不利影响。

弹性变形沿与基板垂直方向的致动器，存在动作范围有限、空气阻力大以及运动传递困难等缺点，主要应用于后述的微型阀和微型泵中。

运动方向与基板表面平行一致的微型静电谐振直线致动器如图 8-17 所示。弹性支撑部分处于连接两个梳状部分为一体的中轴的两侧，每侧通过 4 根梁（长度为 $100\mu\text{m}$ ）支撑梳状可动部分，其中间的 2 个梁的一端固定在基板上，外边的 2 个梁与梳状部分连接。可动梳齿与固定梳齿的间距为 $2 \sim 3\mu\text{m}$ 。在梳齿间施加电压，梳齿向吻合长度增加的方向移动。施加 40V 直流与 10V 交流叠加的电压于两梳状的驱动部，可使可动部至共振状态。当支撑梁的长度为 $200\mu\text{m}$ 时，振幅约为 $10\mu\text{m}$ ，谐振频率为 18kHz 。而当支撑梁的长度为 $80\mu\text{m}$ 时，谐振频率达 75kHz 。图 8-18 所示为同样原理的谐振扭转致动器，可动部分由中心的 4 个弹簧梁支撑，直径为 $1\mu\text{m}$

的圆环外分布 4 组可动梳齿与外圈固定的同心圆梳齿啮合。

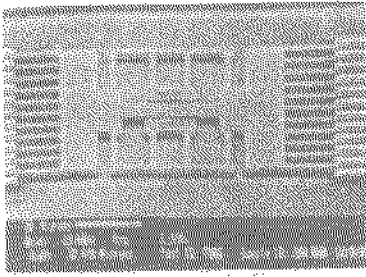


图 8-17 微型静电谐振直线致动器

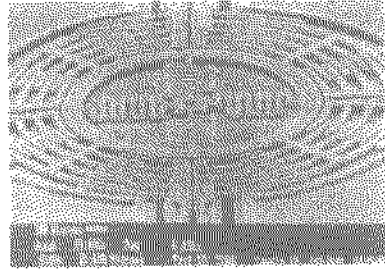


图 8-18 微型静电谐振扭转致动器

这种梳状结构一方面作为致动器，同时可利用谐振频率随加于振子上的力、质量的变化而变化的原理用作谐振型传感器。

利用压电致动快速变形的惯性冲击的致动器，以简单的结构，可实现 $2\mu\text{m} \sim 10\mu\text{m}$ 的微小步进运动。可用于高位移分辨率的微动工作台、细胞操作装置等。其结构和运动原理如图 8-19 所示。压电致动器 A_c 的两端连接大小不同的二个质量块 M 和 m ，作为移动主体的质量块 M 置于滑动导轨平面上，作为惯性驱动用的质量块 m 连接于压电致动器并被悬空。蠕动运动循环如下：

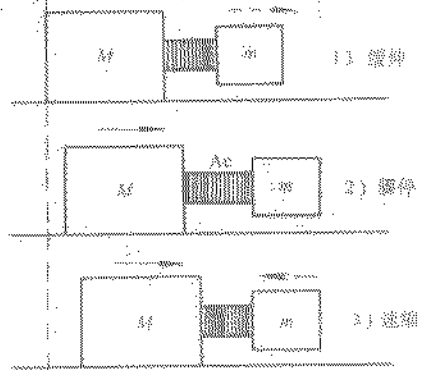


图 8-19 压电惯性冲击致动原理

1) 首先驱动压电致动器 A_c 沿轴向缓慢伸长。此时由于 m 产生的惯性力与移动主体 M 和导轨平面之间的静摩擦力相比小得多， M 静止不动。

2) 使压电致动器 A_c 伸长到一定程度时突然停止。惯性质量块 m 具有的动量使包括压电致动器 A_c 、质量块 M 和 m 的机构整体开始向右移动。

3) 接着使压电致动器 A_c 急速轴向收缩。由于机构整体重心偏移，导致移动体 M 进一步右移。

循环步骤 1) ~ 3) 的操作，即可实现大行程的直线运动。而其反向运动和移动速度的调

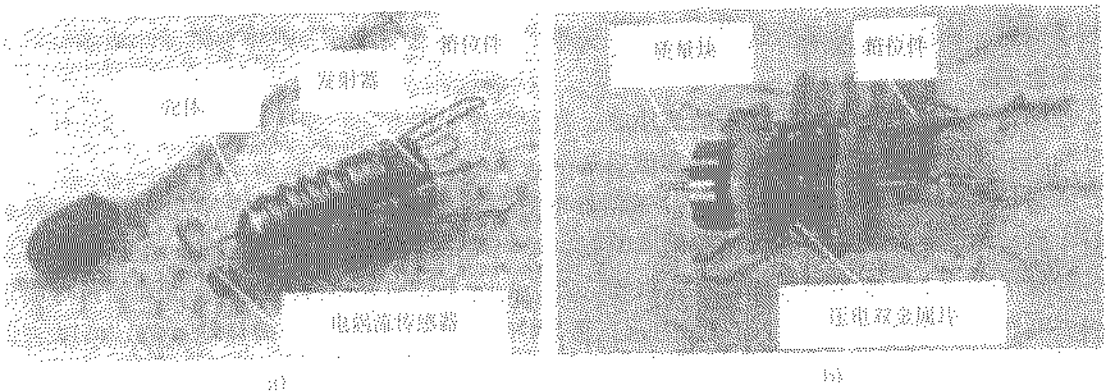


图 8-20 压电惯性冲击致动器
a) 机器人 b) 改进型致动器

节仅通过改变加于压电致动器 A_c 上的电压控制波形即可实现。

压电致动惯性冲击的微型致动器适用于管道内检查作业的微型机器人。图 8-20a、b 所示为采用压电惯性冲击运动原理的管道内检查作业的微型机器人和改进型致动器，微型机器人的致动件为层叠压电块，改进型的致动件为双金属结构的压电片。双金属结构的压电驱动原理如图 8-21 所示，双金属片结构具有放大输出位移和减小输出力的特点，但在该致动器设计中，输出力可以靠增加双金属压电片的个数保证。图 8-20b 所示的致动器的外形尺寸为 $48\text{mm} \times 17\text{mm}$ ，该致动器与层叠压电块驱动相比，其功耗减小到原来的 $1/80$ ，速度快 2.5 倍，有利于无线微型管道机器人的实现。

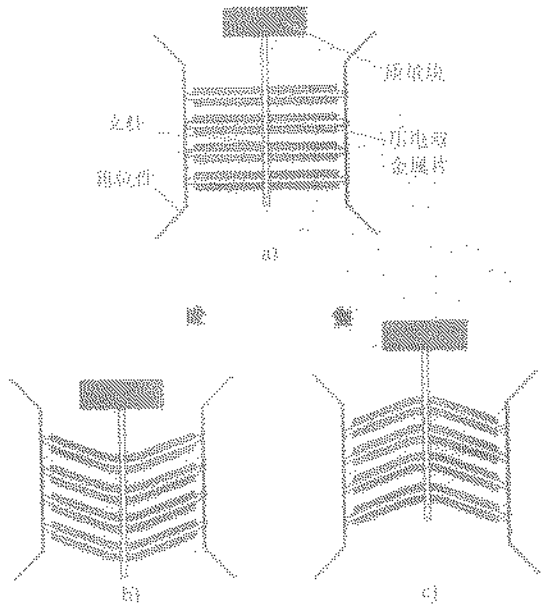


图 8-21 双金属压电片惯性冲击驱动原理

a) 无驱动电压 b) 施加正向电压 c) 施加反向电压

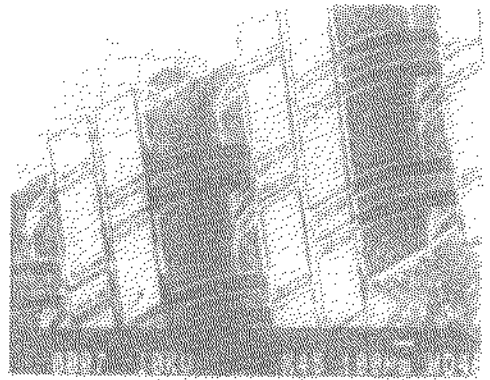


图 8-22 人工纤毛致动器阵列

微型机械或微型机电系统(MEMS)的长处不仅在于自身尺寸微小，还在于可以将传感器、电路以及致动器等同时集成制作。图 8-22 为利用双金属片结构的热驱动人工纤毛阵列。采用的表面微细加工方法，使单元制作工艺过程相对简单。首先在硅基板上沉积铝牺牲层，然后涂敷一层聚酰亚胺(polyimide)并经光刻和 O_2 干法刻蚀成形为悬臂梁，在悬臂梁上制作出镍加热器，再用一层不同热膨胀系数的聚酰亚胺覆盖成形。由于制作过程中温度变化使两层聚酰亚胺材料中残余应力不同，常温状态下悬臂梁呈上翘形状。当悬臂梁结构的纤毛长为 $500\mu\text{m}$ 、宽为 $100\mu\text{m}$ 、厚度为 $6\mu\text{m}$ 时，输入电力 30nW ，垂直方向变形 $70\mu\text{m}$ ，水平方向变形 $120\mu\text{m}$ 。将这种阵列与电子控制电路集成，以如图 8-23 所示的控制方法，四个纤毛为一控制单元，通过协调控制各个单元纤毛的上下动作，可以沿平面任意方向移动上载物体。

一种仿肌肉的分布型静电致动器的结构设计如图 8-24 所示。每个致动单元如图 8-24a 所示，由相互绝缘的波状电极构成，输出变形由静电引力和结构的弹性决定。将每个致动单元如图 8-24b 所示机械串联、电并联驱动，致动器可实现较大的运动行程和力输出。

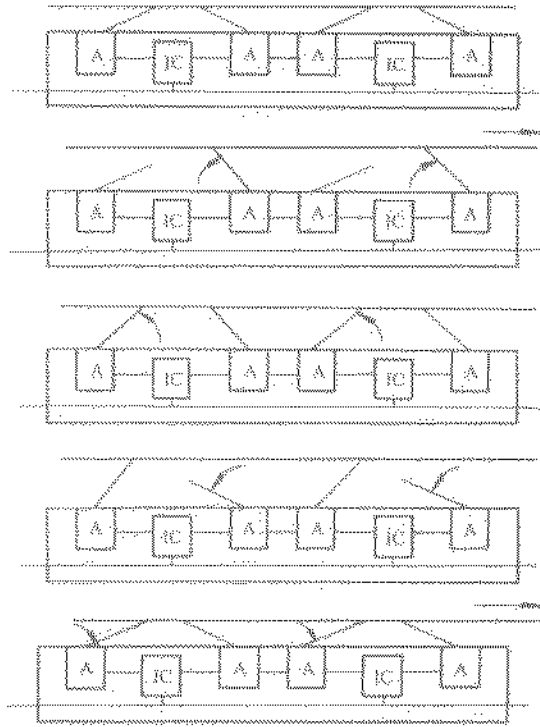


图 8-23 人工纤毛细动器阵列运动原理
A—致动器 IC—集成电路

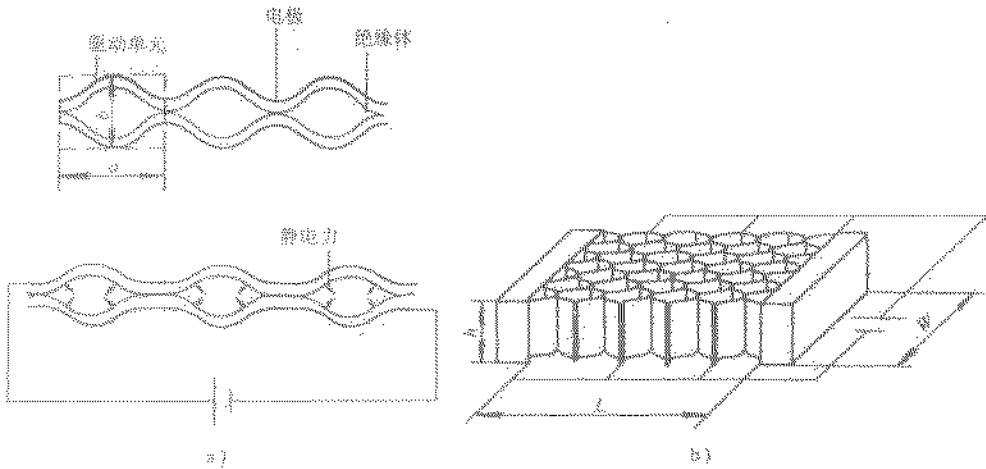


图 8-24 分布型静电致动器

4 微量流体控制器件与系统

微量流体控制系统具有集成化与大批量生产的可能性，由于尺寸小可减少无效体积，耗能低，且响应快有利于提高控制精度。微量流体控制系统主要由微型泵、微型阀以及微流量传感器等构成。微型主动阀、微型泵亦可单独构成开环的微量流体控制系统，集成微流量传感器的

闭环控制系统可能实现更高的微量流体控制性能。

4.1 微型阀

图 8-25 所示为一种薄膜悬臂梁结构的静电致动微型阀，其阀口和阀膜片尺寸分别为 $24\mu\text{m}$ \times $60\mu\text{m}$ 和 $350\mu\text{m}$ \times $390\mu\text{m}$ ，阀膜片的厚度约为 $1\mu\text{m}$ 。其主要制作工艺过程是在双面抛光的 (100) 硅片上沉积成形 Si_3N_4 结构、金属电极及牺牲层，再用等离子体刻蚀出阀膜片边缘和出口通道至牺牲层，然后用 KOH 溶液异向刻蚀硅基板，最后选择蚀除掉牺牲层。该阀在施加 30V 电压时，可控 15kPa 的压力和 150mL/min 的流量，并能承受 101kPa 的背压。

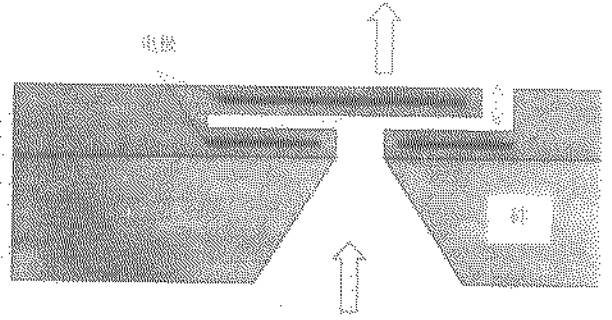


图 8-25 薄膜悬臂梁结构的静电致动微型阀

美国 IC Sensors 公司研制的双金属片结构电热致动微型阀较早实现了产品化，其结构原理如图 8-26 所示。两种热膨胀系数不同的薄膜材料硅和铝，当通电加热时，因热膨胀伸长量不同导致垂直方向弯曲变形，断电时薄膜弹性回复，从而控制微型阀的开启和关闭。该微型阀的硅膜厚 $10\mu\text{m}$ ，直径为 2.5mm，铝层厚 $5\mu\text{m}$ ，常开间隙为 $4\mu\text{m}$ 的阀可控 0.2MPa 的气流，允许最大流量约为 85mL/min。

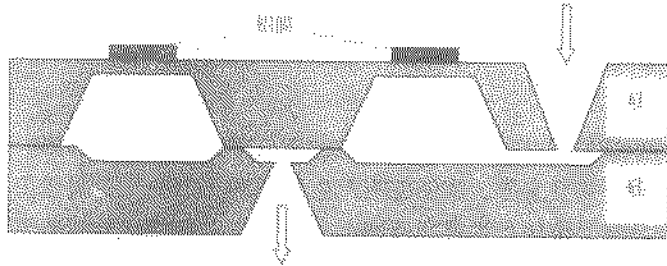


图 8-26 双金属片结构电热致动微型阀

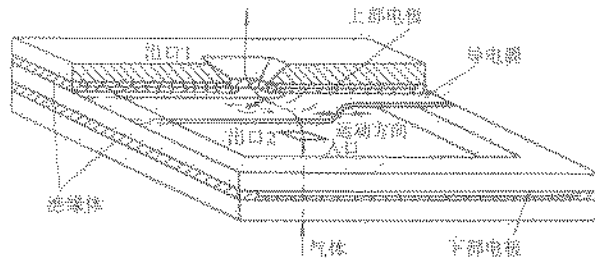


图 8-27 静电驱动大变形薄膜微型阀

微型阀的阀膜片或阀堵多利用硅薄膜的变形达到开关的目的，其变形通常小于 $20\mu\text{m}$ ，尽管施加很大的致动力，也大部消耗在膜片的弹性变形上。日本日立制作所开发出一种如图 8-27 所示的微型阀，在两个平面电极中绝缘地置一 S 形导电薄膜，薄膜厚 $5\mu\text{m}$ 、宽 $12\mu\text{m}$ 、电极间距为 $2.5\mu\text{m}$ ，大变形阀膜片结构使静电致动亦能实现大的位移而不减弱致动力。设计制作的二通阀可用于高流量、高压力控制，当阀口尺寸为 $45\mu\text{m}$ \times $45\mu\text{m}$ 时，施加 250V 电压，可控

0.3MPa 的气体。三通阀通过改变阀出、入口的尺寸以及施加电压的大小,可实现适用于分子束外延等设备的低压力、高流量气体控制(60Pa,10mL/min)。

微型阀的反向泄漏是影响单向控制阀性能的重要因素。图 8-28 所示为减小反向泄漏的微型阀的结构设计和实物照片,阀堵和阀孔的自对准结构设计以及接触表面的纳米级制作工艺使该阀的反向泄漏极小,当在 1Pa 压力下流量范围为 $4.0 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$ 至 $3.2 \times 10^{-4} \text{m}^3/\text{s}$ 时,反向泄漏仅为 $5.8 \times 10^{-10} \text{m}^3/\text{s}$ 。

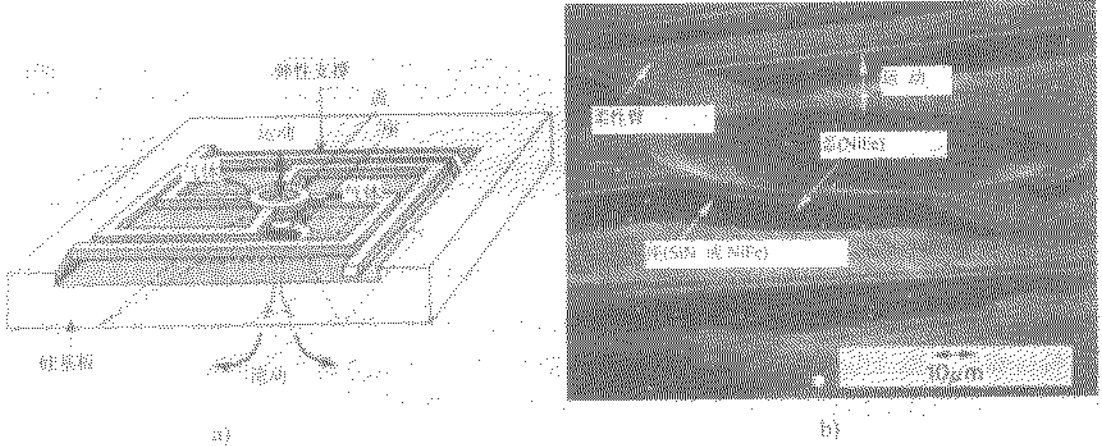


图 8-28 减小反向泄漏的微型阀

a) 结构设计 b) SEM 照片

4.2 微型泵

由微细加工技术的特点以及尺寸效应所决定,微型泵以薄膜结构设计居多。微型薄膜泵的基本工作原理是由致动器导致薄膜弹性变形,使泵腔内产生体积和压力变化。通过出、入口的单向阀的主动或从动的控制,从而使气、液体产生定向流动。迄今已有多种类型的薄膜泵、蠕动泵、电液动力泵以及利用锥形细管内正反向流动的压降不同的原理设计的无阀泵等研究成果发表问世。

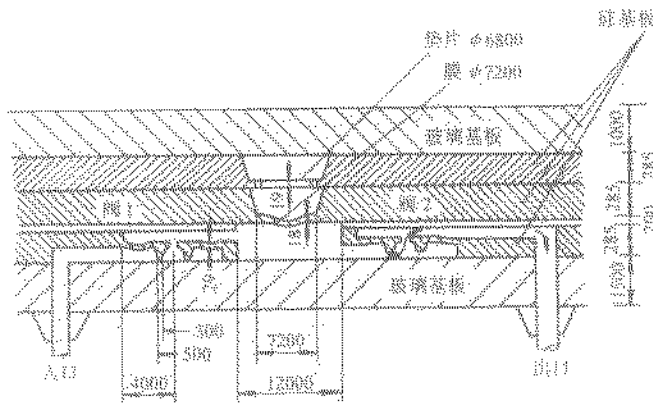


图 8-29 热气动微型薄膜泵(图中尺寸单位为 μm)

图 8-29 所示为荷兰 Twente 大学研制的热气动薄膜泵。硅与玻璃及硅与硅利用阳极键接方法迭合在一起。泵本体部分由一薄膜和二个单向阀构成,薄膜向下弯曲时,流体由出口侧单向

阀压出；薄膜向上弯曲时，流体由入口侧单向阀吸入。薄膜的上部有一密闭的空腔，其中气体由加热器加热膨胀而使薄膜下弯；停止加热，气体收缩，自身的弹性力和下面的流体压力使薄膜向上。该泵的驱动电压和功率消耗分别小于 10V 和 2W，在施加 0.5Hz、6V 的电压时，泵的最大输出流量为 34 μ L/min，出口最大压力约为 4.9kPa。

德国 Fraunhofer 研究所开发的静电致动微型薄膜泵的结构如图 8-30 所示，其外形尺寸为 7mm \times 7mm \times 2mm。致动膜厚 25 μ m，面积 4mm \times 4mm，与电极间距 4 μ m。单向阀口尺寸为 400 μ m \times 400 μ m。在无背压的情况下，当施加电压 170V、频率 26Hz 时，实现流量 70 μ L/min。施加矩形波或正弦波交变电压，静电引力和薄膜弹性力的共同作用使泵腔薄膜往复运动。薄膜的运动改变泵腔内的体积，导致泵腔内压力的变化。当泵腔内压力减小时，入口阀开启，出口阀关闭，吸入流体；当泵腔内压力增大时，入口阀关闭，出口阀开启，流体排出。流体的吸入和排出的循环，使流体定向流动，即实现泵的功能。

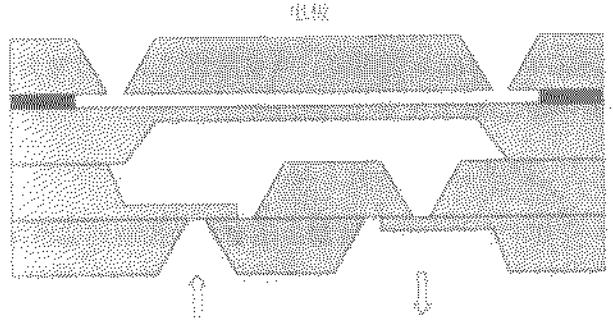


图 8-30 静电致动微型薄膜泵结构

电液动力泵无需运动部件，从而有可能简化泵的制作，提高其可靠性。电液动力泵是利用外加电场与液体中自由电荷的相互作用产生使液体流动的动量的 MIT 设计的电液泵利用温度梯度在液体中诱导自由电荷。德国 Fraunhofer 研究所研制的电液动力泵如图 8-31 所示，核心部分是两个相叠的体硅异向性刻蚀出的栅格结构，其致动利用库仑力对液体中离子的作用，而由电极进入液体的离子产生于电化学反应。施加电压时，产生于电极的离子在相向电极的吸引下运动，从而带动液体一起流动。在相距 350 μ m 的 3mm \times 3mm 栅格上施加 800V 电压时，得到 14ml/min 的流量。驱动电压为 700V 时的最大背压为 2.5kPa。经过性能改善，电液泵的栅格电极间距小至 10~60 μ m，从而降低驱动电压至 10~30V。



图 8-31 电液动力泵

利用锥形细管内正反向流动的压降不同的原理设计的无阀泵使薄膜泵的制作简单并可以高频率工作。图 8.32a、b 所示为一并联无阀泵的结构及工作原理图，泵腔前后的锥形管道代替

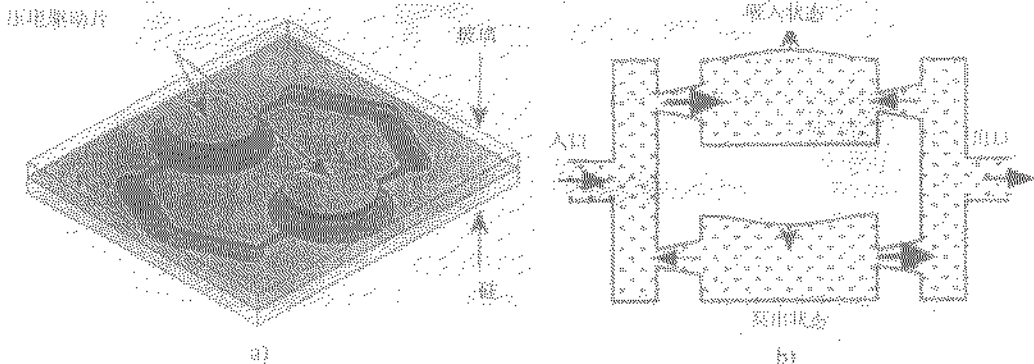


图 8-32 无阀泵

a) 无阀泵结构 b) 无阀泵原理

了一般薄膜泵的两个单向阀。泵腔和锥形管道采用深度反应离子刻蚀 $80\mu\text{m}$ 。出入口采用体硅刻蚀加工。以水为流体, 尺寸为 $\phi 3.8\text{mm} \times 0.2\text{mm}$ 的压电圆片在接近泵的谐振频率(约为 $3 \sim 4\text{kHz}$)驱动 $\phi 6\text{mm}$ 的泵腔, 当锥形管道最小口宽为 $80\mu\text{m}$ 、长 1mm 、锥角 7° 时, 实现泵的最大背压 74kPa , 最大流量 $2.3\text{mL}/\text{min}$ 。

4.3 微量流体控制系统

日本东北大学在研制出压电驱动控制的微型泵和三通阀的基础上, 较早尝试集成的微量化学分析系统。微型泵和三通阀的主要结构包括两个硅片中间夹一层玻璃片及外置的压电致动器, 可控流量为 $0.1 \sim 70\mu\text{L}/\text{min}$ 。

荷兰 Twente 大学开发出将微型泵与微流量传感器集成的微量液体释放系统。图 8-33 所示为系统概念示意图。采用双面体硅刻蚀工艺, 热气动薄膜泵和基于热流速检测原理的微流量传感器集成制作在同一硅片上。该系统可控流量在 $\mu\text{L}/\text{min}$ 范围, 并易于进一步与其他混合、检测等微量流体控制器件集成。

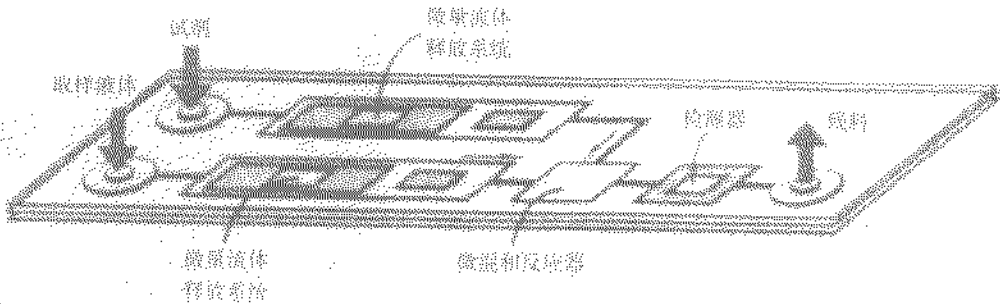


图 8-33 微量液体释放系统概念

瑞士 Neuchatel 大学研制的微量流体控制系统, 当液体流经流量传感器的悬臂梁端部的窄缝时, 液体的粘滞力使悬臂梁变形, 由应变片可检出出口流量。该系统当压力变化为 10kPa 的情况下, 通过微型泵可控 $10 \sim 100\mu\text{L}/\text{min}$ 的输出流量, 保持输出稳定。

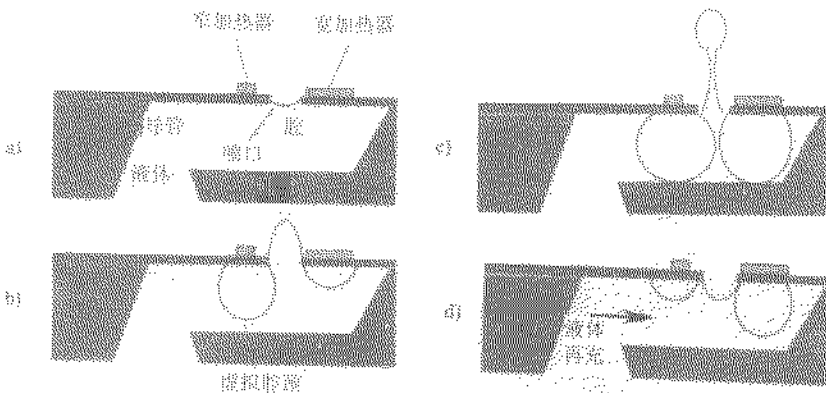


图 8-34 微喷射结构原理

a) 液体加热 b) 虚拟腔颈形成 c) 液滴喷射 d) 消气和液体再充入

液滴喷射广泛用于喷墨打印并且在燃料喷射、细胞分类、药液输送系统、直接打印光刻以及微喷射推进系统等方面具有潜在应用前景。采用热气泡驱动液滴喷射技术简单易于实现, 图 8-34 所

示为一新颖的微喷射结构原理，旨在构成高性能的微喷射阵列用于燃料、空气的充分混合。液体由硅基板背面通过集流腔进入泵腔，气泡由脉冲电流加热产生，将液滴通过喷嘴喷射出。加热电阻位于泵腔之上而不是像通常那样置于底部防止了热量向基板的传递损失。该设计的一个最大特点在于位于集流腔一侧的加热电阻比泵腔一侧的窄。

当脉冲电流通过上述两个串联的加热电阻时，窄的产生气泡快，在其下形成一个虚拟腔颈阻塞集流腔，并在宽的加热电阻开始产生气泡时隔离泵腔。由于第一个气泡的隔阻作用，随着第二个气泡的膨胀形成液滴喷射。随着两个气泡的生长，最终它们相遇在一起切断液滴的尾部，有效地防止了附带液滴的产生。液滴喷射后，在集流腔一侧的气泡首先消失，开启虚拟腔颈，液体迅速再充满泵腔。

该微型喷射器的制作由体硅和表面微细加工结合实现，不需要通常必须的粘接工艺。其频率特性可超过 2kHz，并可构成高分辨率(1200dot/in)的微型喷射阵列。

图 8-35 所示为精工 Epson 开发的静电致动喷墨打印头的结构原理。喷墨打印机虽然占据打印机市场的 65%，主要采用了热和压电致动机构，但存在各自的缺点。热致动寿命有限且当构成喷嘴阵列时功率消耗过大，压电致动的喷墨头尺寸难以缩小。图 8-35 所示的静电致动喷墨机构由于采用完全的硅微细加工技术和简单的平行板结构，制作精度高、尺寸小，静电致动使功率消耗亦非常小，可以较高的喷嘴密度制成 1000 以上的喷嘴阵列。如图 8-35a 所示，静电致动器主要由压力膜板和与其平行相对的电极板构成。当施加电压时，静电引力使压力膜板变形接触电极板，墨水通过节流口进入喷墨腔；当驱动电压减小到 0 时，压力膜板弹性回复，将墨经喷嘴喷出。

该喷墨打印头由硅微细加工而成，静电致动器平行板电极的制作间隙控制在 $(0.2 \pm 0.015) \mu\text{m}$ 。驱动电压为 38V，频率可达 3kHz。喷墨效果均匀，在驱动频率范围至 3kHz、温度变化范围为 10~40℃ 的条件下，液滴重量保持在 $0.12 \mu\text{g}$ 以上，变动量小于 10%。每个喷口的计算平均电流功耗仅为 $50 \mu\text{A}$ ，由于完全的批量制作的静电致动，该喷墨打印头功耗小、尺寸薄且小。

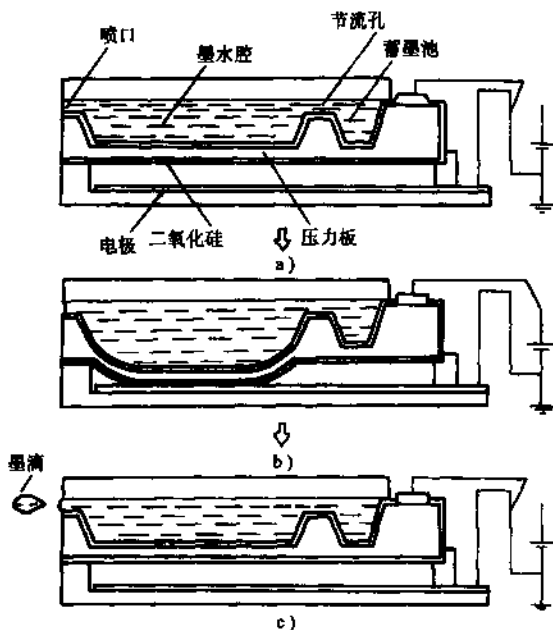


图 8-35 静电致动喷墨打印结构原理
a) 未通电状态 b) 施加电压后压力膜板变形(吸墨) c) 电压减小到 0, 压力膜板恢复

第4篇 精密测量和质量保证

精密测量技术是精密加工发展的基础和先决条件之一，这已被生产发展的历史所确认。从生产发展的历史来看，精密加工精度的提高总是与精密测量技术的发展水平相关的。由于有了千分尺类量具，才能使加工精度达到 0.01mm ；有了测微比较仪，才能使加工精度达到 $1\mu\text{m}$ 左右；有了圆度仪，才能使加工精度达到 $0.1\mu\text{m}$ ；有了激光干涉仪，才能使加工精度达到 $0.01\mu\text{m}$ 。目前，国际上机床的加工水平已能稳定地达到 $1\mu\text{m}$ 的精度，正在向着稳定精度为 $0.1\sim 0.01\mu\text{m}$ 的加工水平发展，表面粗糙度的测量则向 $0.001\mu\text{m}$ (1nm)的水平发展，纳米技术正在形成新的技术热点。有人认为材料、精密加工、精密测量与控制是现代精密工程(包括宇航)的三大支柱。对于科学技术来说，测量与控制是使其发展的促进因素，测量的精度和效率在一定程度上决定着科学技术的水平。

目前，在基础工业的某些领域方面，例如研究切削速度与进给量对加工误差的影响，磨损等，精密测量已成为不可分割的重要组成部分；在电子工业部门，精密测量技术也被提到从未有过的高度。例如，制造超大规模集成电路，要求在 1mm^2 的面积上就集成1000个以上的晶体管，线条宽度仅在 $1\mu\text{m}$ 左右，尺寸误差为 $0.1\mu\text{m}$ ；在制造掩模原版的图形发生器，其定位精度要求达到 $0.1\mu\text{m}$ 。所以要研究这种集成电路的装备，必须有高精度测量用的测量和定位系统。如在阿发家德罗基础常数的测定中，不仅要求X射线干涉仪的工作台能在 0.01nm (10^{-11}m)的分辨力下连续移动，而且在 50mm 的位移行程上的角偏量为千分之几的弧秒级。此外，在高纯度单晶硅的晶格参数测量中，以及对生物细胞、空气污染微粒、石油纤维等基础研究中，无不需精密测量技术。

第9章 精密测量技术

1 精密测量原理

1.1 测量的一般概念

测量是为确定被测对象的量值而进行实验的过程。更具体地说，就是将被测量与一个作为测量单位的标准量进行比较，以求其比值的过程。测量过程可以用一个基本公式来表示，即

$$L = ku \quad (9-1)$$

式中 L ——被测长度(被测量)；

u ——长度单位(标准量)；

k ——比值。

式(9-1)称为测量的基本方程式，它说明被测值 L 等于所采用的长度单位 u 与测量的比值 k 的乘积，例如 u 为 mm ， k 为20，则被测长度为 20mm 。

一个完整的测量过程应由下述四部分组成，即测量过程四要素。

(1) 测量对象和被测量 测量的对象是多种多样的,不同的测量对象有不同的被测量,如孔和轴的主要被测量是直径,箱体零件的被测量有长、宽、高以及孔间距等;螺纹零件的被测量有螺距、中径、牙型半角等;复杂的零件还有复合的被测量,如丝杠和滚刀的螺旋线误差等,无论零件的形状如何不同,被测量的参数如何复杂,从几何量测量的本质来说,均可归结为长度和角度,以及它们的组合。

被测对象和被测量的特性是设计测量方法的主要依据。在被测量和标准量的比较过程中,对被测量的分析研究是非常重要的。

(2) 测量单位和标准量 米制的基本长度为米(m)。精密机械制造中常用的米制长度单位为毫米(mm);精密测量时,多用微米(μm)为单位。

在国际单位制(SI)的7个基本单位中,米是第一个基本单位。1983年10月在第17届国际计量大会上正式通过的米的新定义如下:“米是光在真空中在 $1/299792458$ 秒的时间间隔内所行径的路径的长度。”

国际单位制概括了各门科学技术领域的计量单位,形成有机联系,命名方法简明,科学性很强,使用方便,易于推广。为适应我国国民经济,文化教育事业的发展,以及推进科学技术进步和扩大国际经济、文化交流的需要,我国国务院于1984年2月发布了《关于在我国统一实行法定计量单位的命令》,决定在采用先进的国际单位制的基础上,进一步统一我国的计量单位,规定我国计量单位一律采用《中华人民共和国法定计量单位》。

在测量过程中,测量单位必须以物质形式来体现。常见的能体现测量单位和标准量的物质形式有:光波波长、精密量块、线纹尺、各圆分度盘等。

(3) 测量方法 测量方法是指完成测量任务所用的方法、量具或仪器,以及测量条件的总和。当没有现成的量具或仪器时,需要自行拟定测量的方法,这就需要根据被测对象和被测量的特点(形体大小、精度要求等)确定标准量,拟定测量方案,工件的定位,读数和瞄准方式及测量条件(如温度和环境要求等)。

基本的测量方法有:直接测量和间接测量,绝对测量和相对测量,接触测量和非接触测量,单项测量和综合测量,手动测量和自动测量,工序测量和终结测量,以及主动测量(也叫在线测量)和被动测量等。

(4) 测量精度 由于在测量过程中不可避免地总会存在或大或小的测量误差,使测量结果的可靠程度受到一定的影响。测量误差大,则测量结果的可靠性低;测量误差小,则测量结果的可靠性高。因此,不知道测量精度的测量结果是没有意义的,所以,对每一测量结果,特别是精密测量,都应给出一定的测量精度,有关测量误差及精度的内容将在第4节中讨论。

1.2 精密测量原理

在几何量精密测量中有几个重要的测量原理,即:比较测量原理、长度测量中的阿贝比长原理、角度测量中的正弦正切原理和圆周分度测量中的圆周封闭原则。

1. 比较测量原理

比较测量就是与标准长度进行比较,得到测量结果的测量。

在几何量计量中,一些用于比较测量的仪器,诸如:扭簧比较仪、电感比较仪、立式光学比较仪、卧式光学比较仪等等,通称为比较仪。它是将被测量用仪器进行比较,比较后的所得值,则是被测量相对于某一标准值的偏差值,其原理如图9-1所示。被测量为轴径 D ,量块的尺寸 L 是轴径的标准尺寸,比较仪测量的是被测件相对于标准件(量块)的轴径偏差值 ΔL ,因

此, 轴径的值为

$$D = L + \Delta L \quad (9-2)$$

同样, 对于复杂的形状和运动规律, 也可以通过比较仪与标准件和标准运动比较出其偏差值。

为了比较出偏差值, 测量前, 需用量块或其他标准件预先调整好仪器的零位, 仪器读数装置仅指示出被测的量相对于标准量的偏差值, 为了实现上述测量过程和目的, 通常比较仪需由两部分组成, 一为体现标准值部分, 称作标准件或标准运动部分; 另一为偏差部分。也就是说, 整个比较仪系统应包括标准值的建立和微差读数部分。其中, 偏差部分属于微小量, 为易于辨别, 必须将其放大。因此, 微量放大是比较仪的共同特点。

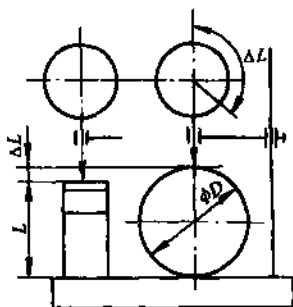


图 9-1 比较测量轴径

2. 阿贝比长原理

1890 年德国人阿贝提出了长度比较的指导性原则: “将被测物与标准尺沿测量轴线成直线排列”。这就是阿贝比长原理。即在长度测量中, 为使测量误差最小, 应将标准量安放在被测量的延长线上, 也就是说: 量具或仪器的标准量系统和被测尺寸应按串联的形式排列。

标准量与被测尺寸有两种布置方案, 现比较如下:

(1) 并联排列方案(图 9-2) 将标准尺和被测尺相距 S 平行放置。由于导轨存在着直线误差, 当读数显微镜架自位置 1 移到位置 2 后产生了偏斜, 以角度 φ 表示, 则由此产生的测量误差

$$\Delta = S \operatorname{tg} \varphi$$

设
则

$$S = 100 \text{mm}, \quad \varphi = 10'' = 0.00005 \text{rad}$$

$$\Delta = S \operatorname{tg} \varphi \approx S \varphi = 5 \mu\text{m}$$

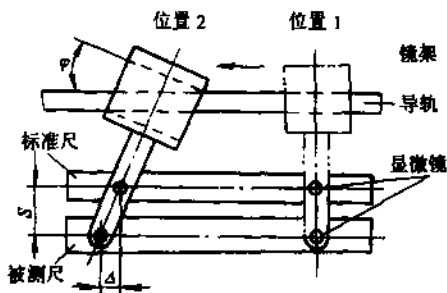


图 9-2 并联排列方案

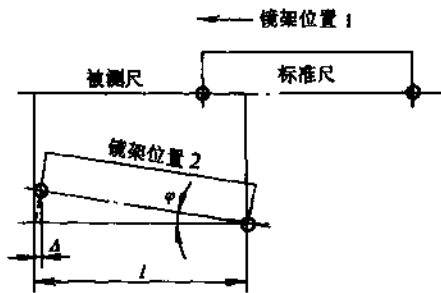


图 9-3 串联排列方案

(2) 串联排列方案(图 9-3) 将标准尺和被测尺串联地放在同一直线上。同样, 由于导轨存在着直线度误差, 当镜架由位置 1 移到位置 2 时(为使图形清楚起见, 将镜架位置 2 的状况画在图的下方)产生了转角 φ , 此时所产生的测量误差

$$\Delta = l (1 - \cos \varphi) \approx \frac{1}{2} l \varphi^2$$

式中 l ——镜架上两个显微镜头的纵向距离。

如 $l = 1000 \text{mm}$, $\varphi = 10''$, 则

$$\Delta = \frac{1000 \times 10^3 \times (5 \times 10^{-5})^2}{2} \mu\text{m} \approx 0.001 \mu\text{m}$$

由两种方案比较看, 并联方案产生的测量误差相当大, 而串联方案产生的测量误差几乎可以忽略不计。可见阿贝比长原则之重要性, 在拟定长度测量的方案时必须首先考虑之。有时, 由于结构上的原因, 在大尺寸测量中难以实现时(譬如要求工作台, 床身太长等), 就应该考虑采取相应措施, 以减少甚至消除由于不符合阿贝原则所产生的误差。

3. 正弦、正切原理

这是由长度值导出角度单位的一种方法。角度定义为两工作面或两相交直线(或线段)间的夹角, 如图 9-4a 所示。当用弧度来表示时, 则角度

$$\varphi = \frac{S}{R} \quad (9-3)$$

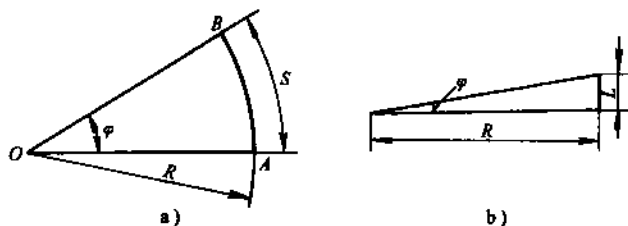


图 9-4 用正弦或正切法导出角度值

式中 S ——弧长;
 R ——圆半径。

如果角度较小, 该角度值可用该角的正弦或正切值来算出(见图 9-4b),

$$\text{即} \quad \varphi = \text{arc tg } \varphi \approx \text{arc sin } \varphi \quad (9-4)$$

因此, 该角度值可以通过测弦长 L 来确定。

(1) 正弦法原理 正弦法是利用正弦规、正弦工作台等, 对角度和锥度进行测量的一种应用广泛的间接测量方法, 其原理如图 9-5 所示。图中 l 为正弦规, 其函数关系为

$$\sin \alpha = H/L \quad (9-5)$$

式中 α ——被测角度的标称值;
 L ——正弦规两圆柱的中心距;
 H ——量块组合尺寸, 其值可由下式计算:

$$H = L \sin \alpha \quad (9-6)$$

用正弦规测量角度和锥度时, 测量误差的大小不仅与正弦规的制造准确度有关, 而且还与所用量块组、指示表、测量点间距 l 等的误差有关。若平板误差为 ΔP , 测微器误差为 Δy , 正弦规工作面与两滚柱正切平面间的平行度误差为 Δh , 则角度测量的总误差为

$$\Delta \alpha = \frac{1}{L \cos \alpha} \Delta H - \frac{\text{tg } \alpha}{L} \Delta L + \frac{1}{L} \Delta P + \frac{1}{L} \Delta y + \frac{1}{L} \Delta h \quad (9-7)$$

式中前二项是通过式(9-4)进行全微分而求得的函数误差。

由上式可以看出, α 较大时, 则 $\Delta \alpha$ 也越大, 当 $\alpha > 45^\circ$ 时, 测量误差会急剧增大。因此,

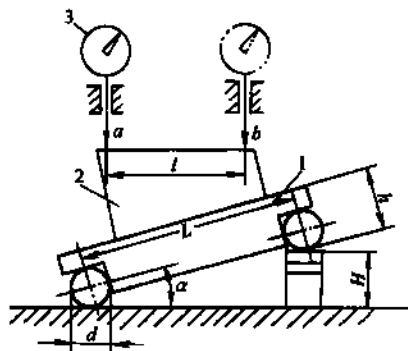


图 9-5 用正弦尺测量锥度
1—正弦规 2—工件 3—指示表

正弦只适应测量 45° 以下的角度。

(2) 正切原理 当不具备正弦尺, 又要求高准确度测量小角度时, 可用正切法测量。

最简单的正切测量是用量块和直尺组成 α 角, 如图 9-6 所示, 则角度 α 可由三角函数关系来求出, 即

$$\operatorname{tg} \alpha = (H - h) / L = \frac{H - h}{l_1 + l_2} \quad (9-8)$$

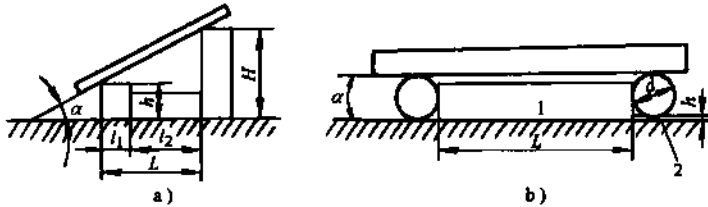


图 9-6 用正切法测量角度

但是, 由于量块倒棱不一致, 这种方法会产生明显的测量误差, 因而准确度低。

除量块与直尺外, 若再添加上滚柱或量针, 按如图 9-6b 所示, 则角度 α 可由三角函数关系求出, 即

$$\operatorname{tg} \alpha = h / (L + d) \quad (9-9)$$

式中 d ——滚柱直径;

h ——量块 2 的尺寸;

L ——量块 1 的尺寸, 亦即两滚柱之间的距离。

正切法用于小角度测量时, 可以得到较高的测量准确度。

4. 圆周封闭原则

对于圆周分度器件(如刻度盘, 圆柱齿轮等)的测量, 利用在同一圆周上所有夹角之和等于 360° , 亦即所有夹角误差之和等于零的这一自然封闭特性, 在没有更高精度的圆分度基准器件的情况下, 可以采用“自检法”来达到高精度测量的目的。下面就以方形角尺四个 90° 角的检定为例, 说明自检法的原理。

将方形角尺垂直放置在一个基面上(图 9-7), 以角 φ_1 的一面为定位面, 由自准直仪对准角 φ_1 的另一面, 调整自准直仪使其读数为零, 即角 φ_1 的读数 $e_1 = 0$ 。然后, 以 φ_1 角为定角, 用 A 表示, 将其他各被测角与 A 进行比较, 得出相应的读数 e_2 、 e_3 、 e_4 。各被测角的实际值为

$$\Delta \varphi_i = A + e_i$$

设 φ_i 对公称角(90°)的误差为 $\Delta \varphi_i$, 即 $\varphi_i = 90^\circ + \Delta \varphi_i$, 则

$$\Delta \varphi_i = \varphi_i - 90^\circ = (A + e_i) - 90^\circ = \Delta A + e_i$$

式中 $A - 90^\circ = \Delta A$ 为定角 φ_1 的误差, 于是可以列出下列各式:

$$\Delta \varphi_1 = \Delta A + e_1$$

$$\Delta \varphi_2 = \Delta A + e_2$$

$$\Delta \varphi_3 = \Delta A + e_3$$

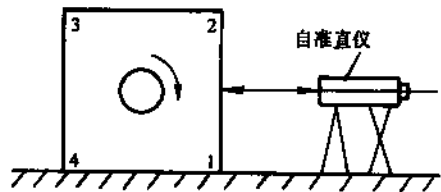


图 9-7 方形角尺的自检法

$$\Delta\varphi_4 = \Delta A + e_4$$

将各式等号两边求和可得

$$\sum_{i=1}^4 \Delta\varphi_i = 4\Delta A + \sum_{i=1}^4 e_i$$

由自然封闭条件可知 $\sum_{i=1}^4 \Delta\varphi_i = 0$, 所以

$$\Delta A = -\frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 e_i \quad (9-10)$$

知道了定角误差 ΔA , 因而四个角的实际偏差皆可求出, 即

$$\Delta\varphi_i = \Delta A + e_i \quad (9-11)$$

1.3 制定测量方案时应考虑的若干因素

1.3.1 被测对象和被测量的特性

被测对象的特性包括其大小、形状、重量、材料、批量及精度要求等。在几何量的测量中, 正由于被测对象是多种多样的, 所以有种类繁多的测量方法。因此, 在拟定测量方法时, 必须对被测对象的这些特性进行充分的研究和分析。

根据被测对象的尺寸、形状、重量等因素, 对于一般中小尺寸工件, 可放在仪器上测量, 而大尺寸工件就应考虑将量仪放在工件上进行测量。根据工件材料的软硬程度, 可决定是否采用接触式测量; 根据被测工件的批量大小, 可考虑是否需要设计专用测量装置。

根据各种几何特性所规定的定义来确定正确的测量方法, 这是个很重要的前提, 这对于复合几何量尤为重要, 如齿轮的齿形、轴向齿距及丝杠的螺旋线测量等。

此外, 在测量某一被测量时, 除了首先要了解它本身的特点外, 还须了解它和其他被测量的相互关系, 并研究怎样才能避免其他量对该被测量的测量时的影响。

例如, 对于圆柱形工件的半径或直径, 理论上单值尺寸, 但由于它必然有形状误差和表面粗糙度的影响, 因而在圆周上各处的实际尺寸是变动的。如将它装在顶尖上用指示表连续一周地测其半径时, 可能得到如图 9-8 所示的复杂曲线, 这说明除了直径这一主参数外, 还存在其他次要参数的影响。

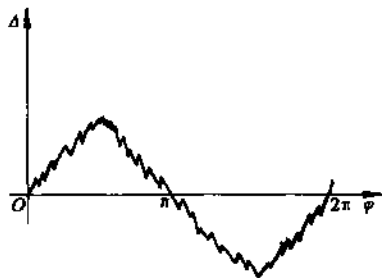


图 9-8 其他参数对半径
(或直径)测量的影响

为消除图 9-8 所示的误差曲线中其他量的影响, 用谐波分析法可将各项误差分离出来, 通常第一阶波为偏心; 第一阶波为椭圆度; 第三阶波为棱圆度等各种影响。

也可从测量方法上消除, 如图 9-9 所示, 当圆柱体在顶尖中测量时, 如只用单测头测量轴的半径, 则必然存在偏心影响, 为消除偏心的影响, 可采用双测头浮动原理, 即浮动架 1 可在导轨 2 上浮, 而下测头在弹簧 3 的作用下始终与工件 4 保持接触, 这样, 指示表 5 所得的总是直径的变化量, 不受偏心的影响, 而指示表 6 所得则为偏心量影响半径的变动量, 指示表 6 的最大最小读数之差即为偏心量的二倍。

从该例可看出, 为消除各被测量的相互影响, 在拟定测量方法时必须认真考虑。

1.3.2 测量力的影响

1. 表面的接触变形

测量力是指测量时工件表面承受的测量压力,由于各种材料受力后都会产生压缩变形,这种变形量看起来不大,但在精密测量中,尤其对小尺寸零件就必须予以考虑。在检验标准中,规定了测量过程中应视测量力为零。如果测量力不为零,则应考虑由此而引起的误差,必要时应予以修正。

为了减少测量力的影响,可从以下两方面考虑:

(1) 采用相对测量法(即利用条件相同的两次读数法) 在这种情况下虽有变形,由于两次读数中相互补偿,故不影响测量结果。例如在三针法测量螺纹中,若能以一标准螺纹来对准,则测力影响便可忽略不计。但应注意只有当调整条件和测量条件完全一致时才能补偿。例如在立式光学计上用平面测头测钢球,若用量块对零点,这时是面接触,测力影响甚微,而测量时是点接触,显然条件不一致,所以不能完全补偿。

还应说明是,采用相对测量法后,只能减小测量力的影响,而不能根本消除,因为还存在测力变化的影响。因此在考虑测量方案时,常要求仪器的测量力稳定,如采用重锤产生的测量力就比弹簧产生的力稳定。测力波动较大时,不宜用于测量跳动之类的参数,否则误差就增大。

(2) 减小测量力和改善对测量力有影响的因素 从变形计算公式来看,测力越大变形也越大,因此减小测量力是减小因测力的影响而产生误差的主要途径。此外,加大测头直径或选用平测头,也可减小此种影响。在卧式测长仪中采用电眼指示装置,可使测力接近于零。

一般情况下,可根据被测工件的标准公差来规定测力的大小,其关系如下:工件公差 $\Pi < 2\mu\text{m}$ 时, $F < 2.5\text{N}$,

$\Pi = 2 \sim 10\mu\text{m}$ 时, $F < 4\text{N}$;

$\Pi > 10\mu\text{m}$ 时, $F < 10\text{N}$ 。

2. 纵向变形及弯曲变形

一根长杆或一个大量块水平安放时,如果承放表面绝对平整,则可避免弯曲,否则只好采用水平支承的方法(图 9-10)。不同的支承方法,重力的影响也不同。

1) 测量两端面的距离为 L 时,变形量最小的支承点可按式确定:

$$a = 0.2232L \approx \frac{2}{9}L \quad (9-12)$$

$$b = 0.5536L$$

这种支承点称作白塞尔点。

2) 测量两端间平行度的最小变形公式

$$a = 0.2113L \approx \frac{4}{19}L \quad (9-13)$$

$$b = 0.557L$$

这种支承点常称作艾利点。

对于支承在顶尖上的工件,由自重引起的弯曲变形(μm)可按下式计算:

$$f = 2.8 \frac{\gamma L^4}{Ed^2} \times 10^{-4} \quad (9-14)$$

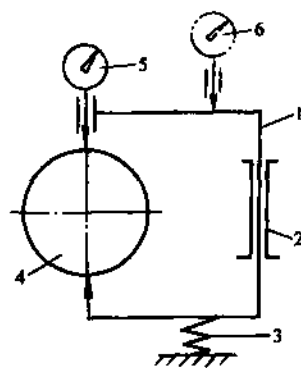


图 9-9 消除偏心影响的测量方法
1—浮动架 2—导轨 3—弹簧
4—工件 5、6—指示表

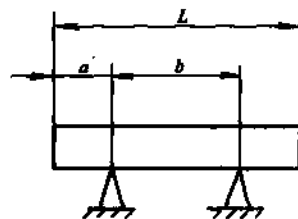


图 9-10 水平支承

当中点受力时，由测力引起的弯曲变形(μm)为

$$f = 425 \frac{FL^4}{Ed^4} \times 10^{-5} \quad (9-15)$$

式中 F ——测力(N);
 L ——工件长度(mm);
 γ ——材料的密度(g/cm^3)
 d ——工件直径(mm);
 E ——材料的弹性模量(N/mm^2)。

由上述公式可知：变形量与工件长度 L 及半径比 L/d 成正比，即 L 越长，长径比越大的零件，此项弯曲不能忽视。例如：1m 长的心棒， $d = 40\text{mm}$ ，其弯曲变形量 f 达 $47.5\mu\text{m}$ ，如长度减小一倍即 $L = 500\text{mm}$ ，则 f 被减小 16 倍，即 $f = 3\mu\text{m}$ 。由此可以说明，在一般万能工具显微镜(行程 $100\text{mm} \times 200\text{mm}$)上，此项误差可以忽略不计。

1.3.3 测量环境

测量环境是指在测量时的外界条件，如温度、湿度、气压、振动、气流、灰尘、腐蚀气体等因素。随着测量精度的提高，对这些因素的控制也要求越严。

1. 温度误差

温度误差在环境影响中占首要地位，由于物体本身具有热胀冷缩的物理特性，因此在不同的温度条件下，被测工件的尺寸也会不同，在大尺寸的精密测量中，温度的影响应作为主要的考虑因素。要精确测定工件尺寸，而没有指明温度条件，那是没意义的。我国规定的标准温度为 20°C ，即测量时的工件和量仪的温度均以 20°C 为准。但在实际中，无论是加工还是测量往往都不是 20°C ，因而产生一定的测量误差。这种误差可通过物理学公式计算出来，从而可对测量结果进行修正。该公式为

$$\Delta L = L [\alpha_1 (t_1 - 20^\circ\text{C}) - \alpha_2 (t_2 - 20^\circ\text{C})] \quad (9-16)$$

式中 L ——工件的被测尺寸(mm);
 ΔL ——由于温度和线胀系数不同而引起的测量误差(mm);
 α_1 ——工件材料的线胀系数;
 α_2 ——量仪材料的线胀系数;
 t_1 ——工件的温度($^\circ\text{C}$);
 t_2 ——量仪的温度($^\circ\text{C}$)。

式(9-16)一般只用于形状较简单的工件、标准件和量仪。对形状复杂的被测件和结构复杂的量仪，由于实际热胀冷缩的情况不简单的线胀规律，无法进行可靠的误差修正。因此，对精密测量都采用恒温措施，此时温度还允许在较小范围内波动，故仍将产生较小的是有随机性质的测量误差。它应按下式估算：

$$\Delta L = L \sqrt{(\alpha_1 - \alpha_2)^2 (t_1 - 20^\circ\text{C})^2 + \alpha_2^2 (t_1 - t_2)^2} \quad (9-17)$$

由公式可知，当被测工件的长度 L 一定时，随着两者的线胀系数之差和温度差的增大，其误差 ΔL 也增大。下面以 $L = 1000\text{mm}$ 的工件为例，来比较不同情况下的 ΔL 值。

1) 线胀系数和温度均不同，如 $t_1 = 18^\circ\text{C}$ ， $t_2 = 21^\circ\text{C}$ ， $\alpha_1 = 11.5 \times 10^{-6}$ (钢)， $\alpha_2 = 23 \times 10^{-6}$ (铝合金)。此时 $\Delta L = -0.046\text{mm}$ 。

2) 温度相同，但线胀系数不同，如 $t_1 = t_2 = 21^\circ\text{C}$ ， α_1 和 α_2 与上同。得 $\Delta L = -0.015\text{mm}$ 。

3) 线胀系数相同，但温度不同，如 $\alpha_1 = \alpha_2 = 11.5 \times 10^{-6}$ ，而 $t_1 = 16^\circ\text{C}$ ， $t_2 = 19^\circ\text{C}$ 。得 Δ

$L = 0.0345\text{mm}$ 。

4) 线膨胀系数相同, 温度相同, 如 $\alpha_1 = \alpha_2 = 11.5 \times 10^{-6}$, $t_1 = t_2 = 23^\circ\text{C}$ 。此时 $\Delta L = 0$ 。

由以上比较可知: 第四种情况下的 $\Delta L = 0$, 说明 $\alpha_1 = \alpha_2$ 时, 只要二者的温度一致, 即使不是 20°C , 也不致产生测量误差。而前三种情况的 ΔL 值都比较大, 其中第二种情况稍好, 即 $t_1 = t_2$, 而 $\alpha_1 \neq \alpha_2$ 。从分析可看出, 影响测量误差的主要因素是工件和量仪的温度差。为了减小这种影响, 在测量前应使工件和量仪进行等温, 即将工件和量仪放在同一温度条件下, 经过一定时间使二者的温度与周围环境的温度保持一致。

产生温度差的原因主要是由对流、传导和辐射而引起。由对流而引起的环境温度变化, 如开门窗、人员进出、空调装置所供应的气流不均匀等; 由传导而引起的误差最典型的是测量者用手拿工件和量具, 身体靠着仪器等, 例如直径为 175mm 的卡规, 用手握 15min , 就会产生 $\Delta L = 0.008\text{mm}$ 的变化。因此, 为消除手热的影响, 在测量时不应用手直接接触工件, 而要用木夹或戴上棉线手套拿工件。在高精度测量时更应该注意, 例如对 $L = 20\text{mm}$ 的量块, 用手指拿 30s 时, $\Delta L = +0.5\mu\text{m}$, 如戴上橡皮手套, 则 $\Delta L = +0.2\mu\text{m}$, 如对温差有更高要求时, 还需做第二次定温。

辐射热的影响是指外界的热源, 或者比周围介质温度高的物体, 例如光学仪器的照明光源, 甚至阳光、采暖设备以及测量者的呵气等, 对这些影响都应予以注意, 并应采取必要的措施尽量减少或避免。

2. 其他环境因素的影响

除温度这一主要因素外, 还应注意下列因素的影响, 例如: 大气压在 0.1MPa (760mmHg), 室内的相对湿度应控制在 $(50 \sim 60)\%$ 范围以内; 应避免外界振动产生的影响, 例如计量室应有防振措施, 使仪器远离振源(如大功率电动机等), 仪器下面垫以厚橡皮等。此外, 为了保持仪器的工作精度, 还应注意防尘和防腐蚀气体等。

上述诸因素, 只能根据不同测量精度要求控制在一定的变动范围以内, 但在现代高精度测量中往往还不能满足要求。例如在激光光波干涉测长仪中, 由于波长 λ 受空气折射率 n 的影响, 而 n 又受气压、温度、湿度的影响, 为了使这些因素的影响最小, 人们在连续自动测量中, 对它们也进行了实时的控制和测量, 并通过计算机处理对测量结果直接进行修正。

2 典型几何量的测量方法与仪器

2.1 常见的几何量测量仪器

2.1.1 光学比较仪

光学比较仪又称光学计。立式光学计的测量范围为 $0 \sim 150\text{mm}$, 其示值范围为 $\pm 0.1\text{mm}$ 。因此一般只能用作比较测量, 通常用来测量 5 等、6 等量块和高精度圆柱形工件的外尺寸及形状误差等。

立式光学计是利用光学杠杆放大原理, 将微小的位移量转换为光学影像的移动。图 9-11 为立式光学计的原理图, 它是利用正切机构和自准直原理结合而成的放大测微器。图中 1 为物镜组,

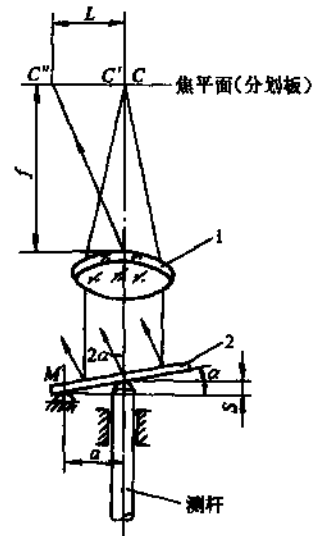


图 9-11 立式光学计原理图

在此物镜焦平面的光轴上有一目标 C ，目标 C 发生的光线经物镜后成为一组平行光线，当反射镜 2 与光轴垂直时，这组平行光按原路返射回来，成象在 C' 且与目标 C 相重合，如果反射光线成 2α 角反射回来，经物镜成象于焦平面上的 C'' 位置，设 $C'C'' = L$ ，则

$$L = f \cdot \operatorname{tg} 2\alpha$$

式中 f ——物镜的焦距，一般取 $f = 200\text{mm}$ 。

此时，测杆的位移量 S 与反射镜 2 的倾角 α 的关系为

$$S = a \cdot \operatorname{tg} \alpha$$

式中 a ——测杆轴线与反射镜 2 的摆动轴心 M 间的距离，一般取 $a = 5\text{mm}$ 。

光学杠杆的放大比 k 为

$$k = \frac{L}{S} = \frac{f \cdot \operatorname{tg} 2\alpha}{a \cdot \operatorname{tg} \alpha} \quad (9-18)$$

将上式二倍角展开并略去二次以上的高次项，可近似得出

$$k = \frac{2f}{a} (1 + \operatorname{tg}^2 \alpha)$$

将 $\operatorname{tg} \alpha = \frac{S}{a}$ 代入得

$$k = \frac{2f}{a} \left(1 + \frac{S^2}{a^2} \right) \quad (9-19)$$

由式(9-2)可以看出，光较仪的放大比为二次曲线。象点的位移 L 为

$$L = k \cdot S = \frac{2f}{a} \left(S + \frac{S^2}{a} \right) \quad (9-20)$$

这是一条直线和一条三次曲线的合成。 L 与 S 成非线性关系。

严格地说，为了正确反映测杆位移 S ，其刻度尺的分度不应是等分。但因转角很小，测杆的位移量也很小（仅为 $\pm 0.1\text{mm}$ ，不包括自由行程），由此引起的原理误差最大为 $\pm 0.04\mu\text{m}$ 。所以实际仪器的刻度尺是按 $K = 2f$ 的线性关系等分刻划的。目镜式立式光学计的外形结构如图 9-12 所示，有带投影筒和不带投影筒两种。其主要构成由工作台、底座、立柱、横臂、光源和光学计管六部分。除目镜式立式光学计外，还有投影式立式光学计和数显式光学计，其工作原理是一样的，只是在读数方式上，一种比一种更先进和方便。

2.1.2 电感式比较仪

电感式比较仪是采用电感器将尺寸的微小变化转换成电信号进行测量的一种仪器。它也像机械式和光学式测微计一样，既可单独使用，也可以安装在其他仪器上作测微装置使用。单独使用时，应把它安装在测量台架上，如图 9-13 所示。测量时，先用标准件或量块调整仪器，使其电表指零。然后再换上工件进行测量，电表指示值就是工件相对于标准件的偏差。电感式比较仪可以测量工件的厚度、内孔、外径、直线度、平面度、平行度、垂直度和跳动等。

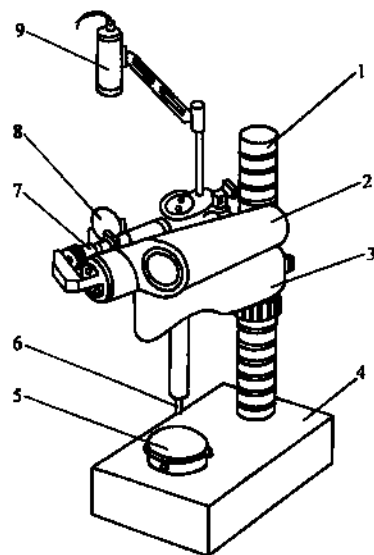


图 9-12 带投影筒的目镜式立式光学计

- 1—立柱 2—投影筒 3—横臂 4—底座
5—工作台 6—测杆 7—光学计管
8—反光镜 9—光源

与其他仪器配合使用可以测量齿形误差、圆度误差等。与继电控制装置配合使用，可以实现自动检验分类。使用两个传感器时可实现和差演算测量，并能减小(或消除)工件的定位误差及由于测量装置的移动、温度变化、工件回转等造成的误差。可以看出，电感式比较仪的用途极为广泛，它的准确度高、重复性好、结构简单、测量力也较小，也可使用不同档次满足不同精度的零件的测量需要。

尽管电感式比较仪的型号不同，但它们都是由传感器、测量电路、指示表三个基本部分组成的。工作原理也基本相同。如果用方框图表示它们的基本电子线路，方框图的边线箭头表示被测信号的传递方向，这就构成了仪器的原理方框图(图9-14)。

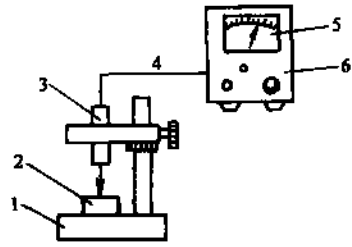


图 9-13 电感式比较仪在测量台架上的安装
1—测量台架 2—量块 3—传感器
4—导线 5—指示表 6—电箱

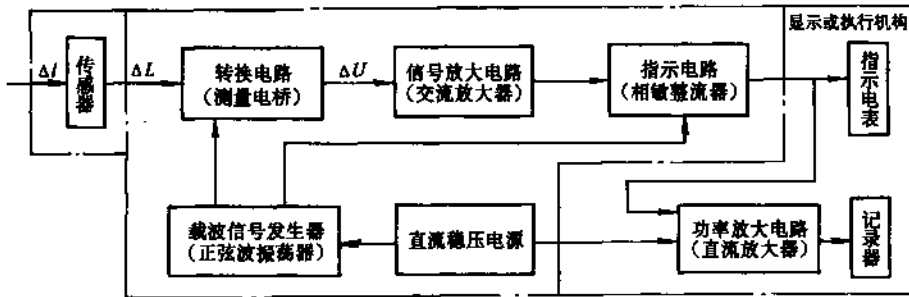


图 9-14 电感式比较仪工作原理

工作尺寸的变化量 Δl 作为原始信号被传感器感受，传感器把感受量 Δl 转换为传感器内线圈的电感量 ΔL ，经测量电桥变成电压的变化 ΔU ，再通过信号电路放大后送入指示电路。输出电压信号的大小与工件尺寸变化 Δl 成正比，最后由电表指示出来，或经功率放大器驱动记录器，绘出工件尺寸变化相变的曲线。在相敏整流器中，载波信号与交流放大器输出的交流电压信号比较相位，以确定工件尺寸变化的方向。

传感器中线圈电感量的变化量 ΔL 正比于工件尺寸的变化量 Δl 。但是，由于线圈感抗的大小是通入线圈电流的角频率 ω 的函数，即 $X_L = \omega L$ ，所以当 $\omega = 0$ 时(相当通过直流)， $X_L = 0$ 。在这种情况下， L 或 ΔL 无法转换成 X_L ，也就是无法转换成电压 ΔU 。为检测到电感量的变化 ΔL ，必须给测量电桥供以一定频率的稳定的正弦波电压($\omega = 2\pi f$)即载波，载波信号发生器可发生一定频率 f 的正弦波电压，该电压加在传感线圈的两端，并同时送入测量电桥和相敏整流器。电桥输出幅值大小则正比于传感器中线圈的电感量变化，这样的信号称为调幅信号。因此，信号放大电路采用交流放大器。

由于磁电式直流微安表的准确度高、灵敏度高、线性好，所以多采用它作为电测量仪的指示电表。这就要求增加一个将放大的交流输出转变成直流的电路，以驱动电表指示，能使电表指示的电路称为指示电路，而且可以使指针的摆动方向与被测尺寸的变化方向相一致。

整台仪器的晶体管电路均由直流稳压电源供电。

电感传感测头是利用处于变磁场中的导体产生感生电流的电感性质而制成一种几何量转换器。按其电感性质的不同可分为自感器和互感传感器两种。下面以自感式为例说明电感传感器

的工作原理。

自感传感器有以下类型：

1) 改变气隙厚度 δ 的自感传感器，如图 9-15a 所示。

2) 改变气隙截面积 S (通磁面积) 的自感传感器，如图 9-15b 所示。

3) 螺管式(磁心式)自感传感器，如图 9-15c 所示。

线圈中的电感应值可按式计算：

$$L = \frac{W^2}{\sum R_m} \quad (9-21)$$

式中 $\sum R_m$ ——磁路总磁阻；

W ——线圈匝数。

如果空气隙厚度较小，且不计磁路的铁损和铜损，则总磁阻为

$$\sum R_m = \sum \frac{l_i}{\mu_i S_i} + \frac{2\delta}{\mu_0 S} \quad (9-22)$$

式中 l_i ——各段导磁体的磁路平均长度(cm)；

μ_i ——各段导磁体的导磁系数(H/cm)；

S_i ——各段导磁体的横截面积(cm^2)；

δ ——空气隙的厚度(cm)；

μ_0 ——空气隙的导磁系数($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-9} \text{H/cm}$)；

S ——空气隙截面积(cm^2)。

通常导磁体的磁阻比气隙磁阻小得多，因此可以忽略不计，故

$$L = \frac{W^2}{\sum R_m} \approx \frac{W^2 \mu_0 S}{2\delta} \quad (9-23)$$

由上式可以看出，改变气隙 δ 或改变磁气隙截面积 S ，都能使线圈电感量发生变化。

当工件尺寸改变，使侧杆向上移动 $\Delta\delta$ 时，线圈感量由 L 变 L_1 ，其变化量为

$$\Delta L = L_1 - L = \frac{W^2 \mu_0 S}{2(\delta - \Delta\delta)} - \frac{W^2 \mu_0 S}{2\delta} = \frac{W^2 \mu_0 S \Delta\delta}{2\delta(\delta - \Delta\delta)} \quad (9-24)$$

因为 $\Delta\delta \ll \delta$ ，故可忽略分母中的 $\Delta\delta$ ，于是

$$\Delta L = \frac{W^2 \mu_0 S \Delta\delta}{2\delta^2} \approx L \frac{\Delta\delta}{\delta} \quad (9-25)$$

为了提高传感器的灵敏度，同时也为了改善传感器特性的线性，在实际结构中的自感传感器常做成差动形式，如图 9-16 所示。

差动式传感器中上下线圈的几何参数和电学参数应尽可能保持一致，这样当上线圈的电感量增加时，下线圈的电感量就会减小，总的变化量 ΔL 为

$$\Delta L = L_1 - L - \frac{W^2 \mu_0 S}{2(\delta - \Delta\delta)} - \frac{W^2 \mu_0 S}{2(\delta + \Delta\delta)} = \frac{W^2 \mu_0 S \Delta\delta}{\delta^2 - (\Delta\delta)^2} \quad (9-26)$$

略去 $\Delta\delta^2$ ，得

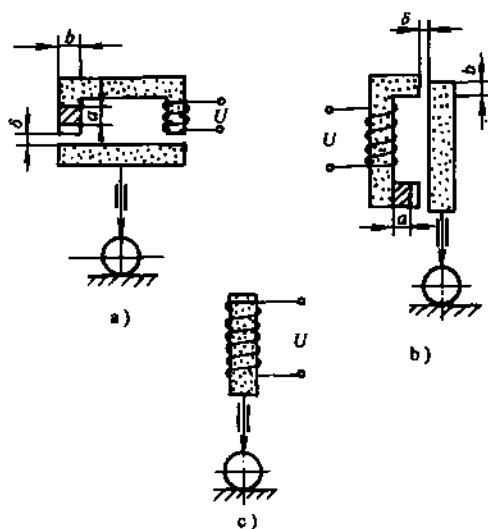


图 9-15 自感传感器的类型

a) 改变气隙厚度 δ b) 改变截面积 S c) 螺管式

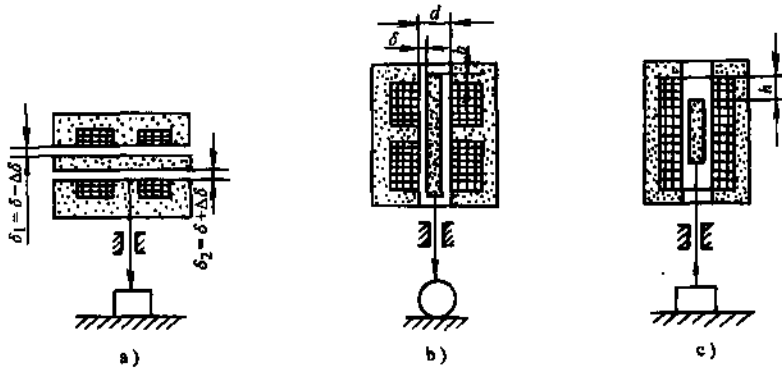


图 9-16 差动式自感传感器

a) 改变气隙厚度 δ 差动传感器 b) 改变气隙面积 S 差动传感器 c) 螺管式差动传感器

$$\Delta L \approx \frac{W^2 \mu_0 S \Delta \delta}{\delta^2} = 2L \frac{\Delta \delta}{\delta} \quad (9-27)$$

式(9-27)用来计算改变气隙厚度 δ 的差动传感器。对于改变气隙面积(即磁通面积)的差动传感器,即用如下的公式计算 ΔL :

$$\Delta L = L_1 - L \approx \frac{W^2 \mu_0 \pi d (b + \Delta b)}{2\delta} - \frac{W^2 \mu_0 \pi d (b - \Delta b)}{2\delta} = 2L \frac{\Delta b}{b} \quad (9-28)$$

比较式(9-25)和式(9-27)、式(9-28)可知,差动式传感器的灵敏度比单线圈式(单边式)高一倍,且线性好。又由于上下电感线圈在同一壳体中,工作条件基本相同。因此,环境温度变化、电磁干扰、电源电压波动等产生的影响可在很大程度上抵消,从而大大提高了抗干扰能力。另外,铁心对衔铁的电磁吸力也基本上互相抵消,减小了电磁吸力对测量的影响。但差动传感器的结构比较复杂。

2.1.3 工具显微镜

工具显微镜包括大、小工具显微镜和万能工具显微镜。

对于复杂零件的参数测量,往往不能由单一方向上的尺寸来确定,而需要变为直角坐标或极坐标进行测量。工具显微镜就是应用直角或极坐标原理通过显微镜瞄准而实现二维测量的一种光学仪器。由于仪器的附件较齐全,所以应用范围较广泛。可以测量内外尺寸、螺纹参数、各种刀具、角度样板、曲线样板等。

大型工具显微镜的光学原理如图 9-17 所示。工具显微镜的光学系统采用了远心照明和远心光路物镜。光由灯泡 1 射出,经聚光镜组 2、光阑 3、平面反射镜 4、再经聚光镜 5 变为平行光束穿过工作台玻璃板 6、使工件得到均照明。工件的轮廓则经物镜组 7、转象棱镜 8、成象于目镜前焦面的分划板 11 上,再通过目镜组 12 放大后进行观察。

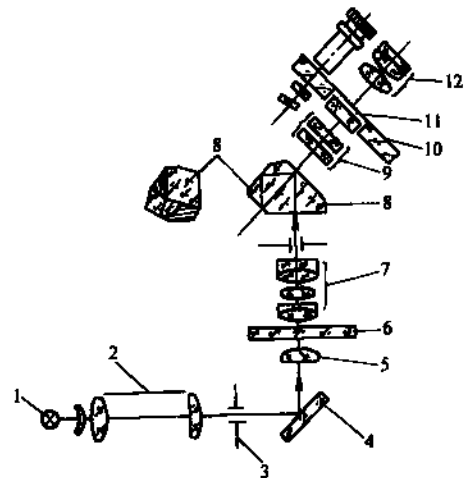


图 9-17 大型工具显微镜光学原理
1—灯泡 2—聚光镜组 3—光阑 4—平面反射镜 5—聚光镜 6—玻璃板 7—物镜组 8—转象棱镜 9—保护玻璃 10—度盘 11—分划板 12—目镜组

转象棱镜 8 是带有屋脊的斯米特棱镜，它起到正象作用，并使显微镜的光轴倾斜 45° ，以便于观察。

可变光阑 3 应位于灯丝的成象位置上，同时也是聚光镜 5 的焦平面，它的作用相当于一个实际光源。使用时可根据需要调整它的大小。

图 9-18 是大型工具显微镜外形结构图。

在具有较高稳定性的铸铁底座 8 上安装纵向滑板 6，它可以借助圆弧形滚动导轨 7 左右移动 $0 \sim 150\text{mm}$ 。这种形状的导轨虽然加工修理较困难，但比 V 形导轨耐磨，精度寿命长。在横向滑板 11 上装有直径为 280mm 的圆工作台 15，借手轮 13 可使之绕轴心旋转 360° ，用手轮 10 锁紧。圆工作台的分度值为 1° ，借助游标可读数到 $3'$ 。

立柱 2 可绕立柱支座 3 内的转轴左右摆动 $\pm 12^\circ$ ，摆角的具体大小可由手轮圆柱部分的刻度上读出，分度值为 $30'$ 。下照明装置安装在立柱的下方，它是由壳体、灯泡、平面反射镜、聚光镜、滤光片及可调光阑等组成。

纵横向测微鼓轮圆周刻度共 100 等分，分度值为 0.01mm ，测微丝杆的螺距为 1mm 。

为保证滑板与测微丝量面可靠接触，纵横滑板各由两有力的弹簧拉紧。

工具显微镜有一系列附件，主要包括测角目镜、轮廓目镜、双象目镜、光学定位器、测量刀、顶尖架及投影装置等。同时它还有一组可换的物镜，放大倍数为 $1\times$ 、 $1.5\times$ 、 $3\times$ 、 $5\times$ ，适用于各种不同的测量对象。

2.2 轴类零件的测量

对于高精度的轴径，常用各种光学计量仪器、机械式测微仪、电动测微仪等进行比较测量。测量时，先用量块或标准件调好仪器的零位，然后将被测件放在工作台上进行测量。仪器指示值为被测轴径相对于调零基准的偏差值，加上量块或标准的尺寸后即为本被测轴径。各种典型测量仪器的特性及精度指标列于表 9-1。

表 9-1 典型测量仪器的特性及精度指标

序号	仪器名称	产地	刻度值 / μm	测量范围 / mm	示值稳定性 / μm	测量误差/ μm
1	立式测长仪	前苏联	1	绝对: 100 相对: 200	0.15	仪器精度 ± 0.25 测量不确定度为 $\pm \left(1.5 + \frac{L}{200}\right)$
2	立式测长仪	德国	1	同上		$\pm \left(1.5 + \frac{L}{100}\right)$
3	数字式立式测长仪	德国	0.5 0.2	同上		$\pm \left(0.25 + \frac{L}{400}\right)$

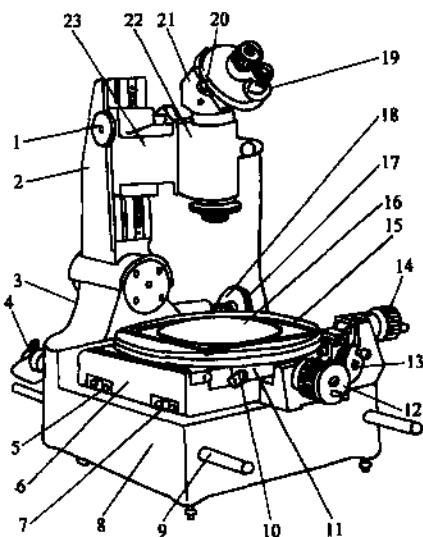


图 9-18 大型工具显微镜外形结构

- 1—升降手轮 2—立柱 3—立柱支座 4—光源装置 5—纵向可动导轨 6—纵向滑板 7—纵向固定导轨 8—底座 9—吊装用红棒 10—圆工作台锁紧手轮 11—横向滑板 12—横向测微器 13—圆工作台旋转手轮 14—纵向测微器 15—旋转工作台 16—玻璃载物台 17—立柱摆动手轮 18—摆动手轮刻度 19—目镜 20—手轮 21—棱镜座 22—物镜管座 23—悬臂

(续)

序号	仪器名称	产地	刻度值 / μm	测量范围 / mm	示值稳定性 / μm	测量误差/ μm
4	立式光学计	上光 新天	1	示值范围: $\pm 100\mu\text{m}$ 测量范围: 180		仪器的不确定度 ± 0.25 测量 不确定度为 $\pm \left(0.5 + \frac{L}{100}\right)$
5	立式投影光学计	德国	0.2	示值范围: $\pm 100\mu\text{m}$ 测量范围: 200	0.1	仪器不确定度 ± 0.2 测量不确 定度为 $\pm \left(0.5 + \frac{L}{100}\right)$
6	超级光学计	德国	0.2	示值范围: $\pm 20\mu\text{m}$ 测量范围: 200	0.02	仪器不确定度为 $\pm \left(0.05 + \frac{\Delta}{400}\right)$ Δ 为测量读数 (μm) 测量不确 定度为 $\pm \left(0.05 + \frac{\Delta}{400} + \frac{1.2L}{1000}\right)$
7	立式接触式干涉仪	上光	± 50 格, 格 值可任意 调节 (0.05 -0.2)	示值范围: ± 50 格 测量范围: 150	0.02	仪器不确定度为 $\pm (0.03 + 3ni\Delta\lambda)$ n ——读得格数 i ——分度值 $\Delta\lambda$ ——波长测量误差

注: 1. 在不确定度公式中 L 以 mm 计。

2. 上光为上海光学仪器厂的简称, 新天为新天精密光学仪器公司的简称。

2.3 孔类零件的测量

几种典型的精密测孔量仪的性能指标见表 9-2。

表 9-2 典型精密测孔量仪的性能指标

(μm)

序号	仪器名称	分度值	测量精度
1	万能测长仪	1	$\pm \left(2 + \frac{L}{100}\right)$
2	小孔量显微镜(德国)	1	当测 0.05~0.5mm 时, 为 $\pm \left(0.5 + \frac{1.6}{n}\right)$ 当测 0.5~2mm 时, 为 $\pm \left(0.8 + \frac{1.3}{n}\right)$ 式中 n ——测量次数
3	气动量仪(国产)	0.5	放大倍数为 1000 时 在仪器标准刻度段内: 0.4 全刻度范围内: 0.8
4	象点仪(德国)	0.5, 1	$\pm \left(0.5 + \frac{L}{300} + \frac{H}{100}\right)$
5	干涉法测孔仪(国产)	0.1	± 0.5
6	DMC-1 测孔仪(国产)	0.1	± 0.5
7	NPL 测孔仪(英国)	0.025	± 0.25
8	AIR-V 测孔仪(德国)	0.05	± 0.1
9	E-IM-B 型内径测定器(瑞典)	0.1	± 0.5

注: 测量精度公式中, L 及 H 为被测长度与高度, 均以 mm 计。

2.4 锥度测量

锥度是指在同一圆锥上，一个较大圆锥截面和一个较小圆锥截面直径之差，与该两圆锥截面间的轴向距离之比。

通常，锥度用大端直径减去小端直径所得的差值，与圆锥长度之比来表示(见图 9-19)，即

$$C = (D - d)/L \quad (9-29)$$

锥度 C 与圆锥角的关系是

$$C = 2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = 1 : \frac{1}{2} \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} \quad (9-30)$$

锥度常以比例或分数的形式来表示，例如： $C = 1:6$ 、 $0.3:1$ 、 0.40% 、 $1/7$ 、 $7:24$ 等。

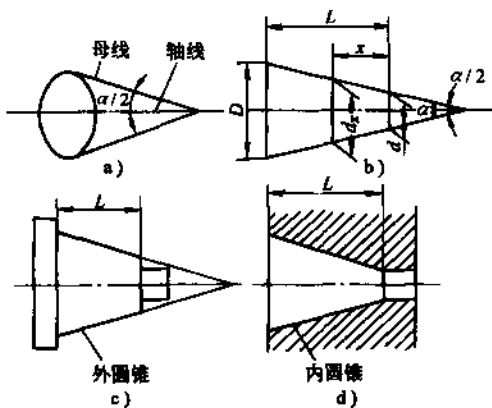


图 9-19 圆锥度

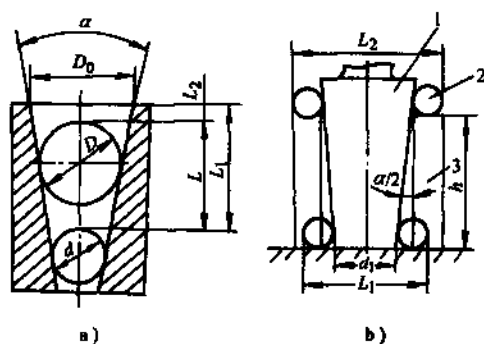


图 9-20 测量内外圆锥的方法

在几何量计量中，角度和锥度是重要的计量参数，通常采用的测量方法有直接测量和间接测量法。直接测量法又分绝对测量法和相对测量法。

用钢球、圆柱和量块测量锥度，是一种较普遍的测量方法。图 9-20a 是用精密钢球测量锥孔锥度的原理图，它是将两个直径分别为 D 、 d 的钢球先后放入锥孔内，然后用深度百分表或深度千分尺(若准确度要求较高时，可用深度百分表及量块校对测量)分别测出钢球顶点到工件上端面的距离 L_1 及 L_2 ，则锥角 α 可按下式计算：

$$\sin \frac{\alpha}{2} = \frac{\frac{1}{2}(D-d)}{L - \frac{1}{2}D + \frac{1}{2}d} = \frac{D-d}{2L-D+d} \quad (9-31)$$

再运用式(9-30)，即可得出被测锥孔的锥度。

图 9-20b 表示测量外锥角 α 的原理图。它是将工件 1 小端朝下置于检查平板上，用直径相等的两个圆柱(或圆球)2 夹在锥体两侧，测出外尺寸 L_1 。然后用两等高量块 3 将圆柱 2 垫高 h ，测出外尺寸。这时利用三角形的函数关系，可算出锥角 α ，即

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = (L_2 - L_1)/2h$$

$$\alpha = 2 \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{L_2 - L_1}{2h} \quad (9-32)$$

再根据锥度和圆锥度之间的关系式(9-30)，同样可求得锥体的锥度。

2.5 螺旋线的测量

螺旋线的测量是根据螺旋线的形成原理来进行。如图 9-21 所示, 螺旋线的形成可看成是由一半径为 R 的圆柱体绕其轴线做均匀的回转运动, 而刀具沿其母线方向做匀速直线运动, 则刀具尖端在圆柱体表面上所刻划的轨迹便形成一螺旋线, 如果圆柱体恰好旋转一周, 则刀具尖端沿轴向走过一个导程 P_n , 这时所形成的螺旋线轨迹正好为圆柱表面展开图中直角三角形的斜边, 而导程 P_n 和圆周周长 $2\pi R$ 分别为三角形的两直角边, 因此, 当螺旋导程角为 ω 时, 则由三角形得到如下关系

$$\operatorname{tg}\omega = \frac{P_n}{2\pi R}$$

或

$$P_n = 2\pi R \operatorname{tg}\omega \quad (9-33)$$

显然, 圆柱体旋转一周 (2π 弧度), 螺旋线轴向位移的理论值为一个导程 P_n 。当圆柱体转过 θ 角时, 螺旋线轴向位移的理论值应为

$$L = \frac{\theta}{2\pi} P_n$$

将式(9-33)代入上式, 则得

$$L = R\theta \operatorname{tg}\omega \quad (9-34)$$

式(9-34)即螺旋运动规律的一般数学表达式, 当对工件的实际螺旋线进行测量时, 这就是按这种规律来设计的。

设测量工件螺旋线时的基准面为 B , 在工件转角 θ 一定的情况下, 若测头 A 在轴向距 B 面的实际位移为 L' , 那么测量值 L' 和理论值 L 之差则为螺旋线误差, 即

$$\Delta L = L' - L = L' - R\theta \operatorname{tg}\omega \quad (9-35)$$

螺旋线误差对传动准确度影响较大, 因此, 对它的测量在机械加工计量中占据重要地位。

目前, 螺旋线误差的测量主要分为静态间断测量和动态连续测量。螺旋线误差的动态连续测量可通过与标准丝杠连续对比, 也可用激光丝杠动态检查仪进行测量。图 9-22 为用激光丝

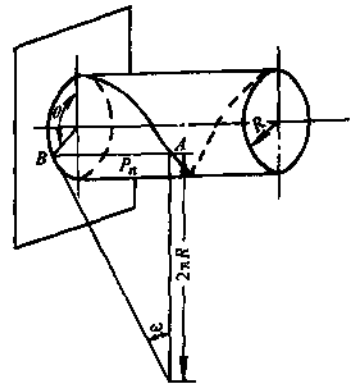


图 9-21 螺旋线的形成

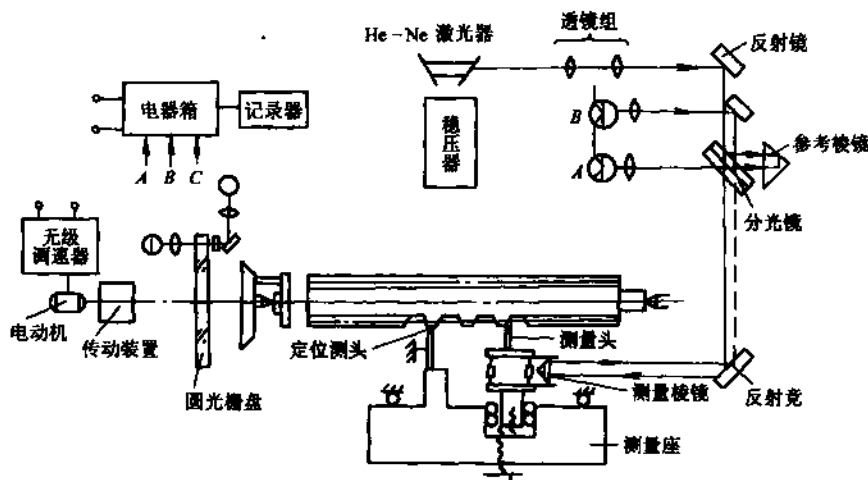


图 9-22 用激光及圆光栅测量丝杠

杠动态检查仪测量螺旋线误差的工作原理图。仪器的基本原理是以圆光栅作为测量丝杠转角的角度标准；以氩-氟激光的波长作为测量位移的长度标准。测量时，当丝杠转过 $-\theta$ 角度时，与丝杠同步旋转的圆光栅就给出相应于 θ 转角的光栅就给出相应于 θ 转角的光栅莫尔条纹数；同时，通过激光干涉仪则给出对应 θ 转角的轴向位移 L 的激光干涉条纹数。这两路信号经各自的光由接收、放大、整形和分频比相，再经误差分选可由记录仪直接画出误差曲线，从曲线上便可将被测丝杠的螺旋线误差很直观地反映出来。

这种方法的特点是：准确度高，效率也高；但对测量条件要求苛刻，只适于在计量室应用。

2.6 渐开线的测量

渐开线是基圆的任一切线，在该圆的圆周上作纯滚动时，直线上一点所形成的运动轨迹，如图 9-23a 所示。

渐开线齿形误差的定义是：在垂直于齿轮回转轴线的端截面上，齿形的工作部分内，容纳实际齿形的两理论齿形间的法向距离，如图 9-23b 所示。

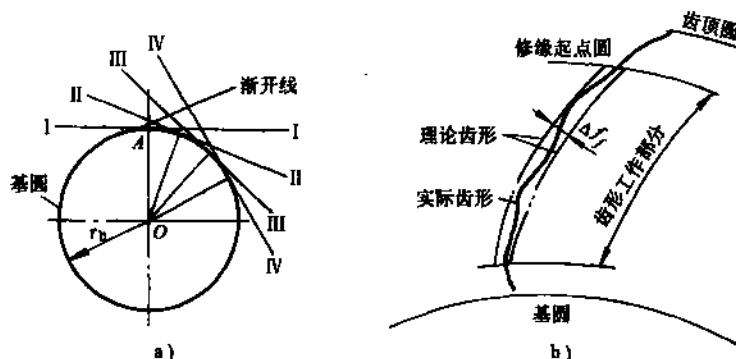


图 9-23 渐开线及其齿形误差

渐开线齿形误差是衡量齿轮工作平稳性的一项主要指标，因而渐开线齿形的测量对于保证齿轮传动准确度具有重要意义。

通常，对于渐开线齿形测量的方法主要有三类：

(1) 比较法 即在各种渐开线检查仪上与标准的渐开线齿形相比较。

(2) 坐标法 它可以采用平面直角坐标轴来测量，也可以用极坐标进行测量。平面直角坐标法是在垂直于齿轮回转轴线的截面向，以相对轴线的适当位置建立平面直角坐标系，然后使球形触头与渐开线齿形相接触，通过计算可得出触头球心的 x' 、 y' 坐标值，此 x' 、 y' 值即代表了渐开线齿形的实际值。然后，将 x 、 y 理论值调整到与直角坐标轴相吻合，则对实际齿形的测得值 x' 与理论 x 之差，即可算出齿轮的齿形误差。

极坐标法，是根据渐开线的法向极坐标方程

$$\rho_j = r_b \varphi_j$$

进行测量，即在准确保证基圆半径 r_b 的条件下，用一角度标准量测出齿轮的展开角 φ_j ，用长度标准量在其法线上测出渐开线的实际展开弧长 ρ_s ，则 ρ_s 与理论展开弧长 ρ_j 之差，即为该点

的齿形误差。如果将齿形工作部分内的各点均测出，则可得到齿轮的齿形误差。

(3) 投影法 该方法是在光学投影仪上将被测渐开线齿形放大后的影象，和具有同样放大倍数的标准齿形图相比较，然后得出齿形误差。

3 典型物理量的精密测量方法与仪器

机械构件的物理性能与机械产品的质量有着密切的关系。如机械产品构件或材料的力学性能、振动、机械阻抗等。

3.1 常用的力学性能测试

首先介绍一些常用的力学性能指标的测试方法，用以测定材料的强度、硬度和韧性。对于一些在循环载荷作用下工作的构件，还需用疲劳试验测定其疲劳寿命，以考核产品的可靠性和耐久性。某些机械构件由于结构上的要求，构件截面有满足结构要求的变化(例如键槽、切口、油孔、螺纹、轴肩等)，或者由于构件表面及内部有缺陷，出现应力集中测试方法。残余应力的存在，常常会影响构件(例如机床的床身导轨等)的精度，因此，本章还介绍了机械、物理两种残余应力的基本测试方法和技术。

3.1.1 拉伸试验

用拉伸试验可测定材料的屈服点 σ_s 、抗拉强度 σ_b 、断后伸长率 δ 和断面收缩率 ψ ，它们是最富有代表性的材料力学性能的四个指标。本节中所涉及的材料强度等力学性能指标的概念，只适用于在室温下用光滑试样进行普通拉伸试验的测试结果，即拉断前载荷缓慢增加。温度、应力和加载速度对某些材料(例如高分子材料)的力学性能有很大影响，所以试验时这三个条件必须指明或保持恒定。使用光滑试样是为避免缺口效应而造成应力集中。轴向拉伸是指试验过程中，试样不允许倾斜和偏心。

1. 试样

金属材料圆形试样的形状如图 9-24 所示，中间为较细的等直径部分，两端较粗。在中间等直径部分取长度为 l 的一段作为工作段， l 称为标距。为了便于比较试验结果，试样应按标准制作。对圆形试样，标距 l 与截面直径 d 有两种比例



