



21st CENTURY
实用规划教材

21世纪全国应用型本科

大机械系列 实用规划教材



机械制造技术基础

主 编 张 鹏 孙有亮
副主编 李 华 范素香



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

机械制造技术基础

主 编 张 鹏 孙有亮
副主编 李 华 范素香
参 编 王万新 马成习



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书是根据教育部机电类专业本科教育人才培养目标和培养方案及课程教学大纲的要求编写的。全书共 8 部分:绪论,第 1 章金属切削基础,第 2 章机械加工方法与机床,第 3 章机械加工工艺规程设计,第 4 章机床夹具设计原理,第 5 章机械加工精度与表面质量,第 6 章装配工艺基础,第 7 章先进制造技术与制造模式。

本书以机械制造工艺过程和加工质量为主线,将金属切削原理与刀具、金属切削机床、机床夹具设计等基本知识优化整合,在着重讲清基本概念、基本原理的基础上,按照少而精的原则浓缩基本内容,突出应用。教材在内容安排上侧重机械制造冷加工领域的基础知识、基本原理和基本方法。

本书可作为高等院校机械类专业主干技术基础课程教材,也可作为职业技术学院、成人高校等相关专业的教材或参考书,还可供机械制造工程技术人员、机械制造企业管理人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

机械制造技术基础/张鹏,孙有亮主编. 北京:北京大学出版社,2009.1

(21 世纪全国应用型本科机械系列实用规划教材)

ISBN 978 7 301 14474 9

I. 机… II. ①张… ②孙… III. 机械制造工艺 高等学校 教材 IV. TH16

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 196463 号

书 名:机械制造技术基础

著作责任者:张 鹏 孙有亮 主编

责任编辑:郭穗娟

标准书号:ISBN 978 7 301 14474 9/TH·0123

出 版 者:北京大学出版社

地 址:北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址:<http://www.pup.cn> <http://www.pup6.com>

电 话:邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电子邮箱:pup_6@163.com

印 刷 者:

发 行 者:北京大学出版社

经 销 者:新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 18.5 印张 417 千字

2009 年 1 月第 1 版 2009 年 1 月第 1 次印刷

定 价:30.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话:010-62752024

电子邮箱:fd@pup.pku.edu.cn

丛书总序

殷国富*

机械是人类生产和生活的基本工具要素之一,是人类物质文明最重要的一个组成部分。机械工业担负着向国民经济各部门,包括工业、农业和社会生活各个方面提供各种性能先进、使用安全可靠的技术装备的任务,在国家现代化建设中占有举足轻重的地位。20世纪80年代以来,以微电子、信息、新材料、系统科学等为代表的新一代科学技术的发展及其在机械工程领域中的广泛渗透、应用和衍生,极大地拓展了机械产品设计制造活动的深度和广度,改变了现代制造业的产品设计方法、产品结构、生产方式、生产工艺和设备以及生产组织模式,产生了一大批新的机械设计制造方法和制造系统。这些机械方面的新方法和系统的主要技术特征表现在以下几个方面:

(1) 信息技术在机械行业的广泛渗透和应用,使得现代机电产品已不再是单纯的机械构件,而是由机械、电子、信息、计算机与自动控制等集成的机电一体化产品,其功能不仅限于加强、延伸或取代人的体力劳动,而且扩大到加强、延伸或取代人的某些感官功能与大脑功能。

(2) 随着设计手段的计算机化和数字化,CAD/CAM/CAE/PDM集成技术和软件系统得到广泛使用,促进了产品创新设计、并行设计、快速设计、虚拟设计、智能设计、反求设计、广义优化设计、绿色产品设计、面向全寿命周期设计等现代设计理论和技术方法的不断发展。机械产品的设计不只是单纯追求某项性能指标的先进和高低,而是注重综合考虑质量、市场、价格、安全、美学、资源、环境等方面的影响。

(3) 传统机械制造技术在不断吸收电子、信息、材料、能源和现代管理等方面成果的基础上形成了先进制造技术,并将其综合应用于机械产品设计、制造、检测、管理、销售、使用、服务的机械产品制造全过程,以实现优质、高效、低耗、清洁、灵活的生产,提高对动态多变的市场的适应能力和竞争能力。

(4) 机械产品加工制造的精密化、快速化,制造过程的网络化、全球化得到很大的发展,涌现出CIMS、并行工程、敏捷制造、绿色制造、网络制造、虚拟制造、智能制造、大规模定制等先进生产模式,制造装备和制造系统的柔性可重组已成为21世纪制造技术的显著特征。

(5) 机械工程的理论基础不再局限于力学,制造过程的基础也不只是设计与制造经验及技艺的总结。今天的机械工程学科比以往任何时候都更紧密地依赖诸如现代数学、材料科学、微电子技术、计算机信息科学、生命科学、系统论与控制论等多门学科及其最新成就。

上述机械科学与工程特征和发展趋势表明,现代机械工程学科越来越多地体现着知识经济的特征。因此,加快培养适应我国国民经济建设所需要的高综合素质的机械工程学科人才的意义十分重大、任务十分繁重。我们必须通过各种层次和形式的教育,培养出适应世界机械工业发展潮流与我国机械制造业实际需要的技术人才与管理人才,不断推动我国机械科学与工程技术的进步。

* 殷国富教授:现为教育部机械学科教学指导委员会委员,现任四川大学制造科学与工程学院院长

为使机械工程学科毕业生的知识结构由较专、较深、适应性差向较通用、较广泛、适应性强方向转化,在教育部的领导与组织下,1998年对本科专业目录进行了第3次大的修订。调整后的机械大类专业变成4类8个专业,它们是:机械类4个专业(机械设计制造及其自动化、材料成型及控制工程、过程装备与控制、工业设计);仪器仪表类1个专业(测控技术与仪器);能源动力类2个专业(热能与动力工程、核工程与核技术);工程力学类1个专业(工程力学)。此外还提出了面向更宽的引导性专业,即机械工程及自动化。因此,建立现代“大机械、全过程、多学科”的观点,探讨机械科学与工程技术学科专业创新人才的培养模式,是高校从事制造学科教学的教育工作者的责任;建立培养富有创新能力人才的教学体系和教材资源环境,是我们努力的目标。

要达到这一目标,进行适应现代机械学科发展要求的教材建设是十分重要的基础工作之一。因此,组织编写出版面向大机械学科的一系列教材就显得很有意义和十分必要。北京大学出版社的领导和编辑们通过对国内大学机械工程学科教材实际情况的调研,在与众多专家学者讨论的基础上,决定面向机械工程学科类的学生出版一套系列教材,这是促进高校教学改革发展的重大决策。按照教材编审委员会的规划,本系列教材将逐步出版。

本系列教材是按照高等学校机械学科本科专业规范、培养方案和课程教学大纲的要求,合理定位,由长期在教学第一线从事教学工作的教师立足于21世纪机械工程学科发展的需要,以科学性、先进性、系统性和实用性为目标进行编写,以适应不同类型、不同层次的学校结合学校实际情况的需要。本系列教材编写的特色体现在以下几个方面:

(1) 关注全球机械科学与工程技术学科发展的大背景,建立现代大机械工程学科的新理念,拓宽理论基础和专业基础知识,特别是突出创造能力和创新意识。

(2) 重视强基础与宽专业知识面的要求。在保持较宽学科专业知识的前提下,在强化产品设计、制造、管理、市场、环境等基础理论方面,突出重点,进一步密切学科内各专业知识面之间的综合内在联系,尽快建立起系统性的知识体系结构。

(3) 学科交叉与综合的观念。现代力学、信息科学、生命科学、材料科学、系统科学等新兴学科与机械学科结合的内容在系列教材编写中得到一定的体现。

(4) 注重能力的培养,力求做到不断强化自我的自学能力、思维能力、创造性地解决问题的能力以及不断自我更新知识的能力,促进学生向着富有鲜明个性的方向发展。

总之,本系列教材注意了调整课程结构,加强学科基础,反映系列教材各门课程之间的联系和衔接,内容合理分配,既相互联系又避免不必要的重复,努力拓宽知识面,在培养学生的创新能力方面进行了初步的探索。当然,本系列教材还需要在内容的精选、音像电子课件、网络多媒体教学等方面进一步加强,使之能满足普通高等院校本科教学的需要,在众多的机械类教材中形成自己的特色。

最后,我要感谢参加本系列教材编著和审稿的各位老师所付出的大量卓有成效的辛勤劳动,也要感谢北京大学出版社的领导和编辑们对本系列教材的支持和编审工作。由于编写的时间紧、相互协调难度大等原因,本系列教材还存在一些不足和错漏。我相信,在使用本系列教材的教师和学生的关心和帮助下,不断改进和完善这套教材,使之在我国机械工程类学科专业的教学改革和课程体系建设中起到应有的促进作用。

《21世纪全国应用型本科机械系列实用规划教材》

专家编审委员会

名誉主任 胡正寰*

主任委员 殷国富

副主任委员 (按拼音排序)

戴冠军	江征风	李郝林	梅 宁
任乃飞	王述洋	杨化仁	张成忠
张新义			

顾 问 (按拼音排序)

傅水根	姜继海	孔祥东	陆国栋
陆启建	孙建东	张 金	赵松年

委 员 (按拼音排序)

方 新	郭秀云	韩健海	洪 波
侯书林	胡如风	胡亚民	胡志勇
华 林	姜军生	李自光	刘仲国
柳舟通	毛 磊	孟宪颐	任建平
陶健民	田 勇	王亮申	王守城
魏 建	魏修亭	杨振中	袁根福
曾 忠	张伟强	郑竹林	周晓福

* 胡正寰:北京科技大学教授,中国工程院机械与运载工程学部院士

前 言

为了适应高等教育改革形势和机械类专业应用型人才的培养及建立新的课程体系的需要,根据教育部机电类专业本科教育人才培养目标和培养方案及课程教学大纲的要求,在总结近几年来教学改革与实践经验的基础上编写了本书。

本书以机械制造工艺过程和加工质量为主线,将金属切削原理与刀具、金属切削机床、机床夹具设计等基本知识优化整合,在着重讲清基本概念、基本原理的基础上,按照少而精的原则浓缩基本内容,突出应用,可作为技术基础课教材。

本书在内容安排上侧重机械制造冷加工领域的基础知识、基本原理和基本方法。其中,绪论中介绍了机械制造业在国民经济中的地位及其发展、机械制造过程的基本概念和本课程的学习方法与要求;第1章为金属切削基础,包含了金属切削刀具、金属切削与磨削过程中的物理现象及其规律等内容;第2章为机械加工方法与机床,介绍常见表面的加工方法、常用金属切削机床的结构及运动和传动分析等;第3章和第6章分别为机械加工工艺规程设计、装配工艺基础,介绍机械制造工艺规程的有关知识,包含了机械加工工艺规程和装配工艺规程的编制、加工过程尺寸链与工序尺寸及公差的确定的确定、机械加工工艺的经济性分析,以及基于装配尺寸链的装配方法和装配工艺规程设计的主要问题;第4章为机床夹具设计原理,介绍了夹具的定位原理、定位误差分析、典型机床夹具设计等内容;第5章为机械加工精度与表面质量,包括加工质量的概念、影响加工精度和表面质量的因素分析与控制、加工误差的统计分析方法、机械加工中的振动与预防等知识;第7章为先进制造技术与制造模式,重点介绍了机械制造自动化技术、快速成形制造技术和先进制造生产模式等内容。

本书可作为高等院校机械类专业主干技术基础课程教材,也可供机械制造工程技术人员、机械制造企业管理人员参考。全书按60~70学时教学计划编写,各校在使用时可酌情增减有关内容。

本书的主要编者都是长期从事专业基础课教学工作的教师。本书由张鹏、孙有亮担任主编,李华、范素香担任副主编,参编人员还有王万新和马成习。全书由张鹏统稿。

限于编者的水平,书中不足或疏漏之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编 者

2008年10月

目 录

绪 论	1	1.5.2 刀具磨损过程及磨钝标准	49
0.1 机械制造业在国民经济中的地位及其发展	1	1.5.3 刀具耐用度及其经验公式	50
0.1.1 机械制造业在国民经济中的地位	1	1.5.4 刀具耐用度的选择	52
0.1.2 机械制造业的发展	1	1.5.5 刀具的破损	52
0.2 机械制造过程的基本概念	3	1.6 金属切削条件的合理选择	53
0.2.1 机械产品生产过程与制造技术	3	1.6.1 工件材料的切削加工性	53
0.2.1 零件的机械制造方法与机械加工工艺系统	3	1.6.2 刀具几何参数的选择	55
0.3 本课程的学习要求和学习方法	4	1.6.3 切削用量的选择	56
思考与练习题	5	1.6.4 切削液的选择	58
第 1 章 金属切削基础	6	1.7 磨削原理	58
1.1 金属切削刀具	6	1.7.1 砂轮的特性与选择	58
1.1.1 切削运动与切削要素	6	1.7.2 磨削过程	62
1.1.2 刀具的角度	9	1.7.3 磨削力	63
1.1.3 刀具材料	13	1.7.4 磨削温度	65
1.2 常用刀具简介	16	思考与练习题	66
1.2.1 车刀	16	第 2 章 机械加工方法与机床	67
1.2.2 孔加工刀具	19	2.1 机械加工方法	67
1.2.3 铣刀	23	2.1.1 零件表面的形成方法	67
1.2.4 拉刀	25	2.1.2 切削加工	69
1.2.5 螺纹刀具	26	2.1.3 磨削加工	73
1.2.6 齿轮加工刀具	28	2.1.4 精密加工	74
1.3 金属切削过程及其物理现象	29	2.2 金属切削机床	75
1.3.1 切屑的形成过程及变形区的划分	29	2.2.1 机床的分类、型号和技术参数	75
1.3.2 切削变形程度	31	2.2.2 典型机床及其加工工艺范围	80
1.3.3 积屑瘤的形成及其对切削过程的影响	33	2.3 车床传动系统及典型部件	95
1.3.4 切屑的类型及控制	34	2.3.1 机床的传动联系和传动原理图	95
1.4 切削力、切削热与切削温度	36	2.3.2 CA6140 型卧式车床的传动系统	97
1.4.1 切削力	36	2.3.3 CA6140 型卧式车床主轴箱简介	101
1.4.2 切削热的产生与传导	42	2.4 数控机床与加工中心	107
1.4.3 切削温度	43	2.4.1 数控机床	107
1.5 刀具磨损与刀具耐用度	46	2.4.2 加工中心	110
1.5.1 刀具磨损形态及其原因	46		

思考与练习题	111	4.2.2 六点定位原理的应用	152
第3章 机械加工工艺规程设计	113	4.3 定位方式与定位元件	154
3.1 机械加工工艺规程的基本概念	113	4.3.1 工件以平面定位	155
3.1.1 机械加工工艺过程的 概念及组成	113	4.3.2 工件以圆柱孔定位	157
3.1.2 生产纲领与生产类型	115	4.3.3 工件以外圆柱面定位	160
3.1.3 机械加工工艺规程	117	4.3.4 工件以组合表面定位	161
3.2 零件工艺性分析与毛坯的选择	118	4.4 定位误差的分析与计算	163
3.2.1 零件的工艺分析	118	4.4.1 定位误差产生的原因及 计算方法	163
3.2.2 毛坯的选择	122	4.4.2 几种典型表面定位时 的定位误差	165
3.3 定位基准的选择	122	4.5 工件在夹具中的夹紧	169
3.3.1 基准的概念及分类	122	4.5.1 夹紧装置的组成及 基本要求	170
3.3.2 精基准的选择原则	124	4.5.2 夹紧力的确定	170
3.3.3 粗基准的选择原则	125	4.5.3 常用夹紧机构	173
3.4 机械加工工艺路线的拟定	126	4.6 典型机床夹具	180
3.4.1 表面加工方法的选择	126	4.6.1 钻床类夹具	180
3.4.2 加工阶段的划分	128	4.6.2 铣床夹具	185
3.4.3 工序的集中与分散	131	4.7 机床夹具的设计步骤	188
3.4.4 工序顺序的安排	131	4.7.1 专用夹具设计的基本 要求	188
3.4.5 机床设备及工艺装备的 选择	133	4.7.2 夹具设计的一般步骤	188
3.5 加工余量与工序尺寸	134	4.7.3 夹具设计中应注意的 几个问题	190
3.5.1 加工余量的概念	134	思考与练习题	191
3.5.2 影响加工余量的因素	135	第5章 机械加工精度与表面质量	195
3.5.3 确定加工余量的方法	137	5.1 机械加工精度	195
3.5.4 工序尺寸及其公差的 确定	137	5.1.1 概述	195
3.6 工艺尺寸链	138	5.1.2 工艺系统几何误差对 加工精度的影响	198
3.6.1 尺寸链的基本概念	138	5.1.3 工艺系统受力变形对 加工精度的影响	202
3.6.2 尺寸链的计算方法	139	5.1.4 工艺系统受热变形对 加工精度的影响	208
3.6.3 工艺尺寸链的应用	141	5.1.5 工件内应力对加工 精度的影响	211
3.7 工艺过程的生产率和技术 经济分析	143	5.1.6 提高加工精度的途径	213
3.7.1 工艺过程的生产率	143	5.2 加工误差的统计分析	214
3.7.2 工艺过程的技术 经济分析	145	5.2.1 加工误差的统计性质	215
思考与练习题	147	5.2.2 加工误差的统计 分析法	215
第4章 机床夹具设计原理	149	5.3 机械加工表面质量	222
4.1 机床夹具概述	149	5.3.1 机械加工表面质量的 含义	222
4.1.1 工件装夹的基本概念	149		
4.1.2 机床夹具的分类	149		
4.1.3 机床夹具的组成	150		
4.1.4 机床夹具的功能	151		
4.2 工件定位的基本原理	151		
4.2.1 六点定位原理	151		

5.3.2	表面质量对零件使用性能的影响	223	6.4.2	制定装配工艺规程的步骤与工作内容	253
5.3.3	影响表面粗糙度的工艺因素及改善措施	224		思考与练习题	255
5.3.4	影响零件表面层物理力学性能的因素及改善措施	227	第7章 先进制造技术与制造模式		256
5.3.5	提高机械加工表面质量的方法	229	7.1	概述	256
5.4	机械加工中的振动	230	7.1.1	先进制造技术产生的背景	256
5.4.1	强迫振动	231	7.1.2	先进制造技术的定义与特点	257
5.4.2	自激振动	231	7.1.3	先进制造技术的发展趋势	257
	思考与练习题	235	7.2	机械制造自动化技术	258
第6章 装配工艺基础		237	7.2.1	机械制造自动化的概念	258
6.1	机械装配概述	237	7.2.2	计算机集成制造系统	262
6.1.1	装配的概念	237	7.3	快速原形技术	264
6.1.2	装配精度	237	7.3.1	快速原形技术的基本原理	265
6.1.3	装配精度与零件精度间的关系	238	7.3.2	快速原形技术的主要工艺方法	266
6.2	装配尺寸链	239	7.4	先进制造生产模式	268
6.2.1	装配尺寸链的建立	239	7.4.1	并行工程	268
6.2.2	装配尺寸链的计算方法	242	7.4.2	敏捷制造	269
6.3	保证装配精度的方法	243	7.4.3	精良生产	271
6.3.1	互换法	243	7.4.4	虚拟制造	272
6.3.2	选择装配法	246	7.4.5	绿色制造	274
6.3.3	修配装配法	248		思考与练习题	277
6.3.4	调整法	250	参考文献		278
6.3.5	装配方法的选择	252			
6.4	装配工艺规程的制定	252			
6.4.1	制定装配工艺规程的基本要求	253			

绪 论

0.1 机械制造业在国民经济中的地位及其发展

0.1.1 机械制造业在国民经济中的地位

制造业是国家的支柱产业,也是反映国家经济实力的重要标志,是为国家创造财富的重要产业。据统计,20世纪90年代20个工业化国家制造业创造的财富占国民生产总值(GDP)的比例平均为22.15%。

机械制造业是制造业最主要的组成之一,国民经济各部门所需要的各种机器设备和装备都要靠机械制造业供应,因此国民经济各部门的生产水平和经济效益在很大程度上取决于机械制造业所提供的装备的技术性能、质量和可靠性。同时,国民经济的发展速度,在很大程度上也取决于机械制造工业技术水平的高低和发展速度。纵观世界各国,任何一个经济强大的国家无不具有强大的机械制造业,许多国家的经济腾飞,机械制造业都功不可没。其中,日本最具有代表性。第二次世界大战后,日本对机械制造业的发展给予全面支持,并抓住机械制造的关键技术——精密工程和制造系统自动化,使日本在战后的短短30年里一跃成为世界经济大国。而美国政府自20世纪50年代后忽视了制造技术的发展,结果导致了90年代初的经济严重衰退,竞争力明显下降,在汽车、家电等行业被日本赶超。美国政府在进行深刻反省之后,先后制定实施了一系列振兴美国制造业的计划,并对制造业给予强有力的支持,才重新树立制造业的地位。1994年,美国汽车产量重新超过日本,并重新占领了欧美市场。

0.1.2 机械制造业的发展

人类最早的制造活动可以追溯到新石器时代,当时人们制作石器作为劳动工具,制造处于一种萌芽阶段;到了青铜器和铁器时代,为了满足以农业为主的自然经济的需要,出现了冶炼和锻造等较为原始的制造活动。

18世纪中叶,随着蒸汽机的发明及大量使用,机械技术与蒸汽动力技术相结合,出现了以动力驱动为特征的制造方式,产生了第一次工业革命。之后,随着发电机和电动机的发明,电气化时代来临,以电作为新的动力源大大改变了机器结构和生产效率。这个阶段制造业发展的一个标志,就是开始使用机械加工机床。

19世纪末,内燃机的发明引发了制造业的又一次革命;20世纪初,制造业进入了以汽车制造为代表的批量生产时代,随后出现了流水生产线和自动机床。在制造管理思想方面,劳动分工制度和标准化技术相继问世。1931年,建立了具有划时代意义的汽车装配生产线,实现了以刚性自动化为特征的大批量生产方式。

以大规模生产方式为主要特征的制造技术,在20世纪50年代逐渐进入鼎盛时期,制造业通过降低生产成本(主要是降低劳动力成本)和提高生产效率,形成了“规模效益”的工业

化生产理念。大规模生产方式作为现代工业生产的一个重要特征,对人类社会的经济发展、社会结构、文化教育以及生活方式等,产生了深刻的影响。

20世纪60年代,随着市场竞争的加剧,大规模生产方式面临新的挑战。制造企业的生产方式开始向多品种、中小批量生产方式转变。与此同时,以大规模集成电路为代表的微电子技术以及以微机为代表的计算机技术迅速发展,极大地促进了制造业的装备技术和制造工艺的进步,为制造业实现多品种、中小批量的生产方式创造了有利条件。这个阶段诞生的制造装备与制造技术主要有数控机床、计算机辅助设计(CAD)和计算机辅助制造(CAM)等。

20世纪80年代以来,信息产业的崛起和通信技术的发展加速了市场的全球化进程。为了适应新的形势,在机械制造领域提出了许多新的制造理念和生产模式,如计算机集成制造(CIM)、精益生产(LP)、快速原型制造(RPM)、并行工程(CE)、敏捷制造(AM)等。