图 9-24 拉伸用试样的形状

$$l = 10d \quad \text{和} \quad l = 5d$$

对于矩形截面试样，标距 l 与横截面面积 A 之间的关系规定为

$$l = 11.3\sqrt{A} \quad \text{和} \quad l = 5.65\sqrt{A}$$

对于其他一些工程材料，如挤压塑料等的试样的形状和尺寸，应查阅有关的标准和规定。

2. 试验机和试验装置

用于做拉伸试验的试验机种类很多，检验工作中常用杠杆摆式万能试验机或液压万能试验

机。其原理示意图分别如图 9-25、图 9-26 所示。试验机对试样施加的载荷一般为 5~60t，大型试验机的加载能力可达 100t 以上。试验机载荷的示值误差应在 $\pm 1\%$ 以内，即试验机的测力装置在它的每个度盘的 20% 以上的载荷示值时，要求误差在 $\pm 1\%$ 以内。例如，使用 10t 示力度盘时，加载在 2t 以上，如果加载为 6t，则要求此力的误差不超过 $\pm 60\text{kg}$ 。

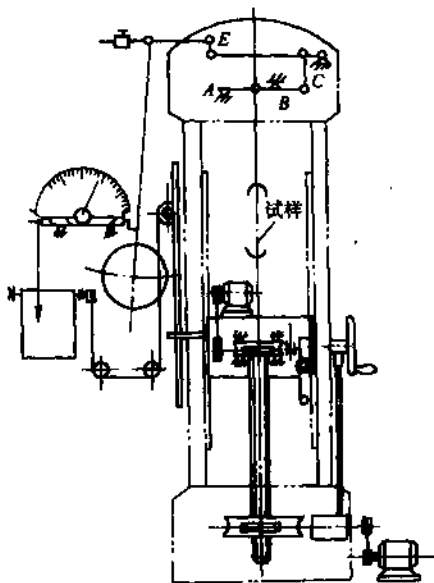


图 9-25 杠杆摆式万能试验机原理示意图

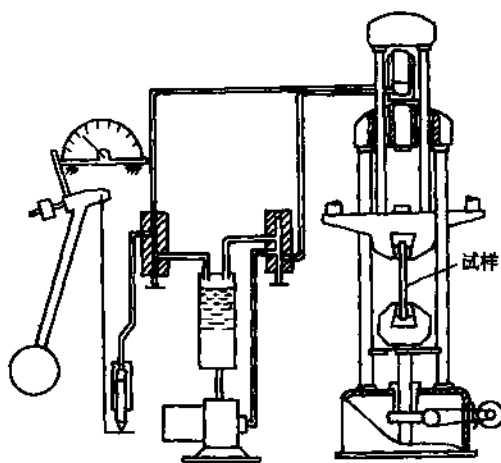


图 9-26 液压式万能试验机原理示意图

近些年来，随着材料科学的发展，越来越多的新产品采用了高分子材料。在某些高分子材料的试验中，要求较高的试验速度。然而，当加载速度较高时，摆式测力计因其性能引起的载荷误差可能达到 15%。这样，装有电子测力计的试验机便应运而生。

电子万能试验机比机械式和液压式试验机具有较多的优点，它的应用范围广，除了能做静态拉伸、压缩、弯曲和剪切试验外，还可以做动态(疲劳)试验。电子万能试验机是采用电子技术对载荷和变形进行精确控制、测量、自动显示和自动记录的试验机。如果试验机配有计算机或微处理系统，则可进行程序控制，对试验结果自动进行处理，并打印输出最后结果。

试验时需要用的试验装置和仪器有：引伸计、应变放大器和 $x-y$ 记录仪等。根据试验要求达到的精度和测试性能指标，适当选择不同类型和规格的试验辅助装置和仪器，与主机配套使用，以达到满意的试验结果。

3. 试验步骤

用游标卡尺测量试样标距两端和中间这三个截面处的尺寸，对于圆试样，在每一横截面内沿互相垂直的两个直径方向各测量一次取其平均值。用测得三个平均值中最小的值计算试样的断面面积 A 。

从手册中查得材料抗拉强度 σ_b 和量得的断面面积 A_0 。估计试验中要加的最大载荷，并由此选择合适的测力度盘。调整测力指针，对准“零点”，并使随动指针与之靠扰，同时调整好自动绘图仪。

试样安装的步骤是：先将试样安装在试验机的上夹头内，再移动下夹头使其到达适当的位置，把试样的下端夹紧。开动试验机，预加少量载荷后，卸载回“零”，以检验机器是否能正

常工作。

开动试验机进行缓慢匀速加载。注意观察测力指针的转动和自动绘图情况以及有关的试验现象，当测力指针不动或倒退时，说明材料开始屈服，记录屈服载荷 F_s ，试样拉断后停机，由随动指针读出最大载荷 F_b ，并将 F_s 和 F_b 的值记录下来。

取下试样，将断成两段的试样的断口对齐并尽量靠紧，用游标卡尺测量拉断后的标距长度 l_1 ，测量颈缩处的直径 d_1 （对于延性塑性材料）。测量直径的方法和最初的测量方法一样，即在每个断口处沿两互相垂直的方向各测量一次，计算其平均值，取其中最小的值作为计算值，并用此值计算断口处的最小断面面积 A_1 。

4. 试验结果

1) 根据屈服载荷 F_s 和最大载荷 F_b 计算屈服点 σ_s 和抗拉强度 σ_b ，即

$$\sigma_s = \frac{F_s}{A_0} \quad (9-36)$$

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_0} \quad (9-37)$$

2) 根据试样断裂前、后标距长度和颈缩处的断面面积计算断后伸长率 δ 和断面收缩率 ψ ，即

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\% \quad (9-38)$$

$$\psi = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\% \quad (9-39)$$

3.1.2 硬度试验

材料的硬度也是材料力学性能的又一主要指标，对于检验产品质量和确定合理的加工工艺是相当重要的。试验研究表明，金属的硬度和其他力学性能指标有一定关系，如钢的抗拉强度 σ_b 与布氏硬度 HB 有如下关系：

$$\sigma_b = 3.62\text{HB} \quad \text{MPa} \quad (\text{HB} < 175) \quad (9-40)$$

$$\sigma_b = 3.45\text{HB} \quad \text{MPa} \quad (\text{HB} > 175) \quad (9-41)$$

对于灰铸铁，则

$$\sigma_b \approx \frac{\text{HB} - 40}{0.6} \quad \text{MPa} \quad (9-42)$$

由此可以看出，用测量硬度的办法在不破坏零件的情况下，便可得到该材料的强度数据。所以，在工程检测中，测量材料的硬度是材料的力学性能指标测试中不可缺少的，而且也是简单易行的测试项目。

硬度是表示材料抵抗他物压入的能力，同时也表示抵抗弹性变形、塑性变形和破坏的能力。硬度测试可分为压入法、弹跳法和刻线法。下面介绍常用的压入法，即测量材料的布氏硬度和洛氏硬度。

1. 布氏硬度的测试方法

用一定的力 F (N)，把直径为 D (mm) 的标准钢球(压陷器)压入材料内，如图 9-4a 所示，并保持一定时间，卸载后，测量残留在材料表面的凹痕直径 d (mm)，按下式计算材料的布氏硬度值 HB (MPa)。

$$\text{HB} = \frac{10F}{\frac{\pi D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (9-43)$$

为比较不同材料的硬度，测试应在统一的国家标准规定的条件下进行，常用金属材料硬度的规范列于表 9-3 中。

表 9-3 常用金属材料布氏硬度测试的有关规范

材 料	布氏硬度范围	试件厚度 /mm	钢球直径 D /mm	压入力 F 与 D 之间的关系	压入力 F /N	压入力作用 保持时间 (s)
黑色金属	140~450	>6	10	$F = 30 D^2$	30 000	10
		6~3	5		7 500	
		<3	2.5		1 875	
黑色金属	140 以下	>6	10	$F = 30 D^2$	30 000	30
		6~3	5		7 500	
		<3	2.5		1 875	
有色金属和合 金(铜、黄铜、 青铜、镁合金等)	31.8~130	>6	10	$F = 10 D^2$	10 000	30
		6~3	5		2 500	
		<3	2.5		1 875	
有色金属和合 金(铝、轴承合 金)	8~35	>6	10	$F = 2.5 D^2$	2 500	60
		6~3	5		625	
		<3	2.5		156	

布氏硬度试验机的原理图如图 9-27b 所示。试验时，先根据表 9-3 选定压入力，再根据选定的压入力配置砝码 1，然后关紧油门 2，转动手轮 3，使试样 4 上升至与压陷器 5 轻微接触，再摇动手柄 6，给工作液压缸 7 供油，直到测力活塞十字头 8 飘浮，即表示已达到要求压力，由压力表 9 指示。在此压力下，保持一定时间，旋开油门 2 卸载，使工作液压缸中的油流出，反转手轮 3，使支持台下降，取出试样，测量凹痕直径 d 并计算硬度值。硬度测试中应注意以下几点：

1) 在检验单上记载材料的布氏硬度时，一定要标出试验条件。例如，若采用 $D = 10\text{mm}$ 的钢球，压入力 $F = 3000\text{N}$ ，保持时间为 30s，测得的硬度值为 138，则记为 $\text{HB}10/300/30 = 138$ (表示压入力为 300kgf，即 3000N 作用下测得的硬度值)。

2) 试验时，凹痕直径 d 应在 $0.2 \sim 0.6D$ 范围内，否则应改换试验标准，重新测量，凹痕中心离试样边缘不应小于 D ，两相邻凹痕中心之间的距离应大于 $2D$ 。

3) 按规定标准进行多次测试，测量次数依被测表面面积而定，且应均匀布点。取各次测试结果的平均值作为材料的硬度值。

4) 太硬的材料 ($\text{HB} > 450$) 不宜测布氏硬度值，应改测其洛氏硬度值。

2. 洛氏硬度的测试方法

洛氏硬度的测试原理如图 9-28a 所示，先用 100N 的初压入力将具有标准形状的压陷器(金

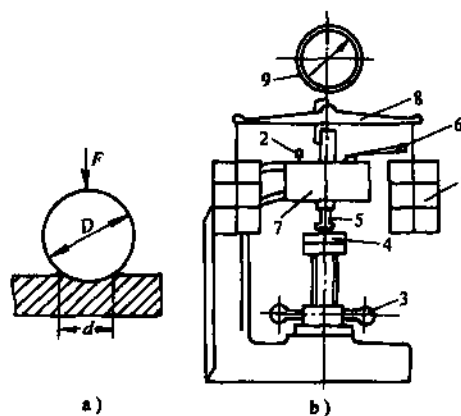


图 9-27 布氏硬度测量原理及布氏硬度试验机原理
1—砝码 2—油门 3—手轮 4—试样 5—压陷器 6—手柄 7—液压缸 8—测力活塞十字头 9—压力表

刚钻圆锥或小圆钢球)压入试样,使其到达 I-I 位置,再施主压入力压至 II-II 位置,然后卸掉主压入力(初压入力不卸),压陷器弹回 III-III 位置,根据 I-I 和 III-III 位置的压入深度之差,按下式计算洛氏硬度值 HR。

$$HR = C - \frac{h}{n} \quad (9-44)$$

式中 h ——I-I 和 III-III 位置的压入深度之差(mm);

n ——常数, $n = 0.002\text{mm}$;

C ——常数,用钢球压陷器时, $C = 130$;用金钢钻压陷器时, $C = 100$ 。

表 9-4 列出了洛氏硬度的试验规范,表中还列出了在三种不同条件下进行试验用的洛氏硬度符号。

表 9-4 洛氏硬度试验规范

压陷器	总压入力 /N	洛氏硬度符号	量表刻度的有效范围	适用材料
1.5785mm 的钢球	1000	HRB	25~100	较软的金属(HB=60~230)
金钢钻圆锥	1500	HRC	20~70	较硬的金属(HB=230~700)
	600	HRA	70 以上	坚硬的材料及薄的材料等(HB 大于 700)

洛氏硬度试验机的原理图如图 9-28b 所示。试验时,转动手轮使支持台托着试样上升,让试样向压陷器,将压陷器上安装的弹簧压缩,产生 100N 的初压入力,然后使缓冲液压缸卸油,通过杠杆将重铈的重量传到压陷器上,杠杆传递的这一压入力即为主压入力。再重新给液压缸充油,使它托起杠杆,于是试样上承受的主压入力消失,记录此时的压入深度,并根据压入深度计算洛氏硬度值。在填写试验报告单时,务必要写明试验条件。

高分子材料的力学性能与金属材料不同,金属材料卸载后,压痕的回复可以忽略不计,而高分子材料卸载后的弹性回复不可忽视。用两种不同的方法测得的压痕深度相差很大,即高分子材料卸去主荷后弹性回复大,而金属铝不会出现这种现象。这样就提出了在主载荷作用下测量压痕的方法,即洛氏 A 硬度法。

洛氏 A 硬度法采用的钢球直径为 1.270mm,初载荷为 100N,主载荷加上后总载荷为 600N。在总载荷作用下经 15s 测量深度,按下式计算洛氏 A 硬度值。

$$\text{洛氏 A 硬度值} = 150 - (h - C') \quad (9-45)$$

式中 C' ——硬度计、压陷器等弹性变形的常数。

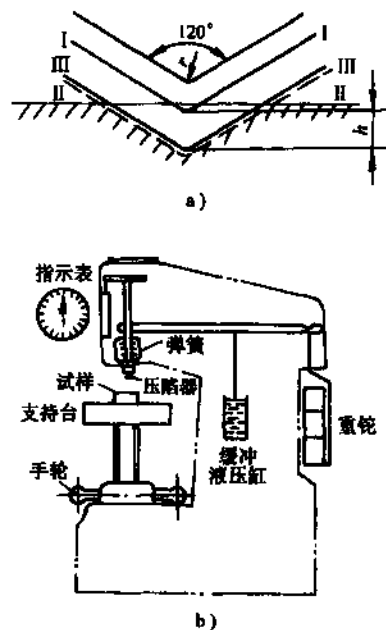


图 9-28 洛氏硬度测量原理及洛氏硬度试验机原理图

硬度计、压陷器等系统的弹性变形值可用标准铜块测定，这种方法多用于软塑料等。

测量高分子材料洛氏硬度值时，初载荷一般都用 100N。聚酰胺、氟塑料、赛璐珞等材料的主载荷为 500N（总载荷为 600N），钢球直径为 1.270mm。酚醛、尿醛、环氧树脂、聚苯乙烯、聚酯树脂、硬聚氯乙烯等材料的主载荷为 900N（即总载荷为 1000N），钢球直径为 0.635mm。

3.1.3 冲击试验

1. 试验方法与试样

拉伸、压缩和硬度试验都属于静载试验。用静载试验测得的力学性能指标不能反映动载条件下，尤其不能反映变形速度很大的急剧加载情况下材料的力学性能。工程中常用“冲击韧度”表示材料抵抗冲击的能力，测量材料的冲击韧度通用的方法是一次性冲击试验法。

一次摆锤冲击弯曲试验是将按规定尺寸加工成的标准试样放在冲击试验机的支架上，然后将升高到规定角度、具有一定位能的摆锤释放向下摆，将试样冲断。试样折断消耗的能量等于摆锤原来的位能（在 α 角处）与其冲断试样后在另一侧扬起位置（在 β 角处）时的位能之差。冲击试验机的简图和摆锤冲击前后的位置如图 9-29 所示，图 a 为冲击试验机简图，图 b 为冲击前后摆锤的位置。冲击试样摆锤消耗的能量 E 除以试样缺口处的截面面积 A ，其商定义为材料的冲击韧度 a_K ($N \cdot mm/mm^2$)。

$$a_K = \frac{E}{A} \quad (9-46)$$

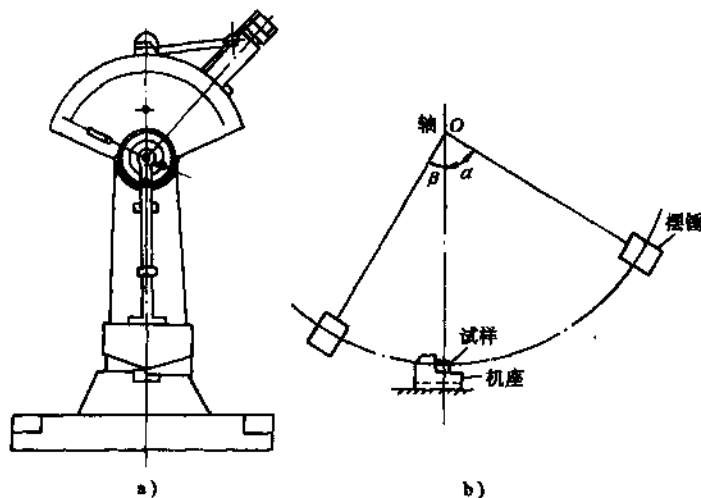


图 9-29 冲击试验

冲击试验对试样有严格的要求，对于金属材料，常用的有两种，即图 9-30a 所示的梅氏冲击试样和图 9-30b 所示的夏比冲击试样。缺口的形状和加工质量对试验结果的影响很大，所以缺口一般应当用铣削和磨削加工，以保证试样尺寸准确。

a_K 对材料品质、内部缺陷和晶粒大小等比较敏感，加之冲击试验简便易行，所以常用来检验材质内部缺陷、脆性程度等。此外，冲击韧度对低温更为敏感。因此，常用来测定材料在低温下的冲击韧度，以鉴别材料的低温冷脆程度。

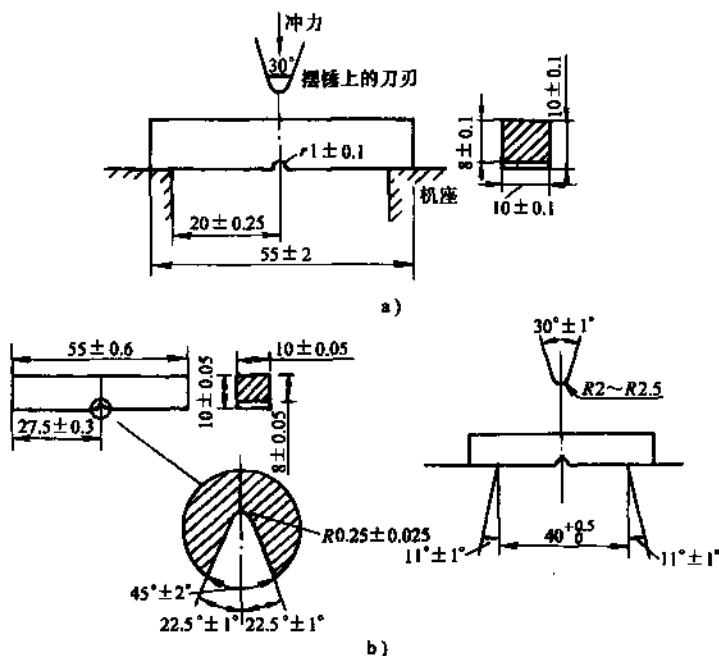


图 9-30 冲击试样

3.2 振动性能检测

3.2.1 振动的测量与频谱分析

振动测量是测量系统工作时振动的位移、速度或加速度值。可以用图 9-31 所示的测量系统。传感器选涡流式位移传感器、磁电式速度传感器、压电式加速度传感器中的任一种，振动计只需与所选传感器相对应即可。从理论上讲，位移、速度、加速度可以用微积分关系转换，所以三种量值可以通过有关电路求得，使所选传感器不受限制。但是在实际测量时，要注意所用电路的特性对量值的影响。

振动信号的频谱分析，可以为寻找振动原因提供参考数据。频谱分析一般用带通滤波器、频谱分析仪或信号处理设备完成。图 9-32a 是电动机工作时振动测量和频谱分析的仪器组合框图。在频谱分析仪上不仅可以读得总振级量值，而且在一定的频率范围内扫频，并使电平记录仪与扫频同步走纸，便可得到图 9-32b 所示的频谱图。根据此图可分析振动的原因。

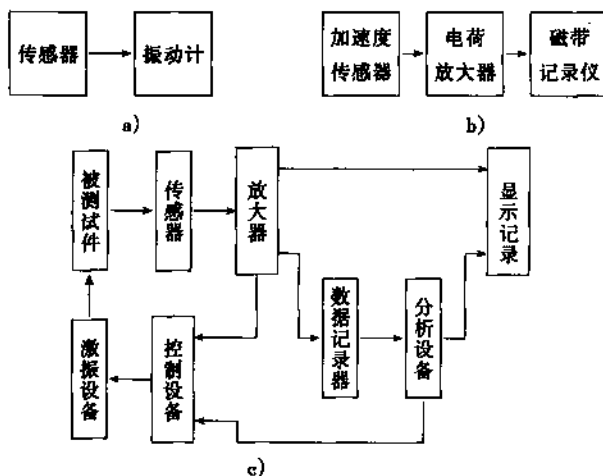


图 9-31 振动测量系统

- a) 简单的测试系统 b) 测量记录系统
c) 第二类振动测量系统

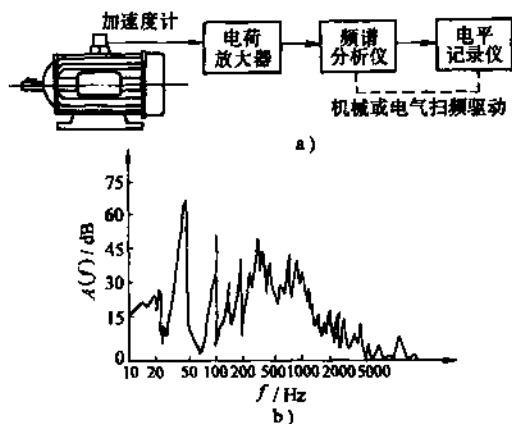


图 9-32 电动机振动的测量与频谱图

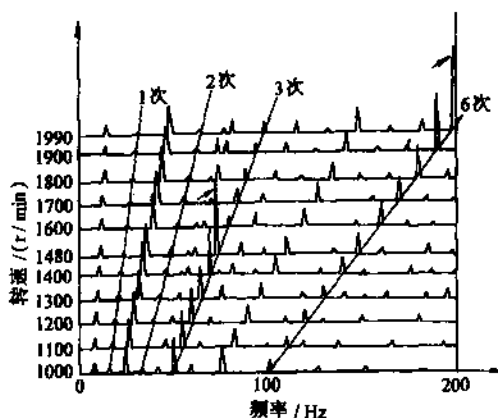


图 9-33 柴油机振动谱阵图

对于旋转机械，除了在额定转速下测量振动，进行频谱分析以外，还可以由起动到正常运转的变速过程进行测量和频谱分析。将振动信号频谱与机械的转速对应起来，构成谱阵图，能更清楚地反映机械的振动特性。图 9-33 是一台柴油机的谱阵图。图中横轴是频率，纵轴是机器转速，斜线是振动的谐波次数。从图可见，柴油机转速为 1480r/min 时，三次谐波频率上有共振发生。在 1990r/min 时，六次谐波频率上又产生了共振。这为确定该柴油机的危险转速，改进柴油机的结构提供了资料。

频谱图上的共振频率并不一定是被测产品的固有频率，因固有频率 ω_n 是由产品的质量 m 和刚度 k 所决定的，而共振频率与所测的信号有关，位移共振频率 ω_r 、速度共振频率 ω_v 和加速度共振频率 ω_a 与产品的固有频率的关系为

$$\omega_r = \omega_n \sqrt{1 - 2\zeta^2} \quad (9-47)$$

$$\omega_v = \omega_n \quad (9-48)$$

$$\omega_a = \omega_n \sqrt{1 + 2\zeta^2} \quad (9-49)$$

由此可见，只有当 $\zeta = 0$ 时，它们才彼此相等，在小阻尼的条件下， $\omega_r \approx \omega_a \approx \omega_v$ 。

3.2.2 机械阻抗试验

机械阻抗试验是用振动的方法求取产品的动态特性参数，为改进产品设计提供资料。

1. 机械阻抗的概念

对于定常线性机械系统，其某点的力与同一点或不同点的响应的复数比称为机械阻抗。考虑到机械结构的响应，可用位移、速度或加速度来表述，因此，机械阻抗包括表 9-5 所示的 6 个量。对于同一系统，这 6 个量都包含了同样的信息。实际测试中，常用位移导纳。

表 9-5 机械阻抗术语

响应	表达式	符号	术语
位移 Z	F/Z	K_n	动刚度(位移阻抗)Dynamic stiffness
	Z/F	a	动柔度(位移导纳)Dynamic compliance
速度 v	F/v	Z_n	机械阻抗(速度阻抗)Mechanical impedance
	v/F	M	机械导纳(速度导纳)Mobility
加速度 a	F/a	A_n	视在质量(加速度阻抗)Apparent mass
	a/F	I_n	惯性率(加速度导纳)Accelerance

注： F 为激振力。

2. 机械阻抗的测试

机械阻抗测试系统框图如图 9-34 所示。系统一般包括：激励部分，力和响应检测部分，结果处理和记录部分。激励部分由信号发生器和激振器构成，用来产生激振力。力和响应的检测，常用压电式力传感器和压电式加速度传感器或阻抗头，配用电荷放大器构成。结果处理可以用传递函数分析仪、频率响应测量系统或信号处理系统。用 X-Y 记录仪记录结果曲线。

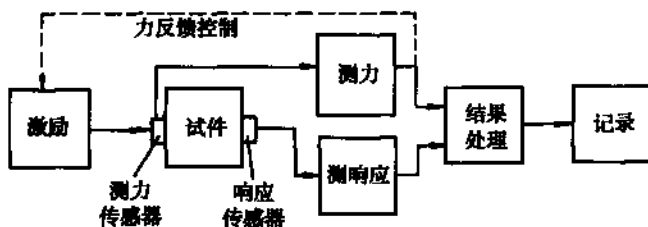


图 9-34 机械阻抗测量系统

3. 激振设备

激振设备包括信号源、功率放大器和激振器。由于这种设备将电信号转换成力，所以能方便地控制力的频率、幅值和波形。

(1) 激振信号和信号源 激振信号有稳态正弦、随机、瞬态三类。稳态正弦信号可以用通用信号发生器产生，其力为单一频率的正弦力，用它激励试件可以得到较高的频率特性精度，但是这种激振方法花费的测试时间较长。随机信号指白噪声和伪随机信号，用它能激起被测对象在一定频率范围内作随机振动，配用频谱分析仪器可求得试件的特性参数。白噪声信号由专门的信号发生器产生，其功率谱密度函数，在一定频率范围内接近于常值。虽然功率放大器和激振器的通频带是有限的，不能使力保持常数，但是在一定范围内力的频谱还是可以近似地认为是常数。伪随机信号是一种周期性重复的随机信号，它可以用伪随机信号发生器或计算机产生，一是快速正弦扫频，通常将正弦信号发生器产生的正弦信号，在幅值保持不变的条件下，由低频很快地变化到高频。从频谱看，它已不具备正弦信号的特性，而在一定频率范围内接近随机信号。图 9-35 是快速正弦扫频信号的频谱。二是脉冲激励。用一把图 9-36 所示的脉冲锤敲击试件，产生近似于半正弦脉冲信号。信号的频率范围取决于锤头垫的材料，材料愈硬，力作用的持续时间愈短，频率范围愈宽。一次敲击，相当于对试件进行一扫频激励。这种方式激振，所需要的设备少，应用方便，三是阶跃(张弛)激振。在拟定的激振点处，用一根刚度大、重量轻的弦经过力传感器对试件施加张力，使之产生初始变形，然后突然切断张力弦，相当于给试件施加一个负的阶跃激振力。瞬态信号除了用上述三种方法产生以外，还可以用爆炸法、撞击法等方式产生。

(2) 振动台和激振器 振动台和激振器是将电信号转换成力的装置。两者的主要区别在于振动台的振动量和体积都较大，一般为固定式结构，有一个台面，试件可以安装在台面上承受振动。或者用它来推动试件。激振器产生的振动量和本身体积都较小，一般是移动式，激振器通过顶杆去推动试件。振动台多用于机电产品振动试验，激振器则多用于测量产品的特性参数。

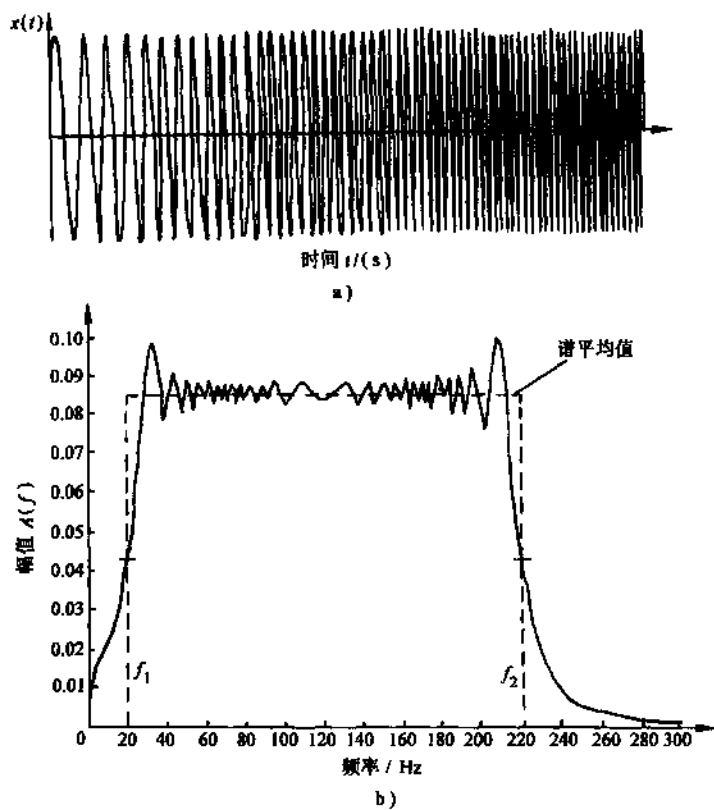


图 9-35 快速正弦扫频信号及频谱

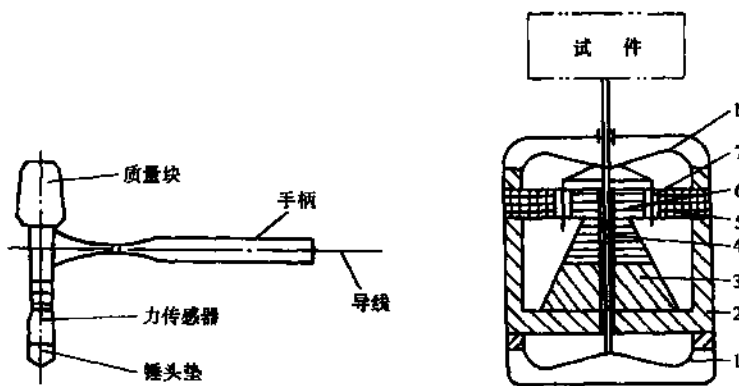


图 9-36 脉冲锤

图 9-37 电动式激振器

1—弹簧 2—壳体 3—支承 4—顶杆
5—磁极 6—铁心 7—线圈

图 9-37 是电动式激振器的结构。驱动线圈 7 固定的顶杆 4 上，并由支承弹簧 1 支承在壳体 2 中，线圈 7 正好位于磁极 5 与铁心 6 的气隙中。当线圈中有电流通过时，便会产生激振力，此力通过顶杆传到试件上，电动式激振器的磁场有永磁式和励磁式两种，前者多用于小型激振

器，后者多用于大型激振器。

振动台和激振器的基本技术指标是其所产生的最大推动力值的大小，使用时按需要的推动力大小选用。使用电动式激振器时，最好在顶杆与试件之间装一只力传感器，以便精确测出激振力的大小。激振器作绝对激振时，可采用图 9-38 几种方式安装。进行较高频率的激振时，用软弹簧(如橡皮绳)将激振器悬挂起来，如图 a，可以加上必要的配重，以尽量降低悬挂系统的固有频率，使其低于激振频率 $1/3$ 。作水平绝对激振时，为了产生一定的预加载荷，可斜挂成 θ 角，加上适当的配重，如图 c 所示，在进行垂直激振时，可以将激振器固定在刚性基础上(如图 b)，使安装后的固有频率比激振频率高 3 倍以上。

激振器与试件间的连接，最好用一根在激振力方向刚度很大，而横向刚度很小的柔性杆。它既保证了激振力的传递，又大大减小对试件回转的约束。

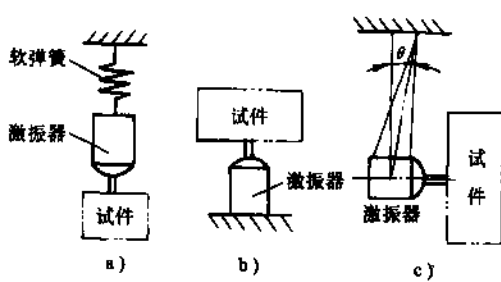


图 9-38 激振器的安装

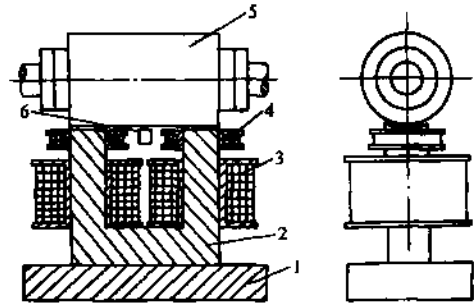


图 9-39 电磁激振器

1—底座 2—铁心 3—励磁线圈 4—力检测线圈
5—衔铁 6—位移传感器

振动测试中，若要求激振器与试件之间不接触，可以采用非接触激振的电磁激振器。它直接利用电磁铁的电磁力作为激振力，其典型结构如图 9-39 所示。当电流通过励磁线圈 3，铁心 2 对衔铁产生电磁力，若磁心和衔铁分别固定在两个试件上，或者用试件本身作为衔铁，便可实现两者之间无接触的相对激振。激振力可以用力检测线圈检测。用位移传感器测量激振器与衔铁之间的相对位移。

电磁激振器对试件没有附加质量的影响，或者附加质量的影响很小，激振力可达几吨。工作频率上限约为 $500 \sim 800\text{Hz}$ 。特别适应对旋转着的试件进行激振。主要缺点是波形失真大，振幅小，有静力作用在试件上，台面有漏磁场的影响。

4. 固有频率和阻尼比的求取

用机械阻抗测量方式，得到试件的位移导纳曲线，便可求得试件的固有频率和阻尼比。对位移导纳曲线可以采用以下方法分析。

(1) 幅频曲线分析法 对于单自由度的被测件，根据测量数据，可画出幅频曲线，如图 9-40 所示。曲线上幅值最大处的频率即为位移共振频率 ω_r ，当 ζ 小时， $\omega_r \approx \omega_n$ 。

在共振频率最大幅值的 $1/\sqrt{2}$ 处，作一条平行于 ω 轴的平行线 l ，交幅频曲线于 a 、 b 两点，则阻尼比 ζ 为

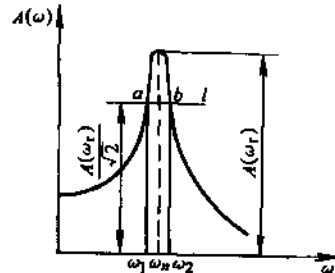


图 9-40 幅频曲线

$$\zeta = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2\omega_n} = \frac{\Delta\omega}{2\omega_n} \quad (9-50)$$

(2) 实、虚部频率特性分析法 用实、虚部表示的频率特性曲线如图 9-41 所示。实部曲线上，实部为零处即 ω_n ，见图 9-41a。虚部曲线上，虚部为 $-1/2\zeta k$ 处即为 ω_n ，见图 9-41b。

实频曲线上两个峰顶间的距离，或虚频曲线上峰值的一半处作一水平线，截得曲线两点间距离都约等于 2ζ ，由此可估计阻尼比。

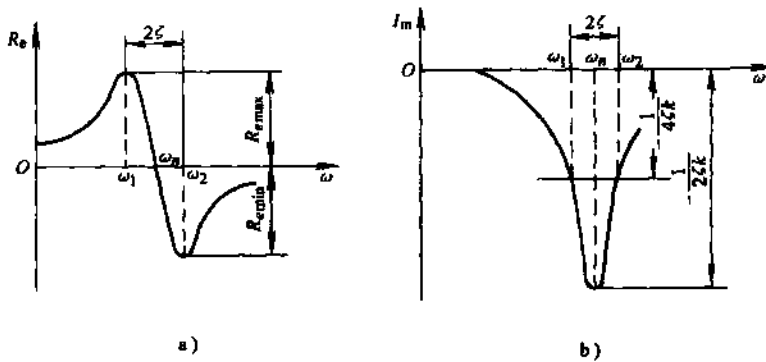


图 9-41 实、虚部频率特性分析法

(3) 相频曲线分析法 单自由度受迫振动的位移响应的相频表达式为

$$\varphi = -\arctan \frac{2\zeta \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \quad (9-51)$$

其曲线如图 9-42 所示。可以看出，不管阻尼比大小如何，当激振频率和固有频率相同时，位移的相位角总滞后 90° ，因此通过相频曲线也可以确定系统的固有频率。根据相频曲线求得 $\omega = \omega_n$ 处的斜率也可以直接估算阻尼比。

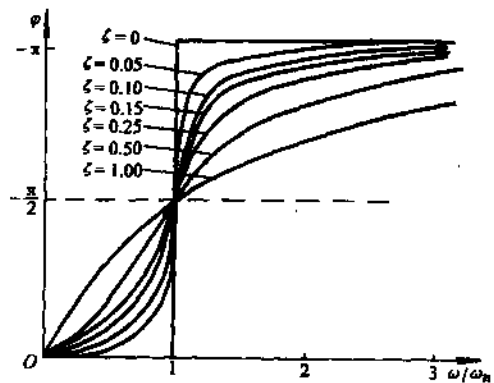


图 9-42 相频曲线

4 精密测量的精度分析

4.1 测量误差的来源分析

1. 原理误差

仪器设计中，有时采用近似的机构实现理论要求的运动，有时用均匀刻度的标尺代替理论上非均匀刻度的标尺，也有时与“阿贝测长原则”不符，等等。这些都属于在仪器设计中从原理上已经固有的误差。这项误差当然也是构成测量误差的一部分。

图 9-43 所示为杠杆测微仪中的正弦杠杆变换原理，其刻度盘标尺是均匀分度的，因此从理论上说，指针摆角 φ 与测杆移动量 x 之间，应为线性函数关系，即

$$x = a\varphi \tag{9-52}$$

但实际上在该仪器的设计中，采用的是正弦机构，于是摆角 φ 与移动量 x' 之间的关系为

$$x' = a \sin \varphi \tag{9-53}$$

因此，均匀分度的标尺就产生了原理误差

$$\Delta x = a \sin \varphi - a\varphi \approx -a\varphi^3/6 \tag{9-54}$$

显然， φ 愈大， Δx 亦愈大。故 φ 值不能太大，所以此类仪器的示值范围有一定限制。

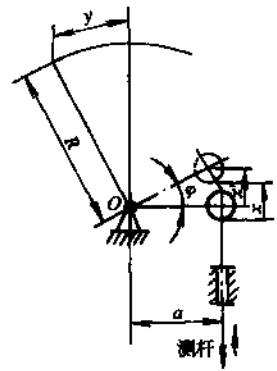


图 9-43 正弦杠杆变换原理

2. 量仪制造和装调误差

例如仪器仪表的各个零件的制造误差及其在装配调整过程中产生的误差，都会导致测量误差。

例如仪器读数装置中的刻线尺、刻度盘、分划板等的制造误差及其装调时的偏斜或偏心误差；仪器传动装置中杠杆、齿轮副、螺旋副、导轨等的制造误差和装配误差，其中包括传动件间的间隙引起的误差；光学元件的制造误差和光学系统的装调误差等等，都会以各自的传播规律构成测量误差。

属于仪器制造与装调误差的项目很多，因素复杂。通常按照各项误差的性质划归类别，然后采取不同的措施予以消除或计算。

3. 测量力或重力引起的变形误差

此项误差来源是指被测件或仪器元件在测量过程中受力产生弹性变形而引起的测量误差。具体地说，有以下几种情况：

(1) 压陷量差值 仪器调零位时，测量头对工作台(绝对测量时)或对基准件(相对测量时)表面的压陷量与测量时对工作表面的压陷量之间的差值，将造成测量误差。

压陷量 W 的大小，与测量力、接触方式、接触面的材料、接触件的尺寸等因素有关。其计算方法可参见表 9-6 和表 9-7。

表 9-6 压陷量的计算 (μm)

	球对圆柱或球对球	球对平面	平面对圆柱
接触方式			
计算公式	$W = K_1 \sqrt[3]{\frac{F^2}{100} \left(\frac{1}{d} + \frac{1}{D} \right)}$	$W = K_1 \sqrt[3]{\frac{F^2}{100d}}$	$W = K_2 \frac{F}{10l} \sqrt[3]{\frac{1}{D}}$
公式符号注释	<p>F—测量力(N) d—球形测量头直径(mm) l—平面测量头直径(mm) D—被测零件直径(mm) K_1、K_2—材料系数(见表 9-7)</p>		

表 9-7 材料系数

	钢 对 钢	硬质合金对钢	钢 对 青 铜	硬质合金对青铜	钢 对 青 铜
K_1	1.9	1.4	2.3	2.0	2.4
K_2	0.41	0.40	—	—	—

(2) 仪器构件变形 在有测量力的情况下, 仪器的框架及有关构件会产生弹性变形。如果调零时和测量时的变形量有差值, 则造成测量误差。这种误差可通过试验法测定变形量而求得。

显然, 保持调零时与测量时的测量力稳定, 是消除或减小该项误差的主要途径。

(3) 被测件自重变形 对于刚度弱的细长被测件而言, 除了因测量力引起的变形外, 其本身自重所造成的弯曲变形也会导致不可忽略的测量误差。

为了减小此项误差, 根据材料力学的理论, 正确地选择支承点的位置, 以适应不同的要求是很重要的, 参看本章第 1 节。除了合理选定支承点位置外, 还可使用可调节的辅助支承, 以减小变形。

4. 对准误差

测量中, 要进行两项对准工作, 即对准被测件和对准读数装置, 二者皆可能产生误差。

(1) 对准被测件的误差 不同的被测表面形状, 有不同的对准要求。如图 9-44 测圆表面的直径, 要求对准最大值 d ; 测平面间距离, 要求对准最小值 B 。否则, 就会产生被测件的对准误差。



图 9-44 被测件对准位置

为此, 在接触测量中要正确选择测头形状, 如图 9-45 所示, 测平面用球形测头(图 9-45a), 测球面用平面测头(图 9-45b), 测圆柱面用刀口测头(图 9-45c), 以减小该项误差。

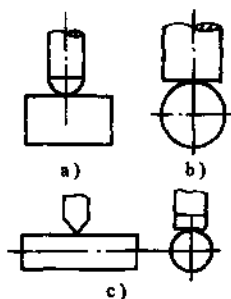


图 9-45 测头形式

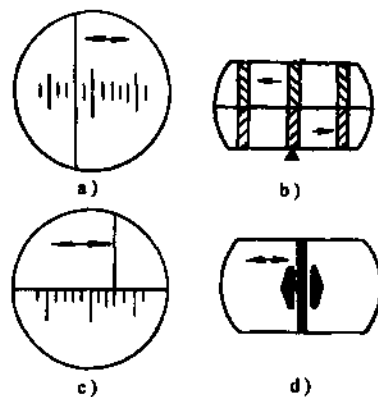


图 9-46 瞄准方式

至于非接触测量, 如工具显微镜目镜十字线对准被测件时, 此项对准误差则与刻线宽度、显微镜鉴别率、零件形状、照明条件、操作者的分辨力水平等因素有关。

(2) 对准读数装置的误差 此项误差主要由视差引起而视差的大小除与测量者的主观因素有关外, 还取决于读数装置的结构形式。

比如瞄准误差。光学仪器的刻线瞄准, 常用如图 9-46 的四种方式: 单线重合、单线符合、

双线符合、比线对称分跨。其瞄准误差按上述顺序依次减少。可见读数装置的结构不同,对准误差也不同。

又如估读误差。当主尺与游标不在同一平面上,或指针与度盘不在同一平面上时,则由于二平面距离 S (见图 9-47a、b),会导致估读误差 Δ (图 9-47c)。图中 l ——人眼至被测点距离; z ——人眼偏离垂直方位距离。为减小此项误差,可在度盘下设置反射镜以对准垂直方位。

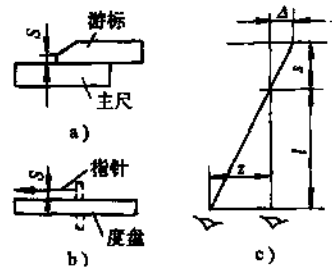


图 9-47 视差产生的原理

5. 环境条件误差

测量环境条件包括温度、湿度、气压、振动、灰尘等项目。其中温度是主要因素,其余诸项只是在精密测量时才有必要考虑。

在长度计量中,规定标准温度为 20°C 。当被测件温度和基准件(或仪器)温度偏离 20°C 分别为 t_1 和 t_2 ,且因材料不同而线胀系数也各为 α_1 和 α_2 时,则由此产生测量误差,计算公式参看本章第 1 节。

6. 人员引起的误差

除了在对准误差中涉及的光学测量人员的分辨能力外,一般测量工作人员的技术水平,连续工作时间长短,固有习惯及情绪等,也是测量误差的产生来源。

4.2 评定测量精度的两个综合性指标

(1) 量仪的不确定度 它是表示指示式计算器具内在误差影响测得值分散程度的一个误差范围。

计量器具的内在误差包括示值误差、示值变动性、回程误差、灵敏限以及由于结构原理、工艺、装调等引起的误差。根据我国检验标准 GB 3177—82 的规定,还应包括调整用的标准器误差。

(2) 测量方法(或过程)的不确定度 它是表示测量过程中,各项误差影响测得值分散程度的一个误差范围。它包括计量器具的不确定度,基准件误差以及测量条件的误差,如温度、振动、读数、瞄准等。

4.3 精密测量中的误差理论

从上述讨论看出,测量误差是不可避免地存在的,因此仅限于量取测得值是无意义的,必须同时对测量误差的大小或范围作出估计,这样的测量结果才是完整的,有意义的。

4.3.1 误差的分类

按照测量误差的特点、性质和规律,以及对测量结果的影响方式,可将其分为系统误差,随机误差和粗大误差三类。

1. 系统误差

在同一条件下,多次测量同一量值时,其绝对值和符号保持不变,或在条件改变时,其值按一定规律变化的误差,称为系统误差。因此,系统误差按其出现的规律又可分为

1) 定值系统误差,即误差的大小和方向为固定值。如基准件的误差,以及相当多的仪器原理误差和制造误差,皆属此类。

2) 变值系统误差,即误差的大小和方向为规律的变化值。按其变化规律,又有线性系统

误差、周期性系统误差和复杂规律系统误差之分。如温度变化引起的误差，刻度盘偏心引起的误差等，属此类。

能够用实验分析方法求得系统误差，可以给予相应的修正量，消除其对测量结果的影响。但是在很多情况下，系统误差的大小和方向难以查明，只能估计出误差的范围；有时，甚至仅仅能用统计学方法来推断系统误差是否存在。

2. 随机误差

在同一条件下，多次测量同一量值时，其绝对值和符号以不可预定的方式变化着的误差。称为随机误差。也叫偶然误差。

随机误差的存在，以及它的大小和正负，不受人为主的支配与控制，即单次测量之间无确定规律，不能从前一次误差预定后一次误差。但是多次重复测量的随机误差总体却存在着规律，并可用概率理论和统计数学的方法寻求和描述。

测量器具中零、部件配合的不稳定性，零件表层油膜的不均匀，摩擦力的变化等引起的皆属随机误差；环境条件的微量波动，如温度、气压、电磁场、光照强度的微小变动是随机误差的来源；测量人员因水平、疲劳、情绪等而引起的瞄准、读数不稳定等，也是随机误差。

3. 粗大误差

明显歪曲测量结果的误差称为粗大误差，也叫过失误差或疏忽误差。

一般认为该项误差是因测量人员的主观因素造成的，如读错了数，记错了数，或错误地操作仪器等。但外界条件的大幅度突变，如冲击振动、电压突降等，也会导致粗大误差。

正确的测量结果中，不应包含粗大误差在内，因此应根据一定的原则，从测量结果中剔除具有粗大误差的测值。

应该指出，上述误差分类在一定条件下可以互相转化，比如在使用某量块时，若未经检定其尺寸偏差，则量块的制造误差表现为未定系统误差，可按随机误差处理；若量块经过检定，并按其检定出的实际尺寸使用，则量块的制造误差就表现为定值的系统误差。

4.3.2 系统误差

在测量过程中产生系统误差的因素是复杂的，其机理是多种多样的，因此往往难以发现所有的系统误差。这里仅介绍几种比较直观地查明是否有可能存在系统误差的方法。

1. 定值系统误差的发现与消除

定值系统误差不能从系列测得值的处理中揭示，而只能通过另外的实验对比方法去发现这种误差。例如，在用比较仪测量某一尺寸时，由于量块尺寸偏差引起的定值系统误差，可用高精度的仪器对量块实际尺寸进行检定来发现，或用高度量块代替进行对比测量来发现。

在测量过程中，如能控制定值系统误差的符号，则可使定值系统误差的出现一次为正，另一次为负，然后取这两次读数的算术平均值作为测量结果。例如，在工具显微镜上测量螺纹的螺距时由于工件安装轴线与工作台移动方向不重合所引起的定值系统误差，可通过实测左、右轮廓的螺距并取其平均值作为螺距的实测结果(图 9-48)。

2. 变值系统误差的发现与消除

变值系统误差有可能从系列测量值的处理和分析观察中揭示出来。

通过对系列测量值中各个剩余误差的大小与符号的变化状况进行分析，可判断是否存在系

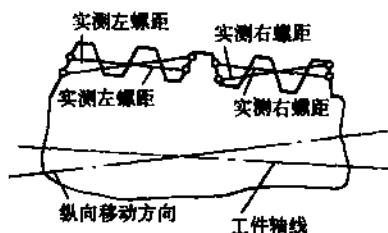


图 9-48 螺距测量中的典型系统误差

统误差。例如，当剩余误差大体上正负相同，无倾向性的变化趋势时，则不能认为存在变值系统误差(但不排除存在定值系统误差的可能性)。剩余误差数值有规律地递增或递减，且其趋势始终不变，则可认为存在线性变化的系统误差。当剩余误差有规律地增减交替，形成循环重复时，则认为存在周期性的系统误差。

显然，为了发现变值系统误差，在对测量系列作表或作图时，必须严格按照测量值的时间顺序，不得混合排列。

如要判断两组系列测量值之间是否存在系统误差，可用数据比较法。设对某一被测的量值，测得两组结果，其算术平均值为 \bar{x}_1 和 \bar{x}_2 ，相应的标准偏差为 σ_1 和 σ_2 。则两组之间不存在系统误差的标志是：

$$|\bar{x}_2 - \bar{x}_1| < 2\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (9-55)$$

若怀疑存在变值系统误差，一般均应通过分析实验，找出其产生原因，并设法消除之，然后重新进行测量。

4.3.3 随机误差

1. 随机误差的分布律

大量的测量实践表明，多数随机误差，特别是在多种各不占优势的独立随机因素综合作用下的随机误差。是服从正态分布律的。所以，其概率密度函数为

$$y = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} \quad (9-56)$$

式中 δ ——随机误差(真差)；

y ——概率分布密度，可理解为随机误差 δ 在单位区间内出现的概率；

σ ——均方误差，是评定测量精度的一项数值参量(详见后述)；

e ——自然对数的底， $e = 2.71828\cdots$ 。

以 δ 为横坐标， y 为纵坐标，此方程的图形如图9-49所示，称为“高斯曲线”或“随机误差正态分布曲线”。该曲线反映出随机误差的以下基本特性。

(1) 随机误差的集中性 在高斯方程中， e 的指数总是负值，而 e 本身大于1。所以 δ 越大时 y 越小； $\delta = 0$ 时， y 最大，其值为

$$y_{\max} = y_0 = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \quad (9-57)$$

这表明，测量中小的随机误差出现机会较多，而大误差的出现机会较少。

(2) 随机误差的对称性 在高斯方程中， δ 是以平方的形式出现的，所以对于绝对值相同而正负号相反的一对 δ ， y 只有一个值，即为偶函数，曲线以 y 轴为对称轴。这表明，绝对值相等的正负随机误差，出现的机会相同。

(3) 随机误差的有限性 在高斯方程中，随着 δ 的增大， y 值减小很快，即曲线的大部分下降很陡，迅速地 δ 轴收敛。这表明绝对值超过一定限度的随机误差事实上不会出现。

(4) 随机误差的抵消性 在高斯方程中，既然 y 是偶函数，曲线左右对称，所以全部可能出现的随机误差的总和应等于零。这表明，随着重复测量次数的增多，一系列随机误差的实际平均值趋近于零。

2. 算术平均值原理

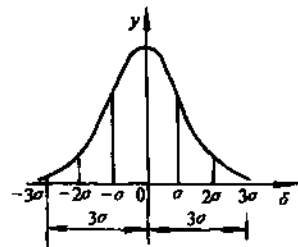


图9-49 正态分布曲线

由于随机误差的存在,对某一量值作多次重复测量所得的测值,必然是互不相同。这时,应以所有测得值的算术平均值作为测量结果,才是最合理的。

(1) 算术平均值的意义 设 x_1, x_2, \dots, x_n 为 n 次测量所得之值,该组测值的算术平均值 \bar{x} 为

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (9-58)$$

设 $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ 为每次测量所产生的随机误差,于是,若被测量的真值为 L_0 , 则有

$$x_1 - L_0 = \delta_1$$

$$x_2 - L_0 = \delta_2$$

$$x_n - L_0 = \delta_n$$

$$\sum x_i - nL_0 = \sum \delta_i$$

$$L_0 = \frac{\sum x_i}{n} - \frac{\sum \delta_i}{n}$$

根据随机误差的对称性,当 $n \rightarrow \infty$ 时, $\sum \delta_i \rightarrow 0$, 所以

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \rightarrow L_0$$

可见,随着重复测量次数的增多,其所有测值的算术平均值最近于真值。所以应该以算术平均值作为测量结果的理论根据,即在于此。

(2) 剩余误差及其性质

各个测得值与算术平均值之差,叫作剩余误差(也称残差) v_i , 即

$$v_i = x_i - \bar{x} \quad (9-59)$$

剩余误差的代数和等于零, 即

$$\sum v_i = 0$$

这是因为

$$\sum v_i = \sum (x_i - \bar{x}) = \sum x_i - n\bar{x} = 0$$

利用剩余误差的这一特性,可对算术平均值和剩余误差的计算正误进行校核。

3. 标准偏差

为了判断随机误差对测量结果可靠性程度的影响,也就是为了鉴定测量的精密度,有必要建立一项衡量测量精度的数值指标。最常用,也是最基本的一种指标,为标准偏差,亦称均方误差,即高斯方程中的 σ 值。

(1) 单次测量的标准偏差 标准偏差的定义为:在等精度的测量列中,即同一条件下所得一系列测值中,标准偏差为各随机误差平方和平均值的平方根, 即

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \dots + \delta_n^2}{n}} = \pm \sqrt{\frac{\sum \delta_i^2}{n}} \quad (9-60)$$

根据高斯方程可知, σ 值越小,则 e 的指数的绝对值大,于是 y 随 σ 的增加而减少得很快、即曲线更陡;与此同时,因 σ 小、所以 e 前面的系数值则大、从而对应于误差为零($\delta=0$)处的纵坐标也更大,则曲线顶点更高(见图 9-50)。反之, σ 越大,曲线变化更平稳,曲线顶点也更低。

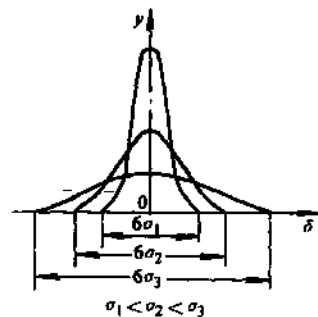


图 9-50 标准偏差的影响

由此可见,标准偏差 σ 值越小,测量列中小误差测值的概率就占优势,且误差的分散和范围也小,说明测量的可靠性大,即测量精度高;反之, σ 值越大,测量精度越低。

因此,若按式(9-60)求标准偏差,则因其中的 δ 表示“真差”,即实际测得值与真值之差、而真值未知,所以不能直接按定义求出 σ 值。

在实际测量中,要用剩余误差计算标准偏差,根据误差理论

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum v_i^2}{n-1}} \quad (9-61)$$

此式称为白塞尔(Bessel)公式,根据此式可由算术平均值的剩余误差求得单次测量的标准偏差。

应该指出,单次测量的标准偏差 σ 并非只测量一次就能得到的,对于一定的测量方法或量仪,必须通过大量测试才能获得,一旦得出了 σ 值,在今后使用该量仪或测量方法时, σ 便为已知值,便能对单次测量给以精度。在有的仪器说明书里或手册表格中往往也给出了 σ 值。此时,在测量过程中便可直接引用,而不必自己去求出。

(2) 算术平均值的标准差 在多次重复测量中,是以算术平均值作为测量结果的,因此要研究算术平均值的可靠性程度。根据误差理论,在等精度测量时,

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sigma^2}{n}} = \sigma/\sqrt{n} \quad (9-62)$$

上式表明,在一定的测量条件下(即 σ 一定),重复测量 n 次所得的算术平均值,标准偏差要比单次测量者小 \sqrt{n} 倍,就是说 n 越大,平均值的分散范围越小。它的测量精度越高。

但是,算术平均值的测量精度与测量次数 n 的平方根成反比,因此要显著提高测量精度,势必要大大增加测量次数;而与此同时,如图9-51所示,当 n 大于10以后, $\frac{1}{\sqrt{n}}$ 的减小已很缓慢;此外,由于测量次数越大,恒定的测量条件越难以保证,以致引起新的误差。因此一般情况下,取 $n < 10$ 的测量次数为宜。

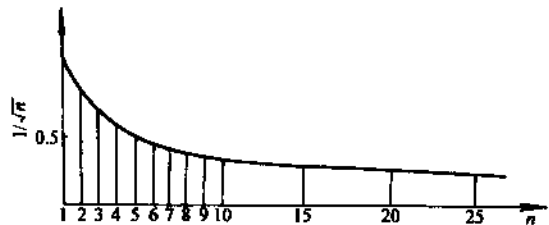


图9-51 n 和 $\frac{1}{\sqrt{n}}$ 的关系曲线

4. 极限测量误差

(1) 正态分布的概率积分 根据高斯方程(9-56),式中 y 为概率分布密度的定义可知,随机误差正态分布曲线下的全部面积,相当于全部误差出现的概率,即

$$P(\pm \infty) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} d\delta = 1$$

而随机误差在 $-\delta$ 至 $+\delta$ 范围内的概率则为

$$P(\pm \delta) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\delta}^{+\delta} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} d\delta = \frac{2}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_0^{\delta} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} d\delta \quad (9-63)$$

以新变量 z 作置换,令 $z = \frac{\delta}{\sigma}$, $d\delta = \sigma dz$

则

$$P(\pm \delta) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-\frac{z^2}{2}} dz = 2\phi(z) \quad (9-64)$$

若某随机误差 $|\delta_k|$ 在 $\pm z_\sigma$ 范围内出现的概率为 $2\phi(z)$ ，则超出范围的概率仅为 $\alpha = 1 - 2\phi(z)$ 。

由于实际测量时得不到真差 δ ，而以足够多次测量的算术平均值 \bar{x} 作为测量结果，所以高斯方程(9-56)以剩余误差写为

$$y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} dx \quad (9-65)$$

同理，概率积分式(9-64)写为

$$P(\pm x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-\frac{z^2}{2}} dz = 2\phi(z) \quad (9-66)$$

式中 $z = \frac{x - \bar{x}}{\sigma}$, $dz = \frac{dx}{\sigma}$

经上述变换，式(9-65)之曲线如图 9-52 所示，式(9-66)之概率如图 9-53 所示。该图中，变量 z 为标准正态分布。

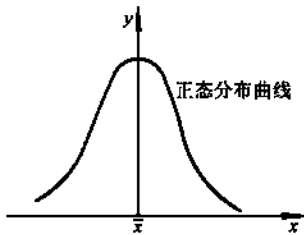


图 9-52 \bar{x} 为原点的正态分布

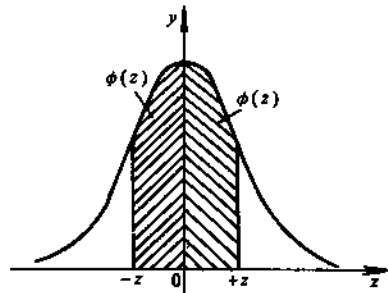


图 9-53 概率计算

(2) 单次测量的极限误差 极限误差用来限定测量结果的分散特性，并以此表明测量的不确定度。

单次测量的极限误差是测量中随机误差的极限值：任何一次测量的随机误差不超过该界限值(即不超过极限误差)的概率 P ，而使超过该值的概率 $(1 - P)$ 小到可予以忽略。

从概率积分表可以看出，随着 z 值的加大，超过 $\pm z\sigma$ 的概率很快地减小，就是说，当 z 为不甚大的一定值时，超出 $\pm z\sigma$ 的概率实际可以忽略不计。例如当 $z = 1$ 时，超出 $\pm 1\sigma$ 的概率为 0.3174，即 3 次测量中就可能有一次随机误差绝对值超出 σ 范围；当 $z = 2$ 时，则超出 $\pm 2\sigma$ 的概率为 0.0456，即 22 次测量中才有一次超出 2σ 范围；而当 $z = 3$ 时，超出 $\pm 3\sigma$ 的概率仅为 0.0027，即 370 次测量中仅有一次超出 3σ 范围。

在一般测量中，测量次数很少超过两位数者，因此可以认为绝对值大于 3σ 的随机误差实际不可能出现。通常就把这一误差值作为界限，称为单次测量的极限误差 $\delta_{\text{lim}}x$ ，即

$$\delta_{\text{lim}}x = \pm 3\sigma \quad (9-67)$$

该式表明，测量列中的任何一次测量的随机误差都不会超过 $\pm 3\sigma$ 的界限(置信度为 99.73%)。

综上所述，用极限误差表示测量结果的分散特性，即测量的不确定度时，对于测量列中的单次测量而言，可用下式

$$\delta_{\text{lim}} = \pm z\sigma \quad (9-68)$$

(3) 算术平均值的极限误差 由于算术平均值也遵循正态分布律, 只是其标准误差是单次测量者的 $\frac{1}{\sqrt{n}}$, 所以测量列的算术平均值极限误差的计算方法与单次测量者相同, 只是采用 σ_x 代表 σ , 即

$$\delta_{\text{lim}} = \pm z\sigma_x$$

通常也是取 $z = 3$ 。

4.3.4 粗大误差

判别和剔除粗大误差, 不可凭主观臆断, 轻易地剔除主观认定为反常的数据, 从而人为地使测得数据一致起来, 是不对的; 但不敢舍弃任何一个测得数据, 一概当作是正常信息, 也是不对的。因此, 就有一个确立判别粗大误差界限的问题。

原则上粗大误差的界限应以随机误差的实际分布范围作为依据, 即超出该范围的误差, 可被视为粗大误差而予以剔除。但是, 由于误差分布律不同, 测试子样容量的不同等因素, 在具体确定粗大误差界限时, 须按不同情况, 以不同的判别准则区别对待。

1. 莱依达准则(也称 $\pm 3\sigma$ 准则)

由于多数测试误差接近于正态分布, 而正态分布的范围或极限误差为 $\Delta_{\text{lim}} = \pm 3\sigma$ 的数据可认为含有粗大误差, 即以

$$|v_i| > 3\sigma \quad (9-69)$$

作为判别粗大误差之界限。

但 $\pm 3\sigma$ 原是真差的分布范围, 今以剩余误差代替真差作判别, 则均值 \bar{x} 和均方根误差 σ 都应是大量重复测量的统计量。因此, 该判别准则仅适用于大量重复测量的统计分析, 或事先已通过大量重复测量试验而统计出 σ 值。

在通常重复测量次数不大(如 $n < 50$), 且无事先经大量统计而得到的 σ 值资料时, 使用此准则未必可靠而偏于保守, 即可能放过了粗大误差而未予剔除。

此法在使用时, 必须先按式(9-61)算出标准偏差 σ , 然后用 3σ 来检查所有的残余误差 v_i , 若某一个 $|v_i| > 3\sigma$, 则可视作粗大误差予以剔除, 然后重新计算标准偏差 σ , 再将新算出的残余误差进行判断, 每一次只能剔除一个最大的 v_i 作为粗大误差, 直到不存在粗大误差为止。

2. 肖维纳准则

这个准则评定粗大误差与测量次数有关。如果 v_i 的绝对值超过 z 则认为该 v_i 是粗大误差, 应予剔除。 z 值用函数 $\phi(z)$ 来计算。

$$\phi(z) = \frac{2n-1}{4n} \quad (9-70)$$

式中 n 为测量次数。

为了使用方便, 可将式(9-70)按不同的 n 值列出粗大误差界限系数 z 的表格如表 9-8 所示, 例如, $n = 30$, 则从表中知 $z = 2.39$, 若已知 $\sigma = \pm 2\mu\text{m}$, 于是 $|v| = 2.39 \times 2 = 4.78\mu\text{m}$, 因此在 30 个测值中如有剩余误差 $|v_i|$ 值超过 $4.78\mu\text{m}$ 者, 便作为粗大误差而剔除。

表 9-8 z 值与 n 关系

n	z	n	z	n	z
5	1.68	11	2.00	25	2.33
6	1.73	12	2.04	30	2.39
7	1.79	14	2.10	40	2.50
8	1.86	16	2.16	50	2.58
9	1.92	18	2.20	80	2.74
10	1.96	20	2.24	100	2.81

由表 9-8 可知, 当 n 值很大时, 此法与 3σ 法很接近, 但当 n 甚小时, 则差别较大, 故一般适用于 $n > 15 \sim 20$ 以上。

剔除粗大误差的评定准则很多, 请参阅有关误差理论书籍。

4.3.5 间接测量误差的计算

间接测量的特点是所需的测量值不是直接测出的, 而是通过函数关系测量有关的独立量值 x_1, x_2, \dots, x_n 后, 经过计算而得的。

对于一般函数关系式可写成

$$y = F(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (9-71)$$

在间接测量中, 各个独立测量值的误差皆可按前述方法处理, 而间接测得值的误差, 则可按一定的计算关系求得。

1. 系统误差的计算

由式(9-71)知, y 值由 x_1, x_2, \dots, x_n 各直接测量的独立量决定, 若已知各独立量的系统误差分别为 $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$, 则间接量 y 的系统误差应为

$$y + \Delta y = F(x_1 + \Delta x_1, x_2 + \Delta x_2, \dots, x_n + \Delta x_n)$$

各元函数的增量可近似地用函数的全微分表示, 则

$$\Delta y = \frac{\partial F}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial F}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial F}{\partial x_n} \Delta x_n \quad (9-72)$$

2. 随机误差的计算

若各独立量误差的符号不能事先测出, 则直接测量误差应按随机误差来处理。

设函数关系为 $y = F(x_1, x_2, \dots, x_n)$

函数的标准偏差可由下述方法求出, 将式(9-72)平方, 并将 Δx 用 δx 代替 Δy 用 δy 代替, 得

$$\delta y^2 = \left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \delta x_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \delta x_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_n} \delta x_n \right)^2 + 2 \frac{\partial y}{\partial x_1} \frac{\partial y}{\partial x_2} \delta x_1 \delta x_2 + \dots + 2 \frac{\partial y}{\partial x_{n-1}} \frac{\partial y}{\partial x_n} \delta x_{n-1} \delta x_n$$

若进行足够多次数的测量, 而将所有的 δy^2 相加时, 则根据正负随机误差出现的概率相等这一特性, 可认为非平方的各项彼此相消, 而平方项则因与正负无关而保留, 即

$$\sum \delta y^2 = \left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \right)^2 \sum \delta x_1^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \right)^2 \sum \delta x_2^2 + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_n} \right)^2 \sum \delta x_n^2$$

上式两边各除以 n , 得

$$\frac{\sum \delta y^2}{n} = \left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \right)^2 \frac{\sum \delta x_1^2}{n} + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \right)^2 \frac{\sum \delta x_2^2}{n} + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_n} \right)^2 \frac{\sum \delta x_n^2}{n}$$

按均方误差的定义, 上式可写为

$$\sigma_y^2 = \left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \right)^2 \sigma_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \right)^2 \sigma_{x_2}^2 + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_n} \right)^2 \sigma_{x_n}^2 \quad (9-73)$$

$$\sigma_y = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \right)^2 \sigma_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \right)^2 \sigma_{x_2}^2 + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_n} \right)^2 \sigma_{x_n}^2}$$

这就是求函数随机误差的一般公式。

4.3.6 测量数据的结果表达式

采用直接测量时:

1) 若只有随机误差而无任何系统误差, 则测量结果表达式为

$$L = \bar{x} + k\sigma_x \quad (9-74)$$

式中 k —置信系数, 下同。

2) 若除随机误差外尚有已定的系统误差, 即其大小和符号均已知的定值系统误差 Δ_0 , 则

$$L = (\bar{x} + \Delta_0) \pm k\sigma_x \quad (9-75)$$

3) 若系统误差中还有一部分不能确定其大小和符号者, 称为未定系统误差 Δ (如未经检定的刻度尺、量块等的制造误差, 在一定范围内波动的温度误差等), 由于此项误差在一定范围内具有随机性, 因此可作为随机误差处理, 于是测量结果表达式为

$$L = \bar{x} + \Delta_0 \pm \sqrt{(k\sigma_x)^2 + \Delta^2} \quad (9-76)$$

4.3.7 测量不确定度简介

由于测量结果必然会包含有误差, 误差始终存在于一切科学实验之中, 测量误差的概念伴随着计量学的产生就产生了。误差理论迄今为止已经历了由经典误差理论到现代理论的变迁。随着现代科技、工业和商贸的发展, 经典的、以测量误差来表示测量结果的精度已过时, 而用测量不确定度来表示测量结果的可信程度则越来越被认可和接受。

1970年以来, 各国计量部门逐渐使用不确定度来评定测量结果, 由于评定方法一样, 评定结果不一致, 使得各国在互相利用成果时极为困难, 并对各国测量结果的比较带来很大的不便。

1980年国际计量局(BIPM)在征求各国意见的基础上, 提出了《实验不确定度建议书 INC-1》。1986年国际标准化组织(ISO)、国际电工委员会(IEC)、国际计量委员会(CIPM)、国际法制计量组织(OIML)、国际理论与应用化学联合会(IUPAC)、国际理论与应用物理联合会(IUPAP)和国际临床化学联合会(IFCC), 成立了国际不确定度工作组, 研究不确定度及其使用, 制定了有关不确定度的较为详细和实用的指导性文件, 并于1993年发表了《测量不确定度表示指南》(Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement), 它明确了被测量值、测量误差、测量不确定度等基本术语和定义, 阐述了不确定度的评估方法, 使测量结果有了统一的国际比较基础。

测量误差与数据处理方法目前已跳出传统的统计圈子, 与模糊数学、数理统计、科学实验和测量工作等结合起来, 注重误差的分布规律和合成的研究, 强调测量不确定度的评估, 能更好地解决计量实践中的问题, 并主动地去规划设计测量, 进行精度分析和精度设计, 不断地向标准化进展。

1. 测量不确定度

由于测量误差的存在, 测量结果并非被测量真值。对测量误差进行分析估计, 表示对测量结果不能肯定的程度的分散性参数即为测量不确定度。不确定度愈小, 测量结果对真值愈靠近, 其质量愈高, 使用价值也愈高; 不确定度愈大, 测量结果对真值愈远离, 其质量愈低, 使用价值也愈底。

测量不确定度的定义为, “测量不确定度是测量结果中表示合理赋予被测量值分散性的一个参数”(parameter, associated with the result of a measurement, that characterizes the dispersion of the values that could reasonably be attributed to the measurand)。

“不确定度”这个词指“不肯定”, 因此测量不确定度表征测量结果变化的不肯定。它一般用标准偏差或标准偏差的倍数(一定置信水准区间的半宽度)来表示。

测量不确定度表示合理赋予被测量值的分散程度, 而被测量真值评定落于其中。全部不确

定分量, 包含由系统效应产生的分量, 如修正值和参考标准具有的分量, 均贡献于此分散性, 测量不确定度定量评定测量的不足, 是对测量误差的表示和估计。

这里合理赋予被测量的值即为测量结果, 是被测量真值的最佳估计。

测量不确定度必须正确评定。不确定度评定过大, 会因测量不能满足需要而需再投资, 造成浪费, 不确定度评定过小, 会对产品质量造成危害, 会对生产、国防造成危害。

不确定度与计量科学技术密切相关, 不确定度用以说明基准标准、检定测试的水平, 作为量值传递的依据。不确定度还用来表明仪器设备的质量。

2. 测量误差与测量不确定度的区别和联系

不确定度的概念和体系是在误差理论的基础上建立和完善的, 它避免了原经典误差理论中某些概念可能产生混淆的现象, 能更准确地用于测量结果所具有的精度的表示。二者的区别为:

1) 测量误差和测量不确定度是两个不同的概念。测量误差是一个理想的未知数, 而测量不确定度在一定置信水准下为一个确定值。不确定度永远是正值, 而误差可能为正, 可能为负, 也可能非常接近于零。

2) 测量不确定度大, 并不说明测量误差也大, 经修正后的被测量的合理赋值有可能非常接近于被测量真值, 即测量误差可能非常接近于零, 其绝对值远小于测量不确定度; 测量误差的绝对值也可能(以很小的概率)大于测量不确定度。

3) 测量不确定度可以理解为一定置信水准的测量误差限, 用来评估由于测量的不完善而可能存在的测量误差, 它以合理赋予被测量的最佳估计(测量结果)为中心, 而测量误差是客观存在的, 以被测量的真值为中心。

3. 测量不确定度的基本术语

测量不确定度: 测量结果中表示合理赋予被测量值分散性的一个参数。

标准不确定度: 用标准偏差表示的测量不确定度。

不确定度的 A 类评定: 用统计分析一系列的重观测数据来评定不确定度的方法。

不确定度的 B 类评定: 用不同于统计分析的其他方法来评定不确定度的方法。

合成标准不确定度: 当测量结果由其他量得来时, 按其他量的方差与协方差加权后的平方根算得的标准不确定度, 其中加权系数由测量结果随这些量变化的情况而定。合成标准不确定度亦简称合成不确定度。

扩展不确定度: 表示测量结果的取值区间的量, 被测量的合理赋值可望以高置信概率位于其中。

包含因子: 为获得扩展不确定度对合成不确定度所乘的数值因子。此因子通常在 2 至 3 之间。

4. 不确定度的 A 类和 B 类评定

不确定度是由于测量误差的存在而对测量结果不能肯定的程度, 故不确定度评估应针对测量误差。

任何一个测量任务的完成, 不但要给被测量一个合理赋值, 还要估计被测量的真值的存在范围。

(1) 不确定度的 A 类评定 一般来说, 高精度测量所给出的被测量的合理赋值, 已修正了系统误差的影响并剔除了粗大误差, 影响测得值的主要因素为随机误差的不确定度和对系统误差修正不完善的不确定度, 而这两类不确定度都具有随机性, 可用概率和数理统计方法来评

估。

不确定度的 A 类评定方法基于统计分析, 具体的评定方法有基本评定法、最大残差法、最大误差法、极差法和分组极差法。下面只介绍基本评定法, 其他方法可参阅有关误差理论和不确定度原理的书籍。

对某无规则变化的输入量 X 进行 n 次独立重复观测, 得观测值 X_1, X_2, \dots, X_n , 则 X 的期望值的最佳估计 x 为 n 次观测量的平均值 \bar{X} , 即

$$x = \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (9-77)$$

每次独立观测值 X_i 的不同是由于影响量的随机性变化, 观测值 X_i 的实验方差估计为

$$s^2(X_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad (9-78)$$

观测值 X_i 的标准偏差为实验方差的平方根 $s(X_i)$, 它表征观测值 X_i 在其平均值 \bar{X} 附近的分散性。平均值 \bar{X} 的标准偏差为

$$s(\bar{X}) = \frac{s(X_i)}{\sqrt{n}} \quad (9-79)$$

观测值的标准偏差 $s(X_i)$ 和平均值的标准偏差 $s(\bar{X})$ 都说明以 \bar{X} 估计 x 的期望值的接近程度, 皆可用作估计值 \bar{X} 的不确定度的度量。

因此, 由 n 次独立重复观测 X_i 确定输入量 X 时, 观测量 X_i 的标准不确定度为 $u(X_i) = s(X_i)$, 其估计 $x = \bar{X}$ 的标准不确定度为 $u(\bar{X}) = s(\bar{X})$ 。为方便起见, 用这种统计方法得出的标准不确定度称为 A 类标准不确定度, 亦称统计不确定度。

(2) 不确定度的 B 类评定 如果实验室拥有足够多的时间和资源, 可以对不确定度的每个起因进行详细的统计研究, 所有不确定度分量就可以用 A 类评定得到。然而, 这样做并非经济可行, 很多不确定度分量实际上还必须用别的方法来评定。

对输入量 X 的估计 x 不是用重复观测的方法得来, 观测值 X_i 标准偏差 $s(X_i)$ 即标准不确定度 $u(X_i)$ 只能根据涉及 X 变化的全部信息来评定。这些信息可能是: 以前的测量数据; 经验或有关资料及仪器特性的一般知识; 制造厂的技术说明书; 检定证书或其他证书提供的数据; 由手册查得的参考数据。为方便起见, 用这种方法估计的不确定度称为 B 类标准不确定度, 亦称非统计不确定度。

合理使用评定 B 类标准不确定度的全部信息, 要求对经验及一般知识有透彻的了解, 这是一门技巧, 一般靠实际经验的积累。应该认识到, B 类评定标准不确定度与 A 类评定标准不确定度一样可靠。

5. 合成标准不确定度

很多情况下, 被测量 Y 不能直接获得, 而是通过 N 个其他可观测量 X_1, X_2, \dots, X_N 的函数关系 f 决定:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (9-80)$$

被测量 Y 的不确定度取决于各直接测量量 X_i 的合成, 估计 y 的合成标准不确定度记为 $u_c(y)$ 或 (简记为 u_c)。有公式

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \quad (9-81)$$

其中第二项记作 $r(x_i, x_j)$ 为 x_i, x_j 两直接测量量的相关系数。引入符号

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}, u_i(y) = |c_i| u(x_i)$$

则各观测量 X_i 无关 ($r=0$) 时, 有

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (9-82)$$

各观测量 X_i 两两全相关 ($r=1$) 时, 有

$$u_c^2(y) = \left\{ \sum_{i=1}^N c_i u(x_i) \right\}^2 = \left\{ \sum_{i=1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} u(x_i) \right\}^2 \quad (9-83)$$

两观测量相关时, 可用估计的协方差来计算相关系数。

各观测量分量相关与否应根据实际情况来考虑。一般地对两分量来说, 当一分量增大或减小而另一分量随机可正可负, 或两分量各自独立, 或两分量属于不同体系时, 则两分量不相关 ($r=0$); 当两分量正线性相关, 或一分量增大和减少另一分量亦增大和减小, 或两分量显著相关, 或两分量属于相同体系时, 则两分量强相关 ($r=1$), 两份量的部分相关时可用最小二乘法进行理论计算来确定其相关系数。

有时采用正交设计等方法避开相关的引入和计算。例如, 某被测量可用函数关系 $y = f(x_1(T, S), x_2(T, S))$ 来求得, 因两分量 x_1, x_2 都含有 T, S 而相关, 若能将被测量的函数关系改写成 $y = g(u_1(T), u_2(S))$, 则两分量 u_1, u_2 无关, 这就使计算得以简化。

6. 扩展不确定度

合成标准不确定度 $u_c(y)$ 对应于标准差, 尽管它可广泛用以表示测量结果的不确定度, 然而在很多应用中, 例如测量比较、安全生产及人体健康工作中, 常需测量不确定度给出测量结果的存在区间, 为满足提供测量结果一个区间的要求而附加的不确定度量称扩展不确定度, 并记为 U 。扩展不确定度 U 由合成标准不确定度 $u_c(y)$ 乘以包含因子 k 得到, 即

$$U = k u_c(y) \quad (9-84)$$

于是测量结果按约定表示为 $Y = y \pm U$ 。意思是, 被测量 Y 的最佳估计值为 y , $y - U$ 至 $y + U$ 的区间以一定的置信水准包含了合理赋予被测量 Y 值的分布的大部分。换句话说, U 是确定测量结果存在区间的半宽度, 它包括测量结果及其合成标准不确定度表示的概率分布的一个高百分率 P , P 称为此区间的包含概率或置信水准。

包含因子 k 值的选取是基于 $y - U$ 至 $y + U$ 区间所需的置信水准。通常 k 在 2~3 范围内取值。在特殊应用时 k 亦可超出此范围。

在实际应用中, 对一给定 k 值应说明该区间的置信水准, 但这很难做到。因为它需对表征 y 和 $u_c(y)$ 的变化的概率分布有丰厚的知识。

一般 k 由置信水准 P 下 t 分布的临界值 $t_p(v)$ 给出(可查表), 其中 v 为 y 的合成不确定度的自由度。自由度可用于描述不确定度评定的质量, 也是计算扩展不确定度的依据。过去常用正态分布计算标准偏差和扩展不确定度, $k=2$ 时置信水准为 $P=95.45\%$, $k=3$ 时置信水准为 $P=99.73\%$ 。

7. 测量结果的表示

任意一个完整的测量结果, 应包括合理赋予被测量的值 y 和测量不确定度 $u_c(y)$ 或 U 。合理赋予被测量的值 y , 应不包含粗大误差并对系统误差进行了预防和修正, 是被测量的最佳估计; 测量结果中的测量不确定度, 应是对所有不确定度来源的正确评估。用 $u_c(y)$ 表示测量结果的不确定度时, 应附加自由度; 用 U 表示测量结果的不确定度时, 应说明它据以计算的合成

标准不确定度 $u_c(\gamma)$ 、 t 分布临界值的自由度、置信水准和包含因子。

5 典型精密测量系统简介

5.1 双频激光外差干涉仪及应用

5.1.1 双频激光外差干涉仪的工作原理

图 9-54 示出双频激光外差干涉仪的光学系统。干涉仪的光源为一双频 He-Ne 激光器，这种激光器在全内腔单频 He-Ne 激光器上加上约 $300 \times 10^{-4} \text{T}$ 的轴向磁场，由于塞曼效应和频率牵引效应，使该激光器输出一束有两个不同频率的左旋和右旋圆偏振光，它们的频率差 $\Delta\nu$ 约为 1.5MHz 。图中双频激光器 1 发生的双频激光束通过 $1/4$ 波片 2 变成两束振动方向互相垂直的线偏振光(设 ν_1 垂直于纸面, ν_2 平行于纸面)，经光束扩束器 3 适当扩束准直后，光束被分束镜 4 分为两部分，其中一小部分被反射到检偏器 5 上，检偏器的透光轴与纸面成 45° 方向上的投影，形成新的同向线偏振光并产生“拍”，其拍频就等于两个光频之差，即 $\Delta\nu_0 = \nu_1 - \nu_2 = 1.5 \text{MHz}$ ，该信号由光电接收器 6 接收后进入交流放大器 7，放大后的信号作为参考信号送给计算机，另一部分光束透过分束镜 4 沿原方向射向偏振分束棱镜 8。偏振方向互相正交的线偏振光被偏振分束棱镜按偏振方向分光， ν_1 被反射至参考角锥棱镜 9， ν_2 则透过 8 到测量角锥棱镜 10。这时，若测量镜以速度为 v 运动(移动或振动)，则由于多普勒效应，从测量镜返回光束的光频发生变化，其频移 $\Delta\nu = 2v/\lambda$ 。该光束返回后重新通过偏振分束棱镜 10 与 ν_1 的返回光会合，经反射镜 11 及透光轴与纸面成 45° 的检偏器 12 后也形成“拍”，其拍频信号可表示为

$$\nu_1 - (\nu_2 \pm \Delta\nu) = \Delta\nu_0 \pm \Delta\nu \quad (9-85)$$

式中正负号由动镜移动方向决定，当动镜向偏振分束器方向移动时为负，反之为正，拍频信号被光电接收器 13 接收后，进入交流前置放大器 14，最后也被送到计算机。

计算机先将拍频信号与参考信号进行相减处理后，就得到所需的测量信息 $\Delta\nu$ 。

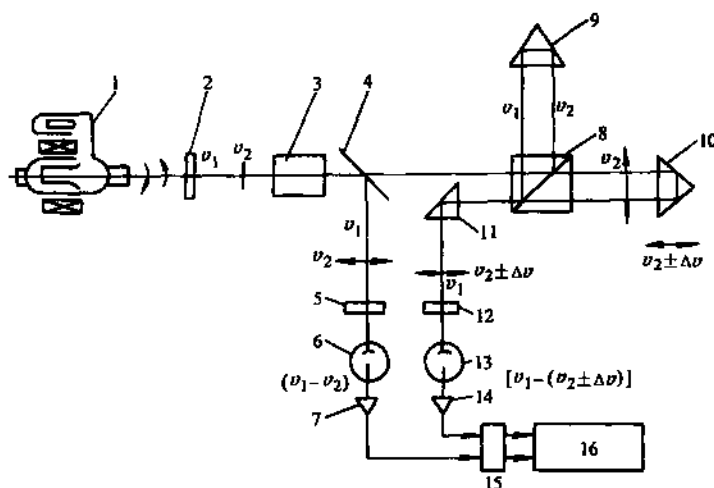


图 9-54 双频激光干涉仪

- 1—双频激光发生器 2—波片 3—扩束器 4—分束镜 5、12—检偏器
6、13—光电接收器 7—放大器 8—偏振分束棱镜 9—参考角
锥棱镜 10—测量角锥棱镜 11—反射镜 14—前置
放大器 15—信号处理单元 16—计算机

设在动镜 10 移动的时间 t 内, 由 $\Delta\nu$ 引起的条纹亮暗变化次数为 N , 则有

$$N = \int_0^t \Delta\nu dt = \int_0^t \frac{2\nu}{\lambda} dt = \frac{2}{\lambda} \int_0^t \nu dt \quad (9-86)$$

上式中, 设在时间 t 内动镜 10 移动的距离为 L , 于是

$$L = N \frac{\lambda}{2} \quad (9-87)$$

由 $\Delta\nu$ 换算成 L 的工作由计算机通过软件自动进行, 最后由显示器显示被测长度值。

双频激光干涉仪中, 双频起了调频的作用, 被测信号只是叠加在这一调频副载波上, 这一副载波与被测信号一起均被光电接收器接收并转换成电信号。当测量镜静止不动时, 干涉仪仍然保留一个 $\Delta\nu = 1.5\text{MHz}$ 的交流信号。动镜的运动只是使这个信号的频率增加或减少, 因而前置放大器可采用交流放大器, 避免了用直流放大器时所遇到的棘手的直流漂移问题。一般单频激光干涉仪中, 光强变化 50% 就不能继续工作。而对双频激光干涉仪, 即使光强损失达 95%, 干涉仪还能正常工作, 这就是交流干涉仪抗干扰性能好的原因。

此外, 双频激光干涉仪还具有测量范围大(可测大于 60m 的距离)及多功能等优点, 除测长外, 还可用于测角、测直线度及测振等。

为了保证双频激光干涉仪的测量精度, 双频激光器在使用时也需要采取稳频措施, 使其输出频率保持稳定。最常用的稳频方法是塞曼稳频法, 其稳频原理如下:

激光谱线在强磁声的作用下, 由于塞曼效应而分裂为具有一定频差的左、右旋圆偏振光, 这两种光对称分布在氦原子中心频率 ν_0 的两边, 图 9-55a 是塞曼分裂前的激光增益曲线, 图 9-55b 是塞曼分裂后的左、右旋光的增益曲线。当激光器的谐振频率 ν 调节到 $\nu = \nu_0$ 时, 左旋光 ν_1 和右旋光 ν_2 的发光强度相等, 即 $I_{\nu_1} = I_{\nu_2}$ 。若腔长发生变化而使 $\nu > \nu_0$, 由图 9-55b 可以看出, 此时 $I_{\nu_1} < I_{\nu_2}$; 反之光腔长变化使 $\nu < \nu_0$ 时, $I_{\nu_1} > I_{\nu_2}$ 。只有当谐振频率 $\nu = \nu_0$ 时, 左旋光和右旋光的输出发光强度才相等。因此, 可以利用这一性质来达到稳频的目的。只要分别测量左、右旋两部分光的输出发光强度, 随时进行比较, 根据 I_{ν_1} 是大于 I_{ν_2} 还是小于 I_{ν_2} 便可判断激光器的谐振频率在哪个方位, 从而给出调整信号去调整激光器谐振腔的腔长, 使 ν 重新等于 ν_0 , 来达到稳频的目的。

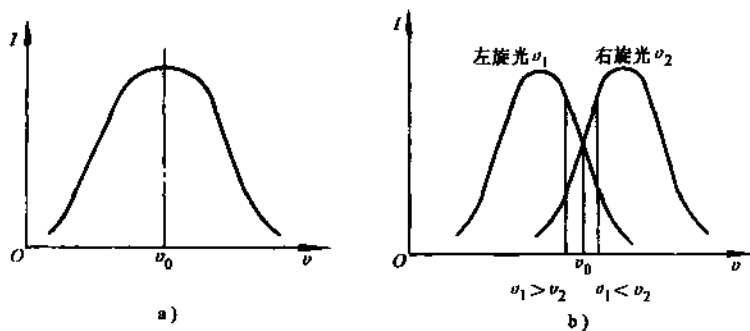


图 9-55 塞曼分裂前后氦氖激光增益曲线

a) 塞曼分裂前 b) 塞曼分裂后

稳频装置如图 9-56 所示。由双频激光器 4 发出的光线, 其强光输出射向干涉仪, 弱光输出端射向铌酸锂光电晶体 3。铌酸锂晶体的双折射率在外加电压的作用下会发生变化, 当加上适当电压后, 可使晶体起 $1/4$ 波片的作用。如果外加电压不停地交变, 就可使晶体成为一个光

轴在互相垂直的位置来回交变的 $1/4$ 波片, 或可理解为是一旋转着的 $1/4$ 波片。由于圆偏振光通过 $1/4$ 波片后变成线偏振光, 且偏振方向与 $1/4$ 波片的光轴成 45° 角, 因此左、右旋圆偏振光通过 $1/4$ 波片后变成互相垂直的线偏振光, 当 $1/4$ 波片旋转, 则这对线偏振光的振动面也随之旋转。双频激光束通过铌酸锂晶体的情况与此相同。如果在铌酸晶体后面放一检偏振器 2, 那么左、右旋交替地通过检偏振器而由光电管 1 接收。通过电子比较器对这两个信号进行比较, 如发现左、右旋光的光强不相等, 就可通过调整电路控制压电陶瓷 5 来改变腔长, 以保持激光器的谐振频率始终稳定在 ν_0 值上。

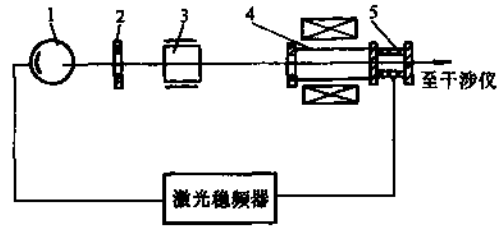


图 9-56 双频激光稳频装置
1—光电管 2—检偏振器 3—光电晶体
4—双频激光器 5—压电陶瓷

塞曼稳频法能达到的稳频精度与兰姆凹陷法类似, 约为 $1 \times 10^{-7} \sim 5 \times 10^{-8}$ 。

5.1.2 双频激光外差干涉的应用

双频激光干涉仪适用于车间现场进行精密计量, 例如用于车间校验数控自动机床的精度及测量机床导轨的直线度等。为便于测量, 往往将干涉仪的干涉系统作为一个部件装在被测的机床上, 而把激光器、照明系统与干涉系统分开, 既可使干涉系统远离热源和电源。减少热气流的影响, 又可使干涉系统靠近测量起始位置, 有利于消除闲区误差。

遥置式干涉仪的另一优点是便于更换干涉仪的组件, 以扩大应用范围, 使双频干涉仪成为多功能干涉仪。除用于长度计量处, 还可有下列的应用。

1. 双频激光干涉仪用于精密测角

图 9-57 示出测角的双频激光干涉仪, 在其干涉系统中用一双膜块组取代测长时所用的偏振分束器, 另外用一双角锥棱镜组分别作为干涉仪的测量镜和参考镜。由双频激光器来的双频激光束被双膜块组下部的偏振分束镜按偏振方向分开, 其中 ν_1 光透过偏振分束镜射向角锥棱镜 I; ν_2 光被反射向上, 经双膜块组上部的普通直角反射镜反射到角锥棱镜 II。分别由这两个角锥棱镜返回的光束在偏振分光镜处重新会合, 然后经反射到检偏振器及光电接收器。双角锥棱镜组安放在被测物体上, 当它在导轨上平移且没有摆动时, 两支光路的多普勒频移会合后经检偏振器产生拍频, 并在拍频中互相抵消, 计算机无多普勒频移值出现。如果双角锥棱镜组在移动过程中, 由于导轨的直线度偏差而发生 θ 角的倾斜, 则两棱镜的角点在光轴方向将产

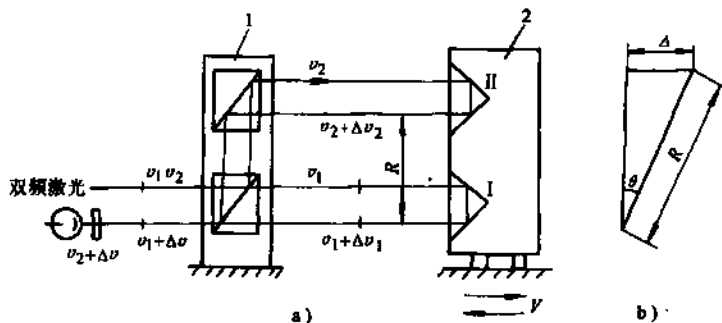


图 9-57 用于精密测角的双稳激光干涉系统
1—双膜块组 2—双锥棱镜组

生一个相对位移量 Δ ，如图 9-57b 所示。此时两路的多普勒频移 $\Delta\nu_1$ 和 $\Delta\nu_2$ 不相等，即有 $\Delta\nu = \Delta\nu_1 - \Delta\nu_2$ ，由图可见， θ 与 Δ 有下列关系：

$$\theta = \arcsin \frac{\Delta}{R} = \arcsin \frac{\lambda \int_0^t \Delta\nu dt}{2R} \quad (9-88)$$

θ 值可由计算机根据上式计算并显示。

双频激光干涉仪的测角最小显示值(分辨力)可达 $0.1''$ 。其测角精度在 $100''$ 范围内可达 $0.5''$ ，量程可达 $\pm 1000''$ 。

双频激光干涉仪与自准直仪类似，可用来精确测量导轨的直线度和平板和平板的平面度等。测导轨的直线度时，双膜块组被固定在适当位置，而双角棱镜组固定在工作台上，移动工作台即可测出以角量表示的直线度。

2. 双频激光干涉仪测量直线度

图 9-58 为测量直线度的原理图。双频激光束通过半反射镜至渥拉斯顿偏振分束器上，正交线偏振光 ν_1 和 ν_2 被分开成夹角为 θ 的两束线偏振光，分别射向双面反射的两翼并由原路返回，返回光在渥拉斯顿镜重新会合后，经半反射镜、全反镜反射到检偏器。两光束在检偏器后形成拍频并被光电接收器接收。若双面反射镜沿 x 轴平移到 A 点，由于 ν_1 和 ν_2 光所走的光程相等，所以 $\Delta\nu_1 = \Delta\nu_2$ ，拍频互相抵消，计算机显示器无多普勒频移值显示。若在移动中由于导轨的直线度偏差而使双面反射镜沿 y 方向下落到 B 点，如图中虚线所示。于是可知： ν_1 光的光程较原来的减少了 $2AC$ ；与相反， ν_2 光的光程却增加了 $2BD$ 。两者总差值等于 $2(AC + BD)$ ，根据这一数值，即可以算出下落量。

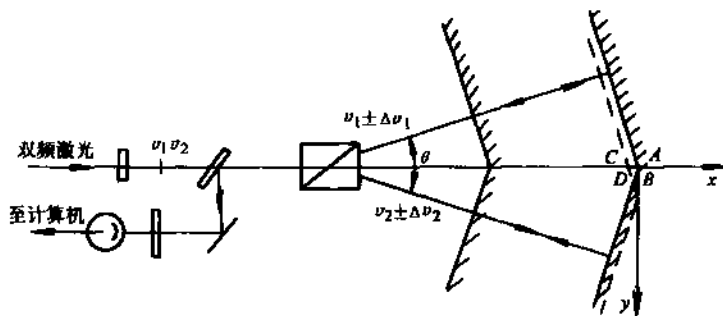


图 9-58 双频激光干涉仪测量直线度的原理

$$AB = \frac{AC + BD}{2\sin \frac{\theta}{2}} = \frac{\lambda \int_0^t \Delta\nu dt}{4\sin \frac{\theta}{2}} \quad (9-89)$$

AB 值即为以线量表示的导轨直线度偏差，它可由计算机直接求得并显示。

双频激光干涉仪测直线度的精度可达 $\pm 1.5\mu\text{m}$ ，其分辨力为 $1\mu\text{m}$ ，最大检测距离可达 3m ，最大下落量可测到 1.5mm 。

3. 双频激光干涉用于同轴度的精密测量

双频激光直线度测量仪，在长距离上测量直线度，具有很高的精度和可靠性，这种仪器经过改造也可用于长距离同轴度的精密测量。

同轴度测量仪器应具有以下特点：

1) 能够进行间断测量, 在同轴度测量中, 定心靶子从一个孔移到另一个孔时, 光传感元件离开光路是不可避免的, 因此当传感元件暂时离开光路再回到光路中, 仪器要能够继续照常工作, 即暂时挡光并不影响测量结果, 这是测量同轴度所必需的。

2) 测量系统对激光束的平漂和角漂具有自适应能力, 光束漂移应不影响测量结果。

3) 光学系统对大气扰动应具有较强的抵抗力。

4) 由于测量同轴度时, 定心靶必须从一个孔移到另一个孔, 还要进行找正, 测量所用时间较长, 因而要求仪器具有较好的长时间稳定性。

现有的双频激光直线度干涉仪是无法满足上述要求的。

首先双频激光直线度干涉仪在信号处理上采用锁相倍频计数技术, 不允许信号中断, 否则计数立即无效。而在同轴度测量时, 定心靶从一个孔到另一个孔的过程中, 挡光是不可避免的, 因而信号中断也是不可避免的, 因此双频激光直线度干涉仪不能用于测量同轴度。

第二, 即使对信号处理系统进行了改进, 也有近程死区和测量范围的矛盾, 实现相位测量的一个必要条件是: 在测量范围内相位的变化范围必须在 $\pm\pi$ 之间。大于 $\pm\pi$ 的相位变化必须同变化过程联系起来才能知道变化量。如图 9-59 所示, 当用双频激光直线度测量仪 (HP5528) 测量直线度时, 由于反射体的两个反射面有一定的夹角, 要使仪器正常工作, 两束光必须分开, 分别入射两个反射面上, 则需要满足:

$$Z_{\min} > r/\alpha$$

式中 r ——光束半径;

Z_{\min} ——能将两光束分开的渥拉斯顿棱镜至反射体的最小距离, 即近程死区;

α ——两光束分开的夹角之半。

当测量元件上下移动距离 S (由于直线度误差引起的), 两个不同偏振光产生的光程差为

$$\Delta l = 4S \sin \alpha \approx 4S\alpha \quad (9-90)$$

若相位差变化要求在 $\pm\pi$ 内, 即

$$\Delta l < \frac{\lambda}{2}$$

此时有

$$\frac{S}{Z_{\min}} < \frac{\lambda}{8r} \quad (9-91)$$

在 HP5528 中, $\lambda = 0.6328\mu\text{m}$, $r = 4\text{mm}$ 。即使 $Z_{\min} = 3\text{m}$, S 还应小于 $59\mu\text{m}$ 。如果考虑了大气折射率不均匀, 空气扰动的影响, 实际可测范围还要更小, 这样小的测量范围已没有实际意义。所以希望把现有激光直线度测量仪通过参数优化改造来实现同轴度是不可能的。

此外, 在 HP5528 中, 采用了等光强稳频方案 (塞曼稳频), 虽然光频比较稳定, 但频差变化比较大, 频差值也比较高, 不利于相位测量。

从以上几点看, 要用双频激光干涉法测量同轴度, 需重新考虑双频激光干涉仪的总体方案。清华大学精仪系经过多年的研究, 提出了一种双

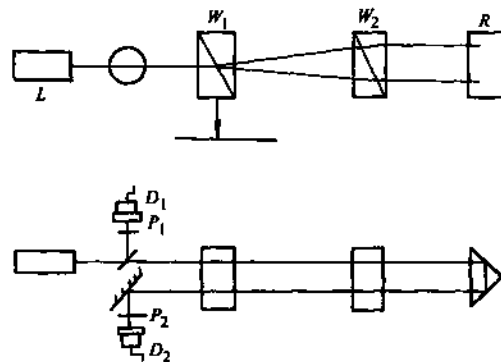


图 9-59 双频激光测量直线度原理图

L —双频激光头 W_1 、 W_2 —渥拉斯顿棱镜

D_1 、 D_2 —光电接收器 P_1 —直角

反射棱镜 P_2 —检偏器

频激光测量同轴度的新方案,并研制了实用型的 SJD2T 双频激光同轴度干涉仪。

图 9-59 为 SJD3T 同轴度干涉仪的原理图。双频激光头出射的正交线偏振光通过第一个渥拉斯顿棱镜 W_1 后,彼此分开一个小角度,然后再通过第二个渥拉斯顿棱镜 W_2 变成两束平行光束,经双面直角棱镜反射后,又依次通过 W_2 、 W_1 后又合成一束光,经检偏振器 P 后被探测器 D_2 接收,形成测量信号,参考信号由探测器 D_1 接收。当 W_1 或 W_2 沿被测表面移动而产生上下横移时,可使测量信号相对参考信号相位发生变化,那么通过测量两者的位相差,可知 W_1 (或 W_2) 的横向移动量。

从光学结构上看,该方案与 HP5528 主要有以下区别:

- 1) SJD3T 方案中用了两个渥拉斯顿棱镜,而 HP5528 方案只用一个
- 2) SJD3T 中反射镜用的是双面直角棱镜,而 HP5529 用的是两个具有一定夹角的平面反射镜。

初看起来,以上两点并没有多少特别的地方,但是,就是这两点区别,使得 SJD3T 能够既保持双频干涉仪所特有的高精度和稳定性,又解决了同轴度测量的难题,下面将对此进行较详细的分析:

在 SJD3T 同轴度干涉仪中,光传感元件是渥拉斯顿棱镜,为了达到干涉光路的共模抑制,从渥拉斯棱镜 W_1 出射的两束光夹角要尽量小,使其在传播一定距离如 30m 后,两束光中心的分距离小于光斑半径,这样两相干光束才具有较高的波前相关性,在形成干涉信号时,能够对外界干扰实现相互补偿,并且这种补偿完全是用纯光学方法实现的,具有实时性。另外,为了实现同轴度的测量,信号的相位变化必须小于 $\pm\pi$ 内,这样就必须对测量范围和分辨力作统一的考虑。若取测量信号和参考信号相位变化 0.1° 对应 W_1 横移 $1\mu\text{m}$,这样对渥拉斯棱镜 W_1 来说,与传统的双频激光干涉仪相似,即有:

$$S = \frac{\lambda/N}{4\sin\theta/2} C \quad (9-92)$$

式中 λ ——激光波长;

θ ——经 W_1 后两出射光之间的夹角;

N ——计数电路的倍频数,计数器的累加数。

在这里 $S = 1\mu\text{m}$, $N = 3600$ (相对于 0.1° 相位变化), $\lambda = 0.6328\mu\text{m}$, $C = 1$, 代入上式得 $\theta/2 = 0.0025^\circ$

再根据 $\sin\theta/2 = (n_0 - n_e) \text{tg}\beta$ (9-93)

可得渥拉斯顿棱镜的楔角为

$$\beta = 0.28^\circ$$

为了使光束能够沿原方向返回,要求从 W_2 出射的光为平行光,根据光路的可逆性, W_2 的设计参数应与 W_1 完全一样,但旋转 180° 放置。

按照上述的设计,信号相位变化 0.1° 对应 W_1 (或 W_2) 横向移动 $1\mu\text{m}$ 。相位变化 $\pm\pi$, 就代表 W_1 横移 $\pm 1.8\text{mm}$, 这个量程对于准直测量来说是足够的。在相位测量时,由于信号不会跨一个周期,因而保证了读数的单值性,解决了同轴度测量的最大难题。

按照上述参数,两光束的分开角度 $\theta = 0.005^\circ$, 可算得在 30m 处两光束中心分开约 2.6mm, 而光斑本身直径约为 8mm 左右,因而在 30m 内两光束中心间距小于光斑半径,此时两光束波前具有很好的相关性。对外界干扰具有“脱敏”性。

由以上分析,可得以下结论:

1) SJD3T 采取了两个渥拉斯顿棱镜和一个直角反射镜, 测量时对两束光的分离量无特别要求, 因而对长距离直线度测量只需一套附件, 无近程死区。而现有的双频激光干涉仪对 0.3~3m, 3~30m 直线度测量各需一套测量附件, 远距离测量附件有近程死区。

2) SJD3T 在测量中光程差变化对应的信号位相变化在一个周期内(即 $\pm\pi$ 内), 使位相测量值与渥拉斯顿棱镜的横移量单值对应, 由于位相测量是状态测量, 渥拉顿棱镜移出光路后再放回光路中, 测量还能继续进行, 因而可用于同轴度测量。

3) 在 SJD3T 中, 干涉的两束光在 30m 内中心距只有 2.6mm(HP5528 可达十几厘米), 因此对外干扰能很好共模抑制, 具有很高的抗干扰能力。

5.2 圆度仪及圆度测量

圆度误差是指实际圆形轮廓或圆柱体轴截面(即正截面)上的实际轮廓, 对其理想圆的变动量。

对于圆度误差的定义, 就其实质而言是实际轮廓对选定基准圆的圆心的最大半径差(见图 9-60), 即

$$\Delta = R_{\max} - R_{\min}$$

因此, 评定圆度误差的核心问题是确定理想圆位置。目前, 确定理想的圆心有以下四种方法, 即: 最小包容区域法(亦称最小半径法, 见图 9-60a)、最小外接圆法(见图 9-60b)、最大内切圆法(见图 9-60c)和最小二乘圆法(亦称平均圆法, 见图 9-60d)。

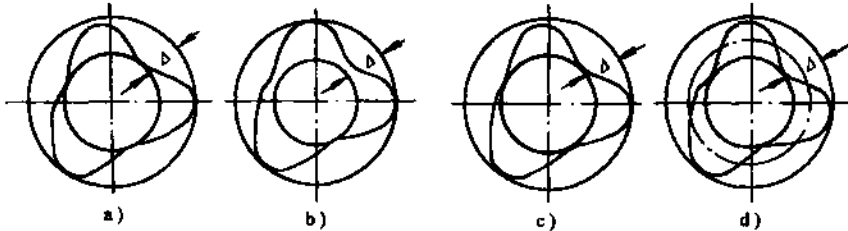


图 9-60 圆度误差的评定方法

现有的测量圆度误差的方法主要是半径测量法(用圆度仪测量)、三点近似测量法(V形块法)和两点测量法。所用仪器除圆度仪、V形块外, 还有光学分度头、标准环规等。

新型圆度仪不仅能测量内外圆度误差, 而且能测量圆柱度、直线度、垂直度等, 特别是与电子计算机联用后, 操作简便、测量效率高, 因此, 在车间、计量室及科研部门得到了广泛应用。

圆度仪按测量状态分为传感器旋转式和转台式(或称工作台旋转式)两种类型。它们的构成分别如图 9-61 所示。这两种类型的圆度仪均由仪器底座 2、立柱与臂架 1、工作台 3 和传感器 5 等主要部件构成。但传感器旋转式圆度仪比转台式圆度仪多一个旋转主轴 6, 所以传感器旋转式圆度仪也可称为转轴式圆度仪。国产 DQR-51 型、206 型及德国产 MMK-2 型均为传感器旋转式圆度仪; 国产 DGY-4 型、YQ-200A 型和意大利产 FMS2100 型及德

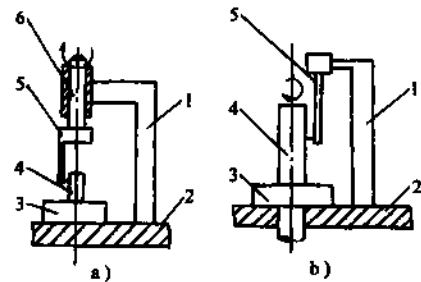


图 9-61 圆度仪结构原理

a) 转轴式圆度仪 b) 转台式圆度仪
1—立柱与臂架 2—底座 3—工作台 4—被测件 5—传感器 6—旋转主轴

国产 MMO-2 型、MMO-3 型均为转台式圆度仪。

传感器旋转式圆度仪的工作原理如图 9-62 所示。传感器 3 固定在旋转精度较高的主轴 4 上，工作台 1 可以通过其微动机构进行调整，使固定在它上面的被测工件 2 与主轴 4 同轴。测量时工件不动，传感器和主轴一起回转形成标准运动，在理想情况下，此回转运动的一个真圆，它是圆度测量的基准。当被测件存在圆度误差时，传感器的圆形轨迹相对于标准运动轨迹必然有径向偏差，该径向偏差被传感器所感受转换成电信号，并送到电器装置中，通过放大、滤波或按选择的圆度评定方法进行运算，最后用记录器记录或者以数字显示。

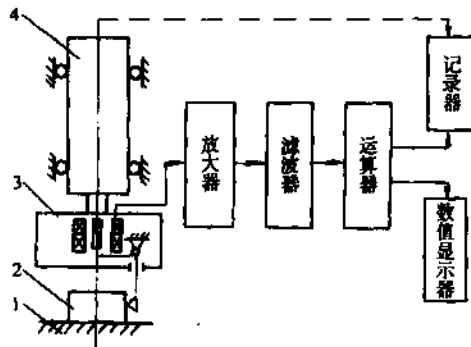


图 9-62 传感器旋转式圆度仪工作原理

1—固定工作台 2—被测件
3—传感器 4—主轴

转台式圆度仪与传感器旋转式圆度仪的工作原理基本相同，不同的是，这种仪器的工作台是转动的，而传感器则固定放在某位置上，或仅作上、下直线运动。

传感器旋转式圆度仪的传感器装置在主轴的下端，所以旋转轴的载荷轻，而且恒定，因此有利于提高主轴的回转精度，同时，由于工作台和被测件都处在静止状态，所以仪器的承载能力强。

转台式圆度仪由于只有工作台自身转动，所以测量范围大，可方便地进行多种测量，如直线度、垂直度、圆柱度等。但由于该种仪器的工作台和被测件的重量均为轴承所承受，所以被测件的重量受到一定限制。

5.3 三坐标测量机

三坐标测量机是 60 年代后期新发展起来的一种高效率的精密测量仪器。它的出现，一方面是由于生产发展的需要，即高效率加工机床的出现，产品质量要求进一步提高，复杂立体形状加工技术的发展等都要求有快速、可靠的测量设备与之配合；另一方面也由于电子技术、计算技术及精密加工技术的发展，为三坐标测量机的出现提供了技术基础。三坐标测量机目前广泛应用于机械制造、仪器制造、电子工业、航空和国防工业各部门，特别适用于测量箱体类零件的孔距和面距、模具、精密铸件、电子线路板、汽车外壳、发动机零件、凸轮以及飞机型体等带有空间曲面的工件。

三坐标测量机的作用不仅是由于它比传统的计量仪器增加了一二个坐标，使测量对象广泛，而且它的生命力还表现在它已经成为有些加工机床不可缺少的伴侣。例如它能卓有成效地为数控机床制备数字穿孔带，而这种工作由于加工型面愈来愈复杂，用传统的方法是难以完成的。因此，它与数控“加工中心”相配合，已具有“测量中心”之称号。

1. 三坐标测量机的类型

三坐标测量机按技术水平可分为以下几个类型：

(1) 数显及打字型(N) 这种类型主要用于几何尺寸测量，采用数字显示，并可打印出测量结果。一般采用手动测量，但多数具有微动机构和机动装置，这类测量机的水平不高，虽然提高了测量效率，解决了数据打印问题，但记录下来的数据仍需进行人工运算。例如测量孔距，测得的是孔上各点的坐标值，需计算处理才能得出结果。

(2) 带有小型电子计算机进行数据处理(NC) 这类测量机水平略高, 目前应用较多。测量仍为手动或机动, 但用计算机处理测量数据, 其原理框图如图 9-63 所示, 该机由三部分组成: 数据输入部分、数据处理部分与数据输出部分。有了电子计算机, 可进行诸如工件安装倾斜的自动校正计算、坐标变换、孔心距计算及自动补偿等工作。并且可以预先储备一定量的数据, 通过计量软件存储所需测量件的数学模型, 对曲线表面轮廓进行扫描测量。

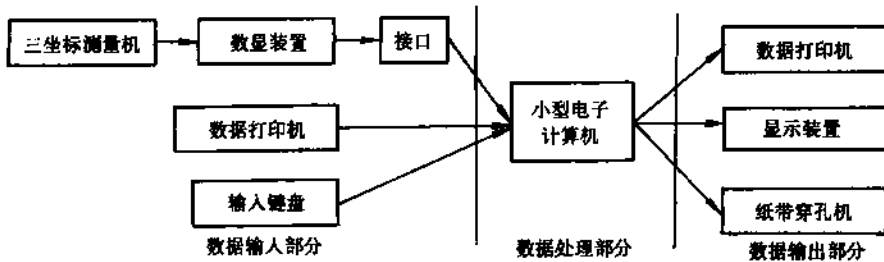


图 9-63 带计算机的三坐标测量机工作原理框图

(3) 计算机数字控制(CNC) 这种测量机的水平较高, 像数控机床一样, 可按照编好的程序进行自测量, 其原理如图 9-64 所示。程序编制好的穿孔带或磁卡通过读取装置输入电子计算机和信息处理线路, 通过数控伺服机构控制测量机按程序自动测量, 并将测量结果输入电子计算机, 按程序的要求自动打印数据或以纸带等形式输出。由于数控机床加工用的程序穿孔带可以和测量机的穿孔带互相通用, 因而提高了数控机床的设备利用率。

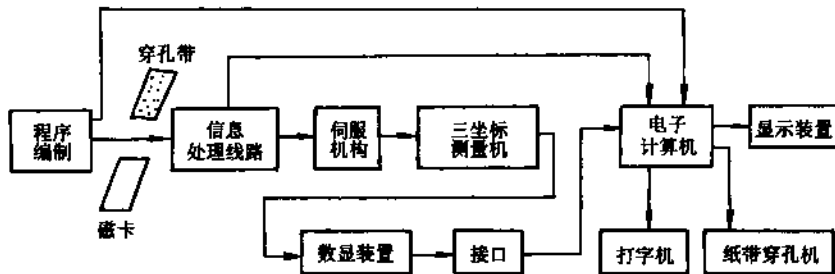


图 9-64 计算机数字控制三坐标测量机工作原理框图

2. 三坐标测量机的结构形式

三坐标测量机一般都具有互成直角的三个测量方向, 水平纵向运动为 x 方向(又称 x 轴), 水平横向运动为 y 方向(又称 y 轴), 垂直运动为 z 方向(又称 z 轴), 如图 9-65 所示。三坐标测量机就其组成来说, 和一般计量仪器差不多, 主要部件有底座, 工作台、立柱、测量头, 以及三个运动方向的导轨等。

三坐标机的结构类型有下列几种

(1) 悬臂式, z 轴移动(图 9-66a) 这类测量机的工作台, 其左右方向开阔, 操作方便。缺点是 z 轴在悬臂的 y 轴上移动, 容易引起 y 轴的挠曲, 使 y 轴的测量范围受到限制(一般不超过 500mm)。

(2) 悬臂式, y 轴移动(图 9-66b) 这类测量机布局的特点是 z 轴固定在悬臂的 y 轴上, 并同 y 轴一起前后移动, 有利于装卸工件, 缺点是悬臂在 y 轴方向移动, 重心变化比较明显。

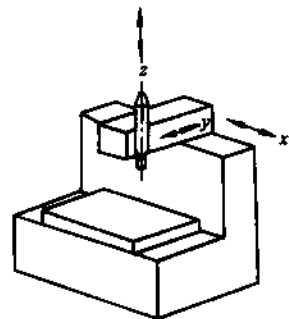


图 9-65 三坐标测量机的测量方向

(3) 桥式(图 9-66c、d) 以桥框作为导向面, x 轴能沿 y 方向移动, 它的结构刚性好, 适用于大型测量机, 桥框(x 轴)的移动距离可达 10m。

(4) 龙门式(图 9-66e、f) 龙门式还分龙门移动式 and 龙门固定式两种。其特点是当龙门移动和工作台移动时, 装卸工件非常方便, 操作性能好, 适宜于小型测量机, 精度较高。

(5) 卧式镗床式或坐标镗床式(图 9-66g、h) 它是在卧式镗床或坐标镗床的基础上发展的, 精度高, 但结构复杂。

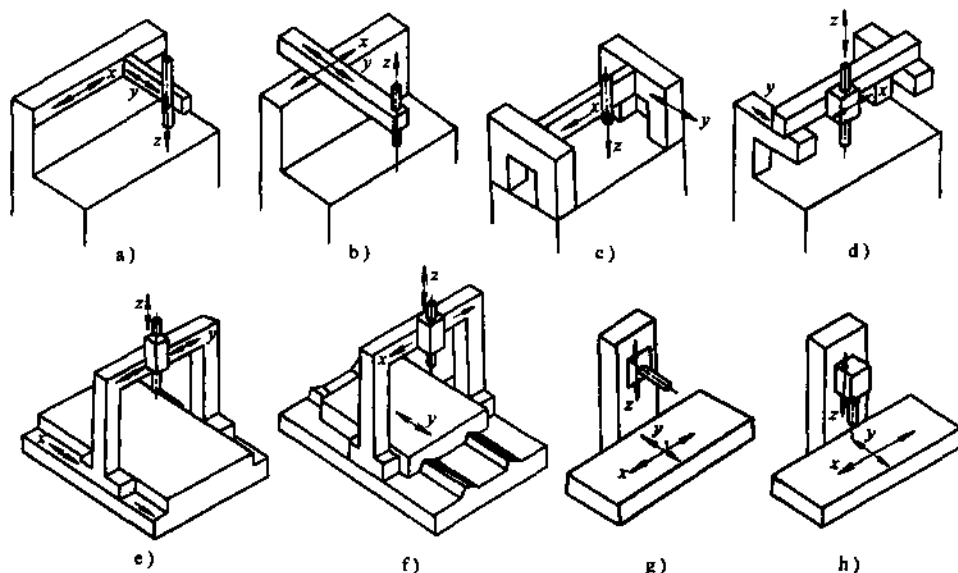


图 9-66 三坐标机的结构类型

3. 测量系统

三坐标测量机的测量系统的主要部件是测量头和标准器。

三坐标机的精度与工作效率和测量头密切有关, 没有选进的测量头, 就无法发挥测量机的功能。三坐标测量头可视为一种传感器, 只是其种类、结构原理、性能较一般的传感器复杂得多, 大致可归纳为以下几类:

(1) 机械接触式测头(硬测头) 包括圆锥形、圆柱形和球形测头, 回转式半圆和回转式 1/4 柱面测头, 盘形测头, 凹圆锥测头, 点测头, V 形块测头及直角测头等。

(2) 光学非接触测头 光学非接触测头对于测量软的、薄的、脆性的工件及光学刻线非常方便, 尤其对限定不能用机械测头与电测头的工件, 只能采用光学非接触测头。它不仅可作二坐标测量用, 也能用作三坐标的测量。适合于测量不规则空间型面(涡轮叶片、软质表面等)。

(3) 电气接触式测量头 按测头能感受的运动方向可分为: 单向的一维电测头、双向的二维电测头和三向的三维电测头。现以双簧片或三向电感测量头为例予以介绍。图 9-67 为其结构原理图, 由于这种测控头很多, 故又名“星形测头”。它采用了三层簧导轨形式, 每层有两片簧悬吊, 图中 16 为 x 向, 1 为 y 向, 3 为 z 向。为了增强片簧的刚度和稳定性, 片簧中间为金属压板。为保证测量时灵敏、精确, 片簧不能太厚, 一般取 0.1mm。由于 z 向导轨是水平放置的故采用三组弹簧加以平衡。可调弹簧 14 的上方有一螺旋升降机构, 靠调整电动机 10, 转动螺杆 11, 使螺母套 13 升降来自动调整平衡力的大小。当变换测杆时, 可调整弹簧 14 平衡其

重量。为了减小 z 向弹簧片受剪切应力而引起的变位, 设置了弹簧 2、15, 用以平衡测头 x 、 y 部件的自重, 以保证 z 轴位移的精确。

在每层导轨的中间, 各设置了三种部件: 一是零位锁紧部件, 如图 9-68a 所示。定位块 5 上有凹槽, 它与锁紧杠杆 3 的圆锥头 4 精确配合, 以确定机械的“零位”。如需打开时, 可将可逆电动机 2 反转, 用拨销 1 压紧杠杆 3, 使圆锥头抬起, 此时该向处于自由状态。需锁紧时, 使可逆电机正转一角度, 拨销不压紧锁紧杠杆, 即为“零位锁紧”。二是传感器部件, 如图 9-68b 所示, 用以测出位移量的大小。在两层导轨上, 一面固定磁心 3, 另一面固定线圈 2 及其支架 1。为了进行精确测量, 必须建立“电气零点”, 而这个“电气零点”应与该向的“机械零点”相重合, 测头精度才高。三是阻尼装置, 如图 9-68c 所示。对于片簧导轨, 需在活动的两层导轨间(成对的)设置粘滞减速装置。该装置由两片组成, 上板 1 和下板 4 上各固定片簧导轨 2 和 3, 在两片之间形成毛细间隙, 中间放入粘性硅油, 使两层导轨在运动时, 产生阻尼力, 避免由于片簧导轨过于灵敏而产生不稳定性。

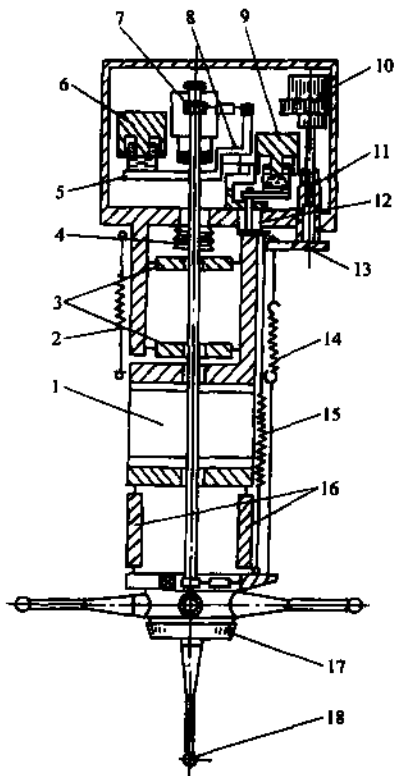


图 9-67 三向电感测量头

1— y 向片簧导轨 2、14、15—弹簧 3— z 向片簧导轨 4—波纹管 5—杠杆 6、9—电磁铁 7—中心杆 8—十字片簧铰链 10—电动机 11—螺杆 12—顶杆 13—螺母套 16— x 向片簧导轨 17—测头座 18—触头

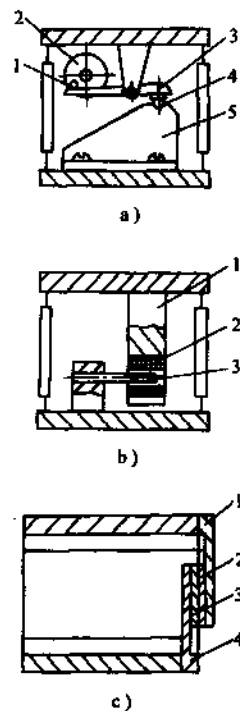


图 9-68 测头部件

a) 零位锁紧

1—拨销 2—可逆电动机 3—锁紧杠杆
4—圆锥头 5—定位块

b) 传感器

1—支架 2—固定线圈 3—固定磁心

c) 阻力装置

1—上板 2、3—固定片簧导轨 4—下板

在测量头的上部, 还设置了预置测力和预置各向位移的机构。 x 与 y 预置测力和位移机构是相同的(图 9-67 中只表示出 x 向)。电磁铁 6 由于通有电流, 它通过杠杆 5 绕十字片簧铰链 8

转动,使中心杆7围绕o点摆动,摆动中心采用一波纹管4,中心杆的下方与测头座17用片簧相连,以使测头座按一个方向移动,并将测力传到触头18上。其测力大小可通过调节电磁铁线圈的电流大小得到。z向测力预置装置是利用电磁铁9产生的。由于电磁铁的作用。使z向有一个上升或下降的初始位置,它通过顶杆12推动被悬挂的那部分(即z向的活动导轨板)。但z向的测力大小不仅取决于电磁铁,还与弹簧14、15和顶杆12的小弹簧的刚度大小有关,因此在设计时要综合计算。

在测头座(又名星形座)上,布置了5个触杆(x、y轴上共四个,z轴上一个),可方便地对工件进行触测。z轴除能进行上端面的测量外,还可进行下端面的测量。这种测量头的精度较高,其重复精度可达 $0.5\mu\text{m}$ 左右。

目前采用的标准器种类较多,机械类有刻线标尺、精密丝杠、精密齿条等;光学类有光栅式、激光干涉式;电类有感应用步器、磁栅式、编码等。

三坐标测量机种类繁多,测量范围小至几百毫米,大至几十米,测量精度分精度测量形和工作型两类,前者精度在微米量级,适用于精密计量室;后者精度在 $10\mu\text{m}$ 量级,适用于生产车间。表9-9列出了几种三坐标测量机性能特点,供参考。

表 9-9 部分三坐标测量机性能指标

国 别	中 国	德 国	瑞 士	意 大 利				
型 号	SZC - II	UMMS500	UPM - 3D	422M	10TA ALPHA			
制造厂	303所	OPTON	Leitz	SIP	DEA			
测量范围/mm	x	1200	500	200	400	1320 (760)	4000 ~ 7000	
	y	800	200	100	200	200	970	2000 ~ 2500
	z	500	300	200	200	200	610	1 000 ~ 2 000
测量标准器	感应同步器	光栅	光栅	金属刻线尺	齿条和旋转编码器或感应同步器			
分辨力/ μm	1.0	0.5(0.2) (数显)	0.5 (数显)	0.1 (数显)	2 (数显)	10 (数显)		
精 度/ μm	x: ± 15 y: ± 12 z: ± 10	在一轴上 $\pm(0.8 + L/250)$ 在三轴上 $\pm(1.6 + L/250)$	$\pm(1.2 + L/250)$	在中间位置 x: ± 0.8 y: ± 0.8 z: ± 0.9	x: ± 5 y: ± 5 z: ± 3.5	$\pm 75/5000000$		
重复精度/ μm	± 4	± 0.3			± 2	± 20		
结构类型	桥式	立轴式	立轴式	立轴式	龙门移动式	桥式		
导轨形式	滚动	滚动	滚动	滑动	气垫和滚动	滚动		
操作方式	手动	手动或自动	手动或自动	手动或自动	手动	手动或自动		
工件重量/kg	800	150	30	150	800	与机器无关		
环境条件		恒温	恒温	恒温	恒温、地基	保护室,地基		
软件		万能程序 特殊程序	万能程序 特殊程序		标准程序	标准程序		
其他	有计算机,打印机	有计算机、打印机等,3D测头	在UWM-2D万能工具显微镜基础上制成,有计算机、打印机	光电显微镜	产品种类很多,有计算机,打印机			

被测工件经过测头的触测(接触或不接触),由测量机的三个坐标的标准器表现为三个坐标数值。这些数据,最初的三坐标机是用数显装置显示出来,由人来记录并计算测量结果,这种方法既慢又易出错,而且对复杂的轮廓测量甚至难以处理。近年来,三坐标机大都与计算机联用,由计算机采集数据,通过运算,并与预先存储的理论数据相比较,然后输出测量结果。

5.4 莫尔条纹技术

5.4.1 光栅结构及莫尔条纹形成原理

在长度计量领域内,用于计量目的的光栅,通常称为计量光栅,它由主光栅(也称标尺光栅)和指示光栅,如图 9-69 所示。

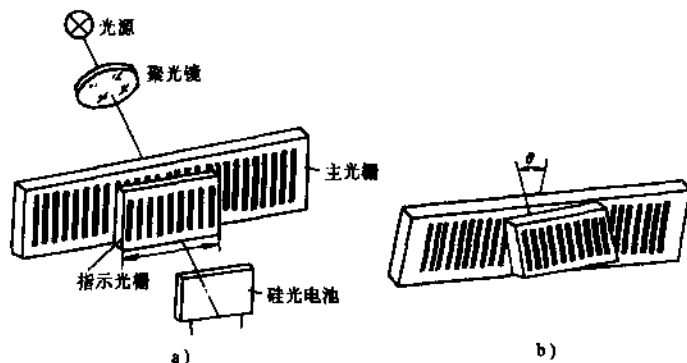


图 9-69 线位移光栅系统及莫尔条纹

计量光栅是在透明玻璃上均匀地刻划条纹,或者在不透明但具有强反射能力的基体上均匀地刻划上间距、宽度均相等的条纹而成。目前,制造计量光栅所使用的透明材料,一般是:主光栅用普通工业用玻璃,而指示光栅最好用光学玻璃。非透明材料一般用不锈钢。

计量光栅按其形状和用途可以分为长光栅和圆光栅两类。根据刻线的形式不同,光栅也可分为黑白光栅(也称幅值光栅)和闪耀光栅(也称相位光栅)。如果根据光线的走向,又可分为透射光栅和反射光栅两种。

如图 9-70 所示为透射长光栅,它是在玻璃表面上用照相法复制或直接刻划成一系列等距的透光缝隙和不透光的栅线。假如将黑白光栅线纹放大,如图 9-70 右图所示,图中 a 表示线纹宽度, b 表示刻线间距,则 $d = a + b$ 即为光栅常数,或称光栅节距(栅距),这种光栅的栅线密度一般为 25 ~ 100 线/mm。

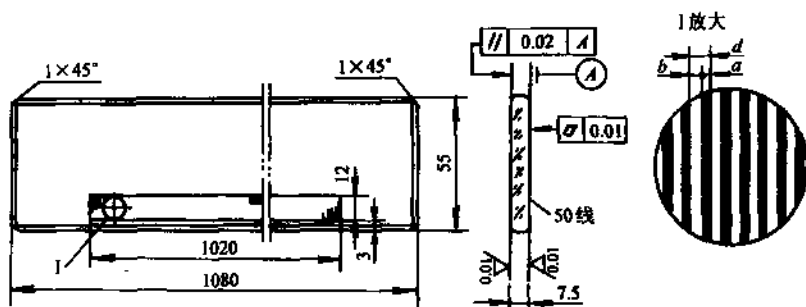


图 9-70 光栅尺及光栅参数

闪耀光栅的栅线形状如图 9-71 所示, d 为光栅常数, 栅线的形状则有对称形和非对称形之分, 闪耀投射光栅是直接刻在玻璃上刻划制成, 而闪耀反射光栅在玻璃的金属膜上刻划或者进行复制, 栅线密度一般为 $100 \sim 2800$ 条/mm, 刻线宽度一般为 $0.4 \sim 7 \mu\text{m}$ 。

图 9-72 示出了圆光栅的结构图, 它的刻线方式有两种, 一种为径向光栅, 其栅距之延长线全部通过圆心, 如图 9-72b 所示; 另一种则是切向光栅, 其栅线全部与一同心的小圆相切, 如图 9-72c 所示。圆光栅只有黑白投射光栅, 整个圆周上刻线数为 $2700 \sim 8640$ 条, 光栅距 $d = 0.01 \sim 0.05 \text{mm}$ 。对于圆光栅, 除栅距参数外, 使用更多的则是栅距角(亦称节距角), 栅距角是指圆光栅盘上相邻两刻线的夹角。

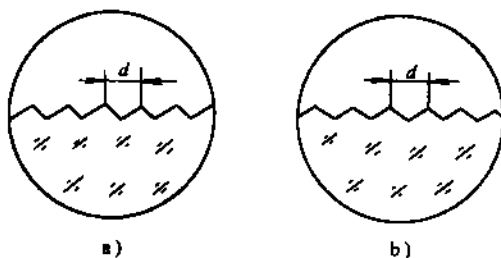


图 9-71 闪耀光栅截面形状

a) 锯齿形 b) 三角形

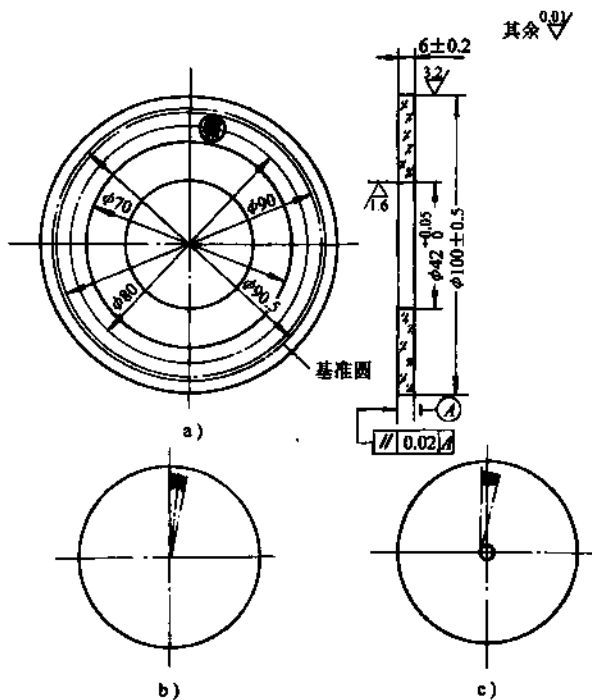


图 9-72 圆光栅及其结构

长光栅用于测量长度, 圆光栅用于测量角度。

莫尔条纹的形成, 实质上是在通过光栅副时衍射与干涉作用的结果。对于栅线密度不大(及栅距较大)的黑白光栅, 其莫尔条纹的形成, 可以按照光是直线传播的几何光学原理, 利用光栅栅线的遮光效应来解释。

根据几何光学的原理, 光是直线传播的。当把光栅常数相等的主光栅, 和指示光栅刻线面相对迭加在一起(如图 9-73 所示), 中间留很小的间隙, 并使两栅线之间保持一很小夹角 θ 时, 在平行光的照射下, 则光在经过两块迭合的光栅时, 其中任一光栅的不透光狭缝都会对光起

遮挡作用,因而在与栅线垂直的方向上,能看到对称分布的明暗相间的条纹。如图所示,在 $a-a$ 连线上,由于两光栅彼此重合,光线从缝隙中通过,因而形成亮带;而在 $b-b$ 连线上,则由于两光栅的栅线彼此错开,因而形成暗带。像这种形成的明暗相间的条纹称为莫尔条纹。

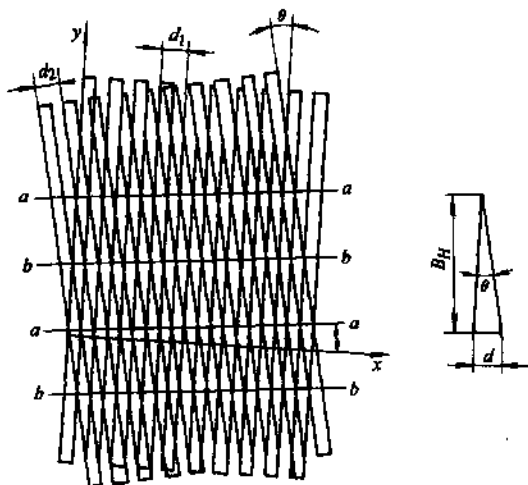


图 9-73 莫尔条纹形成原理

由几何光学理论可以得到长光栅莫尔条纹方程的一般表达式为

$$y = x \left(1 - \frac{d_2}{d_1 \cos \theta} \right) \cot \theta - \frac{kd_2}{\sin \theta} \quad (9-94)$$

由上式可得条纹的斜率为

$$\operatorname{tg} \alpha = \left(1 - \frac{d_2}{d_1 \cos \theta} \right) \cot \theta \quad (9-95)$$

各条纹之间的距离为

$$B = \frac{d_2}{\sqrt{\sin^2 \theta + (\cos \theta - d_2/d_1)^2}} = \frac{d_1 d_2}{\sqrt{d_1^2 + d_2^2 - 2d_1 d_2 \cos \theta}} \quad (9-96)$$

式中 d_1 、 d_2 ——光栅的光栅常数;

θ ——两光栅栅线的交角;

$k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, 每一个 k 值对应一条条纹。

根据式(9-95)和式(9-96)当不同的 d_1 、 d_2 、 θ 组合在一起时可以得到长光栅中的几种典型的莫尔条纹花样,如:横向莫尔条纹、光闸莫尔条纹和纵向莫尔条纹等。如果 $d_1 = d_2 = d$, 光栅的相互交角 $\theta \neq 0^\circ$ 时,则有

$$\operatorname{tg} \alpha = \left(1 - \frac{1}{\cos \theta} \right) \cot \theta = -\operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \quad (9-97)$$

$$B_H = \frac{d}{\sqrt{\sin^2 \theta + (\cos \theta - 1)^2}} \approx \frac{d}{\theta} \quad (9-98)$$

这表示所得到的莫尔条纹的方向与光栅刻线方向相垂直,故称为横线莫尔条纹。横向莫尔条纹对光栅节距有放大作用,其放大倍数为

$$k = B_H/d \quad (9-99)$$

当 $d_1 = d_2 = d$, $\theta = 0^\circ$ 时;所得到的莫尔条纹宽度趋于无穷大。两光栅相对移动时,对人

射光像闸门一样时启时闭，故称为光栅莫尔条纹。当 $d_1 \neq d_2$, $\theta = 0^\circ$ 时，则得到莫尔条纹方向平行于光栅栅线方向的纵向莫尔条纹。

圆光栅条纹是将两块栅距相同的圆光栅迭合并保持一不大的偏心量 e 时，所形成的特有的莫尔条纹，如图 9-74a 所示。圆光栅莫尔条纹包括三种形式，即：在偏心方向上，因为节距不等，而形成纵向莫尔条纹；在偏心的垂直方向上，因偏心而使两光栅交叉，因此产生横向莫尔条纹；在其他方向上则均产生斜向莫尔条纹。这种莫尔条纹的特征是，莫尔条纹的移动量与圆光栅的移动量成正比关系，其方向与光栅盘旋转的方向有关，其宽度则与偏心 e 有关。 e 越大，宽度越窄； e 越小，则反之。这种莫尔条纹常称作圆弧形莫尔条纹。在实际使用中，常使用其横向莫尔条纹。

圆光栅莫尔条纹还有一种环形莫尔条纹，它是由一对切向圆光栅副形成。当两块切圆直径相等，切圆中心重合、方向相反的圆光栅叠合在一起时，便产生以光栅中心为圆心的环形莫尔条纹，如图 9-74b 所示。

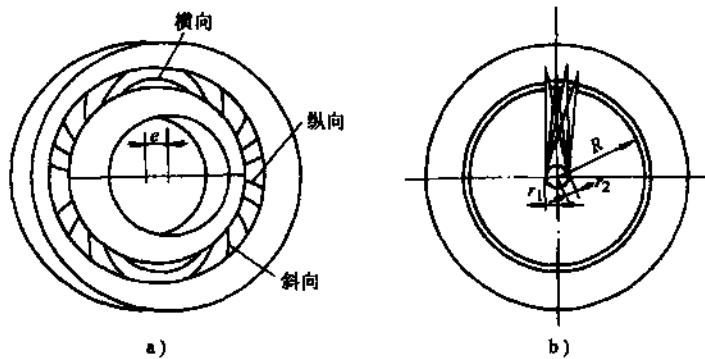


图 9-74 圆光栅形成的各种莫尔条纹

以上根据几何光学原理，利用栅线的遮光作用，说明了光栅莫尔条纹的形成原理。但是，对于栅线密度较大的光栅，诸如：闪耀光栅，由于光栅常数同光波波长处于同一数量级，甚至更小，当这样的两块光栅重迭时，其莫尔条纹的形式原理就难以用光栅的遮光作用说明。这时，其莫尔条纹的形成原理应根据波动光学理论——衍射理论来解释。

由物理光学可知，如果将单色光源 S 放在透镜 L_1 的主焦点上，如图 9-75 所示，则光线经过透镜 L_1 后将形成一束平行光并照射在狭缝 AB 上，穿过单缝的光线再经过透镜 L_2 后，便在屏幕 E 上形成夫琅和费衍射图像。这种单缝衍射现象可由菲涅尔波带法来说明，即位于 AB 波阵面上各子波沿不同方向传播，当衍射角为 ϕ 的一组平行光经过透镜 L_2 后便在 P 点发生干涉，其干涉情况可由各光线之间的光程差来决定。由图可知，由于 $BC \perp AC$ ，因此，单缝两边缘光之间的光程差，可由 $\triangle ABC$ 来得到，即 $AC = a \sin \phi$ ，其中 a 为狭缝 AB 之宽。采用半波带

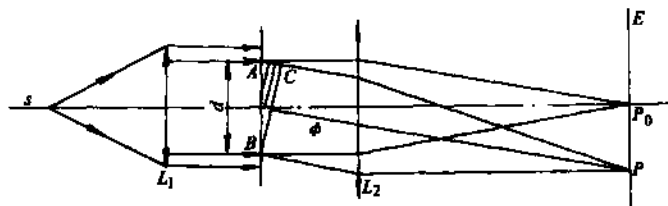


图 9-75 衍射原理

法用 $\lambda/2$ 将 AC 分割成 K 段相等的线段, 则光程差为 $AC = a \sin \phi = K \lambda / 2$ 。

由于相邻半波带位相差为 π , 在 P 点干涉的结果相抵消。因此, 当光程差 AC 刚好是半波带的偶数倍(及半波带数 K 为偶数), 所有波带干涉的结果使 P 点光强度为零, 因而呈现暗条纹; 当 K 为奇数时, 所有波带干涉的结果只剩下一个半波带的作用, 因而使 P 点呈现明条纹。由此得到 P 点呈现暗条纹的条件是:

$$a \sin \phi = \pm 2K \frac{\lambda}{2} \quad (K = 1, 2, \dots) \quad (9-100)$$

P 点呈现明条纹的条件是:

$$a \sin \phi = \pm (2K + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (K = 1, 2, \dots) \quad (9-101)$$

式中, 正负号表示明、暗条纹分布于中心条纹的两侧, 而 ϕ 为 0° 即为中心亮条纹的位置。

上面这种衍射现象, 通常称为夫琅和费单缝衍射。如果在图 9-75 中, 用一双缝衍射屏或一多缝衍射屏(缝宽为 a , 两缝间不透光部分宽为 b)来代替单缝衍射屏, 则各条单缝衍射光波将在观察屏幕 E 上发生干涉, 干涉条纹的亮暗程度则由单缝衍射光到屏幕 E 上的 P 点的光程差来决定。

如果用一具有大量等宽、等间距平行刻痕的光栅(缝宽为 a , 刻痕宽度为 b , $d = a + b$ 为光栅常数)来代替单缝衍射屏, 则两刻痕之间的光滑部分可看作透光狭缝, 这时, 其莫尔条纹的形成原理可用衍射理论来说明。

如图 9-76 所示, 当平行单色光垂直照射在光栅上时, 通过每一狭缝向不同方向反射的光通过透镜 L_2 聚焦在屏幕上不同的位置。从各狭缝正向射出的而平行于透镜主轴的光聚焦在屏幕上的 P_0 点; 而从各狭缝射出的衍射角为 ϕ 的平行光, 则聚焦在屏幕上的 P 点, 由于沿 ϕ 方向射出的两相邻单缝衍射光之间到 P 点的光程差为 $\Delta = d \sin \phi$, 因此, 当光程差等于波长的整数倍时, 即

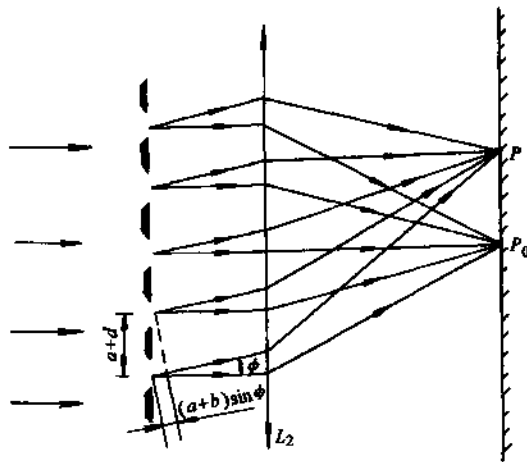


图 9-76 光栅衍射

$$d \sin \phi = \pm K \lambda \quad K = 0, 1, 2, \dots \quad (9-102)$$

则屏幕上将出现明条纹, 对于 $K = 0, 1, 2, \dots$ 的亮条纹分别称为零级, 一级, 二级, ……亮条纹。

在光栅理论中, 式(9-102)称为光栅方程, 但是, 式(9-102)只适用于入射光垂直入射到光

栅面的情况，对于更普遍的斜入射的情形，应该予以纠正。

设平行光束以入射角 α 斜入射到反射光栅上，如图 9-77b 所示，则衍射光与入射光分别处于光栅法线的两侧(见图 9-77a)。这时两相邻光束 R_1 和 R_2 的光程差为

$$\Delta = d \sin \alpha - d \sin \phi \quad (9-103)$$

但当衍射光与入射光在光栅法线的同一侧时(见图 9-77b)则相邻两束光的光程差为

$$\Delta = d \sin \alpha + d \sin \phi \quad (9-104)$$

因此光栅方程的普遍形式则可写成

$$d \sin \alpha \pm d \sin \phi = K \lambda, \quad K = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (9-105)$$

式中 ϕ 为衍射光的衍射角，对于同一入射光波长 λ 来说，光栅常数 d 不同的光栅，所观察到的衍射级数目不同， d 越大，则观察到的衍射级次就越多。这便是光栅莫尔条纹形成的衍射原理。

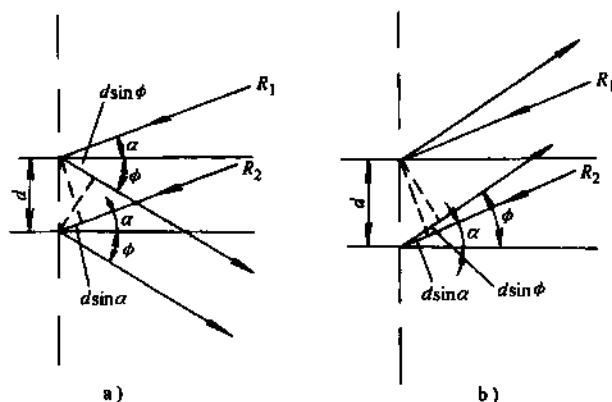


图 9-77 斜入射的反射光栅衍射

5.4.2 光栅光学系统

光栅测量的光学系统有反射式与投射式两类。兹举例说明：

如图 9-78 所示为垂直投射式光路系统。

由光源 1 所发出的光线，经准直透镜 2 后成平行光束垂直投射于光栅上。光栅系统由主光栅 3 和指示光栅 4 所组成，平行光束经光栅后形成莫尔条纹信号，并由光电元件 5 接收而转变成输出电信号，当光栅 3 与 4 相对移过一个栅距时，所形成的莫尔条纹的光强将周期地变化一次，光电元件 5 便将它转换为电量的周期变化，这样就得到了“位移—电压”信号，再经电路系统处理后并由计数器计数，最后通过数字显示管显示。

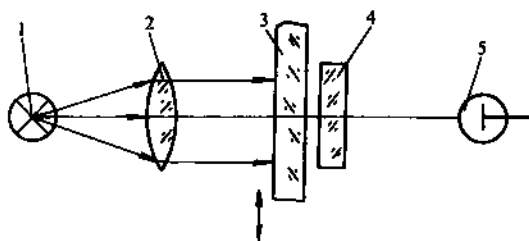


图 9-78 透射光栅系统

1—光源 2—准直透镜 3、4—光栅 5—光电元件

这种光路系统具有结构简单、位置紧凑、调整使用方便等特点，因而广泛应用于数字式工具显微镜和数字式测长仪中。

图 9-79 所示为反射式光路系统。光源 6 经聚光镜 5 和场镜 3 后成平行光束以一定角度投射于指示光栅 2 上，通过反射式主光栅 1 放射后形成莫尔条纹，再经放射镜 4 和物镜 7 最后成象

在光电元件 8 上，这种光路适用于黑白反射光栅。

光栅光学系统还有其他一些形式，如：投射分光式、镜象式、成象式等，本节从略，不再介绍。

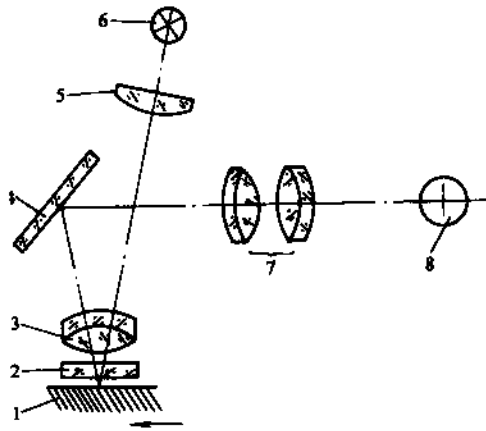


图 9-79 反射光栅系统

- 1—主光栅 2—指示光栅 3—场镜 4—放射镜
5—聚光镜 6—光源 7—物镜 8—光电元件

第 10 章 微尺寸测量技术

1 微小尺寸测量的概念和特点

微小尺寸测量是一个正在迅猛发展的领域。随着科学技术的进步,对微小尺寸的测量要求越来越迫切。很多相距很远的科学部门,从机械工业、电子工业到生物工程以及环境保护等;从尖端科学的热核反应到日常生活中的化学纤维,都有微小尺寸测量问题。而要求进行微小尺寸测量的物体,从尺寸、几何形状和作用来说也是各种各样的。球面型的物体包括制导系统的毫米级大小的轴承,激光核聚变中的 $100\mu\text{m}$ 的玻璃小球,化学处理 $10\mu\text{m}$ 的小滴,涂层和血液分析中亚微米级聚合物,以及造成各种污染的大量不规则的 $0.1 \sim 100\mu\text{m}$ 的粒子。平面型物体包括微米大小的集成电路元件、电子束刻划的 $0.01\mu\text{m}$ 量级的电子器件中的元件、磁泡记忆器等装置中的亚微米线条、磁头缝隙以及电子束、激光或其他方法加工的直径小到 $1\mu\text{m}$ 的尺寸等。尽管微小尺寸测量的对象各种各样,测量方法也不尽相同,但这类测量仪器的共同特点是:测量范围小,分辨力及精度要求高,自动化程度要求高,因此难度大。

随着科学技术和工业生产的发展,产品的小型化或微型化越来越成为一个重要分支,因而微小尺寸的测量越来越多;被测对象也多样化。如细丝、小孔、小球面、镀层厚度、计算机中磁头—磁盘间的微小间隙等等。面对这些测量任务,迫切地要求提出新的测量原理和方法。

1. 用激光衍射法测量金属丝直径

根据夫琅和费衍射(或平行光衍射)原理。当光源和衍射场(即屏幕 P)都距衍射物(小孔、狭缝等)无限远时,便产生衍射现象。实际上只要光源、屏幕离衍射物有足够大的距离都可认为是夫琅和费衍射。如图 10-1 所示,设被测细丝直径为 d ,由于它很小,可认为是衍射物。采用激光作为光源,由于其发散角很小,可认为是平行光,衍射屏 P 离细丝较远($l \geq 500\text{mm}$),在衍射场 P 上可获得一组明暗相间且等距的衍射斑纹,只要测得斑纹距屏幕中心的距离 S_k ,便可求得细丝直径 d 。

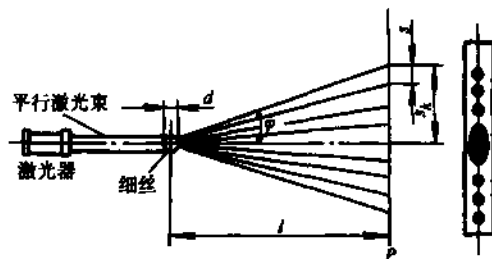


图 10-1 用激光衍射法测量金属丝直径

$$d = \frac{k \lambda l}{S_k} \quad (10-1)$$

式中 S_k —— k 个条纹间距;
 k —— 衍射斑纹级次。

由公式可知：为了测量细丝直径 d ，可以通过在屏幕上测出 S_k 或 S 来实现。细丝直径的极限测量误差 Δd_{lim} 由下式求得

$$\Delta d_{lim} = \pm \sqrt{\left(\frac{kl}{S_k}\right)^2 (\Delta \lambda)^2 + \left(\frac{k\lambda}{S_k}\right)^2 (\Delta l)^2 + \left(\frac{k\lambda l}{S_k^2}\right)^2 (\Delta S_k)^2} \quad (10-2)$$

式中 $\Delta \lambda$ —— 波长 λ 的检定误差；

Δl —— 屏物间距的测量误差；

ΔS_k —— k 个衍射斑纹总间距的测量误差。

此法的相对测量精度约为 10^{-4} 左右。常用于漆包线细丝直径的动态测量。

用激光衍射法还可测量小螺紋各参数，其测量误差约为：中径 3%，螺距 1%，半角 $\leq 1^\circ$ 。

2. 磁头与磁盘间隙的测量方法

在电子计算机中，磁盘存贮器是关键的设备，它的好坏将直接影响着存贮信息量的大小。磁盘与磁头之间间隙的大小是一项重要的技术指标，一般在 $2 \sim 6 \mu\text{m}$ 之间，比较先进的计算机，头盘间隙已达小于 $1 \mu\text{m}$ 的数量级。

测量原理如图 10-2 所示，以同样直径的玻璃圆盘 1 代替磁盘，并以同样的速度旋转，和磁头 2 (由平面度较好的陶瓷材料制成) 形成被测间隙 h 。光源 3，经滤光片 $4a$ 、 $4b$ 获得单色光，经聚光镜 5 形成平行光束，至分光镜 6 向下射至玻璃盘 1 和磁头 2。在玻璃盘的下表面返回的光束和由磁头上表面返回的光束，由于有光程差 $2h$ ，在会合时便产生了光波干涉条纹，透过分光镜 6、物镜 7，成象于目镜分划板 8 (或投影屏) 上，应用小数重合原理，便可求得间隙 h 值，计算方法如下：

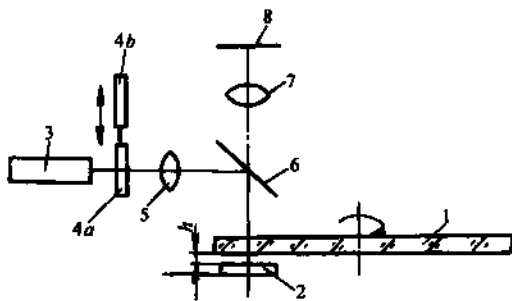


图 10-2 磁头与磁盘间隙测量原理

1—玻璃圆盘 2—磁头 3—光源 4a、4b—滤光片 5—聚光镜 6—分光镜 7—物镜 8—目镜分划板

如光线是垂直入射的话，则 $h = m\lambda/2$ 。今

采用两种波长的光源 (改变滤色镜 $4a$ 和 $4b$ 的位置)，则有

$$2h = m_1 \lambda_1 \quad (10-3)$$

$$2h = m_2 \lambda_2 \quad (10-4)$$

式中 λ_1 、 λ_2 —— 两种光波的波长。

3. 小球径的测量

(1) 用干涉显微镜测球径 除了采用通常测量轴径的方法测量球径外，利用干涉显微镜对小球径的测量具有很大的优越性。由于是非接触测量，其测量精度较高，原理误差为 $\lambda/2$ 。

该方法利用测量表面粗糙度的干涉显微镜，将被测球径与量块直接比较，可测高精度的球径。

如图 10-3 所示，光源 1 的光线经聚光镜 2 后射出平行光束，经分光镜 4 后分成光强相等的两束光：一束透射到参考镜 5 后返回；另一束反射向下到被测球 6 或量块 7 的表面返回。两束返回的光在分光镜上发生干涉，经显微镜组 3 进行观察。

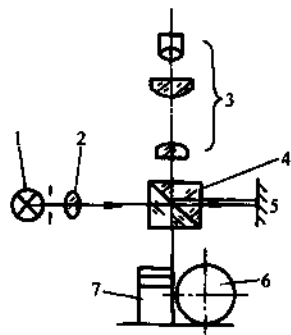


图 10-3 干涉显微镜测球径

1—光源 2—聚光镜 3—显微镜组 4—分光镜 5—参考镜 6—球 7—量块

用该法测球径采用平晶作工作台面，将被测球放在测量位置上，调整仪器使被测球的顶部造成零级干涉带，并记取其位置，然后将量块移入测量位置。若球径尺寸与量块组尺寸相等，则量块组表面零级干涉带也必在此位置上。若有偏离，则偏离的条纹数即为球径 d 与量块 L 之差值，即

$$d = L \pm (N + \Delta N) \frac{\lambda}{2} \quad (10-5)$$

式中 N 、 ΔN ——两次测量中，零级干涉带在条纹垂直方向上以条纹的整数和小数表示的偏离量；

λ ——测量光波波长(白光通常取 $0.58\mu\text{m}$)；

L ——量块组实际尺寸(与球径 d 尺寸差应小于 $3\mu\text{m}$ ，球径 d 可先用其他方法粗测一下)。

根据光的等厚干涉原理，球面形成的干涉带是圆环状的。当零级干涉带产生于球顶部时，则将是一个由一系列圆环包围的黑斑。为了正确判断该位置，需逐次微量调整，使圆环逐渐缩小、变深，直至圆心处缩成一个由色所包围的色圆斑，这就是由球顶造成的零级干涉带。

该法的另一关键，是确定上述公式的正负号。测量时，要注意提升仪器光学部分时条纹的移动方向：量块的零级干涉带朝相对球顶的零干涉这个方向偏离，则公式中用正号；反之选用负号。

(2) 小内球面半径的测量 小内球面(如宝石轴承内半球面)的曲率半径可应用常用的 6JA 型干涉显微镜来测量。

将小内球面放在显微镜的工作台上，使球面中心位于光轴上时，形成的干涉条纹是周边对称的同心圆环。

在测微目镜中测出第 k 、 i 两个(任选)干涉的半径 r_k 、 r_i ，则内半径 R 可由下式确定：

$$R = \frac{r_k^2 - r_i^2}{(k - i)\lambda} \quad (10-6)$$

式中 λ ——测量用光波波长。

这种方法的相对测量误差不大于 $0.2\% \sim 0.3\%$ 。测量时，应注意干涉条纹的稳定性(即干涉环始终位于光轴上)。如有游动，应延长定温时间(至少半小时以上)，或对测量数据作均值处理。

2 微位移的测量

2.1 光干涉法微位移的测量

微位移的测量包括微动工作台移动距离、磁头与磁盘间的间隙以及径向、端面脉动的测量等。50年代采用机械式、光学机械式测微仪、电动式(电容、电感)测微仪，60年代采用干涉方法。

图 10-4 所示是美国标准局测量装置中所用的激光干涉仪，它采用偏振干涉原理和光学倍频措施，提高了测量灵敏度。较大范围的移动采用光电计数来测量。静止时，可通过旋转起偏振片对 $\lambda/4$ 范围内的距离进行进

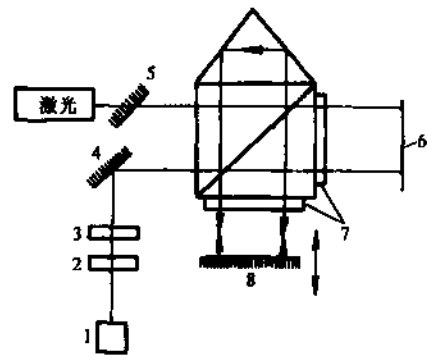


图 10-4 偏振干涉仪

1—光电池 2—起偏振片 3、7— $\lambda/4$ 波片
4、8—反射镜 5—快轴在一定方向的 $\lambda/4$ 波片 6—参考镜

一步细分,起偏振片转 180° 相当于移动 $\lambda/4$ 的距离,所以有很高的灵敏度。

2.2 外差干涉轮廓测量

图 10-5 是外差干涉式轮廓测量装置光路系统。由 He-Ne 激光器 1 发出的激光被分光镜 2 分成两路:一路透射经声光调制器 3,一级衍射光频率增加,频率为 $f_2 = 40\text{MHz}$,经反射镜 4、扩束系统 8,由透镜 9 会聚到物镜 14 的后焦点上,经物镜后成为平行光照射到被测面 15 上,作为参考光束;另一路由分光镜 2 反射经声光调制器 5,一级衍射光频率增加,频率为 $f_1 = 41\text{MHz}$,经反射镜 6、扩束系统 7、分光镜 12,由物镜 14 会聚在样品表面,作为测量光束,测量光斑的大小由物镜 14 的参数决定。

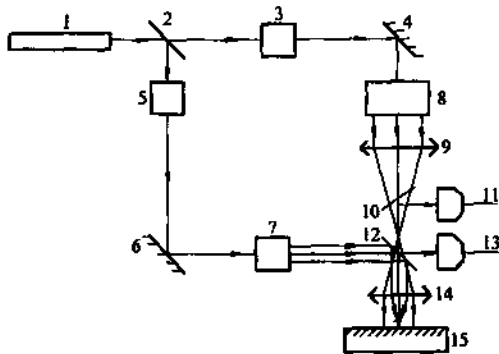


图 10-5 外差干涉式轮廓测量原理

1—He-Ne 激光器 2、10、12—分光镜 3、5—声光调制器 4、6—反射镜 7、8—扩束系统 9—透镜
11、13—探测器 14—物镜 15—被测面

透过分光镜 12 测量光束与被分光镜 12 反射的参考光束产生拍波,由探测器 13 接收,产生参考信号,而从被测面返回的二束光由分光镜 10 反射进入探测器 11,产生测量信号。将探测器 11 与 13 接收到的测量与参考信号送入相位计进行比相,于是可测得表面轮廓高度值。

设由被测表面返回后的波动方程为

$$\text{测量光束: } E_1 = A_1 \cos[2\pi(f_0 - f_1)t + \phi(t) + \phi_1] \quad (10-7)$$

$$\text{参考光束: } E_2 = A_2 \cos[2\pi(f_0 - f_2)t + \overline{\phi(t)} + \phi_2] \quad (10-8)$$

式中 f_0 ——激光频率;

f_1 、 f_2 ——声光调制器频率($f_1 = 41\text{MHz}$, $f_2 = 40\text{MHz}$);

$\phi(t)$ ——表面轮廓高度所对应的相位;

$\overline{\phi(t)}$ ——参考光斑内平均相位;

ϕ_1 、 ϕ_2 ——二路初始相位, $\frac{\lambda}{2\pi}(\phi_1 - \phi_2)$ 为二束光不共路部分的光程差。

1) 光电探测器 11 接收到的合成光强为

$$\begin{aligned} I_1 &\propto (E_1 + E_2)^2 \\ &= E_1^2 + E_2^2 + A_1 A_2 \cos[2\pi(f_1 - f_2)t + \phi(t) - \overline{\phi(t)} + \phi_1 - \phi_2] \\ &\quad + A_1 A_2 \cos[2\pi(2f_0 + f_1 + f_2)t + \phi(t) + \overline{\phi(t)} + \phi_1 + \phi_2] \end{aligned} \quad (10-9)$$

其中只有第三项,频率为 $f_1 - f_2 = 1\text{MHz}$ 能被光电探测器接收。第一、二项为光频,第四项为二倍光频,均因频率太高,表现为直流量。

式(10-9)所示光强信号经光电转换,滤去直流分量后得到电压输出信号,即

$$u_1(t) \propto A \cos[2\pi(f_1 - f_2)t + \phi(t) - \overline{\phi(t)} + (\phi_1 - \phi_2)] \quad (10-10)$$

2) 光电探测器 13 接收到的光强信号为

$$\text{测量光束: } E_1' = B_1 \cos[2\pi(f_0 + f_1)t + \phi_1] \quad (10-11)$$

$$\text{参考光束: } E_2' = B_2 \cos[2\pi(f_0 + f_2)t + \phi_2] \quad (10-12)$$

$$\text{合成光强 } I_2 \propto (E_1' + E_2')^2$$

$$= E_1'^2 + E_2'^2 + B_1 B_2 \cos[2\pi(f_1 - f_2)t + \phi_1 - \phi_2] + B_1 B_2 \cos[2\pi(2f_0 + f_1 + f_2)t + \phi_1 + \phi_2] \quad (10-13)$$

同理，光电探测器 13 的输出电压信号为

$$u_2 \propto B \cos[2\pi(f_1 - f_2)t + (\phi_1 - \phi_2)] \quad (10-14)$$

将 $u_1(t)$ 与 $u_2(t)$ 二路信号进行比相，得相位差

$$\Delta\phi = \phi(t) - \overline{\phi(t)} \quad (10-15)$$

其物理意义可以由图 10-6 描述： $\phi(t)$ 是参考光斑范围内平均相位，若参考光斑直径等于取样长度，则 $\phi(t)$ 所对应的正是取样长度内轮廓平均高度位置，即轮廓中线位置； $\phi(t)$ 则是测量光点位置轮廓高度所对应的相位值。显然 $\Delta\phi$ 与表面轮廓起伏 Δh 之间的关系为

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta h \quad (10-16)$$

该外差干涉式轮廓测装置测量光斑做到 $1\mu\text{m}$ ，参考光斑在 $\phi 0.05 \sim 3\text{mm}$ 范围内可调，垂直方向分辨率优于 1nm 。信号频率为 $f_1 - f_2 = 1\text{MHz}$ ，这个频率无论对接收还是处理，目前都已不是很困难。从理论推导中可以看到，干涉仪二臂不共路部分的相位差通过比相被消除影响，这对提高仪器的抗干扰能力，提高信噪比十分有利。该测量装置的缺点是用两个价格昂贵的声光调制器，不利于降低产品成本。

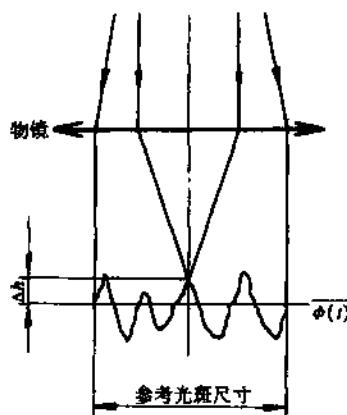


图 10-6 $\Delta\phi$ 与 Δh 的关系

3 平面度和表面粗糙度的测量

3.1 平面度误差的测量和数据处理

3.1.1 平面度

平面度误差是指一个实际表面对其理想平面的变动量。根据国家规定，平面度误差应按最小条件来评定，即评定基准为理想平面，而平面度误差是包容实际表面且距离为最小的两平行平面间的距离。对于许多工件，由于理想平面的位置事先难以确定，因此，测量时应用过渡基准平面先测得原始数据，然后，再以最小条件的方法来评定，以得出被测表面的平面度误差。

平面度公差用以限制平面的形状误差。其公差带为两平行面间的区域。图 10-7a 中零件上表面标注的 0.1 表示上表面的平面度公差值。其公差带是距离 0.1 的两平行平面间的区域(图

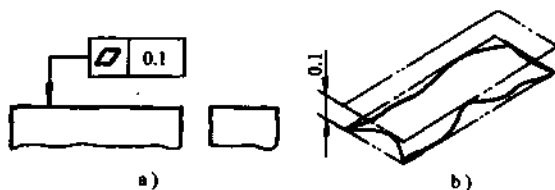


图 10-7 平面度公差

10-7b。全部上表面应处于公差带之内。

3.1.2 平面度误差的测量

1. 平面度误差的测量方法

平面度误差的测量方法可分为直接测量法和间接测量法。直接测量法是将被测的实际表面与理想表面直接进行比较,两者之间的线值距离,即为该被测表面的平面度误差值,间接测量法则是通过测量实际表面上若干点相对测量基准的高度差或倾斜角作为原始数据,然后再换算为以线值表示的平面度误差。

在自然界中,可以用一小块液体表面作为一种自然的平面,但要获得这样的平面必须克服气流和振动造成的起伏和由于表面张力造成的边缘效应;要有较严格的工作环境。

常见的平面度测量方法如图 10-8 所示。图 a 是用指示表测量,将被测零件支承在平板上,将被测平面上相距最远的三点调成距测量平板等高。按一定布点测量被测表面。指示表上最大与最小读数之差即为该平面的平面度误差值。

图 b 是用平晶测量平面度误差。将平晶紧贴在被测平面上,由产生的干涉条纹,经过计算得到平面度误差值。此方法适用于高精度的小平面。

图 c 是水平仪测平面度误差。水平仪通过桥板放在被测平面上,用水平仪按一定的布点和方向逐点测量。经过计算得到平面度误差值。

用自准直仪和反射镜测量如图 d 所示,将自准直仪固定在平面外的一定位置。反射镜放在被测平面上。调整自准直仪,使其和被测表面平行,按一定布点和方向逐点测量。经过计算得到平面度误差值。

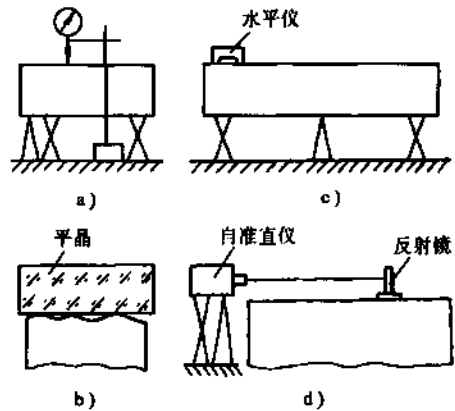


图 10-8 平面度误差的测量

a) 用指示表测量平面度 b) 用平晶测量平面度
c) 用水平仪测量平面度 d) 用自准直仪测量平面度

2. 平直度检查仪

平直度检查仪主要用来测量平面度或直线度,其分度值为 0.005mm/m ,近似等于 $1''$,平直度检查仪的工作原理和自准直管一样。图 10-9 是自准直光管原理图。位于准直物镜 1 焦平面上的刻线标记 2 由于光源 4 的照明及物镜 1 的成像作用,以平行光束出射(成像于无穷远),遇到平面镜反射后返回射膜,刻线标记 2 由胶合面反射至物镜,两返回光束则透过胶合面成像到分划板上。当被测镜面发生 α 角度的微小倾斜时,反射光束将偏转 2α 角,于是刻线标记 2 的亮十字线像将在分划板 6 上产生 $S = f \tan 2\alpha$ 的位移(f 为物镜 1 的焦距)。通过目镜 5 读数,

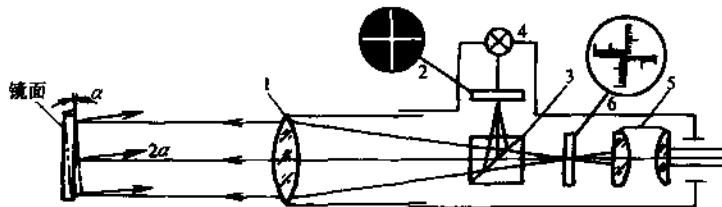


图 10-9 自准直光管原理图

1—物镜 2—刻线标记 3—平面反射镜 4—光源 5—目镜 6—分划板

便可测出平面反射镜的倾角 α 。

常用水平仪与自准直仪的精度指标见表 10-1, 以供参考。

表 10-1 常用水平仪与自准直仪的精度指标

水平仪种类	型 号	刻度值/(mm/m)	示 值 误 差	生 产 单 位
框式水平仪	I 组	0.02 ~ 0.05	0.5" (0.0025mm/m)	各水平仪 厂均生产
	II 组	0.06 ~ 0.10	1" (0.0025mm/m)	
条形水平仪	III 组	0.12 ~ 0.20	2" (0.01mm/m)	
	IV 组	0.25 ~ 0.50	5" (0.025mm/m)	
合象水平仪	GH66	0.01 (2s·rad)	在全范围不 > ± 0.02mm/m, 在 9 ~ 11mm/m 内不 > ± 0.01mm/m	沈 阳 水平仪厂
电感水平仪	68-813 -13	0.005 (1s·rad)		沈阳第一 机床厂等单位
电子水平仪		0.005 (1s·rad)		上海水平仪厂

3.1.3 平面度误差的测量数据处理

用各种不同方法测得的平面度测值, 应进行数据处理, 然后按一定的评定准则评定其处理结果。已证明符合最小条件评定准则的平面度误差最小。最小包容区的判别方法有下列三种。

1) 两平行平面包容被测表面时, 被测表面上有三个最低点(或三个最高点)及一个最高点(或一个最低点)分别与两包容平面相接触, 并且最高点(或最低点)能投影到三个最低点(或三个最高点)之间, 则这两个平行平面符合最小包容区原则, 如图 10-10a 所示。

2) 被测表面上有两个最高点和两个最低点分别和两个平行的包容面相接触, 并且两高点投影于两低点边线之两侧。则这两个平行平面符合于平面度最小包容区原则, 如图 10-10b 所示。

3) 被测表面的同一截面内有两个高点及一个低点(或相反)分别和两个平行的包容平面相接触。则该两平行平面符合于平面度最小包容区原则, 如图 10-10c 所示。

除国家标准规定的最小条件法评定平面度之外, 在工厂中常使用三角形法及对角线法评定。

三角形法是以通过被测表面上相距最远且不在一条直线上的三个点建立一个基准平面, 各测点对此平面的偏差中最大值与最小值的绝对值之和即为平面度误差。实测时, 可以在被测表面上打到三个等高点, 并且调到零点。在被测表面上按布点测量, 与三角形基准平面相距最远的最高和最低点间的距离为平面度误差值。

对角线法是通过被测表面的一条对角线作另一条对角线的平行平面, 该平面即为基准平面。偏离此平面的最大值和最小值的绝对值之和为平面度误差。

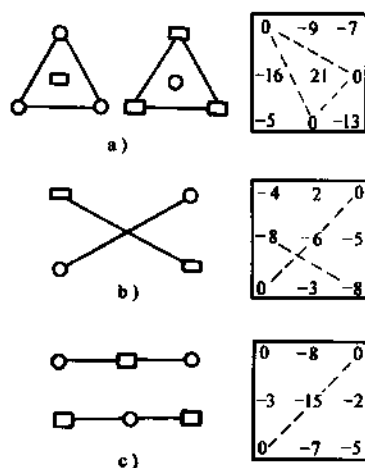


图 10-10 平面度误差的最小条件评定

3.2 表面粗糙度的测量及仪器

表面粗糙度反映的是机械零件表面的微观几何形状误差。对表面粗糙度的评价，主要分为定性和定量两种评定方法，定性评定是将待测表面和已知表面粗糙度级别的标准样板相比较，通过目估或借助于显微镜以判别其级别；而定量评定则是通过一定的测量方法和相应的仪器测出待测表面的不平度数值。目前，应用较广的粗糙度测量方式主要有粗糙度样板比较法、光切法、干涉法、触针法以及印模法等。

3.2.1 比较法

比较法是车间常用的方法。将被测表面对照粗糙度样板，用肉眼或借助于放大镜、比较显微镜；也可用手摸靠感觉来判断被加工表面的粗糙度。

粗糙度样板（图 10-11）的材料，形成及制造工艺尽可能与工件相同，这样才便于比较，否则会产生较大的误差。

比较法一般只用于粗糙度的评定参数值较大的情况下，其判断的准确性很大程度上取决于检验人员的经验。当有争议时，可用仪器进行测量。



图 10-11 粗糙度样板

3.2.2 光切法

(1) 光切法测量原理 光切法是利用光切原理来测量表面粗糙度的方法。它是将一束平行光带以一定角度投射于被测表面上，光带与表面轮廓相交的曲线影像即反映了被测表面的微观几何形状。这种用光带投影于被侧面而获得截面轮廓曲线的方法即称为光切法。

光切原理如图 10-12 所示。由光源发出的光线经狭缝后形成一束光带。此光带以 45° 方向与被测表面相截。若零件表面轮廓如图 10-12a 所示的台阶面，则在光带投射方向相应的反射方向上，通过显微镜就可以看到如图 10-12b 所示的像。

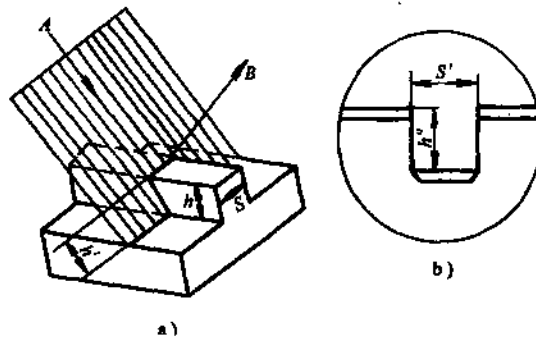


图 10-12 光切原理

由图中的几何关系可得

$$\frac{h''}{h'} = \beta, \quad h = h' \cos 45^\circ = \frac{h''}{\beta} \cos 45^\circ, \quad S = \frac{S'}{\beta}$$

式中 h ——台阶高；
 h'' ——台阶像高；
 S ——台阶宽；
 S' ——台阶像宽；
 β ——观察物镜放大倍数。

只要测微目镜测出 h' 和 s' 值, 就可以根据上述公式算出 h 和 s 的值。

(2) 双管显微镜 双管显微镜就是根据“光切原理”制成的。图 10-13 是它的光学系统图。显微镜有照明管和观察管, 二管轴线互成 90° , 在照明管中, 光源 1 通过聚光镜 2、窄缝 3 和透镜 5, 以 45° 角的方向投射在工件表面 4 上, 形成一狭细光带, 光带边缘的形状, 即为光束与工件表面相交的曲线, 也就是工件在 45° 截面上的表面形状, 此轮廓曲线的波峰在 S_1 点反射, 波谷在 S_2 点反射, 通过观察管的透镜 5, 分别成像在分划板 6 上的是峰与谷影像的高度差。图 10-14 是仪器的视场图。图 10-14a 是以可动十字分划线与最低点相切的情况, 此时又可读一读数; 前后两次读数之差就是 h 的读数值, 测量时可按 R_z 定义, 在基本长度内, 测五个最高点和五个最低点, 求出 h 的平均值, 再根据所选透镜组 5 (可换物镜组) 确定测微目镜鼓轮每一格的分度值 c , 以 c 值乘 h 的平均值, 求得被测表面的 R_z 值, 将此值与粗糙度数值表的数值相比较, 即可确定工件表面的粗糙度。

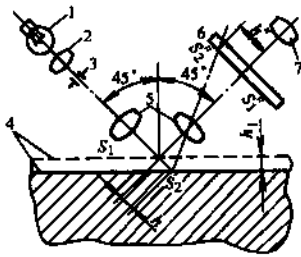


图 10-13 双管显微镜光学系统图

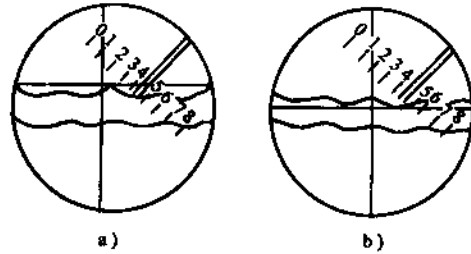


图 10-14 双管显微镜视场图

双管显微镜的外形如图 10-15 所示。

双管显微镜适于测量 R_z 、 R_y , 以及较规则表面(如车、铣、刨等)的 S 和 S_m , 不适于测量粗糙度较高的表面及不规则表面(如磨、研磨等)的 S_m 值。

3.2.3 干涉法及干涉显微镜

干涉法是指利用光学干涉原理来测量表面粗糙的一种方法。

干涉显微镜是根据光学干涉原理制成的。图 10-16a 为其光学系统示意图。由光源 1 发出的光线经聚光镜 2、滤色片 3、光阑 4、及透镜 5 后成平行光线, 射向半透半反的分光镜 7 后分成两束: 一束光线通过补偿镜 8、物镜 9 到平面反射镜 10, 被反射镜反射又回到分光镜 7, 再由分光镜经聚光镜 11 到反射镜 16, 由反射镜进入目镜 12; 另一束光线向上通过物镜 6, 投射到被测零件表面, 由被测表面反射回来, 通过分光镜 7、聚光镜 11 到反射镜 16, 由反射镜反射也进入目镜 12。这样, 在目镜 12 的视场内可观察到这两束光线因光程差而形成的干涉带图形。若被测表面粗糙不平, 干涉带即成弯曲形状(图 10-16b)。

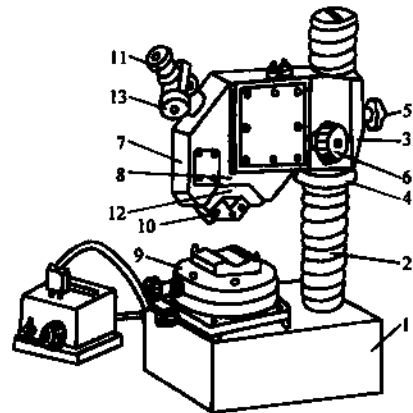


图 10-15 双管显微镜

- 1—底座 2—立柱 3—横臂 4—手轮
5—固定螺钉 6—微测手轮 7—壳体
8—锁紧手柄 9—工作台 10—物
镜组 11—测微目镜 12—燕
尾导轨 13—千分尺

由测微目镜可读出相邻两干涉带距离 a 及干涉带弯曲高度 b 。由于光程差每增加半个波长，即形成一条干涉带，故被测表面微观不平度的实际高度为 $H = \frac{b}{a} \times \frac{\lambda}{2}$ ，式中 λ 为波长。

在取样长度内，测量五个最大的 H 并加以平均即得出 R_z 值。

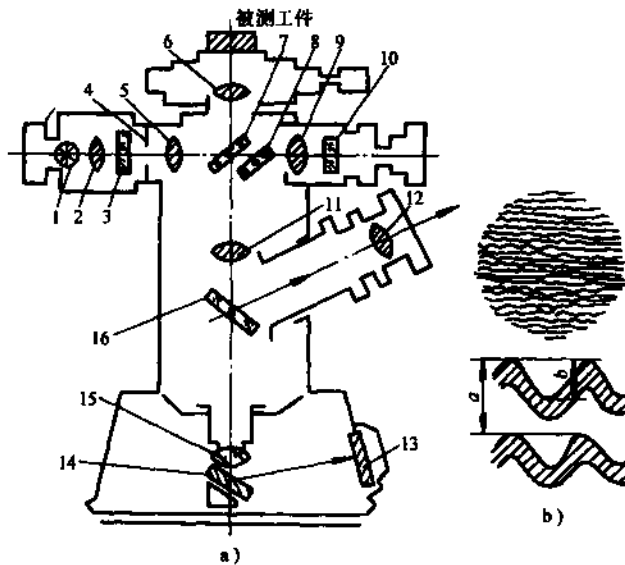


图 10-16 干涉显微镜

1—光源 2、11、15—聚光镜 3—滤色片 4—光阑 5—透镜
6、9—物镜 7—分光镜 8—补偿镜 10、14、16—反射镜
12—目镜 13—透光窗

3.2.4 触针法

1. 触针法的测量原理

触针法又称针描法，它是一种接触式测量方法，是利用仪器的测针与被测表面相接触并使测针沿其表面轻轻移动来测量表面粗糙度的一种测量法。如图 10-17 所示，它是将一个很尖的触针垂直安置在被测表面上作横向移动，由于工作表面粗糙不平，因而触针将随着被测表面轮廓形状作垂直起伏运动。将这种微小位移通过电路转换成电信号并加以放大和运算处理，即可得到工件表面粗糙度参数值；也可通过记录器选描绘出表面轮廓图形，再进行数据处理，进而得出表面粗糙度参数值。

这种方法所测出的表面轮廓信息，即触针圆心的移动轨迹，而轨迹的半径即等于针尖半径和实际表面轮廓曲线半径之和。因此，影响这种测量方法准确度的因素，主要是触针的形状和测量力。

电动轮廓仪与光学机械式表面粗糙度测量仪器相比，主要特点是：显示直观；能测量多种形状的工件表面，如轴件、孔件、锥体、球体、沟槽等；测量时间短，得出参数快；操作方便。便携式的电动轮廓仪能适用于现场测量；带有记录器的台式电动轮廓仪，还可以描绘出实

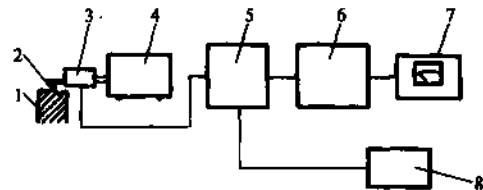


图 10-17 电动轮廓仪工作原理

1—被测件 2—触针 3—传感器 4—驱动器
5—测微放大器 6—信号分离与运算器
7—显示器 8—记录器

际的表面轮廓曲线；带有微处理机的电动轮廓仪，更可以通过屏幕显示被测表面的外貌图形。但由于电动轮廓仪均是接触式的测量方式。所以对软性工件的被测部位会有不同程度的划伤。由于轮廓仪触针针尖尺寸的限制，使得仪器的测量范围 R_a 值一般不超过 $0.02 - 10\mu\text{m}$

2. 电动轮廓仪

电动轮廓仪的工作原理是采用触针法原理。传感器与驱动箱连接后可通过铰链自由下垂，装入传感器前端的滑块使传感器支承在被测工件表面上。当驱动箱带动传感器沿被测表面以某一恒定的速度滑行时，传感器的触针就随着工件表面微观不平度而上下运动。这时触针的运动由传感器转换成电信号，以测微放大电路放大，该信号输入记录器后绘出被测表面轮廓曲线放大图形，或者将该信号通过适当的分离和运算电路后，由显示器显示出某种表征参数，如 R_a 或 R_z 。

电动轮廓仪是按针描原理制成的仪器。图 10-18 所示为一种电动轮廓仪的工作原理。

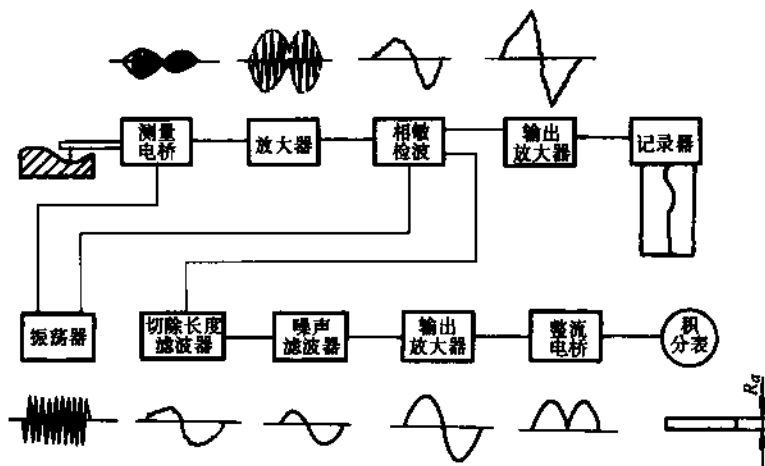


图 10-18

电动轮廓仪依结构形式可分为台式和便携式。这里只介绍台式电动轮廓仪的主要结构。不同型号的台式电动轮廓仪，总体构成是相同的。它们均由基座、传感器、驱动箱及记录器等组成。常见到的外形结构如图 10-19 所示。

一般电动轮廓仪附有记录器，即可测量 R_a 值，也可通过记录图形（已知垂直和水平放大率）来计算 S 、 S_m 、 R_y 、 t 和 t_p 值。

3.2.5 印模法

对于一些大型零件的内表面，不便使用仪器测量，这除了用比较法测量之外，还可用印模法来间接测量。印模法的原理是，利用某些塑性材料作成块状印模，贴合在被测表面上，取下后，在印模上存有被测表面的轮廓形状，然后对印模的表面进行测量，得出原来零件的表面粗糙度。

目前，常用的印模材料有川蜡、石蜡、赛璐珞和低熔点合金等。这些材料的强度和硬度都不

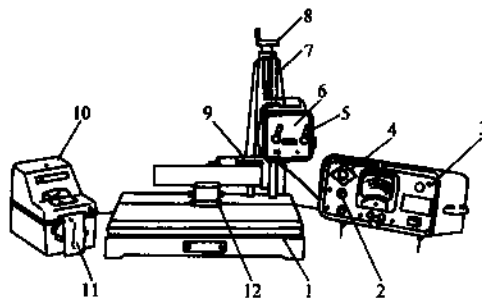


图 10-19 台式电动轮廓仪

- 1—底板 2—截止开关 3—电器箱 4—倍率开关
5—变速手柄 6—驱动箱 7—立柱 8—丝杆手柄
9—传感器 10—记录器 11—记录纸 12—滑块

高，故一般都不用针描法测量它。由于印模材料不可能填满谷底，且取下印模时往往使印模的波峰削平，所以测得印模的 R_z 值比实际的略有缩小，一般应根据实验进行修正。

印模法适于测量 $R_z = 0.8 \sim 330 \mu\text{m}$ 的表面，若用川蜡可测 $R_z = 0.4 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 的表面。

4 微细图形尺寸的测量

微细图形尺寸的测量主要是指大规模集成电路中的掩模板和硅片上的图形线条宽度、线间距以及硅片上线条深度的测量。

线宽和间距的测量仪器按其测量的方法来说有比较测量和直接测量两种。

4.1 比较测量

比较测量方法是用与基准图形进行比较，来判断要制造的图形与标准图形的差异，从而确定制造图形的正确与否。这种方法大多采用透射光照明，主要适用于掩模板的检测。

图 10-20 所示是掩模检查仪的原理图。采用两种单色光源照明，红色光和绿色光分别照明基准掩模和被测掩模，并分别经过倍数相同的显微物镜，成像在同一视场的像面上。由于基准图形与被测图形相同，合像之后，如两图形完全一致则呈黑色。当被测图形有缺陷时，则缺陷处为红色或绿色，用人眼通过投影屏观测。采用 600 倍时，其测量精度可达 $\pm 0.7 \mu\text{m}$ ，适用于中缩版及一般集成电路中的图形检查。

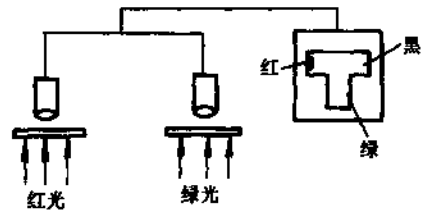


图 10-20 掩模检查仪原理

自动掩模比较仪的原理如图 10-21 和图 10-22 所示。图 10-21 采用飞点扫描工业电视摄像

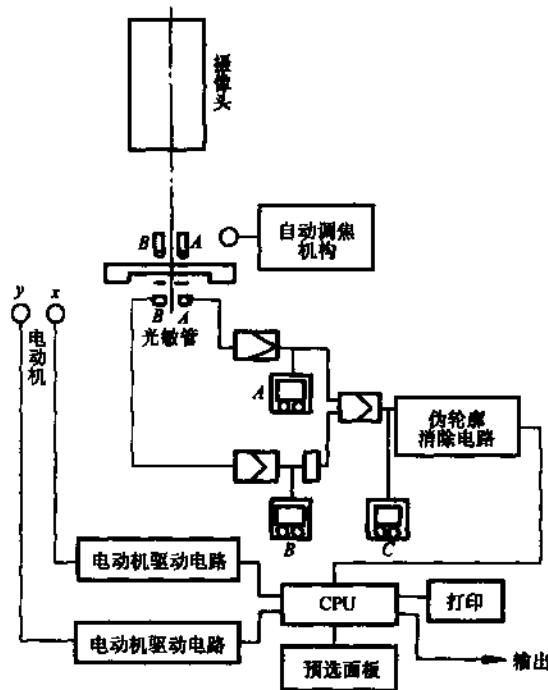


图 10-21 飞点扫描自动掩模比较仪原理

头，通过装在自动调焦头上的两个显微镜 A、B 对掩模进行扫瞄，由光电元件 A、B 分别接收透过掩模的光信号。取 A、B 的差值作为缺陷信号，经过差动放大，再由微处理器与控制掩模工作台的驱动电路输出坐标信号同步记录下来。为了监视工作情况，分别设置 A、B、C 三个监视器，最小检测能力为 $0.75\mu\text{m}$ 。图 10-22 所示是将图形信息暂时存储起来。如图照明光源由下部透射光照明掩模，分别由左、右物镜将图形信息送入左、右光电检测器，并由双向随机存储器记录下来，再由微处理器处理后通过电视显示(或由磁带记录)。该系统还设有自动调焦和自动对准装置。其检测灵敏度为 $0.5\mu\text{m}$ 。以上两种方法可实现自动检测。

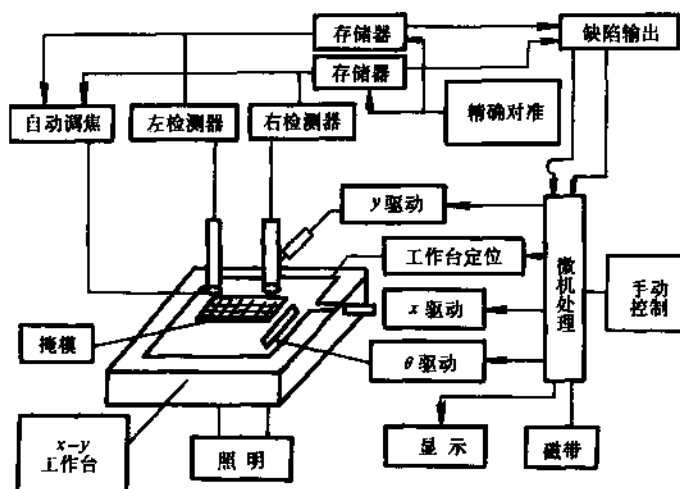


图 10-22 信息存储自动掩模比较仪原理

空间滤波方法也是掩模检查中常用的方法之一，它是用富立叶光学变换系统进行二维光信息处理的基本方法。其原理如图 10-23 所示。图 a 为系统图，掩模放在物面 $g(x_1, y_1)$ 上，其中存在缺陷(图 b)，经 F 透镜 L_1 变换在频谱面 $P(\xi, \eta)$ 得到频谱(图 c)，存在缺陷频谱 $G(\mu)$ ，如果滤波器是正常图形频谱滤波后(图 d)，经逆变换在像面上显示缺陷图形，如图 e 所示。由于大规模集成电路的掩模图形具有特殊形状，因而可以制成与掩模正常图形相对应的频谱滤波器，滤掉正常的图形光学信息，在像面上就显示出缺陷图像。

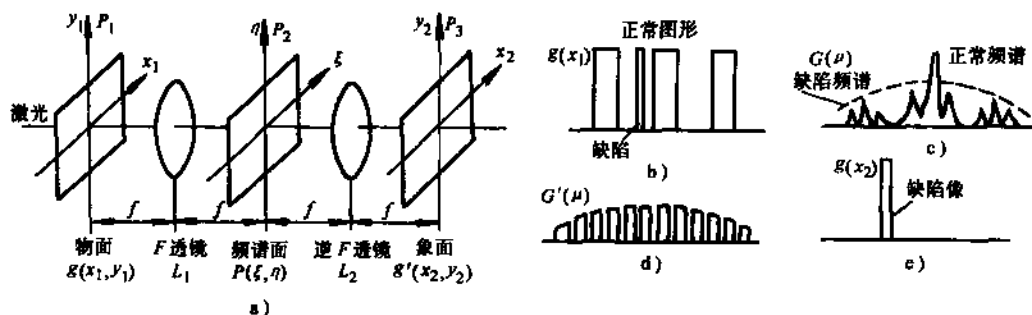


图 10-23 空间滤波法

空间滤波器可分为强度、差分、方向滤波等。图 10-24 所示是采用二色法方向性滤波器的掩模检测系统。He-Ne 激光器经准直后照明掩模，同时在光路中加绿色非相干光照明，经 F 透

镜和方向滤波器之后,经逆变换成像。当绿色光关闭时,即为一般方向性滤波,显示红色缺陷。关闭红光即是一般显微系统。当红绿光同时开启时,则可观察到绿色背景上的红色缺陷。其分辨力为 $1.5\mu\text{m}$ 。

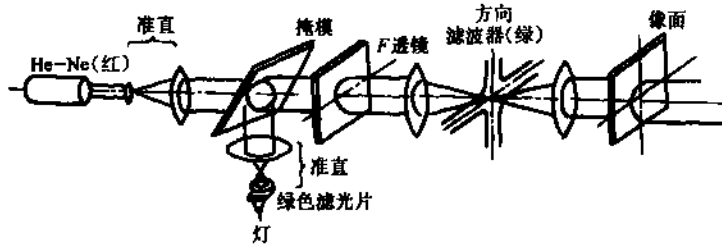


图 10-24 空间滤波掩模检查仪

另外,还可采用图形设计数据(CAD 数据)与所做出的掩模进行比较、对照,从而检测出缺陷,这种方法是比较理想的方法,但数据处理比较复杂,实现比较困难。

4.2 直接测量

1. 电视测量

电视测量是将被测样品经过显微镜、电视摄像机形成电视图像,并把获取的图像处理成一定的尺寸。其原理框图如图 10-25 所示。主要测量数据由电视信号而来,根据测量目标不同的光学特性,可选用不同灵敏度与分辨力的摄像头。此外,还应根据数据处理量的大小及速率选用不同的存储器及微处理机。

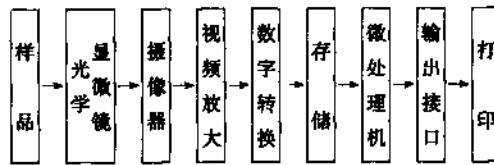


图 10-25 电视测量原理框图

电视测量的原理如图 10-26 所示。电视摄像通过相互垂直的扫描构成垂直坐标网络,在此网络内有两个图像 A, B, 通过微机可以获得两个图像的面积、周长及其他几何特征尺寸,如 l_v , l_H , l_C , l_S 以及中心线位置等,从而可以求出间距、中心距、尺寸差等。图 a 中的图形轮廓用最小单元扫出的图形如图 b 所示,其尺寸误差可达一个单元,而单元的大小取决于“像”