20世纪90年代,随着因特网的应用,不同地区的工厂、设计和研究单位通过因特网组合在一起,分工协作,共同开发、研制并生产新产品。多单位协作,并行作业,可快速、优质、低成本地进行新产品研制与生产,这就是敏捷制造(网络制造)的概念。

在计算机上进行加工仿真、调度仿真、制造过程仿真(虚拟制造)、装配过程仿真(虚拟装配),对机械制造业中的设计、制造、调度管理产生了极大帮助。并行工程,使机械制造中原来需要先后顺序进行的工作,改成并行或部分并行的工作,大大缩短了生产周期。

进入21世纪,机械制造业正向自动化、柔性化、集成化、智能化和清洁化的方向发展。现代机械制造技术发展的总趋势是机械制造技术与材料科学、电子科学、信息科学、生命科学、环保科学、管理科学等的交叉、融合。在机械制造业,综合考虑社会、环境、资源等可持续发展因素的绿色制造技术将朝着能源与原材料消耗最小、所产生的废弃物最少并尽可能回收利用、在产品的整个生命周期中对环境无害等方面发展。

我国机械制造具有悠久的历史。随着农业和手工业的发展,我国最先应用了各种机械作为生产工具。早在公元前16世纪~公元前11世纪的商代,我国就已出现可转动的琢玉工具。车(旋)削加工和车床雏形在我国出现早于欧洲近千年。公元260年左右创造了木制齿轮,应用轮系原理制成了以水为动力的机械,用于加工谷物。然而,后来我们落后了,从资本主义生产方式在欧洲大陆开始发展的14世纪起,一直到1949年中华人民共和国成立这漫长的几百年间,由于封建主义的压迫和帝国主义的侵略,我国的机械制造工业长期处于停滞状态。新中国成立以来,我国的机械制造业得到了长足的发展,建立了自己独立的、门类齐全的工业体系,机床制造业、汽车工业、航天航空工业等技术难度较大的机械制造工业得到快速发展,取得了举世瞩目的成就。目前,中国的制造业规模仅次于美国、日本和德国,已达到世界第四位。但是,与工业发达国家相比,我国机械制造业的产品质量和技术水平不高,基础件和基础工艺不过关,缺乏自主知识产权的产品,技术创新能力落后,劳动生产率低,市场竞争力不强,产品开发能力不足,装备制造业缺乏核心技术,低水平的生产能力过剩、高水平的生产能力不足,致使我国许多高精尖设备和成套设备仍需要大量进口,我国机械制造业人均产值仅为发达国家的几十分之一。因此,我国的机械制造工业必须努力发展,培养高水平的人才和提高现有人员的素质,学习和掌握当代最先进的科学技术,使我国的机械制造工业赶上世界先进水平。

0.2 机械制造过程的基本概念

0.2.1 机械产品生产过程与制造技术

在现代化的制造工业中,机械产品的生产过程是一个大的系统工程。该过程根据内容的不同可分为3个阶段:第一阶段是产品的决策阶段;第二阶段是产品的设计和研究阶段;第三阶段是产品的制造阶段。

产品的制造阶段即是把原材料转变为成品的过程。这一过程包括原材料的运输和保管、生产准备、毛坯准备、机械加工、装配与调试、质量检验、成品包装等不同的工作。

在这一过程中的运输、保管、准备、包装、检验等称为辅助过程,而毛坯制造、机械加工、热处理、装配等直接改变毛坯或零件的形状尺寸、材料性能的过程称为生产工艺过程或工艺过程。生产工艺过程中的毛坯制造、机械加工、装配调试等称为机械制造(工艺)过程。这一过程的工作即是通过铸造、焊接、锻造等方法得到毛坯(或零件成品),并进行机械切削等加工,最后装配成机器。

制造技术是完成制造活动所需的一切手段的总和。这些手段包括运用一定的知识和技能、操纵可以利用的物质和工具、采取各种有效的方法等。

0.2.1 零件的机械制造方法与机械加工工艺系统

零件的机械制造方法很多。按照在制造过程中质量的变化,可分为材料成形法、材料累积法和材料去除法。

1) 材料成形法

材料成形法是一种在较高温度(或压力)下,使材料在模具中成形的方法,如铸造、锻造、挤压、粉末冶金等。它的主要特点是生产效率较高。由于材料成形方法目前所能达到的精度还较低,一般常用于制造毛坯,也可用于制造形状复杂但精度和表面粗糙度要求较低的零件。精密铸造、精密锻造、挤压及粉末冶金等材料成形加工,则可用来直接制造精度要求较高的零件。

2) 材料累积法

材料累积法是利用微体积材料逐渐叠加的方式使零件成形的方法。这类方法中包括电镀、化学镀等原子沉积加工,还包括热喷涂、静电喷涂等微粒沉积加工以及快速原型制造等。

快速原形制造是指将零件三维实体模型数据经计算机处理,让成形材料在计算机控制下逐层累积成形。这种方法的特点是可以快速成形任意复杂的零件,不需任何刀具、模具。目前,快速原形制造除用于快速制造零件的三维实体模型外,还可用于模具和少量零件的快速制造。

3) 材料去除法

材料去除法是指通过在被加工对象上去除一部分材料后制成合格零件的方法。与其他方法相比,其材料利用率较低,但由于该方法的加工精度相对较高、表面质量相对较好,并且有很强的加工适应性,故至今仍然是机械制造中应用最广泛的加工方法,而且在未来相当长的时期内仍将占有重要地位。

在材料去除法中,还可按材料去除方式的不同分为切削加工和特种加工两种。虽然随着加工技术的发展,电火花加工、激光加工、电解加工等新的特种加工方法开始被用来进行

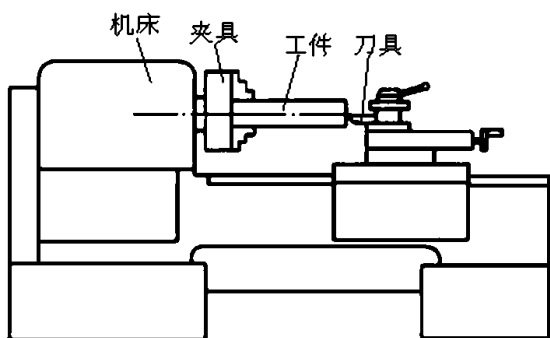


图 0.1 机械加工工艺系统的组成

金属的加工,但目前主要应用的仍然是用金属切削刀具来进行切削的方法。切削加工是利用切削刀具从工件上切除多余材料的方法,图 0.1 是一个典型的金属切削实例。由图可知,机床通过夹具装夹工件,使用刀架夹持切削刀具。加工时,机床根据选好的切削参数提供刀具与工件之间的相对运动,即产生切削加工。

由机床、夹具、刀具和工件组成的统一体称为机械加工工艺系统。而金属切削原理及刀具、金属切削机床、机械制造工艺学及机床夹具等基础理论及相关知识即形成了机械制造技术的基础。

0.3 本课程的学习要求和学习方法

本课程是机械类专业的主干技术基础课程。通过本课程的学习,要求学生能对制造过程有一个总体的、全貌的了解与把握;能掌握金属切削过程的基本规律;了解常用的金属切削刀具的结构、工作原理和应用;熟悉金属切削机床的结构、工作原理,初步掌握分析机床运动和传动系统的方法;掌握机械加工的基本知识,能选择加工方法与机床和刀具;掌握机械加工工艺和装配的基本知识,具有编制零件加工工艺规程、设计机床夹具的能力;掌握机械加工精度和表面质量的基本理论和基本知识,初步具备分析解决现场工艺问题的能力;了解当今先进制造技术和制造模式的发展状况。

本课程的理论和工艺知识具有很强的实践性。学习本课程时,除了参考大量的书籍之外,还必须重视实践环节,通过实验、现场实习以及工厂调研来更好地体会,以加深理解。加强感性知识与理性知识的结合,是学习本课程的最好方法。

本课程的特点及针对这些特点在学习方法上应注意的几点如下:

(1) 综合应用性高。机械制造是一门综合性很强的技术,它要用到多种学科的理论和方法。在学习中,要特别注意紧密联系和综合应用以往所学过的知识。

(2) 实践性强。机械制造技术本身是机械制造生产实践的总结。它要求对生产实践活动不断地进行综合,并将实际经验条理化和系统化,使其逐步上升为理论;同时又要用生产实践检验其正确性和可行性。

(3) 工程性强。研究本课程的内容,要从工程应用的角度去理解和掌握,不能完全照搬理论和公式,因为工程实际问题 and 理论问题总是存在差别的。

在学习中,要特别注意充分理解机械制造技术的基本概念,牢固掌握机械制造技术的基本理论和基本方法,以及这些理论和方法的灵活应用。

思考与练习题

- 0-1 机械制造业在国民经济中占有什么样的位置?
- 0-2 机械产品的生产过程包含哪些内容?
- 0-3 零件的机械制造方法有哪些?
- 0-4 围绕我国机械制造业的发展状况,写一篇调研报告。

第 1 章 金属切削基础

教学提示:本章主要讲述金属切削过程的基本知识,包括刀具的几何参数、刀具材料及常用刀具,对切削过程中的切削变形、切削力、切削热与切削温度以及有关刀具的磨损与刀具寿命、卷屑与断屑等现象进行研究,揭示其内在的机理,探索和掌握金属切削过程的基本规律。

教学要求:理解金属切削过程的基本概念,掌握金属切削的基本原理和基本知识,并具有根据具体情况合理选择刀具、切削用量、切削液等的初步能力;掌握金属切削过程的基本规律,并具备将金属切削过程基本规律应用于实际的初步能力。

金属切削加工是在机床上利用切削工具从工件上切除多余金属材料,从而获得具有一定形状精度、尺寸精度、位置精度和表面质量的机械零件,是机械加工的基本方法。由于广泛使用的切削工具是各类刀具,因此对于刀具的研究具有特别重要的技术意义。此外,金属切削过程是机械制造过程的一个重要组成部分,在这一过程中,始终存在着刀具切削工件和工件材料抵抗切削的矛盾,从而产生一系列现象,如切削变形、切削力、切削热与切削温度以及有关刀具的磨损与刀具寿命、卷屑与断屑等。对这些现象进行研究,揭示其内在的机理,探索和掌握金属切削过程的基本规律,从而加以主动有效的控制,对保证加工精度和表面质量,提高切削效率,降低生产成本和劳动强度具有十分重要的意义。

1.1 金属切削刀具

1.1.1 切削运动与切削要素

1. 切削运动

金属切削过程是工件和刀具相互作用的过程。为了使切削加工过程能够顺利进行,刀具和工件间要有形成零件表面所需的相对运动,即表面成形运动。切削运动按其作用可分为主运动和进给运动。

1) 主运动

使零件与刀具之间产生相对运动以进行切削的最基本运动称为主运动。主运动直接切除工件上的多余材料,使之转变为切屑,从而形成工件新表面。在切削过程中,主运动只有一个,且速度最高,所消耗的功率最大。它可由零件完成,也可以由刀具完成;可以是旋转运动,也可以是直线运动,如车床上工件的旋转运动、牛头刨床上刨刀的直线往复运动,如图 1.1 中的 v_c 所示。

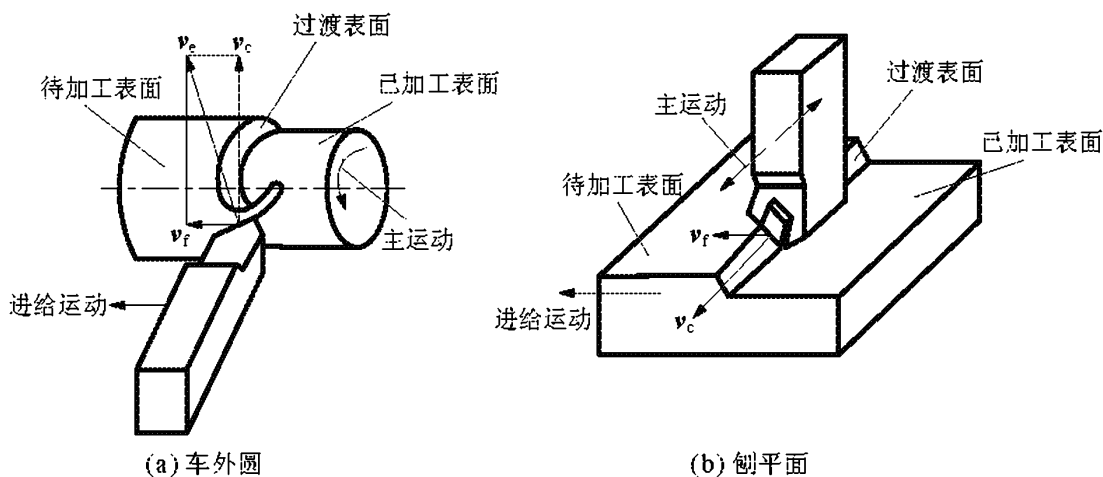


图 1.1 切削运动与切削表面

2) 进给运动

多余材料不断投入切削,从而逐渐切削出整个零件表面的运动,称为进给运动。进给运动一般速度较低,消耗的功率较少,可以有一个或多个。它可以是连续的,也可以是间断的,如车外圆时车刀纵向连续的直线运动,以及在牛头刨床上刨平面时工件横向间断的直线移动,如图 1.1 中的 v_f 所示。

在主运动和进给运动同时进行的切削加工中,如车外圆、钻孔、铣平面等,常将两者按矢量加法合成,称为合成切削运动。如图 1.1 所示,合成运动的速度向量 v_e 等于主运动速度向量 v_c 与进给运动的速度向量 v_f 之和,即

$$v_e = v_c + v_f \quad (1-1)$$

如图 1.1 所示,切削加工中,工件上通常存在着三个不断变化的表面。

待加工表面:工件上即将被切除的表面。

已加工表面:工件上经刀具切削后产生的新表面。

过渡表面:工件上由切削刃正在切削着的表面,位于待加工表面和已加工表面之间,也称为加工表面或切削表面。

2. 切削要素

切削要素主要指切削过程的切削用量要素和在切削过程中由余量变成切屑的切削层参数。

1) 切削用量

在生产中,将切削速度、进给量和背吃刀量统称为切削用量,又称为切削用量三要素。车削外圆时的切削用量如图 1.2 所示。

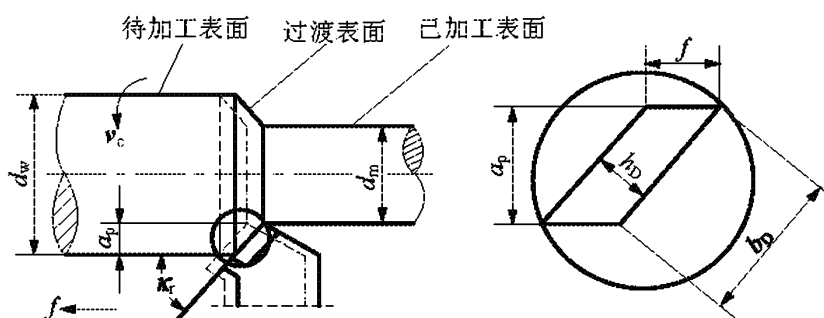


图 1.2 切削用量与切削层参数

(1) 切削速度 v_c 。在单位时间内,刀具和工件在主运动方向的相对位移称为切削速度,单位为 m/s 。计算时常用切削刃上速度最高的点代表刀具的切削速度。当主运动是回转运动时,则其切削速度为

$$v_c = \frac{\pi d_w n}{1000} \quad (1-2)$$

式中, d_w ——工件待加工表面或刀具最大直径, mm ;

n ——工件或刀具的转速, r/s 或 r/min 。

若主运动是往复直线运动,则常用其平均速度作为切削速度,即

$$v_c = \frac{2Ln_r}{1000} \quad (1-3)$$

式中, L ——往复运动行程长度, mm ;

n_r ——主运动每秒的往复次数, $次/秒$ 。

(2) 进给量 f 。工件或刀具每回转一周(或往复运动一次),两者之间沿进给方向的相对位移量称为进给量,单位为 mm/r (或 $mm/双行程$)。对于多齿的旋转刀具,如铣刀、切齿刀,常用每齿进给量 f_z ,单位为 mm/z ,它与进给量 f 的关系为

$$f = z f_z \quad (1-4)$$

式中, z ——铣刀刀齿齿数。

在切削加工中,也有用进给速度 v_f 来表示进给运动的。进给速度 v_f 是指切削刃上选定点相对于工件的进给运动速度,其单位为 mm/min 。外圆车削时的进给速度为

$$v_f = f n \quad (1-5)$$

铣削时进给速度为

$$v_f = f n = z f_z n \quad (1-6)$$

(3) 背吃刀量 a_p 。刀具切削刃与工件的接触长度在同时垂直于主运动和进给方向上的投影值称为背吃刀量。对于外圆车削,背吃刀量为工件上待加工表面与已加工表面间的垂直距离,单位为 mm 。由图 1.2 可知:

$$a_p = (d_w - d_m) / 2 \quad (1-7)$$

式中, d_w ——工件加工前(待加工表面)直径, mm ;

d_m ——工件加工后(已加工表面)直径, mm 。

2) 切削层参数

切削层是指零件上正被切削刃切削的一层金属,即两个相邻加工表面间的那层金属。对于外圆车削,即零件转一转,主切削刃移动一个进给量 f 所切除的金属层,如图 1.2 所示。切削层参数包括切削层公称厚度、切削层公称宽度和切削层公称横截面积。

(1) 切削层公称厚度 h_D 。在过渡表面法线方向测量的切削层尺寸,即相邻两过渡表面之间的距离。它反映了切削刃单位长度上的切削负荷。外圆车削时:

$$h_D = f \sin \kappa_r \quad (\kappa_r \text{表示偏角}) \quad (1-8)$$

(2) 切削层公称宽度 b_D 。沿过渡表面测量的切削层尺寸,它反映了参加切削的切削刃长度。

$$b_D = a_p / \sin \kappa_r \quad (1-9)$$

(3) 切削层公称横截面面积 A_D 。在切削层参数平面内度量的横截面面积,即切削层公称厚度与切削层公称宽度的乘积。

$$A_D = h_D b_D = a_p f \quad (1-10)$$

1.1.2 刀具的角度

刀具上承担切削工作的部分称为刀具的切削部分,金属切削刀具的种类虽然很多,但它们在切削部分的几何形状与参数方面却有着共性的内容。不论刀具构造如何复杂,它们的切削部分总是近似地以外圆车刀切削部分为基本形态。

1. 刀具切削部分的组成

外圆车刀是最基本、最典型的刀具。如图 1.3 所示,其切削部分(又称刀头)由 6 个基本结构要素构造而成,它们各自的定义如下:

(1) 前刀面(又称前面)。刀具上与切屑接触并相互作用的表面,即切屑流过的表面。

(2) 主后刀面(又称主后面或后面)。与工件上过渡表面相对的刀具表面。

(3) 副后刀面(又称副后面)。与工件上已加工表面相对的刀具表面。

(4) 主切削刃。前刀面与主后刀面的交线,它承担主要切削工作。

(5) 副切削刃。前刀面与副后刀面的交线,它协同主切削刃完成切削工作,并最终形成已加工表面。

(6) 刀尖。连接主切削刃和副切削刃的一段切削刃,它可以是小的直线段或圆弧。

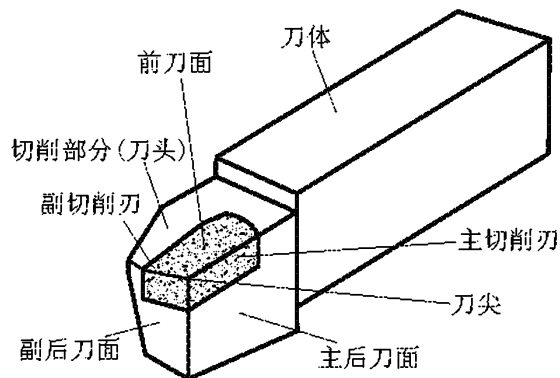


图 1.3 车刀的组成

2. 刀具标注角度的参考系

刀具要从工件上切除材料,就必须具有一定的切削角度。切削角度决定了刀具切削部分各表面之间的相对位置。而要确定它们的空间位置,就应当建立假想的参考平面坐标系,称为刀具标注角度的参考系,如图 1.4 所示。该参考系由 3 个互相垂直的平面组成。

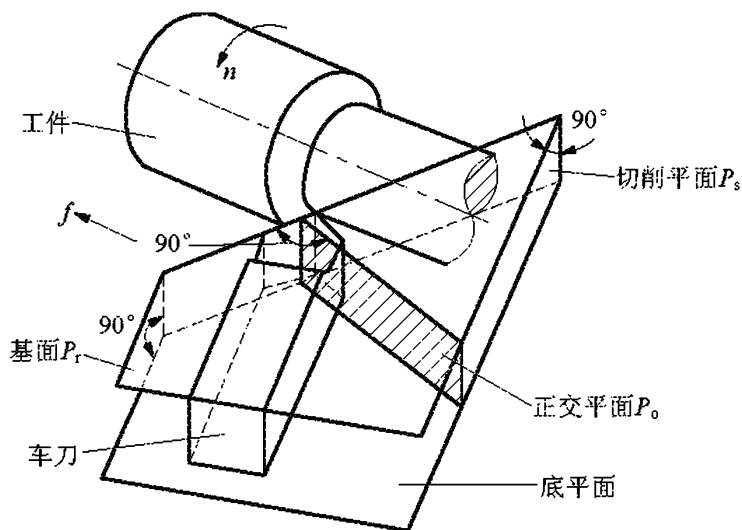


图 1.4 刀具标注角度的参考系

(1) 基面 P_r 。通过主切削刃上某一指定点,并与该点切削速度方向相垂直的平面。

(2) 切削平面 P_s 。通过主切削刃上某一指定点,与主切削刃相切并垂直于该点基面的平面。

(3) 正交平面 P_o 。(又称主剖面)。通过主切削刃上某一指定点,同时垂直于该点基面和切削平面的平面。

3. 刀具的标注角度

在刀具标注角度参考系中测得的角度称为刀具的标注角度,用以确定切削刃、刀面的空间位置。标注角度应标注在刀具的设计图中,用于刀具制造、刃磨和测量。

如图 1.5 所示,在正交平面参考系中,刀具的主要标注角度有五个,其定义如下:

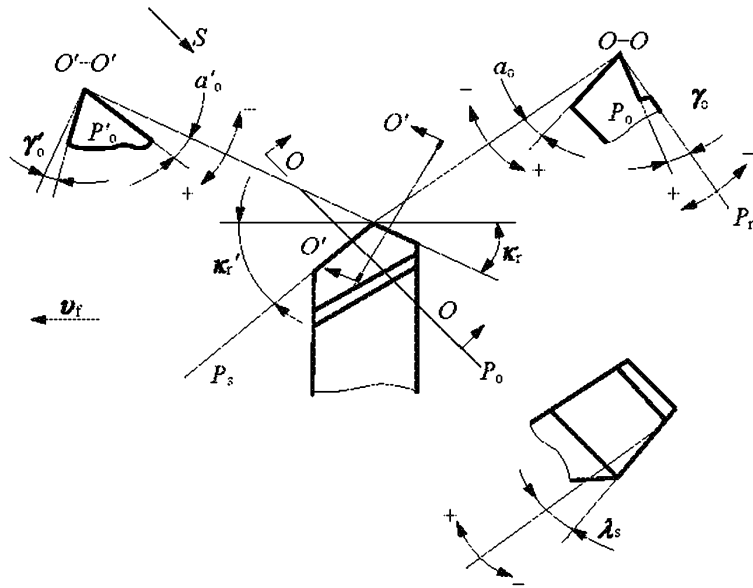


图 1.5 车刀的标注角度

(1) 前角 γ_o 。在正交平面内测量的前刀面和基面之间的夹角。前角表示前刀面的倾斜程度,有正、负和零值之分,前刀面在基面之下时前角为正值,前刀面在基面之上时前角为负值。