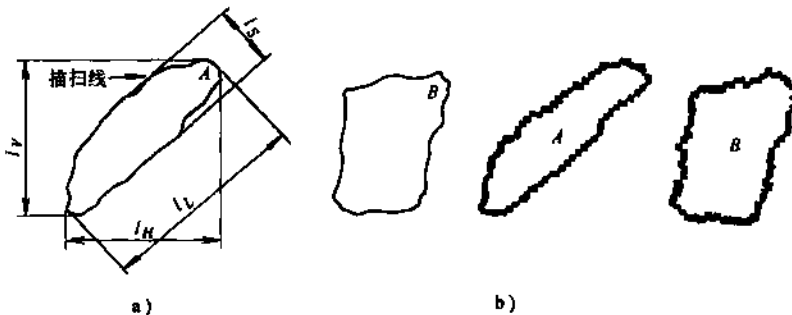


图 10-26 电视测量原理

素”，目前摄像机的像素可达百万以上，最高线分辨率可达 $0.16\mu\text{m}$ 。

电视测量像点的输出强度取决于图像的亮度，故需要良好的光学显微镜。由于在全视场的图像亮度不同会造成不同的测量结果。如相同的尺寸的线条，由于照明不均匀、被测物体本身的差异及接收靶各部分不同的灵敏度，会得出不同的结果，因此应正确选择阈值电平。

2. 光电倍增管测量系统

光电倍增管测量系统主要是由光学显微镜、扫描狭缝、光电倍增管及计算机等组成，其原理如图 10-27 所示。光源(透射或反射)照明被测件，经物镜和辅助物镜成像在扫描狭缝附近，被光电倍增管接收，用显微密度计形成轮廓送入计算机对这个轮廓进行分析，从而确定线边缘的位置。

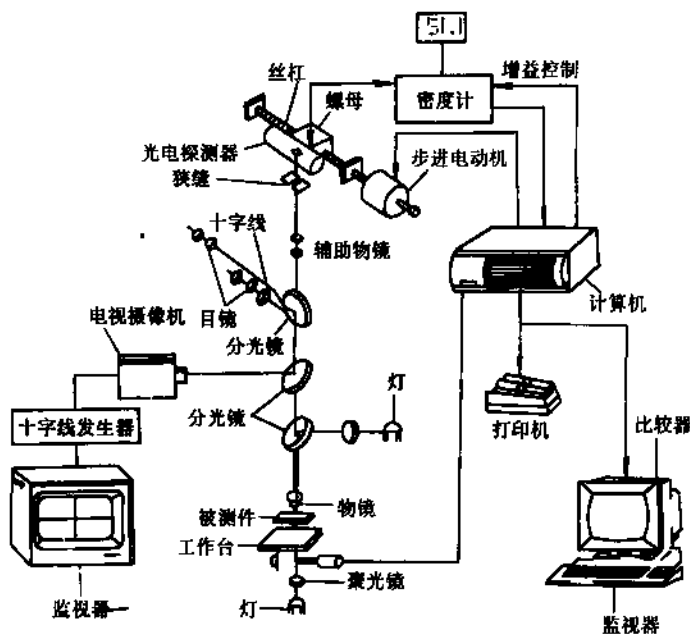


图 10-27 光电倍增管测量系统

狭缝长 400nm 宽 200nm 用十字线对准被测线一边(图 10-28)，狭缝以 25nm 的步距对像进行扫描，得到的光通量转换成数字量被存储起来。确定线宽及间距的关键问题是阈值的选择，

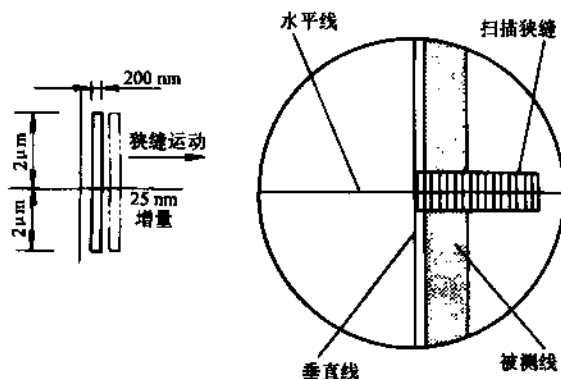


图 10-28 狭缝扫描

因为线条边缘并不是很好的，特别是硅片上的图形(图 10-29)应根据不同的线条确定不同的阈值，从而能获得正确的结果。

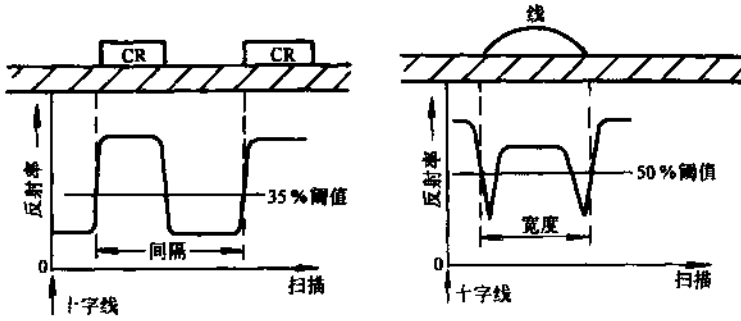


图 10-29 阈值的确定

3. 激光扫描测量系统

利用激光光束的相干性在物体表面进行扫描。当物体表面载有某种标记(如刻线等)时，只要激光束落在标记边缘上，就会产生衍射现象，光能量发生变化。光学系统接收光能量并通过光敏元件转换成电信号，从而精确地测量物面上各种标记的相互尺寸位置。

扫描方式有两种：一是主动扫描，就是利用转鼓等使激光束在被测表面上进行扫描；另一种是被动扫描，即激光束不动而是被测表面移动来进行扫描。图 10-30 所示为测量原理。激光束通过物镜聚焦在被测表面。物镜两侧有两个光敏接收元件。工作台移动使激光斑在被测表面进行扫描，当遇到线条边缘时，激光斑产生散射与衍射，使光敏元件接受不同的能量。由于遇到的边缘不同，光敏元件 A、B 获得不同信号，而形成检测脉冲，从而可确定线宽和间距。

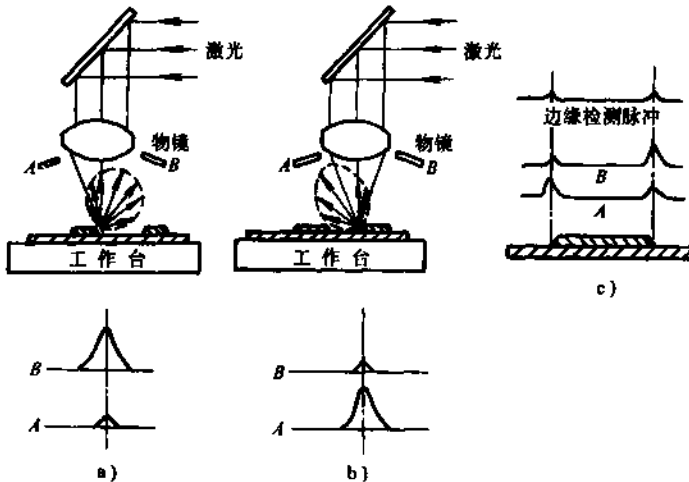


图 10-30 激光扫描测量原理

激光光斑大小与使用的光学系统有关，一般为 $1 \sim 10 \mu\text{m}$ 。测量精度达 $\pm 0.06 \mu\text{m}$ 。

4. 扫描电子显微镜

在微小尺寸测量中应用扫描电子显微镜是一种理想的测量方法。它是利用聚焦度高的电子束对被测样品进行光栅方式扫描，通过对样品发射的二次电子进行检测来获得线宽值。常用的

电子显微镜有两种：一种是透射式电子显微镜 (TEM)；另一种是扫描式电子显微镜 (SEM)。

透射式电子显微镜典型的放大倍数为 $5000 \sim 10^6$ 倍，可测 $0.001\mu\text{m}$ 甚至更小的物体。其缺点是只能测量薄的 (厚度 $< 1\mu\text{m}$) 且不透过电子束的物体。

扫描电子显微镜的放大倍数可高达 5×10^4 倍，因此可测量小到 $0.02\mu\text{m}$ 的物体，与光学显微镜比，其优点一是焦深大；二是扫描电子束斑点尺寸小 ($0.05 \sim 0.005\mu\text{m}$)，分辨力高。

图 10-31 所示为微小尺寸检定用的电子探头框图。采用扫描电子显微镜，激光定位工作台 (包括微动台)，光斑 5mm ，利用微机控制，测量精度为 $0.01\mu\text{m}$ 。此外，光学显微镜是通用的微小尺寸测量仪器，特别是 70 年代问世的超声显微镜具有发展前景。

国外生产的微小尺寸测量仪器见表 10-2。

表 10-2 国外一些制造厂生产的微小尺寸测量机的性能指标

仪器名称	厂家	测量方法	照明	测量范围/ μm	当量值/ μm	重复性/ μm
MAP-28	Nikon	光电显微镜	透射光	0.7 ~ 190	0.01	± 0.05
电视比较仪 (半自动)	日立电子	显微镜+电视信号处理	透射光 反射光	0.3 ~ 9000	0.001	-
Nanoline III	Nanometrics			0.3 ~	0.01	± 0.04 以下
ITP-System 80	ITP			0.5 ~	0.001	± 0.006
Latimat Automatic	Leitz			0.5 ~	0.01	± 0.02
LAMPAS-M2	Nikon	激光	反射光	0.8 ~ 100	0.01	± 0.06
EMM-1000L	Eliionics	SEM 二次 电子信号	—	40 ~ 60mm	0.001	0.01%

5 台阶、膜厚的测量及其他

5.1 台阶测量

线宽、间距和线深组成微尺寸的三维测量。线深测量方法有接触式和非接触式两种。

接触式测量原理如图 10-32 所示。用电磁传感器 (差动变压器) 通过探头对样品进行扫描，把表面轮廓描绘在图形记录仪纸带上。初始位置差动变压器铁心处于中间位置，上下对称，两线圈产生的电压相互抵消，输出为零。测量时探头在被测表面扫描铁心微量移动，两线圈电压不能抵消，经放大、解调后得到正弦波电压信号输出，可测出台阶高度。

接触测量存在测量力 $(1 \sim 20) \times 10^{-5}\text{N}$ ，探头一般用金刚石制成，其半径为 $1.5 \sim 12\mu\text{m}$ 。该

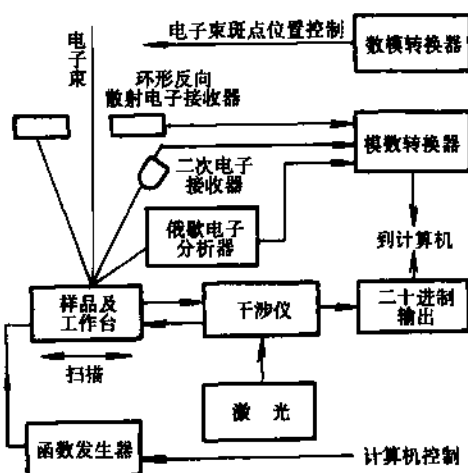


图 10-31 SEM 原理框图

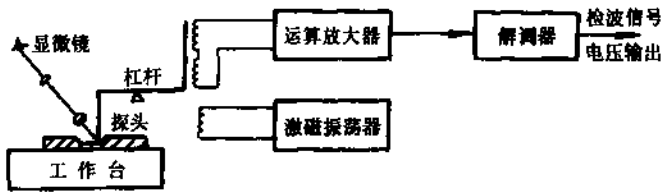


图 10-32 台阶测量原理

方法分辨力可达 5nm。对间距较小的线宽，由于探头有一定的几何尺寸，故不能测量。

非接触测量方法有：光学干涉测量、自动调焦测量等。

5.2 膜层厚度测量

5.2.1 概述

各种介质、半导体和金属的薄膜，在电子工业、光学工业和化学工业等得到了广泛的应用。膜层的厚度对器件或仪器的性能有直接影响。例如用于硅微型电路的介质层的厚度和成分，对半导体工业具有很大的重要性，这些膜层的厚度将决定集成电路器件的性能和可靠性。

采用平面工艺制造的集成电路，通常在硅衬底或硅片上有一层热生长的二氧化硅绝缘层，这薄薄的二氧化硅介质层使得硅衬底的表面态密度降到最小，并且通过防止 PN 结吸收沾污气而使硅表面稳定。在 MOS 器件中，二氧化硅层的厚度决定着器件的开启电压。在硅片上某一区域过厚的硅氧化层，将会引起该区域开启电压的增加，甚至硅片上二氧化硅层厚度的少量变化也会导致元件失配，从而降低器件的灵敏度。因此对各种膜厚的测量及生产过程在线检测与控制，提供灵敏度和准确度高的检测手段尤为重要。膜厚的范围已从微米级进入纳米级。例如集成电路中各种纯化膜已由 100nm 级进入 10nm 级以下，物质结构研究中早已接近 0.1nm 级。对于从微米到毫微米各种膜厚的测量方法很多，其分类主要有

- 1) 机械法 称量法、机械探针法、光学机械法及磨角染色测微法等。
- 2) 电学法 磨角电探针法、电阻法、电容电感法、晶体振荡法及电子射线法等。
- 3) 光电法 光电极值法(变厚、变角、变波长)、干涉法、偏光法、全息法、X 光法、以及扫描电子显微镜、俄歇电子谱仪等。

以上诸方法中，以光电法应用最为普遍，其中不少方法可以达到纳米级的精度。

称量法可检测各种膜厚，对测量大面积薄膜有较高的精度和较大的范围，并可边镀边测实现自动监控，故至今仍被用于真空镀膜工艺中。机械探针法可配合杠杆放大器和电子放大器进行测量，这种方法具有亚微米级精度和较大测量的范围，但需将膜层开槽才能进行探测。用光学比较仪(参见本书第 9 章第 2 节)与无镀层基片进行比较直接读出膜厚，由于采用光学杠杆放大机构，可测出 0.1 μm 的膜厚。线电阻法可镀细长参考片，参考片的长度、宽度固定，并以其他方法预测出镀片膜厚与电阻的反比关系，即可由电阻直接给出厚度，故可边镀边测，有较高精度。电探针法可测出面电阻换算出膜厚。磨角电探针法与磨角染色法都是靠磨出小角度进行测量。染色或电探针则是为了指示膜层与基片的分界线。对于测量 PN 结的宽度很有使用价值，但精度不高。电容法是用来测介质膜，电感法可测金属镀层。

光电极值法是目前工业中常用的方法之一，半导体工业中可用来测氧化膜、氮化硅膜、铁版膜、乳胶膜等膜层厚度。变厚度光电极值法可边镀边测，由单色光垂直入射，可作透射测量或反射测量，极值对应于

$$nd = K \frac{\lambda}{4} \quad (10-17)$$

式中 n ——膜层材料的折射率;
 K ——整数;
 λ ——所用光的波长;
 d ——膜层厚度。

变角法由垂直入射($\varphi = 0^\circ$)开始, 逐渐增大入射角 φ , 由光电法求出反射光极值的人射角 φ , 极变角法由垂直入射($\varphi = 0^\circ$)开始, 逐渐增大入射角 φ , 由光电法求出反射光极值的人射角 φ , 极值对应于

$$d(N^2 - \sin^2 \varphi)^{1/2} = K \cdot \frac{\lambda}{4} \quad (10-18)$$

变波长光电极值法取 $\varphi = 0^\circ$, 由单色仪作波长扫描, 用光电法求取极值仍按式(10-17)求出厚度 d 。

辨色法是半导体工业中常用的方法, 其原理和光极值法相同, 实际上可用白光垂直照明膜层, 观察颜色, 判别极值波长, 按式(10-17)推算膜厚。为提高精度, 可用比色法, 利用人眼的灵敏比力, 在 $nd = \lambda/4$ 处, 可有 $\pm 2\text{nm}$ 的精度。

光电极值法在半导体工业中有一个重要的应用, 是用红外干涉法测量外延层厚度。

斜阶条纹法可测硅片上氧化膜厚度。腐蚀台阶时, 应蚀出一个倾斜的台阶, 观察斜阶上干涉条纹数目 K , 按下式计算出膜厚 d

$$d = K \frac{\lambda}{2n} \quad (10-19)$$

5.2.2 椭圆偏振光法

利用椭圆偏振光法测量膜厚是比较成熟的方法。过去因需从理论上计算出各种特定衬上膜层的厚度与椭圆度变化关系, 计算公式复杂、计算量比较大, 故一直未得到广泛应用。近年来由于电子计算机技术的发展, 使椭圆偏振光法得到了迅速的推广和应用。椭圆偏振光法不仅可以测定介质薄膜的折射率和厚度, 也可以测定吸薄膜的折射率、消光系数和厚度; 采用适当的测量方法和计算程序, 还可测定多层膜中各层薄膜的折射率和厚度; 用微小光点可测微区的折射率和厚度, 改变光源可测非透明膜参数。椭圆偏振方法灵敏度和精度均较高, 一般折射率的测试精度可达到 0.1%, 厚度测试误差优于 1nm, 此外, 它是一种无损测量, 既不破坏被测样品, 也对样品没有任何特别要求。

1. 测量原理

如图 10-33 所示, 当一束光线斜入射到薄膜表面时, 入射光波中的 p 分量电场和 s 分量电场两种媒质的交界面上有不同的行为, 即薄膜、入射介质和基片的 p 分量和 s 分量的有效折射率(或称光学导纳)是各不相同的。因此, 通常 p 分量和 s 分量的有效折射率(或称光学导纳)是各不相同的。因此, 通常 p 分量和 s 分量的反射率和反射相移各不相同。这样当入射光是一束线偏振光时, 在一般情况下, 经过薄膜界面反射后, 在 p 偏振光和 s 偏振光之间产生了附加的振幅差和位相差, 反射光就成了椭圆偏振光。在入射介质及基片的光学常数和入射角均已知的情况下, 这个椭圆偏振光的参数

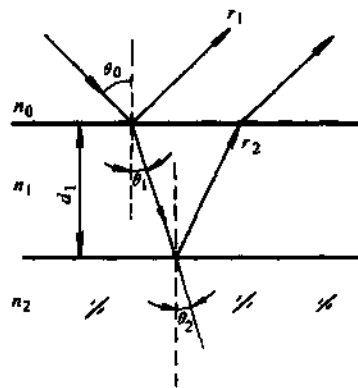


图 10-33 光线在薄膜表面的反射

仅由薄膜的光学常数确定, 因此, 只要测得了反射椭圆偏振光的参数, 就可以计算薄膜的光学常数和厚度。

当光线以入射角 θ_0 入射到薄膜表面时, p 分量和 s 分量的复数振幅反射系数 \hat{r}_p 和 \hat{r}_s 分别是

$$\begin{aligned}\hat{r}_p &= r_p e^{i\varphi_p} = \frac{r_{1p} + r_{2p} e^{-i2\delta}}{1 + r_{1p} r_{2p} e^{-i2\delta}} \\ \hat{r}_s &= r_s e^{i\varphi_s} = \frac{r_{1s} + r_{2s} e^{-i2\delta}}{1 + r_{1s} r_{2s} e^{-i2\delta}}\end{aligned}\quad (10-20)$$

式中 r_{1p} 、 r_{2p} —— p 分量在相应界面的菲涅尔反射系数;
 r_{1s} 、 r_{2s} —— s 分量在相应界面的菲涅尔反射系数。

$$\begin{aligned}r_{j,p} &= \frac{\eta_{j-1,p} - \eta_{j,p}}{\eta_{j-1,p} + \eta_{j,p}} \\ r_{j,s} &= \frac{\eta_{j-1,s} - \eta_{j,s}}{\eta_{j-1,s} + \eta_{j,s}}\end{aligned}\quad (10-21)$$

光学导纳 η 有

$$\begin{aligned}\eta_{j,p} &= n_j / \cos \theta_j \\ \eta_{j,s} &= n_j / \cos \theta_j\end{aligned}\quad (10-22)$$

δ 为薄膜的相位厚度

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} n_1 d_1 \cos \theta_1 \quad (10-23)$$

而 θ_0 、 θ_1 、 θ_2 由菲涅尔定律

$$n_0 \sin \theta_0 = n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

薄膜椭圆函数 $\hat{\rho}$ 定义为复反射系数 \hat{r}_p 和 \hat{r}_s 之比即

$$\hat{\rho} = \frac{\hat{r}_p}{\hat{r}_s} = \frac{r_p e^{i(\varphi_p - \varphi_s)}}{r_s} = \frac{r_{1p} + r_{2p} e^{-i_2\delta}}{r_{1s} + r_{2s} e^{-i_2\delta}} \cdot \frac{1 + r_{1s} r_{2s} e^{-i_2\delta}}{1 + r_{1p} r_{2p} e^{-i_2\delta}}$$

将 $\hat{\rho}$ 改写成

$$\hat{\rho} = \operatorname{tg} \psi \cdot e^{i\Delta}$$

则

$$\begin{aligned}\operatorname{tg} \psi &= \frac{r_p}{r_s} \\ \Delta &= \varphi_p - \varphi_s\end{aligned}\quad (10-24)$$

ψ 表示反射过程中 p 分量和 s 分量的相对振幅衰减程度, Δ 表示了反射过程中 p 分量和 s 分量之间引进的位相差, Δ 、 ψ 称为薄膜的椭圆参数。

Δ 、 ψ 的变化曲线如图 10-34 所示, 由图中可看出 Δ 、 ψ 是厚度 d 的周期函数, 且是关于 $\Delta = 0^\circ$ 线成对称图形。当 n_1 与 n_2 接近时, Δ 、 ψ 随 d 变化的灵敏度比较差; 当 n_1 逐渐脱离 n_2 时, 灵敏度迅速增加, 闭合曲线的形状由扁平的梭形扩展成卵形; 当 n_1 增加到 2.1 时, 形状又发生突变成另一种形式的闭合曲线。这组曲线的特点是: 所有这些曲线依赖薄膜的折射率是大于或小于基底折射率而分为两组, 在每组曲线中各曲线

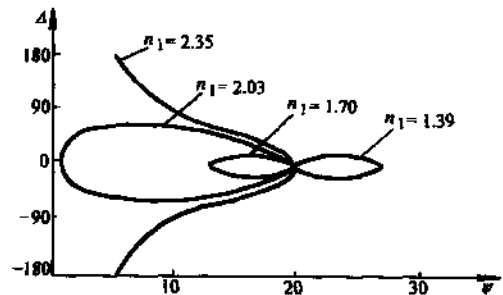


图 10-34 Δ — ψ 随 $n_1 d_1$ 变化曲线
($n_2 = 1.5147$, $\theta_0 = 70^\circ$, $\lambda = 632.8 \text{ nm}$)

彼此之间互相叠套，而始终不相交。说明在一个厚度周期内，一对 Δ 、 ψ 的读数唯一对应于一组 $n_1 d_1$ 。但是方程组

$$\begin{cases} n_1 = F_1(\Delta, \psi) \\ d_1 = F_2(\Delta, \psi) \end{cases} \quad (10-25)$$

是一组超越方程，利用解析方法求解是比较困难的，可采用统计试验逼近用计算机求解。

2. 测量光路

椭圆偏振光法测膜厚的光路原理如图 10-35 所示。He-Ne 激光器发生 632.8nm 的光束经起偏器后变成线偏振光，经 1/4 波片 Q 变成椭圆偏振光，入射在样品表面的椭圆偏振光的 p 分量和 s 分量振幅相等，其间的相位差 $\phi_{p,s}$ 仅随 p 的方位在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 之间连续变化。旋转 P 的方位使入射椭圆偏振光在经过薄膜界面反射后，重新补偿为线偏振光，最后用检偏器 A 测定反射线偏振光的方位。如果薄膜的椭圆函数 $\text{tg}\psi e^{2\Delta}$ 则补偿条件是 $\varphi_{p,s} = -\Delta$ 或 $\varphi_{p,s} = \pi - \Delta$ 。由于 $\varphi_{p,s}$ 随 p 而变化，故从起偏器 P 的方位可得到 Δ 值。在满足补偿条件下，由于 p 、 s 分量振幅相等，反射线偏振光对应分量分别与 r_p 和 r_s 成正比。因 $r_p/r_s = \text{tg}\psi$ ，所以它与 s 分量方向的夹角等于 ψ 。当检偏器 A 的透光方位与它正交时，达到消光状态，则 A 的方位读数正好等于 $180^\circ - \psi$ ，因此，可从测量检偏器 A 的方位读数直接到 ψ 的值。

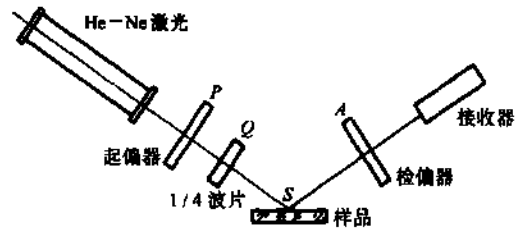


图 10-35

接收器采用光电倍增管；为提高仪器消光位置的判断精度，可在光路中加电光调制器或磁光调制器等。

5.2.3 干涉法

干涉法包括弯度法、条纹对正法、等色级条纹法、钠光内标法及偏光干涉法等等。其基本原理就是利用光波干涉原理由干涉条纹来判断其膜层厚度。

1. 弯度法

弯度法的原理如图 10-36 所示，它实际上是迈克尔逊干涉仪，如前所述其干涉条纹反映了待测面与参考表面 M 的差异，相邻二条纹距离为 $\lambda/2$ 的波长差，以条纹间距为尺度来测条纹的弯度便可测出膜厚 d

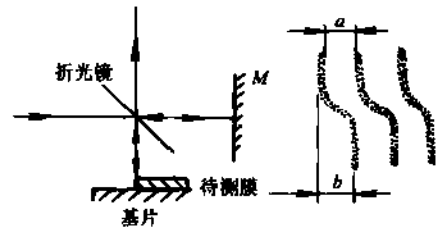


图 10-36 弯度法

$$d = K \frac{\lambda}{2} \quad (10-26)$$

式中 K ——弯度系数， $K = b/a$ ；

λ ——波长。

弯度法可测 $50\text{nm} \sim 20\mu\text{m}$ 的厚度，如采用光电狭缝检测极值位置，其精度可达 $\lambda/50$ 。

2. 等色级条纹法

采用多光束干涉其干涉条纹的光强分布为

$$I = \frac{I_{\max}}{1 + F \sin^2 \pi \left\{ \frac{2nd}{\lambda} \cos \varphi \right\}} \quad (10-27)$$

式中 I_{\max} ——最大光强；

- λ ——波长；
 φ ——光束与入射于多光束相干面的角度；
 d ——两相干面的距离，即膜厚；
 n ——折射率；
 F ——与条纹锐度有关的系数。

对于空气 $n=1$ ，则式(10-27)只有 d 、 φ 和 λ 三个变量。可有以下几种情况(见表 10-3)。

表 10-3 多光束干涉条纹分类

光源	不变量	条纹种类	名称	筛选
单色 (λ 不变)	t	等倾条纹	法-白条纹	角
	φ	等倾条纹	菲佐条纹	线
白色 (λ 变)	φ	等 t/λ 条纹	等色级条纹	波长
	t	等 $\cos \varphi/\lambda$ 条纹	白光法-白条纹	

当 λ 变化时，若 φ 是常数而 t 变化，则对每一条纹 t/λ 取一定值，因而 t/λ 就表示干涉级数。对任一特定的 t 值，允许通过一组分立的波长，对这些波长而言，干涉级数 K 取整数。因为 $K\lambda = \cos \varphi$ ，若 $\cos \varphi = 1$ (垂直入射) 则 $K = t/\lambda$ ， t 固定， K 取整数以 m 表示，则有 $\lambda = t/m$ ，为一系列分立值。这样，若 t 是常量(平行平面膜)，则系统可以看做一个波筛，只允许通过一群分立的波长。若 t 逐点变化，则每一点通过一群和 t 的某定值相应的波长。

其测量光路如图 10-37 所示，物镜把膜的像投射在光谱仪的人射狭缝上，则在光谱仪的谱面上可得到一组分立的弯曲的谱线，每条谱线的不同部位有不同的颜色。条纹弯曲表明所观测的膜映在入狭缝上那一条线的部位有不同的 t 值。等色级条纹法测厚度 d 可由下式求出

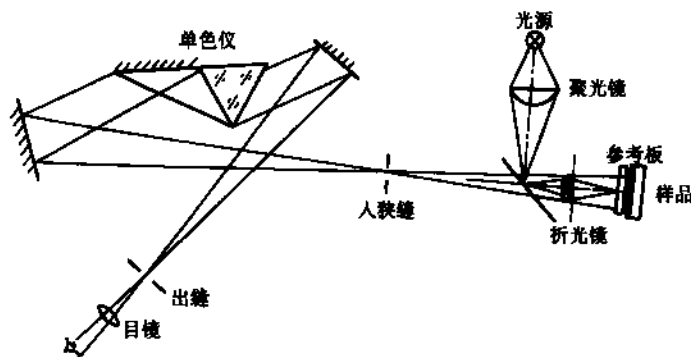


图 10-37 等色级条纹法

$$d = \frac{K}{2} \Delta\lambda \quad K = \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \quad (10-28)$$

式中 λ_1 、 λ_2 ——相邻二谱线的波长；

$\Delta\lambda$ ——第一谱线弯曲处的波长变化。

$\Delta\lambda$ 可由单色仪直接读出。等色条纹法最高精度可达 6nm。

5.2.4 分光光度计法

分光光度计法可用于测介质型薄膜厚度和薄膜工艺参数。其特点是精度高、测试速度快、

信息量大，近年来获得越来越普遍的应用。

1. 固定角反射干涉光谱仪

如图 10-33 入射光以入射角 θ 经薄膜表面和薄膜衬底界面反射后会发生干涉现象。当波长改变时，每当光线 1 与 2 的相位差为半个波长的整数倍时，反射光谱中就会出现明暗交替的干涉条纹。

如果 m 表示在波长为 λ_m 时产生条纹极大的级次的一次整数，则在发生干涉条纹最大值时，膜厚 d 和波长 λ_m 之间的关系为

$$d = \frac{m\lambda_m}{2n_1 \cos \theta_1} \quad (10-29)$$

用棱镜分光改变波长来得到周期性地相长相消的反射率 - 波长光谱响应曲线，再直接用任意两个条纹峰值按下式计算出薄膜厚度 d

$$d = \frac{k\lambda_m + \lambda_{m+k}}{2n_1 \cos \theta_1 (\lambda_m - \lambda_{m+k})} \quad (10-30)$$

2. 可变角单色条纹观测仪

利用固定入射波长改变入射角的方法来得到周期性干涉相长相消的反射率 - 波长光谱曲线，数据处理与固定角干涉仪类似，只要用任意两个条纹极值相对应的人射角度，就可以计算出薄膜厚度 d

$$d = \frac{k\lambda}{2n_1 (\cos \theta_k - \cos \theta_1)} \quad (10-31)$$

式中 k ——是从折射角 θ_1 变化到 θ_k 时观察到的条纹数。

3. 计算机化可见光分光光度计

它是在 400 ~ 800nm 波长范围内，用计算机控制的衍射光栅单色仪对样品表面经白光垂直

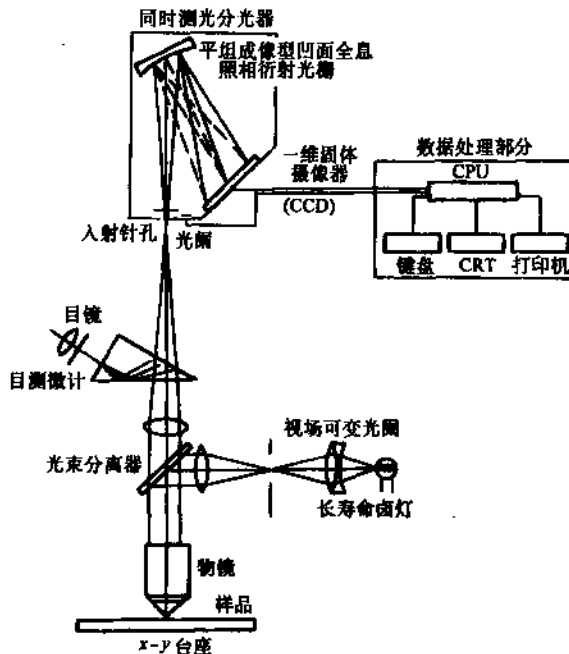


图 10-38 光学式膜厚计

入射而由衬底和它上面的介质薄膜表面分别反射而形成的干涉光谱进行扫描测量，从而得到一条有膜衬底的反射率—波长光谱曲线，并逐点用计算机算出该光谱数据相对于已存储在机内的由扫描无膜衬底的参数时，而得到的代表光源、光栅、探测器和衬底特征的一组光谱数据的比值，对此仅由波长、薄膜厚度和折射率决定的修正干涉光谱数据与理论光谱曲线进行吻合式比较分析，就能由预先设定的折射率精确决定薄膜厚度并以 0.1nm 为单位显示打印出测量结果。下面介绍几种方案：

1) 清华大学研制的光学式膜厚测量仪，其原理如图 10-38 所示，其特点是采用平坦成像型全息照相凹面衍射光栅，探测器部分采用一维 CCD 图像传感器，可同时测定整个波长的光。全息凹面照相衍射光栅是把激光干涉条纹印刷在凹面镜的感光胶片上，可以制成不等间隔的光栅，所以使光谱在同一平面成像，因此可使用 CCD 线阵图像传感器。在极短时间内可测出 1000 点以上的取样点，重复性好，总精度在 $\pm 2\%$ 以内。通过改换物镜，也可改变测定波长，直径为 $2.5\mu\text{m}$ 、 $5\mu\text{m}$ 、 $12\mu\text{m}$ 和 $50\mu\text{m}$ ，可测定 17 种材料的单层膜和双层膜 ($10 \sim 2 \times 10^4 \text{nm}$) 薄膜厚度。

2) 美国 Nanospec/AFT 可见光分光光度计，它的光路如图 10-39 所示，它的原理与日本光学式膜厚计相同，采用旋转衍射光栅，其转动由步进电动机驱动丝杠带动摆杆摆动，通过摆杆的摆动带动衍射光栅转动，用光电倍增管接收。通过改变显微镜聚焦物镜或孔径光阑的大小的办法可在最小为 $\phi 3.5 \sim \phi 5\mu\text{m}$ 范围内进行微区测量。可测量单层膜和双层透明(或半吸收)薄膜，测量范围 $10\text{nm} \sim 50\mu\text{m}$ ，其精度为 $\leq \pm 0.5\text{nm}$ ，重复性 $\pm 2\% \sim \pm 5\%$ ，光谱波长范围为 $400 \sim 800\text{nm}$ ，测量周期 15s 。

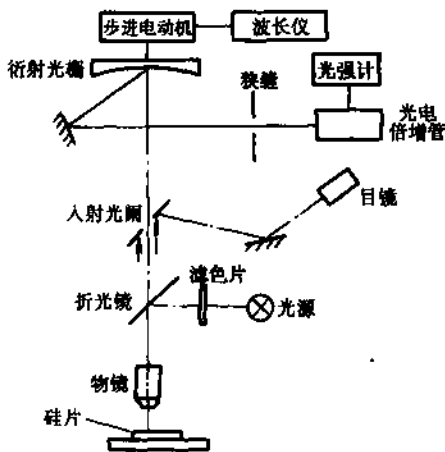


图 10-39 美国 Nanometrics 公司可见光分光光度计光路图

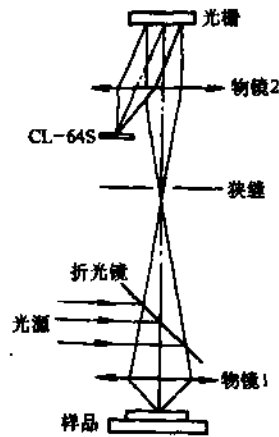


图 10-40 膜厚测试仪光路图

3) 重庆大学快速膜厚测试仪，其光学原理如图 10-40 所示，光束经折光镜、物镜后聚焦在被测透明膜上，反射后的干涉光返回物镜 1 会聚在狭缝上。由狭缝、物镜 2、光栅构成微型分光仪，衍射光照射在自扫描光电二极管阵列上，检测分光后的光谱能量分布，通过接口电路、A/D 转换和微机处理，得到被测膜厚。测量范围 $10 \sim 13000\text{nm}$ ，精度可达 $\pm 1\text{nm}$ 。

各种测量方法特点见表 10-4。

表 10-4 各种测量方法性能

方 法	精度/ μm	范围/ μm	公 式	膜 层	方便性	经济性
称量法	$\pm 1 \times 10^{-3}$	$10^{-3} \sim 10$	$d = \frac{\Delta W}{\text{面积} \times \text{密度}}$	任何膜	中等	中等
机械探针	10^{-2}	10^{-2}	直读	任何膜	方便	中等
光学计	0.2	> 0.1	直读	任何膜	方便	中等
磨角染色	0.1	> 0.1	直读	可染色膜	中等	经济
电阻法	$\pm 5\%$	$10^{-3} \sim 1$	$d \sim \frac{1}{R}$	导电膜	方便	经济
磨角电探针	0.1	> 0.1	直读	半导体膜	方便	经济
容桥法			$d = \frac{eA}{4\pi C}$	介质膜	中等	中等
比色法	$\frac{\lambda}{10}$	$5 \times 10^{-3} \sim 1$		透光膜	最方便	最经济
斜阶法	$\frac{\lambda}{10}$	$0.1 \sim 10$	$d = \frac{K\lambda}{2n}$	透光膜	方便	经济
弯度法	$\frac{\lambda}{10} \left(\frac{1}{100} \right)^{\text{D}}$	$5 \times 10^{-2} \sim 20$	$d = K \frac{\lambda}{2}$	任何膜	中等	中等
条纹对正法	10^{-2}	> 0.2	$d = m \frac{\lambda}{2}$	任何膜	中等	中等
等色条纹	6×10^{-4}	$10^{-3} \sim 0.1$	$d = \frac{\Delta\lambda}{2} \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2}$	任何膜	中等	中等
精度法	5×10^{-4}	$5 \sim 28 \times 10^{-2}$	查表	透光膜	中等	昂贵
偏光干涉	10^{-3}	$10^{-3} \sim 1$		任何膜	中等	昂贵
内标法	5×10^{-4}	$5 \times 10^{-4} \sim 0.1$	$d = \frac{a+b}{1964}$	任何膜	中等	中等
扫描电镜	10^{-2}	$10^{-3} \sim 20$	$d = \frac{\text{屏上条宽}}{\text{放大倍数}}$	任何膜	方便	昂贵
全息法	$< 10^{-2}$	$10^{-2} \sim 20$		任何膜	较繁	昂贵
俄歇电子法	10^{-4}	10^{-4}		任何膜	方便	昂贵
X光法	10^{-4}	$< 2 \times 10^{-3}$		任何膜	方便	昂贵

① 为多光束干涉法。

第 11 章 微位移技术

1 概述

近年来,随着微电子技术、宇航、生物工程等学科的发展,对精密机械的精度要求越来越高,要求精密机械和检测设备具有亚微米甚至纳米精度。例如,用金刚石车刀直接车削大型天文望远镜的抛物面反射镜时,要求加工出几何精度高于 1/10 光波波长的表面,即几何形状误差小于 $0.05\mu\text{m}$;计算机外围设备中大容量磁鼓和磁盘的制造,为保证磁头与磁盘在工作过程中维持 $1\mu\text{m}$ 内的浮动间隙,就必须严格控制磁盘或磁鼓在高速回转下的跳动;大规模集成电路其发展速度惊人,目前线条宽度已达到亚微米级,对与之相应的工艺设备的精度,要求亚微米甚至是纳米级等等。

微位移技术是精密机械和仪器实现高精度的关键技术之一。近年来得到迅速发展,广泛应用于宇航、机械、微电子领域,成为现代机械工业的基础。表 11-1 列举了目前国内外应用微位移技术的应用实例。

表 11-1 亚微米级微位移技术

国别	厂 家	导轨形式	驱动方式	行程	分辨力 / μm	位移精度 / μm	自由度	应用设备
美国	HP 公司	滚 珠			0.008	0.016	x-y	电子束曝光机
	NBS	柔性支承	压 电	50 μm	0.001		1	
	Micronix	柔性支承	压 电		0.02		6	X 射线曝光机
	GCA	弹性导轨	直线电动机		0.03		x-y	图形发生器
	BIL	气浮导轨	静摩擦力			0.1	x-y	分步重复照相机
	Yosemite	滚动导轨	伺服电动机	100mm	0.01	± 0.01	x-y	电子束曝光机
	Burleigh	滚动导轨	压电尺量	25mm	0.01		1, 2, 3, 4	
日本	日立制作所	柔性支承	压 电	$\pm 8\mu\text{m}$		± 0.05	x-y	电子束曝光机
	东北大学	弹性导轨	电 磁			0.1	x-y	图形发生器
	武藏野	弹性导轨	电 磁	$\pm 20\mu\text{m}$	0.01		4	X 射线曝光机
		弹性导轨	电磁、压电	$\pm 20\mu\text{m}$	0.03	0.1	6	X 射线曝光机
	富士通	气浮导轨	模块、丝杠	2mm	0.03		x-y	掩膜对准台
中国	上海电气科学研究所	滚珠导轨	压 电	$\pm 6.4\mu\text{m}$	0.08		y	图形发生器
	电子工业部 45 所	弹性导轨	电致伸缩	20 μm	0.08		z-y	分步重复照相机
	国防科技大学	柔性支承	电致伸缩	20 μm	0.1		1	车床微进给
	哈尔滨工业大学	柔性支承	步进电动机	20 μm	0.01	± 0.05	1	车床微进给
	清华大学	滚珠导轨	模块、丝杠	300 μm	0.05	± 0.25	x-y- θ	投影光刻机
		弹性导轨	弹性缩小	10 μm	0.01	± 0.2	x-y	
		滚珠导轨	压 电	2 μm	0.16		y	自动分步相机

1.1 微位移机构的分类

微位移技术包括微位移机构、检测装置和控制系统三部分组成,如图 11-1 所示。微位移

机构是指行程小、灵敏度和精度高的机构。



图 11-1 微位移技术的组成

微位移机构由微位移驱动器和微动工作台组成。根据微位移驱动器和微动工作台导轨形式可分为五类：

- 1) 柔性支承，压电晶体或电致伸缩微位移器驱动。
- 2) 滚动导轨，压电晶体或电致伸缩微位移器驱动。
- 3) 平行弹性导轨，电磁、压电或机械式驱动。
- 4) 滑动导轨，机械式或压电式驱动。
- 5) 气浮导轨，伺服电动机或直线电动机驱动。

根据形成微位移的机理，微位移器可分为机械式和机电式两类。其类别和机构原理如图 11-2 和图 11-3 所示。

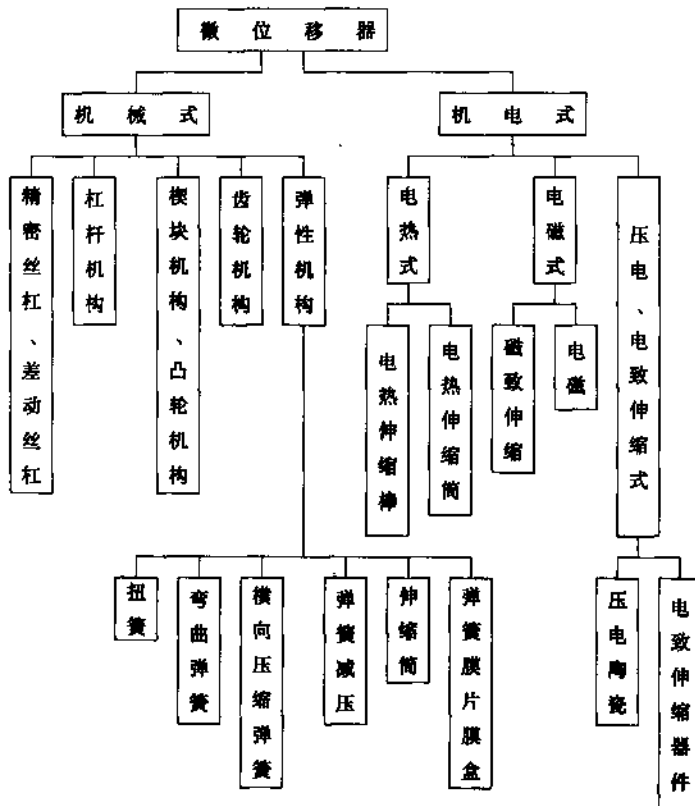


图 11-2 微位移器的分类

1.2 微位移系统的应用

微位移系统在精密机械和仪器中主要用于提高运动的灵敏度和精度。随科学技术的进步，对设备精度要求越来越高，微位移技术就应用越来越广泛。根据目前实际应用的范围，大致可分为三个方面：

- (1) 精度补偿 精密工作台是高精度仪器和设备的核心，它的性能的优劣直接影响整机的

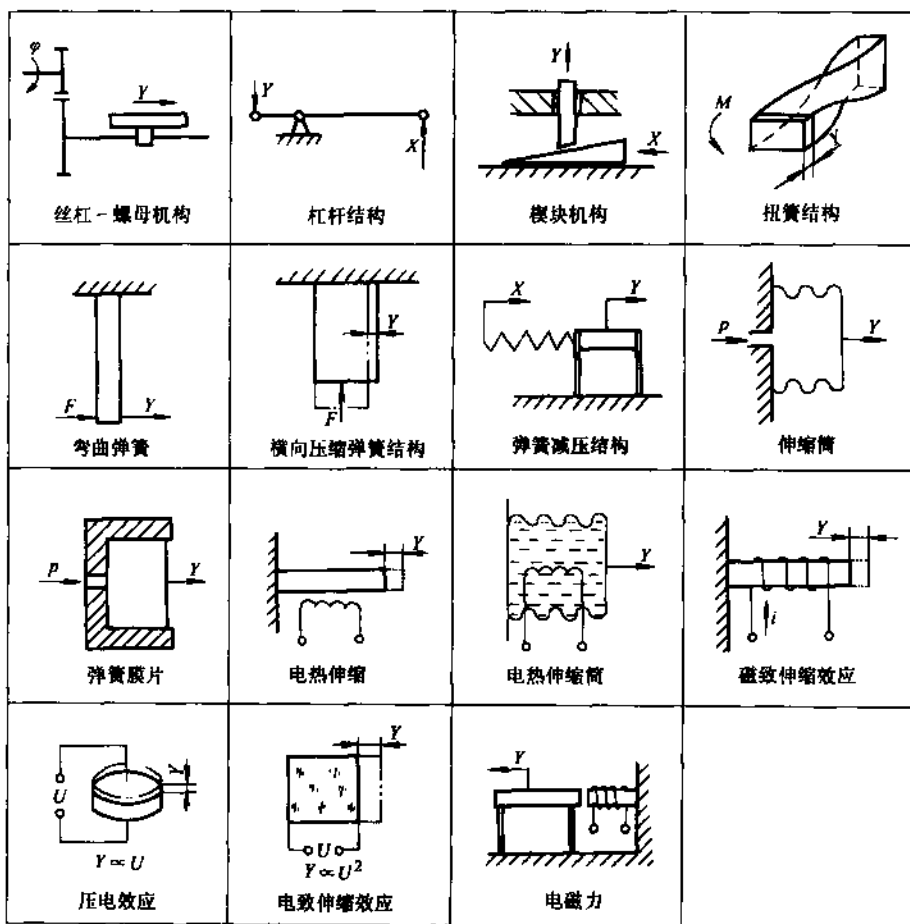


图 11-3 微位移器类别原理图

精度。当今社会，效率问题成为衡量设备先进性重要指标之一，因此，先进的设备和仪器中的运动部件，向高速度、高精度发展，以提高设备的工作效率。但是，高速度带来运动惯量较大，很难实现高精度。例如精密工作台运动速度已从 20mm/s 提高到 50mm/s，先进国家已达 100mm/s，这种高速运动的工作台，欲实现亚微米级的定位精度，是很困难的。为解决高速度和高精度的矛盾，通常采用粗、精结合的方法来实现。如图 11-4a 所示。在粗动工作台上加一个精动工作台，粗动工作台实现高速度、大行程，精动工作台实现微动，完成精密定位中的补偿，以达到预期的精度。这个精动工作台就是由微位移系统实现的。

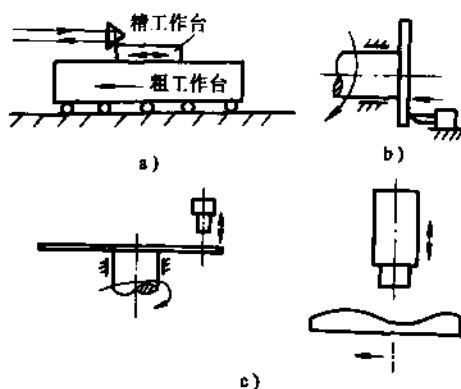


图 11-4 微位移技术的应用

a) 补偿 b) 微进给 c) 微调

(2) 微进给 在精密加工中，为了提高加工质量，往往采用微量进给运动，例如，超光滑表面的精加工，要求每次进给量为微米级，这是一般机械所难于达到的，用微位移机构很容易

实现,如图 11-4b 所示。

(3) 微调 微调是精密机械中经常遇到的难题,实现高精度、准确可靠的微调,是保证机构调整到正确位置的关键,特别是动态实时调整,难度很大。例如图 11-4c 所示,左图是磁头与磁盘浮动间隙的实时调整,由于磁盘在转动中,主轴晃动等因素造成磁头与磁盘之间的间隙变化,而造成获取的信息不真实;右图表示照相物镜和照相干版之间的间隙调整,由于干版本身表面不平,随工作台运动中,造成物镜离焦,而失去清晰的图像等等。为解决微调的问题只有采用微位移系统实现。

2 微位移机构的原理

2.1 压电、电致伸缩器件

压电、电致伸缩器件是近年来发展起来的新型微位移器件。它具有体积小、结构紧凑、分辨率高、控制简便等优点,同时它没有发热问题,故对精密机械系统无因发热而引起的附加误差。用这种器件制成微位移系统,容易实现精度为 $0.01\mu\text{m}$ 的超精密定位,是理想的微位移驱动器,在精密机械中得到了广泛应用。

2.1.1 压电与电致伸缩效应——机电耦合效应

电介质在电场的作用下,产生两种效应:压电效应和电致伸缩效应,统称机电耦合效应。

电致伸缩效应——电介质在外界电场的作用下,由于感应极化作用而引起应变,应变与电场方向无关,应变的大小与电场平方成正比。

逆压电效应——电介质在外界电场的作用下,产生应变,应变的大小与电场成正比,应变的方向与施加电场方向有关。

电介质在外加电场作用下,应变与电场的关系为

$$\epsilon = dE + ME^2 \quad (11-1)$$

式中 ϵ ——应变;

dE ——逆压电效应;

d ——压电系数(m/V);

E ——电场(V/m);

ME^2 ——电致伸缩效应;

M ——电致伸缩系数(m^2/V^2)。

逆压电效应仅在无对称中心晶体中才有,而电致伸缩效应则所有的电介质晶体中都存在,但是一般都比较微弱。压电单晶体如石英、罗息盐等的压电系数比电致伸缩系数大几个数量级,在低于 $1\text{MV}/\text{m}$ 的电场作用下,只有逆压电效应。

2.1.2 材料

(1) 压电晶体 压电晶体常用的材料是锆钛酸铅和钛酸钡。由钛酸铅和锆酸铅组成的多晶固溶体,称为锆钛酸铅压电陶瓷,代号为 PZT (P——铅,Z——锆,T——钛)。其特点为

- 1) 灵敏度高,可达 $1.4 \sim 1.7\text{nm}/(\text{V}\cdot\text{cm})$,输出功率大。
- 2) 机电耦合系数大,故机电换能效率高。
- 3) 机械品质因数高。
- 4) 材料性能稳定,老化性能在五年内 $< 0.2\%$ 。
- 5) 居里温度高,可达 300°C ,可作高温压电元件,应用温度范围宽 $-40 \sim 300^\circ\text{C}$ 之间

6) 变形量小, 即使加高电压, 总的变形也很小。

国产压电陶瓷及主要性能指标见表 11-2。

表 11-2 国内部分高压电系数的压电陶瓷材料及其主要技术参数

材料型号	机电耦合系数		介电系数 ϵ_{33}/ϵ_0	压电系数		杨氏模量 Y_{11} (10^9N/m^2)	介质损耗角 $\text{tg}\delta$	生产厂
	K_{31}	K_{33}		d_{31} (10^{-12}C/N)	d_{33} (10^{-12}C/N)			
P(ZT)-S	0.360	0.725	2300	186	650	60	1.9%	淄博无线电瓷件厂
P(ZTMN)	0.375	0.712	4000	270	700	55	1.8%	
P(ZTSN)-4	0.328	0.690	1500	160	550	61	1.9%	
S_1	0.372	0.712	3500	270	750	68	1.3%	上海玩具元件一分厂
S_2	0.369	0.642	2140	175	400	73	1.6%	
S_3	0.347	0.740	1550	170	560	62	1.9%	
S_4			3120	265	800	62	1.7%	
S_5	0.308		4000	290	800	62	2.7%	

(2) 电致伸缩材料 电致伸缩材料最早是 PMN 铌镁酸铅系。1977 年美国 L. E. Cross 教授研究出具有大电致伸缩效应的弛豫铁电体, 组分: 0.9PMN-0.1PT, 它的居里点在 0°C 附近。1981 年又开发出三元系固溶体 0.45PMN-0.36PT-0.19BZN 的双弛豫铁电体, 它具有良好的温度稳定性及大电致伸缩效应, 它的介电常数、横向应变特性曲线如图 11-5 所示。PMN 是由 PbO 、 MgO 、 Nb_2O_5 、 TiO_2 、 BaCO_3 、 ZrO 等按比例烧结而成。1981 年我国 1426 所研制成 La: PZT 其特性曲线如图 11-6 所示。

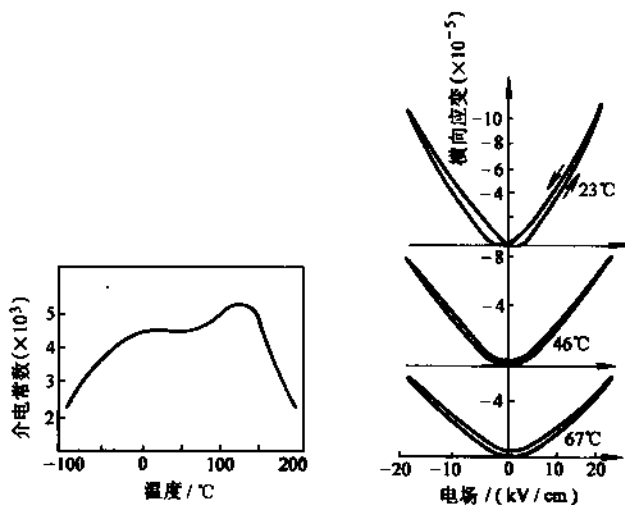


图 11-5 0.45PMN-0.36PT-0.19BZN 的介电常数、横向应变

电致伸缩材料按扩散相变的起因分成两类:

1) 无序型晶体

① 由附加非铁电组分引起介电弛豫, 如 Ba: PZT。

② 由晶格空位引起介电弛豫, 如 $\text{PbLa}\square(\text{ZrTi})\text{O}_3$ 。

2) 短程有序晶体 由阳离子有序结构引起的介电弛豫, 如 $\text{Pb}(\text{Mg}_{2/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ 。

表 11-3 列出了 PMN 系与 La: PZT 系几个典型组分的电致伸缩性能。

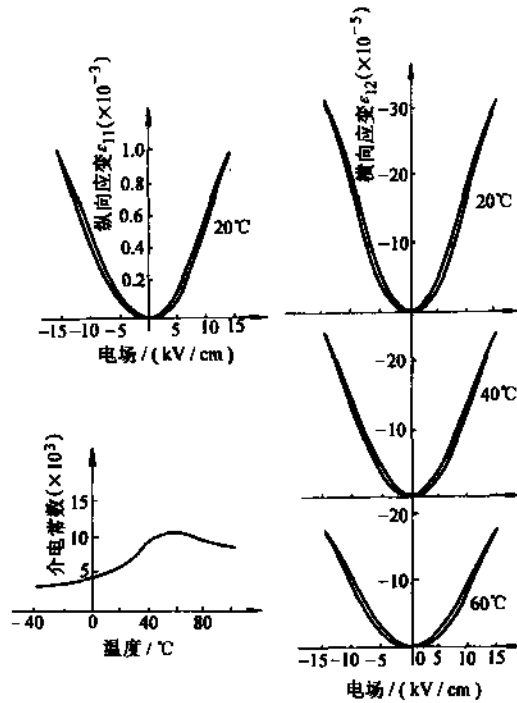


图 11-6 La: PZT-481 的介电常数横向、纵向应变

表 11-3 几个典型组分的电致伸缩性能

组 分	电致伸缩系数 $M_{33} \times 10^{-16} / \text{m}^2 \text{V}^{-2}$	电致伸缩温度系数 $(\Delta \alpha / (\Delta T \alpha)) \times 100\% / \text{°C}^{-1}$
PMN	0.31	1.38
0.9PMN-0.1PT	6.0	2.28
0.45PMN-0.35PT-0.2BZN	0.45	0.91
La: PZT-481B	4.5	1.0
La: PZT-481A	6.0	0.72
La: PZT-481A-Q	5.5	0.90

注: $M_{33} = \alpha_{33} / E^2$, $\Delta \alpha / (\Delta T \alpha) = [\alpha(0^\circ\text{C}) - \alpha(50^\circ\text{C})] / [50^\circ\text{C} \cdot \alpha(25^\circ\text{C})]$ 。

2.1.3 压电、电致伸缩器件

(1) 压电微位移器件 用压电陶瓷作为微位移器件目前已得到广泛的应用, 如激光稳频, 精密工作台的精度微动补偿、精密机械加工中的微进给等。

用于精密微位移的压电器件, 应满足下列要求:

- 1) 压电灵敏度高, 即单位电压变形大。
- 2) 行程大, 电压—变形曲线重复性好。
- 3) 体积小, 稳定性好、不老化。

由式(11-1)可见, 当无电致伸缩效应时, ($ME^2 = 0$), 那么压电系数为

$$d = \frac{\epsilon}{E} = \frac{\Delta l}{l U} \quad (11-2)$$

式中 U ——外界施加的电压(V);

b ——压电陶瓷的厚度(m);

l 、 Δl ——压电陶瓷所用方向长度和施加电压后的变形量(m)。所以

$$\Delta l = \frac{l}{b} U d \quad (11-3)$$

压电陶瓷的主要缺点是变形量小，即在压电陶瓷上施加较高的电压时，仍然获得的行程很小。所以在设计微位移器件时，应尽量提高压电陶瓷的变形量，以满足设计的要求。

由式(11-3)可见，提高微位移行程的措施可从以下几个方面考虑：

1) 增加压电陶瓷的长度和提高施加的电压，这是常用的方法，但增加长度会使结构增大，提高电压会造成使用不便。例如，壁厚2mm的PZT圆筒形压电陶瓷，当 $U = 1000V$ 时， $\Delta l = 4\mu m$ ，其长度 $l > 30mm$ ，可见这种方法是不理想的。

2) 减少压电陶瓷的厚度，可使变形量增加，但是减少压电陶瓷的厚度，会使机械强度下降，如果是承受较大的轴向载荷时，可能会破坏器件，在设计时应兼顾机械强度。

3) 不同的材料压电系数不同，可根据需要选择不同的材料。

4) 压电晶体在不同的方向施加电压，压电系数不同。 d_{31} 是在与极化方向垂直的方向产生的应变与在极化方向上所加电场强度之比，而 d_{33} 是在极化方向上产生的应变与在该方向上所加电场强度之比。从各种压电陶瓷的数据来看，一般 d_{33} 是 d_{31} 的2~3倍，因此在设计时，注意选择压电系数。

5) 采用压电堆，提高变形量。

由式(11-3)，当 $b = l$ 时：

$$\Delta l = U d_{33} \quad (11-4)$$

可见压电陶瓷的变形量与厚度无关，故我们可以选取较小的厚度，为获取大的变形量，可采用多块压电陶瓷组成压电堆，正负极按并联连接，则总的变形量为

$$\Delta L = n \Delta l \quad (11-5)$$

式中 n ——压电堆所包含单块压电晶体块数。

图11-7所示，外形尺寸相同的圆筒，其中图a是单件，图b是压电堆，施加相同电压时在轴向的变形量相差很大。

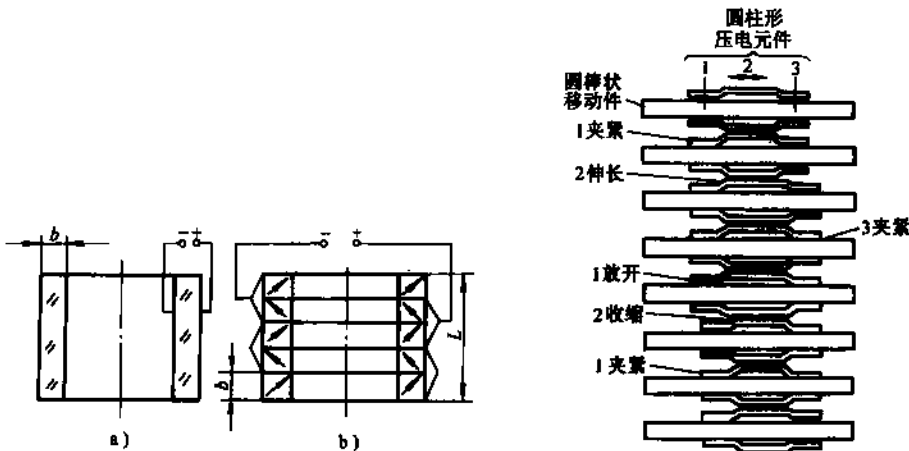


图 11-7 单块压电陶瓷与压电堆

a) 单块压电陶瓷 b) 压电堆

图 11-8 尺蠖机构原理

6) 为解决压电陶瓷器件移动范围窄的问题, 美国 BI 公司研制成由三个压电元件组成的尺蠖机构, 它具有很高的位移分辨率($0.02\mu\text{m}$), 行程范围大($>25\text{mm}$), 移动速度为 $0.01 \sim 0.5\text{mm/s}$ 。其原理如图 11-8 所示, 三个压电陶瓷机械式串联在一起, 压电陶瓷 1、3 与轴的间隙几乎为零, 加电压后径向变形与轴抱紧成一体, 不加电压时与轴脱开, 可以与轴相对移动; 压电陶瓷 2 与轴之间的间隙大, 加电压之后轴向变形。只要按一定频率顺序在三个晶体上加电压, 就能使器件在轴上步步移动。开始三个晶体与轴脱开, 在 1 上加电压后, 压电陶瓷 1 与轴夹紧, 后在压电陶瓷 2 上加电压, 使压电陶瓷 2 沿轴向伸长(或缩短), 同时压电陶瓷 3 也随压电陶瓷 2 移动一步, 随后在压电陶瓷 3 上加电压, 陶瓷 3 与轴夹紧; 再去掉压电陶瓷 1 上的电压, 使压电陶瓷 1 收缩与轴脱开, 去掉压电陶瓷 2 上的电压, 使之收缩(或伸长), 之后再在压电陶瓷 1 上加电压, 使之与轴夹紧, 去掉压电陶瓷 3 上的电压, 使之与轴脱开, 这样器件相对于轴就移动了一步, 如此循环, 达到预定的行程。改变加在三个压电陶瓷上的电压频率, 就可以获得不同的移动速度。

尺蠖机构有两种结构形式: 爬行式尺蠖机构和蠕动式尺蠖机构。

① 爬行式尺蠖机构 尺蠖机构随主轴一起沿导轨作步进运动, 如图 11-9a 所示。其特点是结构简单、运动易实现, 特别是平面导轨加工制造容易; 缺点是机构体积大(与行程成正比), 机构刚性差, 导向性不好, 引线不方便。

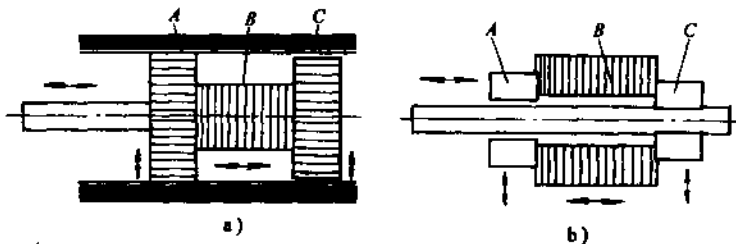


图 11-9 尺蠖机构两种形式

a) 爬行式尺蠖机构 b) 蠕动式尺蠖机构

② 蠕动式尺蠖机构 尺蠖机构推动主轴作步进运动, 如图 11-9b 所示。其特点是体积小、结构紧凑, 行程只受中间主轴长度限制, 结构刚性好。缺点是要求两夹紧钳位装置具有大的轴向/径向刚度比, 并且能对称抱紧中间主轴。否则会加剧两轴承套与主轴之间的磨损, 并增加主轴的运动阻力。

(2) 电致伸缩器件 电致伸缩器件最早是 1977 年由美国 Cross 等人研制成功的。把 PZT5 或 PMN 材料制成 $\phi 25.4\text{mm}$ 厚度为 2mm 的圆片 10 片叠加起来, 如图 11-10a 所示。外加 2.9kV 电压可获得 $13\mu\text{m}$ 的变形量, 分辨力为 1nm 。

我国 1426 所 80 年代研制成 PMN 的 PZT: La 电致伸缩微位移器——WTDS 型。优点是工作电压低、位移量大、分辨力高。 45mm 长的器件外加 300V 的电压, 可产生 $25\mu\text{m}$ 的位移量, 分辨力 $0.08\mu\text{m/V}$, 推力 $>100\text{N}$ 。其外形和特性曲线如图 11-10b、c 所示。特点是: 再现性好, 没有剩余变形和老化现象、迟滞现象小。

电致伸缩弛豫型铁电体在以下方面比普通的压电陶瓷更优越:

- 1) 电致伸缩效应大、应变大。
- 2) 位置重复性(再现性)好。
- 3) 不需要极化。

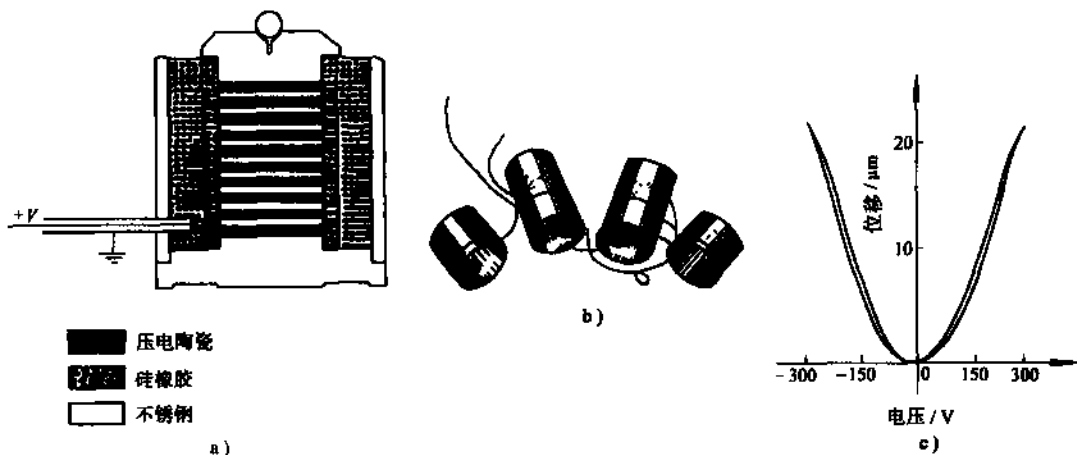


图 11-10 电致伸缩微位移器
a) 工作原理 b) 外形 c) 特性曲线

- 4) 不老化。
5) 热膨胀系数很低。

WTDS-II 型微位移器的主要技术指标, 见表 11-4。

表 11-4 WTDS-I 型微位移器

驱动电压	最大位移	回零位移再现性	荷重	外形尺寸/mm
0~300V	>10 μ m	$\leq 0.10\mu$ m	200N	$\phi 32 \times 21$

电致伸缩器件的传递函数如图 11-11 所示模型。电致伸缩器件有的电容量约 $2\mu\text{F}$, 因此加电压达到稳态会产生过渡过程。在单位阶跃电压输入作用下, 微位移器的位移输出响应为

$$y(t) = K_m (1 - 2e^{-t/T_m'} + e^{-2t/T_m'}) \quad (11-6)$$

$$T_m' = RC$$

式中 R ——微位移器等效电阻;
 C ——微位移器的等效电容;
 K_m ——微位移器的电压位移转换系数。

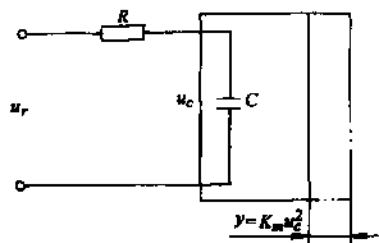


图 11-11 电致伸缩微位移器简化模型

2.1.4 驱动电源

(1) 对微位移器驱动电源的要求 微位移器实质是在外界电场的作用下, 机电耦合作用产生位移的器件。为了在较低的驱动电压下获得较大的位移, 通常是由多片叠加而成。这些薄片在机械上串联, 在电学上并联。对外加控制电压来说, 微位移器件是一个容性负载。对驱动电源应满足下列要求:

- 1) 为保证微进给机构的定位和运动控制精度, 驱动电源应具有微机控制功能。
- 2) 输出电压能连续可调。
- 3) 输出电压稳定、电压波纹应小于毫伏级;
- 4) 驱动电源的最大输出电流不小于 500mA, 以保证控制的响应速度。

5) 驱动电源电路中应具有供微位移器件的速放电回路。

(2) 驱动电源 目前, 尚无专用厂家生产的产品, 推荐哈尔滨工业大学机器人研究室 PD-III 型驱动电源。其技术指标如表 11-5 所示。

表 11-5 PD-III 型驱动电源主要性能

电压范围	电压漂移	响应频率	分辨力	控制方式
0~300V	$< 10^{-4} \text{V/8h}$	$> 500\text{Hz}$	12 位 D/A	手动数字控制/程序控制

2.2 电磁驱动器件

电磁驱动微动工作台首先由日本应用于电子束曝光机中, 成为微位移的一种新的方法。

2.2.1 电磁驱动原理

电磁驱动微动工作台的原理如图 11-12 所示。把微动工作台 1 用四根铰链或金属丝 4 悬挂起来, 工作台用弹簧 3 固定, 另外两端放置电磁铁 2。

工作台位移量 $|\Delta d|$ 与电磁密度的关系为

$$|\Delta d| = \frac{B^2 S}{2\mu\alpha g} \quad (11-7)$$

式中 B ——电磁场磁通密度 (Wb/m^2);

μ ——磁导率 (H/m);

S ——磁极面积 (m^2);

α ——弹簧常数 (kg/m);

Δd ——工作台位移量 (m);

g ——常数, $g = 9.8 \text{N/kg}$ 。

通过线圈的电流与磁通密度的关系为

$$B = NI \left(\frac{1}{d'/\mu + l/\mu_0} \right) \quad (11-8)$$

式中 N ——线圈匝数;

I ——电流强度;

d' ——空气气隙长度 (m);

l ——磁路长度 (m);

μ ——空气间隙的磁导率 (H/m);

μ_0 ——磁性材料的磁导率 (H/m)。

将式(11-7)代入式(11-8)得:

$$|\Delta d| = (NI)^2 \left(\frac{1}{d'/\mu + l/\mu_0} \right)^2 \frac{S}{2\mu\alpha g} \quad (11-9)$$

当磁性材料的磁导率比空气隙磁导率大得多时, 即 $\mu_0 \gg \mu$, 则上式可简化为

$$|\Delta d| = \frac{S\mu (NI)^2}{2d'^2 g\alpha} \quad (11-10)$$

可见, 工作台位移量与电流强度的平方成正比

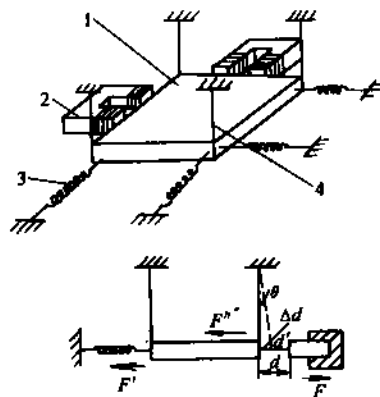


图 11-12 电磁驱动原理

2.2.2 位置控制范围

(1) 工作台与电磁铁相撞条件 由式(11-10)可见, 工作台被电磁铁吸力吸引而移动, 而移动距离是与电流的平方成正比, 也就是说当电流逐渐增大时, 气隙就越来越小, 而磁通量增大吸引力显著增大。当达到某一临界值时, 工作台会突然与电磁铁发生碰撞, 相撞的条件为

$$-\frac{\partial d}{\partial I} = \infty$$

由式(11-10)得

$$I = \frac{d - |\Delta d|}{N} \sqrt{\frac{2g\alpha |\Delta d|}{S\mu}} \quad (11-11)$$

式中 $d' = d - |\Delta d|$;

d ——初始间隙长度。

$$\text{则} \quad \frac{\partial I}{\partial |\Delta d|} = \frac{1}{N} \sqrt{\frac{2g\alpha}{S\mu}} \frac{\partial [\sqrt{|\Delta d|(d - \Delta d)}]}{\partial |\Delta d|} = 0 \quad (11-12)$$

解上式, 得

$$\Delta d_{\max} = \frac{d}{3} \quad (11-13)$$

当微动工作台位移达到原始间隙的 1/3 时, 会发生相撞而不能运动。

电磁驱动的微动工作台, 未采取措施条件下, 其位移控制范围, 只能在小于三分之一的原始间隙下工作。

(2) 磁饱和条件下的定位控制范围 在磁饱和条件下, 磁路阻力比气隙阻力大得多。因此, 磁阻 l/μ_0 不能忽略, 在磁饱和开始时的磁通量大小为

$$B'_{\max} = \frac{2d}{9} \sqrt{\frac{6g\alpha d}{S\mu}} \left[\frac{1}{\frac{2d}{3\mu} + \frac{l}{\mu_0}} \right] \quad (11-14)$$

当产生磁饱和时, 整个磁性物质的长度等于气隙长度 $d - |\Delta d_{\max}| = \frac{2}{3}d$, 这时磁通量和电流强度几乎成线性关系, 可扩大定位范围。

2.2.3 设计中应考虑的几个问题

(1) 精度、稳定速度和气隙的关系 微动工作台位置精度是设计时的重要指标, 如果达不到设计精度, 微动工作台就失去作用。

当不考虑磁饱和特性时, 随精度和定位范围的确定, 则稳定速度和气隙的长度也就确定了。由式(11-11)可得到移动距离的变化量与电流的变化量之比为

$$\frac{\partial |\Delta d|}{\partial I} = N \sqrt{\frac{S\mu}{2g\alpha}} \left(\frac{2\sqrt{|\Delta d|}}{d - 3|\Delta d|} \right)$$

电流变化速度为 $\Delta I = 1/A$, A ——常数, 设计精度为 K , 则

$$\Delta I \frac{\partial |\Delta d|}{\partial I} = \frac{1}{A} N \sqrt{\frac{S\mu}{2g\alpha}} \left(\frac{2\sqrt{|\Delta d|}}{d - 3|\Delta d|} \right) < K$$

那么电流变化速度 $1/A$ 、初始间隙 d 、气隙变化量(位移量) $|\Delta d|$ 与精度 K 之间的关系为

$$\frac{1}{A} \frac{2|\Delta d|(d - |\Delta d|)}{d - 3|\Delta d|} < K \quad (11-15)$$

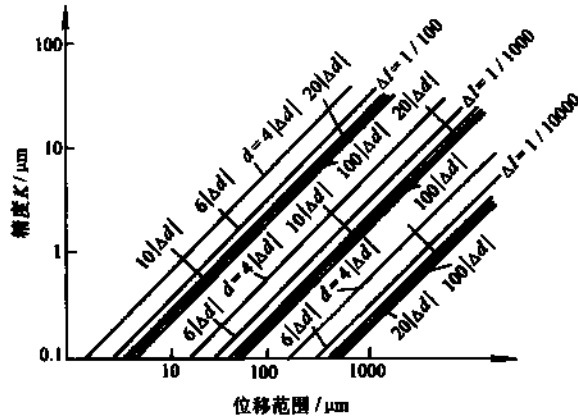


图 11-13 电流变化速度和气隙之间的关系

电流变化速度 $1/A$ 和气隙变化量 $|\Delta d|$ 与精度之间的关系如图 11-13 所示。 $|\Delta d|$ 在 $1\mu\text{m} \sim 10\text{mm}$ 间时, 精度 K 为 $0.1 \sim 10\mu\text{m}$ 。为提高精度, 应采用较高的电流变化精度。

(2) 扩大定位范围的措施 为适应某些微动工作台大行程的要求, 在设计时, 可采取下列措施:

1) 磁饱和 如上所述, 在 $d'/\mu \gg 1/\mu_0$ 条件下, 电磁铁的吸引力与电流强度的平方成正比。采用磁饱和时, 上述条件转化为 $d'/\mu \ll 1/\mu_0$, 磁通密度 B 与电流的关系变弱, 电磁铁的吸引力将正比于电流的“次平方”(即低于平方)。为防止相撞, 在设计时, 在初始间隙长度的 $1/3$ 处发生磁饱和。相反, 为改善精度或扩大定位范围, 在设计时可在任何气隙长度上发生磁饱和。

2) 磁泄漏 如图 11-14 所示的磁泄漏装置。当电流—电磁力增大时, 磁极吸引工作台使其间隙变小, 则磁极磁阻减小, 结果磁通增大, 使磁饱和和磁盘里的磁通量饱和, 其磁阻和通过磁化极的磁泄漏增大。结果, 无论电流增大多少, 只有通过磁极的磁泄漏增加, 而吸引工作台的磁通量

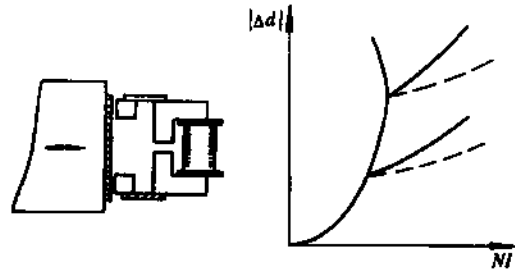


图 11-14 磁泄漏装置与移动距离, 电流的关系

不会增加多少, 力学特性得到了调节, 避免发生相撞, 从而扩大了定位范围。

2.2.4 应用实例

(1) $x-y$ 两维工作台 图 11-15 为 $x-y$ 两维工作台, 用于电子束曝光机。其技术指标如下:

设计精度	$K = 5 \times 10^{-6} \text{m}$
最大行程	$\Delta d_{\text{max}} = 7.5 \times 10^{-3} \text{m}$
定位范围	$\Delta d = 2.5 \times 10^{-4} \text{m}$
悬挂金属丝长度	$L = 3 \times 10^{-1} \text{m}$
弹性常数	$a = 2.8 \times 10^2 \text{kg/m} \times 2$
工作台重量	$m = 83.7 \text{kg}$
电磁铁	U 形
磁性物质	纯铁
	$\mu_0 = 300 \sim 800$

磁饱和密度	$B = 2\text{Wb/m}$
磁性物质长度	$l = 0.5\text{m}$
线圈匝数	$N = 728$ 匝
磁性面积	$S = 5 \times 10^{-2} \times 5 \times 10^{-2}\text{m}^2$
电流变化率	$1/A = 1/100$

(2) 一维微动机构 图 11-16 所示是用于显微镜自动调焦中的微动机构, 它采用环形电磁铁, 用碟形弹簧支承。当电磁铁中的线圈有电流通过时, 产生磁力, 吸引安装在套筒上的环套, 带动显微物镜移动, 实现自动调焦的微动。

设计指标

调焦范围	$\pm 100\mu\text{m}$	精度	$K = \pm 1\mu\text{m}$
	$\pm 10\mu\text{m}$		$K = \pm 0.2\mu\text{m}$
位移分辨力	$0.1\mu\text{m}$		
最大初始间隙	$800\mu\text{m}$		
电磁铁	环形		
磁性物质	纯铁		
磁性物质长度	450mm		
磁性面积	1046mm^2		
线圈匝数	400 匝		
电流变化率	$1/A = 1/100, 1/1000$		
重量	$< 1\text{kg}$		

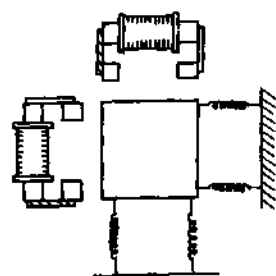


图 11-15 x-y 二维工作台原理图

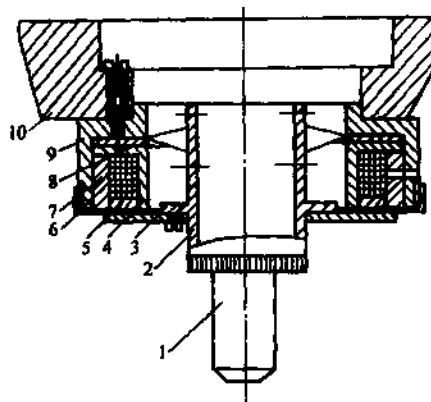


图 11-16 一维工作台结构图

1—物镜 2—套筒 3—联接板 4—钢架 5—压圈
6—线圈 7—外环 8—碟形弹簧
9—外支座 10—联接件

2.3 电热式微位移机构

电热式微位机构包括电热伸缩棒和电热伸缩筒两种结构形式, 都是利用物体的热膨胀原理来实现微位移的。

(1) 电热式微位移机构的原理 电热式微位移机构的原理如图 11-17 所示。传动杆 1 的一端固定在支架上, 另一端固定在沿导轨作微动的运动件 3 上, 当线圈 2 通电后, 产生热量, 使传动杆受热伸长, 其伸长量 ΔL 为

$$\Delta L = \alpha L (t_1 - t_0) \quad (11-16)$$

式中 α ——传动杆材料的线胀系数;

L ——传动杆的长度;

t_1 、 t_0 ——被加热达到的温度和加热前的温度。

例如, 钢的线胀系数为 12×10^{-6} , 当长度为 50mm 的钢棒, 从 20°C 加热到 60°C 时, 可获得从 $0 \sim 24\mu\text{m}$ 的位移量。

当传动杆由于受热变形伸长而产生的力大于导轨副中的静摩擦阻力时, 运动件 3 开始移动, 理想的情况是传动件的伸长量等于运动件的位移量。但是, 由于导轨副摩擦力存在, 其摩擦特性与位移速度、运动件的质量、系统的阻尼等因素有关, 往往达不到理想的状况, 运动

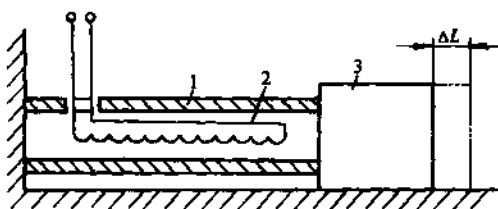


图 11-17 电热式微位移机构的原理

1—传动杆 2—线圈 3—运动件

件的实际位移量为

$$S = \Delta L \pm \frac{c}{K} \quad (11-17)$$

式中 c ——与摩擦阻力、位移速度和系统阻尼有关的系数；

K ——与传动件材料的弹性模量(E)、单位长度截面面积(A/L)有关的系数, $K = EA/L$ 。

位移的相对误差为:

$$\Delta = \frac{S - \Delta L}{\Delta L} = \pm \frac{c}{EA\alpha\Delta t} \quad (11-18)$$

由式(11-18)可见,为减小位移的相对误差,应选择线胀系数和弹性模量较高的材料制成传动杆。

(2) 电热式微位移机构的特点 电热式微位移机构的特点如下:

- 1) 结构简单、操作控制方便。
- 2) 位移精度受热交换的影响、精度低。
- 3) 存在热惯性,不适于作高速位移机构。

(3) 电热式微位移机构的实例 图 11-18 所示是电热式微位移机构中的一种形式。变压器 1 的电压通过杆 2 施加在传动杆 3 上,使其受热膨胀,传动杆 3 左端固定在不动支架 4 上,可向右自由伸长,推动工作台 5 沿导轨 6 运动。为使传动杆 3 快速冷却以实现快速退回,在管道 7 中通入冷却水(或乳化液),使其冷却恢复到原来的位置。杆 2 与杆 3 用黄铜制成,传动杆 3 的端部与工作台之间应绝缘。如采用高频感应加热,实现间断供热,可实现间断小脉冲位移。

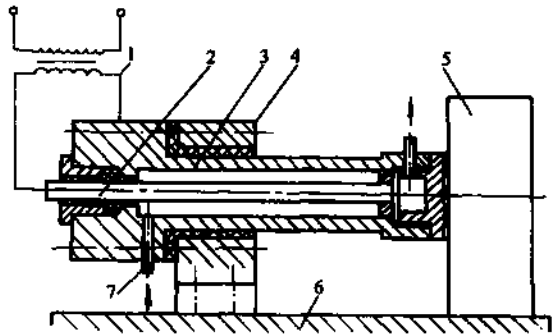


图 11-18 电热式微位移机构

1—变压器 2—杆 3—传动杆 4—支架
5—工作台 6—导轨 7—管道

2.4 机械式微位移机构

机械式微位移机构是一种古老式机构,比较成熟,在精密机械中有着广泛的应用。结构形式比较多。

机械式微位移机构种类:螺旋机构、杠杆机构、楔块凸轮机构、弹性机构、齿轮机构以及上述机构组成的复合机构。

机械式微位移机构的特点:

- 1) 具有较好的分辨力。
- 2) 行程较大。
- 3) 存在间隙、摩擦磨损以及爬行等缺点,很难达到高精度,故适应于中等精度。

2.4.1 螺旋式微位移机构

螺旋式微位移机构具有较高的分辨力,可以获得大行程的位移,结构简单。

图 11-19 所示为典型的螺旋式微位移机构,用于读数 and 进给机构。手轮 6 转动经螺杆 3 传递位移,有两种运动形式,一种是螺母 8 固定,螺杆运动,如千分尺图 11-19a;另一种是螺杆固定,螺母推动运动件运动,如精密工作台传动机构(图 11-19b)。位移 S 与手轮转角 φ 之间

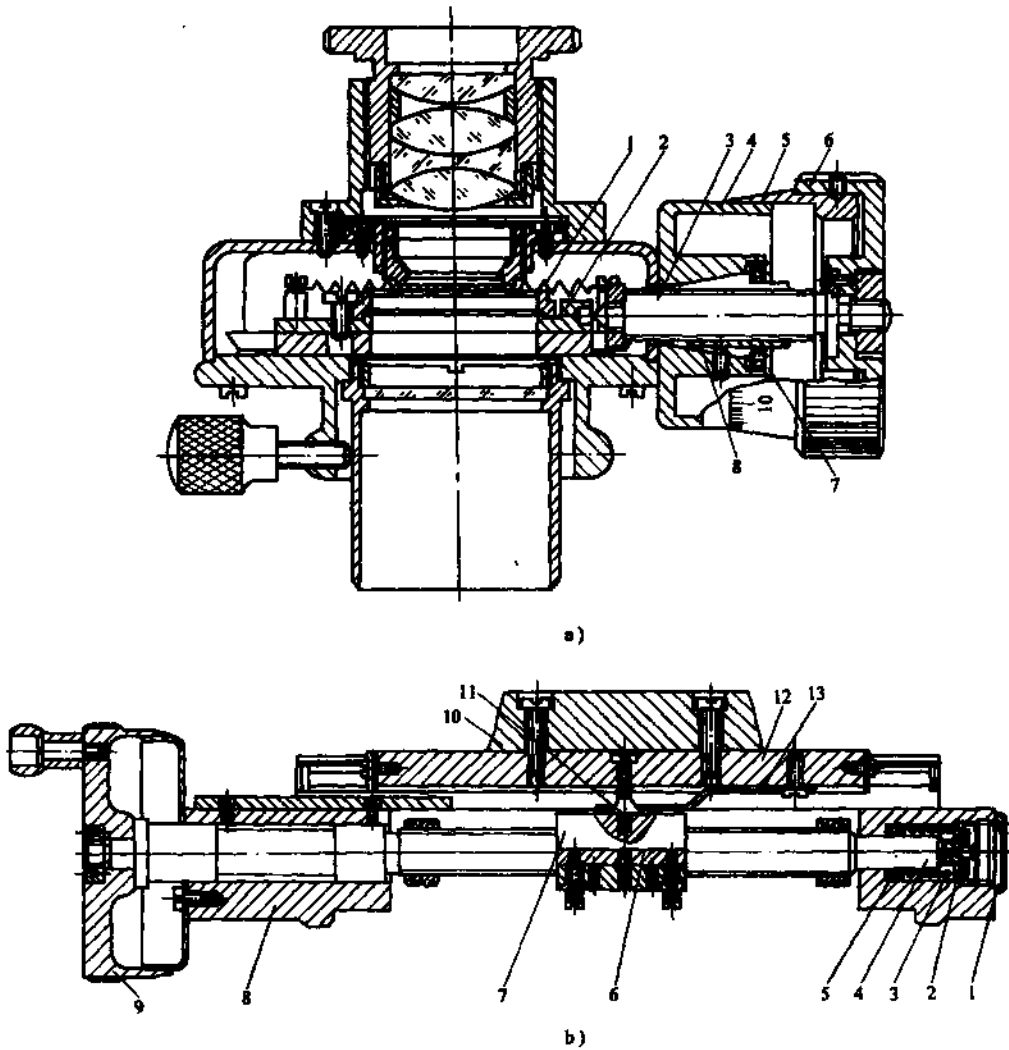


图 11-19 螺旋式微位移机构

a) 测量目镜

1—拉簧 2—分划板座 3—螺杆 4—固定刻线座 5—转动刻线座 6—手轮 7—调节螺母 8—螺母

b) 测量显微镜纵向测微螺旋

1—堵头 2—钢球 3—压簧 4—螺杆 5—推力轴承 6—半开螺母(下) 7—半开螺母(上) 8—手轮支座

9—手轮 10—工作台 11—锥形螺钉 12—导轨 13—弹簧

的关系为

$$S = \pm \frac{P}{2\pi} \varphi$$

其微动灵敏度为

$$\Delta S = P \frac{\Delta \varphi}{2\pi} \quad (11-19)$$

式中 P ——螺距； φ 、 $\Delta \varphi$ ——手轮的转角。

图 11-20 为差动式螺旋机构, 在同一螺旋上有两种不同的螺距 P_1 、 P_2 , 旋向相同, 其位移 S 为

$$S = (P_1 - P_2) \frac{\varphi}{2\pi} \quad (11-20)$$

这种结构的特点是可以获得很高的灵敏度。

2.4.2 机械组合式微位移机构

(1) 螺旋—斜面组合式微位移机构 如图 11-21 所示, 它由螺旋机构和斜块机构两部分组成, 旋转螺杆 1 固定, 旋转螺母 2 转动, 从动螺母 2 推动推杆 3 移动, 推杆 3 推动斜块 5 移动, 使滑块 6 产生微动, 其位移量为

$$S = P \frac{\varphi}{2\pi} \operatorname{tg} \alpha \quad (11-21)$$

式中 P ——螺旋的螺距;

φ ——螺杆的转角;

α ——斜块斜面与水平面的倾角, 一般取 $\operatorname{tg} \alpha = 1/50$ 。

(2) 蜗轮—凸轮组合式微位移机构 如图 11-22 所示, 它由蜗杆蜗轮副 1 和凸轮 4 组成, 主动件蜗杆 1 转动, 经过蜗杆蜗轮副减速, 带动凸轮 4 转动, 通过滚轮 5 使滑板 6 得到微位移。

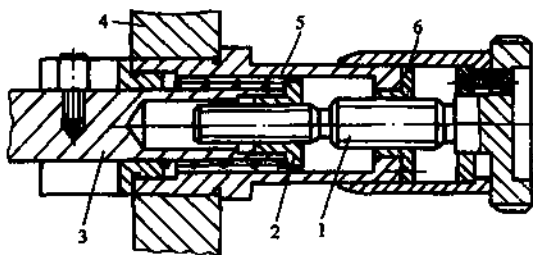


图 11-20 差动式螺旋微位移机构

1—螺杆 2、6—螺母 3—从动件 4—基板 5—套筒

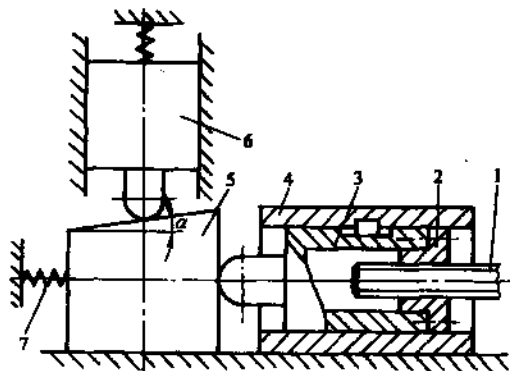


图 11-21 螺旋—斜面组合式微位移机构

1—螺杆 2—螺母 3—推杆 4—推杆座
5—斜块 6—滑块 7—弹簧

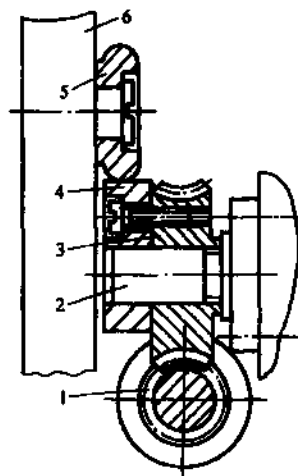


图 11-22 蜗轮—凸轮组合式微位移机构

1—蜗杆 2—轴 3—蜗轮 4—凸轮
5—滚轮 6—滑板

(3) 杠杆—齿轮组合式微位移机构 如图 11-23 所示, 手轮轴 1 转动, 经过三级齿轮副减速后, 变成扇形齿轮 2 的微小转动, 扇形齿轮是一个杠杆机构, 转换成运动件 5 的微位移。

(4) 摩擦轮—齿轮组合式微位移机构 图 11-24 所示是由摩擦轮—蜗轮副—齿轮、齿条—滚动导轨组合成的复合式微位移机构。手轮 1 转动带动轴 2 转动, 轴 2 与空心轴 4 之间通过三个钢球 5 靠摩擦方式带动空心轴上的蜗杆 6 转动, 经蜗轮副减速后, 再经过齿轮齿条(图中未画出)带动滚动导轨运动件 10 作微小移动, 实现微位移。另外也可直接用手轮 3 带动蜗轮转动, 从而实现快速大行程运动。

这种微位移机构可以获得很高的微动灵敏度 ($0.1\mu\text{m}$)。曾获德国专利, 是一种理想的机械式微位移机构。主要是采用了摩擦传动原理。如图 11-24 所示, 设主动轴的直径为 d_1 , 钢球的直径为 d_2 , 固定套筒的内径为 D 。当主动轴以 ω_1 转动时, 则钢球既作自转又作公转, 则

$$\frac{\omega_1 - \omega_2}{-\omega_2} = -\frac{D}{d_1}$$

其传动比 i_1 为

$$i_1 = \frac{\omega_1}{\omega_2} = 1 + \frac{D}{d_1} = \frac{d_1 + D}{d_1}$$

$$D = d_1 + 2d_2$$

$$i_1 = \frac{2(d_1 + d_2)}{d_1} \quad (11-22)$$

则

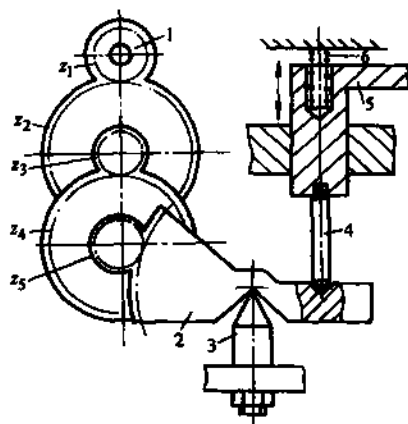


图 11-23 杠杆—齿轮组合式微位移机构

1—手柄轴 2—杠杆 3—支承 4—连杆
5—运动件 6—弹簧

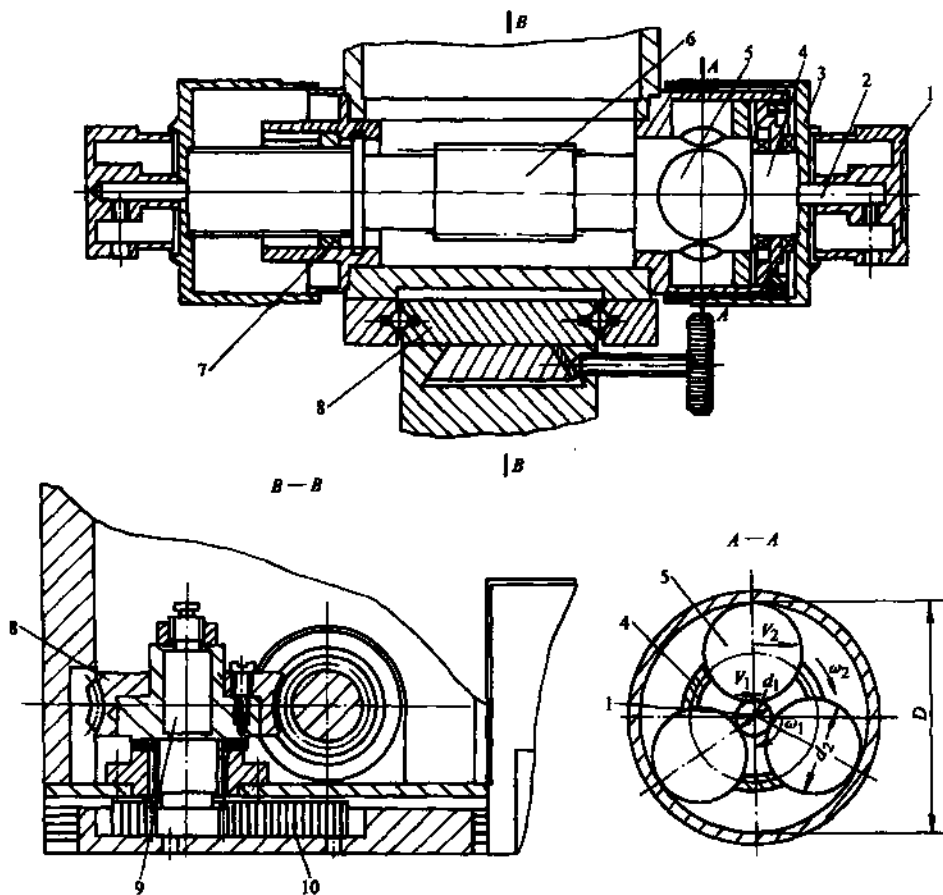


图 11-24 摩擦轮—齿轮微位移机构

1—手轮 2—杆 3—转动轮 4—蜗杆轴 5—钢球 6—蜗杆
7—限位块 8—蜗轮 9—蜗轮轴 10—运动件(导轨)