(2) 后角 α_o 。在正交平面内测量的主后刀面与切削平面之间的夹角。后角表示主后刀面的倾斜程度,一般为正值。

(3) 主偏角 κ_r 。在基面内测量的主切削刃在基面上的投影与进给运动方向的夹角。主偏角一般为正值。

(4) 副偏角 κ'_r 。在基面内测量的副切削刃在基面上的投影与进给运动反方向的夹角,副偏角一般为正值。

(5) 刃倾角 λ_s 。在切削平面内测量的主切削刃与基面之间的夹角。在主切削刃上,刀尖为最高点时刃倾角为正值,刀尖为最低点时刃倾角为负值。主切削刃与基面平行时,刃倾角为零。

要完全确定车刀切削部分所有表面的空间位置,还需标注与副切削刃有关的独立角度:副前角 γ'_o 、副后角 α'_o 、副刃倾角 λ'_s ,其定义参照 γ_o 、 α_o 、 λ_s 。

4. 刀具的工作角度

以上讨论的刀具标注角度,是在假定运动条件和假定安装条件的情况下给出的。在实际的切削加工中,由于刀具安装位置和进给运动的影响,刀具的标注角度会发生变化,其原因是切削平面、基面和正交平面位置会发生变化。以切削过程中实际的基面、切削平面和正交平面为参考平面所确定的刀具角度称为刀具的工作角度,又称实际角度。通常,刀具的进给速度很小,在一般安装条件下,刀具的工作角度与标注角度基本相等。但在切断、车螺纹以及加工非圆柱表面等情况下,刀具角度值变化较大时需要计算工作角度。

1) 横向进给运动对工作角度的影响

当切断、切槽或车端面时,进给运动是沿横向进行的。如图 1.6 所示,当不考虑进给运动时,车刀刀刃上某一定点 O 在工件表面上的运动轨迹是一个圆,因此切削平面 P_s 是过 O

点且与此圆相切,基面 P_r 过 O 点且垂直于切削平面 P_s 。 γ_0 与 α_0 为正交平面 P_0 内的标注前角和后角。当考虑进给运动后,工件每转一转,车刀横向移离 f ,切削刃选定点相对于工件的运动轨迹为一阿基米得螺旋线。因此切削速度由 v_c 变成合成切削速度 v_e ,基面 P_r 由水平位置变至工作基面 P_{re} ,切削平面 P_s 由铅垂位置变至工作切削平面 P_{se} ,从而引起刀具的前角和后角发生变化:

$$\begin{aligned}\gamma_{oe} &= \gamma_0 + \mu \\ \alpha_{oe} &= \alpha_0 - \mu \\ \mu &= \arctan \frac{f}{\pi d}\end{aligned}\quad (1-11)$$

式中, γ_{oe}, α_{oe} ——工作前角和工作后角。

由式(1-11)可知,进给量 f 增大,则 μ 值增大;瞬时直径 d 减小, μ 值也增大。因此,车削至接近工件中心时, d 值很小, μ 值急剧增大,工作后角 α_{oe} 将变为负值,致使工件最后被挤断。对于横向切削不宜选用过大的进给量,并应适当加大刀具的标注后角。

2) 纵向进给运动对工作角度的影响

图 1.7 所示为车削右螺纹的情况。假定车刀 $\lambda_s = 0$, 如不考虑进给运动,则基面 P_r 平行于刀杆底面,切削平面 P_s 垂直于刀杆底面,正交平面中的前角和后角为 γ_0 和 α_0 ,在进给平面(平行于进给方向并垂直于基面的平面)中的前角和后角为 γ_f 和 α_f 。若考虑进给运动,则加工表面为一螺旋面,这时切削平面变为切于该螺旋面的平面 P_{se} ,基面变为垂直于合成切削速度矢量的平面 P_{re} 。它们分别相对于 P_s 和 P_r ,在空间偏转同样的角度,这个角度在进给平面中为 μ_f ,在正交平面中为 μ ,从而引起刀具前角和后角的变化。在上述进给平面内刀具的工作角度为:

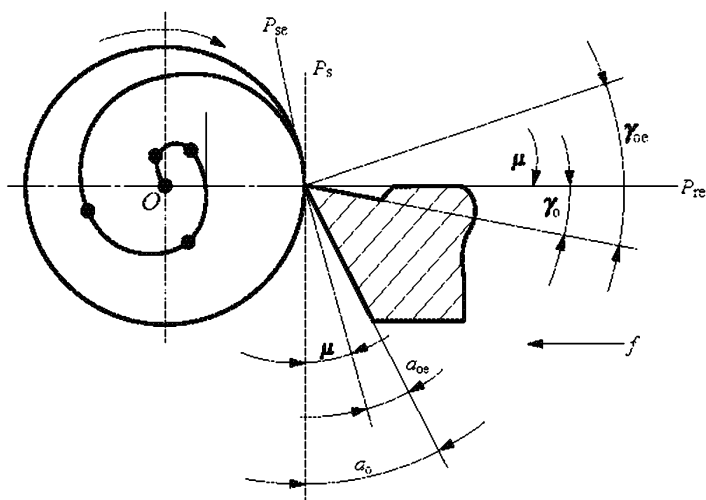


图 1.6 横向进给运动对工作角度的影响

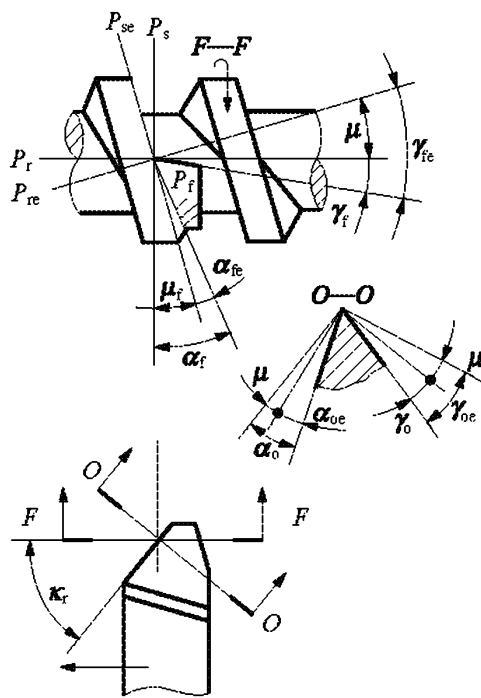


图 1.7 纵向进给运动对工作角度的影响

$$\begin{aligned} \gamma_{fe} &= \gamma_f + \mu_f \\ \alpha_{fe} &= \alpha_f + \mu_f \\ \tan \mu_f &= \frac{f}{\pi d_w} \end{aligned} \tag{1-12}$$

式中, f ——纵向进给量,或被切螺纹的导程或进给量, mm/r;

d_w ——工件直径,或螺纹的外径, mm。

在正交平面内刀具的工作前角、后角分别为:

$$\begin{aligned} \gamma_{oe} &= \gamma_o + \mu \\ \alpha_{oe} &= \alpha_o - \mu \\ \tan \mu &= \tan \mu_f \sin \kappa_r = \frac{f}{\pi d_w} \sin \kappa_r \end{aligned} \tag{1-13}$$

由以上各式可知,进给量 f 越大,工件直径 d_w 越小,则工作角度值变化就越大。一般外圆车削时,由于纵向进给量 f 较小,由进给运动所引起的 μ 值不超过 $30' \sim 1^\circ$,故其影响可忽略不计。但在车削大螺距或多头螺纹时,纵向进给的影响不可忽视,必须考虑它对刀具工作角度的影响。

3) 刀尖安装高低对工作角度的影响

现以切槽刀为例进行分析。如图 1.8 所示,当刀尖与工件中心等高时,工作角度与标注刃磨相同,即工作前角 $\gamma_{oe} = \gamma_o$ 。工作后角 $\alpha_{oe} = \alpha_o$;当刀尖高于工件中心时,切削平面将变为 P_{se} ,基面变到 P_{re} 位置,工作前角 γ_{oe} 增大,工作后角 α_{oe} 减小,即 $\gamma_{oe} = \gamma_o + \theta$; $\alpha_{oe} = \alpha_o - \theta$ (见图 1.8)。反之,当刀尖低于工件中心时,则工作前角 γ_{oe} 减小,工作后角 α_{oe} 增大。对于外圆车刀,工作角度也有同样的变化关系。生产中常利用这种方法来适当改变刀具角度, h 常取 $(\frac{1}{100} \sim \frac{1}{50}) d_w$, 这时 θ 值约为 $2^\circ \sim 4^\circ$ 。这样,就可不必改磨刀具,而迅速获得更为合理的 γ_{oe} 和 α_{oe} 。粗车外圆时,使刀尖略高于工件中心,以增大前角,降低切削力;精车外圆时,使刀尖略低于工件中心,以增大后角,减少后刀面的磨损;车成形表面时,刀刃应与工件中心等高,以免产生误差。

4) 刀杆中心线安装偏斜对工作角度的影响

当刀杆中心线与进给方向不垂直时,工作主偏角 κ_{re} 和工作副偏角 κ'_{re} 将发生变化,如图 1.9 所示。

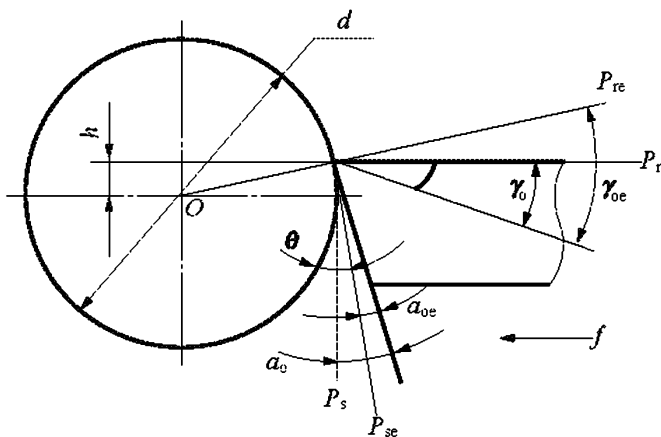


图 1.8 刀尖安装高低对工作角度的影响

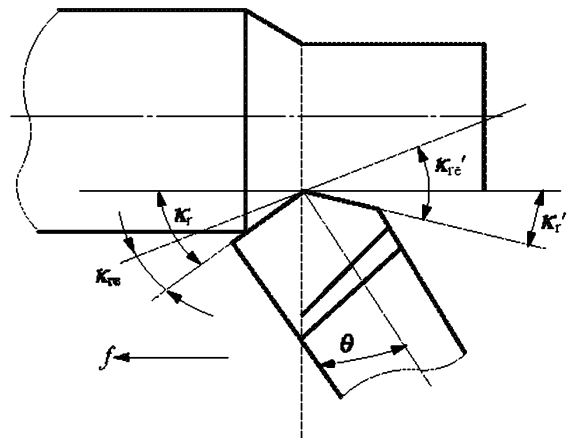


图 1.9 刀杆中心线安装偏斜对工作角度的影响

1.1.3 刀具材料

1. 刀具材料应具备的性能

刀具切削性能的优劣,除了受刀具的几何形状和结构影响以外,刀具材料是最重要的因素之一。它对刀具的使用寿命、工件的生产效率、加工质量和加工成本有极大影响。刀具材料应具备以下几方面性能。

(1) 足够的硬度和耐磨性。刀具材料的硬度必须高于工件材料的硬度,并具有良好的耐磨性。刀具材料的常温硬度一般须在 60HRC 以上。

(2) 足够的强度和韧性。切削时刀具要承受较大的切削力、冲击和振动,为避免崩刃和折断,刀具材料应具有足够的强度和韧性。材料的强度和韧性通常用抗弯强度和冲击值表示。

(3) 高的耐热性及化学稳定性。刀具材料在高温下仍能保持其硬度、耐磨性、强度和韧性。此外,刀具材料在高温下应具有抗氧化的能力以及良好的抗粘结和抗扩散的能力,即具有良好的化学稳定性。

(4) 良好的导热性和耐热冲击性能。刀具材料的导热性要好,不会因受到大的热冲击,产生刀具内部裂纹而导致刀具断裂。

(5) 良好的工艺性能。刀具材料应具有良好的工艺性能,如锻造性能、热处理性能、焊接性能、切削加工性能、磨削加工性能等。

2. 常用刀具材料

目前,常用刀具材料可分为工具钢(包括碳素工具钢、合金工具钢)、高速钢、硬质合金、陶瓷、金刚石、立方氮化硼等。碳素工具钢(如 T10A、T12A)与合金工具钢(如 9SiCr、CrWMn)因其耐热性差,通常只用于手工工具和一些简单的切削速度较低的刀具,如手动丝锥、锉刀、锯条、铰刀等。目前,刀具材料中用得最多的是高速钢和硬质合金。

1) 高速钢

高速钢是富含钨(W)、钼(Mo)、铬(Cr)、钒(V)等合金元素的高合金工具钢,如 W18Cr4V、W6Mo5Cr4V2A1 等。在工厂中常称为白钢或锋钢。

与碳素工具钢、合金工具钢相比,高速钢突出的性能特点是耐热性很高,在切削温度高达 500~650℃ 时,仍能保持 60HRC 的高硬度正常切削,因此许用切削速度为 30~50m/min,是碳素工具钢的 1~3 倍,提高刀具使用寿命 10~40 倍甚至更多。同时,高速钢还具有较高的耐磨性以及较高的强度和韧性,抗弯强度为一般硬质合金的 3~5 倍,冲击韧性是硬质合金的 6~10 倍。与硬质合金相比,高速钢的突出优点是可加工性好,并具有良好的综合力学性能,适宜制造各类切削刀具,尤其在复杂刀具(钻头、丝锥、成形刀具、拉刀、齿轮刀具等)的制造中,高速钢占有重要的地位。

高速钢按切削性能可分为通用型高速钢和高性能高速钢,按制造工艺方法不同可分为熔炼高速钢和粉末冶金高速钢。

常用的几种高速钢的力学性能见表 1-1。

表 1-1 常用高速钢的力学性能和应用范围

种 类	牌 号	常温硬度 HRC	抗弯强度 /GPa	冲击初度 /MJ·m ⁻²	高温硬度 HRC(600℃)	主要性能和应用范围
普通 型高 速钢	W18Cr4V (W18)	63~66	3.0~3.4	0.18~0.32	48.5	综合性能和可磨性好,适于制造精加工刀具和复杂刀具,如钻头、成形车刀、拉刀、齿轮刀具等
	W6Mo5Cr4V2 (M2)	63~66	3.5~4.0	0.30~0.40	47~48	强度和韧性高于 W18,可磨性稍差,热塑性好,适于制造热成形刀具及承受冲击的刀具
高性 能高 速钢	W2Mo9Cr4VCo8 (M42)	67~69	2.7~3.8	0.23~0.30	55	硬度高,可磨性好,用于切削高强度钢、高温合金等难加工材料,适于制造复杂刀具等,但价格较贵
	W6Mo5Cr4V2Al (501)	67~69	2.9~3.9	0.23~0.30	55	切削性能相当于 M42,可磨性稍差,用于切削难加工材料,适于制造复杂刀具等

(1) 通用型高速钢。通用型高速钢是切削硬度在 250~280HBS 以下的大部分结构钢和铸铁的基本刀具材料,应用最广泛。通用型高速钢的特点是工艺性能好,具有较高的硬度、强度、耐磨性和韧性,可用于制造各种刃形复杂的刀具。切削普通钢料时的切削速度通常不高于 40~60m/min。通用型高速钢又分为钨钢和钨钼钢两类,常用牌号分别如 W18Cr4V 和 W6Mo5Cr4V2。

(2) 高性能高速钢。高性能高速钢是在通用型高速钢成分中再添加一些 C、V、Co、Al 等合金元素,进一步提高耐热性能和耐磨性。这类高速钢刀具的耐用度为普通高速钢的 1.5~3 倍,适用于加工不锈钢、耐热钢、钛合金及高强度钢等难加工材料。

(3) 粉末冶金高速钢。粉末冶金高速钢是将熔炼的高速钢液用高压惰性气体雾化成细小粉末,将粉末在高温高压下制成刀坯,或压制成钢坯然后经轧制(或锻造)成材的一种刀具材料。粉末冶金高速钢具有很多优点:有良好的力学性能和可磨削性;淬火变形只有熔炼钢的 1/3~1/2;耐磨性可提高 20%~30%;质量稳定可靠。它适于制造切削难加工材料的刀具、大尺寸刀具,特别适于制造各种精密刀具和形状复杂的刀具,如滚刀、插齿刀等。

2) 硬质合金

硬质合金是用高硬度、难熔的金属碳化物(WC、TiC 等)和金属粘结剂(Co、Ni 等)在高温条件下烧结而成的粉末冶金制品。硬质合金的常温硬度达 89~93HRA,能耐 800~1000℃ 的高温,因此耐磨、耐热性好,许用切削速度是高速钢的 6 倍,刀具寿命比高速钢刀具高几倍到几十倍,可加工包括淬硬钢在内的多种材料。但硬质合金的强度和韧性比高速钢差,常温下的冲击韧性仅为高速钢的 1/8~1/30,因此,硬质合金承受切削振动和冲击的能力较差。此外,由于硬质合金的常温硬度很高,除磨削外,很难采用切削加工方法制造出复杂

的形状结构,故可加工性差。

硬质合金由于切削性能优良,因此被广泛用作刀具材料。大多数的车刀和端铣刀都采用硬质合金制造,深孔钻、铰刀等刀具也广泛采用硬质合金,就连一些复杂刀具,如拉刀、齿轮滚刀,特别是整体小模数硬质合金滚刀和加工淬硬齿面的滚刀也都采用了硬质合金。硬质合金常用于制造形状简单的高速切削刀片,焊接或机械夹固在车刀、刨刀、面铣刀、钻头 etc 刀体上使用。

ISO(国际标准化组织)把切削用硬质合金分为 3 类:P 类、K 类和 M 类。表 1-2 列出了几种常用的硬质合金的牌号、性能及其使用范围。

表 1-2 几种常用的硬质合金的牌号、性能及其使用范围

类型	牌号	物理力学性能		使用性能			使用范围		当的 ISO 牌号
		硬度 HRA	抗弯强度 /GPa	耐磨	耐冲击	耐热	材料	加工性质	
K 类	YG3	91	1.08	↑	↓	↑	铸铁,有色金属	连续切削时精加工、半精加工	K05
	YG6X	91	1.37				铸铁,耐热合金	精加工、半精加工	K10
	YG6	89.5	1.42				铸铁,有色金属	连续切削粗加工,间断切削半精加工	K20
	YG8	89	1.47				铸铁,有色金属	间断切削粗加工	K30
P 类	YT5	89.5	1.37	↓	↑	↓	钢	粗加工	P30
	YT14	90.5	1.25				钢	间断切削半精加工	P20
	YT15	91	1.13				钢	连续切削粗加工,间断切削半精加工	P10
M 类	YW1	92	1.28		较好	较好	难加工钢材	精加工、半精加工	M10
	YW2	91	1.47		好		难加工钢材	半精加工、粗加工	M20

P 类(相当于我国 YT 类)硬质合金由 WC、TiC 和 Co 组成,也称钨钛钴类硬质合金。这类合金主要用于加工钢料。常用牌号有 YT5(TiC 的质量分数为 5%)、YT15(TiC 的质量分数为 15%)等,随着 TiC 质量分数的提高,钴质量分数相应减少,硬度及耐磨性增高,抗弯强度下降。此类硬质合金不宜加工不锈钢和钛合金。

K 类(相当于我国 YG 类)硬质合金由 WC 和 Co 组成,也称钨钴类硬质合金。这类合金主要用来加工铸铁、有色金属及其合金。常用牌号有 YG6(钴的质量分数为 6%)、YG8(钴的质量分数为 8%)等,随着钴的质量分数的增多,硬度和耐磨性下降,抗弯强度和韧性增高。

M 类(相当于我国 YW 类)硬质合金是在 WC、TiC、Co 的基础上再加入 TaC(或 NbC)而成。加入 TaC(或 NbC)后,改善了硬质合金的综合性能。这类硬质合金既可以加工铸铁和有色金属,又可以加工钢料,还可以加工高温合金和不锈钢等难加工材料,有通用硬质合

金之称。常用牌号有 YW1 和 YW2 等。

3) 新型刀具材料

(1) 陶瓷材料。陶瓷材料是以氧化铝为主要成分,在高温下烧结而成的。刀具常用的陶瓷有纯 Al_2O_3 陶瓷和 $\text{TiC-Al}_2\text{O}_3$ 混合陶瓷两种。其硬度可达 91~95HRA,耐磨性好,耐热温度可达 1200°C (此时硬度为 80HRA)。它的化学稳定性好,抗粘结能力强,但它的抗弯强度很低,仅有 0.7~0.9GPa。故陶瓷刀具一般用于高硬度材料的精加工。

(2) 人造金刚石。它是碳的同素异形体,是通过合金触媒的作用在高温高压下由石墨转化而成。人造金刚石的硬度很高,其显微硬度可达 10000HV,是除天然金刚石之外最硬的物资。它的耐磨性极好,与金属的摩擦系数很小;但它的耐热温度较低,在 $700\sim 8000^\circ\text{C}$ 时易脱碳,失去其硬度;它与铁族金属亲和作用大,故人造金刚石多用于对有色金属及非金属材料的超精加工以及做磨具磨料用。

(3) 立方氮化硼(CBN)。它是由六方氮化硼经高温高压转变而成。其硬度仅次于人造金刚石,达到 8000~9000HV,它的耐热温度可达 1400°C ,化学稳定性很好,可磨削性能也较好,但它的焊接性能差些,抗弯强度略低于硬质合金。立方氮化硼作为一种新型超硬磨料和刀具材料,用于加工高温合金、淬火钢和冷硬铸铁等难加工材料。

(4) 涂层刀具。为提高高速钢刀具、硬质合金刀具的耐磨性和使用寿命,近年来研究开发了一种称之为涂层刀具的技术。涂层刀具是在高速钢或硬质合金基体上,采用 CVD 法(化学气相沉积法)或 PVD 法(物理气相沉积法)等方法,涂上一层难熔金属化合物,如 TiC 、 TiN 、 Al_2O_3 等。涂层刀具表面硬度高、耐磨性好,其基体又有良好的抗弯强度和韧性。涂层硬质合金刀片的寿命可提高 1~3 倍,涂层高速钢刀具的寿命可提高 1.5~10 倍。随着涂层技术的发展,涂层刀具的应用会越来越广泛。

1.2 常用刀具简介

生产中所使用的刀具种类很多。刀具按加工方式和具体用途可分为以下几种类型:

(1) 车刀类。包括车刀、刨刀、插刀、镗刀、成形车刀、自动机床和半自动机床用的切刀以及一些专用切刀。

(2) 铣刀类。用于在铣床上加工各种平面、侧面、台阶面、成形表面以及用于切断、切槽等。

(3) 孔加工刀具。包括从实体材料上加工孔以及对已有孔进行再加工所用的刀具,如各种钻头、扩孔钻、铰钻、铰刀、复合孔加工刀具等。

(4) 拉刀类。用于加工各种形状的通孔、贯通平面及成形表面等,是高生产率的多齿刀具,一般用于大批量生产。

(5) 螺纹刀具。用于加工各种内外螺纹,如螺纹车刀、螺纹梳刀、丝锥、板牙、螺纹铣刀、螺纹切头、滚丝轮、搓丝板等。

(6) 齿轮刀具。用于加工各种渐开线齿轮和其他非渐开线齿形的工件,如齿轮滚刀、插齿刀、剃齿刀、蜗轮滚刀、花键滚刀等。

1.2.1 车刀

车刀结构简单,是金属切削加工中应用最为广泛的一种刀具。车刀切削部分常用的材

料是硬质合金和高速钢,还可用陶瓷、金刚石和立方氮化硼等。它可以在普通车床、转塔车床、立式车床、自动与半自动车床上完成工件的外圆、内孔、端面、切削或切断以及部分内外成形面等的加工。按用途不同,车刀可分为外圆车刀、端面车刀、内孔车刀及切断刀等。常用车刀种类及用途详见图 1.10。

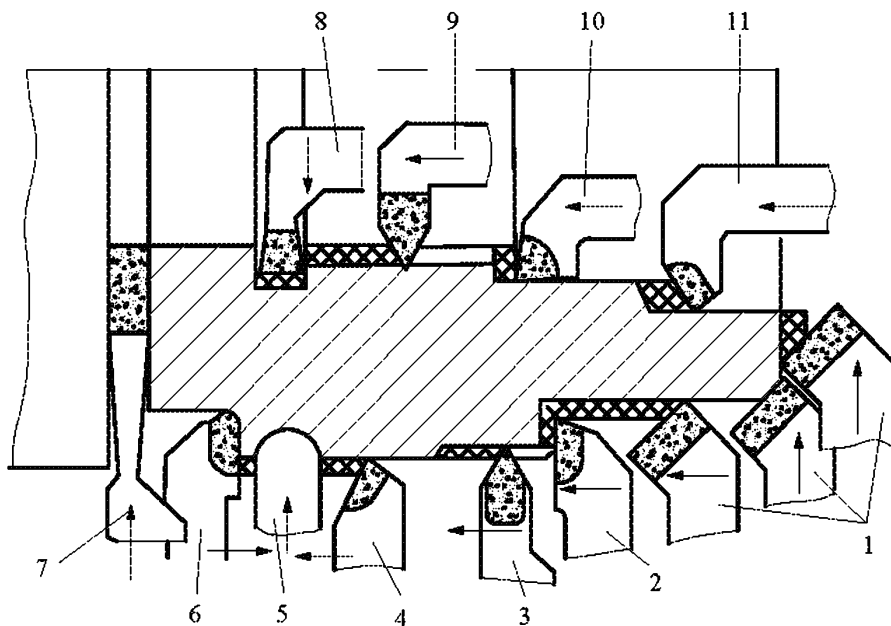


图 1.10 车刀的类型与用途

1 45°弯头车刀;2 90°外圆车刀;3 外螺纹车刀;4 75°外圆车刀;5 成形车刀;
6 90°左偏切外圆车刀;7 割槽刀;8 内孔槽刀;9 内螺纹车刀;10 盲孔镗刀;11 通孔镗刀

车刀在结构上可分为整体式、焊接式和机械夹固刀片的车刀。机械夹固刀片的车刀又分为机夹车刀和可转位车刀。

1. 整体车刀

整体式车刀主要是整体高速钢车刀,俗称“白钢刀”,如图 1.11(a)所示,截面呈正方形或矩形,使用时可根据不同用途进行修磨。整体车刀耗用刀具材料较多,一般只用作切槽、切断刀使用。

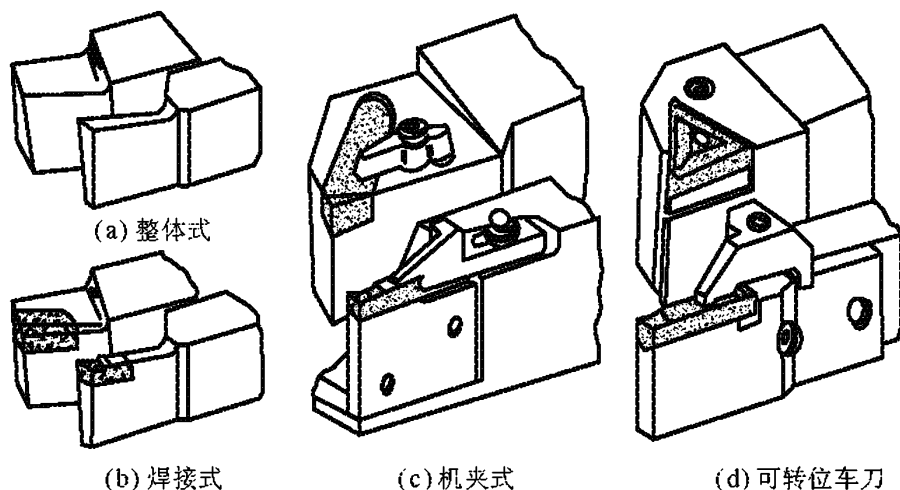


图 1.11 车刀的结构

2. 焊接车刀

焊接车刀是将硬质合金刀片用焊接的方法固定在普通碳钢刀体上,经过刃磨而成,如图 1.11(b)所示。它的优点是结构简单、使用灵活、制造方便,并且可以根据需要进行刃磨,硬质合金的利用也较充分,缺点是焊接产生的应力会降低硬质合金刀片的使用性能,有的甚至会产生裂纹;其次,硬质合金焊接车刀的切削性能主要取决于工人刃磨的技术水平,与现代化生产不相适应;另外,刀杆不能重复使用。

3. 机械夹固刀片的车刀

机械夹固刀片的车刀根据使用情况不同,又分为机夹车刀和机夹可转位车刀。

1) 机夹车刀

机夹车刀是采用普通硬质合金刀片,用机械夹固的方法将其夹持在刀柄上使用的车刀,如图 1.11(c)所示。机夹车刀只有一条主切削刃,用钝后可以重磨,而且可以重磨多次。其优点是刀杆可以重复使用,刀片不经高温焊接,排除了产生焊接裂纹的可能性。

2) 机夹可转位车刀

机夹可转位车刀是采用机械夹固的方法将可转位刀片固定在刀体上,如图 1.11(d)所示。它与普通机夹车刀的不同点在于刀片为多边形,每一边都可作切削刃,当一个刀刃用钝后,只需将刀片转位、重新夹固,即可使新的刀刃投入工作。可转位车刀除具备机夹车刀的优点外,其最大优点在于其几何参数完全由刀片和刀槽保证,不受工人技术水平的影响,因此切削性能稳定,适合现代化生产的需要。

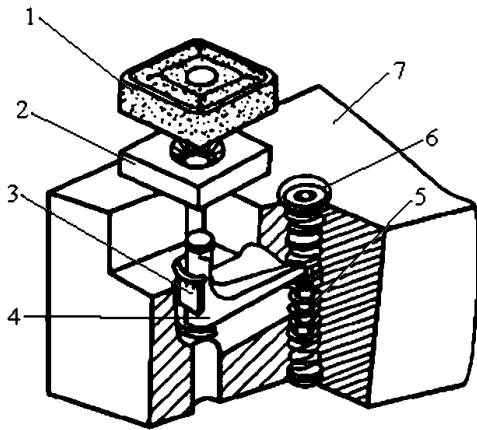


图 1.12 可转位车刀组成

- 1 刀片;2 刀垫;3 卡簧;4 杠杆
- 5 弹簧;6 螺钉;7 刀杆

可转位车刀由刀杆、刀片、刀垫和夹固元件组成,如图 1.12 所示。

硬质合金可转位刀片的形状很多,常用的有三角形、偏 8°三角形、凸三角形、正方形、五角形、圆形等,如图 1.13 所示。

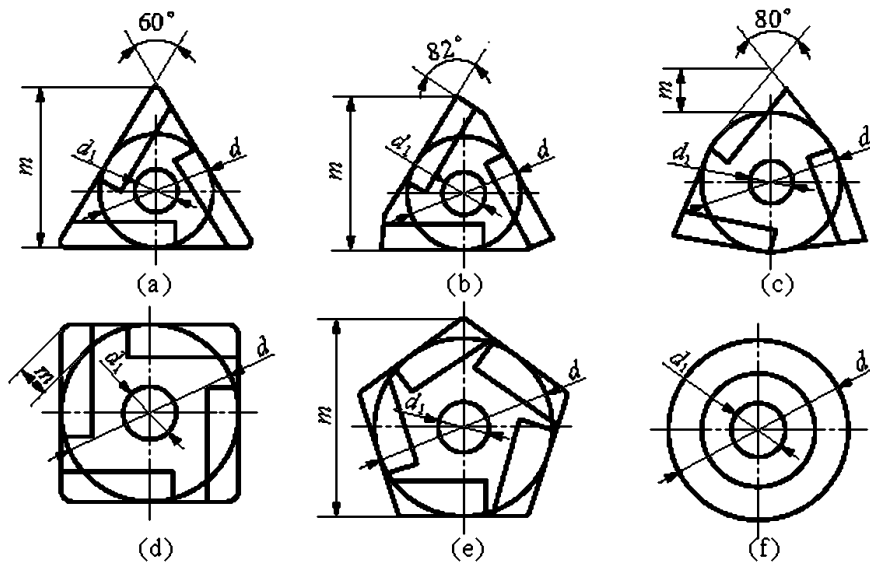


图 1.13 硬质合金可转位刀片

1.2.2 孔加工刀具

在金属切削加工中,孔加工刀具是在实心材料上钻孔、扩张或修整已有孔的刀具,是应用十分广泛的刀具之一。其种类很多,按其用途可分为两大类:一类是在实心材料上加工出孔的刀具,如麻花钻、中心钻和深孔钻等;另一类是对工件上已有孔进行再加工的刀具,如扩孔钻、铰钻、铰刀和镗刀等。

1. 麻花钻

麻花钻是应用最广泛的孔加工刀具,特别适合于 $\phi 30\text{mm}$ 以下的孔的粗加工,有时也可用于扩孔。麻花钻直径规格为 $\phi 0.1 \sim \phi 80\text{mm}$ 。用高速钢麻花钻加工的孔精度可达 IT11~IT13,表面粗糙度 R_a 可达 $25 \sim 6.3\mu\text{m}$;用硬质合金钻头加工时则分别可达 IT10~IT11 和 $R_a 12.5 \sim 3.2\mu\text{m}$ 。标准高速钢麻花钻的结构如图 1.14(a)所示,由柄部、颈部和工作部分 3 部分组成。

(1) 柄部。柄部是钻头的夹持部分,并用来传递扭矩;钻头柄部有直柄与锥柄两种,前者用于小直径($d_0 \leq 12\text{mm}$)钻头,后者用于大直径($d_0 > 12\text{mm}$)钻头。

(2) 颈部。供制造时磨削柄部退砂轮用,也是钻头打标记的地方,小直径的直柄钻头没有颈部。

(3) 工作部分。工作部分包括切削部分和导向部分,切削部分担负着主要切削工作,钻头有两条主切削刃、两条副切削刃和一条横刃,如图 1.14(b)、(c)所示;螺旋槽表面为钻头的前刀面,切削部分顶端的锥曲面为后刀面;刃带为副后刀面;横刃是两主后刀面的交线。导向部分有两条对称的螺旋槽和刃带,螺旋槽用来形成切削刃和前角,并起排屑和输送切削冷却液作用;刃带起导向和修光孔壁的作用;刃带有很小的倒锥,由切削部分向柄部每 100mm 长度上直径减小 $0.03 \sim 0.12\text{mm}$,以减小钻头与孔壁的摩擦。

麻花钻的主要几何参数有螺旋角 β 、顶角 2ϕ (主偏角 $\kappa_r \approx \phi$)、前角 γ_o 、后角 α_o 、横刃长度 b_ψ 、横刃斜角 ψ 等。

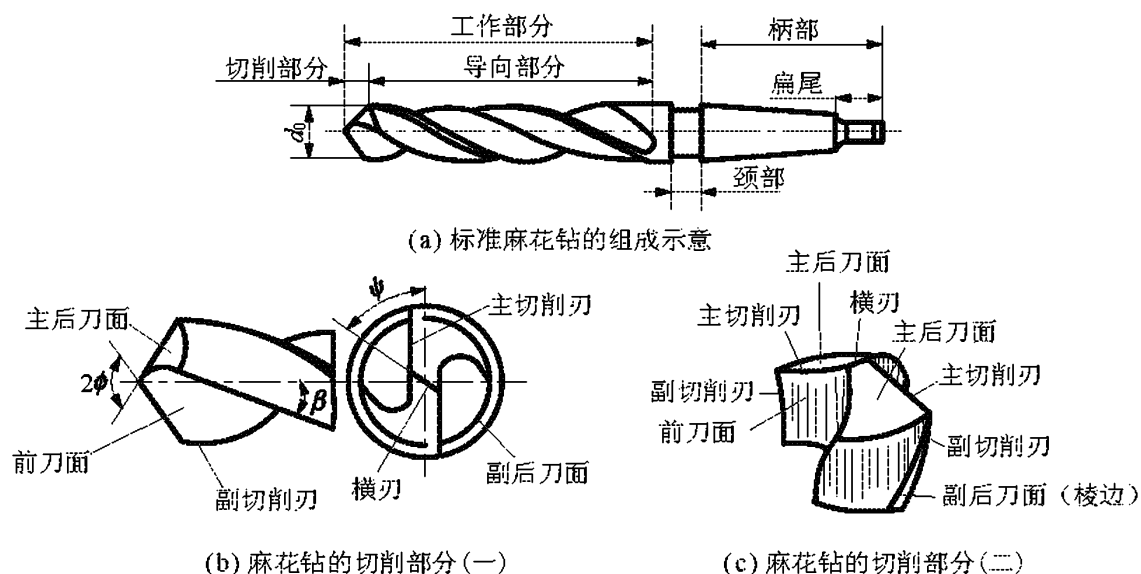


图 1.14 标准麻花钻的结构

(1) 螺旋角 β 。钻头的外缘表面与螺旋槽的交线为螺旋线,该外缘螺旋线展开成直线后与钻头轴线的夹角为钻头的螺旋角,用 β 表示钻头。设螺旋槽导程为 P_h ,钻头外圆直径为 d_0 ,则 $\tan\beta = \pi d_0 / P_h$ 。

由于螺旋槽上各点的导程相同,因而麻花钻主切削刃上不同半径处的螺旋角不同,即从外缘到钻心逐渐减小。螺旋角 β 实际上是钻头的进给前角。因此,螺旋角越大,钻头的进给前角越大,钻头越锋利,也有利于排屑。但是螺旋角过大,会削弱钻头的强度和散热条件,使钻头的磨损加剧。标准高速钢麻花钻的螺旋角 $\beta = 18^\circ \sim 30^\circ$ 。对于小直径的钻头,螺旋角应取较小值,以保证钻头的刚度。

(2) 顶角 2ϕ 与主偏角 κ_r 。钻头的顶角为两主切削刃在与其平行的平面上的投影之间的夹角,标准麻花钻的顶角 2ϕ 一般为 118° 。

主偏角 κ_r 是主切削刃在基面内的投影与进给方向之间的夹角。钻头的顶角 2ϕ 直接决定了主偏角 κ_r 的大小,且顶角的半角在数值上与主偏角 κ_r 很接近,因此一般用顶角代替主偏角来分析问题。顶角减小,切削刃长度增加,单位切削刃长度上负荷降低,散热条件改善,钻头的耐用度提高,轴向力减小。但切屑变薄,切屑平均变形增加,扭矩增大。

(3) 横刃斜角 ψ 。横刃是两个主后刀面的交线,如图 1.14(b) 所示,在端面投影上,横刃与主切削刃之间的夹角为横刃斜角 ψ ,它是刃磨后刀面时形成的。标准高速钢麻花钻的横刃斜角 $\psi = 50^\circ \sim 55^\circ$ 。

由于标准麻花钻在结构上存在着许多问题,如前角变化太大,从外缘处的 $+30^\circ$ 到钻芯处减至 -30° ,横刃前角约为 -60° ;副后角为零,加剧了钻头与孔壁间的摩擦;主切削刃长,切屑较宽,排屑困难;横刃长,定心困难,轴向力大,切削条件很差等。因此在使用时经常要进行修磨,以改变标准麻花钻切削部分的几何形状,提高钻头的切削性能。主要修磨方法有:将横刃磨短并增大横刃前角;将钻头磨成双重顶角;将两条主切削刃磨成圆弧刃或增开分屑槽等。

2. 扩孔钻

扩孔钻是对工件已有孔进行再加工,以扩大孔径和提高加工质量的加工工具。扩孔钻的刀齿一般有 3~4 个,故导向性好,切削平稳;由于扩孔余量较小,容屑槽较浅,刀体强度和刚性较好;扩孔钻没有横刃,改善了切削条件。因此,大大提高了切削效率和加工质量。一般加工精度可达 IT10~IT11,表面粗糙度 R_a 可达 $6.3 \sim 3.2 \mu\text{m}$ 。

扩孔钻的主要类型有高速钢整体式[图 1.15(a)]、镶齿套式[图 1.15(b)]及硬质合金可转位式[图 1.15(c)]等。整体式扩孔钻的扩孔范围为 $\phi 10 \sim \phi 32\text{mm}$;套式扩孔钻的扩孔范围为中 $\phi 25 \sim \phi 80\text{mm}$ 。

3. 铤钻

铤钻用于在孔的端面上加工各种沉头孔或凸台表面,如图 1.16 所示。图 1.16(a) 为铤圆柱形沉头孔;图 1.16(b) 为铤圆锥形沉头孔(锥角有 60° 、 90° 、 120° 3 种);图 1.16(c) 为铤孔端面的凸台平面。铤钻上的定位导柱,是用来保证被铤孔或端面与原来孔的同轴度或垂直度。导柱可以拆卸,以便于刀具的制造和刃磨。根据铤钻直径的大小,可做成带柄铤钻或套式铤钻,既可用高速钢制造,也可镶焊硬质合金刀片。其中以硬质合金铤钻应用较广。

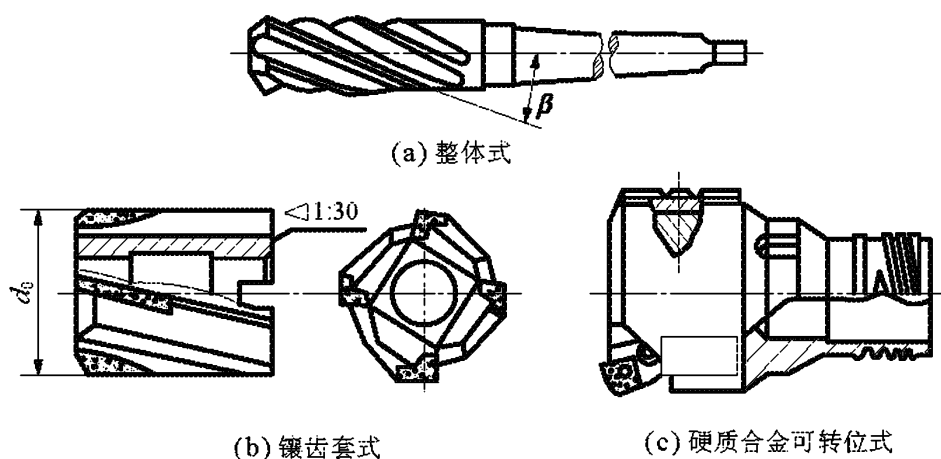


图 1.15 扩孔钻

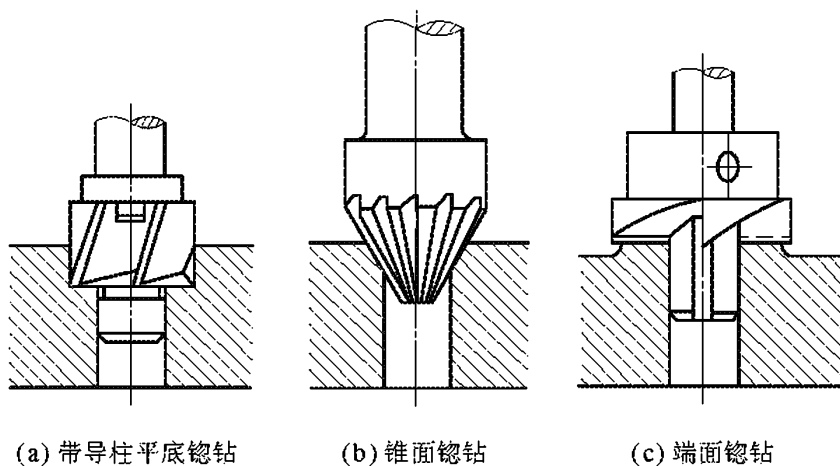


图 1.16 铰钻的类型

4. 铰刀

铰刀是孔的精加工刀具,也可用于高精度孔的半精加工。由于加工余量小,齿数多,加工精度可达 IT6~IT8,表面粗糙度 R_a 可达 $1.6\sim 0.2\mu\text{m}$ 。

根据使用方式,铰刀一般分为手用铰刀和机用铰刀两种。图 1.17 所示是几种常见的铰刀。机用铰刀可分为带柄的和套式的,一般加工直径为 $\phi 1\sim\phi 20\text{mm}$ 的用直柄,加工直径为 $\phi 10\sim\phi 32\text{mm}$ 的用锥柄。手用铰刀柄部为直柄,工作部分较长,导向作用较好。手用铰刀的加工直径范围一般为 $\phi 1\sim\phi 50\text{mm}$ 。铰刀形式有直槽式和螺旋槽式两种。根据加工类型铰刀可分为圆形铰刀和锥度铰刀。

铰刀的结构由工作部分、颈部及柄部组成,如图 1.18 所示。工作部分包括切削部分与校准(修光)部分。切削部分呈锥形,担负主要的切削工作,修光部分用于校准孔径、修光孔壁和导向。对于手用铰刀,为增加导向作用,校准部分应做得长些;对于机用铰刀,为减少摩擦,校准部分应做得短些。为减小修光部分与已加工孔壁的摩擦,并防止孔径扩大,修光部分的后端应加工成倒锥形状。