该组合机构的总传动比为

$$i = i_1 i_2$$

式中 i_1 ——摩擦传动比；
 i_2 ——蜗轮副传动比。

3 柔性铰链

3.1 柔性铰链的类型及特点

柔性铰链的类型分为：

(1) 单轴柔性铰链 单轴柔性铰链有圆形和矩形两种，如图 11-25 所示。

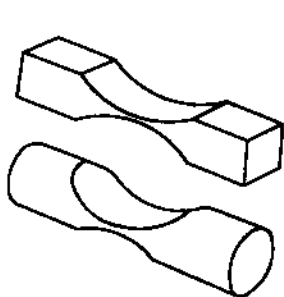


图 11-25 单轴柔性铰链

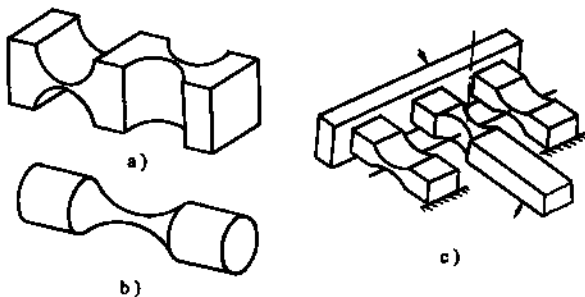


图 11-26 双轴柔性铰链

a) 圆柱型 b) 矩形 c) 复合型

(2) 双轴柔性铰链 双轴柔性铰链可分为三种：圆柱型、矩形和复合型，如图 11-26 所示。

圆柱型双轴柔性铰链(图 11-26b)是用圆柱体车削而成，它的特点是结构简单，加工容易，但它的截面面积较小，强度较弱，适于受力小的情况。

矩形双轴柔性铰链(图 11-26a)是由两个互成 90° 的单轴柔性铰链组成，这种结构比较简单，加工较容易，承受较大的载荷。缺点是两个轴没有交叉。

复合型双轴柔性铰链(图 11-26c)是由三个单轴柔性铰链组成，优点是双轴垂直方向交叉、沿纵向轴具有高强度，缺点是结构比较复杂，体积较大。

3.2 柔性铰链的设计

3.2.1 $l \ll R$ 条件下的设计公式

1. 单轴柔性铰链

设计要求：对输入轴(或灵敏轴)运动灵活；绕横轴和沿纵轴铰链的刚度尽可能大。

单轴柔性铰链的结构参数如图 11-27 所示。

(1) 绕 z 轴的偏转角 α_z 绕 z 轴的偏转角是由力矩

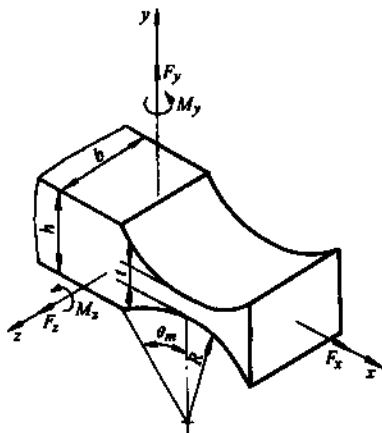


图 11-27 柔性铰链结构参数

M_x 和 F_y 引起的柔性变形角。

由力矩 M_x 引起的柔性变形角 α_x 为

$$\frac{\alpha_x}{M_x} = \frac{3}{2EbR^2} \frac{1}{2\beta + \beta^2} \left\{ \left[\frac{1+\beta}{\gamma^2} + \frac{3+2\beta+\beta^2}{\gamma(2\beta+\beta^2)} \right] \sqrt{1-(1+\beta-\gamma)^2} + \frac{6(1+\beta)}{(2\beta+\beta^2)^{3/2}} \text{arc tg} \left[\sqrt{\frac{2+\beta}{\beta}} \times \frac{\gamma-\beta}{\sqrt{1-(1+\beta-\gamma)^2}} \right] \right\} \quad (11-23)$$

式中 $\beta = \frac{t}{2R}$;

$\gamma = \frac{h}{2R}$;

t ——柔性铰链处厚度;

R ——柔性铰链圆弧半径;

E ——材料的弹性模量。

对于大多数使用条件下: $\beta = \frac{t}{2R} \ll 1$, $\beta = \frac{t}{2R} \ll \gamma = \frac{h}{2R}$, 则上式可简化为

$$\frac{\alpha_x}{M_x} \approx \frac{9\pi}{2EbR^2 (2\beta)^{5/2}} = \frac{9\pi R^{1/2}}{2Ebt^{5/2}} \quad (11-24)$$

对于实际铰链, β/γ 值误差 $< 1\%$, 式(11-24)与 γ 和铰链的高度无关, 因为变形发生在颈薄弱截面中心, 故切割半径中心位置和铰链的高度不是重要参数, 而中心截面是重要参数。

由力 F_y 引起的 α_x 为

$$\begin{aligned} \frac{\alpha_x}{F_y} &= R \sin \theta_m \left(\frac{\alpha_x}{M_x} \right) \\ &= R \sqrt{1-(1+\beta-\gamma)^2} \left(\frac{\alpha_x}{M_x} \right) \end{aligned} \quad (11-25)$$

用与式(11-24)同样的方法将式(11-25)简化为

$$\frac{\alpha_x}{F_y} \approx \sqrt{2\gamma - \gamma^2} \left(\frac{9\pi R^{3/2}}{2Ebt^{5/2}} \right) \quad (11-26)$$

切割半径 R 的中心在铰链的棱边上构成的铰链称为直圆铰链, 其定义为 $h = 2R + t$ 或 $\gamma = 1 + \beta$ 。因为 $\beta \ll 1$, $\gamma \approx 1$, 故式(11-26)还可简化为

$$\frac{\alpha_x}{F_y} \approx \frac{9\pi R^{3/2}}{2Ebt^{5/2}} \quad (11-27)$$

(2) 沿 y 轴的线性位移 Δ_y 由 M_x 引起的 Δ_y 有如下的关系式:

$$\frac{\Delta_y}{M_x} = R \sin \theta_m \left(\frac{\alpha_x}{M_x} \right) \quad (11-28)$$

式中 $\frac{\alpha_x}{M_x}$ 由式(11-24)给出, $R \sin \theta_m$ 是铰链高度的一半, 因此式(11-28)可简化为

$$\frac{\Delta_y}{M_x} \approx \sqrt{2\gamma - \gamma^2} \left(\frac{9\pi R^{3/2}}{2Ebt^{5/2}} \right) \quad (11-29)$$

对直圆铰链特殊情况, 式(11-28)简化为

$$\frac{\Delta_y}{M_x} \approx \frac{9\pi R^{3/2}}{2Ebt^{5/2}} \quad (11-30)$$

由力 F_y 引起弹性变形公式包括由非对称负载力矩 M_x 绕铰链中心引起的弹性变形的计算公

式, 其精确公式为

$$\frac{\Delta_x}{F_y} = R^2 \sin^2 \theta_m \left(\frac{\alpha_x}{M_x} \right) - \frac{3}{2Eb} \left\{ \left[\frac{1+\beta}{(1+\beta-\cos\theta_m)^2} - \frac{2+\frac{(1+\beta)^2}{(2\beta+\beta^2)}}{(1+\beta-\cos\theta_m)} \right] \times \right. \\ \left. \sin\theta_m + \left[\frac{4(1+\beta)}{\sqrt{2\beta+\beta^2}} - \frac{2(1+\beta)}{(2\beta+\beta^2)^{3/2}} \right] \arccos \sqrt{\frac{2+\beta}{\beta}} \operatorname{tg} \frac{\theta_m}{2} - (2\theta_m) \right\} \quad (11-31)$$

θ_m 为:

$$\theta_m = 2 \arccos \operatorname{tg} \frac{\gamma - \beta}{\sqrt{1 - (1 + \beta - \gamma)^2}} \quad (11-32)$$

当 $\beta/\gamma \ll 1$ 的条件下, 式(11-31)的简化公式为

$$\frac{\Delta_x}{F_y} \approx (2\gamma - \gamma^2) \frac{9\pi}{2Eb} \left(\frac{R}{t} \right)^{5/2} \quad (11-33)$$

对直圆铰链, 式(11-33)简化为

$$\frac{\Delta_x}{F_y} \approx \frac{9\pi}{2Eb} \left(\frac{R}{t} \right)^{5/2} \quad (11-34)$$

(3) 绕 y 轴偏转 y 轴(或交叉轴)是运动阻抗最大的轴。由 M_y 力矩引起铰链的转角偏移量 α_y 为

$$\frac{\alpha_y}{M_y} = \frac{12}{Eb^3} \left\{ \left[-2 \arccos \operatorname{tg} \frac{\gamma - \beta}{\sqrt{1 - (1 + \beta - \gamma)^2}} \right] \right. \\ \left. + \frac{2(1+\beta)}{\sqrt{2\beta+\beta^2}} \arccos \operatorname{tg} \left[\sqrt{\frac{2+\beta}{\beta}} \times \frac{\gamma - \beta}{\sqrt{1 - (1 + \beta - \gamma)^2}} \right] \right\} \quad (11-35)$$

这个公式对大部分实际铰链的设计, 可简化为

$$\frac{\alpha_y}{M_y} \approx \frac{12}{Eb^3} \left[-2 \arccos \operatorname{tg} \sqrt{\frac{\gamma}{2-\gamma}} + \sqrt{\frac{2}{\beta}} \arccos \operatorname{tg} \sqrt{\frac{2\gamma}{\beta(2-\gamma)}} \right] \quad (11-36)$$

式(11-36)见图 11-29a, 对于多数普通铰链 γ 值的变化引起弹性变形都小于 10%, 而对直圆铰链式(11-36)可简化为

$$\frac{\alpha_y}{M_y} \approx \frac{12}{Eb^3} \left[\pi \left(\frac{R}{t} \right)^{1/2} - 2.57 \right] \quad (11-37)$$

由 F_x 引起的 α_y 为

$$\frac{\alpha_y}{F_x} = R \left[\sqrt{1 - (1 + \beta - \gamma)^2} \right] \left(\frac{\alpha_y}{M_y} \right) \quad (11-38)$$

式中 $\frac{\alpha_y}{M_y}$ 由式(11-35)给出。式(11-38)可简化为

$$\frac{\alpha_y}{F_x} \approx \frac{12R}{Eb^3} \sqrt{2\gamma - \gamma^2} \left[-2 \arccos \operatorname{tg} \sqrt{\frac{\gamma}{2-\gamma}} + \sqrt{\frac{2}{\beta}} \arccos \operatorname{tg} \sqrt{\frac{2\gamma}{\beta(2-\gamma)}} \right] \quad (11-39)$$

由式(11-39)所得的曲线见图 11-28b。

对于直圆铰链, 式(4-39)可简化为

$$\frac{\alpha_y}{F_x} \approx \frac{12R}{Eb^3} \left[-2.57 + \pi \left(\frac{R}{t} \right)^{1/2} \right] \quad (11-40)$$

(4) 沿 z 轴的线位移 Δ_z 由力矩 M_y 引起的 Δ_z 为

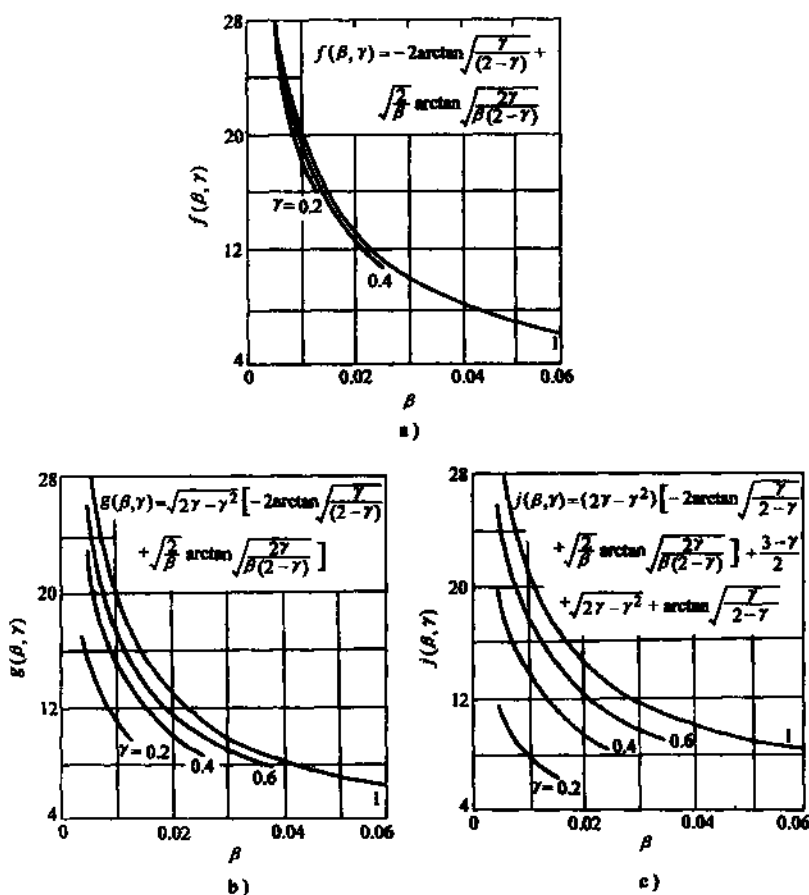


图 11-28 用于各种柔性铰链计算参数值

$$\frac{\Delta_z}{M_y} = R \sin \theta_m \left(\frac{\alpha_y}{M_y} \right) = R \sqrt{1 - (1 + \beta - \gamma)^2} \left(\frac{\alpha_y}{M_y} \right) \quad (11-41)$$

式中 $\frac{\alpha_y}{M_y}$ 由式(11-35)给出。

$\frac{\Delta_z}{M_y} = \frac{\alpha_y}{F_z}$, $\frac{\Delta_z}{M_y}$ 的近似值由式(11-35)给出, 故:

$$\frac{\Delta_z}{M_y} \approx \frac{12R \sqrt{2\gamma - \gamma^2}}{Eb^3} \left[-2 \arctan \sqrt{\frac{\gamma}{2-\gamma}} + \sqrt{\frac{2}{\beta}} \arctan \sqrt{\frac{2\gamma}{\beta(2-\gamma)}} \right] \quad (11-42)$$

由式(11-42)所得的曲线见图 11-28b。

对直圆铰链, 上式变为

$$\frac{\Delta_z}{M_y} \approx \frac{12R}{Eb^3} \left[-2.57 + \pi \left(\frac{R}{t} \right)^{1/2} \right] \quad (11-43)$$

对于铰链中心非对称载荷更复杂的力引起的线性位移的精确表达式为

$$\begin{aligned} \frac{\Delta_z}{F_z} = R^2 \sin^2 \theta_m \left(\frac{\alpha_y}{M_y} \right) + \frac{6R^2}{Eb^3} \left[(2 + 2\beta + \cos \theta_m) \sin \theta_m + (1 + 4\beta + 2\beta^2) \theta_m \right. \\ \left. - 4(1 + \beta) \sqrt{2\beta + \beta^2} \arctan \sqrt{\frac{2 + \beta}{\beta}} \arctan \frac{\theta_m}{2} \right] \quad (11-44) \end{aligned}$$

式中 $\frac{\alpha_y}{M_y}$ 由式(11-35)给出, θ_m 由式(11-32)给出。

对大多数情况下, 式(11-40)可以简化为

$$\frac{\Delta_x}{F_x} \approx \frac{12R^2}{Eb^3} \left\{ [2\gamma - \gamma^2] \left[-2 \operatorname{arc} \operatorname{tg} \sqrt{\frac{\gamma}{2-\gamma}} + \sqrt{\frac{2}{\beta}} \operatorname{arc} \operatorname{tg} \sqrt{\frac{2\gamma}{\beta(2-\gamma)}} \right] + \frac{3-\gamma}{2} \sqrt{2\gamma - \gamma^2} + \operatorname{arc} \operatorname{tg} \sqrt{\frac{\gamma}{2-\gamma}} \right\} \quad (11-45)$$

式(11-45)的解见图 11-28c。

对直圆铰链的特殊情况式(11-45)变成

$$\frac{\Delta_x}{F_x} \approx \frac{12\pi R^2}{Eb^3} \left[\left(\frac{R}{t} \right)^{1/2} - \frac{1}{4} \right] \quad (11-46)$$

(5) 沿 x 轴的线性位移 由 F_x 引起的线性位移 Δ_x , 纵轴是刚性的, 这个方向的变形为

$$\frac{\Delta_x}{F_x} = \frac{1}{Eb} \left\{ -2 \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{\gamma - \beta}{\sqrt{1 - (1 + \beta - \gamma)^2}} + \frac{2(1 + \beta)}{\sqrt{2\beta + \beta^2}} \times \operatorname{arc} \operatorname{tg} \left[\sqrt{\frac{2 + \beta}{\beta}} \frac{\gamma - \beta}{\sqrt{1 - (1 + \beta - \gamma)^2}} \right] \right\} \quad (11-47)$$

由公式(11-35)可见:

$$\frac{\Delta_x}{F_x} = \left(\frac{b^2}{12} \right) \left(\frac{\alpha_y}{M_y} \right)$$

因此对于高精度的情况

$$\frac{\Delta_x}{F_x} \approx \frac{1}{Eb} \left[-2 \operatorname{arc} \operatorname{tg} \sqrt{\frac{\gamma}{2-\gamma}} + \sqrt{\frac{2}{\beta}} \operatorname{arc} \operatorname{tg} \sqrt{\frac{2\gamma}{\beta(2-\gamma)}} \right] \quad (11-48)$$

式(11-48)与式(11-36)类似, 对于大多数铰链的弹性变形与直圆铰链相同, 可以忽略 γ 的作用, 因而, 对直圆铰链的特殊情况可以简化成下式, 其精度优于 90%。

$$\frac{\Delta_x}{F_x} \approx \frac{1}{Eb} \left[\pi \left(\frac{R}{t} \right)^{1/2} - 2.57 \right] \quad (11-49)$$

(6) 剪切弹性变形 由加在铰链端部的剪切力引起的位移 δ 为

$$\frac{\delta}{F} = \frac{1}{G} \int \frac{dx}{A(x)} \quad (11-50)$$

式中 G ——剪切模量。

由于式(11-50)对 $\frac{\Delta_y}{F_y}$ 和 $\frac{\Delta_x}{F_x}$ 两种情况积分相等, 所以这两种情况的剪切弹性变形相同。式(11-50)积分结果:

$$\left(\frac{\Delta_y}{F_y} \right)_\delta = \left(\frac{\Delta_x}{F_x} \right)_\delta = \frac{1}{Gb} \left[-\theta_m + \frac{2(1 + \beta)}{\sqrt{2\beta + \beta^2}} \operatorname{arc} \operatorname{tg} \sqrt{\frac{2 + \beta}{\beta}} \operatorname{tg} \frac{\theta_m}{2} \right] \quad (11-51)$$

式(11-51)可简化为:

$$\left(\frac{\Delta_y}{F_y} \right)_\delta = \left(\frac{\Delta_x}{F_x} \right)_\delta \approx \frac{1}{Gb} \left[-2 \operatorname{arc} \operatorname{tg} \sqrt{\frac{\gamma}{2-\gamma}} + \sqrt{\frac{2}{\beta}} \operatorname{arc} \operatorname{tg} \sqrt{\frac{2\gamma}{\beta(2-\gamma)}} \right] \quad (11-52)$$

对直圆铰链式(11-52)变成:

$$\left(\frac{\Delta_y}{F_y}\right)_\delta = \left(\frac{\Delta_x}{F_x}\right)_\delta = \left[-2.57 + \pi\left(\frac{R}{t}\right)^{1/2}\right] \frac{1}{Gb}$$

弹性变形公式见表 11-6。

表 11-6 弹性变形的基本公式

基本公式	$EI_x(x) \frac{d^2 y}{dx^2} = M_x(x)$ $EI_y(x) \frac{d^2 z}{dx^2} = M_y(x)$ $E = \frac{F_x/A(x)}{d(\Delta x)/dx}$	
绕 x 轴角位移	$\alpha_x = \frac{dy}{dx} = \int_x \frac{M_x(x) dx}{EI_x(x)}$ $= \int_\theta \frac{[M_x + F_y(R \sin \theta_m - R \sin \theta)] R \cos \theta d\theta}{E(2b/3)[R + (t/2) - R \cos \theta]^3}$	
绕 x 轴线位移	$\Delta_y = \int_x \left(\frac{dy}{dx}\right) dx = \int_\theta \alpha_x(\theta) R \cos \theta d\theta$	
绕 y 轴角位移	$\alpha_y = \frac{dz}{dx} = \int_x \frac{M_y(x) dx}{EI_y(x)}$ $= \int_\theta \frac{[M_y + F_x(R \sin \theta_m - R \sin \theta)] R \cos \theta d\theta}{E(b^3/6)[R + (t/2) - R \cos \theta]}$	
绕 y 轴线位移	$\Delta_z = \int_x \left(\frac{dz}{dx}\right) dx = \int_\theta \alpha_y(\theta) R \cos \theta d\theta$	
沿 x 轴线位移	$\Delta_x = \int_x \frac{E_x dx}{EA(x)} = \int_\theta \frac{F_x R \cos \theta d\theta}{E(2b)[R + (t/2) - R \cos \theta]}$	

2. 双轴柔性铰链

对于大多数应用情况，希望两个方向有弹性变形而纵轴保持刚性，这可以用两个互相垂直的单轴柔性铰链实现，如图 11-27a 所示。

对于这种结构的弹性变形可以用单轴铰链弹性变形合成来计算。

对于圆柱型双轴柔性铰链(图 11-27b)是万能圆形铰链，这种类型输入轴和纵轴的弹性变形的计算方法与单轴铰链相同。

角位移的精确表达式为

$$\begin{aligned} \left(\frac{\alpha_y}{M_y}\right)_m &= \left(\frac{\alpha_z}{M_z}\right)_m = \frac{\alpha_x}{F_y R \sin \theta_m} = \frac{\alpha_y}{F_x R \sin \theta_m} = \frac{8}{3\pi ER^3 (2\beta + \beta^2)} \\ &\times \left\{ \left[\frac{1+\beta}{\gamma^3} + \frac{2(1+\beta)^2+3}{2\gamma^2(2\beta+\beta^2)} + \frac{2(1+\beta)^3+13(1+\beta)}{2(2\beta+\beta^2)^2\gamma} \right] \right. \\ &\left. \times \sqrt{1-(1+\beta-\gamma)^2} + \frac{2(1+\beta)^2+3}{(2\beta+\beta^2)^{5/2}} \left[\arctan \sqrt{\frac{2+\beta}{\beta} \frac{\gamma-\beta}{\sqrt{1-(1+\beta-\gamma)^2}}} \right] \right\} \end{aligned}$$

(11-53)

式(11-53)可以简化为

$$\left(\frac{\alpha_y}{M_x}\right)_m = \left(\frac{\alpha_x}{M_x}\right)_m \approx \frac{20}{ER^3(2\beta)^{7/2}} = \frac{20R^{1/2}}{Ez^{7/2}} \quad (11-54)$$

和

$$\left(\frac{\alpha_y}{F_x}\right)_m = \left(\frac{\alpha_x}{F_x}\right)_m = \sqrt{2\gamma - \gamma^2} \left(\frac{20R^{3/2}}{Ez^{7/2}}\right) \quad (11-55)$$

式(11-54)可精确到1%。与单轴铰链相同,输入轴的弹性变形 γ 的影响可忽略不计或 $\beta/\gamma \ll 1$ 。沿纵轴的线性弹性变形为

$$\left(\frac{\Delta_x}{F_x}\right)_m = \frac{2}{\pi ER} \left\{ \left[\frac{2}{(2\beta + \beta^2)^{3/2} \arccos \frac{\sqrt{2+\beta}}{\beta} \sqrt{1-(1+\beta-\gamma)^2}} \right] + \left[\frac{(1+\beta)}{(2\beta + \beta^2)\gamma} \sqrt{1-(1+\beta-\gamma)^2} \right] \right\} \quad (11-56)$$

对于大多数情况,上式可以近似为

$$\left(\frac{\Delta_x}{F_x}\right)_m \approx \frac{2}{ER(2\beta)^{3/2}} \approx \frac{2R^{1/2}}{Ez^{3/2}} \quad (11-57)$$

和单轴铰链相同,剪切弹性变形用杨氏模量代入式(11-56)和式(11-57)即可。

3.2.2 $t \geq R$ 条件下的计算公式

用于微位移的柔性铰链的特点

1) 柔性铰链变形小,一般的微位移为几十微米到几百微米,位移量小。

2) 结构参数一般为 $t \geq R$,结构紧凑。

$t \geq R$ 柔性铰链如图 11-29 所示。柔性铰链的转角变形是由许多微段弯曲变形累积的结果。设第 i 个微段产生转角 $\Delta\theta_i$ 和挠度 Δy_i , 则整个铰链的转角 θ 和挠度 y 为

$$\theta = \sum_{i=1}^n \Delta\theta_i$$

$$y = \sum_{i=1}^n \Delta y_i$$

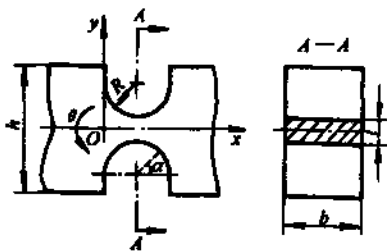


图 11-29 转角刚度计算图

在研究微段变形时,可以认为微段是长度为 dx 的等截面矩形梁,而且作用于微段两侧面的弯矩也是相同的,故根据材料力学可以得到柔性铰链中性面的曲率公式:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M(x)}{EJ(x)} \quad (11-58)$$

式中 E ——材料的弹性模量;

$J(x)$ ——截面对中心轴的惯性矩;

$M(x)$ ——作用于微段上的弯矩。

因为 $t \geq R$, 柔性铰链的全长为 $2R$, 较结构中其他尺寸小得多,所以可以认为柔性铰链上的弯矩变化不大,可把 $M(x)$ 看作常数。

曲率半径与坐标 x 、 y 的关系为

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\frac{d^2 y}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{3/2}} \quad (11-59)$$

由于弹性机构行程很小, 所以柔性铰链弯曲变形, 挠度大于柔性铰链的全长, 即 $\frac{dy}{dx} \ll 1$ 则上式简化为

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d^2y}{dx^2}$$

$$\text{则} \quad \frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M(x)}{EJ(x)} \quad (11-60)$$

当转角很小时 $\theta \approx \text{tg}\theta = \frac{dy}{dx}$, 并将直角坐标系转化为极坐标, 用积分方法可以求出柔性铰链的转角 θ

$$\theta = \int_0^\pi \frac{12MR\sin\alpha}{Eb(2R+t-2R\sin\alpha)^3} d\alpha \quad (11-61)$$

式中的符号与前同, 其余符号见图 11-31。

用 Romberg 数值积分方法对上式进行积分, 可以得到不同的 R 、 t 值柔性铰链转角刚度 M/θ 值, 常用的 R 、 t 值的转角刚度值见表 11-7。

表 11-7 柔性铰链转角刚度 (mm³·kg/rad)

R/mm \ t/mm	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
1.0	0.081Eb	0.24Eb	0.52Eb	0.94Eb	1.6Eb
1.5	0.063Eb	0.18Eb	0.39Eb	0.70Eb	1.2Eb
2.0	0.053Eb	0.15Eb	0.32Eb	0.58Eb	0.94Eb
2.5	0.047Eb	0.13Eb	0.28Eb	0.50Eb	0.81Eb
3.0	0.043Eb	0.12Eb	0.25Eb	0.45Eb	0.73Eb

注: E —材料弹性模量 b —厚度。

4 精密微动工作台的设计及其特性分析

实现微位移的方案比较多, 用途很广泛, 应根据不同的用途, 合理选取不同的方案。设计原则为, 满足微位移行程及分辨率, 经济合理; 结构紧凑。作为微动补偿的微动工作台, 除满足上述要求外, 还应具有良好的静、动态特性。

4.1 精密微动工作台的设计要求

作为理想的精密微动工作台, 应满足下列要求:

- 1) 微动工作台的支承或导轨副应无机械摩擦和无间隙, 具有高的位移分辨率和高的定位精度和重复精度, 满足工作行程要求。
- 2) 微动工作台本身应具有高的几何精度, 即倾摆、滚摆和摇摆误差小, 同时稳定可靠。
- 3) 微动工作台应具有较高的固有频率, 以保证良好的动态特性和抗干扰能力, 即最好采用直接驱动方式, 无传动环节。
- 4) 微动系统便于控制, 而且响应速度快

4.2 精密微动工作台设计中的几个问题

4.2.1 导轨形式的选择对位移分辨力的影响

在微位移的范围内, 为使工作台具有较高的分辨力, 希望驱动力或输入位移的微小变化,

微动工作台应有所响应，因此导轨副间的摩擦力及其特性变化，对微动工作台的微位移特性有着重要的影响。

滑动导轨摩擦力不是常数，受静动摩擦系数的影响较大，摩擦力随相对静止持续时间的增加而增加，随相对滑动速度的增加而减小。滚动导轨虽然摩擦力的平均值很小，但是由于滚动体和导轨面的制造误差、表面的平面度误差以及隔离架的滑动，使滚动摩擦力在较大的范围内变动，而引起较大的随机误差，因此当滚动导轨作微小间歇运动时，与滑动导轨运动特性相类似。也就是说，在微位移范围内，滚动导轨和滑动导轨都存在静、动摩擦力之差，均不适合作微动工作台。

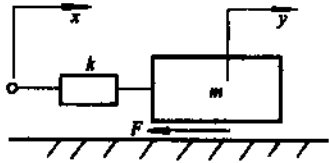


图 11-30 工作台和传动系统模型

图 11-30 所示为工作台和传动系统的简化模型。 m 为工作台的质量， k 为传动系统的刚度， F 为导轨之间的摩擦力。当工作台静止时， F 为 F_a ；当工作台运动时， F 取值为 F_m ，则

$$F = \begin{cases} F_a & v = 0 \\ F_m & v > 0 \end{cases} \quad (11-62)$$

当输入位移 $x < F_a/k$ 时，输出位移 $y = 0$ 。平衡方程为

$$F = kx$$

临界点为

$$F = kx_c$$

式中 x_c ——临界位移。

当 $x > x_c$ 时，工作台开始运动， $F = F_m$ ，其运动方程为

$$m\ddot{y} = (x - y)k - F_m \quad (x > x_c)$$

即

$$\ddot{y} + \omega^2 y = \omega^2 x - \frac{F_m}{m}$$

式中 $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$

对上式求解

$$y = A \sin(\omega t + \varphi) + x - \frac{F_m}{k} \quad (11-63)$$

式中 A, φ ——积分常数。

初始条件 $t = 0$ 时， $y = 0, \dot{y} = 0, x = x_c$

可得：

$$A = -\frac{\pi F}{k}, \quad \varphi = \frac{\pi}{2}$$

代入，得

$$y = -\frac{\Delta F}{k} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) + x - \frac{F_m}{k} \quad (11-64)$$

式中 $\Delta F = F_s - F_m$

系统达到稳态时

$$y = (x - x_c) + \frac{\Delta F}{k} \quad (11-65)$$

当 $x \rightarrow x_c$ 时，得到系统的最小位移输出，即系统的分辨力为

$$y_{\min} = \frac{\Delta F}{k}$$

可见,系统的分辨力受静、动摩擦力之差 ΔF 和传动系统的刚度 k 的影响,欲提高分辨力应减小静、动摩擦力之差和提高系统的刚度。

滑动导轨静、动摩擦力之差较大,滚动导轨结构复杂、抗振性差、对脏物敏感,因此两种导轨均不适合作微动工作台。

弹性导轨是利用受力后发生弹性变形来实现微位移,故仅存在弹性材料内部分子之间的内摩擦,而且没有间隙,具有高的位移分辨力,是较理想的微位移机构。

弹性导轨简化模型如图 11-31 所示。工作台由平行片簧支承,受到驱动力 F 的作用后,发生弹性变形,使工作台产生微小位移 δ , 其运动方程为

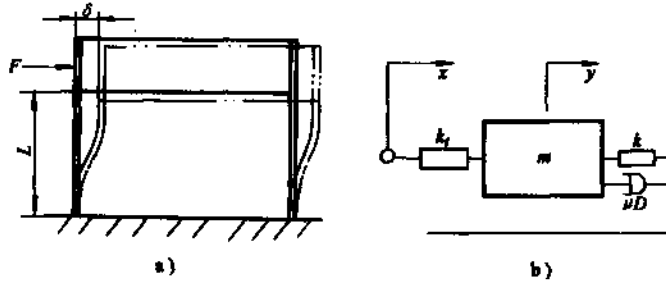


图 11-31 弹性导轨简化模型

$$m\ddot{y} + \mu\dot{y} + (k + k_t)y = k_x x \quad (11-66)$$

式中 m ——工作台运动质量;
 k_t ——传动部件刚度;
 k ——弹性导轨刚度;
 μ ——阻尼系数。

$$k = \frac{2bt^3E}{L^3}$$

式中 b 、 t 、 L ——分别为弹簧片的宽度、厚度、长度;
 E ——材料弹性模量。

工作台的传递函数为

$$G(S) = \frac{k_x \omega_n^2}{S^2 + 2\xi\omega_n S + \omega_n^2}$$

式中 $k_x = \frac{k_t}{k + k_t}$;
 $\omega_n = \sqrt{\frac{k + k_t}{m}}$;
 ω_n ——系统无阻尼自然频率

$\xi = \frac{\mu}{2m\omega_n}$ ——阻尼比。

式(11-53)的解为

$$y(t) = \frac{k_x x}{k + k_t} \left[1 - \frac{e^{-\xi\omega_n t}}{\sqrt{1 - \xi^2}} \sin \left(\omega_d t + \arctan \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{\xi} \right) \right] \quad (11-67)$$

式中 ω_d ——阻尼自然频率, $\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2}$ 。

当系统达到稳态时,其输出位移为

$$y = \frac{k_i}{k + k_i} x \quad (11-68)$$

由式(11-68)可见, k , k_i 均是系统的固有参数, 所以输出位移随输入位移的变化是唯一确定的。

根据驱动环节刚度 k_i 和导轨刚度 k 取值不同, 可以获得两种微动工作台。

(1) 弹性缩小机构 当 $k_i \ll k$ 时

$$y = \frac{k_i}{k + k_i} x \quad (11-69)$$

可选取不同的 k_i 、 k 值获得不同缩小比的弹性机构。这种机构可将输入位移大大缩小, 可提高位移的分辨力, 从而获得较高的精度。但是, 参数选择不合理时, 易产生过度振荡。

(2) 直接驱动机构 当 $k_i \gg k$ 时

$$y \approx x \quad (11-70)$$

这种条件下, 输出位移直接反映输入位移, 成为直接驱动机构。此时该机构仍然是一个二阶系统, 只是 $y = x$, 即输出位移完全被输入位移所约束, 只要输入位移恒定, 则输出位移不可能产生过渡振荡。系统瞬态响应的上升时间为

$$t_r = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \xi^2}} \quad (11-71)$$

可见, 欲提高工作台的响应速度, 应尽量提高系统的固有频率。

以上以片簧为例对弹性导轨进行了分析。该结果同样适于其他弹性机构, 如弹簧、柔性铰链、碟形弹簧及膜片等。

4.2.2 微动工作台的驱动与控制

(1) 微动工作台的驱动形式

1) 手动驱动 机械式缩小方法如弹性机构。杠杆、楔块、丝杠等, 可采用手动驱动方法, 用于微调, 微进给等, 这些机构往往是一次性的调整或非自动控制的场合, 特点是: 成本低, 操作简便, 但结构比较大。用于要求不高的机构。

2) 电动驱动 利用各种物理方法产生的微位移, 如压电式、电致伸缩、电磁式等和部分机械式, 采用电驱动方法。用于各种自动控制的场合。其特点是: 分辨力高、精度高、成本高。

(2) 微动工作台的控制方式 实现高精度的定位, 要有高精度的检测装置, 如激光干涉仪、光栅定位系统等, 与微动工作台组成闭环控制。目前, 微机已很成熟, 在要求较高的场合, 均采用微机数字闭环控制。

4.3 精密微动工作台的设计

机械式微动工作台的设计, 请参阅有关机械设计方面的图书, 该设计方法已成熟, 本书不再赘述。

4.3.1 $x-y$ 弹性精密微动工作台的设计

(1) 设计的初始条件

- 1) 采用柔性铰链支承。
- 2) 压电或电致伸缩驱动。
- 3) 柔性铰链 $t \geq R$, 以提高设计的刚度。

(2) 微动工作台的基本模型及设计公式 柔性铰链 $x-y$ 弹性工作台的基本结构如图 11-32 所示。设计时进行下列假设:

- 1) 工作台运动时, 仅在柔性铰链处产生弹性变形, 其他部分可认为是刚体。
- 2) 柔性铰链只产生转角变形, 无伸缩及其他变形。

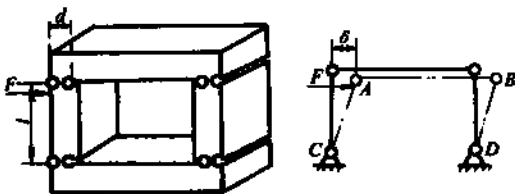


图 11-32 柔性铰链微动工作台模型

柔性铰链微动工作台的刚度计算公式可参照图 11-32 得出。设四个柔性铰链转角刚度为 k_θ , 那么当四连杆机构在外力 F 的作用下产生位移 δ , 每个柔性铰链所储存的弹性能为

$$A_\theta = \frac{1}{2} k_\theta \theta^2 \quad (11-72)$$

式中 $\theta = \frac{\delta}{l}$;

l —— 连杆长度;

k_θ —— 可由表 11-7 查得。

外力 F 所做的功为

$$A = \frac{1}{2} F\delta$$

由能量守恒定律

$$A = 4A_\theta$$

则柔性铰链微动工作台的刚度计算公式为

$$k = 4 \frac{k_\theta}{l^2} \quad (11-73)$$

(3) 弹性微动工作台的设计 设计步骤如下:

- 1) 根据微动工作台的技术要求(行程、灵敏度)选择电致伸缩微位移器, 画出结构草图。
- 2) 选择材料并计算出微动工作台的质量 m 。
- 3) 设计柔性铰链基本参数, t 、 R , 计算刚度 k , k_θ 可由表 11-7 查出。
- 4) 核算并完成装配图

核算内容, 包括行程, 分辨率, 基本参数 t 、 R 等。

柔性铰链的基本参数应满足下列要求:

- 1) 柔性铰链的内部应力应小于材料的许用应力

$$\sigma \leq [\sigma] \quad (11-74)$$

- 2) 微位移器产生最大输出位移时, 微动工作台产生的弹性恢复力 $F_{恢}$ 应小于微位移器的最大驱动力 $F_{驱}$

$$F_{恢} < F_{驱} \quad (11-75)$$

- 3) 微动工作台的刚度应尽可能地大, 使其具有良好的动态特性和抗外界干扰能力。

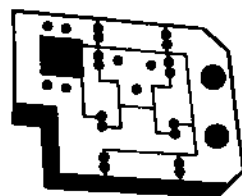


图 11-33 $x-y$ 柔性微动工作台

根据微动工作台的结构原理, 其固有频率 f 为

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (11-76)$$

式中 k ——弹性工作台的刚度;

m ——弹性工作台的质量。

(4) 设计实例 设计实例如图 11-34 所示。

微动工作台的几何尺寸/mm	130 × 100 × 20
驱动器	电致伸缩微位移器
行程/ μm	> 8
分辨力/ μm	< 0.01
位置精度/ μm	± 0.03
柔性铰链结构参数/mm	$R = 1.5, t = 2$
微动台特性参数	
固有频率/Hz	$f = 219$
刚度/(kg/ μm)	$k = 0.35$
质量/kg	$m = 1.8$

该微动工作台的几何精度和刚度实测结果如表 11-8 所示。

表 11-8 微动台的几何精度和刚度(实测)

	x	y
滚 摆/(°)	0.2	0.4
顺 摆/(°)	0.4	0.8
摆 摆/(°)	8.0	0.6
刚 度/(kg/mm)	0.33	0.36

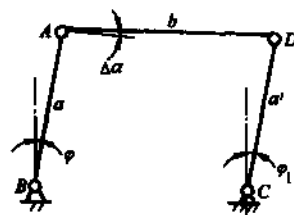


图 11-34 微动工作台
误差分析图

4.3.2 弹性微动工作台的误差分析

(1) 弹性微动工作台设计误差 弹性微动工作台运动时, 柔性铰链实际有转角、挠度、伸缩三种变形, 根据 $t \ll R$ 的计算公式, 在 t 一定的条件下, 转角、挠度、伸缩三种变形分别正比于 $lR^{1/2}$ 、 $R^{3/2}$ 、 $R^{1/2}$ 。而在设计时进行了假设, 在 R 较小的条件下 $h \gg t$ 时, 实验结果表明与理论设计比 $< 1\%$, 所以, 可以认为假设是合理的, 由于假设造成的误差可以忽略不计。

(2) 微动工作台几何误差 造成微动工作台几何误差的原因主要是机械加工中的误差所引起的, 例如铰链圆孔中心位置不准确, 厚度 t 、圆弧半径 R 等的误差。

理想的微动工作台可以简化成图 11-34 所示的平行四边形机构。当 $AB = CD$ 时, 连杆 AD 才能严格平移。若由于加工造成几何位置不精确, 设 $AB = a$ 、 $CD = a'$ 、 $\Delta a = |a - a'|$, 引起的机构误差 $\Delta\varphi$ 为

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi = \frac{\Delta a}{a} \operatorname{tg} \varphi \quad (11-77)$$

连杆 AD 的转角误差 $\Delta\alpha$ 为

$$\Delta\alpha = \frac{(a \cos \varphi - a' \cos \varphi_1) - \Delta a}{b}$$

式中符号见图 11-34。在上式中, $\varphi_1 = \varphi + \Delta\varphi$, 由于 $\Delta\varphi$ 很小, $\cos \varphi \approx 1$, $\sin \Delta\varphi \approx \Delta\varphi$ 则

$$\Delta\alpha \approx \frac{\Delta a a (\cos\varphi - 1) + \Delta a a' \sin\varphi \tan\varphi}{ab} \quad (11-78)$$

因为微动工作行程只有几十微米，所以 φ 角的值非常小，可取 $\cos\varphi \approx 1$ $\sin\varphi \approx 0$ ，因此由于 Δa 引起的 AD 杆的转角误差 $\Delta\alpha \rightarrow 0$ 。

故在正常加工精度条件下，由于孔加工位置造成工作台的摆角误差可以忽略不计。

柔性铰链的位置误差会造成 x 、 y 两个方向四连杆机构的垂直度误差。

设两杆长度为 l_x 和 l_y ，孔的位置误差为 $\pm\Delta$ ，则造成垂直度误差为

$$\Delta\theta = 2\Delta \left(\frac{1}{l_x} + \frac{1}{l_y} \right) \quad (11-79)$$

4.3.3 微动工作台的特性分析

1. 静态特性

微动工作台的静态特性是指输入位移 x 不随时间变化，即 $\frac{dx}{dt} = 0$ 。其静态特性主要取决于驱动器的特性。例如采用电致伸缩微位移器作为驱动器，则静态特性主要取决于电致伸缩微位移器的电压——位移特性，其特性曲线如图 11-35 所示。由图可见，特性曲线呈抛物线型，且伸长（升压）和回缩（降压）两曲线不重合，存在迟滞现象，这对微动工作台的运动精度带来一定的影响，在高精度条件下，应注意采取补偿措施。

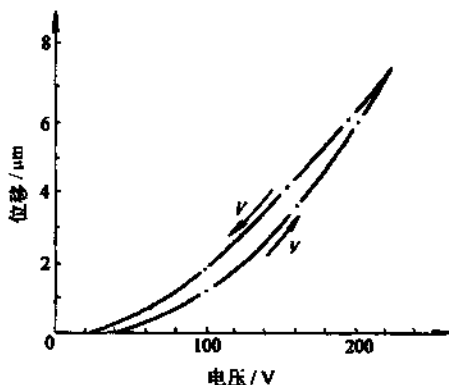


图 11-35 电压位移曲线

利用静态特性可确定行程，分辨力、线性范围等。为高精度补偿提供正确数据。

2. 动态特性

动态特性是指输入位移随时间按正弦变化，即 $\frac{dx}{dt} \neq 0$ 。

研究动态特性目的：

- 1) 避免系统在谐振频率附近工作，以免造成很大误差，严重时会造成破坏。
- 2) 确定系统的固有频率、阻尼比、响应速度及超调量等，为系统的控制提供正确的依据。

(1) 幅频特性，静、动态刚度 弹性微动工作台系统简化模型见图 11-31b 所示的质量—弹簧—阻尼二阶系统，其运动方程为：

$$m\ddot{y} + \mu\dot{y} + (k + k_1)y = k_1x \quad (11-80)$$

当外力 $F_0 = k_1x = \text{常数}$ 时，那么

$$\dot{y} = 0 \quad y = 0$$

此时系统的刚度 k_0 为

$$k_0 = \frac{F_0}{y_0}$$

式中 y_0 ——外力 F_0 为常数时，工作台的位移。

当外力按正弦变化时，即 $k_1x = f\sin\omega t$ ，则

$$m\ddot{y} + \mu\dot{y} + Ky = f\sin\omega t$$

式中 $K = k + k_1$

对上式变换得

$$y + 2\xi\omega_0 \dot{y} + \omega_0^2 y = \frac{f}{m} \sin \omega t \quad (11-81)$$

式中 ω_0 ——固有频率, $\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{m}}$;

ξ ——阻尼比, $\xi = \frac{\mu}{2\sqrt{mK}}$ 。

其幅频特性为

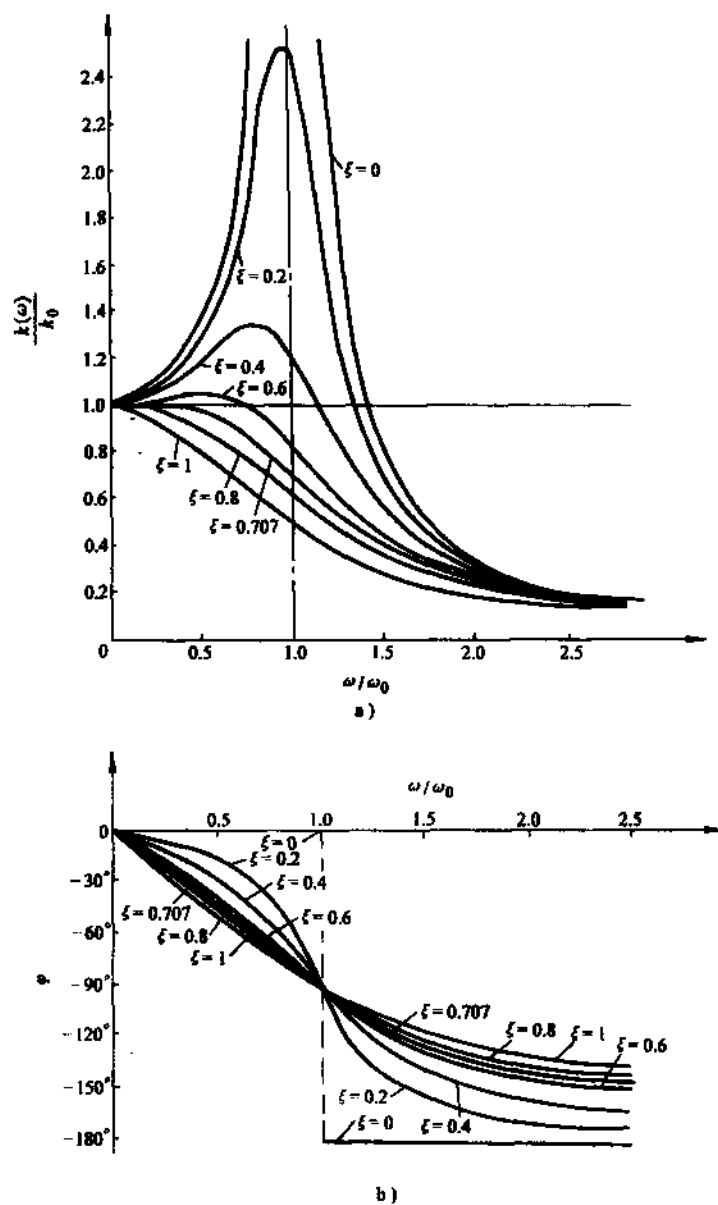


图 11-36 二阶环节的幅频特性与相频特性

$$A(\omega) = \frac{\frac{1}{K}}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + 4\xi^2 \frac{\omega^2}{\omega_0^2}}} \quad (11-82)$$

其相频特性为

$$\varphi(\omega) = -\arctan \frac{2\xi \frac{\omega}{\omega_0}}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}} \quad (11-83)$$

微动工作台系统的输出为

$$y(t) = A(\omega) f \sin[\omega t + \varphi(\omega)]$$

幅频特性与相频特性曲线如图 11-36 所示。当 $\omega = 0$ 时, $A(\omega) = \frac{1}{K}$, $\varphi(\omega) = 0$; 当 $\omega = \sqrt{1 - 2\xi^2} \omega_0$ 时, $A(\omega)$ 有极值

$$A(\omega) = \frac{1}{2\xi K \sqrt{1 - \xi^2}} \quad (11-84)$$

当 $\omega = \omega_0$ 时, $A(\omega) = \frac{1}{2\xi K}$, $\varphi(\omega) = -90^\circ$ 。此时若 $\xi \rightarrow 0$, 则 $A(\omega) \rightarrow \infty$, 输出量的幅度大大超过输入量, 这一现象称为谐振, 即当输入位移的频率等于工作台系统的固有频率时发生谐振, 工作台将无法工作。由图可见 $\xi = 0$ 时有明显谐振现象, 设计时应避免。随 ξ 增大谐振现象逐渐下降但不明显。当 $\xi \geq \frac{\sqrt{2}}{2} = 0.707$ 时不再出现共振现象。此时 $A(\omega)$ 随 ω 增加而单调下降。当 $\omega \rightarrow \infty$ 时, $A(\omega) \rightarrow 0$, $\varphi(\omega) \rightarrow -180^\circ$ 。

系统的动态刚度为

$$k_{\text{动}} = k \sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + 4\xi^2 \frac{\omega^2}{\omega_0^2}} \quad (11-85)$$

(2) 阶跃响应 单自由度的弹簧质量系统在阻尼比 $0 < \xi < 1$ 时, 对单位阶跃输出的响应为

$$y(t) = 1 - \frac{e^{-\xi\omega_0 t}}{\sqrt{1 - \xi^2}} \sin\left(\omega_d t + \arctan \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{\xi}\right) \quad (11-86)$$

式中 ω_d ——阻尼自然频率 $\omega_d = \omega_0 \sqrt{1 - \xi^2}$ 。

阶跃响应曲线如图 11-37 所示。图中 M_p 为最大超调量, 它反映系统的稳定性, 其计算公式为

$$M_p = e^{-(\xi\sqrt{1 - \xi^2})\pi} \quad (11-87)$$

t_p 为峰值时间, 它表明了系统瞬态响应速度, 即

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_0 \sqrt{1 - \xi^2}} \quad (11-88)$$

达到并保持在—个允许误差范围内所需要的时间称为超调时间 t_s , $t_s \propto \frac{1}{\xi\omega_0}$, 表示系统的响应速度, ω_0 越大系统的响应速度越快。用阶跃激励的方法可以直接测出 M_p 和 t_p , 也可用 ω_0 、 ξ 值计算 M_p 和 t_p 。

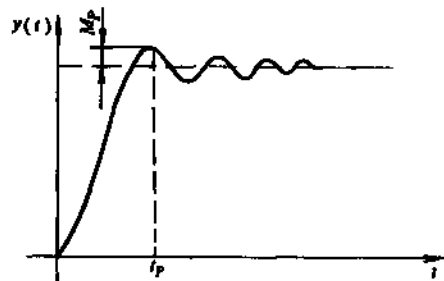


图 11-37 阶跃响应曲线

(3) 参数估算 在研究系统动态特性时, ω_0 、 ξ 是未知量, 可通过用正弦激励的方法测出幅频特性曲线, 其最大峰值就是固有频率 ω_0 。

ξ 的判断方法有两种

$$\frac{A(\omega)}{A_0} = \frac{1}{2\xi} \quad (11-89)$$

$$\frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_0} = 2\xi \quad (11-90)$$

式中 ω_1 、 ω_2 ——半功率点。

本例题弹性 $x-y$ 微动工作台的性能见表 11-9。

表 11-9 微动工作台的性能

轮廓尺寸/mm	130 × 100 × 20
运动坐标	x, y
位移行程/ μm	7
位移分辨率/ μm	0.01
定位精度/ μm	± 0.03
重复定位精度/ μm	± 0.03
固有频率/Hz	> 190
最大定位时间/ms	64

5 常用的微动工作台简介

5.1 柔性支承—压电或电致伸缩微位移驱动器驱动的微动工作台

柔性支承微动机构是近年来新发展起来的一种新型的微位移机构。它的特点是结构紧凑、体积小, 可以做到无间隙、无机械摩擦, 具有很高的位移分辨率(可达 1nm); 使用压电或电致伸缩微位移器驱动, 不仅控制简单, 而且易实现亚微米甚至是纳米级精度; 同时不产生噪声和发热, 可适于各种介质环境工作, 是精密机械中理想的微位移机构。已广泛应用于航空、宇航、微电子、测量及生物工程领域, 开创了精度进入微米/纳米的新时代。

5.1.1 单自由度微位移机构

图 11-38 是美国国家标准局采用柔性支承——压电驱动原理研制成的微调工作台, 于 60 年代初研制成功, 应用于航天技术中并获美国国家 100 项科技成果奖。

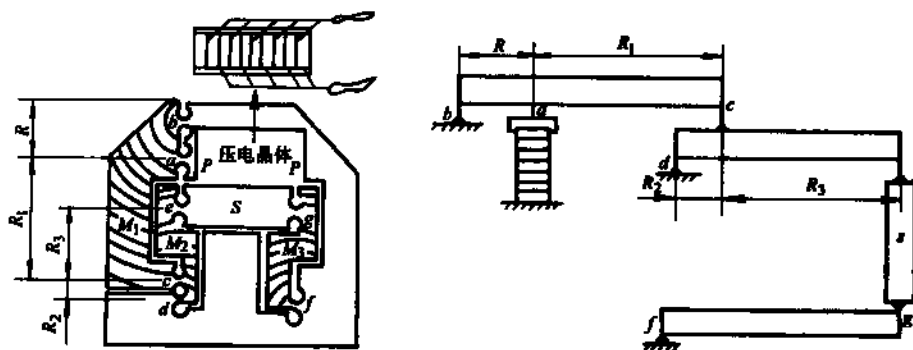


图 11-38 一个自由度的柔性铰链微动工作台

原理：它采用柔性铰链与杠杆原理相结合的整体式结构，利用叠层式压电晶体作为驱动元件。如图所示，在两个侧壁 PP 之间加电晶体，其展开图如图 b 所示，当在压电晶体上施加电压时，产生微位移，推动杆 M_1 上的 a 点，使之绕支点 b 转动；在 c 点上使杠杆 M_2 绕支点 d 转动并在 e 处拉动工作台 S 作微位移。杠杆 M_3 的支点为 f 、工作台 S 由两杠杆 M_2 和 M_3 上 e 和 g 支承。这样，压电晶体的微位移便经过杠杆 M_1 和 M_2 放大，其放大比为

$$\beta = \left(1 + \frac{R_1}{R}\right) \left(1 + \frac{R_3}{R_2}\right) \quad (11-91)$$

式中 β ——放大倍数；

R 、 R_1 、 R_2 、 R_3 ——杠杆长度(见图 11-38)。

该微动工作台的设计参数为

尺寸/mm 100 × 100 × 20

行程/ μm 1 - 50

分辨率/ μm < 0.001

5.1.2 两自由度微动工作台

图 11-39 是清华大学研制的两自由度微动工作台，用于微电子制版设备，作为微动补偿。它采用柔性铰链——电致伸缩微位移器驱动，在一块板材上实现 x 、 y 两个自由度，可以简化成两个四连杆机构，分别在 A 、 B 两处安装两个电致伸缩微位移器，当在微位移器上施加电压时，四连杆机构受力而变形，可获得 x 、 y 两个方向的微位移(δ_x 、 δ_y)。

该工作台的技术指标为

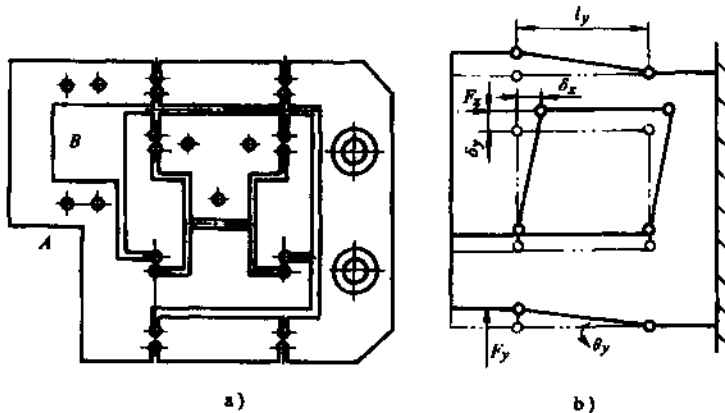


图 11-39 单层 x — y 弹性微动工作台

尺寸/mm 130 × 100 × 20

行程/ μm 0 ~ 10

定位精度/ μm $\leq \pm 0.03$

5.1.3 三自由度微动工作台

图 11-40 所示是日本日立制作所研制的三自由度微动工作台，它用于投影光刻机和电子束曝光机中。三自由度微动工作台固定在粗动工作台上，由四个圆柱形两端具有柔性铰链的柔性杆支承，安装了三个压电晶体，其中两个平行安装，另一个与这两个垂直安装(如图 P_{y1} 、 P_{y2} 和 P_x)，只要控制三个压电晶体的外加电压，便可以获得 Δx 、 Δy 、 $\Delta \theta$ 三个自由度的微位移，即

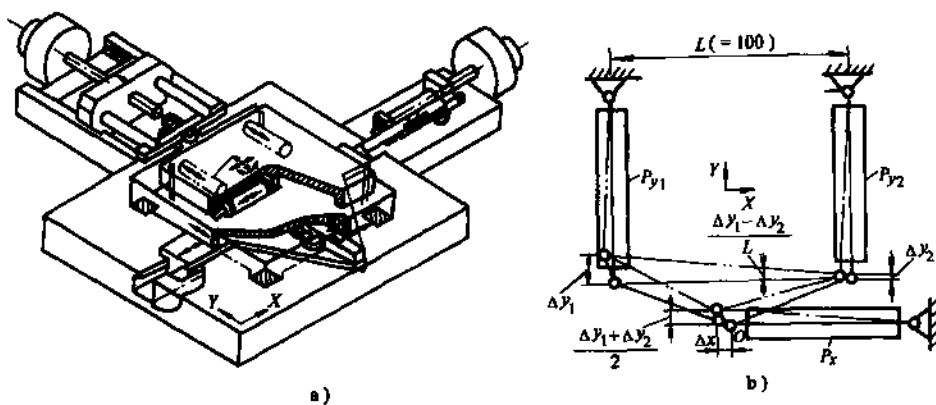


图 11-40 三自由度微动工作台

$$\Delta x$$

$$\Delta y = \frac{\Delta y_1 + \Delta y_2}{2}$$

$$\Delta \theta = \frac{\Delta y_1 - \Delta y_2}{l}$$

(11-92)

该工作台的技术指标为

x 、 y 行程/ μm ± 8

定位精度/ μm ± 0.05

θ 行程/ rad $\pm 0.55 \times 10^{-3}$

5.1.4 多自由度机构

图 11-41 是哈尔滨工业大学研制的组合积木式多自由度机构，它可以组合成 3、4、6 等不同的自由度(图 11-42)，用于机器人，采用柔性铰链，压电晶体驱动。该机构的技术指标见表 11-10。

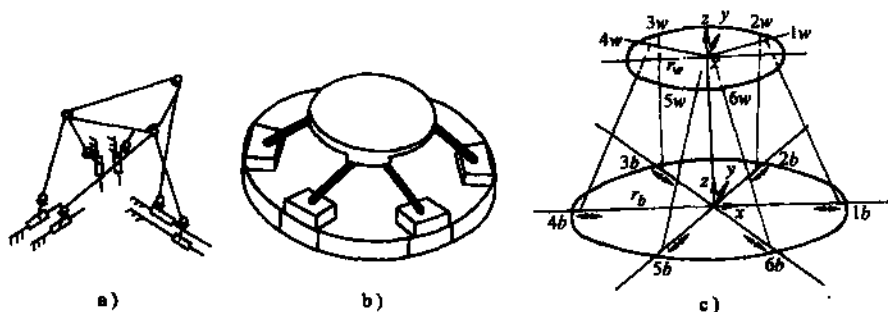


图 11-41 多自由度机构

a) 原理 b) 结构 c) 坐标

表 11-10 多自由度机构技术指标

自由度	行程/ μm	精度/ μm	频响/Hz	输出力/N
x	10	0.01	200	10
y	10	0.01		
z	10	0.01		
α	0.012°	$0.02''$		
β	0.012°	$0.02''$		
γ	0.024°	$0.04''$		

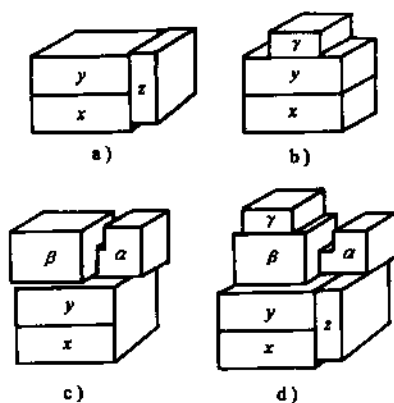


图 11-42 组合方式

a) x, y, z b) x, y, γ c) x, y, α, β d) $x, y, z, \alpha, \beta, \gamma$

5.2 平行弹簧导轨

5.2.1 机械式微位移机构

(1) 弹性缩小机构 这种机构是利用两个弹簧的刚度比进行位移缩小, 如图 11-43 所示, 设两个弹簧 A、B 的刚度为 k_A 、 k_B , 输入位移为 x_i , 则输出位移为 x

$$x = x_i \frac{k_B}{k_A + k_B} \quad (11-93)$$

如果 $k_A \gg k_B$, 那工作台位移 x 相对输入位移 x_i 就被大大缩小, 例如 $k_A : k_B = 99 : 1$, 缩小比为 $1/100$, 如输入位移 $x_i = 10\mu\text{m}$, 输出位移 $x = 0.1\mu\text{m}$ 。

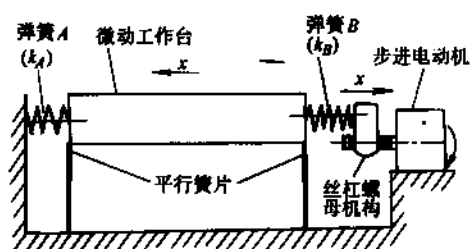


图 11-43 弹性缩小微动台

该机构的特点: 机构简单, 可获取高的位移分辨力; 定位精度低, 易产生过渡振荡, 不适于动态条件。

(2) 杠杆式位移缩小机构 图 11-44a 是杠杆缩小微位移机构, 支承由片簧组成, 输入位移经丝杠螺母和杠杆机构两次缩小。位移范围为 $\pm 50\mu\text{m}$, 分辨力 $0.05\mu\text{m}$, 定位精度可达 $\pm 0.5\mu\text{m}$ 。如杠杆级数增加可获得大的缩小比。但是, 定位精度易受末级杠杆的回转支点和着力点的结构、加工精度影响。

为了克服上述缺点, 采用柔性铰链结构, 如图 11-44b 所示。在一块板材上加工出柔性铰链。可设计成由几级并列杠杆同时与平行簧片导轨机构共同构成。图示缩小率为 $1/47$ 的 2 级杠杆机构。这种缩小机构适于位移范围较小的场合。

(3) 楔形缩小机构 采用具有微小角度的楔形机构可获得分辨力较高的微位移机构, 其原理如图 11-45a 所示。设斜楔角为 θ , 则缩小比为

$$x = x_i \tan \theta \quad (11-94)$$

为提高位移的灵敏度, 可在移动地方加滚球, 使滑动机构变成滚动机构。图 11-45b 是实

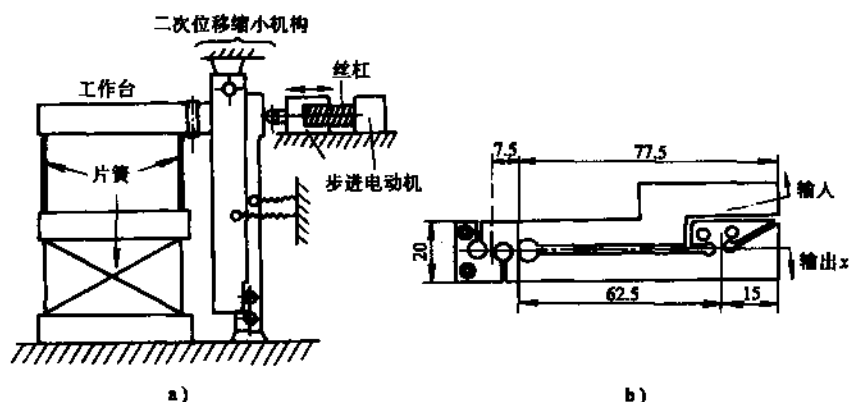


图 11-44 杠杆式位移缩小机构

用机构，在该装置上在平面上配置了3组楔形机构。位移范围 $200\mu\text{m}$ ，可获得 0.5° 以下的平行度误差作上下移动，用于作调平机构。

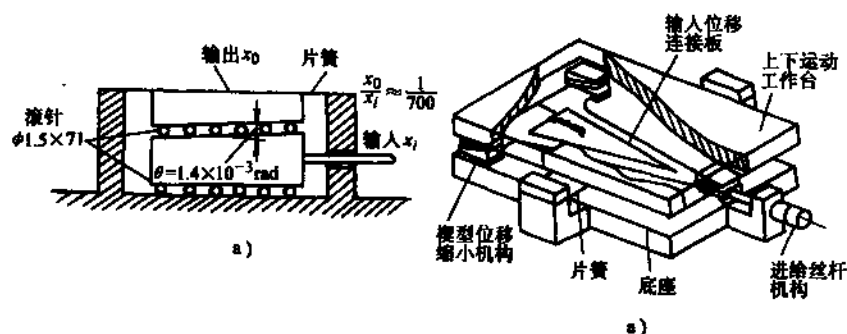


图 11-45 楔形位移缩小机构

a) 楔形缩小机构原理 b) 楔形缩小机构的例子

5.2.2 电磁驱动微位移机构

电磁驱动的微位移机构的原理如图 11-46 所示。微动台用片簧支承，在微动台的端部固定强磁体，它与电磁铁之间有一定的间隙，通过改变电磁铁中的电流强度，改变对工作台的吸引力，从而达到微位移的目的。

利用该原理制成的微动工作台如图 11-47、图 11-49 所示。图 11-47 是日本东北大学研制的微动工作台，具有两个自由度，定位精度为 $\pm 0.2\mu\text{m}$ 。图 11-48 是日本武藏野电气通讯研究所用于 X 射线曝光机上的六自由度的微动工作台其性能参数见表 11-11。

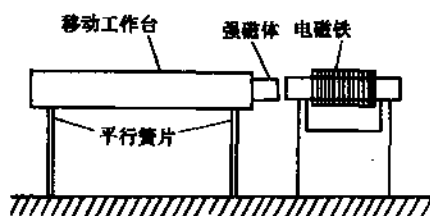


图 11-46 电磁驱动的微动工作台

表 11-11 六自由度微动台的性能参数

自由度	行程/ μm	分辨力/ μm
x	± 20	0.01
y	± 20	0.01
z	100	0.05
θ	$\pm 2'$	$0.15''$
α, β	$\pm 2'$	$0.5''$

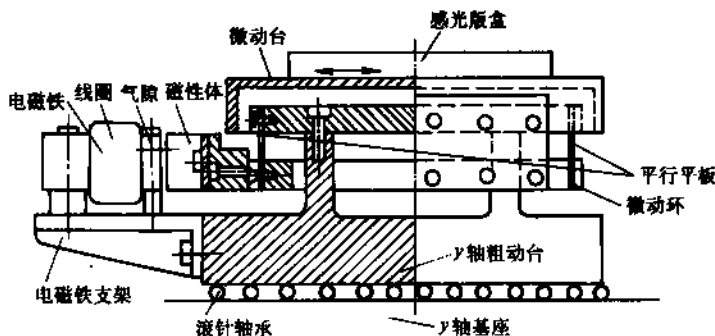


图 11-47 两自由度电磁驱动的微动工作台

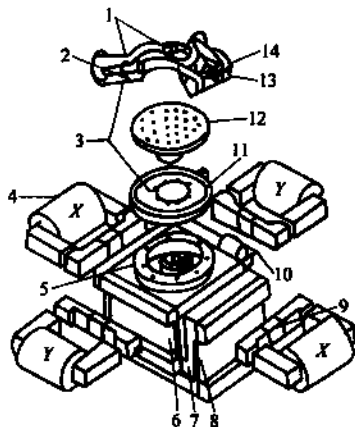


图 11-48 六自由度电磁驱动的微动工作台

1、7—支架 2—探测器机构 3—对准机构 4—电磁铁 5—微动台 6—片簧(x) 8—片簧(y)
9—磁铁 10—驱动器 11—硅片 12—掩膜版 13—探测器(x) 14—探测器(y)

5.3 滚动导轨—压电器件驱动

采用滚动导轨作为精密机械的微动工作台是一种常见的结构形式。图 11-49 是 1445 所用于自动分步重复光刻机(DSW)的微定位控制的微动台。行程 $\pm 9.5\mu\text{m}$ ，定位精度 $\pm 0.4\mu\text{m}$ 。

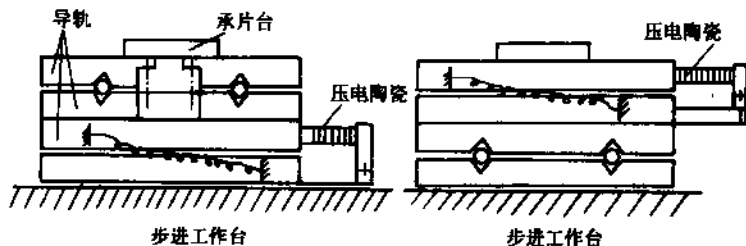


图 11-49 滚动导轨微动台

滚动导轨—压电器件驱动

利用滚动导轨也可以实现微动。图 11-50 是安徽机械科学研究所研制的微动台，它用于机床刀具微进给。在压电陶瓷 15 上加电压使之伸长、推动方形楔块 10 和圆柱楔块 4，使镗刀 6 微位移，实现镗刀的微进给。

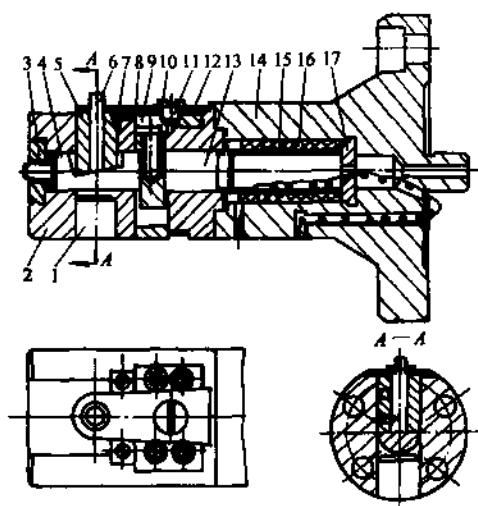


图 11-50 镗刀微进给机构

- 1—闷头 2—镗杆 3—螺盖 4—圆柱楔块 5—刀套
6—镗刀 7—键 8—压板弹簧 9—弹簧 10—方形楔块
11—螺钉 12—盖 13—滑柱 14—法兰
15—压电陶瓷 16—绝缘套 17—垫

5.4 气浮导轨

气浮导轨具有摩擦系数小，导向精度高的特点，近年来在精密机械中应用越来越广泛，它不但可以实现大行程高精度，而且采取相应的措施也可实现微动。

图 11-51 是日本富士通公司研制的精密自动掩膜对准微动台，特点采用气浮支承、楔形缩小机构，在 2mm 的范围内，获得 $0.03\mu\text{m}$ 的分辨力。

图 11-52 是磁盘记录装置中的高速定位机构。采用气浮支承直线电动机驱动。在 $100\mu\text{m}$ 的范围内可获得 $0.1\mu\text{m}$ 的高速定位精度。

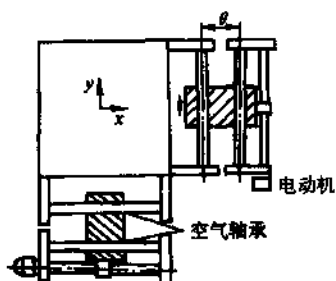


图 11-51 精密自动掩膜对准微动台

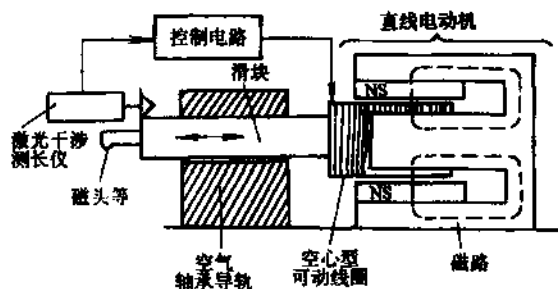


图 11-52 高速定位机构

第 12 章 误差的在线检测与补偿技术

随着现代制造技术的发展,对加工精度提出了越来越高的要求;另外,由于数控机床(NC)、加工中心(MC)、柔性制造系统(FMS)的普及,以及智能制造系统(IMS)、计算机集成制造系统(CIMS)的兴起,使得制造系统正向集成化、智能方向发展,因此现代加工中误差的在线检测与补偿技术就成为一个重要的技术问题,得到世界各国的广泛关注。

1 概述

1.1 先进制造技术及其发展

先进制造技术(AMT:Advanced Manufacturing Technology)是 80 年代末期最早由美国提出的;直到 1994 年初,美国联邦科学、工程和技术协调委员会(FCCSET)下属的工业和技术委员会先进制造技术工作组提出了有关先进制造技术的分类目录,这是对 AMT 内涵的首次较系统的说明。根据这个分类目录,先进制造技术主要包括以下三个技术群:

- 1) 主体技术群,包括面向制造的设计技术群和制造工艺技术群。
- 2) 支撑技术群。
- 3) 制造基础设施(制造技术环境)。

上述三部分相互联系、相互促进,组成一个完整的体系,每一部分均不可缺少,否则就很难发挥预期的整体功能效益。下面分别加以叙述。

1.1.1 主体技术群

这是制造技术的核心,它包括两个基本部分:有关产品设计的技术和工艺技术。

面向制造的设计技术群包括以下几个方面:

(1) 产品、工艺过程和工厂设计 包括计算机辅助设计(CAD),适于加工和装配的设计、工艺过程建模和仿真、工艺规程设计、系统工程和集成、工作环境设计(劳动环境设计)、符合环保的设计。运用上述先进的设计技术,可以使设计更加有效、快捷。

(2) 快速样件成形技术(快速原型法,RPM:Rapid Part Manufacturing) 它是将 CAD 与各种自由造型制造(FFF)等新的制造技术直接结合起来,从而使 CAD 直接生产出零件的实体物理模型、样件、铸模或冲模。

(3) 并行工程(Concurrent Engineering) 这一技术旨在将产品设计与制造以及相关过程进行系统的综合,以期在产品设计的同时将生产、维修的各个环节考虑进去,不仅大大缩短了产品生产周期,而且可以将生产过程中产生的废物减少到最低程度,使最终产品成为可回收、可再资源的资源。该技术的关键在于:将 CAD、CAM、CAT、MIS 等有机集成起来,并打破了以前设计、试验生产的中间环节,引进动态并行机制,即将产品生产周期中产品的设计、生产计划、生产加工、质量检验、市场分析等各种因素进行有机综合、并行处理,同步规划。

(4) 其他技术 其中主要是制造技术,制造技术工艺群主要包括:

- 1) 材料生产工艺。
- 2) 加工工艺:包括切削工艺,铸造、锻造、模塑成型(注塑、模压等),压力加工(冷冲压

加工等), 热处理、表面涂层和改性, 电子工业工艺(制版印刷、光刻/沉积、离子注入等), 复合材料工艺(预浸处理、纤维卷绕、树脂转换模塑、纤维束置放等)。

- 3) 连接和装配 包括连接(焊接、铆接等), 装配(机械的、电子的装配等), 电子封装。
- 4) 测试和检验 包括测量技术、检验规程编制。
- 5) 环保技术 包括减少废弃物、能量存储。
- 6) 维修技术。
- 7) 其他。

1.1.2 支撑技术群

基本的生产过程需要一系列的支撑技术, 它们也是用于保证和改善主体技术的协调运行所需的技术, 是工具、手段和系统集成基础技术。主要包括:

- 1) 信息技术, 包括接口和通信, 数据库技术, 集成框架, 软件工程, 人工智能, 专家系统和神经网络, 决策支持系统。
- 2) 标准和框架, 包括数据标准, 产品定义标准, 工艺标准, 接口框架等。
- 3) 机床和工具技术。
- 4) 传感器和控制技术, 包括单机加工单元和过程的控制, 执行机构, 传感器和传感器组合, 生产作业计划。
- 5) 其他。

1.1.3 制造技术基础设施

制造技术基础设施是指为了管理好各种适当的技术群的开发并鼓励这些技术在整个国家工业(基地)内推广应用而采取的各种方案和机制。由于技术只有应用适当才会产生效用, 所以其技术基础设施的各要素和基本技术本身同样重要。这些要素包括了车间工人、工程技术人员和管理人员在各种先进生产技术和方案方面的培训和教育, 这些技术和方案将提高企业的生产竞争力。可以说, 制造技术的基础设施是使制造技术适应具体企业应用环境充分发挥其功能、取得最佳效益的一系列措施, 是使先进的制造技术与企业组织管理体制和使用技术的人员协调工作的系统工程, 是先进制造技术生长和壮大的土壤, 因而是其不可分割的一个组成部分。

它主要包括: 质量管理, 用户/供应商交互作用, 工作人员培训和教育, 全局监督和基准评测, 技术获取和利用, 以及其他相关技术。

以上是先进制造技术的基本组成。目前, 先进制造技术的发展趋势主要有以下几个方面:

- 1) 常规制造工艺的优化, 优化方向有高效化、精密化、清洁化、强韧化。
- 2) 新型(非常规)加工方法的发展, 如激光加工技术、电磁加工技术、超塑加工技术、复合加工技术。
- 3) 专业、学科间交叉融合, 界限逐渐淡化、消失。
- 4) 工艺研究由经验走向定量分析。
- 5) 高新技术与传统工艺的紧密结合。

根据工业发达国家的技术发展动向、趋势及有关专家预测, 先进制造技术的前沿有以下12项: 无余量精密成形技术, 纳米技术与微型机械, 计算机辅助热加工工艺设计及组织、性能、质量、预测技术, 自由造型制造与快速零件制造技术, 新型材料的成形、加工技术, 极限条件下的成形、加工技术, 同步工程技术, 计算机集成制造技术, 智能制造技术, 机械制造清洁生产技术, 具有决策支持功能的系统管理技术, 精益生产等新型生产方式。

1.2 先进制造系统中的质量监控技术

自动化的机床加工通常是在高速、有切削液等的环境下进行的,这使得传统靠人工的过程监控无法进行。因此,自动化的加工过程监控就成为必需,其目的有以下几方面:保证机床系统安全运行,使设备避免严重的损坏,保证工件质量,缩短加工辅助时间,实现资源优化使用。

加工过程监控项目主要包括:机床运行状态监视、加工过程监视、刀具实时监视和加工过程工件质量监视。其详细内容见图 12-1。

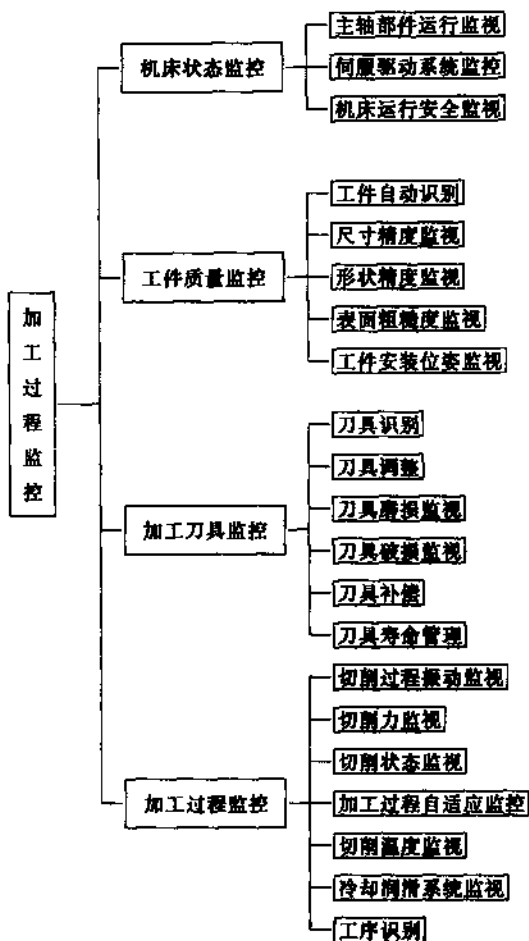


图 12-1 加工过程监视项目及内容

先进制造系统中加工过程的监测与控制系统基本由下列几个部分组成。

1.2.1 传感器

为了充分发挥无人控制加工中心的潜力,必须解决的问题是开发可靠的性能好的传感器来监测机器的运转,以确保高效的金属切除率,并在发生事故或刀具折断时能采取相应措施。

根据传感器的用途,可按下述进行分类:传感器的物理现象,像拉伸和电阻的关系等;传感器在工程中的应用情况——直接的还是间接的,连续的还是间断的,过程后的还是过程中的;多传感器系统和能完成局部信号处理与调整的智能传感器。

1.2.2 信号调理

信号调理涉及的内容主要有两方面:为提取所需数据进行的数据收集,包括信号放大、滤

波、A/D 转换等；其次是在时域，频域或是借助对数倒频谱分析来进行的评价。

1.2.3 建模

模型是联系测量值与监控主体所必需的，例如，进给力信号与切削刀具磨损状态相联系用以防止刀具损坏。模型的建立可以通过物理关系也可以通过实验解决。一个模型必须借助于数学公式，并需输入数据。固定模型由不变的参数组成，这些参数必须在操作开始之前被编成程序；适应模型可根据大量的信息修正参数；自学习模型能够在自我观测的基础上按照设计的策略修正参数；多模型系统包含一个以上的模型，而其总的性能则取决于这些模型间的相互作用。

1.2.4 控制策略的确定

1. 监控系统的种类

目前，常见的监控系统有以下几种：

(1) 监测系统 属于开环系统。测量机床或加工过程本身的状态，并将它们在显示器上表示出来，或发出警报等待操作人员处理。

(2) 诊断系统 也属于开环系统。监测并试图发现加工中的故障与原始状况间的函数和因果关系。

(3) 自适应系统 属闭环系统，它能按照给定的编入程序中的策略自动地修改加工条件。最简单的系统能在发生故障时停止机床主运动或进给。较为复杂的系统是 ACC 或 ACD 系统。ACC 系统保证在不超力、转矩、功率或温度给定值的情况下，保持最大的材料去除率。ACD 系统能够根据规定的目标函数，如最小加工成本，来优化加工条件。

2. 监控系统的研究任务

早期的加工过程监控技术研究主要针对各类传感器信号及其特征参数的变化特性，监控策略一般是采用传统的经验模型和门限报警，且监控对象是针对单一工况和固定切削条件，监控系统无法与制造系统联网。因此，很难用于先进制造系统中多任务、多目标、工况频繁改变的柔性监控。为适应先进制造系统中加工过程监控的要求，目前的加工过程监控技术研究集中在以下几个方面：

1) 多传感器融合感知加工状态，以实现多目标，多工况和多种故障的监视和预报，使系统具有高的可靠性和精度。

2) 采用智能化的监控模型，使系统能对各种加工状态的决策进行自学习、自适应，并具有很高的实时性和鲁棒性。

3) 人工神经网络因其在模式识别和过程建模中具有自学习、自组织、并行处理、分布式信息存储以及高度非线性拟合等方面的优点，被广泛用于监控技术中的多传感器信息融合、智能识别、决策和过程数据建模等环节，使监控系统的性能获得了极大提高。

4) 集成化，柔性化的系统结构。监控系统不能再是独立于制造系统之外的部分，而必须集成到制造系统中，实现设计、制造、监控、管理信息的集成和共享，更好地提高了制造系统的效率，进一步保证了产品质量。

1.3 影响加工精度的因素

评价一台机床或加工中心质量优劣的最重要指标之一是它所能达到的加工精度，机床的制造者与使用者均希望精度指标达到高水平。

一般认为，机床的加工精度取决于几何精度和定位精度。现代 CNC 系统的加工中心最小

测量分辨力和最小位移量已达到 $1\mu\text{m}$ ，机床每个坐标的定位精度经过补偿后都可以达到 0.01mm 以内。但实际加工的孔距误差却是 $0.02\text{mm}/200\text{mm}$ ，引起这一加工误差的因素有很多，下面作一简要分析。

1.3.1 影响加工精度的主要因素

(1) 机床精度的影响 机床的几何精度在很大程度上会影响加工零件的形状误差(如两个面的垂直度,一个面的平面度、孔和端面的垂直度等)。而且,定位精度也会直接影响加工零件的尺寸精度。

另外,机床的几何精度误差所造成的阿贝误差也会对加工精度产生影响。如立式加工中心由于工作台面导轨与刀具移动作用线(即床身)不重合,二者之间的平行度误差就会造成阿贝误差。若 x 坐标方向的允差为 $0.025\text{mm}/750\text{mm}$,则要在工作台上安装一工件,镗两个相距 200mm 的孔,那么其加工误差可达 0.007mm 。此项阿贝误差与被加工件与床身间的垂直距离及 x 向的孔间距有关,工件在工作台面上安装位置越高, x 向孔间距越大,加工误差越大。

机床的各项精度对加工都有一定影响,所以根据各项实测精度,便可大致判断加工出的零件能达到什么精度。根据预测的误差,采取一些补偿方法也是提高机床加工精度的有效方法。

除此之外,机床各部件的热变形也是造成加工误差的重要因素。例如,JCS-018 立式加工中心主轴箱在主轴高速连续运转 2h 之后,主轴在 y 轴方向有 0.03mm 左右的伸长,造成加工零件有关尺寸产生 0.01mm 的误差。在实际加工中,主轴的工作是时停时转,有足够的冷却时间,因此其伸长对加工精度影响不太大;但当要求高精度时,就必须考虑这一因素的影响。又如,卧式加工中心上,由于主轴箱发热,造成立柱局部热变形,使主轴轴线前倾或后仰,也会造成加工误差。

(2) 加工零件自身变形的影响 工件在加工中产生变形,一般是由于温度变化和内应力改变而引起的,因此,加工中心在加工时需要解决零件的变形问题,如配备淋浴式工件冷却装置。

(3) 夹具误差的影响 夹具的安装误差,安装时对零件的卡压变形、夹具自身的误差等,也会直接影响加工精度。

(4) 刀具误差的影响 加工刀具在长时间使用之后必定会产生磨损,其直接后果便是加工零件的尺寸变化;另外,对于加工中心而言,刀具自动交换给提高生产效率带来了有利条件,但也带来了换刀误差,这已被一系列的工艺试验所证实。

图 12-2 基本概括了影响机床加工精度的各种因素。

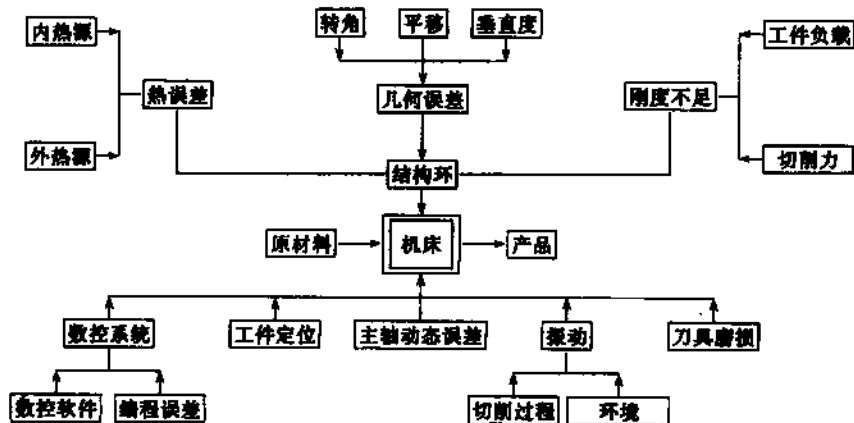


图 12-2 机床加工误差源

1.3.2 加工误差的分类

机床加工误差的分类方法有很多种。根据一批零件加工过程中造成误差的因素出现有无规律性，把加工误差分为系统误差和随机误差；根据其随时间变化的性质，又可分为准静态误差和动态误差。各种误差的定义及包括的内容见表 12-1。

表 12-1 机床加工误差的分类

误差名称		定义	包含内容
系统误差	常值系统误差	大小和方向在加工过程中恒定不变的误差	加工的原理误差；机床、刀具、夹具的几何误差；机床调整误差；机床受力变形误差；机床热平衡后的热变形误差；钻头、铰刀、齿轮刀具等刀具磨损误差
	变值系统误差	大小和方向按一定规律变化的误差	机床热平衡前的热变形误差；砂轮、车刀、端铣刀、单刃镗刀等刀具磨损误差
随机误差		其数值的大小和方向无一定规律，但就其总体而言服从统计规律的误差	毛坯误差；定位误差；测量误差；夹紧误差；内应力误差等
准静态误差		刀具与工件相对位置随时间变化缓慢且与机床自身结构有关的误差	机床几何误差；机床热变形误差；机床受力变形误差
动态误差		随时间快速变化的误差，主要影响工件的局部特性，如圆度，表面粗糙度等	主轴运动误差；机床结构的自激和强迫振动、惯性力造成的误差；CNC 控制器误差

1.4 保证加工精度的途径

进行误差分析和计算的最终目的，是为了消除和减小加工误差，提高加工精度。

长期以来，提高机床精度都是通过两种手段：误差避免和误差补偿。误差避免是一种“硬技术”，着重在设计 and 加工阶段消除所有可能的误差。从理论上讲，只要机床制造没有误差，环境条件得以完美控制，就不会有加工误差，但实际上这是不可能的，而误差补偿在生产工程的各领域内应用越来越广，已经被认为是一种经济而有效的方法。

实际上，人们使用误差补偿技术已经很长时间了，高精度的要求使我们今天更加自觉地应用这一技术。现代计算机与测量技术的发展，为误差补偿技术提供了更为广阔的前景。1995 年国际生产工程学会(CIRP)6 篇主题报告中有 3 篇是围绕精度展开的，其中又有 2 篇是关于通过补偿几何误差和热误差来提高加工和测量精度的，这足以说明误差补偿技术的重要性。

2 误差检测技术

2.1 误差检测技术简述

根据随时间变化的性质，机床加工误差可以分为两大类：准静态误差和动态误差。不同种类的误差其检测方法也不同。对于准静态误差，在加工过程中刀具与工件的相对位置随时间变化缓慢，因此，对这类误差的补偿采用最多的是预先标定误差的补偿方法，即先对误差进行测量，然后利用它标定或修改随后的工序过程，因此这种方法也叫非实时误差补偿方法。另外，准静态误差的在线测量技术目前在国际上也有较大发展，其基本思想是在刀具主轴上安装测量头以进行加工中的主动测量。

而对于动态误差, 由于其随时间的变化速度较快, 因此, 必须在加工过程中实时监测其变化情况, 即必须实现动态测量, 这就对信号传感器、信号调整和处理电路提出了更高的要求, 不仅要求在高速运动中不失真地获取被测信号, 而且还要求有高的信号处理速度和快的输出响应能力, 这也正是目前研究的难点所在。要进一步提高机床的加工精度, 进行动态误差的在线实时补偿是一个行之有效的手段, 因此, 动态误差的检测和补偿技术正越来越受到人们的广泛关注。

在下面的内容中, 我们根据误差检测技术中各种误差的不同表现形式, 分别从位移和振动等两个方面对目前较常用的几种检测方法作一介绍。

2.2 位移量的检测

由于各种机床误差归根结底表现为刀具与工件相对位置的变化, 因此, 位移量的检测是误差检测的一个重要内容。由于位移量的检测方法很多, 我们这里介绍几种主要的位移检测方法: 电阻应变式、电感式、电容式、霍尔式、光栅和激光测量方法。

2.2.1 电阻应变式位移传感器

电阻应变式传感器由电阻应变片、弹性元件和测量电路等部分组成, 电阻应变片也叫电阻应变计, 用来测量物体的受力状态和机械变形, 并转换为电阻的变化。它由敏感栅 1、基底 2、盖片 3 和引线 4 组成, 见图 12-3。根据敏感栅的材料不同, 又分为金属应变片和半导体应变片; 根据基底材料分为纸基和胶基两种; 根据工作温度又分为低温、常温、中温和高温应变片。

1. 金属电阻应变片

测量应变时, 应变片用粘合剂粘贴在试件上, 当试件在外力作用下产生变形时, 应变片的敏感栅也发生变形, 使金属丝的电阻值随其变形而改变, 这一物理现象称电阻应变效应, 通过测量应变片电阻值的变化就可反映出外界作用力的大小。

金属电阻丝的电阻值可用下式表示:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (12-1)$$

式中 R ——电阻丝的电阻值;

L ——电阻丝的长度;

A ——电阻丝的截面积;

ρ ——电阻丝的电阻率。

当电阻丝受到拉伸或压缩时, 其几何尺寸和电阻值同时发生变化:

$$\frac{dR}{R} = \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} + \frac{d\rho}{\rho}$$

若电阻丝横截面半径为 r , 纵向应变为 ϵ , 横向应变为 ϵ_1 , 电阻丝材料的泊松比为 μ , 则

$$\frac{dL}{L} = \epsilon$$

$$\frac{dA}{A} = \frac{2\pi r dr}{\pi r^2} = 2 \frac{dr}{r} = 2\epsilon_1 = -2\mu\epsilon$$

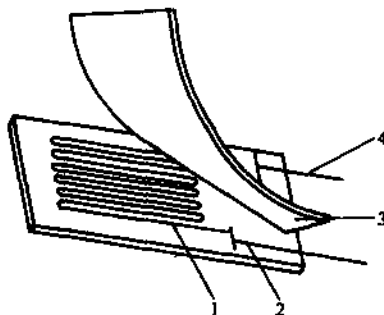


图 12-3 电阻应变片

1—敏感栅 2—基底 3—盖片 4—引线

那么
$$\frac{dR}{R} = (1 + 2\mu)\epsilon + \frac{d\rho}{\rho} \quad (12-2)$$

所以，金属电阻丝的灵敏度为

$$S = \frac{dR/R}{\epsilon} = (1 + 2\mu) + \frac{d\rho/\rho}{\epsilon} \quad (12-3)$$

由此可知，电阻丝的灵敏度受两个因素的影响。一个是电阻丝几何尺寸变化产生的 $(1 + 2\mu)$ 项；另一个是电阻率变化产生的 $\frac{d\rho/\rho}{\epsilon}$ 项。当电阻丝的材料确定后，在弹性范围内 μ 为常数，对金属材料来讲后一项很小，可忽略不计，因此 S 为一常数。故

$$\frac{dR}{R} = S\epsilon \quad (12-4)$$

上式表明金属电阻丝的电阻变化率与沿着它的纵向应变成线性关系，知道了应变片的 S 值与电阻的相对变化，就可求出应变 ϵ 。

金属电阻应变片常见的结构形式有两种：丝式和箔式，如图12-4所示。

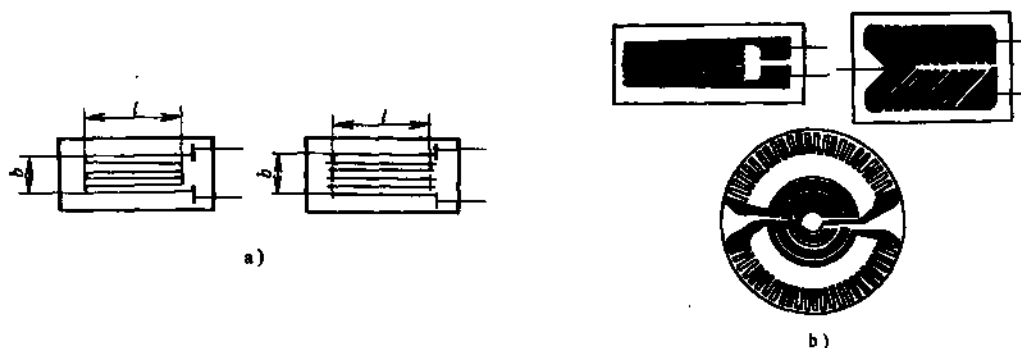


图 12-4 金属电阻应变片的结构

a) 丝式应变片 b) 箔式应变片

常见的敏感栅材料和性能如表 12-2 所示。

表 12-2 常用敏感栅材料及主要性能

材料名称	成分 (质量分数,%)	灵敏系数 (S)	电阻率 ρ / $(\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m})$	电阻温度系数 α $\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$	线胀系数 β $\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$	最高工作温度 $^\circ\text{C}$
康铜	Ni 45 Cu 55	1.9~2.1	0.45~0.52	± 20	15	300(静态) 400(动态)
镍铬合金	Ni 80 Cr 20	2.1~2.3	1.0~1.1	110~130	14	450(静态) 800(动态)
镍基合金 ^① (6JYZ-C ₃)	Ni 74 Cr 20 Al 2.5 Fe 2.5	2.4~2.6	1.24~1.42	± 20	13.3	450(静态)
镍基合金 ^② (6JYZ-C ₄)	Ni 75 Cr 20 Al 2.5 Cu 2.5					800(动态)

(续)

材料名称	成分 (质量分数,%)	灵敏系数 (S)	电阻率 ρ /(\(\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}\))	电阻温度系数 α $\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$	线胀系数 β $\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$	最高工作温度 /°C
铁铬铝合金	Fe 70 Cr 25 Al 5	2.8	1.3~1.5	30~40	14	700(静态) 1000(动态)
铂钨合金	Pt 92 W 8	3.5	0.68	227	8.3~9.2	800(静态) 1000(动态)

① 也称卡玛(KARMA)合金。

② 也称伊文(EVANOHM)合金。

应变片用来感受弹性元件的变形并转换成电阻的变化,该电阻变化可由直流电桥进行测量。应变片在电桥中的联接有三种基本线路,如图 12-5 所示。其中图 12-5a 有一个桥臂为随试件变形的待测应变片,用 $R \pm \Delta R$ 表示,以下称工作应变片,这种接法称单臂接法;图 12-5b 中两个桥臂为工作应变片,称半桥接法,图 12-5c 中四个桥臂均为工作应变片,称全桥接法。

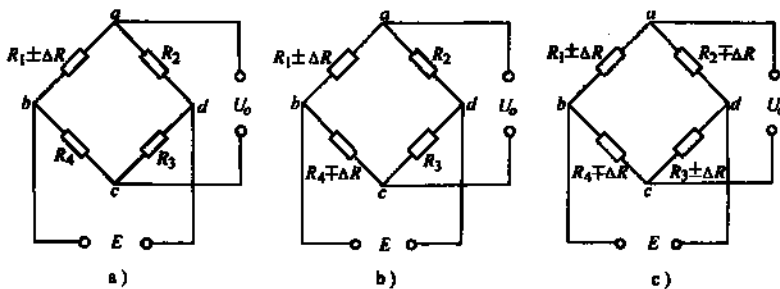


图 12-5 应变片在电路中的接法

a) 单臂接法 b) 半桥接法 c) 全桥接法

设 ΔR 为工作应变片 R_1 感受应变后产生的电阻增量, $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$, 一般 $R \gg \Delta R$, 则单臂接法的输出电压为

$$U_0 \approx \frac{1}{4} \frac{\Delta R}{R} E = \frac{1}{4} ES \epsilon \quad (12-5)$$

半桥接法的输出电压为

$$U_0 \approx \frac{1}{4} E \left(\frac{\Delta R_1}{R} - \frac{\Delta R_4}{R} \right) = \frac{1}{4} ES (\epsilon_1 - \epsilon_4) \quad (12-6)$$

全桥接法的输出电压为

$$U_0 \approx \frac{1}{4} ES (\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4) \quad (12-7)$$

实际上,由于联接导线、基底材料、粘合剂等都会随温度变化而引起测量误差,因而为了提高测量精度,必须进行温度补偿。常见的方法有电路补偿法和自补偿法。

2. 半导体应变片

半导体应变片的敏感元件是半导体材料,它是利用压阻效应工作的。

所谓压阻效应就是当半导体材料沿某一方向受到外加载荷作用时,由应力引起电阻变化的

现象。若 σ 表示应力，则电阻率的变化为

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \pi_l$$

式中 π_l ——半导体材料的压阻系数，其大小与半导体材料及晶体方向有关。

根据虎克定律 $\sigma = E\varepsilon$ ，代入上式得：

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \pi_l E\varepsilon$$

将此式代入式(12-2)得：

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\mu)\varepsilon + \pi_l E\varepsilon$$

上式右边第一项是几何尺寸变化对电阻的影响，第二项为压阻效应的影响。由于半导体材料的形状效应远小于压阻效应，略去第一项得：

$$\frac{\Delta R}{R} \approx \pi_l E\varepsilon \quad (12-8)$$

半导体应变片和金属应变片一样，都以灵敏度 S 表征其特性，所以半导体应变片的灵敏度为

$$S = \pi_l E$$

其数值比金属应变片大几十倍至上百倍。

半导体应变片分为体型和扩散型两种结构。体型半导体应变片是将单晶硅或锗加工成条状两端镀上金膜，焊上内引线后粘贴在胶膜基底上制成，如图 12-6 所示。体型半导体应变片由于将硅条粘在弹性元件上，所以存在较大的滞后和蠕变，难于集成化，固有频率低，传递应变不理想。

扩散型半导体应变片是在电阻率很大的单晶硅支持片上直接扩散一层 P 型或 N 型杂质，形成极薄的导电层，焊上电极即成。其固有频率可高达 1.5MHz 以上，易于微型化和批量生产，机械滞后和蠕变小，精度高。但也存在温度升高时绝缘电阻下降、制造工艺复杂、成本高的缺点。若用硅支持片作弹性元件，在其上面直接扩散 P 型和 N 型半导体组成电桥，可制成如图 12-7a 所示的整体式传感器。

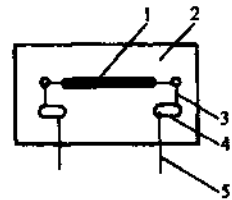


图 12-6 体型半导体应变片

1—单晶硅条 2—基底
3—内引线 4—焊接电极 5—引线

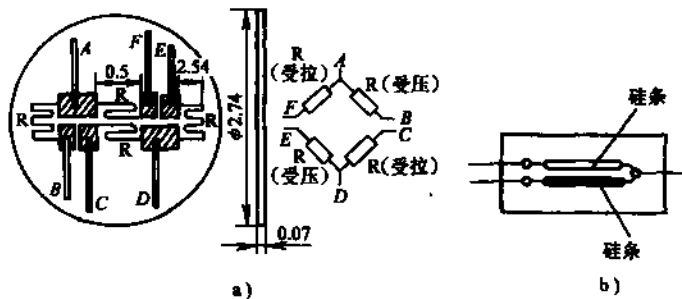


图 12-7 两种半导体应变片

a) 扩散型半导体应变片构成的整体式压力传感器 b) 温度自补偿应变片

为克服普通半导体应变片电阻温度系数大，对环境温度变化敏感的缺点，我们还可以采用如图 12-7b 所示的温度自补偿应变片。它由具有正负灵敏度的两个硅条布置在一个基底上构

成。使用时硅条 1 和 2 在电桥中接成邻臂即可达到温度补偿的目的。

国内部分应变式位移传感器性能如表 12-3 所示。

表 12-3 国内部分应变式位移传感器性能比较

名称	生产厂家	测量范围 /mm	线性度 (%)	灵敏度	重复性 (%)	工作温度 /°C	测量力/(N)	
WR 系列	WR2	西南结构力学研究所	0~2	≤0.5		≤0.5	-10~50	≤5
	WR5		0~5	≤0.5		≤0.5	-10~50	≤5
	WR10		0~10	≤0.5		≤0.5	-10~50	≤5
	WR15		0~15	≤0.5		≤0.5	-10~50	≤5
	WR20		0~20	≤0.5		≤0.5	-10~50	≤5
	WR25		0~25	≤0.5		≤0.5	-10~50	≤5
DY-A1 型电测引伸计	北京无线电元件四厂	20~100		1mV/V		-30~100		
LDC 型杠杆式引伸计	机电部长春实验机研究所	25~100	0.5					
YHD 型电子引伸计	同济大学	0~30	0.1	$300 \times 10^{-6} \epsilon^{\text{①}}$			≤4.0	
GYE-1 应变式引伸计	国营 521 厂 (汉中)	0~2	0.1			0~40		
DYJ-50 应变式引伸计	扬州仪表厂	1	0.3			5~40		

① ϵ 为电阻应变片的应变。

2.2.2 电感式位移传感器

电感式传感器是利用电磁感应原理，通过线圈自感或互感的变化来实现测量目的。常见的有自感式传感器、差动变压器和电涡流传感器三种。

1. 自感式传感器

自感式传感器由线圈 1、铁心 2 和衔铁 3 组成，如图 12-8 所示。铁心和衔铁之间留有空气

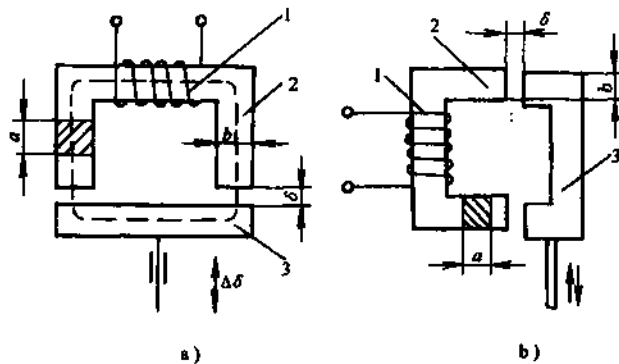


图 12-8 自感式传感器

a) 变气隙式 b) 变截面积式
1—线圈 2—铁心 3—衔铁

隙, 其厚度为 δ 、横截面积为 A , 当衔铁移动时使 δ 或 A 发生变化, 从而引起电感变化。

根据电磁感应原理, 线圈的电感量为

$$L = \frac{W^2}{R_m} \quad (12-9)$$

式中 W ——线圈匝数;

R_m ——磁路的总磁阻。

如果气隙 δ 较小, 且不考虑磁路的铁损时, R_m 由铁心、衔铁的磁阻 R_F 和空气隙的磁阻 R_δ 组成, 即

$$R_m = R_F + R_\delta = \frac{L_F}{\mu_F A_F} + \frac{2\delta}{\mu_0 A}$$

式中 L_F ——铁心和衔铁的磁路长度;

A_F ——铁心和衔铁的横截面积;

μ_F ——铁心和衔铁的导磁率;

δ ——空气隙的厚度;

A ——空气隙的导磁横截面积;

μ_0 ——空气的导磁率。

由于铁心和衔铁通常是用导磁性能很好的纯铁或硅铁制成, 且一般工作在非饱和状态下, 故 $\mu_F \gg \mu_0$, 所以 R_F 可略去, 于是

$$R_m = \frac{2\delta}{\mu_0 A}$$

代入式(12-9)得:

$$L = \frac{W^2}{R_m} = \frac{W^2 \mu_0 A}{2\delta} \quad (12-10)$$

由此可知, 电感 L 仅与线圈和磁路的参数有关。当线圈匝数确定后, L 与气隙导磁截面和 A 成正比, 与气隙厚度 δ 成反比。因此, 保持 A 不变, 改变 δ , 可构成变气隙式自感传感器; 若保持 δ 不变而改变 A , 则构成变截面积式自感传感器。

如果在空心线圈中放置一个活动铁心, 移动铁心也可引起线圈电感变化, 这种结构称为螺管式自感传感器。

从式(12-10)中可求出变气隙式自感传感器的灵敏度为:

$$S = \frac{dL}{d\delta} = -\frac{W^2 \mu_0 A}{2\delta^2} \quad (12-11)$$

由于 S 与 δ 的平方成反比, 所以输出与输入呈非线性关系, 如图 12-9a 所示。要保持较好的线性度, 必须限制测量范围, 一般取 $\Delta\delta = (0.1 \sim 0.2)\delta_0$ 。

而变截面积式传感器的灵敏度为

$$S = \frac{dL}{dA} = \frac{W^2 \mu_0}{\delta} = \text{常数} \quad (12-12)$$

其输出与输入呈线性关系, 如图 12-9b 所示, 因此测量范围要比变气隙式大得多。

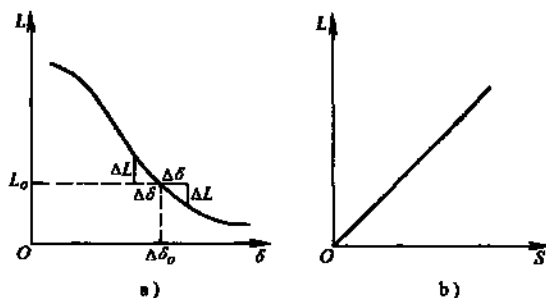


图 12-9 自感传感器的输入输出关系

a) 变气隙式 b) 变截面积式

由于自感式传感器当衔铁无位移时，测量电路中亦有电流流过、且灵敏度较低、易受外界干扰，因此实际应用中大多采用差动形式。差动变气隙式传感器的结构原理如图 12-10 所示，它由两个完全相同的单线圈自感传感器组成，在两个铁心之间有一个公用衔铁。当衔铁处于中间位置时，传感器输出电压为零，而且这种结构的灵敏度较单圈式增大了一倍，非线性也得以改善，而且还可以消除温度变化带来的影响。

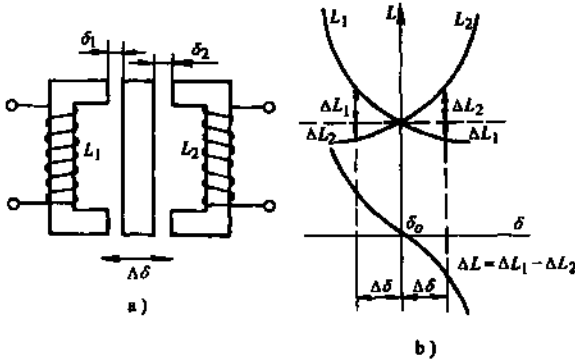


图 12-10 差动变气隙式传感器及其特性
a) 结构 b) 特性曲线

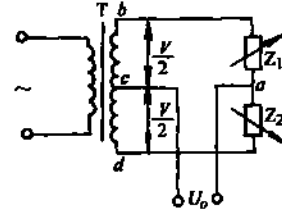


图 12-11 变压器电桥

自感式传感器的测量电路大多采用交流电桥，利用高频电源作为载波对信号进行调幅处理，经放大后送相敏检波器，解调出符合要求的电压信号。其电桥形式主要有两种：变压器电桥是将差动自感传感器的两个线圈接入电桥作为邻臂 Z_1 和 Z_2 ，变压器的次级绕组从中心抽头组成电桥的另两臂，如图 12-11 所示。其输出电压 U_o 为

$$U_o = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} V - \frac{V}{2}$$

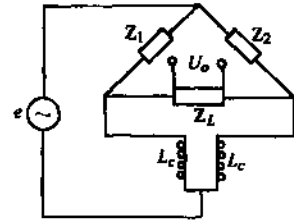
电感线圈的复数阻抗 $Z = r + j\omega L$ ，当 $r \ll \omega L$ 时，

$$U_o = \left(\frac{2L_2}{L_1 + L_2} - 1 \right) \frac{e}{2} \tag{12-13}$$

紧密耦合电感臂电桥电路如图 12-12 所示。电桥的两个工作臂由差动传感器的阻抗 Z_1 和 Z_2 组成，另两臂由两个参数相同紧密耦合的电感线圈 L_c 组成。其电桥输出电压的表达式为

$$U_o = \frac{\Delta Z}{Z} \frac{\left[1 + \frac{Z_{12}(1 - k_M)}{Z} \right] / \left[1 + \frac{Z_{12}(1 + k_M)}{Z} \right]}{1 + \frac{1}{2} \left[\frac{Z_{12}(1 - k_M)}{Z} + \frac{Z}{Z_{12}(1 - k_M)} \right] + \frac{Z + Z_{12}(1 - k_M)}{Z_o}} e$$

(12-14) 图 12-12 紧密耦合电感臂电桥



- 式中 $Z_{12} = j\omega L_c$;
- Z ——工作臂阻抗;
- Z_o ——负载阻抗;
- $\Delta Z = Z_2 - Z_1$;
- k_M ——耦合系数, $k_M = \pm \frac{M}{L_c}$;
- M ——两紧密耦合电感线圈 L_c 的互感。

这种电桥的零点稳定性较高，简化了电桥的屏蔽和接地。

2. 差动变压器

变压器式传感器如同一个变压器，它是将被测物体的位移变化变成线圈互感系数的变化。初级线圈接入电源后，次级线圈因互感作用产生输出电压，当互感变化时，输出电压亦发生变化。这种传感器通常采用差动式，故称差动变压器。

差动变压器的原理如图 12-13a 所示。它由两个铁心和一个公共衔铁组成，衔铁位于两铁心中间，每个铁心上各有一个初级线圈和一个次级线圈。两个初级线圈 W_1 和 W_2 串接后通入交流激励电压 U_1 ，则线圈 W_1 中产生的磁通通过次级 W_{12} ，由于互感作用在 W_{12} 中产生互感电势 V_1 ，而 W_2 中产生的磁通在 W_{22} 中产生互感电势 V_2 。两个变压器的结构参数完全对称，两个次级线圈按感应电势反向串接，如图 12-13b 所示。则输出电压为

$$U_0 = V_1 - V_2 \quad (12-15)$$

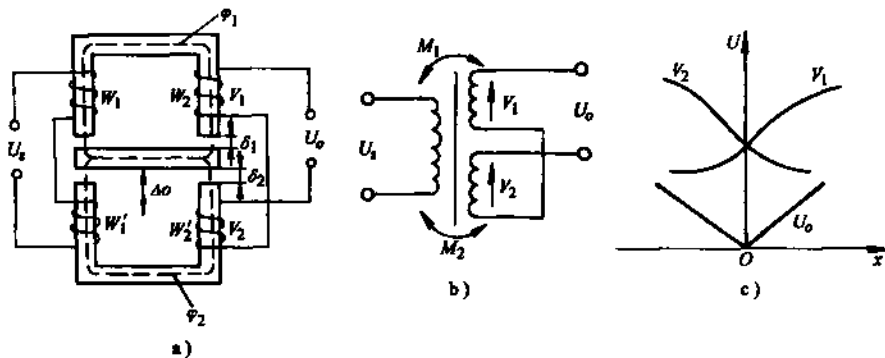


图 12-13 差动变压器原理

a) 工作原理 b) 等效电路 c) 输出特性曲线

次级线圈产生的感应电势大小与激磁电流 i 的变化率成正比，即

$$V = -M \frac{di}{dt} \quad (12-16)$$

式中 M ——初、次级线圈之间的互感，其大小与两线圈相对位置及周围介质的导磁能力有关；
 i ——流过初级线圈的激磁电流。

当衔铁处在中间位置时， $M_1 = M_2$ ， $V_1 = V_2$ ，故 $U_0 = 0$ ；当衔铁偏离中间位置时，衔铁两边的气隙大小改变， $\delta_1 \neq \delta_2$ ，使两边磁路的磁阻变化，从而使磁通 $\phi_1 \neq \phi_2$ ，由于磁通的变化使互感系数一个增大，一个减小， $M_1 \neq M_2$ ， $V_1 \neq V_2$ ，所以 $U_0 \neq 0$ 。这样就把衔铁的位移变成电压信号输出，输出特性曲线如图 12-13c 所示。

差动变压器输出是一个调幅波，因此，必须经过解调机滤波才能反映出衔铁移动的大小和方向。常用的解调电路是相敏检波电路和差动整流电路，其各自电路图如图 12-14 所示。

3. 电涡流传感器

根据电磁感应原理，当金属板置于变化着的磁场中运动时，金属板内就会感应产生感应电流，因为该电流在金属板内自己闭合，所以称涡流。

把一个半径为 r 的扁平线圈放置在金属导体附近，线圈中通入频率为 f 的交变电流 i_1 ，在线圈的周围便产生一个交变磁场，磁场强度为 H_1 ， H_1 在金属表面感应产生涡电流 i_2 ，如图 12-15a 所示。此涡流又产生一个与 H_1 方向相反的交变磁场，磁场强度为 H_2 ，由于 H_2 的反作

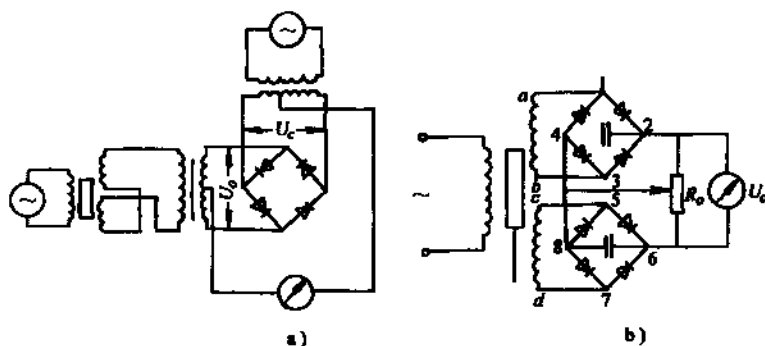


图 12-14 差动变压器的测量电路

a) 相敏检波电路 b) 差动整流电路

用, 必须削弱线圈的磁场 H_1 , 使线圈的电感 L 发生变化, 从而使阻抗 Z 变化。而 i_2 与金属导体的电阻率 ρ , 磁导率 μ , 厚度 h 和线圈与金属导体表面之间的距离 x 有关。若仅使 x 变化, 其他参数固定不变, 则可通过测量电路将 L 或 Z 的变化转换为电压 U 的变化, 从而得到线圈与导体之间的距离 x 。

线圈电感 L 或阻抗 Z 随距离 x 的变化呈非线性关系, 其线性范围的大小与灵敏度高低与线圈的形状和大小有关。线圈内径 d 对传感器的参数影响较小, 外径 D 影响较大。匝数不变, 外径小时灵敏度高, 但线性范围减小; 线圈厚度小时灵敏度高

根据涡流传感器的工作原理, 被测量可以变换为线圈阻抗或电感的变化。阻抗可以利用电桥测量, 电感可以利用谐振电路进行测量。

谐振法是把传感器线圈的等效电感变换成电压或电流的变化。传感器线圈与电容并联组成 LC 并联谐振电路, 其谐振频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (12-17)$$

当电感 L 发生变化时, 回路的等效阻抗和谐振频率随之发生变化。因此, 利用测量谐振回路阻抗或谐振频率的方法可以间接测出被测参数。常见的测量电路有调幅式和调频式两种, 如图 12-16 所示

表 12-4 列出了国内主要电感式

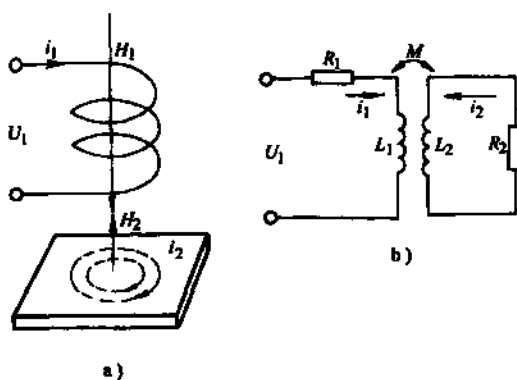


图 12-15 涡流传感器的基本原理

a) 涡流的产生 b) 等效电路

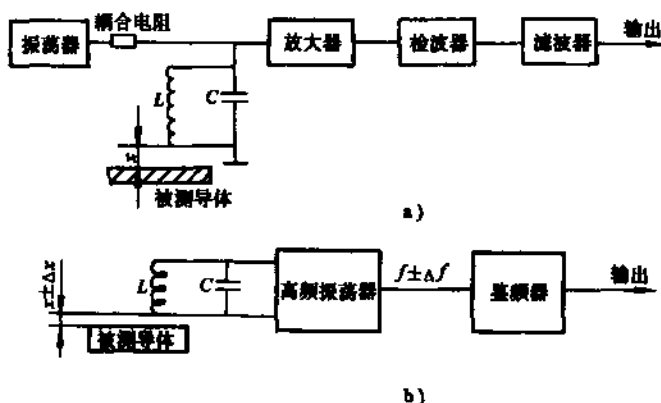


图 12-16 涡流传感器测量电路

a) 调幅式 b) 调频式

位移传感器的性能与生产厂家。

表 12-4 国内主要电感式位移传感器性能比较

类别	名称	生产厂家	测量范围/mm	线性度(%)	分辨力/ μm	灵敏度	工作温度/ $^{\circ}\text{C}$	
自感式传感器	HEL型电感式位移计	同济大学	0~5~50	0.5			-10~40	
		温州市传感器厂	0~50	0.5			-10~45 -20~85	
	电感传感器—记录仪	航空航天大学精密机械研究所	0.01、0.02、0.05、0.1、0.2、0.5、1					
	BWG系列电感调频式位移传感器	空军工程设计研究所	0~2、0~5、0~10、0~20、0~30、0~50、0~100、0~200	0.1、0.2、0.35、0.5、1	$<4 \times 10^{-4}$ FS/Hz ^①		-20~50	
差动变压器	WY型系列位移传感器	安徽传感器厂	0.1~1500, $\pm 0.1 \sim \pm 750$	0.1 0.05		0.5~20 mV/V/mm ^②	-10~70	
	WYDC型系列直流位移传感器		1~600 $\pm 0.5 \sim \pm 300$	1、0.5、0.3、0.2、0.1		0.5~10 mV/V/mm	-10~50	
	WYW型微位移传感器		$\pm 0.1 \sim \pm 2$	0.5、0.3、0.2、0.1、0.05		10~20 mV/V/mm	-10~70	
	LVDT差动变压器位移传感器	LVD-1	南京传感器厂	0~ ± 1	<0.5	<1	600mV/mm	
		LVD-5		0~ ± 5 0~10	<0.8	<2	600mV/mm	
		LVD-10		0~ ± 10 0~20	<1	<10	300mV/mm	
		LVD-15		0~ ± 15 0~30	<1	<10	100mV/mm	
		LVD-30		0~ ± 30 0~60	<1	<20	270mV/mm	
		LVD-50		0~ ± 50 0~100	<1	<20	150mV/mm	
		LVD-200		0~ ± 200 0~400	<1	<30	50mV/mm	
GW3型位移测量仪	西南结构力学研究所	0~ ± 0.8 0~1.6	$\leq \pm 0.5$		1mV/ μm			
差动变压器式位移传感器	南京航空学院	0~ ± 1 、 0~ ± 5 、 0~ ± 10 、 0~ ± 15 、 0~ ± 30 、 0~ ± 50 、 0~ ± 200	0.3~1	1	150~180 mV/mm			

(续)

类别	名称		生产厂家	测量范围/mm	线性度(%)	分辨力/ μm	灵敏度	工作温度/ $^{\circ}\text{C}$
涡流传感器	8500 涡流 传感 器	85811-01	北京测振 仪器厂	1.5	1.5	1	8mV/ μm	-30~150
		85811-02		4	2	3	4mV/ μm	-30~150
		85811-03		10	1.5	10	0.8mV/ μm	-30~150
	E-1型涡流传感器		东南大学	20~85	0.8		0.1mV/ μm	
	WD型 电 涡 流 传 感 器	WD I	西南力学研 究所	0~1.5	$\leq \pm 1$		5.5mV/ μm	-15~85
		WD II 10		0~1	$\leq \pm 1.2$		8.5mV/ μm	-15~85
		WD II 20		0~2	$\leq \pm 1.5$		4.2mV/ μm	-15~85
		WD II 40		0~4	$\leq \pm 1.5$		2mV/ μm	-15~85
		WD III 10		0~1	$\leq \pm 1.2$		8.5mV/ μm	-15~85
		WD III 30		0~3	$\leq \pm 1.5$		2.8mV/ μm	-15~85
		WD III 50		0~5	$\leq \pm 1.5$		1.7mV/ μm	-15~85
ZZF6-II型电 涡流式位移振 幅测量仪		杭州自动 化仪表厂	0.5~30	<3			-10~45	

① FS为满量程。

② mV/V/mm表示输出电压/励磁电压/被测位移。

2.2.3 电容式传感器

1. 电容式传感器工作原理

电容式传感器是将被测量的变化转化成电容量变化的一种传感器。实际上,其本身就是一个可变电容器。

由物理学可知,两平行平板组成的电容器,如果不考虑边缘效应,其电容为

$$C = \epsilon \frac{A}{\delta} \quad (12-17)$$

式中 ϵ ——极板间介质的介电常数;

A ——极板的遮盖面积;

δ ——极板间的距离。

当被测量的变化引起 δ 、 A 或 ϵ 中任一参数发生变化时,电容 C 也就随之变化,这就是电容式传感器的工作原理。

2. 电容式传感器的基本类型

根据上述原理,在应用中电容式传感器分为三种基本类型:变极距式、变面积式和变介电常数式。

(1) 变极距式电容传感器 变极距式电容传感器由固定极板1和可动极板2组成,如图

12-17a 所示。电容计算如式(12-17)所示，灵敏度为

$$S = \frac{dC}{d\delta} = -\frac{\epsilon A}{\delta^2} \quad (12-18)$$

即灵敏度与极距 δ 的平方成正比，输出与输入呈非线性关系如图 12-17b 所示。一般 $\Delta\delta \approx (0.01 \sim 0.1)\delta_0$ 。

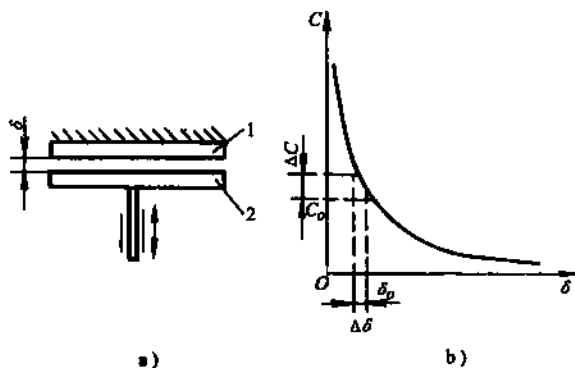


图 12-17 变极距式电容传感器

a) 原理图 b) 特性曲线

由特性曲线可知，为提高灵敏度 S ，可以减小初始间隙 δ_0 ，但 δ_0 过小会使测量范围减小，且易使电容击穿，一般 $\delta_0 = 0.1 \sim 1\text{mm}$ 。

间极距式电容传感器灵敏度高，但非线性大，故常用于小位移测量。

(2) 变面积式电容传感器 电容器是由两块极板构成的，因此可通过极板的移动或转动来改变遮盖面积 A 。图 12-18a 所示为平板式直线位移电容传感器。其电容为

$$C = \frac{\epsilon b x}{\delta} \quad (12-19)$$

式中 x ——两极板重合部分长度；

b ——极板宽度。

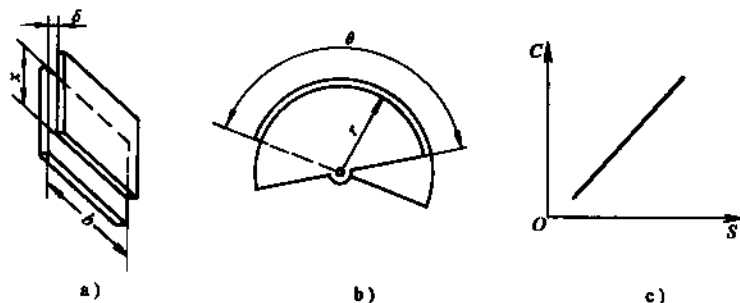


图 12-18 变面积式电容传感器

a) 平板式直线位移电容传感器 b) 平板式角位移电容传感器 c) 特性曲线

灵敏度

$$S = \frac{dC}{dx} = \frac{\epsilon b}{\delta} = \text{常数} \quad (12-20)$$

图 12-18b 所示为平板式角位移电容传感器，当两极板之间产生角位移时，其间遮盖面积变化引起电容变化，遮盖面积 $A = \frac{\theta r^2}{2}$ ，则电容为

$$C = \frac{\epsilon \theta r^2}{2\delta}$$

式中 θ ——两极板重合部分对应的中心角；
 r ——极板半径。

灵敏度

$$S = \frac{dC}{d\theta} = \frac{\epsilon r^2}{2\delta} = \text{常数} \quad (12-21)$$

这种传感器的特性曲线如图 12-18c 所示，其输出和输入之间呈线性关系，因此其测量范围大，但灵敏度较低。

(3) 变介电常数式电容传感器 这种传感器是在两极板之间加不同的介质构成的，各种介质的介电常数如表 12-5 所示，它常用于检测容器中的高度，溶液浓度和片状材料的厚度等。

表 12-5 各种材料的介电常数

物质名称	相对介电常数 ϵ_r	物质名称	相对介电常数 ϵ_r
水	80	云母	7
真空	1.00	石英	4.5
干燥空气	1.00054	玻璃	5.3~7.5
电容器用蓖麻油	4.2	瓷器	5~7
硅油	2.9	砂	3~5
乙醇	20~25	钛酸钡	$10^4 \sim 10^5$
盐	6	纸	2
砂糖	3	沥青	2.7
米及谷类	3~5	聚四氟乙烯塑料	1.8~2.2

由于差动式传感器不但灵敏度高，而且线性范围大，稳定性好，所以电容传感器一般也做成差动式，如图 12-19 所示。

3. 电容式传感器的测量电路

与电感式传感器相似，电容式传感器也可采用交流电桥和调频电路来实现电容量的测量。另外，它还可以采用脉冲调宽电路，如图 12-20 所示。

当电阻 $R_1 = R_2 = R$ 时，输出电压

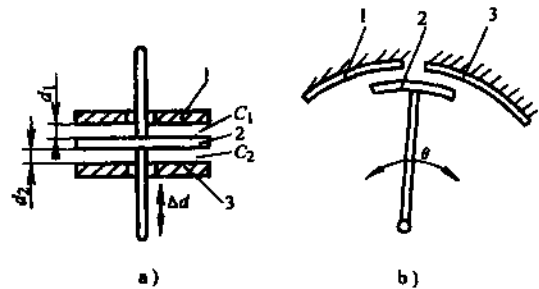


图 12-19 差动式电容传感器
 1、3—定板 2—动板

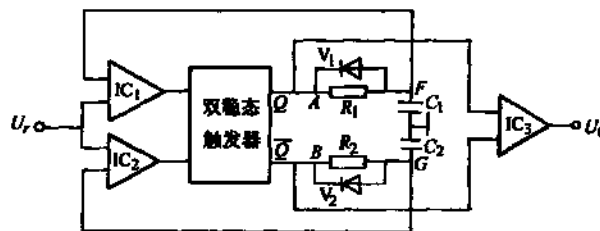


图 12-20 脉冲调宽电路

$$U_0 = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} U_1 = \frac{\Delta C}{2C_0} U_1 \quad (12-22)$$

式中 U_1 ——触发器输出的高电位；

C_0 ——初始状态差动电容的值， $C_1 = C_2 = C_0$ 。

由于脉冲调宽电路对传感元件的线性要求不高，不需解调电路，调宽脉冲输出频率的变化对输出无影响、且采用直流稳压电源供电，这都是其他电容测量电路所不具备的，因此应用越来越多。

4. 容栅传感器

最近，在变面积型电容式传感器的基础上又发展起来一种新型的容栅传感器，它是在两极板相对工作面上分别刻划(印制)一系列栅纹，形成一对对电容，将这些电容并联在一起即构成容栅传感器。当两极板相对运动时，电容值发生周期变化，根据测得的变化周期数和变化量来测量位移和角位移。

根据形状和用途，容栅式传感器又可分为长容栅、圆容栅和柱状容栅，如图 12-21 所示。

容栅传感器有三大特点：因为同组中有多个电极或多个电极并联，极大地提高了灵敏度；在一个大极距内有多个发射电极，可细分，实现小位移测量；在定尺上有多个大电极，可计数，实现大位移测量；由于增加了反射电极，通过它的电容耦合和电荷传递作用，使得传感器的动尺与测量线路之间没有活动的引线。

5. 电容式位移传感器的性能指标

表 12-6 列出了国内外主要电容式位移传感器的性能指标。

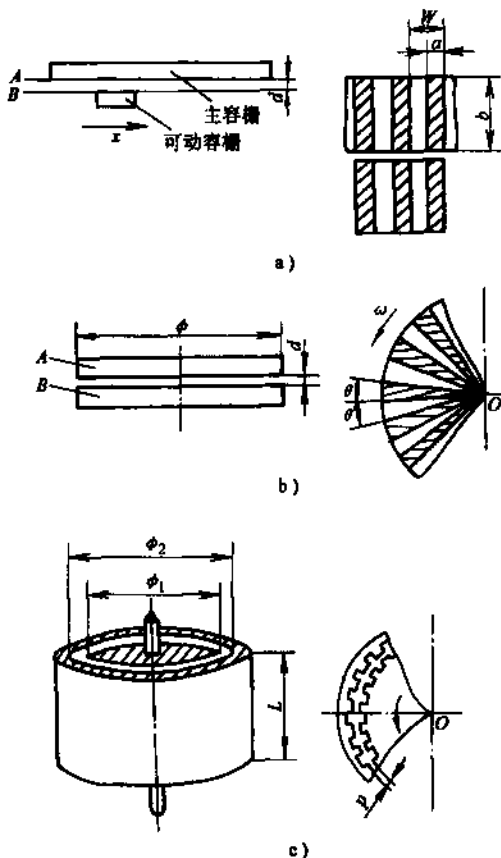


图 12-21 容栅传感器

a) 长容栅 b) 圆容栅 c) 柱状容栅

表 12-6 国内外部分电容式位移传感器性能指标

名称	生产厂家	测量范围/ μm	线性度(%)	灵敏度($\text{mV}/\mu\text{m}$)	分辨力/ μm	重复精度/ μm	外形尺寸/ mm
LVCT 型电容式位移测量仪	南京传感器厂	0~2000 0~5000 0~10000	0.05~0.3	0.2~1		$\leq 0.05\%$	
DB1 型电容传感器	机电部北京机床研究所	± 0.0025 $-\pm 300$	<1.5				$\phi 15 \times 42$ 有微调
DX2 型电容传感器	江苏泰兴机床测试仪器厂						$\phi 8 \times 36$ 无微调

(续)

名称	生产厂家	测量范围/ μm	线性度(%)	灵敏度(mV/ μm)	分辨力/ μm	重复精度/ μm	外形尺寸/mm
JDC-III 型 精密电容 测微测振 传感器	天津大学 精密仪器 系	± 5	0.5		0.01	0.02	$\phi 0.29$
		± 3	0.1		0.001	0.002	$\phi 1.0$
		± 25	0.1		0.005	0.01	$\phi 2.0$
		± 50	0.1		0.01	0.02	$\phi 3.0$
		± 500	1.0		0.1	0.2	$\phi 9.7$
		± 2000	1.0		1.0	2.0	$\phi 25$
		± 5000	5.0		10.0	20.0	$\phi 40$
鉴相型容 栅传感器	瑞士 SYLVAD 公司	1m			1	5	
梳状电容 传感器		30mm		2.6			
容栅式轴 环数显示 表		± 999.995 mm			5		
筒形电极 电容传感器		12mm				1	

2.2.4 霍尔式传感器

1. 霍尔效应

把一片薄片半导体材料垂直于磁力线方向放在磁场 B 中, 在半导体材料上通入激励电流 I , 如图 12-22a 所示, 那么移动着的载流子(电子)将受到磁场力 F_B 的作用。在 F_B 的作用下, 电子就不是直线向前运动, 而是在向前运动的同时向侧面偏转, 形成一边电子积累, 而另一边积累了正电荷, 从而在半导体两侧产生了电场, 此电场阻止电子继续向侧面偏转。当电场力 F_E 与磁场 F_B 相等时, 电子的积累便达到动态平衡, 这时在半导体薄片两侧面由于电子积累形成的电位差称为霍尔电势, 即

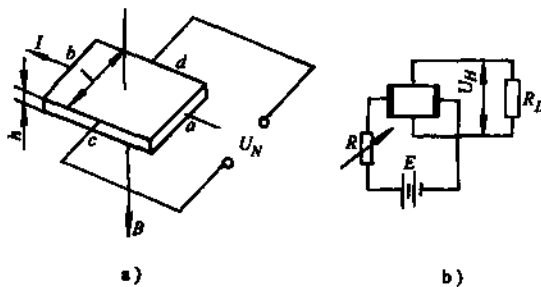


图 12-22 霍尔效应原理与基本电路
a) 霍尔效应原理 b) 霍尔元件基本电路

$$U_H = R_H \frac{IB}{h} = k_H IB \quad (12-23)$$

式中 R_H ——霍尔系数, 由材料决定;

k_H ——霍尔灵敏度, 表示单位电流和单位磁场作用下开路霍尔电势的大小, $k_H = 1/ngh$ (其中 n 为单位体积中的载流子数目; g 为电子的电荷量; h 为半导体薄片的厚度)。

霍尔元件之所以选用半导体材料, 是因为其 k_H 值较金属材料大得多, 另外, 减小元件厚度也可以提高灵敏度。但厚度过小的元件内阻将增大, 强度也将降低。霍尔元件的基本电路如图 12-22b 所示。

2. 霍尔元件的温度补偿

与其他半导体元件一样，霍尔元件对温度比较敏感，其内阻、霍尔电势都随温度变化。因此，必须进行温度补偿。常见的补偿方法有三种。

(1) 恒流源补偿 采用恒流源激励的方法，保持激励电流 I 恒定，以补偿霍尔元件输入电阻 R_I 随温度变化对激励电流的影响。

(2) 负载电阻补偿 当激励电流恒定时，由于霍尔元件输出电阻 R_V 随温度变化会引起霍尔输出电压变化。设霍尔元件为正温度系数，即 R_V 随温度升高而增大，由于 U_H 在 R_V 上有压降，引起负载 R_L 上的电压 U_L 随温度上升而减小，如图 12-23 所示。又由于霍尔电势也具有正温度系数，当温度升高时 U_H 增大，又使 U_L 上升，这恰与 R_V 对 U_L 产生的影响相反。因此，正确选择 R_L ，就可使 R_V 和 U_H 对 R_L 的影响相互抵消，达到温度补偿的目的。 U_L 不随温度变化的条件是：

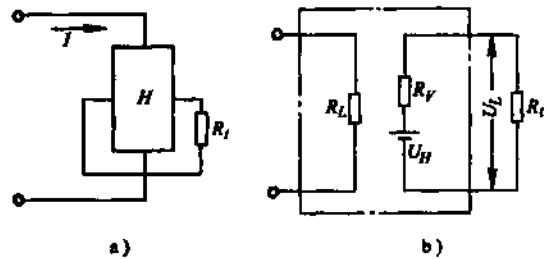


图 12-23 负载电阻补偿电路
a) 基本电路 b) 等效电路

$$R_L = R_{V_0} \frac{\beta}{\alpha} \quad (12-24)$$

式中 R_{V_0} ——温度为 t_0 时霍尔元件的输出电阻；

α ——霍尔电势的温度系数；

β ——霍尔元件的电阻温度系数。

由于霍尔电势的负载通常是放大、记录、显示仪表的输入电阻，其值不变，因此可以用串、并联电阻的方法满足式(12-24)的要求，但灵敏度相应降低。

(3) 热敏电阻或电阻丝补偿 把热敏电阻 R_t 或电阻丝 r 接在输入或输出回路中，图 12-24 所示为霍尔电势温度系数为负值的补偿回路，利用负温度系数的热敏电阻或正温度系数的电阻丝，当温度升高时电阻值下降或增加的特性达到温度补偿目的。

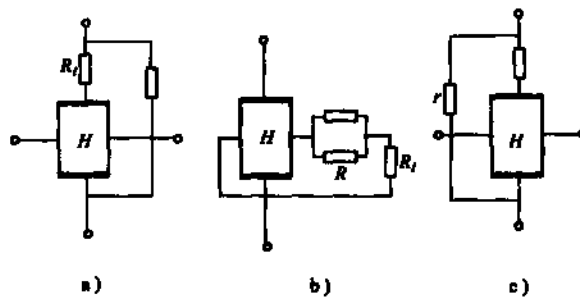


图 12-24 热敏电阻和电阻丝补偿电路
a) 输入回路热敏电阻补偿 b) 输出回路热敏电阻补偿
c) 输出回路电阻丝补偿

3. 霍尔位移传感器

由式(12-23)可知，霍尔灵敏度 k_H 为常数，当 I 恒定时， U_H 正比于 B 。所以如果把霍尔元件放在一个梯度磁场中移动，其输出电势变化即反映出位移的变化。利用这一原理可以测量位

移和与位移相关的非电量。磁场的梯度越大, 变换灵敏度越高; 磁场梯度越均匀, 输出特性的线性越好。

图 12-25 为霍尔位移传感器的原理。上下两块磁路形成方向相反的两个磁场, 霍尔元件放在两个磁场中间, 元件的平面垂直磁场方向并通以恒定电流 I , 根据霍尔效应, 两个磁场产生方向相反的两个霍尔电势 U_{H1} 和 U_{H2} 。在初始平衡位置时, 通过元件的两个磁场强度相等, $U_{H1} = U_{H2}$, 输出电压 $U_o = U_{H1} - U_{H2} = 0$; 当元件移动 Δx 时, 通过元件的两个磁场强度改变, 使 $U_{H1} \neq U_{H2}$, 从而得到一个输出电压 U_o , 其大小与位移成正比, 极性与移动方向有关。

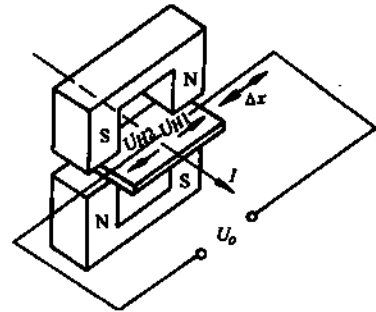


图 12-25 霍尔位移传感器

常见的霍尔位移传感器性能见表 12-7。

表 12-7 国内部分霍尔式位移传感器性能比较

名称	生产厂家	测量范围 /mm	满量程输出 /V	零位温漂 系数(%)	重复性 (%FS)	线性度 (%)	工作温度 /°C	外形尺寸 /mm	测量力/N
HL 型霍尔效应位移传感及变换器	中国工程物理研究院结构力学研究所	0~1	±5	≤0.05	≤0.1	≤±1		φ6×5	≤2
		0~2						φ7×9	
		0~5						φ10×18	
CQM-1 型磁码盘位移传感器	杭州南洋传感器厂		10		≤15		-20~15		

2.2.5 光栅测量方法

光栅被人们发现已有几个世纪, 但应用于科学技术领域只有一百多年的历史。早期人们利用光栅的衍射现象进行光谱分析和光波波长测量, 到了 20 世纪 50 年代才开始利用光栅进行几何量测量。

在几何量测量中, 主要是利用光栅的莫尔条纹现象进行测量。常用的光栅栅线数, 长光栅一般为 20~125 线/mm, 圆光栅在整圆内的栅线数一般为 5400~64800 条, 我们称这类光栅为计量光栅。

根据不同的分类方法, 计量光栅可分为很多种, 见表 12-8。

表 12-8 计量光栅分类

分类方法及类别		说明
分类方法	类别	
形状及用途	长光栅	用于长度尺寸测量
	圆光栅	用于角度测量
工作原理及结构特点	普通增量式光栅	主光栅与指示光栅栅距相等; 从确定位置清零后开始计数, 到所需位置停止; 使用方便, 结构简单; 但突然断电后无法找回原点
	绝对零位光栅	主光栅与指示光栅栅距不相等; 不仅具有增量式光栅的优点, 而且具备判别工作原点和绝对坐标原点之间特定关系的能力
光线的走向	透射光栅	其栅线刻划在透明材料上, 常用玻璃材料
	反射光栅	栅线刻划在具有强反射能力的材料上
栅线的形式	黑白光栅	也称幅值光栅
	闪耀光栅	也称相位光栅

光栅测量是基于莫尔条纹的原理进行的,不同的光栅传感器形成的莫尔条纹不完全相同。以振幅光栅为例,它是将两块栅距相同的光栅刻线面相对地叠合在一起,中间留有很小的间隙,并使二者的栅线之间保持一个很小的夹角 θ ,在光线照射下就出现如图 12-26 所示的图形,在 1-1 线上两个光栅的栅线相交,透光的缝隙互不遮挡,光线能够透过形成一条亮带;而在 2-2 线上,栅线彼此错开,互相遮挡,光线透不过,形成一条暗带。于是,在垂直于两栅线交角平分线的方向上出现了比栅距 ω 宽得多的明暗相间的条纹,这就是莫尔条纹。

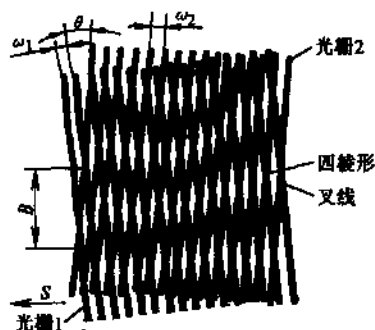


图 12-26 莫尔条纹的形成

就计量光栅而言,莫尔条纹图样是光栅系统的挡光、干涉、衍射(与线纹密度有关)现象综合作用的结果,其测量原理如下:

1. 振幅光栅测量位移的原理

图 12-27 所示的长光栅测量位移系统,光源发的光经聚光透镜变成平行光束,照明标尺光栅 G_1 和指示光栅 G_2 ,形成莫尔条纹,由光电元件接收并转变成电信号。当光栅 G_1 沿光轴方向移动时,莫尔条纹沿垂直于光轴方向运动,光栅每移动一个栅距,莫尔条纹移动一个条纹间隔;当光栅 G_1 反向运动时,莫尔条纹也随之改变。如图 12-28 所示,若被测对象长度为 x ,则

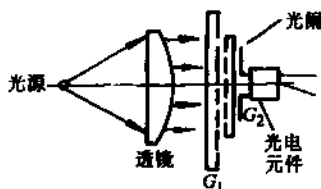


图 12-27 常用的光栅
读数系统

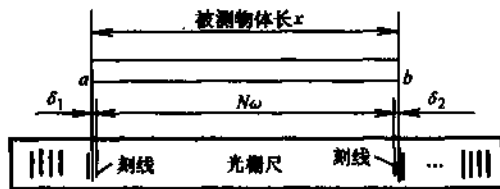


图 12-28 莫尔条纹测量原理

$$x = ab = \delta_1 + N\omega + \delta_2 = N\omega + \delta \quad (12-25)$$

式中 ω ——光栅栅距;

N —— a 、 b 两点间包含的光栅栅线对数;

δ_1 、 δ_2 ——被测距离两端对应光栅上小于一个栅距的小数。

如将光栅栅距进行细分,分成几等分, n 为系统的细分数,则光栅系统的分辨力为

$$\tau = \omega/n$$

式(12-24)可改写成

$$x = M\tau \quad (12-26)$$

式中 M ——以细分分辨力为单位的总计数值, $M = Nn + m$, $m = 0, 1, 2, \dots$ 。

2. 相位光栅测量原理

相位光栅又称闪耀光栅,通常为图 12-29 所示两种断面形状:三角形和锯齿形。三角形光栅 $a = b$, 故也称对称型相位光栅;锯齿形光栅 $a:(a+b) = 0.6 \sim 0.7$, 对 0 级和 1 级衍射光有最佳透过系数。

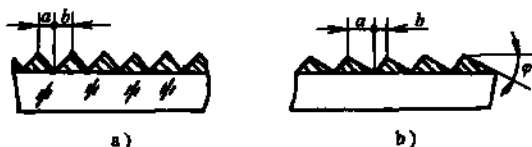


图 12-29 相位光栅断面
a) 三角形光栅 b) 锯齿形光栅

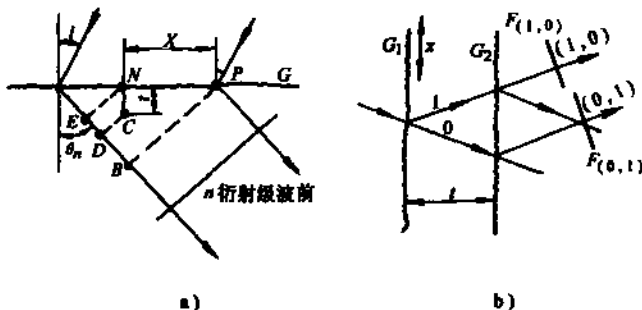


图 12-30 相位光栅测量原理

相位光栅测量原理如图 12-30a 所示, 当一束平面光波以入射角 i 入射在透射相位光栅 G 上, 经衍射后其衍射角为 θ_n 的第 n 级衍射光波在空间任一点 C 的相位 $\varphi_C(n)$ 为

$$\begin{aligned}\varphi_C(n) &= \varphi_P(n) - \frac{2\pi(BE - DE)}{\lambda} \\ &= \varphi_P(n) + \frac{2\pi t}{\lambda} \cos\theta_n - \frac{2\pi x}{\lambda} \sin\theta_n\end{aligned}$$

式中 λ ——入射光波波长;
 $\varphi_P(n)$ ——空间 P 点的相位。

同理, 衍射角为 θ_m 的第 m 级在 C 点的相位

$$\varphi_C(m) = \varphi_P(m) + \frac{2\pi t}{\lambda} \cos\theta_m - \frac{2\pi x}{\lambda} \sin\theta_m$$

因此, 这两束衍射光波在该点的相位差为

$$\begin{aligned}\Delta\varphi_C &= (\varphi_P(n) - \varphi_P(m)) + \frac{2\pi t}{\lambda} (\cos\theta_n - \cos\theta_m) \\ &\quad - \frac{2\pi x}{\lambda} (\sin\theta_n - \sin\theta_m)\end{aligned}\quad (12-27)$$

根据光栅衍射主极大值方程

$$(a+b)(\sin\theta_n - \sin\theta_m) = k\lambda\quad (12-28)$$

式中 $(a+b)$ ——光栅栅距, $a+b = \omega$;

k ——衍射级数, $k = n - m$ 。

将式(12-28)代入式(12-27)中有:

$$\Delta\varphi_C = (\varphi_P(n) - \varphi_P(m)) + \frac{2\pi t}{\lambda} (\cos\theta_n - \cos\theta_m) - (n - m) \frac{2\pi x}{\omega}\quad (12-29)$$

对于一定的参考点和给定的衍射级来说, 式(12-29)中的前两项为常数。可见, 在 C 点给

定的两束衍射光波的相位差 $\Delta\varphi_c$ 与位移 x 成线性关系, 若这两束光符合相干条件, 在 C 点发生干涉, 光栅沿 x 方向连续移动, C 点就可获得交替变化的光强。如果加上指示光栅, 其栅距和标尺光栅栅距相等(或接近, 或具有整数倍关系), 把标尺光栅与指示光栅面对面的刻线几乎平行地放在一起, 如图 12-30b 所示, 当光线通过 G_1 衍射出 1、0 两束光, 并入射到第二块光栅 G_2 上, 每束光又进行一次衍射, 强度占优势而相近的两束衍射光(1,0)和(0,1)以相同方向发射, 它们的各自波前 $F(1,0)$ 和 $F(0,1)$ 相互平行。当光栅 G_1 相对光栅 G_2 沿 x 方向移动时, 光束(1,0)相对光束(0,1)的相位发生变化, 光栅移动一个栅距, 其相位变化为 2π , 此时发射光的光场亮度均匀地变化一周, 即莫尔条纹信号。将光栅 G_1 相对光栅 G_2 转动, 使两者刻线交叉一个很小角度 θ , 可获得垂直于刻线方向具有一定宽度的莫尔条纹。

3. 莫尔条纹的特征

莫尔条纹如图 12-31 所示, 它有如下几个特征。

(1) 莫尔条纹运动与光栅运动具有对应关系 当光栅副中任一光栅沿垂直于刻线方向移动时, 莫尔条纹就沿着近似于垂直于光栅运动的方向运动。光栅移过一个栅距, 莫尔条纹移动一个条纹间隔。当光栅反向移动时, 莫尔条纹也随之反向运动。两者运动关系是对应的。

(2) 莫尔条纹具有位移放大作用 放大倍数 K 可由式(12-30)求得, 一般 θ 角取值很小, 故 K 值很大。由于莫尔条纹具有放大作用, 因此适于高灵敏度的位移测量, 也可直接进行细分。

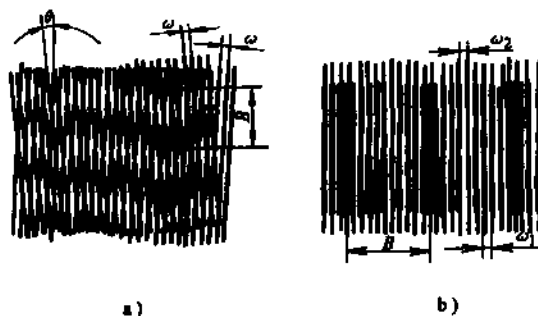


图 12-31 莫尔条纹

a) 横向莫尔条纹 b) 纵向莫尔条纹

$$K = \frac{B}{\omega} \approx \frac{1}{\theta} \quad (12-30)$$

(3) 莫尔条纹具有平均光栅误差作用 由于光栅在刻划过程中存在栅距误差, 故莫尔条纹不是直线, 而莫尔条纹是由大量光栅刻线组成的, 光电元件接收到的是这个区域中所包含的所有刻线的综合结果, 即对各栅距的误差起到平均作用, 从而提高测量精度。设单个栅距误差为 δ , 形成莫尔条纹区域内有 N 条刻线, 则综合栅距误差 Δ 为

$$\Delta = \pm \frac{\delta}{\sqrt{N}} \quad (12-31)$$

4. 莫尔条纹读数系统

莫尔条纹读数系统, 有的书中也称光栅传感器, 它通常是由照明光源, 由主光栅和指示光栅(或相当元件)组成的光栅副和光电接收转换元件组成, 其作用是将光栅的位移转换成近似正弦的莫尔条纹的光电信号, 经电路处理后可用于精密机械运动的控制定位或测量。

根据不同的用途与读数原理, 莫尔条纹读数系统种类较多, 常用的几种见表 12-9。

目前国内常见的光栅传感器性能指标见表 12-10。

表 12-9 莫尔条纹读数系统

类型	原理图	特点	适用范围
直读式	<p>透射式</p> <p>反射式</p>	<p>透射式光栅用钢材制成,其优点是坚固耐用,线胀系数与工件相近</p>	<p>栅距大于 0.01 mm 振幅光栅</p>
分光式	<p>透射式</p> <p>反射式</p>	<p>由于衍射效应通过限光狭缝后而大大削弱,因此应选用较大的光栅间隙</p>	<p>适用于相位光栅</p>
镜像式	<p>二倍频读数系统</p> <p>多倍频读数系统</p> <p>四倍频读数系统</p>	<p>可获得无间隙的莫尔条纹信号,无指示光栅;可获得倍频信号输出,提高了灵敏度</p>	
调相式			

表 12-10 国内部分光栅传感器性能指标

产品名称	生产厂家	有效量程 /mm	分辨力 /mm	精度	最高工作速度 /(m/min)	工作电压 /V	输出波形	外形尺寸 /mm
粗光栅 线值数字 测量仪	航天部 精密机械 研究所	$\pm 20\text{mm}$	0.01、0.005	0.01mm 0.005mm	48			
GHGD- 50 长光栅 数显系统		600	0.001	$< 0.002\text{mm}$		220V $\pm 10\%$ 或 $\pm 15\%$		
长光栅 数显仪	中科院 光电技术 研究所	280	0.01、0.001	0.02mm/ 300mm 0.02mm/ 500mm				30 \times 35 \times L 35 \times 50 \times L
JGX-光栅 线位移传 感器	北京超精 细工程研 究所	(50 ~ 2000) 每 50mm 一档	0.01 ~ 0.0001	$\pm 20\mu\text{m}$ $\pm 10\mu\text{m}$ $\pm 5\mu\text{m}$ $\pm 3\mu\text{m}$ $\pm 2\mu\text{m}$ $\pm 1\mu\text{m}$ $\pm 0.5\mu\text{m}$	8 ~ 50	$\pm 5\text{V} \pm 5\%$ $\pm 12\text{V} \pm 5\%$	方波和 正弦波 且带有 零位	19 \times 52 \times L 23 \times 52 \times L 38 \times 66 \times L
光电测长 仪		2、5、10、 30、50、120	0.005 μm , ~ 0.01 μm ,	$\pm 0.1\mu\text{m}$ $\pm 0.2\mu\text{m}$ $\pm 0.5\mu\text{m}$ $\pm 1\mu\text{m}$				

2.2.6 激光干涉测量方法

60年代初激光的出现,特别是 He—Ne 激光器的出现,使古老的干涉技术得到迅速发展,广泛应用于计量技术中。由于激光具有亮度高,方向性好,单色性及相干性好等特点,是其他光源所不能比拟的,目前以 He—Ne 激光器作为光源的激光干涉技术已经比较成熟。

激光干涉仪有单频激光干涉仪和双频激光干涉仪两种,下面分别加以介绍。

1. 单频激光干涉仪的原理

根据物理光学,迈克尔逊双光束干涉测长公式为

$$L = k \frac{\lambda}{2} \quad (12-32)$$

式中 L ——被测长度;

λ ——波长, $\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$ (λ_0 为激光在真空中的波长, n 为折射率);

k ——干涉条纹数。

将式(12-32)改写成

$$k = \frac{2nL}{\lambda_0}$$

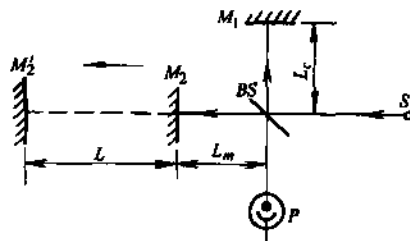


图 12-32 激光干涉仪光路图

图 12-32 为激光干涉仪的原理光路。光源 S 发出的光,经分光镜(析光镜) BS 分成两束,

一束透过分光镜入射到测量反射镜 M_2 被返回，另一束反射后入射到参考反射镜 M_1 被返回，两束光在分光镜相遇发生干涉，产生干涉条纹被光敏元件 P 接收。干涉仪处于起始位置，其初始光程差为 $2(L_m - L_c)$ 对应的干涉条纹为

$$k_1 = 2n(L_m - L_c)\lambda_0$$

式中 L_m ——测量光路长度；

L_c ——参考光路长度。当反射镜 M_2 移动到 M'_2 位置时，设被测长度为 L ，那么

$$k = \frac{2nL}{\lambda_0} + \frac{2n(L_m - L_c)}{\lambda_0} = k_2 + k_1 \tag{12-33}$$

式中 k_1 ——初始位置时的干涉条纹数；

k_2 ——测量的条纹数。

在实际测量中，通常测量初始的干涉条纹数 K_1 取为 0，对应测量长度 L 计数器得到的条纹数 $K = K_2$ 。

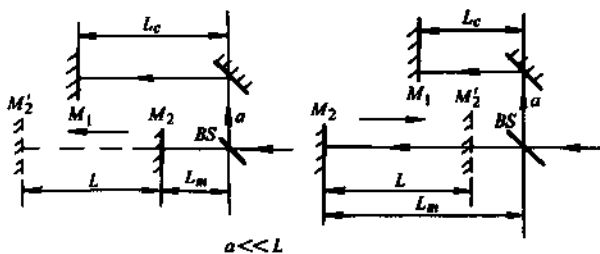
2. 几种单频激光干涉仪的结构布局

目前，常用的单频激光干涉仪有四种，见表 12-11。

表 12-11 单频激光干涉仪的结构布局

名称	结构布局示意图	特点
整体式		<p>将参考镜 M_1、分光镜 BS、激光器 J 等密封于一体之内，而测量镜 M_2 与被测体联在一起，测量时置于外界条件之中。该布局的参考臂区与测量臂区处于不同的环境条件之下</p> <p>该布局闲区误差较大，不适于高精度的仪器，一般只适于小型轻便式干涉仪</p>
最短程差式		<p>在最大测量行程时，使测量光束与参考光束具有最短的相干长度 $L/2$。由于参考镜 M_1 和测量镜 M_2 布置在同一侧，可以认为干涉仪两臂经受相同的环境条件</p> <p>适于大行程测量，可使结构紧凑。</p>
齐端式		<p>“齐端”是指干涉仪的参考镜和测量镜在测量开始时“齐端”，即 $L_m = L_c$。干涉仪的闲区误差为零</p>

(续)

名称	结构布局示意图	特点
误差自动补偿式		<p>当改变参考镜和测量镜的相对位置时,可以在相同环境条件下是干涉仪的某两误差项符号相反,实现自动补偿。</p> <p>各结构布局中最好</p>

3. 双频激光干涉仪

与单频激光干涉相比,双频激光干涉仪具有抗干扰能力强,可实现光学二倍频,使用范围广等优点,但成本较高。

双频激光干涉仪是建立在塞曼效应、牵引效应和多普勒效应的基础上的。其光学原理如图 12-33 所示,在全内腔 He—Ne 激光器上加约 $3 \times 10^{-2} \text{T}$ 的轴向磁场,由于塞曼效应和牵引效应,发出一束含有不同频率的左旋和右旋圆偏振光,它们的频率差大约是 1.5MHz 左右。这束光经 $1/4$ 波片之后成为两个互相垂直的线偏振光,再经平行光管准直和扩束。

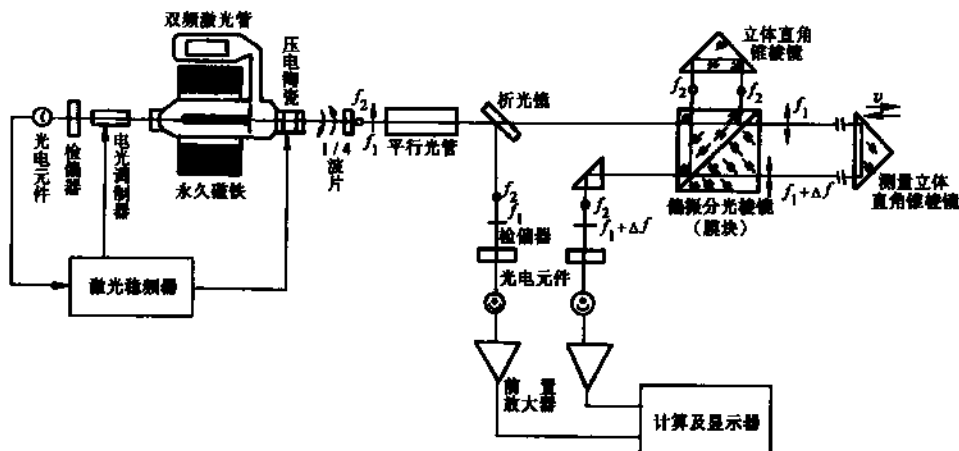


图 12-33 双频激光干涉仪光路图

从平行光管出来的光经析光镜反射出一小部分作为参考光束通过 45° 放置的检偏器。由马吕斯定律可知,两个垂直方向的线偏振光在 45° 方向上投影,形成新的线偏振光并产生拍频。这个拍频频率恰好等于激光器所发出的两个光频的差值,即 $(f_1 - f_2)$ 约为 1.5MHz,经光电元件接收进入前置放大器和计算机。

另一部分透过析光镜沿原方向射向偏振分光棱镜,互相垂直的线偏振光 f_1 和 f_2 被分开。 f_2 射向参考立体直角棱镜后返回, f_1 透过偏振分光棱镜到立体直角锥棱镜——测量棱镜,这时如果它以速度 v 运动,那么 f_1 的返回光就变为 $(f_1 \pm \Delta f)$ 。这束光返回后重新通过偏振分光棱镜并与 f_2 的返回光会合,然后到 45° 放置的检偏器上产生拍频被光电元件接收,进入前置放大器和计算机。

计算机对两路信号进行比较,计算出它们之间的差值 $\pm \Delta f$,进而可根据立体直角锥棱镜

移动速度和时间求得被测长度。

设测量中立体直角锥棱镜的移动速度为 v ，根据多普勒效应则有

$$f = f_1 \left(1 \pm \frac{v}{c}\right) \quad (12-34)$$

式中 f_1 ——激光频率；

c ——光在真空中的速度。

式(12-34)中正、负号按下述原则选择：棱镜与激光器相向运动时为正，相背运动为负。由于多普勒效应引起的频率变化为

$$\Delta f = f - f_1 = \pm \frac{2v}{c} f_1 = \pm \frac{v}{\frac{1}{2} \frac{c}{f_1}} = \pm \frac{v}{\frac{\lambda}{2}} \quad (12-35)$$

式中 λ ——激光波长。

Δf 为立体直角锥棱镜运动时，由它反射回来的光频变化，即经计算机比较计算出来的两路信号的差值。

设测量棱镜移动距离为 L ，时间为 t ，则：

$$\begin{aligned} v &= \frac{dL}{dt} \\ dL &= v dt \\ L &= \int_0^t v dt \end{aligned}$$

将式(12-35)代入上式，则

$$L = \int_0^t \frac{\lambda}{2} \Delta f dt = \frac{\lambda}{2} \int_0^t \Delta f dt = \frac{\lambda}{2} K \quad (12-36)$$

式中 K ——计算机记录下来的脉冲数：

$$K = \sum_0^t (\Delta f dt) = \int_0^t \Delta f dt \quad (12-37)$$

双频激光干涉仪一般做成遥置式，即干涉仪和激光器分成两体。其优点是使用方便灵活，可根据具体测量对象进行组装，便于消除阿贝误差和闲区误差，提高测量精度，同时便于更换干涉组件，以扩大应用范围。双频激光干涉仪除具有精度测长功能之外，还可以测角、测直线度等。

常见的激光干涉仪系统性能指标见表 12-12。

表 12-12 常见激光干涉仪性能比较

主要性能	英国 REN-ISH-AW 激光干涉仪	北京机床研究所 SJ-III 多功能双频激光干涉仪	清华 SJD-II 型双频激光干涉仪	美国 HP 公司 5526A 双频激光干涉仪
运算器误差/ μm			$\pm 0.32 \pm 1 \times 10^{-7} L$	$\pm 0.2 \pm 5 \times 10^{-7}$
稳频误差			$\pm 1 \times 10^{-7}$	终态修正
稳频操作			不完全自动调谐	完全自动调谐
激光器寿命			多数在 1000h 之下	1000h
采样运算速度			2000 次/s	200 次/s
折射率测量精度			$\leq 2 \times 10^{-7}$	$\Delta P = 100\text{Pa}$ $\Delta t = \pm 0.1^\circ\text{C}$ $\Delta f = \pm 10\%$ 计算 $\Delta n = 2.9 \times 10^{-7}$
测长	最大检测距离/m	80	> 30	
	分辨力/ μm	0.001	0.158, 0.03 0.04	
	精度	± 1.1 脉冲当量	$\pm 0.3 \mu\text{m}/\text{m}$	
	允许移动速度	1m/s	> 18m/min	

(续)

主要性能		英国 REN-ISH-AW 激光干涉仪	北京机床研究所 SJ-III 多功能双频激光干涉仪	清华 SJD-II 型双频激光干涉仪	美国 HP 公司 5526A 双频激光干涉仪
测角	范围		$\pm 2000''$		
	分辨率		0.1''	0.1''	0.1''
	精度		$\pm 0.3\%$ 显示值 ± 1 脉冲当量	$\pm 0.5''$	$\pm 0.1''$
直线度	最大检测距离		3m		
	分辨力/ μm		0.16	0.1582	0.01
	精度/ μm		$\pm 3.5\%$ 显示值 ± 1 脉冲当量	± 0.5	± 0.4
单光束干涉仪				无	配有 $f=127、254、762$
扩展器				有 36 \times	有 6 \times 、10 \times 并有另外配件
自动补偿系统误差				$< \pm \sqrt{0.32^2 \pm (5 \times 10^{-7} L)^2}$	$\pm 0.2 \pm 0.3 \times 10^{-6} L$

2.3 机械加工振动及其检测方法

2.3.1 机械加工振动

机械加工过程中产生的振动是一种十分有害的现象，主要表现在以下几个方面：

- 1) 刀具相对于工件加工表面的振动会使加工表面产生振痕，严重影响被加工零件的使用性能。
- 2) 刀具相对工件振动时，切屑截面、切削角度、切削力等均将随之发生周期性的变化，工艺系统的各个组成环节将承受动态载荷的作用，刀具易于磨损，严重时将产生崩刃；机床连接特性会受到破坏，严重时甚至使切削加工无法继续进行。
- 3) 切削过程中发生的高频振动，有时还会伴随产生一种刺耳的尖叫声，造成噪声污染。
- 4) 为了避免发生振动或减小振动，有时不得不降低切削用量，致使机床、刀具的工作性能得不到充分发挥，限制了机械加工生产率的提高。

机械加工过程中产生的振动，可分为受迫振动和自激振动两大类。

机械加工过程中受迫振动发生、发展的规律与一般机械中的受迫振动完全一样，受迫振动的频率与干扰力的频率相同或是它的倍数；受迫振动的幅值与干扰力的幅值有关，又与工艺系统的动态特性有关。

解决受迫振动问题的关键是要找到产生受迫振动的干扰力源。受迫振动的干扰力源有来自机床内部的称为机内振源，也有来自机床外部的称为机外振源。

机外振源很多，但它们都是通过机床地基传给机床的，可通过加设隔振垫隔振，如图 12-34 所示，机床 1 用地脚螺钉装夹在基础 2 上，基础 2 则通过弹性元件 3 支承在地基 4 上，在隔振参数选用适当的条件下，机外振源便可被隔离。

机内振源主要有：

- 1) 机床高速旋转件的不平衡，如电动机转子、轴、齿轮等。
- 2) 机床传动机构的缺陷，如齿轮、滚动轴承等。
- 3) 液压传动装置，主要来自液压系统流量或压力的波动。
- 4) 切削过程中的冲击。
- 5) 往复运动部件的惯性力，即其在改变方向时产生的惯性冲击。

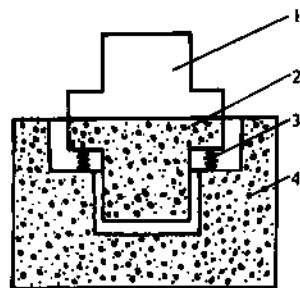


图 12-34 隔振地基

1—机床 2—基础

3—弹性元件 4—地基

与受迫振动相比, 自激振动(也称颤振)具有以下特征:

1) 机械加工中的自激振动是在没有周期性外力(相对于切削过程而言)干扰下所产生的振动。在机床加工系统产生自激振动之前, 必须有一个受迫振动作先导, 但当自激振动产生以后, 即使将上述受迫振动去除, 机床加工系统的自激振动仍将维持下去, 其能量是由机床电动机通过切削过程传递过来的。

2) 自激振动的频率接近于机床加工系统薄弱环节的固有频率, 即取决于机械加工系统的固有特性。

3) 自由振动受阻尼作用将迅速衰减为零, 而自激振动却不因机床有阻尼而迅速衰减为零。自激振动的振幅变化与每一振动周期中振动系统所获得的能量与所消耗的能量之比有关。

机械加工中, 自激振动的发生、发展规律与机械加工过程本身有着十分重要的联系。自激振动产生的机理目前比较公认的学说有再生原理、振动耦合原理和负摩擦原理。另外, 对切削力滞后原理和刀具工作角度变动原理的认同度也较高。根据激振机理的不同, 产生的自激振动也相应不同, 其中尤以再生型颤振在实际中应用最多, 对其研究也最为成熟。

由前面的分析可知, 机械加工中产生的振动可分为受迫振动和自激振动, 自激振动又有不同类型, 因此必须了解各种振动的特征, 正确诊断振动的类型, 才能对现场生产中的振动问题进行深入研究。受迫振动的频率与外界干扰力的频率相同或是它的整数倍; 自激振动的频率接近于机床加工系统某一主振模态的固有频率; 混合型颤振是在受迫振动诱发下产生的, 它的特征是振动频率与外界干扰频率相同或是它的整数倍, 且此振动频率还接近于机床加工系统某一主振模态的固有频率。因此, 在判定振动类型以前, 应查明机床加工系统的外界干扰力源以及机械加工系统的主振模态。一般地, 机械加工振动的诊断程序是:

- 1) 做切削试验, 拾取机床加工过程的振动响应信号。
- 2) 进行谱分析处理, 找出机床加工振动的各频率成分。
- 3) 做环境试验, 查找机外振源。
- 4) 做空运转试验, 查找机内振源。
- 5) 做激振试验, 查找机床加工系统的主模态。

2.3.2 振动量的检测

测量振动的方法按振动信号的转换方式可分为电测法、机械法和光学法, 其中应用最多的是电测法。测振传感器是将机械振动量转换成与之有确定关系的电量(如电流、电压或电荷)的装置。按测振过程中测振传感器是否与被测对象接触, 可将它分为接触式和非接触式两类。电涡流式和电容式位移传感器常用于振动位移的非接触式测量。在接触式测振仪器中, 根据测试参考坐标的不同, 又将它分为相对式和惯性式(绝对式)两类。

1. 相对式测振传感器的工作原理

相对式测振传感器的力学模型如图 12-35 所示, 其测杆 2 和壳体 1 可作相对运动。在实际测振时, 壳体 1 固定在相对静止的物体上, 并以该物体作为参考坐标, 测杆 2 被弹簧 4 以一定的预压力压紧在被测对象 3 上, 在被测对象产生的振动力和弹簧恢复力的作用下, 与测杆 2 相连的质量—弹簧系统将跟随被测对象一起作受迫振动, 其跟随条件为

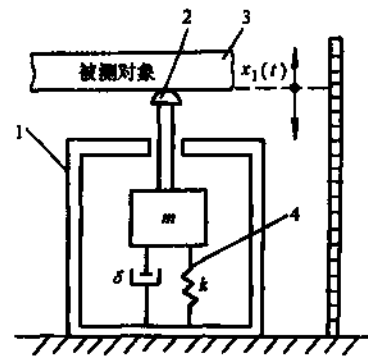


图 12-35 相对式振动传感器的力学模型

- 1—壳体 2—测杆
3—被测对象 4—弹簧

$$\Delta x > \frac{m}{k} \omega^2 x_0 = \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 x_0 = \left(\frac{f}{f_n}\right)^2 x_0 \quad (12-38)$$

式中 Δx ——弹簧预压缩量；

x_0 ——被测的简谐振动的幅值；

f ——被测对象的振动频率；

f_n ——测振传感器的质量—弹簧系统的固有频率， $f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}}$ 。若此条件不满足，则会发生测杆与被测对象间的撞击现象。

此系统中，激振力 $F(t)$ 是输入，振动位移 $x(t)$ 为输出，其频响函数 $H(j\omega)$ 、幅频特性 $A(\omega)$ 和相频特性 $\varphi(\omega)$ 均与典型的二阶系统相同。

2. 惯性式测振传感器的工作原理

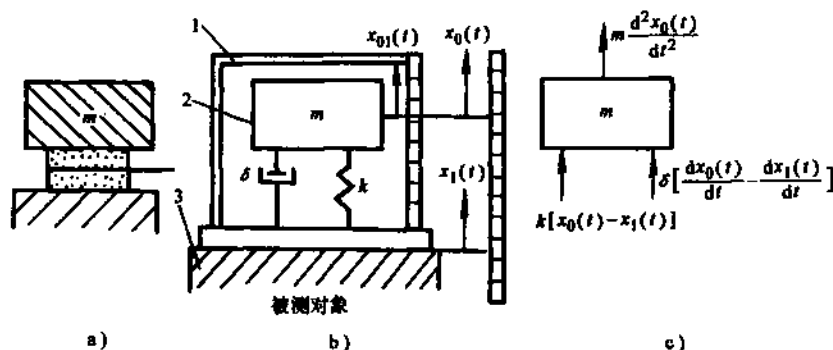


图 12-36 惯性式测振传感器力学模型

a) 压电晶片的放置 b) 力学模型 c) 自由体的受力

1—壳体 2—质量—弹簧系统 3—被测对象

惯性式测振传感器的力学模型如图 12-36 所示。它以不动的大地为参考坐标，在实际测振时，将测振传感器的壳体 1 直接固定在被测对象 3 的测点上，当壳体 1 随振动的被测对象一起振动时，将引起传感器的质量—弹簧系统的受迫振动，经转换元件和中间变换器可将此振动量转变为电信号输出。实际测振时，传感器壳体的振动是输入，质量块 m 对壳体的相对运动是输出。

目前，将质量块对壳体的相对运动转换成电信号的方法有三种，见表 12-13。

表 12-13 将质量块对壳体的相对运动转换成电信号的方法

名称	工作原理
惯性式位移传感器	将壳体的振动位移 $x_1(t)$ 视为力学模型的输入，而将质量块 m 对壳体的相对位移 $x_{01}(t)$ 视为输出。利用某些位移传感器将质量块 m 对于壳体的相对位移 $x_{01}(t)$ 转换成电信号输出
惯性式速度传感器	将壳体的振动速度 $v_1(t) = dx_1(t)/dt$ 视为力学模型的输入，而将质量块 m 对壳体的相对速度 $v_{01}(t) = dx_{01}(t)/dt$ 视为输出。利用具有电磁感应原理的传感器将质量块 m 对于壳体的相对速度 $v_{01}(t)$ 转换成电信号输出
惯性式加速度传感器	当测振传感器的固有圆频率 ω_n 大大高于被测频率的针对圆频率 ω 时，其 $x_{01}(t)$ 将与壳体的振动加速度 $a_1(t) = d^2 x_1(t)/dt^2$ 成正比。将壳体的振动速度 $v_1(t)$ 视为力学模型的输入，而将质量块 m 对壳体的相对位移 $x_{01}(t)$ 视为输出，利用具有正压电效应的传感器(或具有应变效应的传感器)将与 $x_{01}(t)$ 成正比关系的弹性力转换成电信号输出

如图 12-36 所示, 设 m 为质量块的质量, k 为弹簧刚度, δ 为阻尼系数, 质量块 m 的绝对位移为 $x_0(t)$, 壳体的振动位移 $x_1(t)$ (或振动速度 $v_1(t)$ 或振动加速度 $a_1(t)$) 作为传感器的输入, 质量块 m 对壳体的相对位移 $x_{01}(t)$ 作为测振传感器的输出。假设被测对象的振动为简谐振动, 即

$$X_1 \sin \omega t = x_1(t)$$

则系统的运动微分方程式为

$$m \frac{dx_{01}^2(t)}{dt^2} + \delta \frac{dx_{01}(t)}{dt} + kx_{01}(t) = m\omega^2 X_1 \sin \omega t \quad (12-39)$$

这是一个二阶常系数线性非齐次微分方程, 它反映了惯性式测振传感器的输出和输入之间的关系。

几种常用的振动传感器的工作原理及特点如表 12-14 所示, 部分振动传感器产品的性能指标见表 12-15。

表 12-14 几种常用振动传感器的工作原理及特点

名称	工作原理	特点
压电加速度传感器	以压电材料为转换元件, 其电荷或电压的输出与加速度成正比	结构简单、工作可靠、量程大、频带宽、体积小、重量轻、精度和灵敏度高 频率范围: 0.1Hz ~ 20kHz 振动加速度: $10^{-4} \sim 10^3 g$
磁电式速度传感器	利用电磁感应原理, 将传感器的质量块与壳体的相对速度转换成电压输出	
伺服式加速度传感器	其振动系统仍由质量块 m 和弹簧 k 组成, 但在质量块上连接着一个电磁线圈。当有振动输入时, 该线圈产生的电磁恢复力可使质量块保持在原来的平衡位置上, 因而大大提高了系统的刚度	固有频率很高, 动态范围大; 线性度好, 测量精度高; 稳定性好; 体积和重量大

表 12-15 部分振动传感器产品的性能指标

名称	生产厂家	电荷灵敏度 /(pC/ms ⁻²)	电压灵敏度 /(mV/ms ⁻²)	频率响应 /Hz	可测加速度 /(m/s ²)	环境温度 /°C	重量 /g	应用范围
YD-1 压电式加速度传感器	北京测振仪器厂		8 ~ 13	2 ~ 10000	< 2000	常温	26	
BJ 型标准压电式加速度传感器	无锡市标准计量局实验工厂	0.12		25000				标定
JC-4 型压电加速度传感器	福州电子仪器厂	3	2.5	9000 ~ 15000	< 50000		21	
C-1 型压电式加速度传感器	国营千山电子仪器厂		> 10		0.1 ~ 500			
JYD-2 型应剪式加速度计	江苏宝应测振仪器厂	> 1		1 ~ 12000	< 20000		22	
CI-5 型压电加速度计	航天部 304 所 (北京)	> 0.1			> 10000 其中最大冲击加速度 > 3000	-60 ~ 300	25	冲击
6153 型压电加速度计	北京强度环境所	150		0.3 ~ 700	< 1000		102	
JS14100 型压电加速度计	北京长城无线电厂	2		1 ~ 6000	< 10000	-40 ~ 120	21	

(续)

名称	生产厂家	电荷灵敏度 ($\mu\text{C}/\text{ms}^{-2}$)	电压灵敏度 (mV/ms^{-2})	频率响应 /Hz	可测加速度 (m/s^2)	环境温度 /°C	重量 /g	应用范围
磁电式加速度计	磁电式测振传感器	上海交大; 上海市轴承技术研究所	0.3 $\text{mV}/(\text{mm}/\text{s})$		100			轴承测振
	CD-1型磁电式传感器	北京测振仪器厂	600 $\text{mV}/(\text{cm}/\text{s})$	10~500	<50			
	伺服式超低频振动传感器	清华大学						绝对振动测量

3 误差补偿技术

通过对机床误差源的分析和实验发现,几何误差和热误差是机床最大的误差源,约占机床总误差的70%以上。本节将针对这两种误差的补偿展开叙述,并对其他误差补偿方法作一简单介绍。

误差补偿技术大致可分两类:预标定误差补偿和主动误差补偿。前者是先对误差进行测量,然后利用它标定或修改随后工序过程。它只能补偿系统误差,且要求机器的重复性,测量系统的重复性和精度都很好;而后者是在加工过程中监测误差并利用它修改正在进行的加工工序过程,它不仅可以补偿系统误差,还可以补偿相关的随机误差,这种方法不仅要求测量系统的重复性和精度好,而且要求它的信号处理系统和控制系统有很高的运算速度和很快的时间响应能力以满足实时补偿的需要,但它不依赖于机床的精度,因此对机床的重复性要求不如预标定误差补偿技术高。

虽然主动误差补偿技术有上述许多较预标定误差补偿技术优越的特点,但其成本高,补偿系统只适用于一种具体加工过程,难于推广于小批或单件生产,而且机床总误差中70%的误差属于几何误差和热误差,它们都是系统误差,采用预标定法即可对其实行补偿,因此,目前在机床补偿中用得更多的还是预标定误差补偿技术,当然主动误差补偿技术在切入式磨削、端铣、镗削和车削加工中也已经有了成功的应用。

3.1 几何误差的补偿

3.1.1 机床的几何误差

一般的机床都具有三个互相垂直的直线运动轴,通常由溜板—导轨运动副实现这三个方向的直线运动。溜板在床身导轨上运动时,由于受到导轨的几何形状误差。导轨上油膜厚度不均等因素的影响,通常不是理想直线运动而存在误差,如图12-37所示。这些运动误差最终导致刀具相对工件的定位和方向误差。为方便起见,现定义这些误差的命名法则。

δ 表示平移运动误差, ϵ 表示转角运动误差;下角表示平移误差的作用方向或转角误差转动轴的方

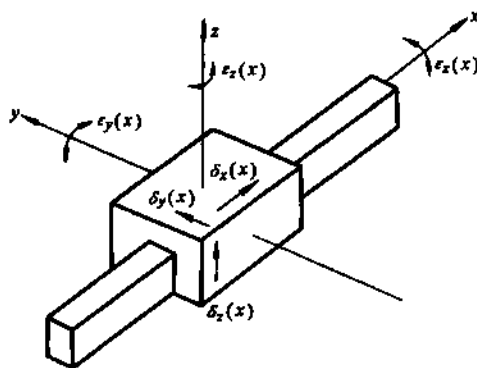


图 12-37 溜板直线运动误差分析

向；括号内的变量表示平移运动的方向或转角运动绕某个轴的转角。例如，沿 x 方向运动时，运动误差可分解为六个分量，分别为沿 x 、 y 和 z 三个坐标轴的位移误差分量 $\delta_x(x)$ 、 $\delta_y(x)$ 、 $\delta_z(x)$ ；以及绕这三个轴旋转的俯仰角误差 $\epsilon_y(x)$ 、偏摆角误差 $\epsilon_x(x)$ 和滚转角误差 $\epsilon_z(x)$ 。

由于在每个运动方向上都有上述 6 个误差分量，因而对一台沿三个导轨运动的加工机床而言，共有 18 个误差分量，再加上三个导轨运动副间的垂直度误差，总共有 21 个误差源，可分成下面四类：

(1) 定位误差

- 1) $\delta_x(x)$ ——沿 x 轴运动时沿 x 方向的定位误差。
- 2) $\delta_y(y)$ ——沿 y 轴运动时沿 y 方向的定位误差。
- 3) $\delta_z(z)$ ——沿 z 轴运动时沿 z 方向的定位误差。

(2) 直线度误差

- 1) $\delta_y(x)$ ——沿 x 轴运动时沿 y 方向的直线度误差。
- 2) $\delta_z(x)$ ——沿 x 轴运动时沿 z 方向的直线度误差。
- 3) $\delta_x(y)$ ——沿 y 轴运动时沿 x 方向的直线度误差。
- 4) $\delta_z(y)$ ——沿 y 轴运动时沿 z 方向的直线度误差。
- 5) $\delta_x(z)$ ——沿 z 轴运动时沿 x 方向的直线度误差。
- 6) $\delta_y(z)$ ——沿 z 轴运动时沿 y 方向的直线度误差。

(3) 转角误差

- 1) $\epsilon_z(x)$ ——沿 x 轴运动时绕 z 轴的滚转角误差。
- 2) $\epsilon_y(y)$ ——沿 y 轴运动时绕 y 轴的滚转角误差。
- 3) $\epsilon_x(z)$ ——沿 z 轴运动时绕 x 轴的滚转角误差。
- 4) $\epsilon_y(x)$ ——沿 x 轴运动时绕 y 轴的俯仰角误差。
- 5) $\epsilon_x(y)$ ——沿 y 轴运动时绕 x 轴的俯仰角误差。
- 6) $\epsilon_y(z)$ ——沿 z 轴运动时绕 y 轴的俯仰角误差。
- 7) $\epsilon_z(x)$ ——沿 x 轴运动时沿 z 轴的偏转角误差。
- 8) $\epsilon_z(y)$ ——沿 y 轴运动时沿 z 轴的偏转角误差。
- 9) $\epsilon_x(z)$ ——沿 z 轴运动时沿 x 轴的偏转角误差。

(4) 垂直度误差

- 1) α_{xy} —— x 、 y 轴间的垂直度误差。
- 2) α_{xz} —— x 、 z 轴间的垂直度误差。
- 3) α_{yz} —— y 、 z 轴间的垂直度误差。

3.1.2 几何误差模型的建立

在机床几何误差补偿中，很重要的一步就是建立误差模型。这里我们给出了多轴机床误差的一般模型，该模型适用于由平移和转动部件以任意顺序组成的多轴机床，它把刀具相对工件的定位误差与机床各连续部件之间的相对误差联系起来。

(1) 多轴机床的结构环 如图 12-38 所示，从机床的基座开始，在一个环的末端支撑工具，在另一个环的末端支撑工件，我们分别称这两个环为 T 环

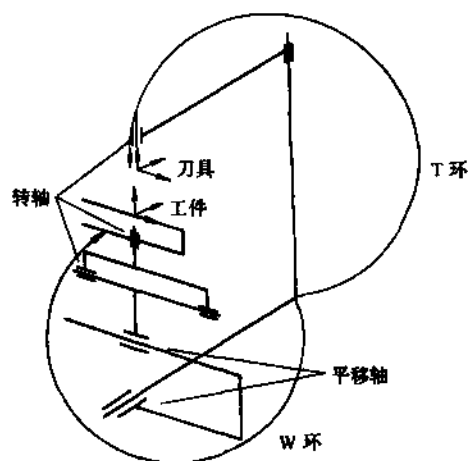


图 12-38 机床的 T、W 环

和 W 环。例如，五轴机床的平移轴(三个)和转动轴(二个)分别可以有下面的组合：

平 移 轴		转 动 轴	
T 环	W 环	T 环	W 环
0	3	0	2
1	2	1	1
2	1	2	0
3	0		

这些不同的组合就构成了多轴机床的不同结构。

(2) 坐标系的选择 坐标系数量和位置的选择原则是每一个机床组件设置一个坐标系。如图 12-39 所示，整体坐标系 0 固定在机床的基座上，从 1 开始连续对各正交坐标系编号，各编号的前缀 t 、 w 分别表示该坐标系属于从基座到刀具的 T 环和从基座到工件的 W 环， t 、 w 坐标系分别固定在刀具和工件上。

(3) 机床结构的准刚体运动学假设 考虑到机床的结构在一定时间和温度范围内具有良好的稳定性，假设为准刚体。其特点是模型由参数唯一确定，假设各轴间的垂直度误差随坐标位置而变化，运动时两轴间的夹角变化归结为偏摆角和俯仰角误差。各轴的参数误差只是该轴位置函数，不受其他坐标位置的影响。

(4) 误差模型的建立

采用齐次变换矩阵作为数学工具，经过对机床空间机构的分析和综合，可以得到刀具相对工件在刀具坐标系中的误差 E_{wp}^d ，它可以表达为两连续坐标系间误差的线性组合，即

$$E_{wp}^d = - \sum_{k=1}^m [F_{tt}^{wk} E_{tt}^{wk}] + \sum_{k=1}^n [F_{tt}^{wk} E_{tt}^{wk}] \quad (12-40)$$

如果以

$E_{wp}^d = [\delta_{wpz}^d \delta_{wpy}^d \delta_{wpz}^d \epsilon_{wpz}^d \epsilon_{wpy}^d \epsilon_{wpz}^d]^T$ 代表刀具相对工件在刀具坐标系中的误差；

$E_{k-1}^k = [\delta_{k-1z}^k \delta_{k-1y}^k \delta_{k-1z}^k \epsilon_{k-1z}^k \epsilon_{k-1y}^k \epsilon_{k-1z}^k]^T$ 代表坐标系 k 相对坐标系 $k-1$ 的误差；

$R_j^k(3 \times 3)$ 描述坐标系 j 相对于坐标系 k 的方向；

$t_j^k(3 \times 1)$ 描述了坐标系 j 原点相对于坐标系 k 原点的位置。

那么， $F_{tt}^k = \begin{bmatrix} R_{tt}^k & (t_{tt}^k \times R_{tt}^k) \\ 0 & R_{tt}^k \end{bmatrix}$ (6×6) 矩阵，表明机床组件 k 和 $k-1$ 之间的误差 E_{tt}^k 对刀具相对工件误差的贡献。 3×3 矩阵 $t_{tt}^k \times R_{tt}^k$ 的列向量是矢量 t_{tt}^k 和矩阵 R_{tt}^k 对应列向量的矢量积。

3.1.3 几何误差的测量方法

原始几何误差的测量也是误差补偿中非常重要的一个环节。我们在第二节中已详细介绍了各种误差测量的方法，这里仅对几何误差的测量方法进行分类，以便有针对性地进行测量。

几何误差的测量方法可以分为直接方法和自标定方法两大类。

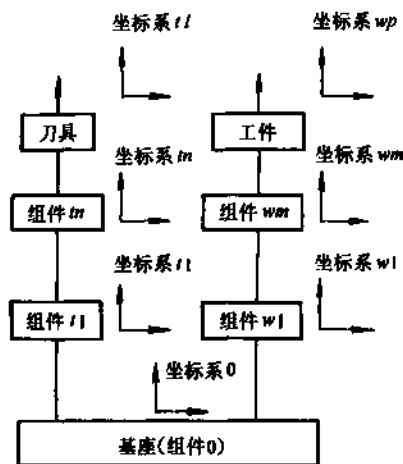


图 12-39 机床各坐标系的命名
(T 环共 n 个组件, W 环共 m 个组件)

(1) 直接方法 又称参数法, 可以使用专门的测量仪器, 如表 12-16 所示; 也可以采用单一标定过的实物基准, 如一维球列、二维球板或三维的空间实体。

表 12-16 几何误差测量方法

几何误差的类型	测量基准和装置
定位误差($\delta_i(j)$, $i=j$, 三项原始几何误差)	1) 激光干涉仪 2) 量块 3) 步距规 4) 球列
直线度误差($\delta_i(j)$, $i \neq j$, 六项原始几何误差)	(1) 直线度基准 1) 拉紧的钢丝 2) 机械和光学基准 3) 沃拉斯特棱镜 4) 激光束 (2) 位移测量装置 1) 电容测微仪 2) 电感测微仪 3) 平面镜激光干涉仪 4) 四象限光电池
角运动误差($\epsilon_i(j)$; 三项滚转误差, $i=j$; 三项偏摆误差和三项俯仰误差, $i \neq j$)	1) 自准直仪 2) 角度激光干涉仪 3) 机械水平仪 4) 电子水平仪 5) 相距一定距离的直线度测量装置 6) 激光滚转测量仪
垂直度	1) 机械直角尺与准直仪 2) 对角线法
平行度	1) 光学直角镜和准直仪 2) 激光干涉仪与光学直角镜

(2) 自标定方法 将实物基准放于机床空间内的不同位置, 分别测量上面各点的空间坐标。实物基准在各位置上, 各点的坐标和它们之间的距离是不变的。将测量的信息与机床的几何误差模型相结合, 得到一系列方程, 使方程的个数大于其中未知数的个数, 用最小二乘法解方程, 就可以获得各项原始几何误差。

3.1.4 误差补偿的执行

误差补偿的执行包括误差的计算和补偿的实施, 在加工中响应速度往往是主要问题。

通过测量获得的误差值以误差表或系数表的形式存储于计算机内, 经过插值或直接计算, 可得到各位置的误差。

在补偿的实施方面主要有两类方法: 硬件补偿法与软件补偿法, 其中硬件补偿法又分机械式补偿和电路补偿两种。

由于几何误差和热误差在补偿的实施上基本相同，而且很多实际的机床误差补偿系统也是将它们合在一起统一实施补偿的，因此下面这部分的内容将不仅限于对几何误差的补偿。

1. 机床误差的硬件补偿方法

(1) 采用机械式微位移装置 通过对误差模型的分析 and 计算，选择一个或几个合适的误差补偿点，采用微位移装置对机床施加反向作用，抵消原有误差。常见的微动补偿类型见图 11-2，结构简图见图 11-3。

(2) 电路补偿 在机床的控制电路中加入误差补偿组件，通过其对电路的修改实施误差补偿。例如，北京机床研究所采用一块带有单片机的智能补偿板，实现对误差的采集和处理，将其插入机床数控系统的扩展槽内，通过总线结构实现二者的数据通信，再结合数控机床的部分功能实现了在三维空间内对机床加工过程综合误差的实时补偿，通过加工和仿真试验，补偿效果优于 70%。

2. 机床误差的软件补偿

硬件补偿方法中控制装置与各自数控系统相连，一般只适用于具体的机床，通用性较差，而且成本相对较高。因此，软件补偿的方法便应运而生，且广泛为人们所接受。

软件误差补偿就是根据通过误差模型计算出的误差值修改机床的加工程序，再去控制进给系统，完成对误差的补偿。这种方法与机床硬件无关，通用性较强，还可以满足动态性能的要求，且成本低廉。其具体作法就是通过预处理程序，对预先编制的 NC 加工程序进行修改，完成补偿。

但是，软件误差补偿对误差模型的依赖性较强，因此要求误差模型的精度足够高，且具有绝对坐标测量系(测量与补偿时均以此为参照)。另外，由于此方法属于预先标定补偿方法，所以工作状态与标定时机床状态的差异必定会影响到最后的补偿结果。尽管如此，软件误差补偿方法在实际应用中还是非常普遍的。

3.2 热误差的补偿

热误差是机床的最大误差源之一，世界各国都非常重视并进行了大量的研究。

3.2.1 减小机床热误差的途径

一般来讲，减小机床热误差的方法有三种：改进设计，使机床对温度敏感程度最小；温度控制；误差补偿。

1. 改进机床设计

(1) 对热源的控制 尽量将可以分离出去的热源分离，合理布置机床内热源的位置，都可以达到减小热误差的目的；另外，还可以采取一些特殊结构隔离热源，对于以主轴旋转为主运动的机床来说，主轴的发热是机床的主要热源，若采用磁力轴承和陶瓷轴承就可以大大减小温升和热变形，如碳纤维加强塑料的主轴热漂移是钢的 1/12 倍，类似的材料还有：氮化硅陶瓷、微晶玻璃、树脂花岗岩、混凝土等。

(2) 热态结构优化设计 就是在一定热源作用下，从形状优化和参数优化出发，寻求合理的温度分布和刚度分布，控制机床结构的热位移，大大降低机床对温度变化的敏感程度，保证加工精度。

机床结构热对称设计是克服热变形非常有效的措施之一，因为结构对称则温度分布也容易对称，可大大提高机床的加工精度和热稳定性。例如，双立柱结构的加工中心避免了一般单立柱机床结构经常出现的立柱倾斜和扭曲现象，自然精度就大大提高。

另外，在机床热态结构优化设计中，有限元分析是一个非常重要的手段，通过对机床温度场分布及对静、动态特性的分析，得出机床结构设计的最优化方案。

(3) 材料的合理选择 温度对机床热变形的影响不仅与温升有关，而且还与材料的性质有关。合理采用非金属材料制造机床的零部件，既有较理想的动、静刚度和良好的阻尼特性，又可以阻隔机床的热量传递，减少机床的发热量和热误差。例如，混凝土对热的衰减能力是铸铁的5~10倍，传热系数是铸铁的1/35，热胀系数是铸铁的1/3，用它做机床的床身和立柱，可获得良好的热特性。

2. 温度控制

由于材料膨胀系数的不确定度、温度偏差以及非线性影响，在精密加工中必须采用温控措施，控制热源的发热使机床温升减小或均衡温度场以保证良好的热态精度，常用的方法有：

1) 空气恒温。

2) 油淋恒温：机床罩在恒温箱内，用恒温油喷淋箱内的机床、刀具、工件等，使温度保持在20℃内。由于油的比热容比空气大得多，因此，该方法恒温效果较空气恒温好得多，但成本较高。

3) 热管技术：热管是一种高效传热元件，热管通过工作液体使热量从一端传到另一端，它本身通过空气冷却。该方法可降低主轴箱的温升、平衡温度场，使机床热漂移减小到原来的 $\frac{1}{4} \sim \frac{1}{3}$ 。