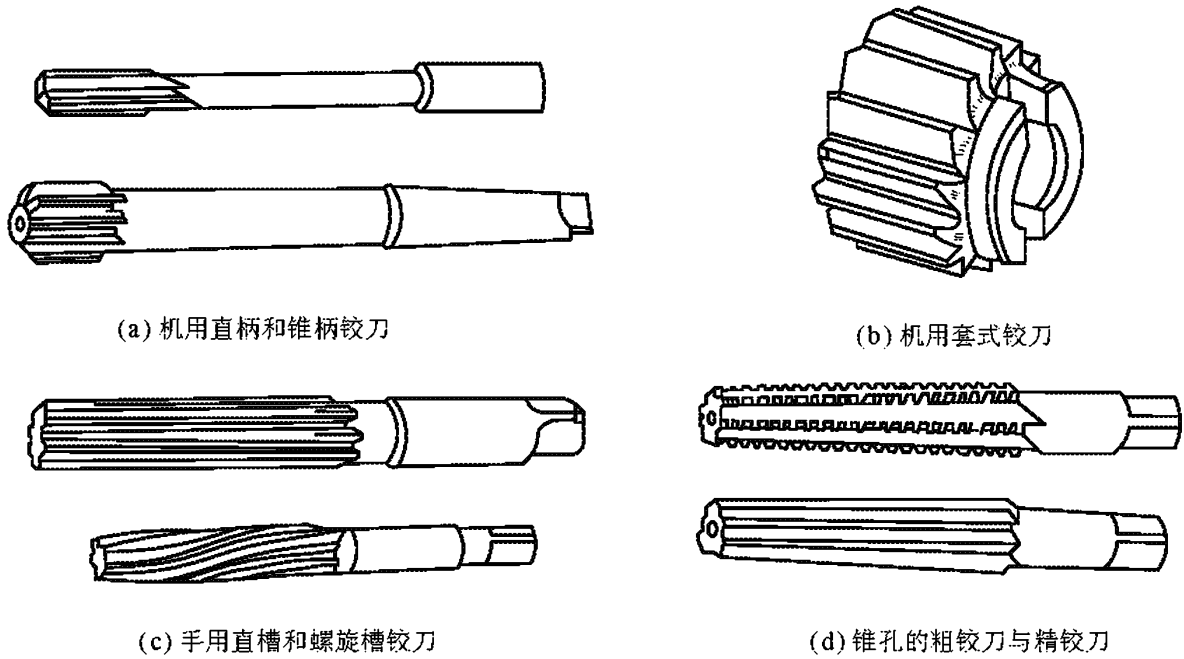


图 1.17 铰刀

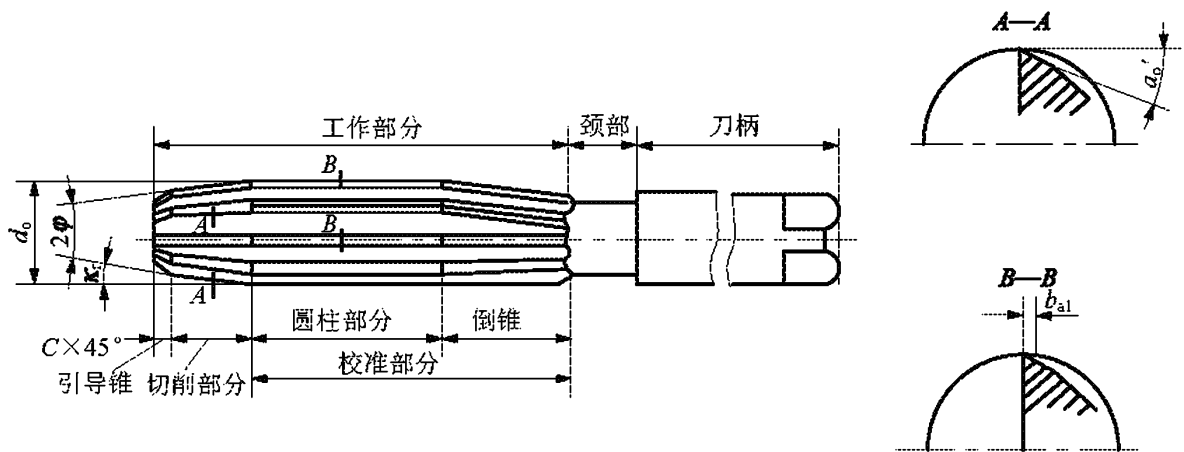


图 1.18 铰刀的结构

5. 镗刀

镗刀是一种很常见的扩孔用刀具,在许多机床上都可以用镗刀镗孔,如车床、铣床、镗床以及组合机床等。镗孔的加工精度可达 IT6~IT8,表面粗糙度 R_a 可达 $6.3 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 。常用于较大直径的孔的粗加工、半精加工和精加工,特别是对于大直径的孔,镗刀几乎是唯一的

刀具。镗刀的种类很多,一般可分为单刃镗刀与多刃镗刀两大类。

(1) 单刃镗刀。单刃镗刀如图 1.19 所示,结构与车刀类似,只有一个主切削刃,结构简单,制造容易,通用性好,但刚性差。单刃镗刀一般均有尺寸调节装置。在精镗机床上常采用微调镗刀以提高调整精度,如图 1.20 所示。

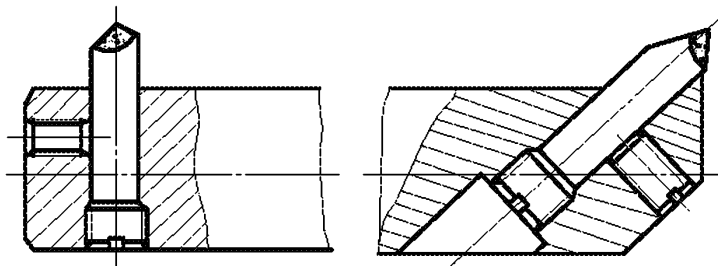


图 1.19 单刃镗刀

(2) 双刃镗刀。如图 1.21 所示,双刃镗刀两边都有切削刃,工作时可以消除径向力对镗杆的影响,工件的孔径尺寸与精度由镗刀径向尺寸保证。镗刀上的两个刀片径向可以调整,因此,可以加工一定尺寸范围的孔。双刃镗刀多采用浮动连接结构,镗刀片插在镗杆的槽中,依靠作用在两个切削刃上的径向力自动平衡其位置,刀片不紧固在刀杆上,可以浮动并自动定心,可消除因镗刀安装误差或镗杆偏摆引起的加工误差。但这种镗刀不能校正孔的直线度误差和孔的位置偏差。双刃浮动镗应在单刃镗之后进行。

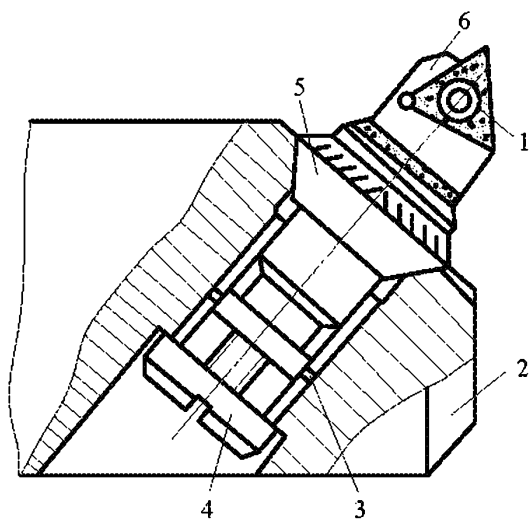


图 1.20 微调镗刀

- 1 刀片;2 镗杆;3 导向键;
4 紧固螺钉;5 精调螺母;6 刀块

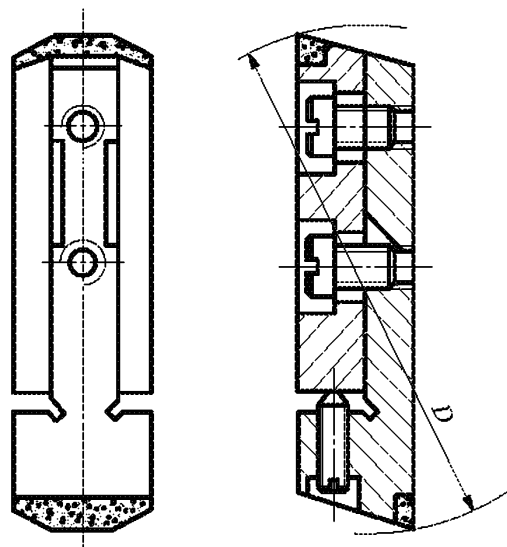


图 1.21 双刃镗刀

1.2.3 铣刀

铣刀是一种应用广泛的多齿旋转刀具。按用途可分为加工平面用铣刀(如圆柱铣刀、面铣刀)、加工沟槽用铣刀(如立铣刀、两面刃或三面刃铣刀、锯片铣刀、键槽铣刀等)、加工成形面用铣刀(如成形铣刀、指状铣刀、模具铣刀等)等 3 大类。

1. 圆柱铣刀

圆柱铣刀如图 1.22 所示,主要用于卧式铣床上加工宽度小于铣刀长度的狭长平面。它一般都是用高速钢制成整体的,如图 1.22(a)所示,螺旋形切削刃分布在圆柱表面上,没有副切削刃,螺旋形的刀齿切削时是逐渐切入和脱离工件的,所以切削过程较平稳。铣刀外径较大时,常制成镶齿的,如图 1.22(b)所示。

根据加工要求不同,圆柱铣刀有粗齿、细齿之分,粗齿的容屑槽大,用于粗加工,细齿用于精加工。

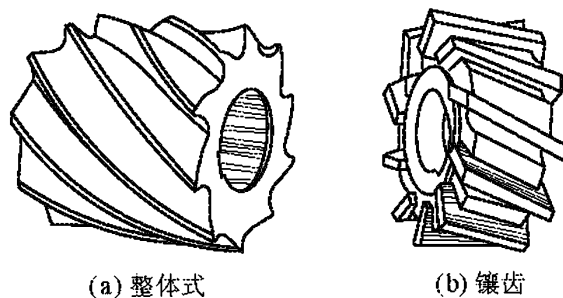


图 1.22 圆柱铣刀

2. 面铣刀

面铣刀又称端铣刀,如图 1.23 所示。主切削刃分布在圆柱或圆锥表面上,端面切削刃

为副切削刃,铣刀的轴线垂直于被加工表面。按刀齿材料可分为高速钢和硬质合金两大类,多制成套式镶齿结构。主要用在立式铣床或卧式铣床上加工台阶面和平面,特别适合较大平面的加工。用面铣刀加工平面,同时参加切削的刀齿较多,又有副切削刃的修光作用,使加工表面粗糙度值小,因此可以用较大的切削用量,生产率较高,应用广泛。

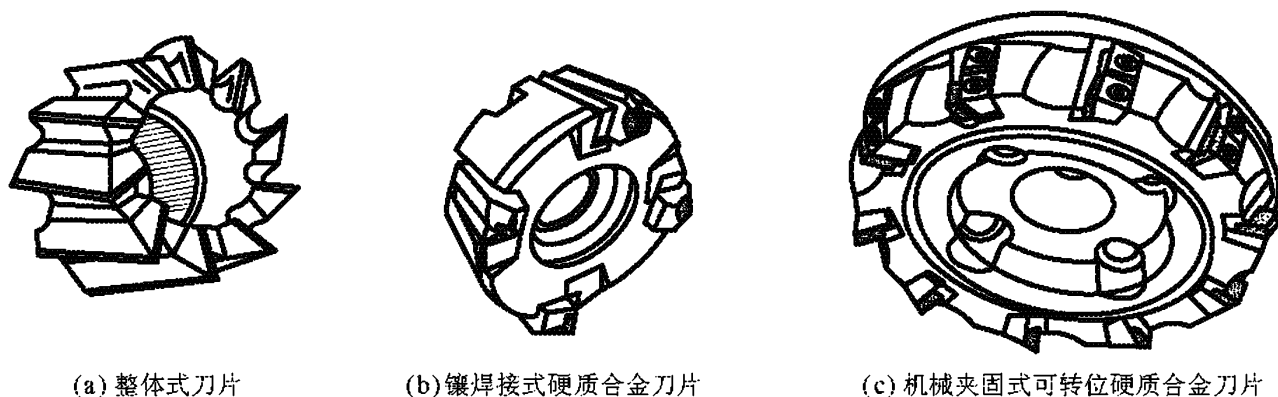


图 1.23 面铣刀

3. 立铣刀

立铣刀如图 1.24 所示,一般由 3~4 个刀齿组成,圆柱面上的切削刃是主切削刃,端面上分布着副切削刃,工作时不宜能沿铣刀轴线方向作进给运动。它主要用于加工平面、凹槽、台阶面等。

4. 键槽铣刀

键槽铣刀如图 1.25 所示。它的外形与立铣刀和钻头相似,在圆周上有两个螺旋刀齿,其端面刀齿的刀刃延伸至中心,因此可以用轴向进给对毛坯钻孔,然后沿键槽方向运动铣出键槽全长。

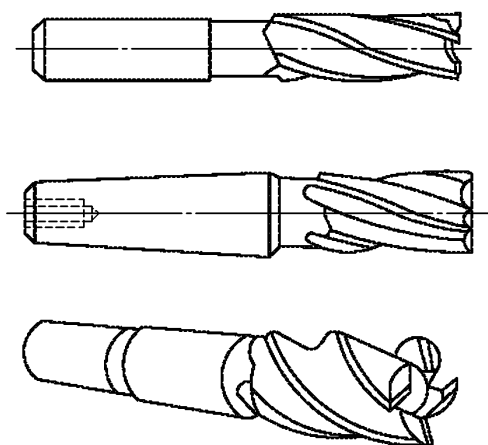


图 1.24 立铣刀



图 1.25 键槽铣刀

5. 盘铣刀

盘铣刀又称三面刃铣刀,从制造方式上,可以用高速钢制造,如图 12.6(a)、(b)所示,也可以镶焊硬质合金刀片制成,如图 12.6(c)所示。它主要用在卧式铣床上加工台阶面和一端或两端贯穿的浅沟槽。三面刃铣刀除圆周具有主切削刃外,两侧面也有副切削刃对加工侧面起修光作用,从而改善了切削条件,提高了切削效率,减小了表面粗糙度值。

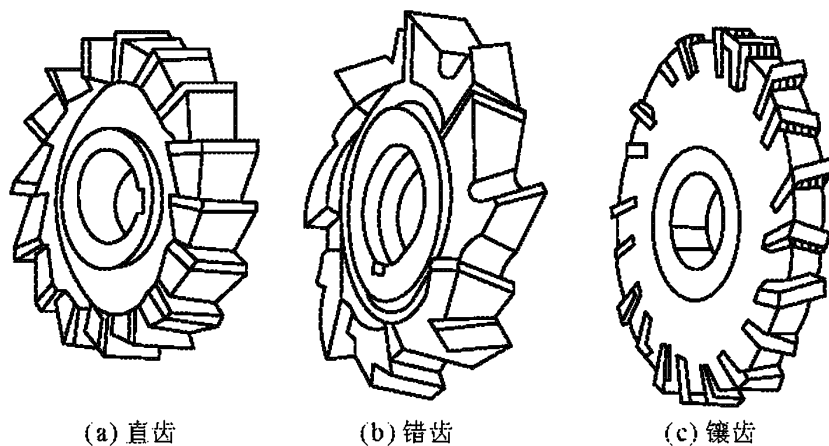


图 1.26 三面刃铣刀

6. 其他铣刀

除了上面介绍的铣刀外,还有成形铣刀、模具铣刀、锯片铣刀、T形槽铣刀、燕尾槽铣刀、仿形铣用的指形铣刀、角度铣刀等,如图 1.27 所示。

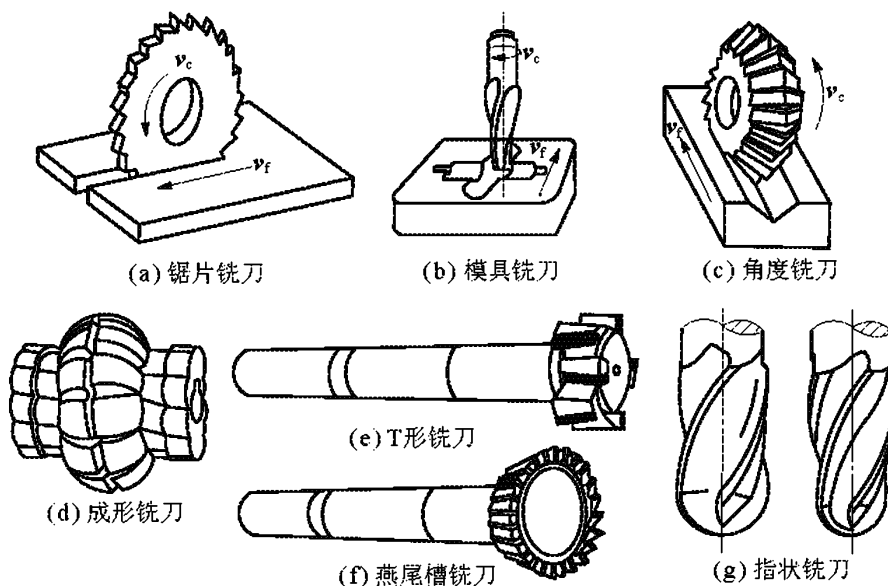


图 1.27 其他铣刀

1.2.4 拉刀

拉刀是一种加工精度和切削效率都比较高多齿刀具。加工精度可达 IT7~IT9,表面粗糙度 R_a 可达 $3.2 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 。

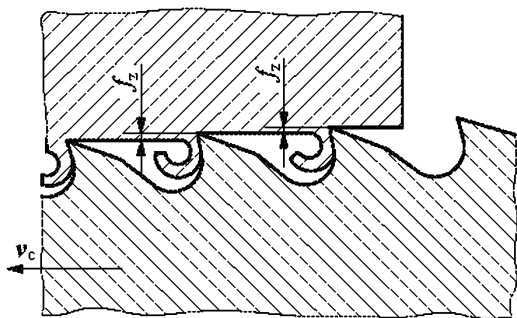


图 1.28 拉削过程

拉削时,拉刀做等速直线运动,由于后一个(或一组)刀齿高出前一个(或一组)刀齿,从而能够一层层地从工件上切去金属,以获得所要求的工件表面,拉削过程如图 1.28 所示。拉刀可以用来加工各种截面形状的通孔、直线或曲线的外表面。拉刀构造比较复杂,制造成本高,因此一般多用于大批量生产。

拉刀的类型按拉刀所加工表面的不同,可分为内拉刀和外拉刀两类。内拉刀用于加工各种形状的内表面,常见的有圆孔拉刀、花键拉刀、方孔拉刀和键槽拉刀等;外拉刀用于加工各种形状的外表面。在生产中,内拉刀比外拉刀应用更普遍。按拉刀工作时受力方向的不同,可分为拉刀和推刀。前者受拉力,后者受压力。

下面以圆孔拉刀为例,介绍拉刀的组成。如图 1.29 所示,拉刀主要由以下几个部分组成。

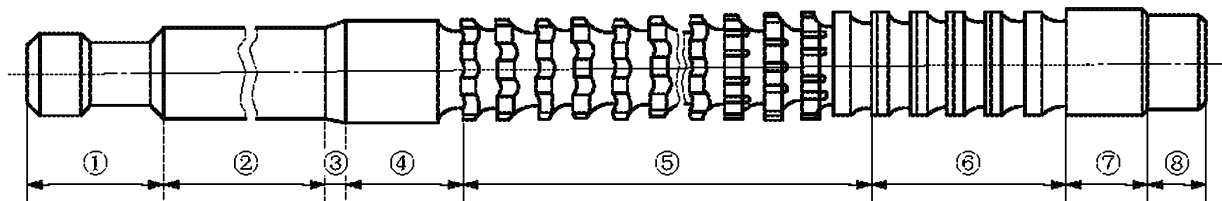


图 1.29 圆孔拉刀的组成

- ① 前柄部;② 颈部;③ 过渡锥;④ 前导部;⑤ 切削部;⑥ 校准部;⑦ 后导部;⑧ 后柄部

(1) 前柄部。它是拉刀的夹持部分,用以传递动力。

(2) 颈部。它是拉刀前柄部和过渡锥的连接部分,拉刀的规格等标记一般都打在颈部上。

(3) 过渡锥。它是引导拉刀前导部进入工件预加工孔的锥度部分,起对准中心的作用。

(4) 前导部。它是引导拉刀切削齿正确地进入工件待加工表面的部分,并可检查拉前孔径是否太小,以免拉刀第 1 个刀齿负荷太重而损坏。

(5) 切削部。它担负切削工作,切除工件上的全部加工余量,它是由粗切齿、过渡齿和精切齿组成,各齿直径依次递增。

(6) 校准部。它具有几个尺寸形状相同的齿,起校准作用,可以提高工件加工精度和表面质量,也作为精切齿的储备齿。

(7) 后导部。它是保证拉刀最后刀齿正确地离开工件的导向部分,以防止拉刀在即将离开工件时,工件下垂而损坏已加工表面和拉刀刀齿。

(8) 后柄部。它当拉刀长而重时,拉床的托架或夹头支撑在后柄部上,防止拉刀下垂而影响加工质量,并减轻了装卸拉刀的劳动强度。

1.2.5 螺纹刀具

螺纹的应用很广,加工各种螺纹用的螺纹刀具种类也很多。按加工方法可分为外螺纹刀具和内螺纹刀具,前者有螺纹车刀、螺纹梳刀、圆板牙、螺纹铣刀、螺纹切头等;后者有内螺纹车刀、丝锥、螺纹滚压工具等。

1. 螺纹车刀

螺纹车刀是一种廓形简单的成形车刀,可用于加工各种内、外螺纹。螺纹车刀结构简单、成本低、加工精度较高,可用于切削精密丝杆等。它的加工尺寸范围较广,加工大尺寸螺纹几乎不受什么限制,通用性好;但生产率较低,常应用于中、小批量及单件螺纹的加工。

2. 丝锥

丝锥是加工各种内螺纹的标准刀具之一,它本质上是一带有纵向容屑槽的螺栓,工作部分由切削锥与校准部分组成,其结构简单、使用方便,在中、小尺寸的螺纹加工中应用极为广泛,生产率较高。

丝锥的种类很多,按不同用途和结构可分为手用丝锥、机用丝锥、螺母丝锥、锥形螺纹丝锥、梯形螺纹丝锥等,如图 1.30 所示,工作部分由切削锥与校准部分组成。手用丝锥用手操作,常用于单件小批量生产和修配工作。机用丝锥因其切削速度较高,一般用于成批大量生产中。

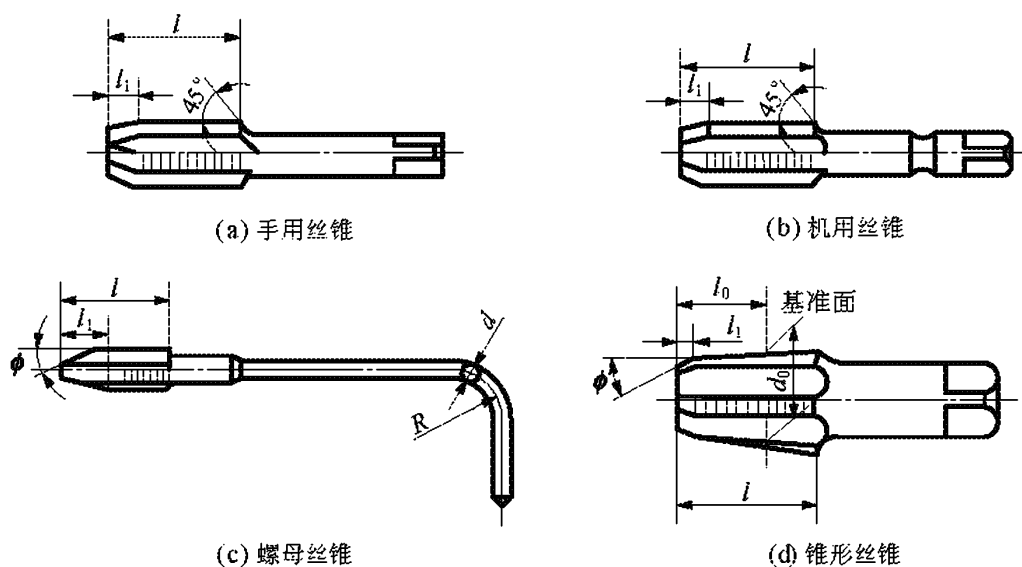


图 1.30 常用的几种丝锥

l_1 切削部分; l_0 校准部分; l 工作部分

3. 板牙

板牙实质上是具有切削角度的螺母,是加工与修整外螺纹的标准刀具,沿轴向钻有 3~8 个排屑孔以形成切削刃,并在两端做有切削锥部。圆板牙的螺纹廓形是内表面,难以磨削,影响被加工螺纹的质量,因而它仅能用来加工精度和表面质量要求不高的螺纹。如图 1.31 所示,板牙两端面上都磨出切削锥角 2ϕ ,齿顶经铲磨形成后角,中间部分为校准齿。圆板牙使用时,是靠它外圆周上的紧固孔用螺钉将它紧固在板牙套中。当板牙的校准部分磨损超差后,切开 60° 缺口槽,拧紧外圆周上的调节螺钉,则可迫使板牙孔径收缩。

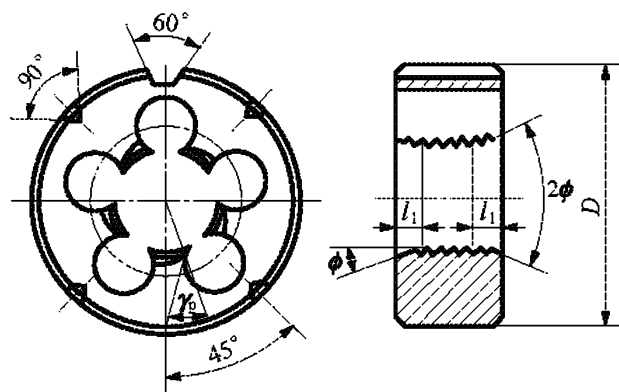


图 1.31 圆板牙

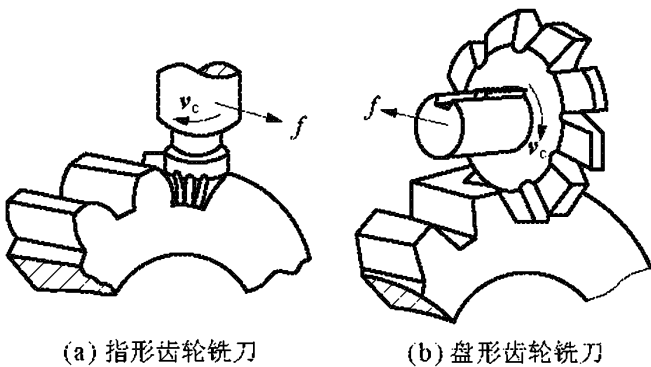
1.2.6 齿轮加工刀具

齿轮刀具是用来加工齿轮齿形的刀具。

为满足各种齿轮加工需要,齿轮刀具种类很多,结构复杂,其生产批量、质量要求和加工方法各不相同,所以齿轮刀具加工方法各不相同,所以种类很多。

按照齿轮齿形的形成原理,齿轮刀具可分为成形法齿轮刀具和展成法齿轮刀具两大类。

1. 成形法齿轮刀具



(a) 指形齿轮铣刀

(b) 盘形齿轮铣刀

图 1.32 成形法齿轮铣刀

成形法齿轮刀具的齿形与被加工齿轮的齿形形状相同。常用的成形齿轮刀具主要有指形齿轮铣刀和盘形齿轮铣刀。

指形齿轮铣刀如图 1.32(a)所示,它是成形立铣刀。切齿过程中工件沿齿向作进给运动,铣完一个齿后,用分度头分度铣第二个齿。这种铣刀适合加工人字齿轮及加工大模数的直齿、斜齿轮。由于刀齿负荷大,进给量小,齿形精度也不高,因而加工效率和精度都较低。

盘形齿轮铣刀如图 1.32(b)所示,可用于加工直齿或斜齿轮。切齿过程中刀具旋转,沿齿槽方向进给,铣完一个齿槽后需分度。由于这种方法的加工精度和生产率都很低,故盘形齿轮铣刀多用于机修工作中低精度配件的加工或单件小批量生产。关于成形齿轮刀具,除上述两种外,还有用于大批量生产的专用成形齿轮拉刀,成形齿轮切割刀盘等。

2. 展成法齿轮刀具

展成法齿轮刀具利用齿轮的啮合原理来加工齿轮。切齿时,刀具就相当于一个齿轮,它与被加工齿轮作无侧隙啮合,工件齿形是由刀具齿形运动轨迹包络而成的。同一把刀具可加工模数、压力角相同而齿数不同的齿轮。其加工精度和生产效率都较高,广泛地应用于成批和大量生产中。常用的展成法齿轮刀具有齿轮滚刀、插齿刀、剃齿刀等。

(1) 齿轮滚刀。图 1.33 所示为齿轮滚刀,它可加工外啮合的直齿、斜齿圆柱齿轮,生产率较高,应用最广泛,加工范围大,可加工模数为 0.1~40 之间的齿轮,精度一般为 IT7~IT9,同一把滚刀可以加工模数相同、齿数不同的齿轮。为了使滚刀能切出正确的齿形,滚刀切削刃应当分布在蜗杆的同一螺旋表面上,这个蜗杆称为滚刀的基本蜗杆。滚刀的基本蜗杆有渐开线、阿基米

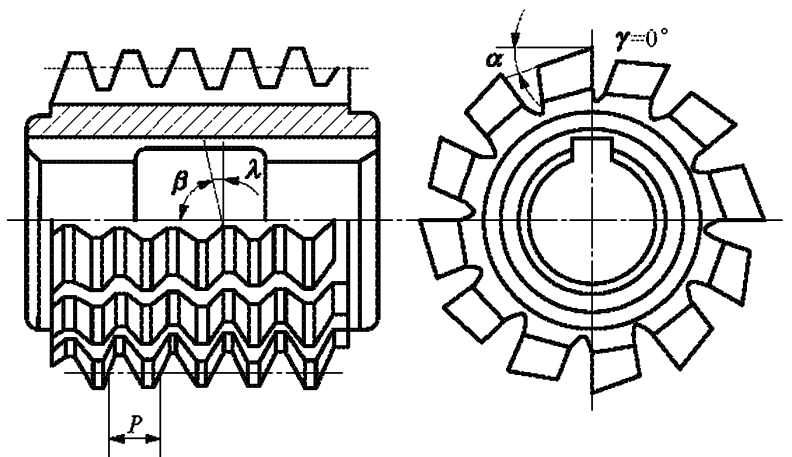


图 1.33 整体式齿轮滚刀图

得和法向直廓 3 种。理论上,加工渐开线齿轮应用渐开线蜗杆,但其制造困难;而阿基米得蜗杆轴向剖面的齿形为直线,易于制造,生产中常用阿基米得蜗杆代替渐开线蜗杆。

(2) 插齿刀。插齿刀可加工直齿轮、内齿轮、多联齿轮、人字齿轮和齿条等。按其结构特点,标准直齿插齿刀可分为盘形、碗形和带锥柄形 3 种类型,如图 1.34 所示。盘形插齿刀主要用于加工直齿外齿轮及大模数的内齿轮;碗形插齿刀主要用于加工多联齿轮和带凸肩的齿轮;锥柄插齿刀主要用于加工内齿轮。

(3) 剃齿刀。剃齿刀用于未淬硬的直齿、斜齿圆柱齿轮的精加工。剃齿刀结构如图 1.35 所示。剃齿刀的螺旋角有 15° 、 10° 、 5° 这三种。 15° 的多用于加工直齿圆柱齿轮, 5° 的多用于加工斜齿轮和多联齿轮中的小齿轮。剃削齿轮前,需用专用的剃前滚刀或剃前插齿刀来加工齿形并留有剃削余量。剃齿刀生产率高、寿命长,但价格贵,在成批大量生产中使用较多。

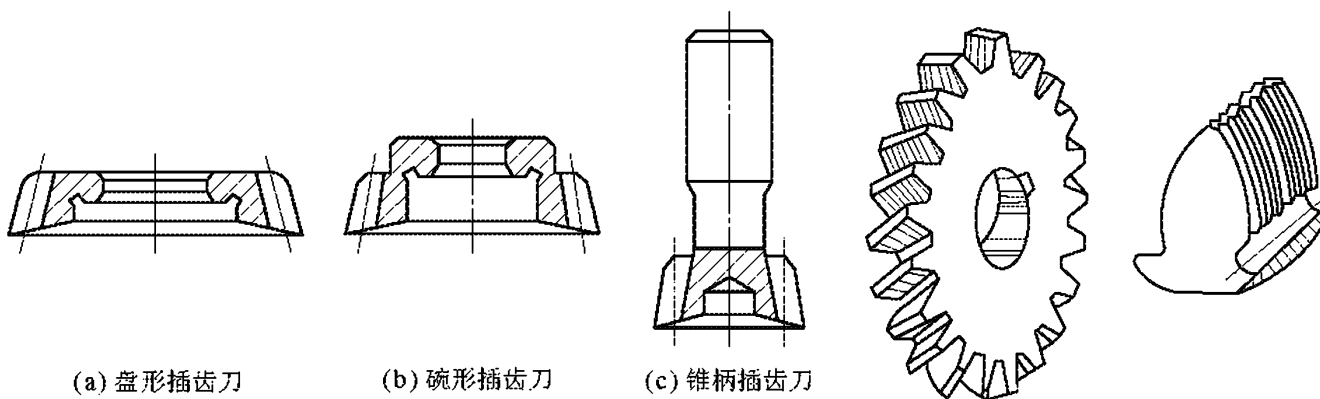


图 1.34 插齿刀

图 1.35 剃齿刀

1.3 金属切削过程及其物理现象

金属切削过程就是刀具与工件相互作用形成切屑的过程。在这个过程中将产生许多物理现象,如切削力、切削热、刀具磨损、积屑瘤等。因此,有必要对金属切削过程和物理现象加以研究,以探索和掌握其基本规律。这对合理设计和使用刀具,提高加工质量、生产效率以及降低生产成本等方面有着重要的意义。

1.3.1 切屑的形成过程及变形区的划分

大量的实验和理论分析证明,塑性金属切削过程是切削层金属在刀具前刀面的挤压下,发生以剪切滑移为主的塑性变形而形成切屑的过程。这非常类似于材料力学实验中试件被压缩破坏的情况。图 1.36 所示是用显微镜直接观察低速直角自由切削工件侧面得到的切削层的金属变形情况,根据该图可绘制出如图 1.37 所示的金属切削过程中的滑移线和流线示意图。流线表示被切削金属的某一点在切削过程中流动的轨迹,由图 1.37 可见,它可大致被划分为 3 个变形区。

(1) 第 I 变形区。从 OA 线开始发生塑性变形,到 OM 线晶粒的剪切滑移基本完成。

(2) 第 II 变形区。切屑沿前刀面排出时进一步受到前刀面的挤压和摩擦,使靠近前刀面处金属纤维化,基本上和前刀面相平行。这部分称为第 II 变形区。

(3) 第 III 变形区。已加工表面受到切削刃钝圆部分与后刀面的挤压和摩擦,产生变形与

回弹,造成纤维化和加工硬化。这一部分的变形也是比较密集的,称为第Ⅲ变形区。

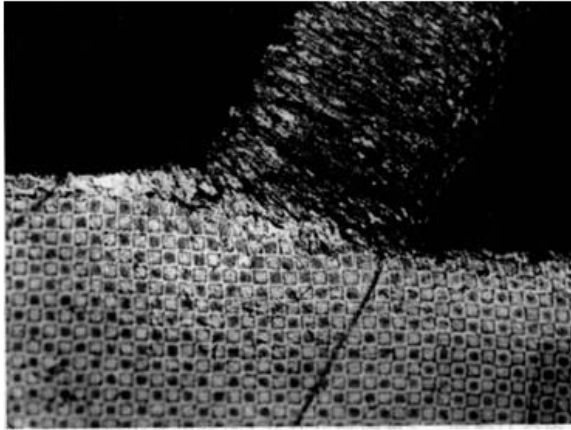


图 1.36 金属切削层变形图像
工件材料:Q235A $v = 0.01\text{m/min}$,
 $a_p = 0.15\text{mm}$, $\gamma_o = 30^\circ$

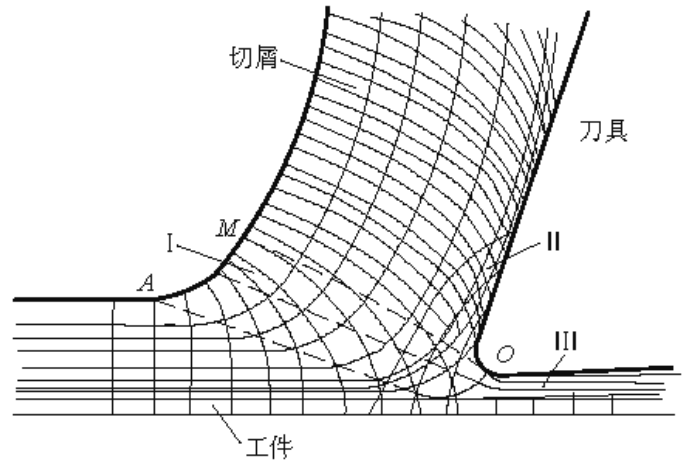


图 1.37 金属切削过程中的滑移线和流线示意图

这三个变形区汇集在切削刃附近,此处的应力比较集中而复杂,金属的被切削层就在此处与工件本体分离,大部分变成切屑,很小一部分留在已加工表面上。

图 1.37 中的虚线 OA 、 OM 实际上就是等切应力曲线。如图 1.38 中所示,当切削层中金属某点 P 向切削刃逼近,到达点 1 的位置时,此时其切应力达到材料的屈服点 τ_s ,点 1 在向前移动的同时,也沿 OA 滑移,其合成运动将使点 1 流动到点 2。2' 2 就是它的滑移量。随着滑移的产生,切应力将逐渐增加,也就是当 P 点向 1,2,3...各点流动时,它的切应力不断增加,直到点 4 位置,其流动方向与前刀面平行,不再沿 OM 线滑移。所以 OM 叫终滑移线, OA 叫始滑移线。在 OA 到 OM 之间整个第 I 变形区,其变形的主要特征就是沿滑移线的剪切变形,以及随之产生的加工硬化。在切削速度较高时,这一变形区较窄。

沿滑移线的剪切变形,从金属晶体结构的角度来看,就是沿晶格中晶面的滑移。当受到切应力时,晶粒伸长,其方向与滑移方向即剪切面方向是不重合的,它们成一夹角 ψ ,如图 1.39 所示。图 1.39 中第 I 变形区较宽,代表切削速度很低的情况。在一般的切削速度范围内,第 I 变形区的宽度仅约 $0.2 \sim 0.02\text{mm}$,所以可用一剪切面来表示。剪切面和切削速度方向的夹角叫做剪切角,以 ϕ 表示。

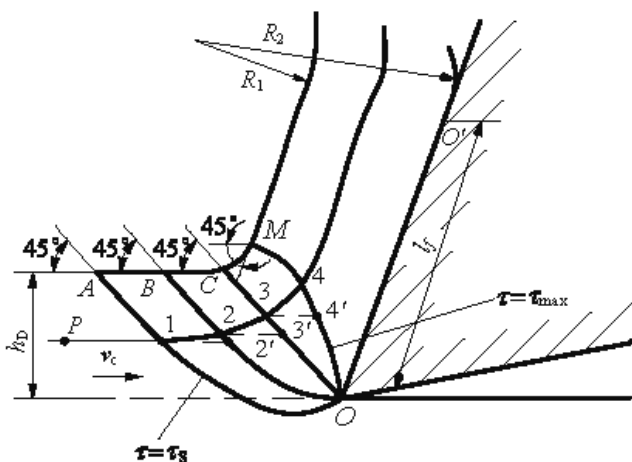


图 1.38 第 I 变形区金属的滑移

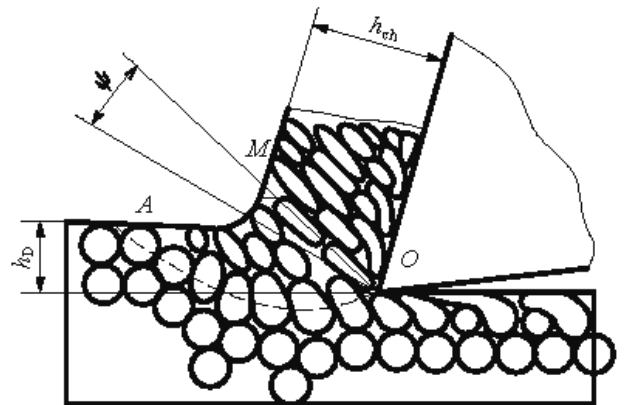


图 1.39 滑移与晶粒的伸长

根据上述的变形过程,可以把塑性金属的切削过程粗略地模拟为如图 1.40 的示意图。被切材料好比一叠卡片 1'、2'、3'、4'、…，当刀具切入时,这叠卡片受力被擦到 1、2、3、4、…等位置,卡片之间发生滑移,这滑移方向就是剪切面方向。

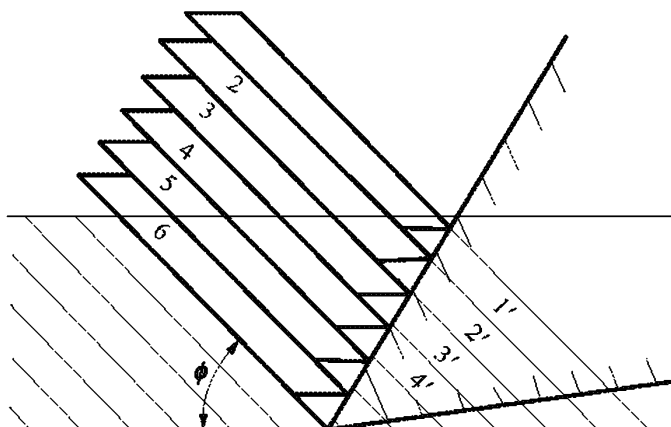


图 1.40 金属切削过程示意图

实验证明,剪切角 ϕ 大小和切削力的大小有直接关系。对于同一工件材料,用同样的刀具,切削同样大小的切削层,当切削速度高时, ϕ 角较大,剪切面积变小,切削比较省力,说明剪切角的大小可以作为衡量切削过程情况的一个标志。

1.3.2 切削变形程度

切削变形程度有 3 种不同的表示方法,分述如下。

1. 变形系数 Δ_h

在切削过程中,刀具切下的切屑厚度 h_{ch} 通常都大于工件切削层厚度 h_D ,而切屑长度 l_{ch} 却小于切削层长度 l_D ,如图 1.41 所示。切屑厚度 h_{ch} 与切削层厚度 h_D 之比称为厚度变形系数 Δ_{ha} ;而切削层长度 l_c 与切屑长度 l_{ch} 之比称为长度变形系数 Δ_{hl} 。由图 1.41 知:

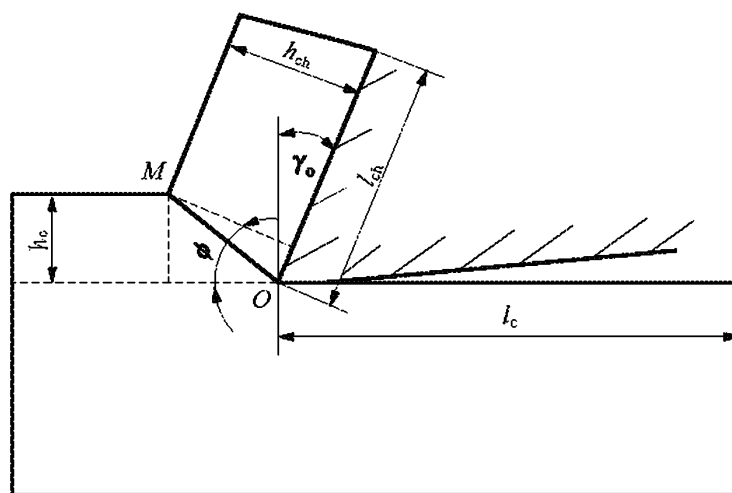


图 1.41 变形系数 Δ_h 的计算

厚度变形系数

$$\Delta_{ha} = \frac{h_{ch}}{h_D} = \frac{OM \sin(90^\circ - \phi + \gamma_o)}{OM \sin \phi} = \frac{\cos(\phi - \gamma_o)}{\sin \phi} \quad (1-14)$$

则

$$\phi = \frac{\pi}{4} - \beta + \gamma_0 \quad (1-16)$$

分析上式可知：

(1) 前角 γ_0 增大时, 剪切角 ϕ 随之增大, 变形减小。这表明增大刀具前角可减少切削变形, 对改善切削过程有利。

(2) 摩擦角 β 增大时, 剪切角 ϕ 随之减小, 变形增大。提高刀具刃磨质量、采用润滑性能好的切削液可以减小前刀面和切屑之间的摩擦系数, 有利于改善切削过程。

1.3.3 积屑瘤的形成及其对切削过程的影响

1. 积屑瘤的形成及原因

在切削速度不高而又能形成连续性切屑的情况下, 加工一般钢料等塑性材料时, 常在前刀面靠近刀尖处粘着一块剖面呈三角状的硬块, 这块粘附在前刀面上的金属硬块称为积屑瘤, 如图 1.43 所示。它的硬度很高, 通常是工件材料硬度的 2~3 倍, 在处于稳定状态时, 可以代替切削刃进行切削。积屑瘤的大小常用积屑瘤的高度 H_b 表示。

切削时, 切屑底层金属与前刀面接触处发生强烈摩擦, 当接触面达到一定温度, 同时又存在较高压力时, 被切材料会粘结(冷焊)在前刀面上。连续流动的切屑从粘在前刀面上的底层金属上流过时, 如果温度与压力适当, 切屑底部材料也会被阻滞在已经“冷焊”在前刀面上的金属层上, 粘成一体, 使粘结层逐步长大, 形成积屑瘤。

积屑瘤的产生及其成长与工件材料的性质、切削区的温度分布和压力分布有关。塑性材料的加工硬化倾向越强, 越易产生积屑瘤; 切削区的温度和压力很低时, 不会产生积屑瘤; 温度太高时, 由于材料变软, 也不易产生积屑瘤。对碳钢来说, 切削区温度处于 300~350℃ 时积屑瘤的高度最大, 切削区温度超过 500℃ 积屑瘤便自行消失。在背吃刀量 a_p 和进给量 f 保持一定时, 积屑瘤高度 H_b 与切削速度 v_c 有密切关系, 因为切削过程中产生的热是随切削速度的提高而增加的。在图 1.44 中, I 区为低速区, 不产生积屑瘤; II 区积屑瘤高度随 v_c 的增大而增高; III 区积屑瘤高度随 v_c 的增大而减小; IV 区不产生积屑瘤。