4) 水内冷却技术：围绕主轴外环设置换热冷却套，冷却水在其内部循环使主轴降温。

5) 润滑油强制冷却技术：把流经主轴轴承和主轴箱内的润滑油用冷冻机进行强制冷却，由自动恒温箱达到恒温，有效地控制主轴轴承的温升。

3. 热误差补偿

误差补偿技术是控制机床热变形的有效手段。常用的补偿方法有以下两大类：

(1) 主动误差补偿 可通过测量热变形并实施补偿，也可采用辅助(冷)热源补偿热校正法控制机床的热变形。

日本学者研制的智能加工中心，装有8个应力规传感器以监测热变形，并以其作为神经网络控制模型的输入，控制安装在机床立柱不同部分上的冷却和加热套，补偿内外热源造成的热膨胀和热倾斜，实验表明机床的热漂移可减小到原来的 $\frac{1}{3}$ ，达到 $10\mu\text{m}$ 。

辅助(冷)热源补偿热校正法是应用辅助的(冷)热源在机床适当位置上进行(致冷)加热控制，以产生与机床热变形相反的变形量，从而减小热变形误差。这种方法也可以与前面的温度控制措施相结合实现综合控制，图12-40所示的热监控系统就是一例。

(2) 预标定误差补偿 即先建立一个可预测误差的数学模型，在加工过程中利用这个模型预测误差，进行实时补偿。建立模型的方法有机理分析法和经验法，在本节的后面将作详细介绍。

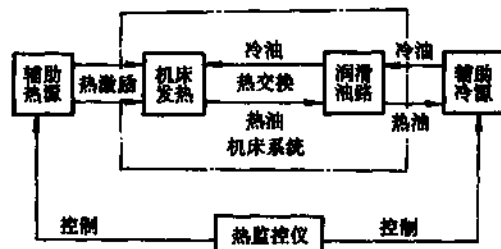


图 12-40 综合控制的热监控系统

3.2.2 热误差的测量与热特性分析

1. 热变形机理分析与温度测量

由于在加工中直接测量热误差是很困难的, 必须用一些容易观测的量反映热误差, 这些量就是模型的输入量。分析机床热变形机理(如图 12-41 所示)可知, 可以选工作状态、发热率(J/cm^3)、温度、主轴热位移和工件误差作为自变量。

(1) 工作状态 机床的工作状态也称工况, 包括主轴转速及其变化情况、切削深度、进给量, 以及主轴工作的历史状态等, 它是数控程序给定的已知量, 因此, 毋需测量就可直接获得。这是一个很大的优势; 但以工况为输入量也存在较大的弊病, 因为相同的工况并不能保证机床具有相同的热变形, 环境温度的波动、机床停机时间、切削时间等都会影响热变形的大小, 所以这种方法存在着误差, 对内部热源误差不大, 但对外部热源其计算的热变形误差就较大。

(2) 发热率 以发热率作为热误差模型的输入在所有方法中是最难于实现的一种, 原因有三方面:

- 1) 发热率的测量与推算非常困难, 且精度很低。
- 2) 各热源的发热率会随加工内容的变化而产生变化。
- 3) 由于机床热容的影响, 温升和变形与发热率有一阶时间延迟的关系, 所以精确地确定它们之间的关系很困难。

(3) 温度 迄今为止, 监测温度在所有方法中最简单, 而且它能把环境温度的波动, 机床停机时间、工作状态的变化都考虑在内, 而且不需要监测大量点的温度, 只用若干个关键点的温度就可以修正主轴的热位移。

常用的机床测温方法有电阻温度计和热电偶。

电阻温度计具有测量精度高, 性能稳定, 灵敏度高, 应用范围广, 可远距离测温并能实现温度自动控制和记录等许多优点。一般可分为标准和工业用两大类。

从 $-220^{\circ}\text{C} \sim 850^{\circ}\text{C}$ 左右, 都采用铂丝来制作标准温度计, 因此常称标准铂电阻温度计, 而在更低的温度范围, 则用铈铁电阻温度计和锗电阻温度计作标准。

除标准电阻温度计外, 其余的都属工业用电阻温度计。制作感温元件的材料可分为金属导体和半导体两类。金属导体包括铂、铜、镍、铁和锗铁合金等。目前常用的为前三种, 这类电阻温度计也称金属热电阻; 半导体有锗、碳和热敏电阻(氧化物)等。

电阻温度计是利用导体或半导体的电阻值随温度变化而变化来测量温度的元件或仪器。若将电阻温度计的感温元件置于被测介质中, 其电阻值将随介质的温度变化而发生相应的变化, 即每一个温度值将对应一个电阻值。它们之间的关系为

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2 + Ct^3 + \dots) \quad (12-41)$$

利用这个关系, 人们可以通过测量任一温度下的电阻值来得到欲测的温度。

在机床温度测量中用得较多的就是铂电阻温度计。

铂是常温下最稳定的金属之一。在一般情况下, 甚至在高温下其化学和物理性能都很稳定。在可作为电阻丝的纯金属中, 铂具有最高的熔化温度(1772°C); 其次, 它还具有较大的电阻率 ρ , 能在很宽的温度范围内使用。由于铂容易提纯, 复现性好, 因此它是制造热电阻的良好材料。

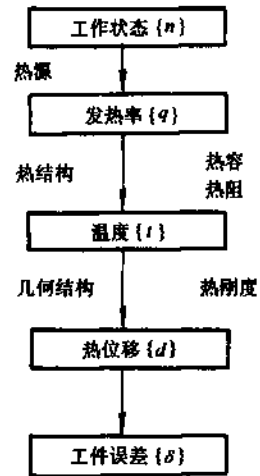


图 12-41 机床热变形机理

铂热电阻的优点是精度高、稳定性好、性能可靠,缺点是铂的价格较贵。由于铂的复现性好,容易复制,因此,当铂热电阻经检定符合各项技术指标时,则可使用统一的铂热电阻分度表,而不必在每个温度点上进行复杂的计算。表 12-17 为工业用 P_{100} 的分度表。

表 12-17 工业铂电阻 P_{100} 分度表

工作温度/°C	电阻值/ Ω	工作温度/°C	电阻值/ Ω
0	100	300	212.03
100	138.5	400	247.04
200	175.84	500	280.90

我国生产的工业铂热电阻,其分度号分别为 P_{10} 和 P_{100} ,其 0°C 时的名义电阻值为 10Ω 和 100Ω 。铂丝的电阻温度系数 $\alpha = 0.003850$ (电阻温度系数的定义 $\alpha = \frac{R_t - R_{t_0}}{R_{t_0}(t - t_0)}$, 习惯上常用 $t = 100^{\circ}\text{C}$ 、 $t_0 = 0^{\circ}\text{C}$ 时的 α 值作为电阻温度计的电阻温度系数)。

热电偶是目前温度测量领域应用最广泛的感温元件之一。其主要优点是:测量温度范围广;性能稳定、准确可靠、结构简单、热惯性小;动态响应速度快;信号可远距离传送;可多点测量等。

由两种不同金属 A 、 B 组成如图 12-42a 所示的闭合回路,这种两种不同金属或合金的组合就称为热电偶。

实际测温线路如图 12-42b 所示, A 、 B 称为热电极,它们的一端通常焊接在一起形成接点 1,称为测量端(工作端或热端)。而另一端接点 2 称为参考端(自由端或冷端),测温时,将热电偶的测量端置于被测温场中,其参考端恒定在某一温度下(通常为 0°C),然后通过连接导线与测量仪表相连。由于热电偶两端所处的温度不同,在热电偶回路中就有电动势产生,用测量仪表测得电动势的数值后,便可间接知道相应的温度或直接由测量仪表指示出温度。

由前面的测温原理可知,热电偶两端输出的热电势,并不代表工作端的实际温度值,而是工作端与自由端的温度差值。因此,常见的热电偶测温电路必须进行冷端补偿,或将自由端置于某一恒定温度场中再经过简单补偿(若该温度场温度恒定为 0°C ,则无需补偿)得到被测温度值。在热电偶应用的

早期,人们多采用后一种方法,显然这是很麻烦的一种方法,使测量带来很大的局限性,目前已逐渐为第一种方法所取代,这类补偿方法有补偿电桥法、多点补偿法和补偿导线法等。

无论是哪种测温方法,在测点的布置上都应注意以下几点:

- 1) 测量端应处于能够真正代表被测介质温度的地方。
- 2) 测头应有足够的插入深度。
- 3) 为防止热损失,其外部应加保温层。
- 4) 应尽量避免其他热源、强磁场、电场等,防止外来干扰。

(4) 热位移 在加工过程中,实时监视机床的位移量,并建立误差模型对加工进行修正,不仅可以补偿热误差而且对机床的其他系统误差和随机误差都可以补偿,该方法属于主动误差

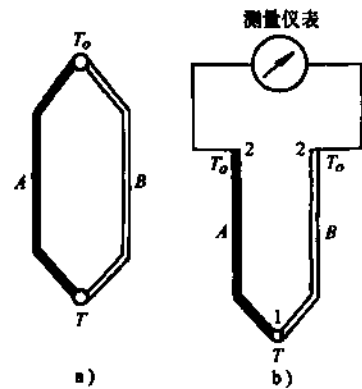


图 12-42 热电偶的工作原理

a) 热电偶原理线路 b) 测温基本线路

补偿。清华大学研制的误差实时修正系统采用激光干涉技术和信号高速采集与处理技术,实现了误差的实时测量与修正,其位移测量精度为 $\pm\sqrt{0.24^2 + (1 \times 10^{-6}L)^2} \mu\text{m}$,其中 L 为工作距离,单位为米;俯仰角和偏摆角的测量精度为 $\pm 0.2''$;滚转角为 $\pm (10.26 + 0.03\theta + 0.04L)''$,其中 θ 为被测角度,单位为秒, L 为工作距离,单位为米。

(5) 工件误差

通过实时测量工件误差来修改随后工件的加工程序,以达到误差补偿的目的。这是一种最直接的主动误差补偿方法。但由于目前技术水平及其他一些因素的限制,这种方法在应用上有一定的局限性。

- 1) 较适合一维尺寸的测量和补偿、对二维和三维尺寸测量难于实现。
- 2) 适合于简单形状的测量,对于复杂形状和内部结构,需要特殊的检具或三坐标测量机。
- 3) 适合于批量生产,难于在小批和单件生产中推广。

尽管如此,由于它可以补偿几乎所有的机床误差,因此,具有广阔的研究和应用前景。上海交通大学基于人对加工过程中工件尺寸误差变化规律的知识及其在模糊信息上的把握,通过建立多层感知器神经网络,对工件尺寸精度实行智能监控,取得了较为满意的效果。他们用测量精度为 $\pm 1 \mu\text{m}$ 的光纤微位移传感器对外圆车削工件径向尺寸进行实时监控,将工件尺寸偏差控制在 $\pm 3 \mu\text{m}$ 范围以内。

2. 热误差的测量

在所有上述五种模型输入方法中,通过监测温度来计算热误差是最为常见的。

测量热误差首先应当分析机床热误差的组成,然后选用适当的测量方法将它们一一测量出来。例如,对于立式加工中心,热误差由主轴的热膨胀,主轴箱的热变形、X、Y、Z轴滚珠丝杠或标尺的热膨胀以及立柱的热变形等几部分构成,如图12-43所示。

采用表12-16列出的误差测量方法测出上述热误差,再确定合适的测量策略得到机床各敏感点在不同状态下的温度值,就可以分析机床的热特性,为热误差模型的建立打下基础。

3.2.3 热误差模型的建立

一般来说,建立热误差模型的方法有两类:机理分析法和经验性方法。

1. 机理分析方法

机理分析方法就是通过对热误差形成机理的分析,找出影响机床热误差的诸因素,然后建立它们与热误差的关系,从而得到了热误差的数学模型。根据建立数学模型方法的不同,又可分为解析法和数值法。

(1) 解析法 就是将热误差与系统输入的关系简化。抽象为一个精确的数学模型,求解该模型得出一个精确的解析解。这类方法在早期的误差补偿中应用较为广泛,但由于它只适于求解比较简单的数学问题,对于处理复杂结构中热传导的偏微分方程时,往往难以得到理想的解,因而逐步为数值法所替代。表12-18列出了几种解析法的应用实例。

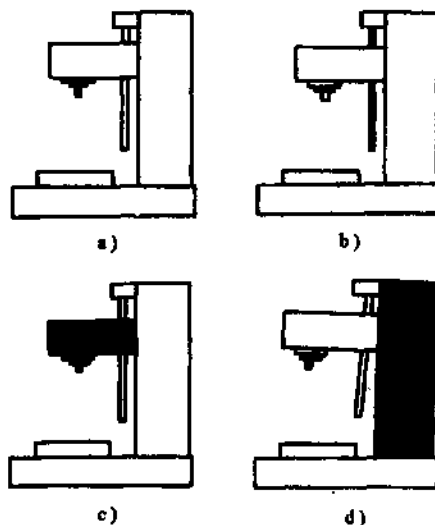


图 12-43 立式加工中心的热误差

a) 主轴的热膨胀

b) Z轴丝杠或标尺的热膨胀

c) 主轴箱的热变形 d) 立柱的热变形

表 12-18 解析法应用实例

序号	模型输入	模型输出	原理或公式	结 论
1	温度	机床热变形	线胀公式	
2	温度	机床稳态热误差	热源附近温度呈指数分布	
3	接触压力热阻	瞬态热变形	接合面上的非线性热弹性理论	
4	温度	稳态热位移	热节点法, 热传导方程的解析解法	
5	能量损失 温度 热位移	主轴热特性	加工状态下的热特性建模	适合于任何加工状态
6	温度	薄壁立式机床结构热变形	准静态条件下, 在某一时刻任意一点的变形是由这一时刻物体的温度场决定的	热对机床精度的影响可由机床结构上一些特征点温度来预测

(2) 数值法 就是通过数值计算方法, 求解热误差模型的近似解, 应用最多的就是有限元法。有限元法是数值计算方法的一种, 它直接面向实际复杂结构, 把任一形状和不同材料组成的物体划分成有限多个简单几何形状(多为三角形或矩形)的单元, 在单元内假设近似函数, 这些单元的大小可随场变量变化的剧烈程度随意调整。原则上, 随着网格的加密或近似函数阶次的提高, 有限元法的工程数值解将收敛于精确解。这种方法的主要思想就是离散和近似。

一般说来, 受热零件中任一点的温度 T 是其位置和时间的函数, 即 $T = T(x, y, z, t)$, 其中 x, y, z 是位置坐标, t 是时间, 它在直角坐标系中应满足的微分方程是

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \rho Q = 0 \quad (12-42)$$

式中 ρ ——材料密度(kg/m^3);

c ——材料比热容($\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$);

t ——时间(s);

k_x, k_y, k_z 分别为材料沿 x, y, z 方向的热导率($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$);

$Q = Q(x, y, z, t)$ 为物体内部的热流密度(W/m^2)。

如果 T 只随位置改变而不随时间改变, 即 $T = T(x, y, z)$, 则为稳定温度场, 或称稳态热传导问题, 否则即为不稳定温度场, 或瞬态热传导问题。一般来讲, 当机床工况稳定时, 除表层外其余各处均为稳定温度场; 当工况发生变化时, 零件的温度场为不稳定温度场。

求解不稳定温度场的导热微分方程要给定初始条件, 而求解稳定温度场只需给定边界条件。初始条件就是计算不稳定温度场在初始时刻($t = 0$)的温度场 $T = T(x, y, z, 0)$, 边界条件描述的则是物体表面与外围介质的热关系, 典型的边界条件有三类:

1) 已知物体表面的温度

$$T = \bar{T}, \quad (\text{在 } \Gamma_1 \text{ 边界上}) \quad (12-43)$$

式中 \bar{T} —— Γ_1 边界的给定温度, $\bar{T} = \bar{T}(\Gamma, t)$ 。

2) 已知物体表面的热流密度

$$k_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + k_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z = \Phi \quad (\text{在 } \Gamma_2 \text{ 边界上}) \quad (12-44)$$

式中 Φ —— Γ_2 边界上的给定热流密度(W/m^2), $\Phi = \Phi(\Gamma, t)$;

n_x, n_y, n_z ——边界外法线在 x, y, z 向的方向余弦。

3) 已知物体与外围介质间的传热系数 h 和 T (在自然对流条件下, T_a 是外界环境温度; 在强迫对流条件下, T_a 是边界层的绝热壁温度)。

$$k_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + k_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z = h(T_a - T) \quad (\text{在 } \Gamma_3 \text{ 边界上}) \quad (12-45)$$

式中 h ——传热系数($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)。

边界 Γ 应满足 $\Gamma = \Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_3$ 。

按一定的边界条件求微分方程的解, 数学上称为微分方程的边值问题。对于这类问题的求解, 通常采用变分原理或加权余量法(也称伽辽金法), 得到上述微分方程的边界条件的等效积分提法, 从而建立有限元格式, 利用有限元法求解。

对于二维稳定温度场问题, 有限元法求解的步骤分三步:

1) 求解域的高离散化 将整个空间域 Ω 分解为有限个(e_e)形状简单的单元, 共 n 个结点, 最常见的为三角形单元和矩形单元; 每个单元内点的温度 T 可以近似用单元结点的温度 T_i 的插值得到

$$T = \sum_{i=1}^{n_e} N_i(x, y) T_i \quad (12-46)$$

式中 n_e ——每个单元的结点数;

$N_i(x, y)$ ——插值函数, 也叫形函数。

2) 单元分析 根据导热微分方程, 采用变分原理或加权余量法建立单元的有限元格式:

$$k^e T^e = P^e \quad (12-47)$$

3) 整体合成与求解 在整个求解域 Ω 内对单元的变量合成, 得到整体的有限元格式:

$$kT = P \quad (12-48)$$

式中 k ——热传导矩阵;

k^e ——单元热传导矩阵, k 的元素为

$$k_{ij} = \sum_{\alpha} k_{ij}^{\alpha} + \sum_{\beta} H_{ij}^{\beta} \quad (12-49)$$

$$k_{ij}^{\alpha} = \int_{\Omega^{\alpha}} \left(k_x \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + k_y \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) d\Omega \quad (12-50)$$

$$H_{ij}^{\beta} = \int_{\Gamma_3^{\beta}} h N_i N_j d\Gamma \quad (12-51)$$

P ——温度载荷列阵;

P^e ——单元温度载荷列阵, P 的元素为

$$P_{ij} = \sum_{\alpha} P_{ij}^{\alpha} + \sum_{\beta} P_{ij}^{\beta} + \sum_{\gamma} P_{ij}^{\gamma} \quad (12-52)$$

$$P_{ij}^{\alpha} = \int_{\Omega^{\alpha}} N_i Q d\Omega \quad (12-53)$$

$$P_{ij}^{\beta} = \int_{\Gamma_3^{\beta}} N_i h \phi_{\alpha} d\Gamma \quad (12-54)$$

$$P_{ij}^{\gamma} = \int_{\Omega^{\gamma}} N_i \rho Q d\Omega \quad (12-55)$$

T ——结点温度列阵, $T = [T_1, T_2, \dots, T_n]^T$

式(12-48)所示即为二维稳态热传导问题有限元的一般格式, 它是 n 个联立的线性代数方程组, 求解之即得到 n 个结点温度 T_i , 再利用式(12-46)即可得到任意点的温度值。

不稳定温度场与稳定温度场的主要差别就是它的场函数不仅是空间域 Ω 的函数, 而且还是时间域 t 的函数。但时间和空间两种域并不耦合, 因此, 建立有限元格式时可以采用部分离散的方法: 用前述方法先将空间域离散化, 将时间域和空间域的偏微分方程在空间域内离散为 n 个结点温度 $\phi(t)$ 的常微分方程的初值问题; 之后再利用数值积分方法, 将时间域离散化, 用在离散的时间点上满足方程组代替在时间域上处处满足方程组, 求解该方程即可得到原瞬态热传导问题的解。

当物体各部分温度发生变化时, 将由于热变形而产生线应变 $\alpha(T - T_0)$, 其中 α 是材料的线胀系数, T 是弹性体内任一点现时的温度值, T_0 是初始温度值。如果物体各部分的热变形不受任何约束时, 则物体上有变形而不引起应力。但是, 由于物体由于约束或各部分温度变化不均匀, 热变形不能自由进行时, 则在物体中产生应力。物体由于温度变化而引起的应力称为“热应力”。当弹性体的温度场 T 已经求得时, 就可以进一步求出弹性体各部分的热应力。

物体由于热膨胀只产生线应变, 剪切应变为零。这种由于热变形产生的应变可以看作是物体的初应变。计算热应力时只需算出热变形引起的初应变 ϵ_0 , 求得相应的初应变引起的等效载荷 P_{e0} (简称温度载荷), 然后按通常求解应力一样解得由于热变形引起的结点位移 a , 然后可以由 a 求得热应力 σ 。也可以将热变形引起的等效结点载荷 P_{e0} 与其他载荷项合在一起, 求得包括热应力在内的综合应力。计算应力时应包括初始应变项

$$\sigma = D(\epsilon - \epsilon_0) \quad (12-56)$$

式中 ϵ_0 ——温度变化引起的应变, 它现在是作为初应变出现在应力应变关系式中, 对于三维问题是

$$\epsilon_0 = \alpha(T - T_0)[1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (12-57)$$

式中 α ——材料的热膨胀系数($1/^\circ\text{C}$);

T_0 ——结构的初始温度场。

将求解域 Ω 进行有限元离散, 求解热应力的有限元格式为

$$ka = P \quad (12-58)$$

与不包含温度应变的有限元求解方程相区别的是载荷矢量中不仅包含体积载荷 P_f 和面积载荷 P_T , 还包括由温度应变引起的温度载荷 P_{e0} , 即

$$P = P_f + P_T + P_{e0} \quad (12-59)$$

$$P_{e0} = \sum_i \int_{\Omega} B^T D \epsilon_0 d\Omega \quad (12-60)$$

2. 经验性方法

经验性方法是把机床热系统看成一个黑箱, 输入是机床的温度变化或其他有关变量, 输出是机床的热误差, 并假定了模型的结构, 用系统辨识的方法确定模型中的参数。

模型的输入可以是温度, 也可以是其他变量, 如工况等。表 12-19 就是几种以工况作为模型输入的应用实例。当然, 以温度作为模型输入还是最常见的, 其建模方法有: 回归分析和人工神经网络技术。

表 12-19 工况输入模型

序号	输入工况	输出	原理
1	主轴瞬时转速 机床温升 主轴工作的历史状态 主轴的转速变化	机床热误差	以规则集的形式建立误差与工况之间的关系
2	环境温度的变化 当时的工作状态	刀具在某一位置时的热误差	用传递函数与时间常数描述各组件的特性建立热误差的动态模型, 采用阶跃响应曲线法估计模型的参数

(1) 回归分析模型 回归分析就是对具有相互联系的现象, 根据其关系的形态, 选择一个合适的数学模型, 用来近似地表达平均变化关系。由此建立的自变量与因变量的关系式称为回归方程式, 根据所研究变量的数目, 回归分析又可分为简单回归(只研究两个变量的关系)和多元回归; 若根据变量间数学关系的性质, 回归分析又可分为线性回归和非线性回归。

热误差的温度模型, 就是以各测点的温度值作自变量, 机床热误差作为因变量, 建立的一种多元线性回归模型。由此确定热误差和机床各测点温升之间的关系, 并从众多的测温点中找出对加工质量影响最大的热敏感点, 由此建立最优误差补偿模型(此处最优的含义是指误差补偿效果显著)。

采用一阶线性回归模型建立温度的热误差模型:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_m x_m + \varepsilon \quad (12-61)$$

式中 y ——模型的因变量, 这里为热误差;

x_1, x_2, \cdots, x_m ——模型的自变量, 这里为机床各测点的温升值;

ε ——残余误差, 它是未知数, 且是随观察值 Y 变化的一个随机变量;

$\beta_0, \beta_1, \cdots, \beta_m$ ——模型中的未知参数。

$\beta_0, \beta_1, \cdots, \beta_m$ 虽是未知参数, 但却是固定值, 只有当对自变量和因变量的一切情况进行观察时方可求出其准确值。因此, 实际应用中, 常根据一些足够多次测量样本值对其进行估计, 得到估计值 b_0, b_1, \cdots, b_m , 于是:

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \cdots + b_m x_m \quad (12-62)$$

此式称为回归方程, 式中 \hat{Y} 为对于给定自变量的相应的因变量的回归值, 可以采用最小二乘法确定 $\beta_0, \beta_1, \cdots, \beta_m$ 的估计值。

为建立回归方程, 进行 n 次观察(测量), 一般 $n > m$, 得到 n 组观察数据 $(y_i, x_{i1}, x_{i2}, \cdots, x_{im}), i = 1, 2, \cdots, n$,

$$\text{令 } Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \cdots \\ y_n \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix}, \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_m \end{bmatrix}, \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}$$

则有

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad (12-63)$$

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \cdots, \varepsilon_n$ 呈独立正态分布, 均值为零, 方差为常数 σ^2 。

X 为 $n \times m$ 矩阵, 称为回归设计矩阵或资料矩阵。

在 $X^T X$ 满秩, $\text{rank}(X^T X) = m + 1$ 的情况下, β 的最小二乘估计值为

$$\hat{\beta} = b = (X^T X)^{-1} X^T \bar{Y} \quad (12-64)$$

将此估计值代入式(12-62)所示的回归方程, 就可以求出任意自变量对应的因变量的估计值 \hat{Y} 。

多元线性回归模型的建立过程中, 假设要用基本的“独立”变量 z_1, z_2, \dots, z_k 来建立因变量 Y 的线性回归方程, 又设 X_1, X_2, \dots, X_r (它们都是 z_1, z_2, \dots, z_k 的函数) 是所考虑的可能与 Y 有关的变量全体, 它们是依赖于建立模型的回归变量, 即考虑问题的出发点。在从 X_1, X_2, \dots, X_r 中选择若干(也许是全部)变量拟合回归方程时, 通常会有两个相互对立的准则:

第一, 为了建立一个用于预报目的的方程, 希望模型中包含尽量多的 X 变量, 以确定可靠的拟合值。

第二, 考虑到从大量 X 变量中取得信息及随后监测它们所需的费用和计算量, 希望方程中包含尽可能少的 X 变量。

解决矛盾的方法就是选择最优回归方程。其方法是不唯一的, 目前较成熟的方法有: 最优子集回归、预报平方和准则, 向后消元法、逐步回归法、逐级回归法、岭回归、主成分回归、特征根回归等。由于篇幅所限, 这里仅介绍常见的逐步回归法和主成分回归法, 有关其他方法读者可参看其他文献。

假设在开始时模型中没有一个自变量, 每次在模型中加入一个自变量来发现一个最优子集, 对全部待筛选自变量计算出它们与因变量 Y 之间的二元相关系数, 从中选出一个与 Y 相关程度最高的自变量与 Y 构成第一个回归方程, 拟合该方程, 计算 F 统计量。如果 F 统计量小于预先选定的 F_{IN} , 就停止选元, 这表明没有一个待选自变量对 Y 有显著的影响, 应当另寻更合适的待选自变量组; 如果 F 统计量是显著的, 继续选元。在回归方程中已包含了由第一步首选出的自变量的情况下, 对剩下的自变量分别计算其偏 F 统计量, 对具有最大偏 F 统计量的自变量进行偏 F 显著性检验, 如果检验不通过, 则停止选元; 否则将该变量引入回归方程。在后续的每一步中, 都对尚未进入方程的每个自变量计算偏 F 统计量, 将具有最大偏 F 统计量的一个自变量加入方程, 进行偏 F 检验, 显著者方可加入到回归方程中, 直至没有自变量可进入方程, 或最后一个变量也进入了模型, 选元结束。这种方法称向前选择法, 这种方法的缺点是在选元早期因较显著而被选入回归方程的自变量很有可能在选元后期由于其他自变量的引入而不再显著。为了及时发现这种情况, 对方程中的每个变量都当作最后选入方程的变量求出偏 F 统计量, 对偏 F 统计量最小的自变量作偏 F 检验, 若检验显著则留在方程中, 否则剔除。这样选入、排除循环进行, 直到待筛选的全部自变量中根据给定的显著水平 α 没有一个再能被选入或排除出刚构成的回归方程为止。

由于 X 变量之间不是线性独立的, 而是存在着相关性, 这种自变量之间存在线性关系的现象称为多重共线性。它会使回归系数的估计方差趋向无穷大。选择自变量过程中接受错误假设的可能和作出错误决策的风险增大、回归系数估计值的稳定性变差、预测的可靠性降低等等, 严重影响回归分析的结果。主成分回归法就是一种解决这一问题的方法。

主成分分析法是一种很有用的多元统计分析方法。在实际研究中, 为了全面分析问题, 往往提出很多与此有关的变量, 因为每个变量都在不同程度上反映了这个研究的某些信息。但是, 在用统计分析方法研究这个多变量问题时变量太多会增加问题的复杂性。人们自然希望变量个数较少而得到的信息较多。当两个变量之间有一定相关关系时, 可以解释为这两个变量反映的信息有一定的重叠。于是从数学上考虑, 要求有一种方法对于原来提出的所有变量(设为 p 个变量, $p \geq 2$), 建立 q 个新变量($q \leq p$), 要求新变量两两相关且在尽可能保持原有信息的原则下使 q 尽量小。这种方法称为主成分分析法, 其中信息量的大小通常用方差来衡量。

设要回归的模型如式(12-62)所示,将回归变量 x_1, x_2, \dots, x_m 中心标准化,模型变为

$$\hat{y} = b_{0z} + b_{1z}x_1 + b_{2z}x_2 + \dots + b_{mz}x_m \quad (12-65)$$

Z 的相关矩阵为 $Z^T Z$, 设 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_m$ 是 $Z^T Z$ 的 m 个特征根, 即为下面特征方程的 m 个解:

$$|Z^T Z - \lambda I| = 0 \quad (12-66)$$

称 $\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n Z_{ij}^2$ 为 Z 的总方差, 它等于相关矩阵的迹, 即

$$\text{tr}(Z^T Z) = \sum \lambda_j = m = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n Z_{ij}^2 \quad (12-67)$$

与特征根 λ_j 对应的特征矢量 g_j 满足方程

$$(Z^T Z - \lambda_j I) g_j = 0$$

选取 $g_j = (g_{1j}, g_{2j}, \dots, g_{mj})^T$ 满足 $g_j^T g_j = 1$ 。若 m 个特征根都是单根, 则 m 个特征矢量一定两两正交; 若有重根, 则可将对应的特征矢量正交化, 则称

$$w_j = g_{1j}x_1 + g_{2j}x_2 + \dots + g_{mj}x_m, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (12-68)$$

为主成分。 w_j 的 n 个观测值的平方和

$$\sum_{i=1}^n w_{ij}^2 = g_j^T Z^T Z g_j = \lambda_j g_j^T g_j = \lambda_j \quad (12-69)$$

则 w 的总方差

$$\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n w_{ij}^2 = \sum_{j=1}^m \lambda_j = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n Z_{ij}^2$$

与 Z 的总方差相等。从变量 x_1, x_2, \dots, x_m 出发, 用变换产生新的两两正交的变量, w_1, w_2, \dots, w_m 。

如果原变量之间的相关性较大, 即 $|Z^T Z| \approx 0$, 则 $Z^T Z$ 的有些特征根将很小(接近于零)。将它们对应的主成分去掉, 对总方差影响不大。为确定保留的主成分个数 k , 可选取 k 使 $\sum_{j=1}^k \lambda_j / m > 0.8$, 然后用最小二乘法作 Y 对 w_1, w_2, \dots, w_k 的回归。由于 w_j 相互正交, 故选择进入回归的先后顺序无关紧要。在得到 Y 关于 w_1, w_2, \dots, w_k 的回归方程后, 再转换成 Y 关于 x_1, x_2, \dots, x_m 的方程, 其系数称为主成分估计。这种消除多重共线性影响的方法就是主成分回归法。

(2) 人工神经网络模型 人工神经网络是由大量的, 同时也是很简单的处理单元(常称神经元)广泛地互相联接而形成的复杂网络系统。它是一个高度复杂的非线性系统, 同时还具有很强的容错、计算和存储能力, 和高维性、神经元之间的广泛互连性以及自组织或自适应等自己特有的性质。人工神经网络是模仿生物神经系统中大量的简单处理单元——神经元的并行处理方式而构建的, 它是人工智能研究的一个重要分支。

一个简单的神经网络如图 12-44 所示, 其中每一个小圆圈表示一个神经元(也称处理单元或节点)。各神经元之间通过相互连接形成一个网络拓扑, 这个网络拓扑的形式称为神经网络的互联模式。神经网络以外的部分(图中点画线框以外的部分)称为神经网络的环境, 神经网络从其中接收信息, 经加工处理之后又返回到其所处环境中。

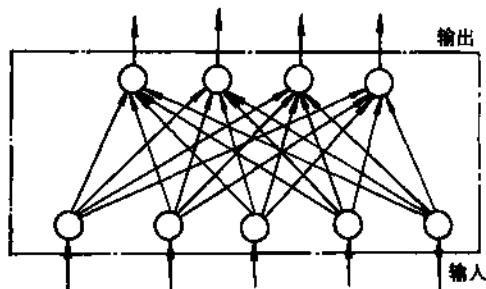


图 12-44 一个简单的神经网络

在每对神经元之间的联接上有一个加权系数，它可以加强或削弱上一个神经元的输出对下一个神经元的刺激，一般称之为权值(也称联接强度、突触强度)。在神经网络中，权值不是固定不变的，修改权值的过程即为学习，这一个过程所遵循的规则即为学习算法。

神经元的一般结构如图 12-45a，其 o_1, o_2, \dots, o_n 表示该神经元 i 的输入，它们可以是环境输入信息，也可以是其他神经元的输出； $w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{in}$ 为分别对应于各输入的权值； net_i 为神经元 i 的总输入； F_i 为该神经元的活跃规则(也称激励函数,如图 12-45b 所示)，一般有阈值型、线性饱和型和 S 型(Sigmoid 函数,较常用)； $a_i(t), a_i(t+1)$ 分别为当前时刻和下一时刻神经元 i 的活跃值， o_i 为输出， f_i 为输出函数，即 $o_i(t+1) = f_i[a_i(t+1)]$ ，一般地 $f(x) = x$ ，即神经元的活跃状态与输出是一致的。

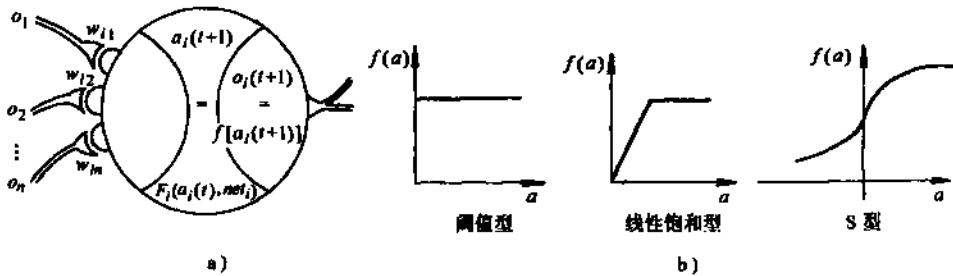


图 12-45 神经元的一般结构
a) 神经元结构 b) 常见激励函数

神经网络的处理单元按照其功能可分为输入单元、隐含单元(不与外界环境产生直接联系的中间单元)和输出单元三种类型。神经元之间的互联模式有自上而下(自上而下依次的顺序为输入层、隐含层、输出层)、自下而上和相互作用三种。

迄今为止，人们已提出了三十多种神经网络模型，其中常用的有十几种，尤其是反向传播模型(也称 BP 模型)在工程中应用最多。

BP 模型的结构如图 12-46 所示，它由输入层、中间隐含层和输出层三个层次组成，各层次之间的神经元之间形成全互联联接，各层次内的神经元之间没有联接。

BP 模型的输入层神经元的输出和输入相同，即 $o_i = i_i$ 。中间隐含层和输出层的神经元的操作特性为

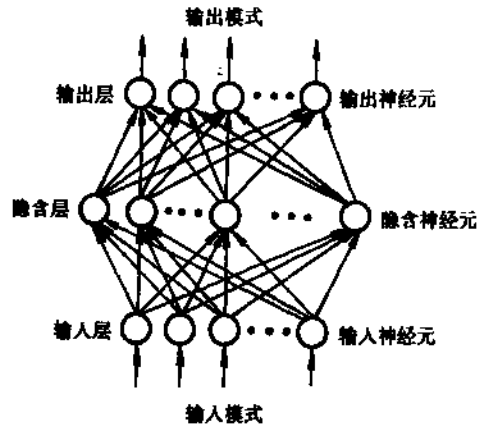


图 12-46 BP 模型

$$n_{etpj} = \sum_i w_{ij} o_{pi} \tag{12-70}$$

$$o_{pj} = f_j(n_{etpj}) \tag{12-71}$$

式中 w_{ji} ——从神经元 i 到神经元 j 的联接权值；
 o_{pi} ——神经元 j 的当前输入；

o_{pj} ——神经元 j 的当前输出；
 f_j ——激活函数，一般取 S 型函数，即

$$f_j(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

BP 网络必须经过训练和学习方可用于计算。在对它进行训练时，首先要提供一组训练样本，其中每一个样本由输入样本和理想输出对组成。当网络的所有实际输出与其理想输出一致时，表明训练结束。否则，将输出层产生的误差反向传播到输入层，从而计算出权值调整量 $\Delta_p w_{pj}$ ，通过修正权值使网络的理想输出与实际输出一致。

在实际应用中，“理想输出与实际输出一致”的含义不可能是二者完全相同，而是指网络的输出误差 E_p 为最小。

$$E_p = \frac{1}{2} \sum_i (t_{pi} - o_{pi})^2 \quad (12-72)$$

式中 t_{pi} ——理想输出；
 o_{pi} ——实际输出。

BP 学习算法的权值调整公式为

$$\Delta_p w_{pj} = \eta \delta_{pj} o_{pj}$$

式中 η ——为误差 E_p 的下降速率，对于某一特定算法为常数，也称学习速率；
 δ_{pj} ——误差，对不同的单元类型求解方法不同；

对于网络的输出神经元：

$$\delta_{pj} = (t_{pj} - o_{pj}) f'_j(n_{pj}) \quad (12-73)$$

对于中间隐含层神经元：

$$\delta_{pj} = f'_j(n_{pj}) \sum_k \delta_{pk} w_{kj} \quad (12-73a)$$

从式(12-73)可知，隐含单元 j 的输出误差是将所有与其相联的输出单元 k 输出端的误差 δ_{pk} ，乘上对应的权值 w_{kj} 并求和得到的，这一过程称为误差反向传播，这就是 BP 算法名称的由来。

由于 BP 网络具有人工神经网络所共有的非线性特性，且具有多层网络的广泛适用性，因此应用领域很广，尤其是在非线性领域。理论证明，一个三层的 BP 神经网络可以通过选择隐含神经元的数目及总的训练样本数以任意的期望精度在均方差意义下逼近任意函数。

在机床的热误差建模中，有些热误差——温度模型属非线性模型，用多元线性回归模型逼近精度不够，可以采用 BP 神经网络模型，实践证明，该模型的精度要高于线性模型。

3.3 机床误差的其他补偿方法

由图 12-2 所示的机床误差源组成图可以看出，除几何误差和热误差之外，工件负载、切削力、刀具磨损、切削过程中及环境的振动、主轴动态误差、工件定位误差、数控系统本身的误差等，都会引起机床的加工误差。对这部分误差的补偿也是机床误差补偿的一个重要内容。以下通过几个例子对这部分内容作一简单介绍。

金属切削过程中的振动(特别是切削颤振)是影响加工精度和表面加工质量的主要因素之一，严重时会影响机床工作的稳定性。大大限制其加工能力，因此，对加工振动特别是颤振进

行监测和预报,从而采取防范和抑制措施,便成为保证加工质量的一个重要手段。

华中理工大学的研究人员采用三层人工神经网络模型,利用BP学习算法实现了对切削颤振的监测。他们采用振动信号时序的方差,一步自相关系数和一阶自回归模型残差的方差作为模型的三个输入节点,设置8个隐含节点,并以切削振动状态作为输出节点(当切削振动在正常范围内时,该节点值为0;当切削振动增大到即将发生颤振时,值为1),分别采用14组和12组样本对模型进行训练和检验,实验结果误差均小于预定误差,可实现准确预报。

上海交通大学在这方面进行了进一步的研究。他们也是采用人工神经网络模型,对切削加工中刀具异常磨损(包括破损)和切削颤振进行综合诊断,其神经网络模型同样由输入层、隐含层和输出层构成,各层节点数分别为10、4和2,输出层共有四种输出模式:

- 1) 正常状态($y_1=0, y_2=0$)。
- 2) 刀具异常磨损而无颤振状态($y_1=1, y_2=0$)。
- 3) 颤振而无刀具异常磨损($y_1=0, y_2=1$)。
- 4) 同时刀具磨损和颤振状态($y_1=1, y_2=1$)。

采用这样的模型可实现多种状态的并行监测。

另外,清华大学还尝试利用超低频振动传感器测量机床加工过程的振动状态、结合机床的振动模态分析,采用虚拟仪器技术进行机床振动状态的实时监测,实验装置简单、可靠,适用性强,具有较大的研究价值。

主轴运动误差同样会影响到工件的加工精度,西安理工大学的学者将其归纳在表12-20中。

表 12-20 车床主轴运动误差对加工精度的影响

加工误差	原始误差								
	轴向窜动 A	y 向径向圆跳动 A		z 向径向跳动 A		x-y 面角摆 α		x-z 面内角摆 α	
		$f = n/60$	$f > n/60$	$f = n/60$	$f > n/60$	$f = n/60$	$f > n/60$	$f = n/60$	$f > n/60$
圆度误差	0	$A^2/2R$	$2A$	$A^2/2R$	$A^2/2R$	$\leq L^2\alpha^2/2R$	$\leq 2L\alpha$	$\leq L^2\alpha^2/2R$	$\leq L^2\alpha^2/2R$
圆柱度误差	0	$A^2/2R$	$2A$	$A^2/2R$	$A^2/2R$	$L^2\alpha^2/2R$	$2L\alpha$	$L^2\alpha^2/2R$	$L^2\alpha^2/2R$
端面平面度误差	$\leq A$	0	0	0	0	$L\alpha^2/2$	$2R\alpha$	$L\alpha^2/2$	$L\alpha^2/2$
端面对轴线垂直度误差	A	0	0	0	0	$2R\alpha$	$2R\alpha$	$L\alpha^2/2$	$L\alpha^2/2$

注: 1. 表中 f —频率; n —主轴转速(r/min); A —误差幅值; α —角摆幅值; L —角摆中心到工件前端距离。

2. 主轴纯偏心运动与主轴几何轴线在空间成一锥角的圆锥运动,均不产生加工误差。

采用类似几何误差的测量方法测出主轴回转运动原始误差,就可以根据表12-20计算出工件的加工误差,同样也可以根据这一数据实施对主轴运动误差的补偿。

机械零件,特别是大型、异形等不易装夹定位的零件,其装夹定位误差也是影响加工精度的主要因素之一。济南第一机床厂在设计、制造新型精密两轴控制车床的过程中,针对车床大溜板类异形零件难于装夹的问题,在数控机床上,利用数控程序测量、计算和补偿工件装夹定位误差,从而降低了对工件装夹定位的要求,提高了加工精度和生产率。

前述所有方法都是针对产生加工误差的某一原因进行检测和补偿的,除此之外,还可以直

接以工件的尺寸精度作为被控对象进行补偿。上海交通大学基于人对加工过程中工件尺寸误差变化规律的知识及其模糊信息的把握,通过建立模糊多层感知器神经网络,尝试对工件尺寸精度的智能监控,取得了较为满意的试验仿真效果。图 12-47a 是测试外圆车削工件径向尺寸变化的实验装置示意图。采用光纤微位移测量传感器作为测量元件,其测量精度为 $\pm 1\mu\text{m}$,测头距刀尖加工位置为 2mm 。切削条件:45 钢工件, YT15 硬质合金刀头,切削深度 $a_p = 0.7\text{mm}$ 、 1.2mm ,切削速度 $v = 76.98\text{m}/\text{min}$ 。进给量 0.1mm , $0.5\text{mm}/\text{r}$,干切削。结果示于图 12-47b,工件尺寸偏差被控制在 $\pm 3\mu\text{m}$ 范围内。

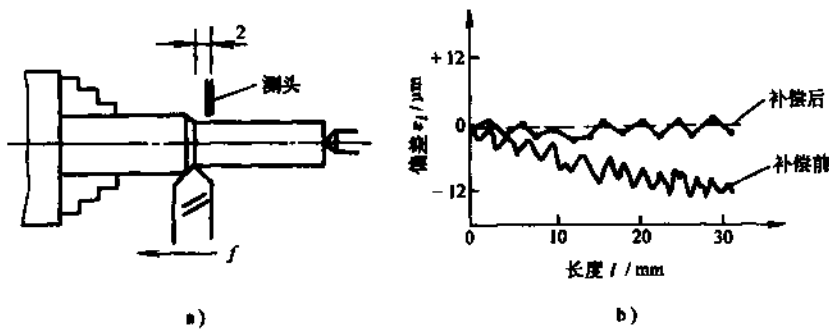


图 12-47 工件尺寸的直接控制

a) 实验装置图 b) 实验结果

4 在线检测与补偿系统举例

在了解了机床误差的在线检测与补偿方法之后,本节介绍两个应用实例,以便读者对这部分内容有更直观、深入的认识。

4.1 阿贝误差实时修正系统

在机床几何误差中,角值误差是以阿贝误差的形式反映到空间误差中的,其大小随阿贝臂长的增加而增加。阿贝原则的内容是:要使量仪给出准确的测量结果,必须将被测件布置在基准元件沿运动方向的延长线上。若违反阿贝原则产生的测量误差,称为阿贝误差。但在实际的机床结构设计中要完全遵守阿贝原则是很困难的,于是就有了布莱恩建议,其内容为:基准位移测量系统工作点的路程应和被测位移作用点的路程位于一条直线上;如果不可能,那么或者必须使传送位移的导轨没有角运动,或者必须用实际角运动的数据计算偏移的影响。布莱恩原则是阿贝原理的补充和推广,它为阿贝误差的补偿提供了理论依据。

清华大学采用双频激光干涉技术对阿贝误差实时修正系统进行了深入的研究,并在一维直线运动工作台上进行了实验验证,结果表明,采用这套装置进行阿贝误差的实时修正是完全可行的,并可以广泛应用于机床的精密加工与改造,坐标测量机误差修正等许多领域。

1. 系统组成

阿贝误差实时修正系统的组成原理见图 12-48,它由激光头、分光部件,四通道干涉仪部件及干涉仪靶镜组和实时信号处理系统组成。四通道干涉仪部件中包括分光部件和遥置式干涉仪部件,其中后者又包括轴向位移、俯仰角、偏转角和滚转角光学系统。信号处理系统由插入计算机扩展槽中的三块信号处理卡组成。靶镜随工作台沿导轨运动,实现对导轨运动的任一位置处的轴向位移、俯仰角、偏转角和滚转角的测量和阿贝误差的实时修正。

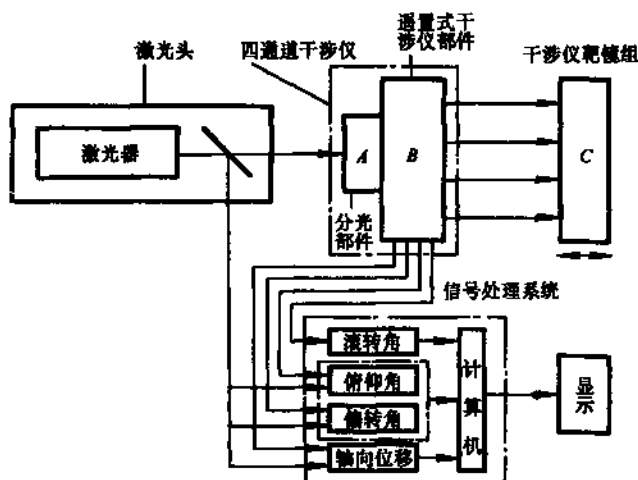


图 12-48 阿贝误差实时修正系统的组成原理

为实现对轴向位移、俯仰角、偏转角及滚转角四个参数的测量。需把激光头发射的光分为相互平行的四束，所用的分光器原理图如图 12-49 所示，该分光方法有较大的分光效率。

遥置式干涉仪部件中，集成了轴向位移光学系统、偏转角光学系统、俯仰角光学系统和滚转角光学系统，另外还有多路光电接收与放大电路。

轴向位移测量采用典型双频激光干涉测长光路，俯仰角和偏转角的光路是在典型光路上增加测角部件组成的，它们的测量原理可参见本章第 2 节激光干涉仪部分，这里不再赘述。值得一提的是，滚转角误差动态测量方法，它是建立在法拉第磁光效应基础上的一种测量方法，其原理组成如图 12-50 所示。

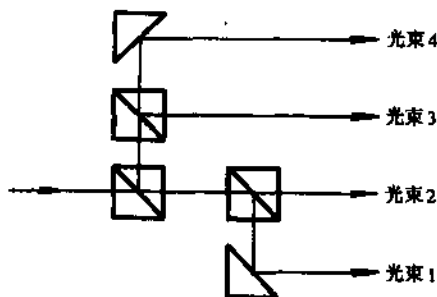


图 12-49 分光光路图

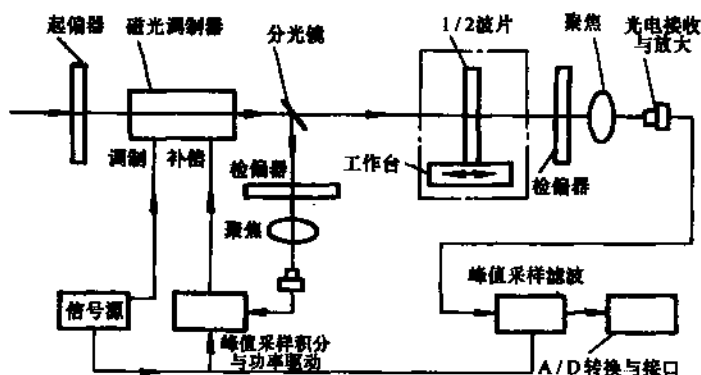


图 12-50 滚转角误差动态测量原理图

激光束经格兰——傅科棱镜起偏后，得到偏振度优于 10^{-5} 的线偏振光，再经磁光调制器使线偏振光的偏振态受到调制。由法拉第磁致旋光效应，偏振面旋转的角度 θ 由下式决定：

$$\theta = VHL \quad (12-74)$$

式中 V ——磁光物质的费尔德常数;
 H ——磁场强度;
 L ——磁光物质的长度。

经过磁光调制后的线偏振光在分光镜上分为两部分,其中,反射光作为参考光束,经检偏器,聚焦透镜后,由光电接收器接收,经选频、放大、采样、积分、功率驱动后反馈回磁光调制器,补偿磁光调制器的旋光漂移,这是系统进行动态测量的首要因素。采用这种参考光束反馈补偿旋光漂移的方法,补偿效果达 96% 左右。

透射光作为测量光束,经 $1/2$ 波片、检偏器、聚焦透镜后,由光电接收器接收形成测量信号,经选频放大、采样后,经 A/D 后送入计算机完成数据的采集、处理与显示。

测量光路中光电接收器接收到的信号光强大小为

$$I = I_0 \sin^2 (M \sin \omega t - 2\varphi) \quad (12-75)$$

式中 M ——调制度, $M = VLC$;
 C ——常数;
 ω ——调制频率;
 I_0 ——入射光强。

利用贝塞尔函数将式(12-75)展开,应用电子技术滤掉直流分量和二阶以上高频分量(它们对测量结果影响较小,可以忽略),并作近似之后有:

$$I = -I_0 [4\varphi J_1(2M) \sin \omega t + J_2(2M) \cos 2\omega t] \quad (12-75a)$$

式中 $J_1(2M)$ 、 $J_2(2M)$ ——基频和二倍频信号贝塞尔函数的值,可由下式求出:

$$J_n(2M) = \sum_{k=0}^n \frac{(-1)^k}{k! \Gamma(n+k+1)} \cdot M^{n+2k} \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (12-76)$$

$$\left. \begin{aligned} U &= 4I_0 G J_1(2M) \varphi \\ V &= I_0 J_2(2M) \end{aligned} \right\} \quad (12-77)$$

式中 G ——基频信号与二倍频信号的增益比。则式(12-75a)为

$$I = -U \sin \omega t - V \cos 2\omega t \quad (12-78)$$

由上式可见,当导轨滚转角 $\varphi = 0^\circ$ 时,仪器工作在极小值位置,输出二倍频信号

$$I = -V \cos 2\omega t \quad (12-79)$$

当 $\varphi \neq 0^\circ$ 时,仪器工作点偏离极小值位置,输出信号包含基波和二次谐波,其波形如图 12-51 所示。该信号在一个基频周期内有四个极值点 I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4 , 其中 $I_1 = -U + V$, $I_3 = U + V$, 因此:

$$I_3 - I_1 = 2U = 8GI_0 J_1(2M) \varphi \quad (12-80)$$

为消除入射光强 I_0 对测量结果的影响,可采用下面的算法计算滚转角误差 φ :

$$A = \frac{I_3 - I_1}{I_3 + I_1} = \frac{4GJ_1(2M)}{J_2(2M)} \varphi \quad (12-81)$$

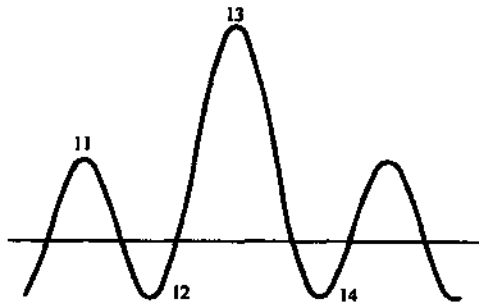


图 12-51 滚转角信号波形图

该系统的信号处理部分主要包括两部分:轴向位移、俯仰角和偏转角信号的处理采用以现场可编程门阵列 FPGA 为核心的高速、高集成度外差信号处理方案,其原理如图 12-52 所示,该系统集成度高,抗干扰能力强,可处理外差信号的最高频率可达 35MHz。

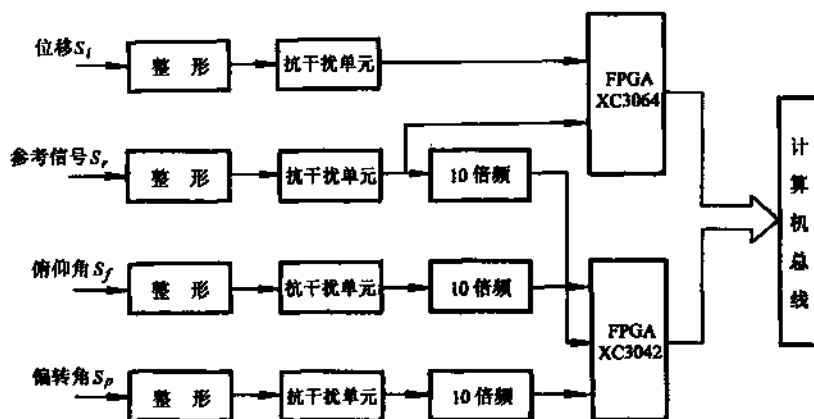


图 12-52 基于 FPGA 的外差信号处理系统原理图

而滚转角信号的处理则采用 A/D 转换的方式，这主要是由测量原理本身的特点决定的，其电路原理如图 12-53 所示。

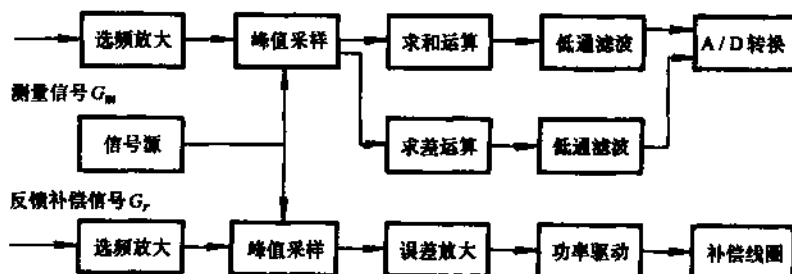


图 12-53 滚转角信号处理系统原理框图

2. 应用实例

一个典型的阿贝误差实时修正系统应用装置如图 12-54 所示，它由 HP5528A 双频激光头 7、SJD3 型双频激光头 1、四通道干涉仪 2 和靶镜 3 等构成。HP5528A 双频激光头 7、测长干涉仪 6 和反射镜 5 用于测量工作台 4 的位移；而 SJD3 型激光头 1、四通道干涉仪 2 和靶镜 3 一起实现对工作台 4 的位移、俯仰角和偏转角的同时测量（本装置中，滚转角误差不影响被测量）。由于两台双频激光干涉仪在水平方向和垂直方向分别有 256mm 和 255mm 的阿贝臂长，因此当工作台沿轴向运动时，就会有阿贝误差存在，其值 ΔL 可由四通道干涉仪 2 所测得的俯仰角误差 $\epsilon_y(x)$ 和偏转角误差 $\epsilon_z(x)$ 加以修正，即：

$$\Delta L = -1.2411\epsilon_z(x) + 1.2362\epsilon_y(x) \quad (12-82)$$

因此，只要工作台在任意位置时 1、7 两台双频干涉仪所测位移之差 ΔL_c 与按上式计算得到的阿贝

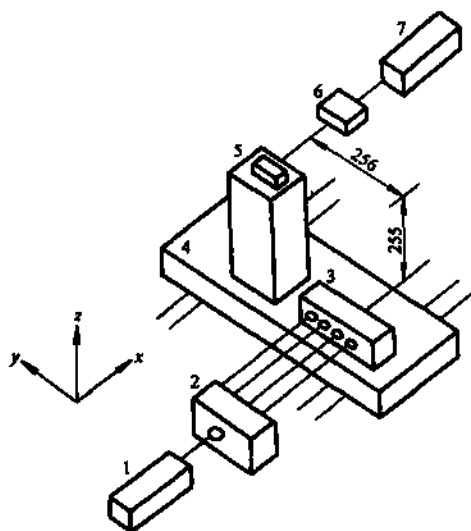


图 12-54 阿贝误差实时修正系统实验装置
1—SJD3 型双频激光头 2—四通道干涉仪 3—靶镜 4—工作台 5—反射镜 6—测长干涉仪 7—HP5528A 双频激光头

误差 ΔL 相吻合, 就充分证明了该方法的可行性。

实验表明, 在 3.7m 行程内, 导轨的最大偏转角和俯仰角分别为 $9.4''$ 和 $19.4''$, 阿贝误差最大值达 $37.0\mu\text{m}$; 经修正后, 降为 $1.5\mu\text{m}$ 。整个修正系统重复性偏差 $0.17\mu\text{m}$, 稳定性偏差为 $0.20\mu\text{m}$ 。

4.2 机床热误差的测量与补偿

天津大学张国雄教授对三坐标测量机与数控机床误差的测量与补偿进行了多年的潜心研究, 在他的博士生李书和的毕业论文中对数控机床的热误差进行了深入的分析和实验。其具体方法如下:

实验对象采用 JCS-018A 型立式加工中心, 其热误差主要由主轴热膨胀, 主轴箱的热变形、X、Y、Z 轴滚珠丝杠或标尺的热膨胀和立柱的热变形等几部分构成。采用一维球列检具实现对热误差的快速测量。如图 12-55, 将检具装卡在工作台上并调整使其与 Z 轴(若测 X 轴或 Y 轴热误差, 则与 X 轴或 Y 轴)平行, 将测头固定在主轴箱上。先测量机床初始状态时各球心坐标的值作为参考值, 然后机床运转升温, 每隔一定时间对各球心坐标测量一次, 该值相对参考值的变化即反映机床的热漂, 从中采用一定的几何变换关系即可将各项热误差分离出来。

在机床上布置 12 个热敏电阻(如图 12-56 所示)测量机床的温升, 每隔 15min 采集一次信号。

采用第三节所述的两种热误差建模方法——回归分析模型和人工神经网络模型对 Z 轴零点热漂移分别进行补偿:

(1) 回归分析模型 采用全部温度得到的模型如表 12-21 所示。

表 12-21 回归分析模型(一)

温度	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_7	T_8	T_9	T_{10}	T_{11}	T_{12}	常数项
系数	3.92	3.61	5.20	10.12	0.76	11.78	-4.08	-31	-34.9	9.08	3.61	0.4

采用逐步回归分析后得到的最优模型如表 12-22 所示。

表 12-22 回归分析模型(二)

温度	T_1	T_8	T_{10}	T_{12}	常数项
系数	13.95	6.85	-13.82	3.97	1.5

采用主成分回归法, 对表 12-22 所示模型消除多重共线性以后的模型如表 12-23 所示。

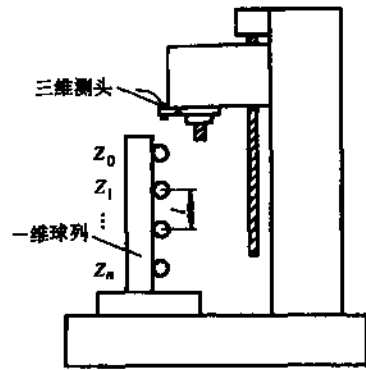


图 12-55 采用一维球列检具测量机床热误差

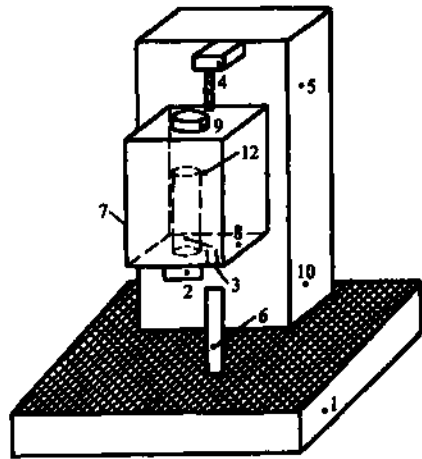


图 12-56 温度测点的布置

表 12-23 回归分析模型(三)

温度	T_1	T_4	T_{10}	T_{12}	常数项
系数	-1.88	2.07	-2.34	6.49	1.6

图 12-57a 显示了 Z 轴零点热漂移的拟合情况, 图 12-57b 为对新工作状态下 Z 轴热误差的预测情况。

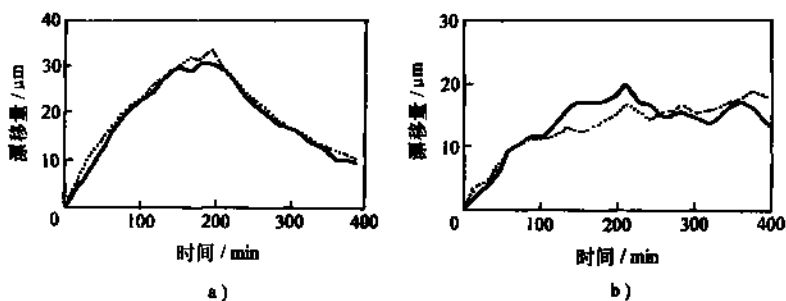


图 12-57 Z 轴热误差的回归分析模型补偿结果

a) 负载: 800r/min b) 负载: DEN8602 转速谱

实线—实测曲线 虚线—预测曲线

(2) 人工神经网络模型 采用人工神经网络的 BP 算法, 建立热误差与温度的非线性模型, 其补偿效果见图 12-58。

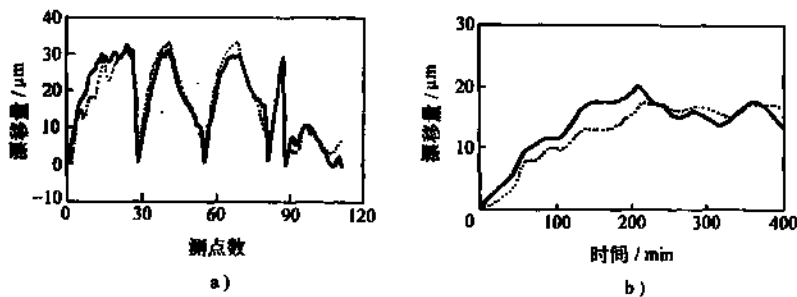


图 12-58 Z 轴热误差的人工神经网络模型补偿结果

a) 拟合结果 b) 预测结果

实线—实测曲线 虚线—拟合曲线或预测曲线

实验表明, 采用上述方法进行热误差补偿, 可达到 60% 的补偿效果。

第 13 章 精密和超精密加工的支持环境

为了适应精密和超精密加工的需要，达到微米甚至纳米级的加工精度，必须对它的支持环境加以严格的控制。这里的支持环境是指精密和超精密加工工艺系统和工人的操作经验及技术水平之外的必须加以控制的各个外部环境。它们主要包括空气环境、热环境、振动环境、声环境、光环境和电场、电磁环境等。各种不同的精密和超精密加工方法，需要对不同的支撑环境方面进行不同程度的控制。对这些支撑环境方面需要控制的品质要求大致如表 13-1 所列。

表 13-1 构成支持环境的诸方面及控制要求

支持环境	控制要求	支持环境	控制要求
空气环境	洁净度、气流速度、压力、有害气体等	声环境	噪声、频率、声压等
热环境	温度、湿度、表面热辐射等	光环境	照度、眩光、色彩等
振动环境	频率、加速度、位移、微振动等	静电环境	静电量、电磁波、放射线等

精密和超精密加工所要求控制的支撑环境都只是在某一范围内的局部环境，如室内的环境或加工区附近的局部环境。随着精密加工和超精密加工所能达到的精度不断的提高，对要求加以控制的支持环境方面也会越来越多，要求也会越来越高。

1 空气的环境和热环境

1.1 空气环境

在我们的日常生活环境与普通车间环境下的空气当中，存有大量尘埃和微粒等物质。对于普通加工方法，这些尘埃和微粒不会有什么不良的影响，但对于精密和超精密加工来说情况就不同了。尘埃和微粒进入加工区还常常引起加工精度下降，这是因为空气中尘埃和微粒的尺寸大小与这时的加工精度要求相比，已经成为不可忽视的数值了。例如，在计算机硬磁盘表面抛光加工时，如果混入了空气中的坚硬尘埃，就会在加工表面形成划伤而不能正确记录信息，严重时会使磁盘报废。在大规模集成电路元件制造过程中，如果在硅片上混入了空气中的尘埃杂质，它可能会在后续的工序中成为不可控制的扩散源而严重影响产品的合格率。

从表 13-2 可知，大气中含有相当多直径在 $0.5\mu\text{m}$ 以上的尘埃和微粒。虽然在不同的场合，大气中含有尘埃的多少有所不同，但即使是在人们认为比较干净的地方如手术室，每 0.028m^3 (1ft^3) 空气中也含有 $0.5\mu\text{m}$ 直径以上的尘埃微粒 50000 个以上。人及其穿着的服装是空气的主要污染源，尤其在人做动作的时候发尘量大增，表 13-3 给出了人着各种服装及做不同动作时的发尘量。

表 13-2 日常环境中空气的含尘量

场 所	尘埃粒子数/(个/ 0.028m^3 (1ft^3))
工厂、车站、学校	200000
百货店、办公室、药房	100000
住宅	60000
室外(住宅区)	50000
病房、门诊部	15000
手术室	5000

表 13-3 服装发尘量

(个/min·人)

衣 服		普通工作服	白色尼龙 洁净工作服	全套型洁 净工作服	手术内衣	棉手术衣	无纺布 手术衣
粒 径/ μm		$\geq 0.5 (\times 10^6)$	$\geq 0.5 (\times 10^6)$	$\geq 0.5 (\times 10^6)$	$\geq 0.5 (\times 10^6)$	$\geq 0.5 (\times 10^6)$	$\geq 0.5 (\times 10^6)$
静 止 状 态	站 着	0.339	0.113	0.006	—	—	—
	坐 着	0.302	0.112	0.007	—	—	—
动 作 状 态	手腕上下运动	2.98	0.3	0.019	27.9	12.5	1.53
	腕自由运动	2.24	0.289	0.021	7.63	33.9	3.32
	上体前屈	2.24	0.54	0.024	8.28	8.73	7.15
	头上下左右运动	0.361	0.151	0.011	0.224	0.543	0.255
	上体扭转	0.850	0.267	0.015	4.56	5.88	1.17
	屈 身	3.12	0.605	0.037	10.3	26.1	8.65
	起立坐下	—	—	—	15.3	31.7	5.92
	坐 下	—	—	—	0.215	0.51	0.749
	坐下(腕手头 躯体轻动)	—	—	—	1.03	14.0	0.61
	踏步(90步/min)	2.92	1.01	0.056	4.63	24.0	4.33
动作平均		2.14	0.45	0.026	8	15.79	3.37
动静比		6.68	4	4	—	—	—

因此,为了保证精密和超精密加工产品的质量,必须对周围的空气环境进行净化处理,减少空气中的尘埃含量,即控制空气的洁净度。所谓空气洁净度是指空气中含尘埃量多少的程度。含尘浓度越低则空气洁净度越高,规定以空气洁净度级别来区分之。我国拟定的空气洁净度等级规范见表 13-4。表中给出了各洁净度等级的含尘浓度限定值,它是室内空气含尘浓度的平均值。

随着半导体工业的快速发展,对空气洁净度的要求提出了更加苛刻的条件,被控制的微粒直径从 $0.5\mu\text{m}$ 减小到 $0.3\mu\text{m}$,有的甚至减小到 $0.1\mu\text{m}$ 或 $0.01\mu\text{m}$ 。因此美国联邦标准 209D 上增加了 1 级和 10 级洁净度级别。表 13-4 中给出了美国联邦标准 209E 各洁净度级别不同直径微粒的浓度限定值。从这个表可以清楚地看出,每 0.028m^3 (1ft^3) 空气中所含 $\geq 0.5\mu\text{m}$ 直径尘埃的个数即为所属洁净度级别。如 100 级洁净度即指在 0.028m^3 (1ft^3) 空气中所含 $\geq 0.5\mu\text{m}$ 直径尘埃的个数 ≤ 100 个。

表 13-4 209E 的空气洁净度级别

级别名称		级 别 限 值				
		$0.1\mu\text{m}$	$0.2\mu\text{m}$	$0.3\mu\text{m}$	$0.5\mu\text{m}$	$5\mu\text{m}$
		容 积 单 位				
国际 单位	英制 单位	m^3 (ft^3)				
M1		350 (9.91)	75.7 (2.14)	30.9 (0.875)	10.0 (0.283)	— —
M1.5	1	1240 (35.0)	265 (7.50)	106 (3.00)	35.3 (1.00)	— —
M2		3500 (99.1)	757 (21.4)	309 (8.75)	100 (2.83)	— —

(续)

级别名称		级别限值				
		0.1 μm	0.2 μm	0.3 μm	0.5 μm	5 μm
		容积单位				
国际单位	英制单位	m^3 (ft^3)				
M2.5	10	12400 (350)	2650 (75.0)	1060 (30.0)	353 (10.0)	— —
M3		35000 (991)	7570 (214)	3090 (87.5)	1000 (28.3)	— —
M3.5	100	— —	26500 (750)	10600 (300)	3530 (100)	— —
M4		— —	75700 (2140)	30900 (875)	10000 (283)	— —
M4.5	1000	— —	— —	— —	35300 (1000)	247 (7.00)
M5		— —	— —	— —	100000 (2830)	618 (17.5)
M5.5	10000	— —	— —	— —	353000 (10000)	2470 (70.0)
M6		— —	— —	— —	1000000 (28300)	6180 (175)
M6.5	100000	— —	— —	— —	3530000 (100000)	24700 (700)
M7		— —	— —	— —	10000000 (283000)	61800 (1750)

空气环境中主要应控制的品质除了洁净度之外, 还有气流速度、压力和有害气体等。

1.2 热环境

精密加工和超精密加工所处的热环境与加工精度有着密切的关系。热环境中主要应控制的品质为温度和湿度。

在环境温度发生变化时, 首先会影响加工设备的精度。例如, 一台镗床在 20℃ 时进行精度检验完全符合标准, 但在 -10℃ 和 35℃ 时进行精度检验则会发生许多检验项目超差。这主要是因为床身铸件在 -10℃ 时变成中凹形状, 而在 35℃ 时又变成中凸形状, 最大翘曲量可达 7~11 μm 。另外温度不均匀也会影响加工设备的精度。例如一台安装在窗户附近的机床, 局部受到阳光的照射而使机床相对的两面产生 10℃ 的温差, 机床变形可达 0.14mm/m, 这种变形是从太阳光照入开始出现, 到 11 点钟左右达到最大。

由于人体的温度高于恒温基数, 所以人是影响恒温作业环境的一个重要因素。

当人静止于静止的空气中时, 发生的是自然对流换热。由于人体的外表温度一般来说高于周围空气温度, 自然对流的结果是在人体周围产生一股热上升气流。用条纹摄像技术可以清楚地观察到并拍下这股气流(如图 13-1)。

热上升气流自脚部开始, 流速较小, 厚度也很小, 但在上升过程中越来越发展。对于站态的裸体者, 在脸部高度上, 气流速度大约为 0.4~0.5m/s, 相应的边界层厚度约 0.15~0.20m。在人的头顶上, 这股气流仍可维持大约 1~1.5m 的高度, 然后才消失在空气中。在 25℃ 的空气温度中, 最大流量可达 600L/min。

自然对流所形成的流动边界层内的流态可以是层流, 也可以是紊流, 主要依

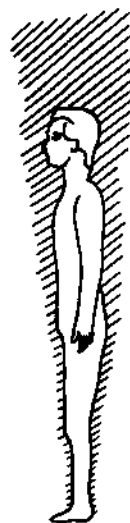


图 13-1 人体周围自然对流边界层

据葛拉晓夫数(准则数) Gr 来判定。此时, 准则数中的定性尺寸 l 取人体垂直方向的高度。图 13-2 表示了边界层内 Gr 数随高度变化的情况。

当 $Gr < 10^9$ 时, 为层流; $Gr > 10^{10}$ 时为紊流。对于站立的裸体者, 皮肤表面平均温度与空气温度的温差在 $8 \sim 10^\circ\text{C}$ 时, 1m 以下为层流边界层, 1.5m 以上为充分发展的紊流边界层, 其间为过渡区。对于穿着服装的人, 其外表面平均温度低于皮肤平均温度, 与空气的温差变小, 有可能在全人体高度上都保持层流边界层。但应当看到, 在准则数 Gr 中, 高度 h 以三次方出现, 温差 Δt 以一次方出现, 所以人体的身高 h 是主要影响因素。

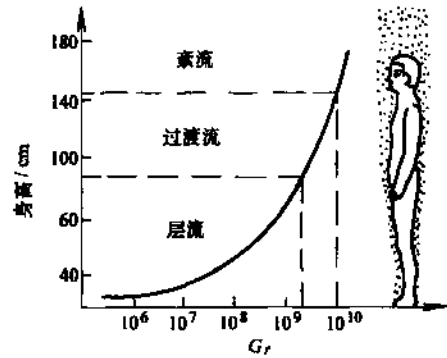


图 13-2 不同高度上的 Gr 数

温度的变化除了影响机床的几何精度, 而且还会影响工件的加工精度。例如在加工 3m 长的滚珠丝杠时, 磨削后的温升为 1°C , 丝杠就会由于温升而伸长 0.033mm , 这显然严重影响高等级要求的丝杠生产。因此, 对于精密零件的加工, 必须严格控制温度变化。

在环境温度稳定的情况下, 一般来说, 零件的形状及各形面之间的相互位置关系也不变。如 90° 角尺在 20°C 时有 $0.3''$ 的误差, 那么在 30°C 时也是 $0.3''$ 的误差; 平板在 20°C 时是平的, 那么在 30°C 时也是平的。但是如果两个相配合的偶件, 其材料不同, 在 20°C 时配合良好, 而在 30°C 时就可能发生配合性质的改变, 使设备性能发生变化。

长度精密测量是精密和超精密加工的重要保证手段, 长度的精密测量必须在特定的条件下才能正常进行, 其中温度是一个重要的条件, 任何物体不论是内部还是外部温度不均衡, 都会引起尺寸的变化。如果在没有具体说明温度条件的情况下去测量物体的精确长度是没有意义的。

国际上采用 20°C 作为进行长度测定的标准温度。进行长度比较的两个物体的线膨胀系数值相差越多, 就要求这两个物体的温度更准确地等于 20°C , 否则将引起测定误差, 其值为

$$\Delta L = L [\alpha_{\text{量}}(\theta_{\text{量}} - 20) - \alpha_{\text{工}}(\theta_{\text{工}} - 20)] \quad (13-1)$$

式中 L ——被测零件的长度(mm);

$\alpha_{\text{量}}$ ——量具的线胀系数;

$\theta_{\text{量}}$ ——量具的温度($^\circ\text{C}$)

$\alpha_{\text{工}}$ ——工件的线胀系数;

$\theta_{\text{工}}$ ——工件的温度($^\circ\text{C}$)。

我们可以看出, 当量具温度与工件温度相同时, 有

$$\Delta L = (\alpha_{\text{量}} - \alpha_{\text{工}})(\theta - 20)L \quad (13-2)$$

式(13-2)说明要使测定误差 $\Delta L \approx 0$, 则必须使 $\alpha_{\text{量}} = \alpha_{\text{工}}$ 或 $\theta = 20^\circ\text{C}$ 。我们不可能针对各种不同材料工件制造相应的长度标准尺, 那么标准温度的控制就更加重要了。它决定了精密和超精密加工所能达到的精度极限。因此, 在严格控制的恒温条件下进行加工和计量是精密和超精密加工的重要条件之一。

所谓恒温条件主要以两个指标来进行衡量, 一个是恒温基数, 也就是指空气的平均温度。另一个是恒温精度, 也就是指相对于平均温度所允许的偏差值。我国规定的计量标准温度为

20℃, 一般来说, 精密和超精密加工及装配的温度环境也以 20℃ 为宜。但由于加工、装配常常占用非常大的空间, 维持恒温比较困难。尤其是由于地理位置不同或同一地理位置的季节不同, 大气温度差别非常大, 不分地区、不分季节统一规定恒温基数, 会大大增加投资和浪费能源。因此很多精密和超精密加工车间的环境温度实行了按季节调温的办法。如夏天把温度基数定为 24℃, 冬天定为 17℃, 只有春、秋两季定为 20℃。大量的分析研究、试验应用和实地调查证明, 除了有特殊精度要求的情况外, 一般的精密和超精密加工场合, 主要是要求温度波动和恒温区内各处温差应小些。所以在适当场合对于恒温基数采用按季节调整温度是有益的。

恒温精度主要取决于不同的精密和超精密加工的精度和工艺要求。总的来说, 加工精度要求越高, 对温度波动范围的要求越严格。恒温精度一般分为 0.2 级、0.5 级、1 级和 2 级等四个等级。分别代表恒温精度为 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 、 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 、 $\pm 1^\circ\text{C}$ 和 $\pm 2^\circ\text{C}$ 。如对于一级精度坐标镗床的精调与校验环境可以取 $\pm 1^\circ\text{C}$, 而对于高精密度的微型滚动轴承的装配和调整工序的环境就可以取 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。

随着现代工业技术的发展与精密和超精密加工工艺的不断提高, 对恒温精度也提出了越来越高的要求。例如在大规模集成电路元件生产过程中的光刻曝光工序, 要求掩膜板材料(一般是玻璃)与硅片的热胀系数的差别越来越小, 因为当直径为 100mm 的硅片的温度上升 1℃ 的时候, 就会引起 0.24 μm 的线性膨胀, 显然这是不能允许的, 所以相应提出了 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 恒温精度的要求。当前已经出现了 $\pm 0.01^\circ\text{C}$ 的恒温环境, 它的维持需要采用许多特殊措施, 如把整个设备浸入恒温油槽之中, 加工区域增加保温罩等, 在一个普通恒温精度的基础上, 创造一个比较高恒温精度的局部环境。

精密和超精密加工对环境的相对湿度也有一定的要求, 所谓相对湿度是指空气中水蒸气分压力和同温度下饱和水蒸气分压力之比。它反映了湿空气中水蒸气含量接近饱和的程度。相对湿度值小, 表示空气离饱和程度远, 空气较为干燥, 吸收水蒸气能力强; 相对湿度值大, 表示空气接近饱和程度, 空气较为潮湿, 吸收水蒸气能力弱。

湿度过高会产生许多对精密和超精密加工不利的因素。相对湿度超过 50% 时会使机床和仪器发生锈蚀, 光学镜头出现霉斑, 严重影响仪器设备的性能。相对湿度超过 55% 时会使冷却水管壁上出现结露现象, 假如是发生在精密装置的电路系统当中, 将是引发各种事故的隐患。湿度太高时, 空气中的水分子将把硅片表面粘着的尘埃化学吸附在表面上而难于清除, 图 13-3 给出的是关于硅片上吸附的 10 μm 直径以上的尘埃, 用空气吹也去除不掉的比例的调查结果。由图可知, 湿度越高, 吹不掉的比例也越高。

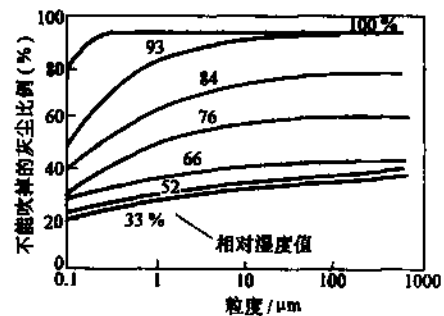


图 13-3 湿度对尘埃粘附的影响

在实际生产当中, 相对湿度过低也不利于精密和超精密加工。当相对湿度低于 30% 时, 有些材料由于干燥而变脆和易燃; 静电力的作用使尘埃更易吸附于物体表面; 某些半导体器件容易发生击穿。所以一般情况下, 相对湿度应控制在 35% 到 45% 之间。湿度的波动范围相应规定了 $\pm 10\%$ 、 $\pm 5\%$ 和 $\pm 2\%$ 几个等级。当前精度要求非常严格的某些半导体工业已经需要将湿度波动范围控制为 1%, 而且今后会更加严格。表 13-5 给出了美国 209B 标准温度和湿度的控制建议。

表 13-5 温度和湿度的控制建议

美国 209B 标准	温度/℃			湿度/(%)		
	范围	推荐值	波动值	最高	最低	波动值
	19.4~25	22.2	±2.8 特殊需要 时为±0.28	45	30	±10 特殊需要 时为±5
趋势			±0.1	45	30	±2

1.3 洁净室

洁净室是指将室内空气中尘埃微粒、温度、湿度、压力流速和气流分布形式及其形状等控制在一定范围内的房间。它为精密和超精密加工提供了必需的空气环境和热环境，是整个支撑环境的重要基础设施。

1.3.1 实现空气净化的基本要求

(1) 发尘量要小 包括尽量不带尘埃进入洁净室和在净化区域内不产生尘埃两个方面。操作人员应穿无尘工作服并经专门设置的“风淋室”后再进入洁净室，所携带的工件及物品必须预先认真洗净并经由特设的物品传送箱送进洁净室，防止未净化的空气混入洁净区。尽量缩短操作人员的作业路线，不做多余无用的动作，限制尘埃的产生。

(2) 及时排除尘埃 洁净室内只要有作业操作，就不可避免地会有尘埃产生。重要的是不让产生的尘埃停留和扩散，及时加以排除。为了保证这一点，内部装修应尽量选用难以积存尘埃的不易带静电的材料，防止尘埃吸附停留。在易产生尘埃微粒的区域附近进行排气，防止尘埃扩散形成二次污染。

(3) 供给洁净的空气 所谓尘埃，一般以 $0.5\mu\text{m}$ 为基准，用普通的空气过滤方法是不能去除掉的。适合精密和超精密加工要求的洁净室一般使用 HEPA (High Efficiency Particulate Air Filter) 超高性能过滤器，以保证洁净空气的供给。虽然洁净室的密封性有严格要求，但总难免有泄漏，为了保持与外界有一定的压差和及时排除尘埃，不断地送入洁净的空气是实现和保持洁净度的最基本措施。

1.3.2 空气过滤器

空气过滤器是空气净化的关键设备。过滤器的性能指标主要有效率、阻力、容尘量、风速和流速等。

过滤效率是较为重要的指标，它是指在额定风量情况下，过滤器捕获的尘埃量与过滤器前进入过滤器的尘埃量的百分比。由此可得过滤器效率 η 为

$$\eta = \frac{Vc_1 - Vc_2}{Vc_1} \times 100\% = \left(1 - \frac{c_2}{c_1}\right) \times 100\% \quad (13-3)$$

式中 V ——通过过滤器的风量；

c_1 ——过滤器前的空气含尘浓度；

c_2 ——过滤器后的空气含尘浓度。

过滤器的阻力是另一个较为重要的指标，用压力降 ΔH 来表示。它随过滤器通过的风量大小而变化，评价时是指额定风量而言的。显然，随着过滤器的使用时间增加，其阻力也会因尘埃滞留而不断加大。通常把未粘尘的新过滤器的阻力称做初阻力，把需要更换的过滤器的阻力

叫做终阻力。一般情况规定终阻力为初阻力的两倍。

常用的过滤器可以分为粗效过滤器、中效过滤器和高效过滤器等几种。它们的主要性能如表 13-6 所示。

从表中可以看出，粗效过滤器只能滤掉较大颗粒尘埃，适用于一般净化要求的情况。对于有中等净化要求的情况应设置粗效和中效两道过滤器；对于有超净要求的情况，则至少应设置三道过滤器，前两道为粗效和中效过滤器，作为预过滤系统，以减轻末级过滤器的负担，延长高效过滤器的使用寿命。

表 13-6 空气过滤器的分类

类别	有效的捕集尘埃直径/ μm	计数效率(%) 对直径为 $0.3\mu\text{m}$ 尘埃	阻力/ Pa
粗效过滤器	> 10	< 20	≤ 30
中效过滤器	≥ 1	20 ~ 90	≤ 100
亚高效过滤器	≥ 0.5	90 ~ 99.9	≤ 150
$0.3\mu\text{m}$ 级过滤器	≥ 0.3	≥ 99.91	≤ 250
$0.1\mu\text{m}$ 级过滤器	≥ 0.1	≥ 99.999 (对直径为 $0.1\mu\text{m}$ 尘埃)	~ 250

要求洁净度在 10 级以上的超级洁净室，须使用一种更高性能的 ULPA (Ultra Low Penetration Air) 过滤器作为末级过滤器，它捕集 $0.1\mu\text{m}$ 直径尘埃的效率达 99.999% 以上。

高效过滤器用纸状超细玻璃纤维和超细石棉纤维作为过滤材料，孔隙非常小，过滤效率很高。为减少阻力，就必须增大过滤面积，将过滤纸往返多次折叠，如图 13-4 所示 HEPA 高效过滤器的结构形式，能使实际过滤面积达到过滤器断面面积的 60 多倍。

1.3.3 气流组织

洁净室的气流组织的主要作用是把已有的尘埃尽快而有效地排出去，并阻止外界尘埃进入。在此过程中要防止尘埃二次飞扬，以减少尘埃对工艺过程的污染。工作区的气流速度应满足空气洁净度的要求。

洁净室的气流组织形式主要有乱流和层流两种形式。

1. 乱流形式

乱流形式是将净化的空气由顶棚送进室内，再由地面或接近地面的墙壁处回气，气流自上而下，与尘埃的重力沉降方向一致，见图 13-5。它是用洁净的空气稀释室内尘埃的浓度，逐渐排出室内尘埃而达到净化要求。由于空气流向不同，所以称作乱流形式。它的单位时间内的换气次数是一个比较重要的指标。要保持 1000 级水平，每小时需换气 60 ~ 70 次以上。同时为了避免吹起表面尘埃而造成再污染，一般将吹过水平表面的气流速度控制在 0.2m/s 以下。

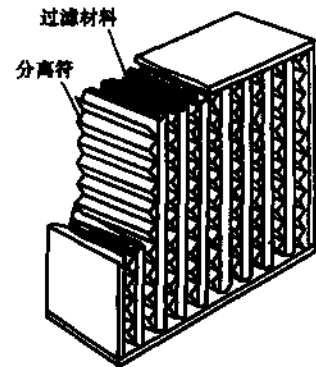


图 13-4 高效过滤器(HEPA)

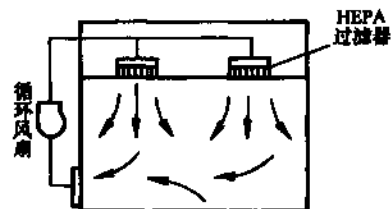


图 13-5 乱流形式

乱流型式受到送风口和回风口布置和结构的限制，尘埃可能随乱流向任一地点扩散，只能维持洁净度 1000~100000 级的水平。但是乱流形式的洁净室的建设费用和运行费用都较小，因而应用广泛。

2. 层流形式

层流形式是使室内的气流流线几乎平行，以均匀的速度向一个方向流动，没有涡流产生。气流速度可以参考美国 209B 标准，采用 0.45m/s。由于气流速度与通风量有关，气流速度越大，所要求的通风量就越大，能源消耗也相应加大。为了能既满足空气净化化的要求，又节约能源，有人提出了各种不同情况下控制污染所需的最低风速如表 13-7 所示。层流形式中净化的空气直接流过作业区冲洗尘埃，可得到非常高的洁净度，达 100 级或更高，而且这种系统一般启动后 1~2min 就可以达到要求的洁净度。但其建设费用和运行费用都比较高，只有在必要时才采用。

层流形式又分为垂直层流方式和水平层流方式。

(1) 垂直层流方式 垂直层流方式的特点是在洁净室整个顶棚上装满高效过滤器，整个地面布满回风口，送入室内的洁净气流充满整个洁净室断面，流速均匀，象“活塞”一样把室内的尘埃迅速压下排走，如图 12-6 所示。整个洁净室就成了高洁净度的环境。

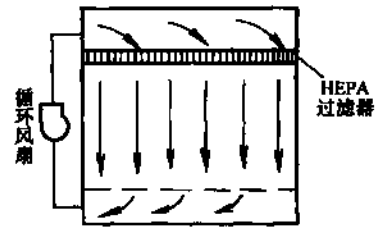


图 13-6 垂直层流方式

表 13-7 下限风速

洁 净 室	下限风速/(m/s)	条 件
垂直层流	0.12	无人或很少有人进出，无明显热源
	0.3	无明显热源的一般情况
	>0.5	有人，有明显热源
水平层流	0.3	平时无人或很少有人进出
	0.35	一般情况
	>0.5	要求更高或人员进出频繁的情况

(2) 水平层流方式 水平层流方式的特点是在一侧的整个墙面上装满高效过滤器，将相对的另一侧的整个墙面作为回风口。送入室内的洁净气流以水平方式通过洁净室断面，完成排除尘埃的任务，如图 13-7 所示。由于水平层流方式气流方向与尘埃沉降方向不一致，所以其断面风速应略大于垂直层流方式气流的断面风速，以减轻尘埃沉降现象的影响。室内沿气流方向和从上到下方向洁净度逐渐降低，在加工作业安排与布置时应加以考虑。

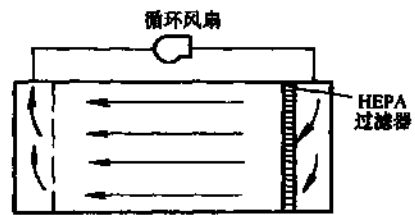


图 13-7 水平层流方式

1.3.4 正压控制

外部空气渗入洁净室是影响室内洁净度的重要原因。为了保持室内环境的洁净度和温湿度，防止外界空气渗入，需要保持室内具有一定的正压，如图 13-8 所示。室内正压是靠送入风量大于排出风量达到的。较高的正压值，虽然有利于防止外界空气渗入，但所需新风量加

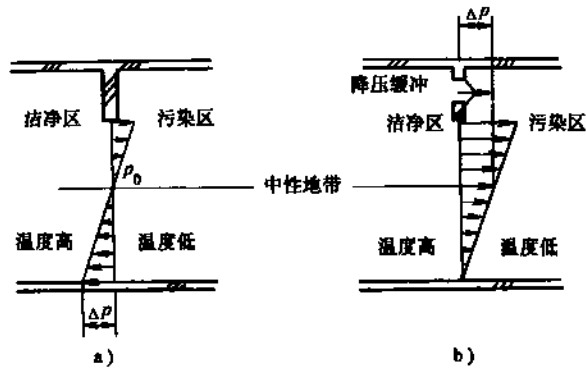


图 13-8 因温度差产生的开放部气流

a) 有污染 b) 无污染

大，缩短了高效过滤器的寿命，增加了能量消耗和运行费用。所以应使室内正压值维持在规定的合理值内。必要的压力差随不同的场合有所不同，基本情况如表 13-8 所示。

表 13-8 必要的压力差

相应的场合	最低压力差/Pa
不同级别洁净室相互之间	4.9
洁净室与准洁净室之间	9.8
洁净室与一般工作室之间	14.7

由于系统运行过程中各级过滤器积尘量的不断增加使过滤器阻力也随之加大，室内压力也会产生变化，所以必须采取措施进行压差控制。最简单的方法是在回风口上安装空气阻尼层如尼龙布或泡沫塑料等，以增加室内压力。较常用的方法是安装余压阀或差压式电动风量调节阀等压力调整装置。

1.3.5 温度和湿度的控制

在洁净室内，精密和超精密加工过程中消耗能量转变成的热和操作人员身体散发出的热是影响恒温环境的主要内部因素；洁净室外的温度与室内温度不一致而产生的热传递是影响恒温环境的主要外部因素。恒湿也有类似的主要影响因素。因此洁净室的恒温、恒湿控制是要随时进行的。空气调节系统就是解决这一问题的关键设施。

空气调节系统中有许多空气处理设备，其中包括空气加热设备、冷却设备、加湿设备和减湿设备。除了空气电加热器及使用固体吸湿剂的设备外，多数是空气与其他介质的热湿交换设备。水、水蒸气、液体吸湿剂和制冷剂都能被做为热湿交换的介质，通过直接接触方式或表面式热湿交换方法进行温湿度控制。表 13-9 所示为温湿度控制系统。室内采用电子温度传感器，由出口露点传感器控制加湿器，用电子调节器控制空调机。

表 13-9 温度、湿度控制系统

控制幅度	空调机的控制	热源控制
$\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ $\pm 2\%$	电加热器的再热控制吹出气体的温差 1°C 以内	送水温度固定 $\pm 1^{\circ}\text{C}$
$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ $\pm 5\%$	湿水管再热控制吹出气体的温差 5°C 以内	送水温度固定 $\pm 1^{\circ}\text{C}$
$\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ $\pm 10\%$	湿水管再热控制吹出气体的温差 10°C 以内	送水温度固定 $\pm 2^{\circ}\text{C}$

1.4 分层次的局部环境

精密和超精密加工要求的支撑环境因行业不同而有所不同,即使是同一种行业,不同工序要求的环境也不相同。某一产品的生产常常同时需要有普通环境、精密环境和超精密环境。在具体实现这些环境时,不是分别单独设置,而是采取逐层提高的办法。即在建设恒温洁净室时,规划成一层套一层的局部环境结构,最外层是一般环境,往里一层是精密环境,套在一般环境之中,越是里层,恒温精度和洁净度等级越高。最里层是恒温精度和洁净度等级最高的超精密环境。这样做可以使得超精密环境容易达到,而且相对来说节省费用,同时相当于在超精密环境外面设置了多层保护层,提高了安全性和可靠性。在安排生产工艺流程时,要使物质流向从一般环境向精密、超精密环境逐层流动,尽量避免物流方向的交叉,对维持超精密环境是十分必要的。

在精密和超精密加工中,像高精度半球面金刚石车削和硬磁盘涂层表面高点铲刮等,切削加工区域的温湿度和洁净度常常是很难控制的。针对这些情况可以采用更为局部的恒温和净化措施。

安装在恒温洁净室内的高精度非球面金刚石车床整体被透明塑料罩子罩起来,内部设有多个喷嘴,将大量的经过精细的恒温处理的冷却油从上面喷淋到机床的各个部位,使加工区域的温度保持在 $20 \pm 0.1^\circ\text{C}$ 的范围内。流回油箱的油流不仅带走了机床运转和切削加工产生的热量,同时也带走了切屑和尘埃。这是一个典型的采用设备局部恒温的例子。

计算机硬磁盘涂层表面高点铲刮仪安放在1000级的洁净环境中,高速旋转的磁盘与宝石铲刮头块之间的间隙控制在 $0.4\mu\text{m}$ 左右,表面上 $0.4 \sim 0.8\mu\text{m}$ 高的凸起物不断地被铲刮头块撞击下来形成尘埃,必须随时清除才能避免安装在铲刮头臂上的声发射高点检测装置发生误报信号。于是在磁盘和铲刮头臂外围增加了一个有机玻璃外罩做为局部洁净腔,通过高效过滤器送入洁净的空气使腔内达到100级的洁净度,保证了磁盘高点铲刮工序的顺利进行。这是一个典型的采用加工区局部净化的例子。

2 振动环境

2.1 振动干扰的影响

精密和超精密加工对振动环境的要求越来越高,限制越来越严格。这是因为工艺系统内部和外部的振动干扰会使得加工和被加工物体之间产生多余的相对运动而无法达到需要的加工精度和表面质量。例如在精密磨削时,如果有振动干扰会产生多角形的轮廓形状而影响加工精度,表面粗糙度也达不到镜面要求。只有将磨削时的振幅控制在 $1 \sim 2\mu\text{m}$ 时,才可能获得 $R_a 0.01\mu\text{m}$ 以下的表面粗糙度。当然,这就必须控制外界振动干扰引起的振幅和机床空运转时的振幅比这个数值还要小。

精密和超精密加工的质量不仅与振动干扰的振幅有关,而且与振动干扰的频率有关。较高频率的振动能被工艺系统滤除一部分,但小于70Hz的振动干扰严重地影响加工表面质量。所以较低频率振动的振幅应控制在 $0.125\mu\text{m}$ 以下,而较高频率振动的振幅应控制在 $0.25\mu\text{m}$ 以下,尤其是类似放置超过100万倍电子显微镜的设施和刻线宽度为亚微米级的半导体加工设备等,对微小的振动干扰也极为敏感,更要特别注意对振动干扰的控制。

在一般情况下,对精密和超精密加工构成威胁的微振动,其振动加速度为 $2 \times 10^{-2}\text{m/s}^2$ 以

下, 振动振幅为 $5\mu\text{m}$ 以下, 频率在 $0.5 \sim 70\text{Hz}$ 之间的情况较多, 这种微小振动是属于所谓暗振动, 即“常时振动”的范围, 主要来自于:

(1) 室内振动 人员行走产生的振动、设备振动产生的振动、物料搬运产生的振动、辅助设施产生的振动。

(2) 室外振动 交通运输产生的振动、工厂生产产生的振动、建设施工产生的振动、辅助设备产生的振动。

(3) 自然界振动 常时微动及风等。

这些微振动源通过不同的途径传播到精密和超精密加工区域而产生影响。所以必须在搞清主要振动源的基础上, 分析它们可能的传播途径, 采取积极的预防和隔离措施, 以消除振动干扰的影响, 保证精密和超精密加工对振动环境的要求。

2.2 振动干扰的消除

为保证精密和超精密加工的正常进行, 必需采取有效措施消除振动干扰的影响, 其主要途径如下:

2.2.1 内部振动干扰的消除——防振

所谓内部振动干扰是指工艺系统内部自己产生的振动干扰, 这是振动干扰最重要的部分, 如果内部振源没能消除, 外界环境再好也是无济于事的, 所以首先要防止工艺系统内各部分产生振动干扰。