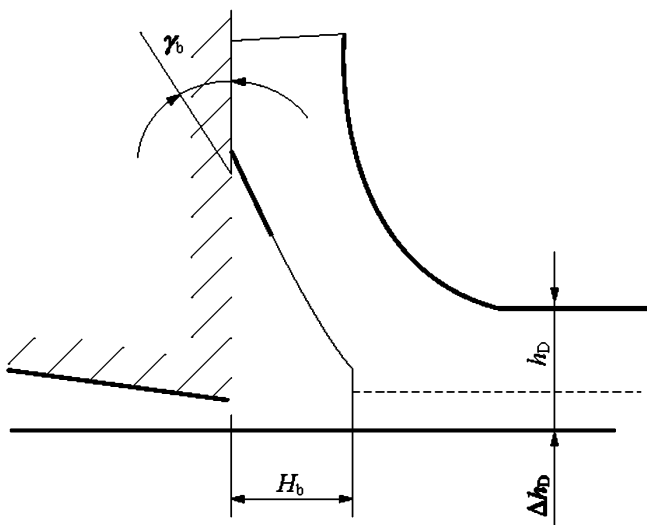


图 1.43 积屑瘤前角 γ_0 和伸出量 Δh_D

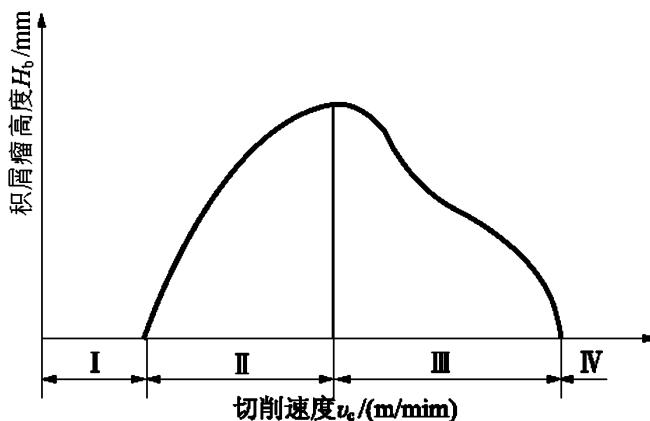


图 1.44 积屑瘤高度与切削速度的关系

2. 积屑瘤对切削过程的影响及其控制

(1) 使刀具前角变大。阻滞在前刀面上的积屑瘤有使刀具实际前角增大的作用(见图 1.43),使切削力减小。

(2) 使切削厚度变化。积屑瘤前端超过了切削刃,使切削厚度增大,其增量为 Δh_D 。 Δh_D 将随着积屑瘤的成长逐渐增大,一旦积屑瘤从前刀面上脱落或断裂, Δh_D 值就将迅速减小。由于积屑瘤的产生、成长与脱落是一个周期性过程,切削厚度变化必然导致切削力产生波动。

(3) 使加工表面粗糙度增大。积屑瘤伸出切削刃之外的部分高低不平,形状也不规则,会使加工表面粗糙度增大;破裂脱落的积屑瘤也有可能嵌入加工表面使加工表面质量下降。

(4) 对刀具寿命的影响。粘在前刀面上的积屑瘤,可以替代刀刃切削,有减小刀具磨损,提高刀具寿命的作用;但如果积屑瘤从刀具前刀面上频繁脱落,可能会把前刀面上刀具材料颗粒拽去(这种现象易发生在硬质合金刀具上),反而使刀具寿命下降。

3. 防止积屑瘤产生的措施

积屑瘤对切削过程的影响有积极的一面,也有消极的一面。粗加工时,对精度和表面粗糙度要求不高,积屑瘤可代替刀具进行切削。但精加工时,为了保证加工精度和表面质量,必须防止积屑瘤的产生,可采取的控制措施有:

- (1) 正确选择切削速度,使切削速度避开产生积屑瘤的中速区域。
- (2) 使用润滑性能好的切削液,目的在于减小切屑底层材料与刀具前刀面间的摩擦。
- (3) 增大刀具前角 γ ,减小刀具前刀面与切屑之间的压力。
- (4) 适当提高工件材料硬度,减小加工硬化倾向。

1.3.4 切屑的类型及控制

1. 切屑的类型及其分类

由于工件材料不同,切削过程中的变形程度也就不同,因而产生的切屑种类也就多种多样。切屑的形状一般分为带状切屑、挤裂切屑、单元切屑和崩碎切屑 4 种类型,如图 1.45 所示。

(1) 带状切屑。这是最常见的一种切屑,如图 1.45(a)所示。它的内表面是光滑的,外表面呈毛茸状。加工塑性金属材料,当切削厚度较小、切削速度较高、刀具前角较大时,一般常形成这类切屑。

(2) 挤裂切屑。如图 1.45(b)所示,这类切屑外表面呈锯齿状,内表面有时有裂纹。挤裂切屑大多在切削速度较低、切削厚度较大、刀具前角较小时产生。

(3) 单元切屑。如果在挤裂切屑的剪切面上,裂纹扩展到整个面上,则整个单元被切离,变为梯形的单元切屑,如图 1.45(c)所示。

以上 3 种切屑只有在加工塑性材料时才可能产生。其中,带状切屑的切削过程最平稳,单元切屑的切削力波动最大。在生产中最常见的是带状切屑,有时得到挤裂切屑,单元切屑则很少见。假如改变挤裂切屑的条件,如进一步减小刀具前角,减低切削速度或增大切削厚

度,就可以得到单元切屑;反之,则可以得到带状切屑。这说明切屑的形态是可以随切削条件而转化的。

(4) 崩碎切屑。切削脆性材料时,被切金属层在前刀面的推挤下未经塑性变形就在拉应力作用下脆断,则会形成崩碎切屑。这种切屑的形状是不规则的,加工表面是凹凸不平的,如图 1.45(d)所示。加工脆性材料,如高硅铸铁、白口铁等,切削厚度越大越易得到这种切屑。

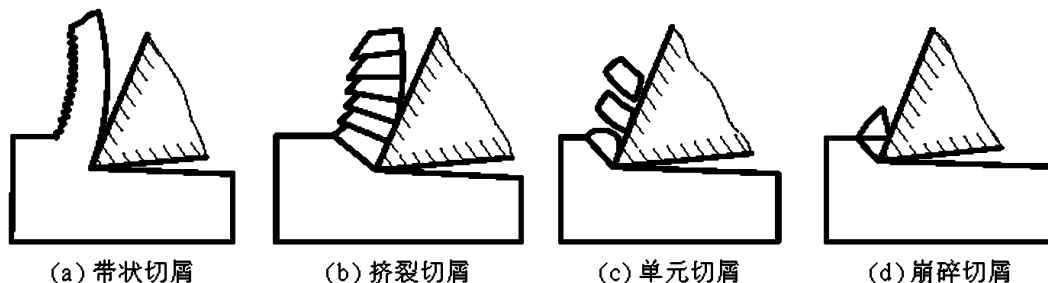


图 1.45 切屑类型

2. 切屑的控制

在生产实践中,我们会看到不同的排屑情况。有的切屑打成螺卷状,到一定长度时自行折断;有的切屑折成 C 形、6 字形;有的呈发条状卷屑;有的碎成针状或小片,四处飞溅,影响安全;有的带状切屑缠绕在刀具和工件上,易造成事故。不良的排屑状态会影响生产的正常运行,因此切屑的控制具有重要意义,这在自动化生产线上加工时尤为重要。

从切屑控制角度出发,国际标准化组织(ISO)制定了切屑分类标准,如图 1.46 所示。

切屑控制是指在切削加工中采取适当的措施来控制切屑的卷曲、流出与折断,以形成“可接受”良好屑形。

1.带状切屑	2.管状切屑	3.发条状切屑	4.垫圈形螺旋切屑	5.圆锥形螺旋切屑	6.弧形切屑	7.粒状切屑	8.针状切屑
1-1长的	2-1长的	3-1平板的	4-1长的	5-1长的	6-1相连的		
1-2短的	2-2短的	3-2锥形	4-2短的	5-2短的	6-2碎断的		
1-3缠绕形	2-3缠绕形		4-3缠绕形	5-3缠绕形			

图 1.46 国际标准化组织的切屑分类法

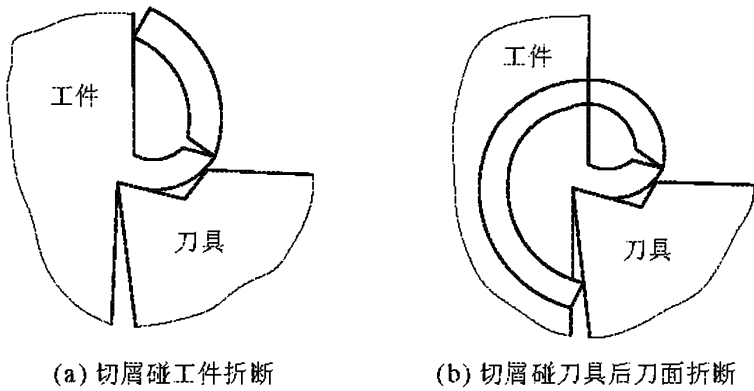


图 1.47 切屑碰到工件或刀具后刀面折断

切屑经第 I、第 II 变形区的剧烈变形后,硬度增加,塑性下降,性能变脆。在切屑排出过程中,当碰到刀具后刀面、工件上过过渡表面或待加工表面等障碍时,如某一部分的应变超过了切屑材料的断裂应变值,切屑就会折断。图 1.47 所示为切屑碰到工件或刀具后刀面折断的情况。

研究表明,工件材料脆性越大(断裂应变值小)、切屑厚度越大、切屑卷曲半径越小,切屑就越容易折断。

可采用以下措施对切屑实施控制。

(1) 采用断屑槽。通过设置断屑槽对流动中的切屑施加一定的约束力,使切屑应变增大,切屑卷曲半径减小。断屑槽的尺寸参数应与切削用量的大小相适应,否则会影响断屑效果。常用的断屑槽截面形状有折线形、直线圆弧形和全圆弧形,如图 1.48 所示。

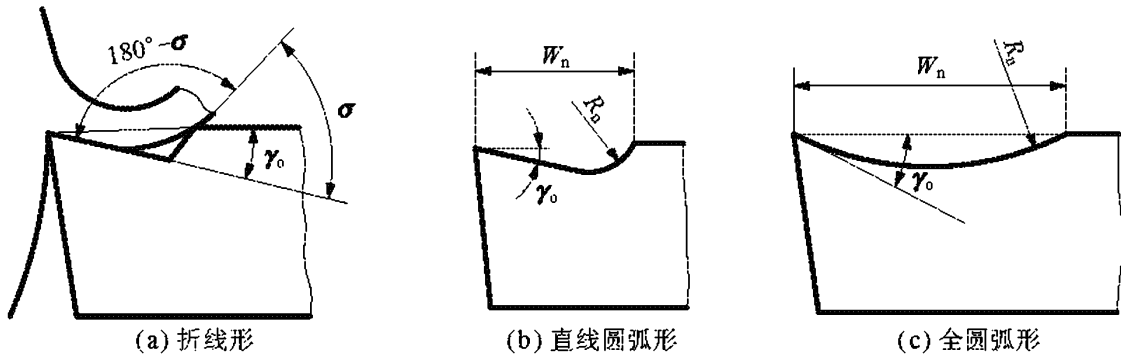


图 1.48 断屑槽截面形状

(2) 改变刀具角度。增大刀具主偏角 κ_r , 切削厚度变大,有利于断屑。减小刀具前角 γ_0 可使切屑变形加大,切屑易于折断。刃倾角 λ_s 可以控制切屑的流向, λ_s 为正值时,切屑常卷曲后碰到后刀面折断形成 C 形屑或自然流出形成螺卷屑; λ_s 为负值时,切屑常卷曲后碰到已加工表面折断成 C 形屑或 6 字形屑。

(3) 调整切削用量。提高进给量 f 使切削厚度增大,对断屑有利;但增大 f 会增大加工表面粗糙度。适当地降低切削速度使切削变形增大,也有利于断屑,但这会降低材料切除效率。须根据实际条件适当选择切削用量。

1.4 切削力、切削热与切削温度

1.4.1 切削力

金属切削过程中,刀具切入工件,使被加工材料发生变形成为切屑所需的力,称为切削力。切削力直接影响切削热、刀具磨损与耐用度,是影响工件的加工精度和表面质量以及工艺系统刚度的重要因素,是金属切削过程中的基本物理现象之一。

1. 切削力、切削合力与切削功率

1) 切削力的来源

切削力的来源有以下两个方面(如图 1.49 所示)。

(1) 克服切削层金属、切屑和工件表面金属的弹性变形和塑性变形所产生的抗力。

(2) 克服刀具与切屑、刀具与工件表面间的摩擦阻力所需的力。

2) 切削合力及分解

上述各力的总和形成作用在刀具上的合力 F , 即作用在刀具上的总切削力。为便于测量、计算和实际应用, 常将合力 F 分解成 3 个互相垂直的分力。

图 1.50 所示为车削外圆时的切削合力与分力, 3 个互相垂直的分力分别为 F_c 、 F_p 和 F_f 。

F_c ——主切削力、切削力或切向力。它相切于过渡表面且与基面垂直, 并与切削 v_c 的方向一致。 F_c 在切削过程中消耗的功率最大, 所以是确定机床的电机功率、计算车刀强度、设计机床零件所必需的。生产中所说的切削力一般都是指主切削力。

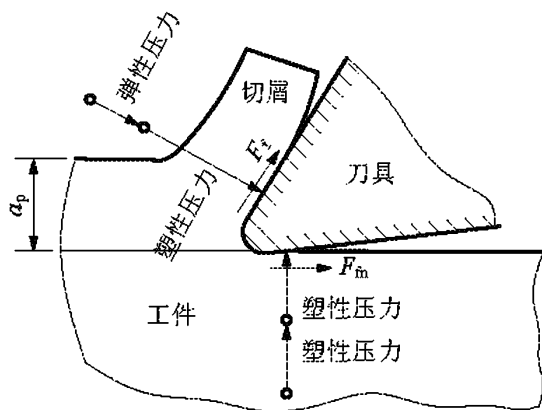


图 1.49 切削力的来源

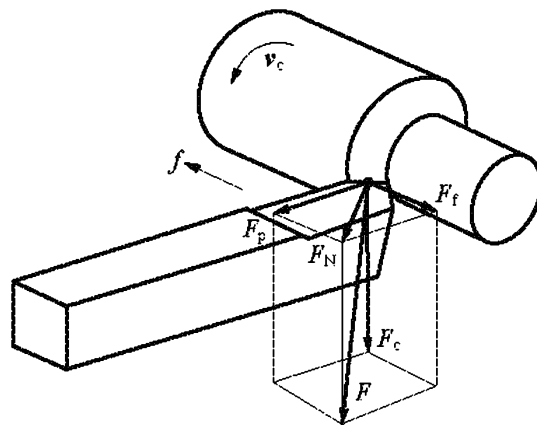


图 1.50 切削合力与分力

F_p ——切深抗力, 或背向力、径向力。它处于基面内并与进给方向垂直。 F_p 虽不做功, 但能使工件变形或振动, 对加工精度和已加工表面质量影响较大。

F_f ——进给力或轴向力。它处于基面内并与工件轴线方向相平行, 它是与进给方向相反的力。该力是检验进给机构强度、计算车刀进给功率所必需的。

由图 1.50 可知, 切削合力与各分力之间的关系为

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_N^2} = \sqrt{F_c^2 + F_p^2 + F_f^2} \quad (1-17)$$

根据实验, 当 $\kappa_r = 45^\circ$, $\gamma_o = 15^\circ$, $\lambda_s = 0^\circ$ 时, F_c 、 F_f 、 F_p 之间有如下近似关系: $F_p = (0.4 \sim 0.5)F_c$; $F_f = (0.3 \sim 0.4)F_c$; $F = (1.12 \sim 1.18)F_c$ 。

由此可知, 总切削力 F 的大小主要取决于主切削力 F_c , F_c 在各分力中最大。实际加工中, 由于车刀材料、工件材料、车刀几何参数、切削用量、车刀磨损和切削液使用情况等切削条件的不同, F_c 、 F_f 、 F_p 之间的比例可在较大范围内变化。

3) 切削功率

消耗在切削过程中的功率称为切削功率, 用 P_c 表示。计算切削功率主要用来核算加工成本和计算能量消耗, 并在设计机床时根据切削功率来选择机床电动机功率。

切削加工中, 因为 F_p 分力方向没有位移, 故不消耗功率。因此, 总切削功率为 F_c 和 F_f 所消耗功率之和, 于是有

$$P_c = \left(F_c v_c + \frac{F_f n_w f}{1000} \right) \times 10^{-3} \quad (1-18)$$

式中, F_c ——主切削力, N;

F_f ——进给力, N;

v_c ——切削速度, m/s;

n_w ——工件转速, r/s;

f ——进给量, mm/r。

其中, F_c 所消耗功率占总切削功率的 95%左右, F_f 所消耗功率占总切削功率的 5%左右; 由于消耗在进给运动中的功率所占比例很小, 通常可略而不计。故

$$P_c = F_c v_c \times 10^{-3} \quad (1-19)$$

如不计 F_f 所消耗的功率, 则

$$P_c = \frac{F_c v_c}{75 \times 60 \times 1.36} \quad (1-20)$$

计算出切削功率后, 可以进一步计算出机床电动机的功率 P_E , 以便选择机床电动机, 此时还应考虑到机床的传动效率。

机床电机功率 P_E 应满足:

$$P_E \geq P_m / \eta_m \quad (1-21)$$

式中, η_m ——机床的传动效率, 一般取为 0.75~0.85, 大值适用于新机床, 小值适用于旧机床。

由式(1-21)可检验和选取机床电动机的功率。

2. 切削力的测量与计算

1) 切削力的测量

在生产实际中, 切削力的大小一般采用由实验结果建立起来的经验公式进行计算。但是在需要较为准确地知道某种切削条件下的切削力时, 还需进行实际测量。随着测试手段的现代化, 切削力的测量方法有了很大的发展, 在很多场合下已经能很精确地测量切削力。当前采用测力仪直接测量切削力成了研究切削力行之有效的办法。

测力仪必须具备以下性能: 足够的刚度; 较高的固有频率; 足够的灵敏度; 各分力间相互干扰要小; 测力仪的输出应不受力作用点位置变化的影响; 测力仪的输出应具有较好的线性及较小的滞后现象。

按测力仪的工作原理可以分为机械式测力仪、油压式测力仪和电测力仪。电测力仪又有电阻应变式、电感式、电容式及压电式等, 目前常用的是电阻应变片式测力仪和压电测力仪。

除此之外, 还可通过测定机床功率来计算切削力。根据上面分析, 用功率表测出机床电机在切削过程中所消耗的功率 P_E 后则可计算出切削功率, 当切削速度 v 为已知时, 即可求出主切削力。但这种方法只能粗略估算切削力的大小, 不够精确。

随着计算机的广泛应用, 也可以利用计算机对切削力进行辅助测试。

2) 切削力的计算及经验公式

目前, 计算切削力多采用经验公式。它是通过大量的实验, 用切削力测量仪测得切削力后, 对所得数据用数学方法进行处理而得到的。

在生产中,计算切削力的经验公式可分为两类:一类是指数公式;另一类是按单位切削力进行计算。

(1) 计算切削力的指数公式。

常用的指数公式形式如下:

$$\begin{aligned} F_c &= C_{F_c} \cdot a_p^{x_{F_c}} \cdot f^{y_{F_c}} \cdot v_c^{n_{F_c}} \cdot K_{F_c} \\ F_p &= C_{F_p} \cdot a_p^{x_{F_p}} \cdot f^{y_{F_p}} \cdot v_c^{n_{F_p}} \cdot K_{F_p} \\ F_f &= C_{F_f} \cdot a_p^{x_{F_f}} \cdot f^{y_{F_f}} \cdot v_c^{n_{F_f}} \cdot K_{F_f} \end{aligned} \quad (1-22)$$

式中, F_c ——主切削力;

F_p ——切深抗力;

F_f ——进给抗力;

C_{F_c} 、 C_{F_p} 、 C_{F_f} ——与被加工金属材料和切削条件有关的系数;

x_{F_c} 、 x_{F_p} 、 x_{F_f} ——背吃刀量 a_p 的影响指数;

y_{F_c} 、 y_{F_p} 、 y_{F_f} ——进给量 f 的影响指数;

n_{F_c} 、 n_{F_p} 、 n_{F_f} ——切削速度 v_c 的影响指数;

K_{F_c} 、 K_{F_p} 、 K_{F_f} ——计算条件与实验条件不同时的总修正系数。

表 1-3 列出了车削时切削力指数公式中的系数和指数。

表 1-3 车削力指数公式中的系数和指数

加工材料	刀具材料	加工形式	公式中的系数及指数											
			切削力 F_c				背向力 F_p				进给抗力 F_f			
			C_{F_c}	x_{F_c}	y_{F_c}	n_{F_c}	C_{F_p}	x_{F_p}	y_{F_p}	n_{F_p}	C_{F_f}	x_{F_f}	y_{F_f}	n_{F_f}
结构钢及铸钢 $\sigma_b = 0.673\text{GPa}$	硬质合金	外圆纵车、 横车及镗孔	1433	1.0	0.75	-0.15	572	0.9	0.6	-0.3	561	1.0	0.5	-0.4
		切槽及切断	3600	0.72	0.8	0	1393	0.73	0.67	0	—	—	—	—
		切螺纹	23879	—	1.7	0.71	—	—	—	—	—	—	—	—
	高速钢	外圆纵车、 横车及镗孔	1766	1.0	0.75	0	922	0.9	0.75	0	530	1.2	0.65	0
		切槽及切断	2178	1.0	1.0	0	—	—	—	—	—	—	—	—
		成形车削	1874	1.0	0.75	0	—	—	—	—	—	—	—	—
不锈钢 1Cr18 Ni9Ti 141HBS	硬质合金	外圆纵车、 横车及镗孔	2001	1.0	0.75	0	—	—	—	—	—	—	—	
灰铸铁 190HBS	硬质合金	外圆纵车、 横车及镗孔	903	1.0	0.75	0	530	0.9	0.75	0	451	1.0	0.4	0
		切螺纹	29013	—	1.8	0.82	—	—	—	—	—	—	—	—
	高速钢	外圆纵车、 横车及镗孔	1118	1.0	0.75	0	1167	0.9	0.75	0	500	1.2	0.65	0
		切槽及切断	1550	1.0	1.0	0	—	—	—	—	—	—	—	—

(续)