(1) 提高设备回转零件的动平衡精度 砂轮、带轮、齿轮、转轴等在工作时高速回转的零部件, 经常存在不平衡力和力偶, 这是产生内部振动干扰的基本原因。只有通过精细的静、动平衡之后, 才能消除由于离心力而引起的振动干扰。另外, 要特别注意回转零件的加工精度和消除回转零件之间的装配间隙, 因为加工误差和装配间隙都会产生不平衡力和力偶。

(2) 减少设备传动系统的振动干扰 在必要时应对驱动电动机的转子进行动平衡; 轴承零件应当进行精化处理。为了减少传动带的振动, 应尽量选用厚度均匀的薄型带, 柔软的平带比较硬的 V 带要好; 单根带比多根带好。

(3) 减少液压系统的干扰 精密和超精密加工设备常常使用液压系统作为驱动和控制的动力源。由于液压泵的高速回转, 难免产生振动干扰, 而且大部分液压泵的工作状况决定了液压是波动的。为了减少液压系统的振动干扰, 一般把液压站与设备分开, 放置于隔振良好的基础。同时采用高性能的储能器以减少液压的波动。

(4) 提高加工设备的抗振性 提高加工设备的静刚度是增加抗振性的重要措施, 包括提高设备的整体刚度、局部刚度和接触刚度。这样有助于提高系统的固有频率和降低振动振幅, 无论对抵抗强迫振动还是抵抗自激振动都是十分有效的。另外, 还可以用将砂芯封留在大型铸件内部、合理安排加强肋的分布等办法增大阻尼系数, 改善设备的动刚度, 有效地提高设备的抗振性。

2.2.2 外界振动干扰的消除——隔振

外界振动干扰常常是独立存在而不可控制的, 如交通运输产生的振动干扰和建设施工产生的振动干扰等, 尤其是自然界存在的常时微动和风产生的振动等干扰, 只能采取各种隔离振动干扰的措施, 阻止它们传播到工艺系统中来。

最基本的隔振措施是采取远离振动源的办法, 事先对场地外的铁路、公路等振动源进行调查, 必须保持相当的距离。在建设布局上把动力房、空调机室等设施与加工场地的距离尽量远一些, 使对振动敏感的设备不受影响。

精密和超精密加工的隔振措施常常是多层次的。首先洁净室甚至整个车间都应当建筑在一个良好的隔振地基上,然后在这个隔振地基的基础上再安放隔振的弹性材料或隔振元件,以达到更好的隔离振动干扰的目的。

2.3 隔振器的隔振原理

在精密和超精密加工中,常用隔振器把加工设备与地基隔离开,以避免外界振源对加工精度的影响,用隔振器把加工设备与外界振动干扰隔离开来的方法称为设备的隔振。

为了讨论简化,把隔振器的隔振基本原理用单自由度振动系统力学模型加以说明,如图 13-9 所示。

假定加工设备的弹性不计,其质量为 m ,而隔振器的质量不计,其刚度为 k 、阻尼系数为 δ 。外界振动干扰源为垂直振动 $x_0 = a \sin \omega_j t$,按单自由度强迫振动可以推导出以下关系

$$A = \frac{a \sqrt{1 + (2\zeta\lambda)^2}}{\sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2}} \quad (13-4)$$

式中 A ——加工设备的振幅(mm);

a ——外界振动干扰的振幅(mm);

ζ ——阻尼比或衰减系数比;

λ ——频率比, $\lambda = \frac{\omega_j}{\omega_n}$;

ω_j 、 ω_n ——振动干扰频率和系统固有频率(Hz)。

隔振效果用被隔振加工设备的振幅 A 与外界振动干扰的振幅 a 的比 η 来表示,称为隔振系数或振动传递率,故有

$$\eta = \frac{\sqrt{1 + (2\zeta\lambda)^2}}{\sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2}} \quad (13-5)$$

如果忽略阻尼,即 $\zeta = 0$ 时,则振动传递率为

$$\eta = \left| \frac{1}{1 - \lambda^2} \right| \quad (13-6)$$

图 13-10 表示了此时的振动传递率和振动频率比的关系。

由式(13-6)和图 13-10 可以看出:

1) 当外界振动干扰频率小于系统固有频率,即 $\lambda < 1$ 时,则 $\eta > 1$ 。这时的振动干扰力全部通过减振器传给加工设备,不能起到应有的减振作用。

2) 当外界振动干扰频率等于系统固有频率,即 $\lambda = 1$ 时,则 η 趋于无穷大,整个系统发生共振。这时不仅起不到减振作用,反而会加剧系统的振动。

3) 当外界振动干扰频率与系统固有频率的比 $\lambda > \sqrt{2}$ 时,则 $\eta < 1$ 。只有在这时候,减振器才起到减振作用。

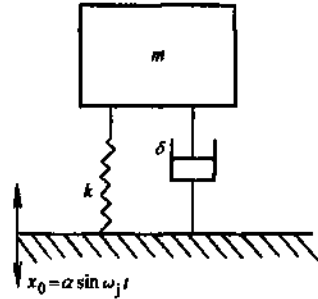


图 13-9 单自由度隔振系统的力学模型

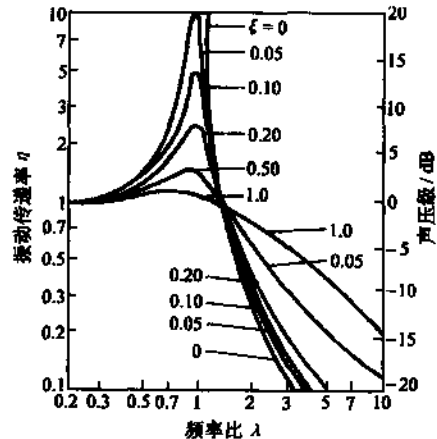


图 13-10 振动传递率曲线

因此,要想取得理想隔振效果,就必须使选用的弹性支承的固有频率满足 $\lambda > \sqrt{2}$ 的条件。虽然从理论上讲 λ 值越大, η 值越小,隔振效果越好。但实际上 $\lambda > 3$ 以后,隔振效果变化并不十分明显,同时 λ 值大,隔振器的静扰度就大,装置稳定性差,造价还高,所以工程上一般 λ 值取 3 左右。

2.4 隔振元器件

按上述隔振原理,工程中实施的隔振措施,大都是通过机床设备和地基之间放置弹性支承来实现的。这些弹性元件主要有隔振垫层和隔振器。它们的主要作用在于都具有一定刚度,可以产生一个与振动干扰位移成正比的恢复力;同时又都有一定阻尼,可以产生一个与振动干扰速度成正比的阻尼力,如果使作用在地基上的这两个力的矢量和变得很小,由设备振动时的惯性力部分地抵消外界振动干扰,即可达到积极隔振的目的。设计良好的弹性支承能吸收大部分的外界振动干扰,加工设备依靠自身的惯性保持基本不动。

2.4.1 隔振垫层

最简单的隔振措施是选择合适的弹性材料做为隔振垫层。根据弹性材料的允许荷载、动态弹性系数和振动干扰的频率等条件,选择合适的弹性材料种类、厚度等参数;根据机床设备的总质量,选择弹性材料的横截面积或垫层个数。

常用的隔振垫层弹性材料有软橡皮、中硬橡胶、海绵橡胶、孔板状橡胶、天然软木、软木屑板、毛毡、玻璃纤维及泡沫塑料等。它们没有确定的形状和尺寸要求,一般是根据具体情况来拼排和裁剪的。

2.4.2 隔振器

隔振器是经过专门设计、制造的具有确定规格形状和减振功能的弹性元件。常见的隔振器有弹簧隔振器、橡胶隔振器、弹簧与橡胶组合隔振器和空气弹簧隔振器等。

(1) 弹簧隔振器 弹簧隔振器是由一个或几个相同的金属弹簧、定位块、螺栓和外罩等零件组成的,其中弹簧是关键隔振弹性元件。由于它的承载能力强、静载压缩量大、固有频率低,不仅隔振效果好,而且性能稳定可靠,因此应用十分广泛。(见图 13-11)。

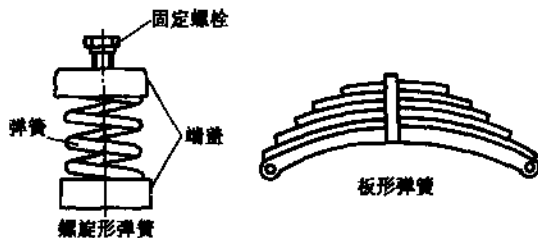


图 13-11 弹簧隔振器

(2) 橡胶隔振器 橡胶隔振器是由耐油的防振橡胶,内外金属环和防护外罩等零件组成的。其中防振橡胶是关键隔振弹性元件。虽然它的承载能力、静载压缩量和固有频率等性能参数都比不上金属弹簧,但由于它的阻尼很大,对高频成分的隔离性能好,安装、更换都比较方便,有良好的隔振效果,而且价格便宜,因此应用也十分广泛。(见图 13-12)。



图 13-12 橡胶隔振器

(3) 弹簧与橡胶组合隔振器 弹簧与橡胶组合隔振器是由金属弹簧、防振橡胶、定位块、金属环和防护罩等零件组成的。其中金属弹簧和防振橡胶是关键隔振弹性元件。它既具有弹簧隔振器的承载能力强、固有频率低的特点,又具有橡胶隔振器阻尼大的特点。在结构上常采用

的有弹簧与橡胶并联布置和串联布置两种形式。有的是在金属弹簧上包涂上一层防振橡胶，或将防振橡胶插入盘簧内部，可以有效地消除传递到弹簧本身的高频成分。因此，当采用橡胶隔振器不能满足要求，而采用弹簧隔振器又阻尼不够时，可以采用弹簧与橡胶组合隔振器。

(4) 空气弹簧隔振器 空气弹簧隔振器是由空气、橡胶和外罩等零件组成的。其中空气和橡胶是关键隔振弹性元件，它是将普通空气打入用橡胶材料做成的波纹管中，利用空气的弹性达到隔振的目的。它的固有频率可以做到很低，具有在载荷变化时固有频率可保持不变的特点。有的空气弹簧隔振器的高度可以通过注入空气的多少来进行调整，由于空气和橡胶的特性，对高频成分的隔离性非常好，因此适用于防止微振的情况，特别是精密和超精密加工设备的防振。它的主要缺点是结构比较复杂，价格比较贵。

(5) 常用隔振元件的适用范围 图 13-13 为常用隔振元件的适用范围。根据所需隔振机器的干扰频率及隔振要求，由图 13-13 所示图线可选用合适的隔振元件，并确定其固有频率和挠度等主要性能指标。如某机器的干扰频率为 15Hz，需设计振动衰减量 $N = 30\text{dB}$ 的隔振系统，由图可知，可以采用金属弹簧或空气弹簧，该系统的固有频率为 2.5Hz，其静挠度为 40mm。

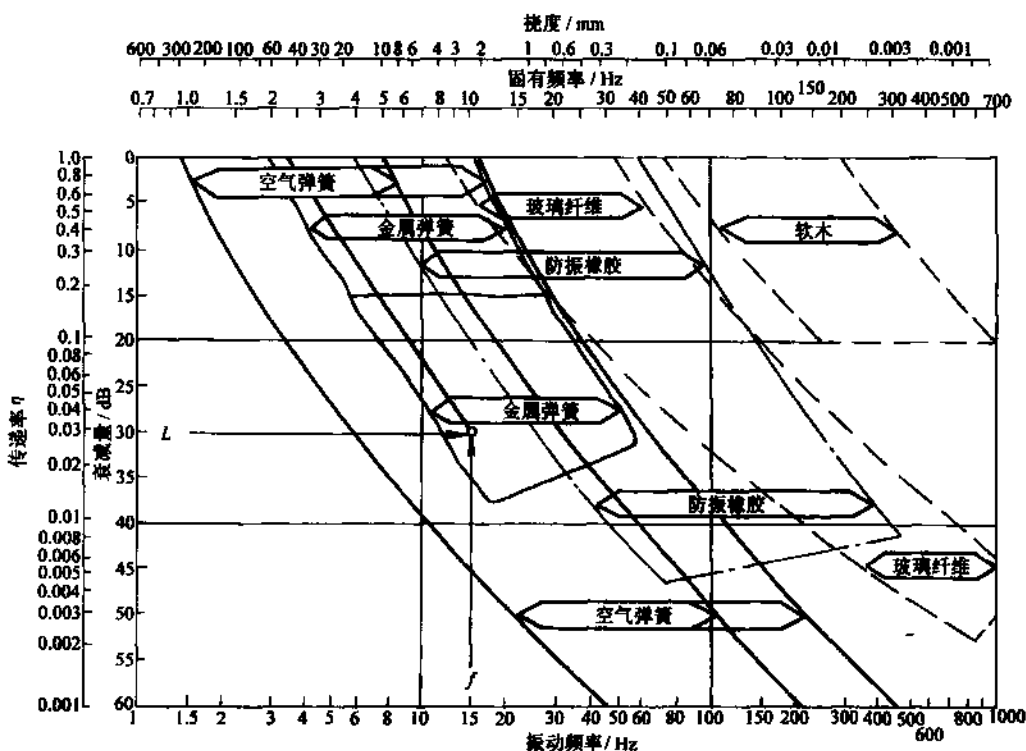


图 13-13 常用隔振元件的适用范围

2.4.3 有源控制器

在单自由度振动系统中，设质量为 m ，阻尼系数为 δ ，刚度为 k ，振动干扰的外力为 F ，则其运动方程可表示为

$$m\ddot{x} + \delta\dot{x} + kx = F \quad (13-7)$$

在这个方程式中，表示了振动状态所有的力及它们之间的关系。其中左边第一项是质量与加速度的乘积表示惯性力，第二项是阻尼系数与速度的乘积表示衰减力，第三项是刚度与位移的乘积表示弹性力。左边所有力的和与右边的振动干扰外力相等。由此可见，如果能控制住所有这些力，就可以控制住振动。这就是振动有源控制的基本思想。

图 13-14 是一个使用补偿质量的有源控制示例。它通过位移传感器获得控制量信息，由专门的控制器以该信息为基础输出相应的控制信号使动作器产生附加的控制力来达到减振目的。

这种有源控制器目前已有商品出售，而且能够实现 3 个轴方向的控制。但由于使用电子控制、结构复杂，所以价格十分昂贵，而且受控制力的限制，使被减振的设备重量必须控制在一定范围内，因此实际应用还很少。

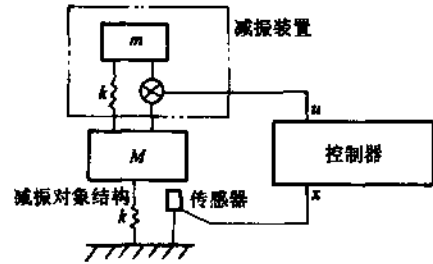


图 13-14 使用补偿质量的有源控制示例

3 噪声环境

3.1 噪声及其影响

所谓噪声是指使人烦恼和对工作有妨碍的声音。它是由各种不同频率和声强的声音杂乱无章地组合而成的。现代工业生产和施工建设以及交通运输等生产活动，使噪声污染已经成为一个严重问题。图 13-15 表示了不同情况的噪声大小和对人及工作的影响。

对精密和超精密加工来说，操作者长时间在封闭的洁净室中工作，人的情绪受噪声的影响将更为严重，因此必须重视噪声的影响。

衡量洁净室噪声的主要指标是：

1) 把噪声使人产生的烦恼情绪分为极安静、很安静、较安静、稍嫌吵闹、比较吵闹和极吵闹七个等级。最后两级属于高烦恼水平。在同一环境中的高烦恼人数与总人数的百分比为高烦恼率，一般不应超过 30%。

2) 从三个方面评价噪声对工作效率的影响，它们是集中精神高影响率、动作准确性高影响率和工作速度高影响率。一般噪声在 70dB 以下时对工作效率影响不大。

3) 把噪声对综合通讯的干扰分为清楚或满意、稍困难、困难和不可能四个等级。资料表明在 65dB 以下时，能保证一般通话。

表 13-10 给出了洁净室噪声的判断指标。一般在动态时不超过 70dB (A)，最高不超过 75dB (A)，空态时乱流洁净室不超过 60dB (A)、层流洁净室不超过 65dB (A)。

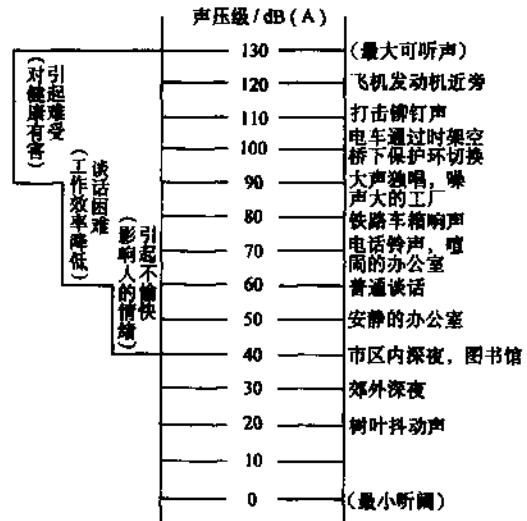


图 13-15 噪声公害与噪声标准图解

表 13-10 噪声判断指标

洁净室分类		中心频率 /Hz								A 声级
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
		声压级 /dB								
空态	乱流	79	70	63	58	55	52	50	40	≤ 60
	层流	83	74	68	63	60	57	55	54	≤ 65
动态		87	78	72	68	65	62	60	59	≤ 70 - 75

3.2 噪声源

工业生产中常见的噪声主要有空气动力噪声、机械噪声和电磁噪声。

空气动力噪声是由于空气流动时非稳态的压力突变引起空气振动而产生的。洁净室的空气动力噪声主要来自各种风机，送、排气装置和使用压缩空气为动力的装置等。

机械噪声是由于机械设备的各个部件受外力后引发的固体振动而产生的。洁净室的机械噪声主要来自加工设备及其辅助机械设施。另外，还有机件之间互相碰撞而产生的撞击噪声。

电磁噪声是由于电动机和某些电器内部空隙交变力的相互作用而产生的。洁净室的电磁噪声主要来自加工设备的驱动电动机、继电器、电磁铁等装置。这种噪声常常是持续不断的，很容易引起人的烦恼情绪。

另外，还有一种所谓固体噪声，它是由于各种物体的振动传播到洁净室的基础、墙壁、顶棚和其他结构而引起振动，并以弹性波的形式沿建筑结构传播到其他房间去，使相邻的空气发生振动而产生噪声。洁净室的固体噪声主要来自建筑物传递的弹性波。

由此可见，要改善噪声环境，就必须分析清楚所有噪声源及其不同的传播途径，全部加以控制，才可能取得明显的效果。

3.3 噪声控制

对噪声进行控制，应首先从噪声源入手，尽量减少噪声源或降低噪声辐射，包括尽可能选用低速低噪声的加工设备和辅助设施；严格控制送风管道等空调系统中的气流速度；使用高质量、高性能的电器元件；远离外界的强噪声源，如公路、工厂、学校等，这些都是控制噪声源的有效措施。其次就是在噪声传播的过程中采取控制措施，它们包括隔声、吸声、消声等方法。

3.3.1 隔声

所谓隔声就是把不能去掉的噪声源单独安放在一个隔声间内或是用隔声罩把它与外界隔离，阻碍噪声传播的方法。例如要对某齿轮箱进行噪声测试，必须把驱动电动机和变速装置安放在测试间以外的地方，并用隔声罩罩好，只是把传动带或其他不产生噪声的传动装置伸入测试间带动齿轮箱，防止驱动动力部分的噪声传播到测试间内影响噪声测试的准确性。

当一定的噪声能入射到隔声结构的隔声壁上时，会产生振动并向外辐射噪声，这部分辐射的噪声能称为透射声能。一般来说，隔声壁的透射声能与入射声能的比小于几百分之一，大部分噪声能被隔声壁反射回去了。

可以用透射系数 τ 来表示隔声壁的隔声能力。即

$$\tau = \frac{W_1}{W_2} \quad (13-8)$$

式中 W_1 ——透射声波的能量(N·m);

W_2 ——入射声波的能量(N·m)。

为了计算方便,也常用透射损失 TL 来表示隔声壁的隔声值

$$TL = 10 \log \frac{1}{\tau} = 10 \log \frac{W_2}{W_1} \quad (13-9)$$

从式(13-9)中可以看出, τ 值越小, TL 值越大, 隔声效果越好。

实际应用的隔声结构包括房间的墙壁, 顶棚、门和窗户等都必须符合隔声要求才能达到控制噪声的效果。

隔声壁的隔声值取决于它的单位面积质量、结构刚性、材料内摩擦特性、噪声频率和与其他隔声结构之间的联接方式等。为了增强隔声效果,可以把中间有空气式填充吸声材料的两层隔声壁组合使用,称为双层隔声壁。它比同质量的单层隔声壁的隔声值要高出 ΔTL , 双层隔声壁系统的固有频率越低,附加隔声值 ΔTL 值越高。另外,它的附加隔声值还与两个单层隔声壁的厚度比、刚度比及连结方式有关。设计合理的双层隔声壁的附加隔声值一般为 8~15dB。图 13-16 给出了双层墙隔声结构在三种空气层厚度时不同的隔声情况。

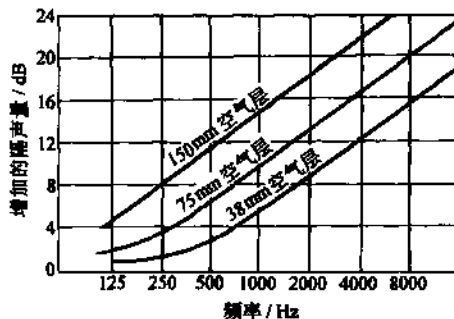


图 13-16 双层墙在三种空气层厚度时各频率增加的隔声量

3.3.2 吸声

房间中某一固定点的噪声能除了来自噪声源直接辐射的噪声能之外,还来自房间经周围墙壁和地面、顶棚多次反射的噪声能。如果在房间周围墙壁和顶棚上挂满吸声材料,地面也铺满吸声材料,房间中那个固定点的噪声能就会小得多。这种利用吸声材料控制噪声的方法叫作吸声,是降低加工场地内部噪声普遍采用的方法。

吸声材料除了反射和继续传播一部分噪声能之外,其余部分则被吸收了。这主要是由于吸声材料的多孔性和松散性所致,声波进入材料孔隙,使孔隙中空气和材料产生微小振动,是摩擦力和粘滞力把一部分声能转化为热能而被吸收。

吸声材料的吸声能力大小可用无规入射吸声系数 α_0 来表示。

$$\alpha_0 = \frac{E_2}{E_1} \quad (13-10)$$

式中 E_1 ——入射到吸声材料上的声能(N·m);

E_2 ——吸声材料吸收的声能(N·m)。

从式(13-10)中可以看出,如果声波没有被反射而射入开阔空间全被吸收时,吸声系数 α_0 为 1,而被全部反射时,吸声系数 α_0 为 0,所以吸声材料的吸声系数越接近于 1 越好。

常用的吸声材料有超细玻璃棉、开孔型聚氨酯泡沫塑料、微孔吸声砖和木丝板等。吸声法降低噪声一般可降低 10dB 左右。图 13-17 给出了不同厚度的超细玻璃棉的吸声特性。图中

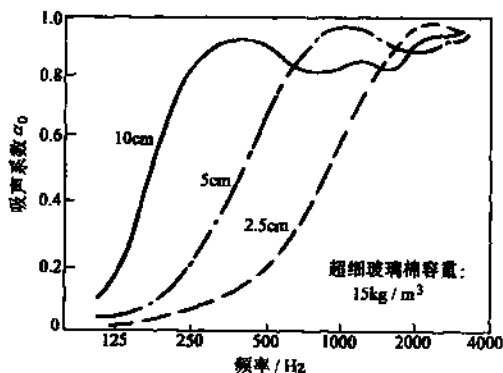


图 13-17 不同厚度的超细玻璃棉的吸声特性

的 α_0 为正入射吸声系数。

3.3.3 消声

在许多场合,可以采用专门的消声器来控制噪声传播。消声器是由吸声材料和按不同消声原理设计的特殊壳型结构组成的。一般按不同的消声原理分为阻性、抗性、共振性和复合性等形式的消声器、大量应用于净化空气系统中。

(1) 阻性消声器 把适当厚度,形状的吸声材料固定在通风管道内壁,就构成了阻性消声器。为了提高对高频噪声的消声效果,增加声波与吸声材料接触的机会,可以把大断面的管道分成几个格子,形成格式消声器;也可以把吸声材料做成曲折的板状,形成折板式消声器;还可以把大型管道内部上下错开隔成几个室,形成迷宫式消声器,如图 13-18 所示。这种消声器适用于中、高频范围。

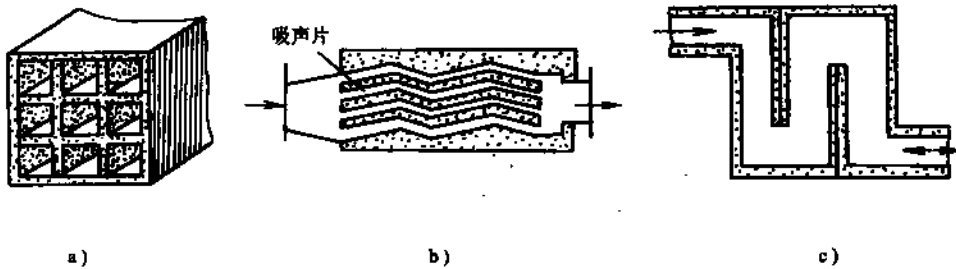


图 13-18 阻性消声器

a) 格式 b) 折板式 c) 迷宫式

(2) 抗性消声器 抗性消声器是在管道外面增加一个小室而形成的。由于气流通道截面突然变大,使得沿原管道方向传播的声波被反射回噪声源方向而达到消声目的。这个增加的小室叫做膨胀室,结构如图 13-19 所示。当膨胀室断面与管道断面的面积比大于 5 时消声效果较好。这种消声器适用于中、低频范围。

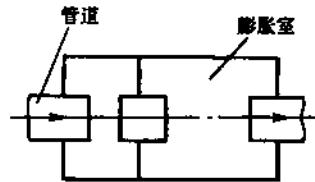


图 13-19 抗性消声器

(3) 共振性消声器 共振性消声器也是在管道外面增加一个小室而形成的,但它不是让通道截面突然变大,而是在管道壁上开了许多小孔,小室不是作为膨胀室,而是作为共振腔。在声波作用下,小孔中的空气柱往复运动,使共振腔内的空气也相应振动。于是小孔颈处空气柱和共振腔内的空气形成了共振吸声结构,如图 13-20 所示。它的固有频率由孔径、孔板厚和腔深等参数决定。当噪声频率与其固有频率一致时,由于空气柱的强烈共振与小孔壁产生剧烈摩擦,消耗了噪声能而起到消声作用。这种消声器一般用来消除频率范围较窄的低频噪声。

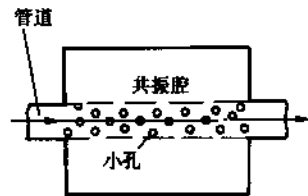


图 13-20 共振性消声器

(4) 复合性消声器 复合性消声器是综合以上各种消声器的特点设计的一种宽频程的消声器。例如阻抗复合式消声器是由一些阻性吸声板和几个抗性膨胀室组成。它综合了阻性消声器对中、高频噪声消声效果好的特点和抗性消声器对低频噪声消声效果好的特点。是一种消声效果良好的消声器。

4 其他环境

4.1 光环境

精密和超精密加工的工作内容大都要求操作者仔细严格，而工作场所又是在密闭的洁净室里，人在黑暗的环境里是无法正常工作的。因此对洁净室的光环境提出了一定的要求。洁净室的照明方式有三种，一是一般照明，它是为整个室内的照明而设置的。二是局部照明，它是为加工区域的照明而设置的。三是混合照明，它是对必要的区域在已有一般照明的基础上增加局部照明而设置的合成照明。大多数的精密和超精密加工场合都是采用混合照明。

光环境有两个主要指标，一个是照度，另一个是眩光。

4.1.1 照度

照度是衡量照明量的指标。它用单位被照面积上接受的光通量来表示，照度单位是 lx。

从操作所需精度的角度来看，越是要求精密的操作，照度就应该越高。国外洁净室的照度级别大体上是按照这个规律制订的，一般对精密级以上的操作要求照度在 500lx 到 1000lx，甚至更高。我国规定无采光窗洁净室工作面上的最低照度如表 13-11 所示。

调查表明，在天然光源照明情况下工作，照度逐步提高到 1000lx 时，精密加工的工作效率一直是呈现提高的趋势。而在人工光源照明时情况就不同了，常常是在 300lx ~ 500lx 时工作效率最高，照度达到 1000lx 时效率反而下降了。这主要是因为人工光源照明质量不好，产生令人不舒适的眩光所致。因此理想的照明，最好是采用天然光源辅以人工光源。

表 13-11 最低照度值

识别对象的最小尺寸 d 及场所/mm	视觉工作分类		亮度对比	照度/lx	
	等级			混合照明	一般照明
$d \leq 0.15$	I	甲	小	2500	500
		乙	大	1500	300
$0.15 < d \leq 0.3$	II	甲	小	1000	300
		乙	大	750	200
$0.3 < d \leq 0.6$	III	甲	小	750	200
		乙	大	750	150
$d > 0.6$	IV	—	—	750	150
通道、休息室	—	—	—	—	100
暗房工作室	—	—	—	—	30

4.2.2 眩光

眩光是衡量照明质量的指标。它是由于在视线附近有高亮度光源、光泽表面反射出高亮度光源和极高的亮度对比等原因形成的。常用眩光常数 G 来表示，下式是表达方式之一

$$G = 4.167 \frac{B_s^{1.6} \omega^{2.3}}{B_b} \quad (13-11)$$

式中 B_s ——光源 s 的照度(lx);
 B_b ——光源以外的背景平均照度(lx);
 ω ——由眼睛看到光源 s 的立体角(sr)。

眩光常数 G 值越小, 眩光越弱, 人的感觉就越舒服。 G 值与眩光引起的不舒服程度之间的关系如表 13-12 所示。

表 13-12 G 值与眩光引起的不舒服程度之间的关系

G	眩光引起的不舒服程度
600	不堪忍受
150	不舒服
35	尚可
8	感觉不到眩光

这就说明了洁净室的照明只注意照度, 即明亮度是不够的, 如果照明质量不好, 像使用裸灯泡、悬挂高度不当、亮度分布不均匀或只有局部照明而没有一般照明, 都会造成眩光过强, 使得操作人员感到不适甚至不堪忍受而达不到好的照明效果, 严重影响工作效率。因此光环境是精密和超精密加工的重要支撑环境之一。

4.2 静电环境

精密和超精密加工对静电环境的要求是十分严格的。因为在洁净室里有大量容易产生和集聚静电的高电阻率材料, 如塑料地面, 尼龙墙面、涤纶工作服等。还有大量容易产生和集聚静电的动作和机会, 如加工工艺上的搅拌、粘合、研磨、喷涂、清扫等操作; 操作工人进行操作时各种动作引起的物体间摩擦; 气流与管道、设备机构间的摩擦等。再加上相对来说较为干燥的湿度条件, 都对静电环境不利。

产生和集聚的大量静电, 有可能导致如下一些事故:

- 1) 静电放电使人受到电击而产生不由自主的动作造成失误, 甚至造成触电、碰伤、摔伤等二次伤害。
- 2) 静电放电使元器件击穿, 尤其是那些对静电放电十分灵敏的器件, 损坏率极高。
- 3) 静电放电产生的光可使胶片不正常感光; 静电放电产生的热可使易燃物起火和爆炸; 静电放电产生的电磁波可使仪器出现干扰, 设备出现误动作。
- 4) 静电本身产生的力可使尘埃微粒吸附于表面而造成制品污染, 粉尘堵塞等生产事故。

图 13-21 表示了静电放电对集成电路(IC)的破坏程度示意图。从图中可以看出, 100V 左右的静电电压就能使 IC 发生电击穿, 大约 200V 以上的静电电压就能使 IC 的接合点遭到破坏。1000V 以上的静电电压就能使 IC 的氧化膜熔断。

图 13-22 是人在步行时测得的人体电位曲线。为了消除测量过程中因人体与测量探头之间的前驱放电带来的测量误差, 人体在运动过程中一直与测量探极相连。

为减少静电的产生, 应当尽量采用抗静电或经过抗静电处理的材料铺设地板、装饰墙壁; 用高效的抗静电剂喷涂易产生和携带静电的材料和部位; 用不易产生静电或经过抗静电处理布料做操作人员的洁净服。这些都是非常有效的抗静电措施。经过抗静电处理的洁净服比未经过

处理的带静电电位可降低 80%，尘埃附着率可减少 90%。

为减少静电的集聚，防止对人的静电电击，应当限制人随时都在接触的室内地面的泄漏电阻，这个阻值越小，人体的静电就越容易从地面泄漏于大地而避免使人遭受电击。另外，应特别注意各种情况发生静电电击的界限，如非导体发生静电电击的带电电位为 10kV 左右，而人体发生静电电击的带电电位为 3kV 左右。因此，要采取措施使带电物体的电位低于静电电击电位。

以上论述了精密和超精密加工的主要支撑环境，还有很多象电磁波环境、放射线环境等在某些场合对精密和超精密加工也有很大影响，同样需要加以控制，给以必要的重视。

5 精密和超精密加工的环境设施

针对精密和超精密加工对各项环境的要求，设计了相应的设施来满足这些要求：针对空气环境，设计了具有控制洁净度、风速、风向、气流压力等功能的洁净室；针对热环境，设计了具有控制温度、湿度功能的恒温室和恒湿室；针对振动环境，设计了具有防振、隔振、消振功能的隔振室；针对噪声环境，设计了隔声、吸声、消声的无响室；针对静电环境、电磁波环境等，设计了相应的防静电室、屏蔽室等。由于各种精密和超精密加工作业和方法对洁净度的要求最为基本，最为普遍，因此，在前面较为详细地介绍了洁净室的情况。所有针对各种环境设计的这些设施，都对精密和超精密加工的正常进行起了保证和支持作用。

在实现精密和超精密加工的支撑环境时，应当明确以下几个目标：

- 1) 实现高性能的制造环境空间，它必须满足精密和超精密加工作业的各项严格要求。
- 2) 降低环境设施的原始成本和维持运转这些设施的费用，追求经济性。
- 3) 确保各项性能指标的稳定性，使作业生产能够连续稳定地进行。
- 4) 必须考虑操作者的安全和对周围环境的污染，如噪声、振动、污水和废气等公害。
- 5) 为了适应现代技术的高速发展，环境设施必须要适应制造工艺不断变化的要求。

某种精密和超精密加工作业或方法，通常都会对几种支撑环境提出要求，因此就出现了恒温洁净室、恒温防振洁净室、恒温防振无响洁净室等等。这样，随着精密和超精密加工的不断发展，对洁净室的性能和要求将越来越高、越来越多。

图 13-23 表示了现行洁净室标准与超净室标准。

表 13-13 列出了集成电路工厂超净空间规格。

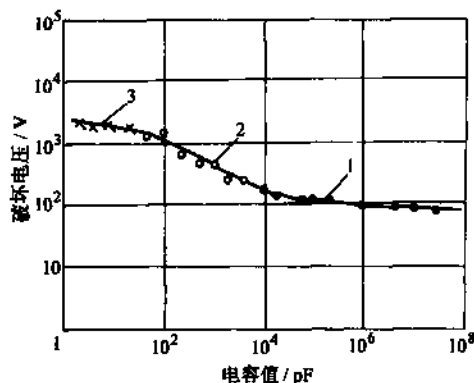


图 13-21 静电放电对 IC 破坏程度示意图
1—击穿孔 2—接合点破坏 3—氧化膜熔断

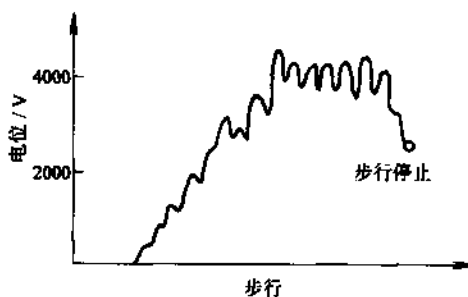


图 13-22 人步行时人体电位随时间的变化曲线

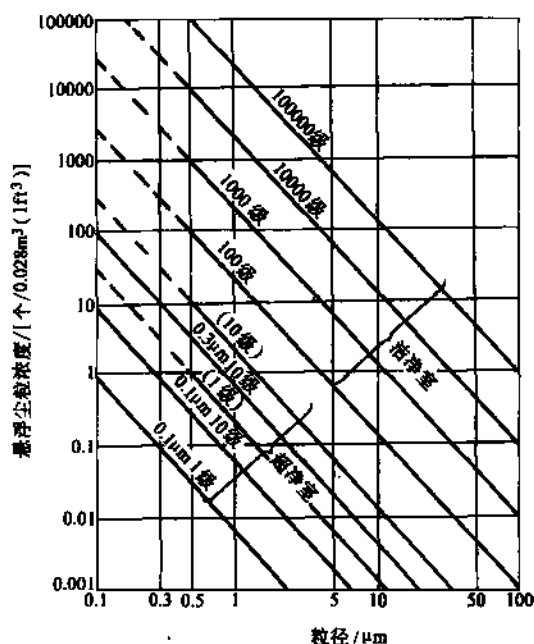


图 13-23 现行洁净室标准与超净室标准

表 13-13 集成电路工厂超净空间规格

IC、LSI 工厂超净空间规格		
等级	暂行 10 级	目前所能达到的最高洁净度
粒径	$\geq 0.1\mu\text{m}$	
个/ 0.028m^3 (ft^3)	10	
压力/Pa	10 以上, 正压	
温度/ $^{\circ}\text{C}$	确认要求 ± 0.1 精度的范围	
湿度(%)	已有要求 ± 1 的工序	
振动	在建筑基础上约 $1\mu\text{m}$ 以下	
气流	不局限于层流且要努力防止诱导空气	
除静电	设备、装置、衣服都应考虑	
电磁噪声	应对电子束曝光设备加以研究	
其他	<ul style="list-style-type: none"> ○除去药剂、气体、纯水中的尘粒 ○改善清扫方法 ○改善洁净工作服 	

图 13-24 给出了一个考虑比较全面的层流式洁净室的剖面设计情况。在这个设计中,从建筑角度看,它的空间利用合理,布置紧凑,无论是空气、水和工作气体的送、回管路安装和照

明、电器的布线及维修都比较方便。从功能角度看，除了保证洁净度、温湿度以外，还采取了措施使地面不传播振动，使室内没有噪声，使照明不产生眩光，使人体避免静电电击等，创造了一个较为完全的精密和超精密加工的支撑环境。

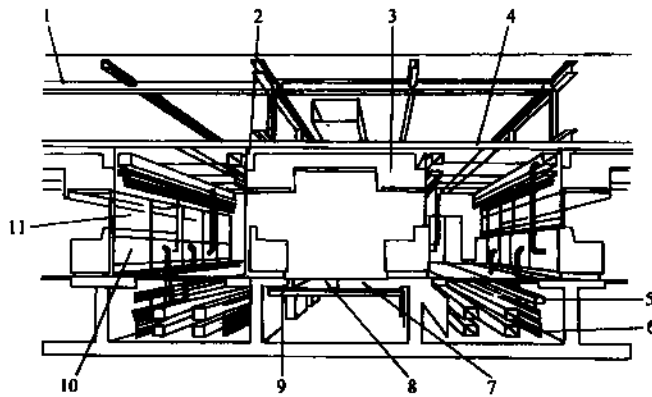


图 13-24 层流洁净室的剖面设计

- 1—双梁结构法、方便柔性导管、容易悬挂净化装置、顶棚上有便于维修的空间 2—方便起吊净化装置的构件 3—低噪声型净化单元
 4—便于维修检验 5—实用配管 6—排气管 7—防止带静电的锦条 8—不产生闪光的照明 9—非基座工作法：
 柔性地板下的有用空间、不传播走步振动的地面
 10—便于实用配管控制盘的安装
 11—方便维修控制盘

第5篇 典型精密元件加工

第14章 精密基准件加工

1 精密平板和直角尺加工

精密平板是机械制造中精密测量的基础，精密直角尺是常用的检验工具。通过这两个精密元件的制造工艺可了解精密平面的加工和测量，从而掌握获得原始平面的方法。

精密平板和直角尺的加工，一般是经过必要的机械加工和热处理(时效)，达到尽量高的精度和稳定性，然后经过研磨或刮研来得到最终的精度。

1.1 精密平板的加工

标准平板按精度共分为0、1、2、3级。前三级作检验用，3级作划线平台。

标准平板的尺寸由100mm×200mm到1000mm×1500mm。

1. 研磨方法

加工精密平板的最后一道工序是用三块平板互相对研(或对刮)的方法，其具体的加工方法及原理如下(参看图14-1)。

三块尺寸相同的平板，已进行多次时效热处理，在精刨、精铣或精磨后，进行对研或对刮时，将三块平板进行编号，分别标以1、2、3号。先说明对研的情况。

设平板1和平板2对研已完全密合，出现平板1微凹，平板2微凸的情况；再将平板2和平板3对研。两块平板也密合，出现平板3微凹，平板2微凸；然后再将平板1和平板3进行对研。由于这时两个平板都是微凹

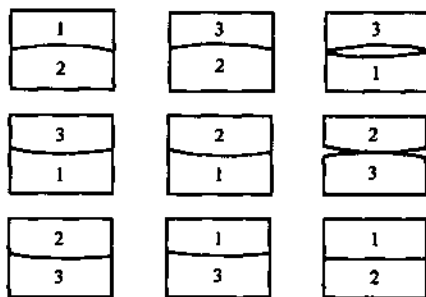


图14-1 三块平板对研(或对刮)原理

的，对研时一定是边缘先接触，经过对研后，平板1和平板3的精度一定会提高，并且比平板2的精度要高。平板1和平板3最后对研密合，可能出现平板1微凹，平板3微凸。这是第一轮对研。

第二轮对研时，由于平板1和平板3已经对研，并出现平板1微凹，平板3微凸。可将平板1和平板2进行对研，结果仍是平板1微凹，平板2微凸，但程度要小得多。然后再将平板2和平板3对研，由于两块平板都是微凸，对研后精度一定会有所提高，它们对研的结果可能是平板2微凸，平板3微凹。

再进行第三轮对研，这样依照一定的顺序1/2、3/2、3/1对研，最后三块平板的精度愈来愈高，达到接近于理想平面的程度。

至于对刮时的情况与对研相似，只是对刮时有基准平面的问题，如对刮的次序是1/2、3/②、3/1、1/2表示平板1先与平板2对刮，二块平板都刮研，3/②表示以平板2为基准刮研平

板3。所以对刮的次序是1/2、3/②、3/1、2/①、2/3、1/③……依此类推。

在对研和对刮时,要注意使其中的一块平板经常转 90° ,以免产生扭曲面,即一条对角线高,另一条对角线低。

平板在对研和对刮中,由于某些工艺因素的影响,有时往往不能达到理想的精度;甚至还会出现精度下降,因此在对研和对刮中要注意以下问题:

1) 两块平板对研(或刮前对研)时,上平板总要越出下平板一个长度 L_1 ,如图14-2所示。从左端的情况来看,可知1点的对研时间最短,从1点到2点对研时间逐渐增加,2点以后的对研时间就相等了。因此,1点研得少,2点研得多。当上板向右移动时,右端有相同的情况。因此,上板中部的接触点重,研得多(或刮研多),而四周的接触点轻,研得少(或刮研少),成微凹形状。而下板也是微凹形状,如图14-3所示。



图 14-2 平板对研(或刮前对研)时的行程影响

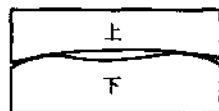


图 14-3 平板对研(或刮前对研)时容易产生的形状

2) 上板和下板在对研(或刮前对研)时,由于上板自重所形成的压强在对研运动过程中是不均匀分布的,如图14-4所示。当上板越出一个长度时,随着上板重心趋近于下板边缘时,下板的边缘部分和上板的中部所受的压强较大,因此接触点重,研得多,使得刮研后下板边缘变低,如图14-3所示。

所以,平板在对研对刮时,要注意上平板不要超出下平板太多。平板一般都用铸铁制成,有较好的刚度。近年来,花岗石平板应用日趋广泛,它有较好的刚度和稳定性,而且不会生锈,受碰后不会翻边而凸出。平板一般都作成方形,对于小平板,一般多用研磨方法进行最后加工;对于大平板,一般多用刮研方法进行最后加工,或用专门的研平板机进行研磨。因为手工研磨太费力,劳动强度大。

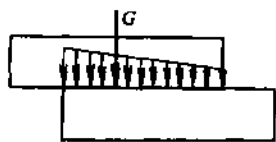


图 14-4 平板对研(或刮前对研)时上板重心的影响

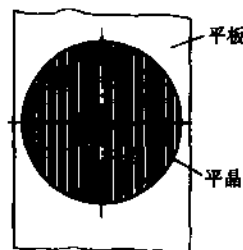


图 14-5 用光学平晶检查平板的平面度

2. 精密平板的检测

精密平板加工后,检测就成为关键,通常精密平面的检测有下列几种方法:

(1) 光学平晶检测 光学平晶是一块圆形玻璃,其上下两面本身很平而且互相平行。将它放在被检测平面上,如果被检测平面不平,则由于光波干涉造成波形条纹,而不是直纹(见图14-5)。它一般用来检查小的精密平面的平面度。

(2) 水平仪检测 水平仪通常用来检测精密平面的直线度和平面度,如检验精密机床的工

作台和导轨等。这是应用得最为广泛的一种检测方法。常用水平仪的刻度值为 $0.02 \sim 0.05\text{mm/m}$ 。特别精密的水平仪，如合象水平仪，刻度值可达 0.01mm/m 。

检测时，在被测平面上放置两块精密平尺或量块，其间距可按水平仪的大小确定，一般为 $200 \sim 500\text{mm}$ 。在其上放置水平仪，便可从刻度值量出沿某一测量方向上直线度的角度偏差。对于长的平面，可用“接测”的办法，即测量一段后，移动水平仪测量下一段。例如第一段 AB 测得读数是 $+0.02\text{mm}$ ，表示 B 点比 A 点高 0.02mm 。第二段 BC 测得读数是 $+0.02\text{mm}$ ，则 C 点比 A 点高 0.04mm 。若第二段 BC 测得读数是 -0.01mm ，则表示 C 点比 B 点低 0.01mm ，则 C 点比 A 点高 0.01mm 。

一般可用水平仪直接检测直线度。若检测平面度，则要从纵向、横向、对角线共六条线来测量(如图 14-6 所示)。

(3) 精密平尺检测 将精密平尺架于两量块之间。一般两个量块应架于离精密平尺两端各 $2/9$ 的地方，然后用不同厚度的量块或厚薄规(塞尺)来检测精密平尺刀口与该被测平面的距离，就可得到该平面的直线度。这种方法简单方便，但精度不高，一般为 0.01mm 。

(4) 自准直仪检测 自准直仪是利用平行光管中发出的平行光，到达平面反射镜后返回至分划板上，通过十字影像在分划板上的位置来测得角度差。如图 14-7 所示，从光源 3 发出的光经聚光镜 4、十字分划板 6、立方棱镜 7 和 8、物镜 1，将十字分划板 6 上的十字影像用平行光发射到平面反射镜 14，从平面反射镜 14 返回的光，经物镜 1、立方棱镜 7 和 8，成像于标尺分划板 10 上。由十字影像在标尺分划板上的位置，就可读出角度差。

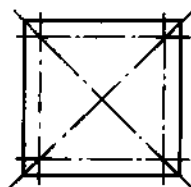


图 14-6 用水平仪测量平面度

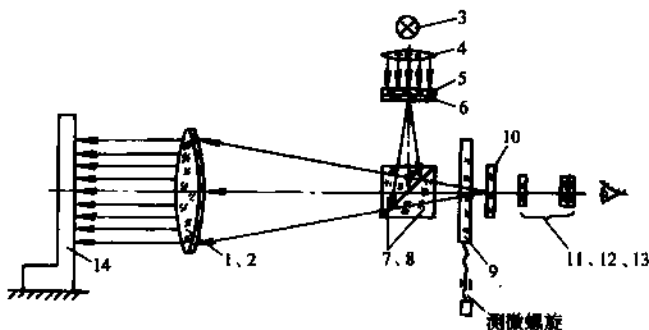


图 14-7 自准直仪的结构原理

1、2—物镜 3—光源 4—聚光镜 5—保护玻璃 6—十字分划板 7、8—立方棱镜
9—双线分划板 10—标尺分划板 11~13—目镜 14—平面反射镜

测量时，将平面反射镜放在被测平面上，在被测平面之外一定距离放置自准直仪，调整自准直仪的高低位置及转角，使从平面反射镜返回的十字影像能成像于标尺分划板上，并且对准原点。然后移动平面反射镜到另外一点，如果被测表面上这两点不是水平的，则十字影像在标尺分划板上的位置就会移动，通过测微螺旋移动双线分划板 9，来对正十字影像的位置，就可精确读数。

用自准直仪测量直线度的精度较高，一般的自准直仪读数值为 $30''$ ，最高的可达 $1''$ ，相当于 0.005mm/m 。

(5) 激光干涉仪检测 激光干涉仪测量平面的平面度是当前精密测量中精度最高的方法。首先要了解一下激光干涉仪的工作原理，激光通常是由氦-氖气体激光管或半导体激光管

产生，是一束亮度强、方向性好、频率准确的单色平行光，波长为 $0.633\mu\text{m}$ ，在精密测量上，必须要用稳频器，并且要能自动补偿受温度、湿度、气压等变化对波长的影响。用于精密测量的激光干涉仪，有三种形式：

1) 单频激光干涉仪 单频激光干涉仪实质上是一个以激光为光源的干涉仪，如图 14-8 所示，它是由激光管、稳频器、光学干涉和光电接收等部分组成。激光管发出的激光束经分光镜分成反射光束 1 和透射光束 2。反射光束 1 经参考棱镜反射回来，透射光束 2 经可动棱镜反射回来，两者在分光镜处合成相干光束。可动棱镜装在被测表面上。先测量一点，调整可动棱镜，得到一个相干光束状态。然后移动可动棱镜到被测表面的另一位置。如果被测表面不平，则可动棱镜将产生偏移，因此产生光程差。由相干光束的干涉条纹数，便可测得偏移值。由于两干涉条纹之间的距离等于光波的半个波长 λ ，如果干涉条纹数为 N ，则偏移值为

$$H = \frac{\lambda}{2} \cdot N$$

干涉条纹数可通过光电元件接收，并可用计数器计数及显示。

2) 双频激光干涉仪 双频激光干涉仪是当前精度最高的激光干涉仪，如图 14-9 所示，它的激光管放在轴向磁场内，由于喇曼效应(即单色光被分子散射后频率发生改变的现象，又称并合散射效应)，得到两个方向相反、频率相差 $1 \sim 1.8\text{MHz}$ 的圆偏振光 f_1 和 f_2 ，经分光镜 M_d 后分成反射光束及透射光束。反射光束到光电接收器 D_1 ，得到一个基准频率为 $\sin[2\pi(f_1 - f_2)t]$ 的光束，作为以后比较用；透射光束经 $\lambda/4$ 光栏将圆偏振光变为线偏振光 f_1 和 f_2 ，再到分光镜 M_r ，分量 f_1 被反射到参考棱镜 M_1 再反射回来；分量 f_2 被透射到可动棱镜 M_2 再反射回来，在分光镜 M_r 处汇合，经偏振器后由光电元件 D_2 接收，其频率

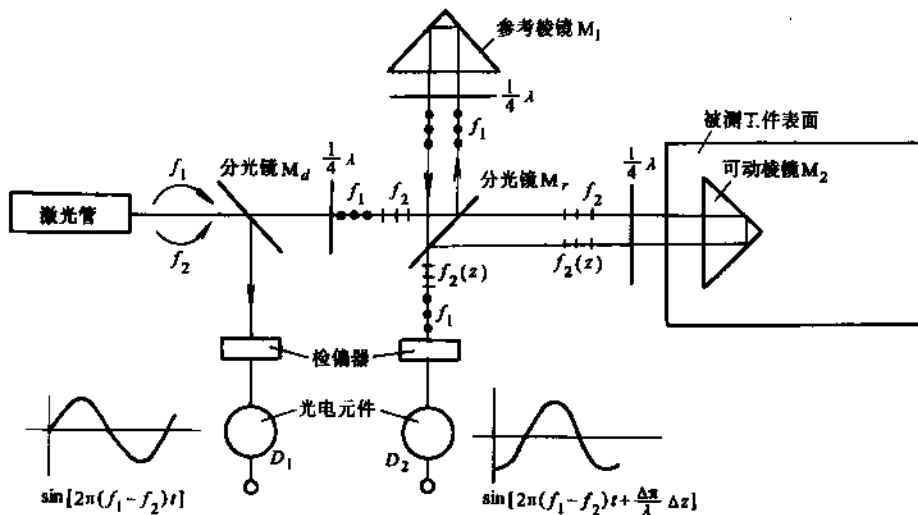


图 14-9 双频激光干涉仪原理图

$$\sin \left[2\pi(f_1 - f_2)t + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta z \right]$$

称为测量频率。

当可动棱镜位置有变化 z 时, 就会产生多普勒位移差 Δx , 因此基准频率和测量频率就不相同, 其差值经减法器及计数器计算, 便可得到偏移值, 也可以显示。

双频激光干涉仪和单频激光干涉仪不同, 它是计量频率差的变化值, 不会受激光强度、磁场变化、仪器振动等影响, 其接收信号又是交流信号, 不用直流放大器, 因此没有零点漂移的问题, 所以双频激光干涉仪的精度较高。

3) 偏振光激光干涉仪 偏振光激光干涉仪利用的是偏振光, 其频率稳定性比自然光激光干涉仪高, 因此易于保证精度。它的工作原理与单频激光干涉仪相同。

激光干涉仪不仅可以用来测平面的平面度, 而且可以用来测量长度、角度等。激光干涉仪的测量精度可达 $1''$ 以内, 相当于 0.001mm/m 。

1.2 精密直角尺的加工

精密直角尺是常用的精密量具之一, 它不仅对两个尺身平面有平面度的要求, 而且还有垂直度的要求, 因此加工比较困难。

精密直角尺也是用研磨或刮研等方法加工的, 其加工原理和精密平板相似。也是用三个直角尺, 先将每个直角尺的一个平面研好, 再研磨另一个直角边的平面。如图 14-10 所示, 先取直角尺 1 和直角尺 2, 将已研磨好的一边合在一起, 在一块精密平板上研磨另一边。待密合后, 可能直角尺的两边不垂直。再将直角尺 1 和直角尺 3 合在一起与精密平板对研, 密合后, 可能直角尺的两边也不垂直。然后再将直角尺 3 和直角尺 2 合在一起与精密平板对研, 由于这两个直角尺都是大于 90° 的, 因此研磨后, 精度一定能提高, 如此循环, 最后每个直角尺都会得到极高的垂直度, 其垂直度一般可达 $\pm 5''$ 。

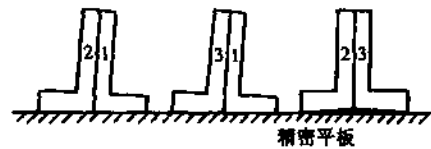


图 14-10 精密直角尺的研磨

2 精密分度板(盘)加工

2.1 精密分度板的技术要求

精密分度板是加工齿轮、花键等机床的关键零件, 它的用途主要是精确分度。举齿轮磨床为例, 从分度情况来说, 齿轮磨床可以分为单个分度和连续分度两类, 分度板就是用来单个分度的, 这种带分度板的齿轮磨床, 由于分度传动链较短, 因此精度比较高。

图 14-11 所示是一种典型的分度板结构, 它是在一块圆板上开了许多等分槽, 槽形的种类很多, 有双斜面槽和单斜面槽两类, 目前多采用单斜面槽, 图 14-11 中所示为双斜面槽。小的分度板多做成整体的, 大的分度板则由外

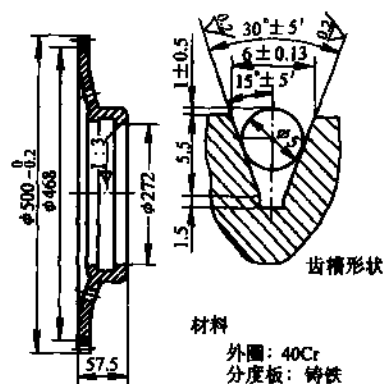


图 14-11 分度板(盘)

圈和板体组合而成，外圈多用 40Cr 材料制作，表面淬火 40HRC，板体一般多用铸铁制成，图 14-11 中所示就是这种组合式的分度板。

分度板的技术要求主要有两方面：

- 1) 安装时的定位面，如图 14-11 中所示的 $\phi 272\text{mm}$ ，1:3 的短锥。
- 2) 齿槽的精密分度：一般齿轮磨床上所用的分度板，齿槽有下列要求：
槽距差(同一圆周上任何两个槽距之差)不超过 0.004mm。
槽距累积误差不超过 0.012mm。
齿槽侧面对定位短锥孔轴线的平行度允差为 0.002mm。

2.2 精密分度板的加工工艺

现举组合分度板为例：

(1) 外圈加工

粗车。

时效：去除应力。

精车：外圆留磨削余量。

(2) 外圈与板体组合后加工

将外圈加热到 $300^{\circ}\sim 350^{\circ}\text{C}$ ，热套在板体上。

车外圆及两端面。

磨 1:3 锥孔至尺寸，接触面积 75%。

铣齿槽：可在滚齿机上加工。

淬火：表面淬火 40HRC。

磨外圆及端面。

时效：消除内应力。

研 1:3 锥孔，接触面积 75%。

磨齿槽。

用油石将齿槽四周锐边倒角。

从加工工艺可以看出，其工艺特点是：

- 1) 关键工序是磨齿槽，通常是在专门的机床上用原始分度板分度，进行磨削。而原始分度板的加工中，精密分度是一个关键问题，将在下面阐述。
- 2) 1:3 短锥孔是定位基准，应充分注意保证它的精度。
- 3) 精密元件为了防止内应力变形，对时效是很严格的，分度板加工中安排了多次时效。

2.3 精密分度方法

1. 弧长分度法

这是一种单齿静态分度，如图 14-12 所示。在普通滚齿机工作台上安装工件，工件应与工作同心轴，工作台转动时，工件随着一起转动。在工件上安装一个锥套，此锥套也应与工作同心轴，在锥套上装一杠杆，杠杆一端的锥孔与锥套密切配合，使杠杆在锥套中能准确转动。杠杆的另一端，

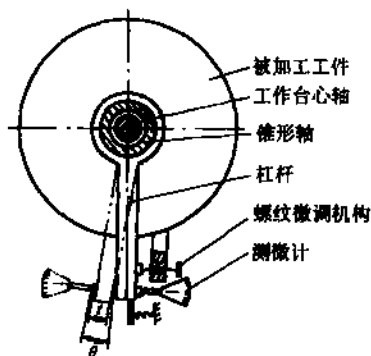


图 14-12 弧长分度法

在机床的床身上装有两个测微计，杠杆可在其间摆动。在工件上还安装了一个微调机构，用来调节杠杆的位置，杠杆通过弹簧或重锤的拉力紧靠在微调机构的触头上。

先调整好两个测微计间的圆弧弦长 l ，它等于两个测微计间的距离，而实际分度齿距等于 l 减去杠杆的宽度。开始分度时，用微调机构使杠杆与右边的测微计接触并对零，然后转动工作台，工作台带着工件、微调机构及杠杆一起转动，当杠杆与左边的测微计接触并对零时，则工作台正好转动了一个齿距，准确地完成了一次分度运动。加工完了以后，将微调机构松开，回移一个齿距角并仍固定在工件上，由于微调机构回移同时使杠杆相对于工作台也回移，由右边的测微计指示回原始位置，就可进行第二次分度，这样继续下去，直到全部齿槽加工完毕。

用弧长分度法来加工分度元件，关键在于两测微计间距离 l 的确定。一般可以用读数精度为 $1''$ 的经纬仪来静分度，并测其累积误差，待达到精度要求后，安装好两个测微计间的距离。

这种方法由于测微计的精度可达 0.001mm ，杠杆又有放大作用，因此获得很高的精度。在加工中，经纬仪不必拆掉，可作为校正用。如果用经纬仪来直接分度也是可以的，不过高精度的经纬仪虽然读数精度为 $1''$ ，但其对线精度可能为 $2'' \sim 3''$ ，不易保证齿距精度。

2. 圆柱分度法

将许多直径相同的圆柱紧箍在一个圆盘上，事先计算好圆柱与圆盘的直径，使圆柱和圆柱之间、圆柱与圆盘之间都能互相接触，有微小过盈但无间隙，这样，这些圆柱之间就构成等分关系，圆柱的数目就是等分数。

图 14-13 表示了圆柱和圆盘之间的关系。

$$\theta = \frac{1}{2} \frac{360^\circ}{z} = \frac{180^\circ}{z}$$

$$\cos \theta = \frac{r}{R+r} = \frac{d}{D+d}$$

$$d = (D+d) \cos \theta = \frac{D \cos \theta}{1 - \cos \theta}$$

$$D = d(1 - \cos \theta) / \cos \theta$$

式中 D ——圆盘直径；

R ——圆盘半径；

d ——圆柱直径；

r ——圆柱半径；

z ——圆柱数；

θ ——等分角度的一半。

为了计算与制造方便，可先决定 d 及 z ，再计算出 D ， D 愈大，分度精度愈高，但也要适当。一般选圆柱直径 $10 \sim 20\text{mm}$ ，长度 $30 \sim 50\text{mm}$ ，其尺寸精度、圆度、圆柱度等要保证在 0.0005mm 以内，表面粗糙度 R_a $0.025\mu\text{m}$ 。由于圆柱精度要求较高，可以加工出一批后进行选择和研配。圆盘尺寸先按圆柱上限尺寸算出，精度按 IT5 级，圆度为 $0.005 \sim 0.01\text{mm}$ ，内外圆同轴度为 $0.005 \sim 0.01\text{mm}$ ，以后再进行修磨，材料多用铸铁。

为了提高分度板的精度，选取圆盘尺寸时应较理论计算值小 $0.005 \sim 0.015\text{mm}$ ，这样使圆柱与圆柱之间略产生公盈。

这种方法可用来加工出精度达 $40'' \sim 1'$ 的分度板。

3. 自校分度法

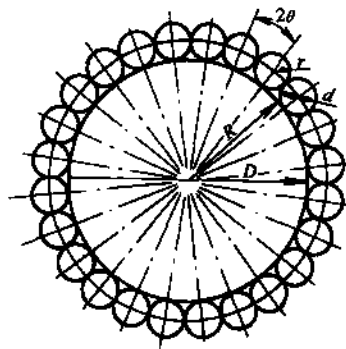


图 14-13 圆柱分度法

自校分度法是加工高精度分度板的一种原始方法,可以获得极高的分度精度,这种方法很简单,不需要什么专用设备及仪器,因此应用很广。

自校分度法的原理和方法如图 14-14 所示,将分度板的齿槽先加工到一定精度后,用自校分度法进行最终加工齿槽。如图 14-14 中表示的是磨八个齿槽的分度板,以第 4 齿定位加工第 1 齿,再以第 5 齿定位加工第 2 齿,依此顺序加工出各齿。开始加工时,由于原分度有误差,有的齿槽磨得着,有的齿槽磨不着,也可能有的齿槽磨得太多。因此,定位销应设计成可以绕分度板中心能微小摆动,以便调节齿槽的加工量。因而在加工时,是先将定位销固定在某一位置,依次按上述定位情况加工齿槽,这时可能有的齿槽磨得着,有的齿槽磨不着;将定位销的位置稍微调一下,再依次磨削各齿槽,这样直到最后各齿槽都能磨到为止。然后,将砂轮精修一次,将定位销微调一点,将各齿槽精磨一遍,直至无火花,这表示分度板已经磨好。

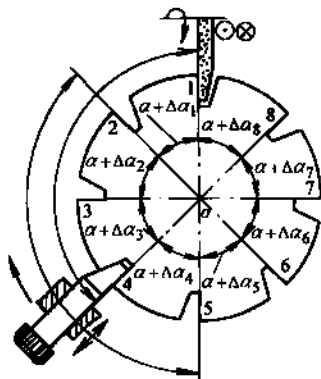


图 14-14 自校分度法

自校分度法能达到高精度分度的原因可以论证如下:

假设分度板八个齿槽的分度误差分别为 $\Delta\alpha_1$ 、 $\Delta\alpha_2$ 、 $\Delta\alpha_3$ 、 \dots 、 $\Delta\alpha_8$, 由于这八个齿槽都能磨到, 所以

$$\angle 104 = \angle 205 = \angle 306 = \angle 407 = \angle 508 = \angle 601 = \angle 702 = \angle 803$$

由于

$$\angle 104 = \angle 205$$

所以

$$(\alpha + \Delta\alpha_1) + (\alpha + \Delta\alpha_2) + (\alpha + \Delta\alpha_3) = (\alpha + \Delta\alpha_2) + (\alpha + \Delta\alpha_3) + (\alpha + \Delta\alpha_4)$$

可得

$$\Delta_1 = \Delta_4$$

同理可得

$$\Delta\alpha_1 = \Delta\alpha_2 = \Delta\alpha_3 = \Delta\alpha_4 = \Delta\alpha_5 = \Delta\alpha_6 = \Delta\alpha_7 = \Delta\alpha_8$$

另一方面, 由于 $8\alpha = 360^\circ$, 所以

$$\Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2 + \Delta\alpha_3 + \Delta\alpha_4 + \Delta\alpha_5 + \Delta\alpha_6 + \Delta\alpha_7 + \Delta\alpha_8 = 0,$$

可知要使上二式能成立, 只有 $\Delta\alpha_1$ 、 $\Delta\alpha_2$ 、 $\Delta\alpha_3$ 、 $\Delta\alpha_4$ 、 \dots 、 $\Delta\alpha_8$ 都为零才行, 因此可以得到准确分度。

利用自校分度法其分度精度可达 $3''$ 左右, 因为定位销还有配合间隙等一些问题。

4. 电磁分度法

磁分度是一种比较先进而精度很高的分度方法, 它的原理是利用一个标准的磁性分度盘和磁头等装置来分度的。

磁性分度盘是一个用非导磁材料(铝合金)做基体, 外面镀一层磁性材料(磷镍钴合金)的圆盘, 称之为磁盘。磁盘的直径一般为 $\phi 100 \sim \phi 1000\text{mm}$, 宽度为 $20 \sim 100\text{mm}$, 有准确的止口为定位基准。基体材料要求紧密均匀, 无气孔、砂眼等缺陷, 镀前表面粗糙度应达 $R_a 0.05\mu\text{m}$ 以下。镀层厚度一般为 $0.01 \sim 0.03\text{mm}$, 硬度为 $42 \sim 45\text{HRC}$ 。整个磁盘的外圆圆度及安装时的垂直度均应小于 $5\mu\text{m}$ 。

利用精密的录磁装置在磁盘外圆上录制了 $100 \sim 24000$ 个波, 一般波距为 0.05mm , 约为 $40''$, 可根据工作需要选择波数并决定磁盘外圆直径。磁盘是整个分度装置的关键, 分度精度主要决定于磁盘的波距精度。目前录制的磁盘, 其波距精度可达 $0.5''$ 。

利用磁分度来磨削分度板, 是在一台专用机床上进行的, 如图 14-15 所示。将磁盘安装在一个套筒上, 套筒又空套在工件主轴上, 两个静磁头装在机床的不动部分, 并互成 180° , 这是

为了消除磁盘转动时径向跳动而引起的误差，一个动磁头装在工件主轴上，当工件作分度转动时，动磁头也跟着转动，动磁头和两个静磁头在磁盘的轴向位置是并列的，所以动磁头转动时，不会与静磁头相撞。磁盘在空套于主轴的套筒上作 $1r/s$ 的恒速转动，这样动、静磁头就有信号输出，这两个信号有一定的相位差，磁盘的转速保持恒定，否则将影响信号的大小。由于安装磁盘的套筒是空套在主轴上的，两者要求同轴，但并不互相接触，所以当工件与工件主轴一起作分度转动时，和磁盘的转动没有关系。

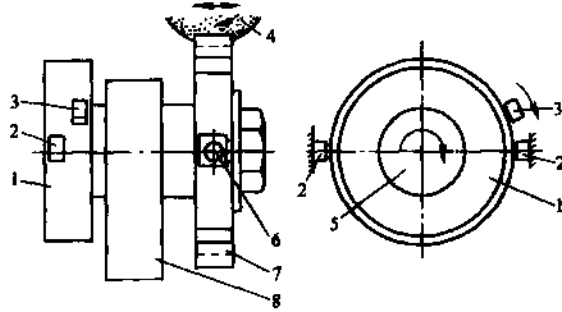


图 14-15 磁分度加工分度板

1—磁盘 2—静磁头 3—动磁头 4—砂轮 5—工件主轴 6—定位销机构 7—工件 8—支架

磨削时，工件事先已加工出有一定精度的齿槽，工件装在工件主轴上后，用定位销进行粗定位，定位销的结构是能沿圆周方向进行微调，定位销的位置和磨削齿槽处相差 90° 。当用定位销定好一个齿槽位置后，用比相计测出静磁头与动磁头的相位差，微调定位销的周向位置使比相计的指示对零，这表示动、静磁头之间的距离为整数倍的波距，紧固后即可磨削相应齿槽。加工完毕后，退出砂轮，进行分度，将定位销顺序插入下一齿槽的定位处，用比相计测量这时动、静磁头的相位差，调整定位销位置，使比相计的指示对零，表示已准确定位，紧固后即可磨下一个齿槽，依次磨出全部齿槽。

由上述分度原理可知，用这种方法分度时，齿槽预加工要求有一定的分度精度，即分度误差要控制在一个波距以内，即 0.05mm 以内，否则用比相计来对零时，就会对到另一个波距上。另一方面，磁盘的波数应是工件齿槽数的整倍数，才能够进行等分，所以磁盘的波数应多些，并有较多的公约数。

磁分度加工分度板，分度精度可达 $1''$ ，因此多用来制造原始分度板。这种分度方法的分度精度较高，但其分度装置较复杂，要求精度较高，对工件预加工的要求也很高，整个加工过程的生产率不高，劳动强度较大，对环境条件也有较高要求。如果测量动、静磁头之间的相位角能直接用分频器及可逆计数器来记录脉冲数，就可进行自动定位，不必用人工调整，这对齿槽预加工的精度要求就可以降低，同时加工效率也要高得多。

5. 多齿分度盘分度

多齿分度盘俗称鼠牙盘，是用两个齿数较多并相等的三角形端面齿的齿盘来分度，其分度精度一般为 $\pm 3'' \sim \pm 5''$ ，最高可达 $\pm 0.25''$ 。

多齿分度装置的关键零件是多齿分度盘，其上的三角齿形端齿，最终加工是由对研来完成的，对研时有专门的对研机，一般下齿盘不动，上齿盘上下往复运动，同时做一定的转动易位循环，一个循环完成后，上齿盘转过一个齿，再做下一个转动易位循环，如图 14-16 所示。为了保证齿的良好接触，上齿盘与摇臂是浮动联接。

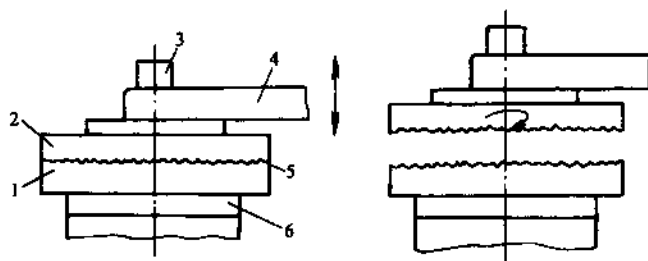


图 14-16 多齿分度盘的研磨

1—下多齿分度盘 2—上多齿分度盘 3—重块 4—摇臂 5—研磨剂 6—基座

研磨时分为粗研和精研，粗研时在上齿盘上加较大的重量，例如 8kg 左右，用粗粒度的研磨剂，上齿盘的转动易位循环常用四点易位对角研磨法，即正转 180° ，反转 90° 的顺序，位置为 $0^\circ \rightarrow 180^\circ \rightarrow 90^\circ \rightarrow 270^\circ \rightarrow 180^\circ \rightarrow 360^\circ \rightarrow 270^\circ \rightarrow 90^\circ \rightarrow 0^\circ$ ，八次为一个循环，一次循环后，上齿盘转一个齿，再进行下一个循环，直至全部齿转完。精研时在上齿盘上加较小的重量，例如 4kg 左右，用细粒度的研磨剂，上齿盘的转动易位循环常用六点易位对角研磨法，即正转 180° ，反转 120° 的顺序，位置为 $0^\circ \rightarrow 180^\circ \rightarrow 60^\circ \rightarrow 240^\circ \rightarrow 120^\circ \rightarrow 300^\circ \rightarrow 180^\circ \rightarrow 360^\circ \rightarrow 240^\circ \rightarrow 60^\circ \rightarrow 300^\circ \rightarrow 120^\circ \rightarrow 0^\circ$ ，十二次为一个循环，一次循环后，上齿盘转一个齿，再进行下一个循环，直至全部齿转完。

这种多齿分度盘的研磨方式，由于使齿距误差充分均化，精度极高，但加工效率很低，一般多用来制造原始多齿分度盘，用于多齿分度盘工作母机上。近年来，用此方法做塑料多齿分度盘的模具，用来制造塑料多齿分度盘。塑料多齿分度盘的精度稍低，但价格便宜，用于一般分度上，精度还是足够的。

6. 利用微机软件补偿提高分度精度

精密转台是由微机控制功率步进电动机，通过分度蜗轮副进行分度。功率步进电动机的定子由另一步进电动机通过蜗轮副可进行附加转动，来补偿分度蜗轮副的误差。

在此转台上主功率步进电动机的脉冲当量为每步 $30''$ ，产生附加转动的步进电动机，称之为校正步进电动机，其脉冲当量为 $0.5''$ 。在用微机软件补偿时，首先应测量转台正、反方向的原始转角误差，绘出误差曲线，测量点愈多愈准确，但测量的工作量很大，一般可取 360 个点，即每转 1° 测量一次，可利用多面体和自准直仪来进行测量。

原始转角误差曲线可视为转角 x ，周期为 2π 的周期函数 $f(x)$ ，按此函数关系做出误差仿真数学模型，送入微型计算机，发出相应的补偿脉冲指令，控制校正步进电动机工作。这种利用误差仿真校正控制的原理图如图 14-17 所示。

根据原始转角误差曲线 $f(x)$ 函数，用傅里叶级数展开，利用计算机求傅里叶系数的程序求出各系数，并由此可作出转角误差的频谱分析图。

令 $x = \omega t$ ， ω 为转台转角频率， t 为时间， $f(x) = f(\omega t)$ ，可用傅里叶级数写成下式：

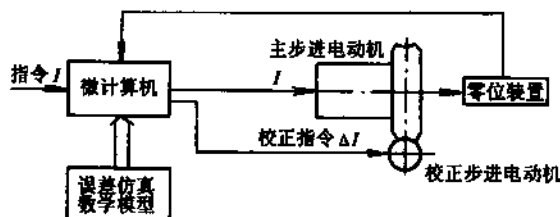


图 14-17 误差仿真校正控制原理图

$$f(x) = f(\omega t) = C_0 + \sum_{K=1}^{\infty} C_K \sin(K\omega t + \theta_K)$$

$$C_K = a_K^2 + b_K^2$$

$$a_K = C_K \sin \theta_K, \quad b_K = C_K \cos \theta_K, \quad \theta_K = \tan^{-1} \left(\frac{a_K}{b_K} \right)$$

式中 C_0 ——直流分量, $C_0 = \frac{a_0}{2}$;
 C_K ——各种频率下误差的幅值;
 θ_K ——各种频率下误差的初相角;
 a_K 、 b_K ——傅里叶系数。

从转角误差频谱分析图(图 14-18)可知, 转角误差有五个主要频峰, 基频 ω_1 是由分度蜗轮的有关误差造成, 其对应的误差是以转台一转为周期的, 为大周期误差。第二频峰 $60\omega_1$ 是由分度蜗杆的有关误差造成(该转台蜗轮副速比为 1:60), 其对应的误差是以蜗杆一转为周期, 为小周期误差, 其余三个频峰均为小周期误差的高次谐波。

将大周期误差及其附近谐波用函数 $U(x)$ 来表示, 小周期误差及其附近谐波用函数 $V(x)$ 来表示, 则 $f(x) = U(x) + V(x)$, 考虑所用微机的性能, 分别用几个简单的三次多项式来拟合, 如用 $S(x)_1 = a_i x^3 + b_i x^2 + c_i x + d_i$ ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) 来拟合 $U(x)$, 用 $S(x)_2 = a_j x^3 + b_j x^2 + c_j x + d_j$ ($j = 1, 2$) 来拟合 $V(x)$, 则误差仿真数学模型为

$$f(x) \approx S(x)_1 + S(x)_2$$

如果转角误差曲线比较平缓, 则多项式可以降阶, 使微机计算更为方便。

这种利用微机软件补偿的效果十分显著, 上述转台的转角误差, 经两次校正后, 误差由原来的 $40''$ 降为 $3''$ 。

3 精密球加工

精密球是圆度仪、陀螺、轴承和精密测量中的重要元件, 并常常作为精密测量的基准, 在精密加工中的地位十分重要。

精密球的主要技术要求是圆度和表面粗糙度, 其圆度要求 $0.025\mu\text{m}$, 表面粗糙度 $R_a 0.025\mu\text{m}$, 其中比较困难的是保证圆度精度。

金属材料的精密球, 其粗加工多采用成形车削, 或在专门的球面车削机床上车削, 工件回转, 刀具绕球心回转形成球面, 精加工多采用磨削和研磨, 最终工序是用研磨加工。在加工过程中有多次时效处理, 去除内应力。精密球的材料要求均匀无纤维化。淬硬的精密球, 要有稳定性等热处理工序。

精密球的制造工艺中, 关键工艺是最后的精密研磨, 现对精密球面研磨进行一些探讨。

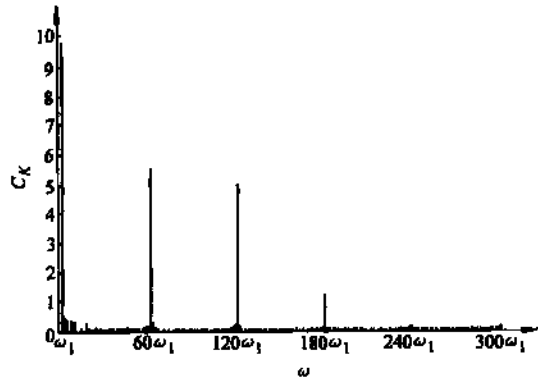


图 14-18 转角误差频谱分析图

3.1 球面研磨原理

对于一个理想的球体，其特点是它的任何一个截面都是一个圆。如图 14-19 所示，将被研磨的球放在一个空心管状的研具上，研具绕 z 轴旋转，角速度为 ω ，同时使被加工球绕瞬时轴 z_1 回转，角速度为 ω_1 ， z 轴与 z_1 轴之间的夹角为 α ，只要使 α 角能不断地随机变化，就可进行球面研磨。

实现 α 角的不断随机变化，可采用自动球面研磨机来实现，也可以用手工研磨的方法。四轴自动球面研磨机是当前效果比较突出的球面研磨手段。

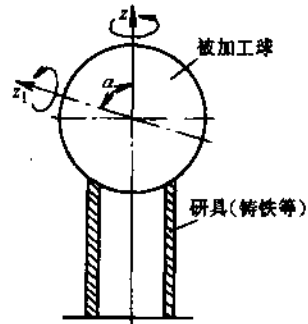


图 14-19 球面研磨原理

3.2 四轴自动球面研磨原理

图 14-20 所示为四轴自动球面研磨机的结构简图，它由工作台、立柱、四个研磨头(研具)等构成。每个研磨头就是一根轴，由一力矩电动机带动作正、反转，轴的前端装有空心管状的研具，四轴中， A 、 B 、 C 、 D 四轴互成 φ 角，其中 A 轴垂直安装， B 、 C 、 D 三轴在水平面上投影互成 120° 并向上倾斜一定角度 γ 安装，四个研磨头正好将被研磨的球托在中间，为了保证汇交， A 轴的研具采用固定联轴器， B 、 C 、 D 轴采用浮动联轴器。当四根轴按一定关系正、反回转时，在工件上加上研磨剂，便能进行研磨加工。整个研磨过程是自动控制的，转速用闭环反馈系统，力矩电动机上同轴装有测速电机，随时发出反馈信号，以保证各轴的稳定转速，各轴的转速是分别调整，故有四套调速系统。回转方向采用电子开关控制线路，便于与调速系统联接。

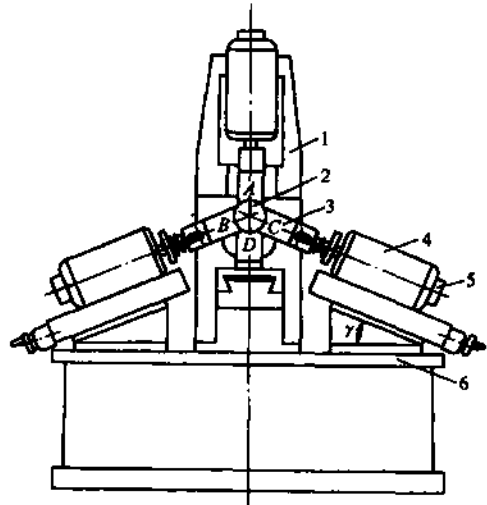


图 14-20 四轴自动球面研磨

1—立柱 2—被加工球 3—研具 4—力矩电动机 5—测速发电机 6—工作台

1. 四轴位置安排

如图 14-21 所示， O 为研磨球心， OA 、 OB 、 OC 、 OD 为四根轴，它们在空间互成 φ 角，由三角形 BCD 可知：

$$\overline{O'C} = \frac{\frac{l}{2}}{\cos 30^\circ} = \frac{l}{\sqrt{3}}, \quad l \text{ 为边长,}$$

$$\text{由三角形 } O'AC \text{ 可知: } \sin \beta = \frac{\frac{l}{\sqrt{3}}}{l} = \frac{1}{\sqrt{3}},$$

$$\beta = 35.264^\circ$$

$$\gamma = 90^\circ - 2\beta = 19.47^\circ$$

$$\varphi = 180^\circ - 2\beta = 109.47^\circ$$

2. 四轴回转方向的选择

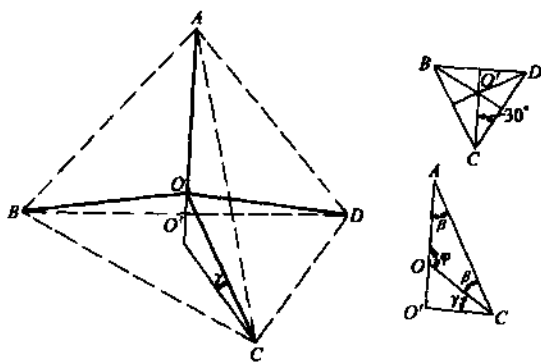


图 14-21 四轴位置安排

从实现球面研磨的运动可知，研具本身要回转，同时被研球要绕瞬时轴回转，瞬时轴的位置要不断变化，在四轴自动球面研磨机上就是用控制四轴的转向变化来实现。

由排列组合可知，四轴转向共有 16 种不同组合，可分为三种类型：

(1) 四轴转向相同 四轴同时正转或反转，共有四种组合。这时如果四轴转速相等，球的角速度为零，即球相对于四轴无转动，研具在球面上研出四个圆槽，可见不能用这种组合。

如图 14-22a 所示，若四轴转速、转向、压力、磨料等均相同，则四轴引起球的角速度都相等， $\omega_A = \omega_B = \omega_C = \omega_D$ ，将两两角速度合成，有

$$\omega_1 = \omega_A + \omega_B$$

$$\omega_2 = \omega_C + \omega_D$$

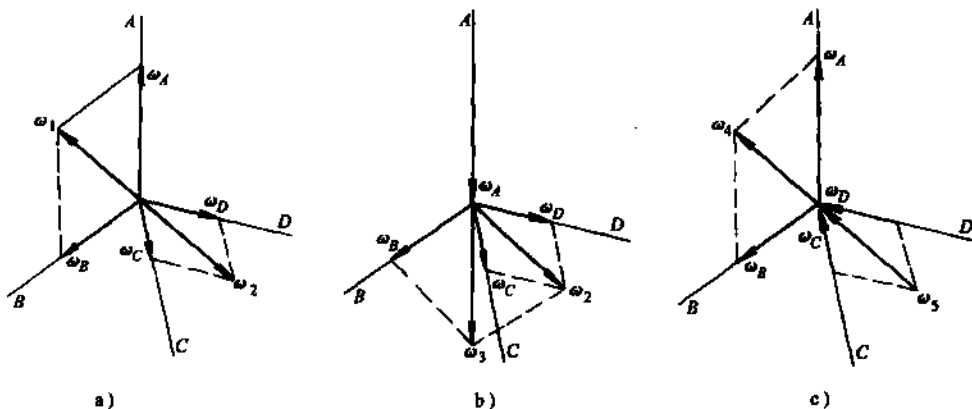


图 14-22 四轴回转方向的选择

这两个合角速度的回转轴由于四轴相互对称，一定是共轴， $\omega_1 = \omega_2$ ，两者转向相反，因此

$$\omega = \omega_1 + \omega_2 = 0$$

(2) 三轴转向相同，一轴相反 如图 14-22b 所示， ω_B 、 ω_C 、 ω_D 转向相同， ω_A 转向与它们相反，将 ω_B 、 ω_C 、 ω_D 合成，得 ω_3

$$\omega_3 = \omega_B + \omega_C + \omega_D$$

ω_3 的回转轴由于四轴相互对称，一定与 ω_A 共轴，两者转向相同，因此

$$\omega = \omega_3 + \omega_A = 2\omega_A \text{ 或 } 2\omega_3$$

可见，这种组合方式不能得到瞬时变化的回转轴，其瞬时回转轴始终沿着四根研具轴之一，即 $\alpha = 0^\circ$ ，将研磨出一个圆环槽，不能得到均匀研磨。这种三轴转向相同，一轴相反的情况，共有八种组合。

(3) 两轴转向相同，两轴转向相反 这种情况共有六种组合，如图 14-22c 所示，举 ω_A 、 ω_B 同向， ω_C 、 ω_D 同向为例，两者方向相反，将 ω_A 、 ω_B 合成而得 ω_4 ， ω_C 、 ω_D 合成得 ω_5 ，由于结构对称， ω_4 和 ω_5 两者共轴，但方向相同，所以

$$\omega = \omega_4 + \omega_5 \neq 0, \quad \omega = 2\omega_4 \text{ 或 } 2\omega_5$$

说明球的瞬时转动角速度不等于零，从而可以得到均匀研磨的可能性。

研磨时，按顺序改变这六种组合状态，即可实现球面自动均匀研磨，为得到瞬时轴不断变化，可按图 14-23 的方式变换。

这种四轴自动球面研磨机可研磨钢球、玻璃球，圆球度可达 $0.05\mu\text{m}$ 。研磨钢球，由于材质、热处理等影响较大，其精度比玻璃球低些。

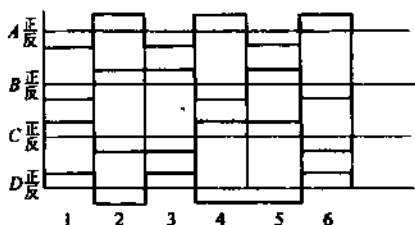


图 14-23 两轴转向相同不同组合方式的变换顺序

参 考 文 献

- 1 Budinski Kenneth G. Engineering Materials Properties and Selection. Fourth Edition. New Jersey, USA: Prentice-Hall, Inc., 1992
- 2 Ashby M F. and Jones D R H. Engineering Materials An Introduction to their Properties and Applications. Oxford, Uk: Pergamon Press 1980
- 3 长春汽车材料研究所编写组. 机械工程材料手册: 黑色金属材料(第4版). 北京: 机械工业出版社, 1991
- 4 张云兰等. 非金属工程材料. 北京: 轻工业出版社, 1987
- 5 胡志忠. 钢及其热处理曲线手册. 北京: 国防工业出版社, 1986
- 6 (日)日本热处理技术协会编著. 热处理指南. 刘文泉译. 北京: 机械工业出版社, 1987
- 7 杨杰等. 中国石材. 北京: 中国建材工业出版社, 1994
- 8 刘晋春, 赵家齐. 特种加工. 北京: 机械工业出版社, 1994
- 9 陈传良主编. 特种加工技术. 北京: 科学技术出版社, 1989
- 10 王先逵主编. 机械制造工艺学. 北京: 机械工业出版社, 1995
- 11 (日)微细加工技术编辑委员会. 微细加工技术. 朱怀义, 赵巾奎译. 北京: 清华大学出版社, 1983
- 12 王先逵主编. 计算机辅助制造. 北京: 清华大学出版社, 1999
- 13 刘正坝. 我国特种加工技术的回顾与展望. 电加工, 1999, (5)
- 14 赵万生等. 国外特种加工技术的最新进展. 电加工, 1999, (5)
- 15 王先逵编著. 机械制造工艺学(上、下册). 北京: 清华大学出版社, 1989
- 16 余承业主编. 航天制造工程手册: 特种加工分册. 北京: 航天工业出版社, 1993
- 17 李晋年等. 黑色金属的超低温金刚石超精密切削. 机械工程学报. 1989, (3)
- 18 袁哲俊编. 精密和超精密加工技术·哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1990
- 19 孟少农主编. 机械加工工艺手册: 第2卷·北京: 机械工业出版社, 1991
- 20 袁哲俊等. 金刚石刀具刃锋锐度对切削变形和加工表面质量的影响. 机床, 1992, (11)
- 21 航空制造工程手册总编委会. 航空制造工程手册. 北京: 航空工业出版社, 1996
- 22 卡兹马莱科 J 著. 切削、磨料与腐蚀加工原理. 高希正, 刘德忠等译. 北京: 机械工业出版社, 1985
- 23 李洪主编. 机械加工技术手册. 北京: 北京出版社, 1989
- 24 齐世恩主编. 机械制造工艺学. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1989
- 25 王启平等编者. 精密加工工艺学. 北京: 国防工业出版社, 1990
- 26 李伯民、赵波等编著. 实用磨削技术. 北京: 机械工业出版社, 1996
- 27 机械工程手册电机工程手册编辑委员会编. 机械工程手册. (第二版): 机械制造工艺及设备卷(二). 北京: 机械工业出版社, 1997
- 28 王惠方. 金属切削机床. 北京: 机械工业出版社, 1994
- 29 戴曙. 金属切削机床设计. 北京: 机械工业出版社, 1985
- 30 袁哲俊编著. 精密和超精密加工技术. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1990
- 31 袁哲俊等. 超精密机床的新发展(上). 机械工艺师. 1994, (11)
- 32 袁哲俊等. 超精密机床的新发展(下). 机械工艺师. 1994, (12)
- 33 吴敏镜. 超精密加工的概况与展望(上). 机械工艺师. 1992, (7)
- 34 吴敏镜. 超精密加工的概况与展望(下). 机械工艺师. 1992, (8)
- 35 张普星. 超精密研磨机床. 机械工艺师. 1998, (6)
- 36 何雅全. 超精密切削加工技术的发展概况. 航空精密机械工程. 1985, (4)
- 37 吴明根. 超精密加工基础及其发展趋势. 航空精密机械工程. 1998, (1)
- 38 王春光. 国外超精密机床的发展. 机床. 1991, (3)

- 39 侯镇冰等. 高精度机床主轴系统的研究与制造. 机床. 1991, (3)
- 40 张幼植. 精密加工的现状和发展趋势(上). 航空精密制造技术. 1990, (1)
- 41 张幼植. 精密加工的现状和发展趋势(下). 航空精密制造技术. 1990, (2)
- 42 靳庆方等. 超精密镗削加工机床. 航空精密制造技术. 1991, (5)
- 43 Fan L S, Tai Y C and Muller R S. Integrated movable micro mechanical structures for sensors and actuators. IEEE Transactions on Electron Devices, 1988, ED-35 (6): 724 ~ 730
- 44 Mehregany M, Gabriel K J and Trimmer W S N. Integrated fabrication of polysilicon mechanics. IEEE Transactions on Electron Devices, 1988, ED-35 (6): 719 ~ 723
- 45 Menz W, et al.. The LIGA technique -- a novel concept for microstructures and the combination with Si technologies by injection molding. Proceedings of IEEE Micro Electro Mechanical Systems, 1991: 69 ~ 73
- 46 Masuzawa T, et al.. Wire electro-discharge grinding for micro-machining. Annals of the CIRP, 1985, 34 (1): 431 ~ 434
- 47 李勇, 严晓敏等. 微细电火花加工工艺研究. 电加工. 1998 (4): 4 ~ 7
- 48 K. Ikuta, et al.. Development of mass productive micro stereo lithography (Mass-IH process). Proceedings of IEEE Micro Electro Mechanical Systems, 1996: 301 ~ 306
- 49 Suda M, et al.. Electrochemical and optical processing of micro structures by scanning probe microscopy (SPM). Proceedings of IEEE Micro Electro Mechanical Systems, 1996: 296 ~ 300
- 50 Fukuta Y, et al.. Microactuated self-assembling of 3D polysilicon structures with reshaping technology. Proceedings of IEEE Micro Electro Mechanical Systems, 1997: 477 ~ 481
- 51 Feynman. R P. There's plenty of room at the bottom. Journal of Microelectromechanical Systems, 1992, 1 (1): 60 ~ 66
- 52 Petersen K E. Silicon as a mechanical material. Proceedings of the IEEE, 1982, 70 (5): 420 ~ 457
- 53 Sugiyama S, et al.. High-resolution silicon pressure imager with CMOS processing circuits. 4th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers'87), 1987: 444
- 54 Bernstein J, et al.. A micromachined comb-drive tuning fork rate gyroscope. Proceedings of IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop, 1993: 143 ~ 148
- 55 Fan L S, et al.. IC-processed electrostatic micromotors. Sensors and Actuators, 1989, 20 (1/2): 41 ~ 48
- 56 Tang W C, et al.. Laterally driven polysilicon resonant microstructures. Sensors and Actuators, 1989, A20 (1/2): 25 ~ 32
- 57 Kawakita S, et al.. Multi-layered piezoelectric bimorph actuator. Proceedings of International Symposium on Micro Machine and Human Science (MHS97): 73 ~ 77
- 58 Takeshima N and Fujita H. Polyimide bimorph actuators for a ciliary system. Proceedings of 1991 ASME Winter Meeting on Micromechanical Sensors, Actuators and Systems: 203 ~ 209
- 59 Jernam J H. Electrically-activated micromachined diaphragm valves. Technical Digest of IEEE Solid-State Sensors and Actuators Workshop, 1990: 65 ~ 69
- 60 M. van F C. de Pol, et al.. A thermopneumatic micropump based on micro-engineering techniques. Sensors and Actuators, 1990, A20-A23: 198 ~ 202
- 61 袁哲俊, 王先造. 精密和超精密加工技术. 北京: 机械工业出版社, 1999
- 62 许钟麟. 洁净室设计. 北京: 地震出版社, 1994
- 63 早川一也. 洁净室设计手册. 北京: 学术书刊出版社, 1989
- 64 魏润柏, 徐文华. 热环境. 上海: 同济大学出版社, 1994
- 65 郑长聚. 实用工业噪声控制技术. 上海: 上海科学技术出版社, 1982
- 66 徐世勤, 王楷. 工业噪声与振动控制. 北京: 冶金工业出版社, 1987
- 67 詹庆旋. 建筑光环境. 北京: 清华大学出版社, 1988

- 68 孙可平, 宋广成. 工业静电. 北京: 中国石化出版社, 1994
- 69 万军. 先进制造中加工过程智能建模与监控技术研究: [学位论文]. 北京: 清华大学, 1996
- 70 刘晓谦等. 国内外刀具磨损、破损自动监测方法的现状评述. 机床. 1992, (5): 5-8
- 71 加工中心应用与维修编委会. 加工中心应用与维修. 北京: 机械工业出版社, 1992
- 72 章锦华. 精密切削理论与技术. 上海: 上海科学技术出版社, 1986
- 73 李书和. 数控机床误差补偿的研究: [学位论文]. 天津: 天津大学, 1996
- 74 杨俊等. 精密测试技术. 南京: 江苏科学技术出版社, 1990
- 75 张福学. 传感器敏感元器件实用指南. 北京: 电子工业出版社, 1993
- 76 贾伯年, 俞朴. 传感器技术. 南京: 东南大学出版社, 1992
- 77 于骏一, 吴博达等. 机械加工振动的诊断识别与控制. 北京: 清华大学出版社, 1994
- 78 薛实福, 李庆祥编著. 精密仪器设计. 北京: 清华大学出版社, 1991
- 79 Parso J M and Weisbord L. How to deising Flexure Hinges. Machine Design, 1965: 37
- 80 Jun-ichi NISHIZAWA, Kaoru TAKHASHI, Wasaburo ICHINOSE and Saijo HIRANO. Precise Position Control by Electromagnet. Bulletin of the JSME. 1975, 17 (1)
- 81 王世蕃. 新型电致伸缩材料及应用. 压电与声光. 1983, (2)
- 82 森山茂夫, 原田達男, 高梨明紘. 圧電素子アクチュエータ微動機構走備えた超精密 $x-y$ 移動台. 精密機械, 1980 50 (4)
- 83 高宏, 李庆祥, 严普强. 亚微米弹性微位移工作台系统的设计及其精度分析. 清华大学学报. 1989, 28 (5)
- 84 徐锡林. 压电微型驱动器. 上海交通大学学报. 1997, 31 (1)
- 85 崔天宏等. 压电微马达的动力学原理及其实验研究. 仪器仪表学报. 1996, 17 (1)
- 86 津田展宏. 一體構造の縮小機構つき复合平行ほみ. 精密機械. 1982, 48 (6)
- 87 李玉和, 毛乐山, 李庆祥. 微夹持器现状及其发展. 仪器仪表学报. 1999, 20 (4)
- 88 花国梁主编. 精密测量技术. 北京: 中国计量出版社, 1990
- 89 李柱主编. 互换性与测量技术基础. 北京: 计量出版社, 1985
- 90 花国梁主编. 互换性与测量技术基础. 北京: 北京理工大学出版社, 1986
- 91 席宏卓主编. 产品质量检验技术. 北京: 中国计量出版社, 1992
- 92 王江主编. 现代计量测试技术. 北京: 中国计量出版社, 1990
- 93 刘智敏等编著. 测量不确定度手册. 北京: 中国计量出版社, 1997
- 94 梁铨廷主编. 物理光学. 北京: 机械工业出版社, 1980
- 95 杨国光主编. 近代光学测试技术. 北京: 机械工业出版社, 1986
- 96 强锡富主编. 电量量仪(上册). 北京: 机械工业出版社, 1983
- 97 费业泰主编. 误差理论与数据处理. 北京: 机械工业出版社, 1981
- 98 严普强, 黄长艺主编. 机械工程测试技术基础. 北京: 机械工业出版社, 1985
- 99 殷纯永等. 自动双频激光测量系统. 清华大学学报. 1979
- 100 黄尚廉等. 重庆大学科研论文集. 1985
- 101 超精密微细铣削加工技术. 制造技术与机床. 1996 (10)