加工材料	刀具材料	加工形式	公式中的系数及指数											
			切削力 F_c				背向力 F_p				进给抗力 F_f			
			C_{F_c}	x_{F_c}	y_{F_c}	n_{F_c}	C_{F_p}	x_{F_p}	y_{F_p}	n_{F_p}	C_{F_f}	x_{F_f}	y_{F_f}	n_{F_f}
可锻铸铁 150HBS	硬质合金	外圆纵车、 横车及镗孔	795	1.0	0.75	0	422	0.9	0.75	0	373	1.0	0.4	0
		高速钢	981	1.0	0.75	0	863	0.9	0.75	0	392	1.2	0.65	0
		切槽及切断	1364	1.0	1.0	0	—	—	—	—	—	—	—	—
中等硬度不 匀质铜合金 120HBS	高速钢	外圆纵车、 横车及镗孔	540	1.0	0.66	0	—	—	—	—	—	—	—	—
		切槽及切断	736	1.0	1.0	0	—	—	—	—	—	—	—	—
铝及 铝硅合金	高速钢	外圆纵车、 横车及镗孔	392	1.0	0.75	0	—	—	—	—	—	—	—	—
		切槽及切断	491	1.0	1.0	0	—	—	—	—	—	—	—	—

例如,用 YT15 硬质合金车刀外圆纵车 $\sigma_b = 0.637\text{GPa}$ 的结构钢,车刀几何参数为:
 $\kappa_r = 45^\circ, \gamma_o = 10^\circ, \lambda_s = 0^\circ$ 。切削用量为: $a_p = 4\text{mm}, f = 0.4\text{mm/r}, v_c = 1.7\text{m/s}$ 。把由表 1-3 查
 出的系数和指数代入式(1-23)(由于所给条件与表 1-3 相同,故 $K_{F_c} = K_{F_p} = K_{F_f} = 1$)。

$$F_c = C_{F_c} \cdot a_p^{x_{F_c}} \cdot f^{y_{F_c}} \cdot v_c^{n_{F_c}} \cdot K_{F_c} = 1433 \times 4^{1.0} \times 0.4^{0.75} \times 1.7^{-0.15} \times 1 = 2662.5\text{N}$$

$$F_p = C_{F_p} \cdot a_p^{x_{F_p}} \cdot f^{y_{F_p}} \cdot v_c^{n_{F_p}} \cdot K_{F_p} = 572 \times 4^{0.9} \times 0.4^{0.6} \times 1.7^{-0.3} \times 1 = 980.3\text{N}$$

$$F_f = C_{F_f} \cdot a_p^{x_{F_f}} \cdot f^{y_{F_f}} \cdot v_c^{n_{F_f}} \cdot K_{F_f} = 561 \times 4^{1.0} \times 0.4^{0.5} \times 1.7^{-0.4} \times 1 = 1147.8\text{N}$$

切削功率 P_c 为

$$P_c = F_c v_c \times 10^{-3} = 2662.5 \times 1.7 \times 10^{-3} \approx 4.5\text{kW}$$

(2) 用单位切削力计算主切削力。

单位切削力指的是单位切削面积上的主切削力,用 $p(\text{N}/\text{mm}^2)$ 表示:

$$p = \frac{F_c}{A_c} = \frac{F_c}{a_p f} = \frac{F_c}{a_c a_w} \tag{1-23}$$

式中, F_c ——主切削力, N;

A_c ——切削面积, mm^2 ;

a_p ——背吃刀量, mm;

f ——进给量, mm/r;

a_c ——切削厚度, mm;

a_w ——切削宽度, mm。

如果单位切削力已知,可由式(1-23)求出切削力 F_c 。

用单位切削力计算主切削力是一种更简便的形式。在同一切削条件下,用单位切削力
 计算出的切削力与用指数公式算出的切削力基本相同。

3. 影响切削力的因素

凡是影响切削过程变形和摩擦的因素均影响切削力。影响切削力的因素很多,其中最主要的是工件材料、切削用量和刀具几何参数。此外,刀具材料、刀具磨损、冷却润滑液等对切削力也有一定的影响。

1) 工件材料的影响

工件材料的强度、硬度越高,则屈服强度越高,切削力越大。在强度、硬度相近的情况下,材料的塑性(伸长率)、韧性越大,则刀具前面上的平均摩擦系数越大,切削力也就越大。切削脆性材料时,切削层塑性变形很小,形成的崩碎切屑与前刀面的摩擦力也很小,因此脆性材料的切削力一般小于塑性材料。

2) 切削用量的影响

(1) 背吃刀量和进给量。由公式(1-23)可知,切削力是随着切削面积的增大而增大的,切削面积 $A_c = a_p f$,因此切削力随着背吃刀量 a_p 和进给量 f 的增大而增大。在车削力的经验公式中,多数加工情况下, a_p 的指数 $x_{F_c} = 1.0$,即当 a_p 加大一倍时, F_c 也增大一倍;而 f 的指数 $y_{F_c} = 0.75$,即当 f 加大一倍时, F_c 只增大 68% 左右。由此可见,背吃刀量 a_p 或进给量 f 对切削力的影响程度不同。这是因为当 a_p 加大一倍时,切削宽度 a_w 亦增大一倍,切削力成正比例增大;而 f 加大一倍时,虽然切削厚度 a_c 也成正比增加一倍,但平均变形有所减少,使切削力增大不到一倍。因此,切削加工中,如从切削力和切削功率角度考虑,加大进给量比加大背吃刀量有利。

(2) 切削速度。切削速度对切削力的影响因材料不同而异。加工塑性金属时,切削速度对切削力的影响规律是受积屑瘤和摩擦作用而制约。如图 1.51 所示,以 YT15 硬质合金车刀加工 45 钢为例,当切削速度在 $5\text{m/min} < v_c < 20\text{m/min}$ 的范围内时,随着速度的增加,会产生积屑瘤并且积屑瘤的高度逐渐增加,这时刀具的实际前角加大,故切削力逐渐减小;当 $v_c = 20\text{m/min}$ 时,积屑瘤最大,切削力最小;当切削速度超过 20m/min 时,由于积屑瘤减小,刀具的实际前角也在减小,切削力逐步增大;当 $v_c > 30\text{m/min}$ 左右时,积屑瘤消失,随着切削速度的增大,摩擦系数减小,变形系数减小,又使切削力逐步减小,而且随着切削速度增大,切削温度也升高,使被加工金属的强度和硬度降低,也会导致切削力的降低。

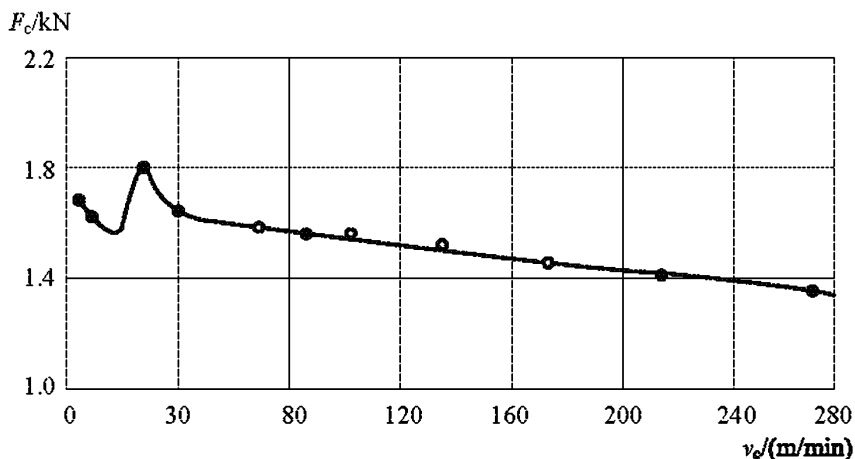


图 1.51 切削塑性材料时切削速度对切削力的影响
工件材料:45 钢;刀具:焊接式硬质合金车刀, YT15 切削用量:
 $a_p = 3\text{mm}$, $f = 0.25\text{mm/r}$

切削铸铁等脆性金属材料时形成崩碎切屑,因金属的塑性变形很小,切屑与前刀面的摩擦也很小,所以切削速度对切削力没有显著影响。

3) 刀具几何参数的影响

(1) 前角 γ_0 。刀具几何参数中,前角对切削力的影响最大。 γ_0 加大,能使刀刃变得锋利,切屑变形减小,切削力减小。尤其是加工材料的韧性、延伸率越高,前角的影响更为显著,切削力降低较多;加工脆性材料,由于切屑变形和加工硬化很小,故前角的变化对切削力影响不显著。

(2) 主偏角 κ_r 。主偏角的变化影响切削分力 F_f 、 F_p 的变化从而改变它们之间的比值。径向分力随着主偏角的增大而减小,轴向分力随着主偏角的增大而增大。由于径向分力容易顶弯零件,使加工时产生振动,影响加工精度与表面粗糙度,因此当工艺系统刚性较差时,应尽可能使用大的主偏角刀具进行切削。

(3) 负倒棱。负倒棱可以提高切削刃的强度和散热能力,增加刀具的耐用度。但金属变形增大,使切削力有所增加。进给量不变时,负倒棱宽度越大,切削力也越大。当切屑除了与负倒棱接触外,还与前面接触,前面仍起作用时,切削力比无负倒棱的大。当切屑只与负倒棱接触,不与前面接触,则相当于用负前角车刀加工时的切削力的大小。

(4) 刃倾角 λ_s 。刃倾角对切削力 F_p 、 F_f 的影响很大。 F_p 随着刃倾角减小而增大; F_f 随着刃倾角减小而减小。刃倾角对 F_c 的影响不大。

(5) 刀尖圆弧半径 r_c 。通常,刀尖圆弧半径对 F_f 、 F_p 的影响较大,对 F_c 的影响较小。刀尖圆弧半径的增大相当于主偏角减小时对切削力的影响。因为刀尖圆弧半径增大,则参加切削的圆弧刃长度增加,使圆弧刃部分的平均主偏角减小,因此不宜采用太大的刀尖圆弧半径。

4) 刀具磨损的影响

在加工过程中,随着刀具的磨损,切削力增大。刀具后刀面磨损形成后角为零且有一定宽度的小棱面,使后刀面与加工表面的接触面积增大,从而使后刀面的正压力和摩擦力都增大,使切削力增大。

5) 切削液的影响

切削液的使用,可以明显降低切削力的大小。特别是润滑作用强的切削液,其润滑作用可以减小切屑与刀具前刀面及其工件表面与后刀面之间的摩擦,从而使切削力减小。

1.4.2 切削热的产生与传导

切削热和由它所引起的切削加工区温度的升高是切削过程中的又一个重要物理现象,它直接影响刀具的磨损和耐用度,限制切削速度的提高,影响工件加工精度和表面质量。

1. 切削热的产生

切削热是由切削功转变而来的,切削时所消耗的能量约有 98%~99% 转换为切削热。一方面,切削层金属在刀具的作用下发生弹性变形、塑性变形而耗功;另一方面,切屑与前刀面、工件与后刀面之间的摩擦也要耗功,这两个方面都产生出大量的热量。因此,切削时共有 3 个发热区域,即剪切面区、切屑与前刀面接触区、后刀面与过渡表面接触区,如图 1.52 所示。

一般地,切削塑性金属时,切削热主要来自剪切区的变形热和前刀面的摩擦热;切削脆性金属时,则切削热主要来自后刀面的摩擦热。

若忽略进给运动所消耗的功,并假定主运动所消耗的功全部转化为热能,则单位时间内产生的切削热可由下式算出:

$$Q = F_c v_c \quad (1-24)$$

式中, Q ——每秒钟内产生的切削热, J/s;

F_c ——主切削力, N;

v_c ——切削速度, m/s。

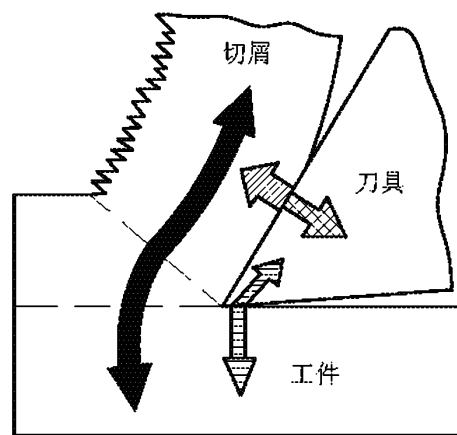


图 1.52 切削热的来源和传导

2. 切削热的传导

切削区域的热量由切屑、工件、刀具及周围的介质传散出去。大部分的切削热被切屑带走,其次被工件和刀具传来。以下是影响切削热传导的一些主要因素:

(1) 工件、刀具材料的导热性能。工件、刀具材料的导热系数低,则切削热不易从切屑和工件、刀具传导出,切削区域温度高,刀具磨损加剧,刀具寿命降低。例如,航空工业中常用的钛合金,它的导热系数只有碳素钢的 $1/3 \sim 1/4$,切削时产生的热量不易传导出,切削温度增高,刀具易磨损,属于难加工材料。

(2) 加工方式。不同的加工方式中切屑与刀具接触的时间长短不同,由于切屑中含有大量的热,若不能及时脱离切削区域,则不能迅速把热量带走,带来不好的影响。

车削加工时,切削热 $50\% \sim 86\%$ 由切屑带走, $40\% \sim 10\%$ 由车刀传出, $9\% \sim 3\%$ 传入工件, 1% 传入介质(空气)。切削速度越高或切削厚度越大,则切屑带走的热量越多。钻削加工时,切削热的 28% 由切屑带走, 14.5% 传给刀具, 52.5% 传入工件, 5% 传给周围介质。

(3) 周围介质的状况。若不使用切削液,则由周围介质传出的热量很少,所占比例在 1% 以下;若采用冷却性能好的切削液并采用好的冷却方法,就能吸收大量的热。

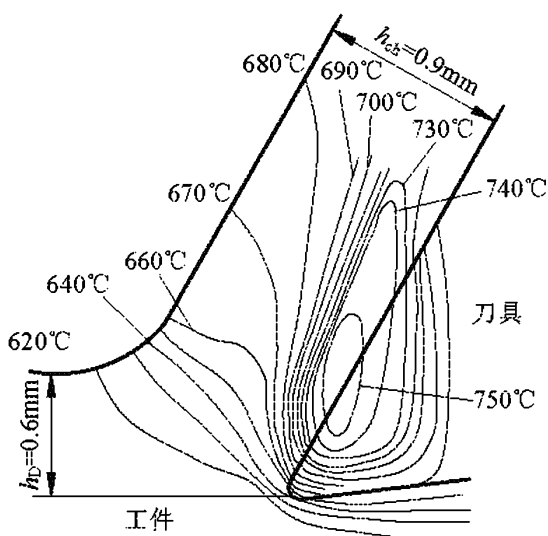


图 1.53 二维切削中的温度分布

工件:低碳易切钢;刀具: $\gamma_0 - 30^\circ, \alpha_0 - 7^\circ$;
切削速度: $v = 30 \text{ m/min}$, 干切削, 预热 611°C

1.4.3 切削温度

1. 切削温度的分布

工件、刀具和切屑上各点的温度是变化的,即形成了一个温度场。图 1.53 是切削钢料时,所测出的主剖面内的温度场。图 1.54 是车削不同的工件材料时,正交平面内前、后刀面上温度分布情况。根据对图 1.53 和图 1.54 的分析以及对温度分布的研究,可以归纳出一些温度分布的规律:

(1) 剪切面上各点的温度基本一致,由此可以推断剪切面上各点的应力应变规律基本上变化不大。

(2) 前刀面和后刀面上的最高温度都处在离切削刃有一定距离的地方,这是摩擦热沿刀面不断增加的缘故。温度最高点出现在前刀面上。

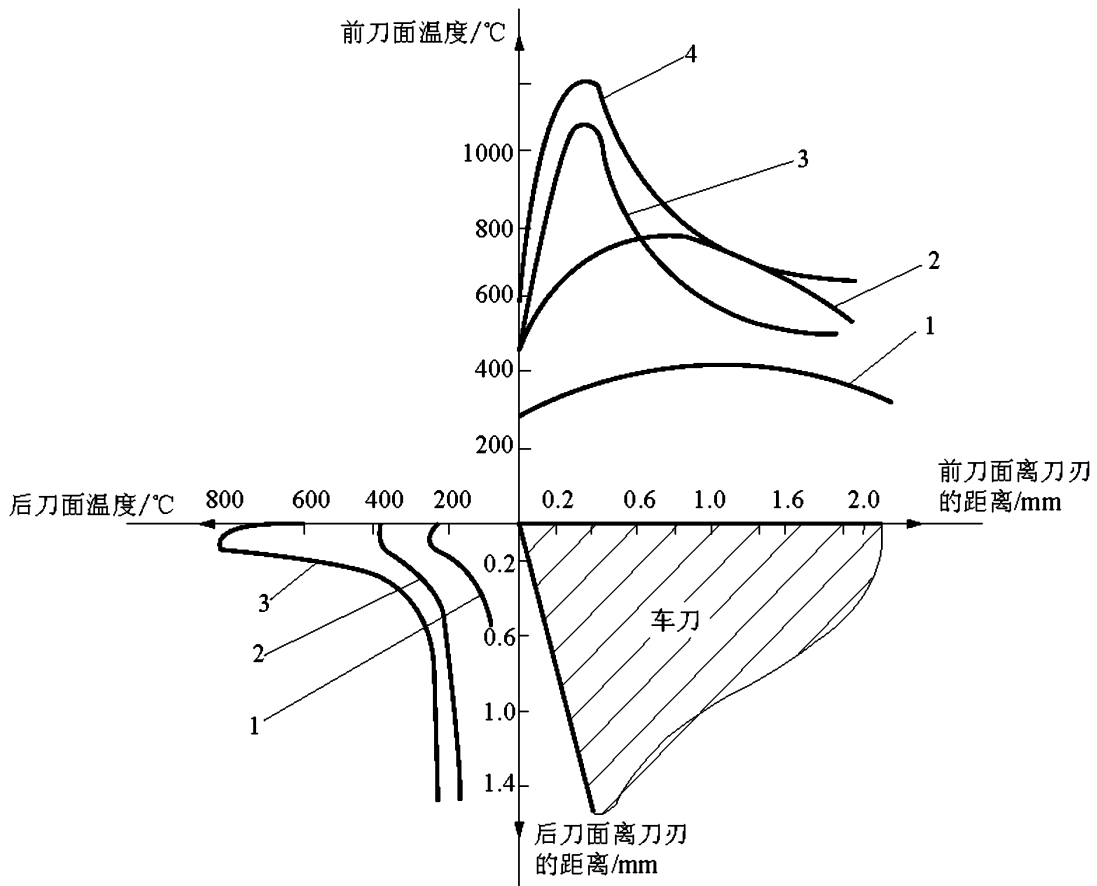


图 1.54 切削不同材料的温度分布

1 45 钢-YT15; 2 GCr-YT14; 3 钛合金 BT2-YG8; 4 BT2-YT15

切削用量: $v_c = 30\text{m/min}$, $f = 0.2\text{mm/r}$

(3) 在剪切区域内,垂直剪切方向上温度梯度较大。这是因为剪切滑移的速度很快,热量来不及传导出来,从而形成较大的温度梯度。

(4) 垂直前刀面的切屑底层温度梯度大,距离前刀面 $0.1 \sim 0.2\text{mm}$ 温度就可能下降一半。这说明前刀面上的摩擦是集中在切屑的底层,因此切削温度对前刀面的摩擦系数有较大影响。

(5) 后刀面的接触长度很小,因此温度的升降是在极短时间内完成的,导致已加工表面受到一次热冲击。

(6) 工件材料塑性越大,前刀面上的接触长度越大,切削温度的分布就均匀些。工件材料脆性越大,最高温度所在的点离切削刃就越近。

(7) 工件材料导热系数越低,刀具的前、后刀面的温度就越高。这是一些高温合金和钛合金切削加工性低的主要原因之一。

2. 切削温度的测量

切削温度是指切削过程中,切削区温度升高到一定程度后,处于热平衡时的温度。一般指前刀面与切屑接触区域的平均温度。

切削温度的测量方法很多,目前常用的测量方法是热电偶法。其结构简单,测量方便,其中应用较广的有自然热电偶法和人工热电偶法。

1) 自然热电偶法

如图 1.55 所示,自然热电偶法是利用刀具和工件分别作为热电偶的两极,连接测量仪表,组成测量电路测量切削温度。测温时,刀具与工件引出端应处于室温下,且刀具和工件应分别与机床绝缘。切削加工时,刀具与工件接触区因切削热而产生高温后,就形成热电偶的热端,与刀具、工件各自引出端的室温(冷端)形成温差电动势,利用电位差计或毫伏计测出其值,切削温度越高,该电势值越大。切削温度与热电势毫伏值之间的曲线关系应事先标定得到。根据切削实验中测出的热电势毫伏值,可在标定曲线上查出对应的温度值。自然热电偶法测得的温度是切削区的平均温度。

2) 人工热电偶法

人工热电偶法可用于测量刀具、切屑和工件上指定点的温度,并可测得温度分布场和最高温度的位置。其测温装置是在刀具或工件被测点处钻一个小孔(孔径越小越好),孔中插入一对标准热电偶并使其与孔壁之间保持绝缘,如图 1.56 所示。切削时,热电偶接点感受出被测点温度,并通过串接在回路中的毫伏计测出电势值,然后参照热电偶标定曲线得出被测点的温度。

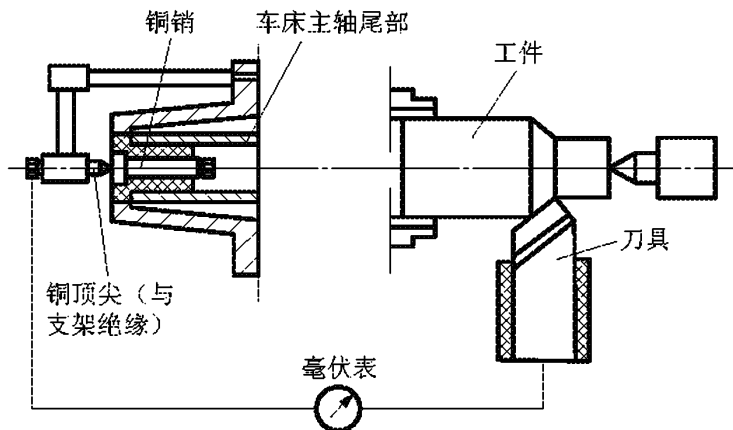


图 1.55 自然热电偶测温装置

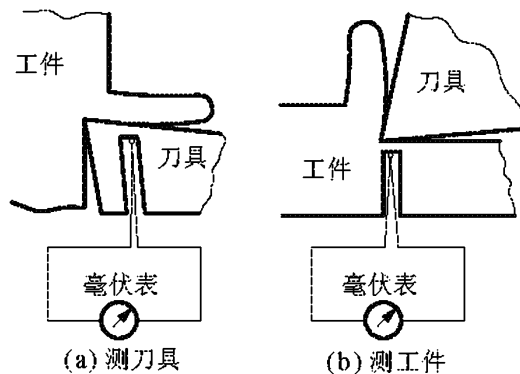


图 1.56 人工热电偶法

3. 影响切削温度的主要因素

1) 切削用量的影响

切削用量是影响切削温度的主要因素。由实验得到的切削温度经验公式为

$$\theta = C_{\theta} v^{x_{\theta}} f^{y_{\theta}} a_p^{z_{\theta}} K_{\theta} \quad (1-25)$$

式中, x_{θ} 、 y_{θ} 、 z_{θ} ——切削用量三要素对切削温度的影响指数;

C_{θ} ——与实验条件有关的影响系数;

K_{θ} ——切削条件改变后的修正系数。

如表 1-4 所示为用高速钢和硬质合金刀具切削中碳钢时,不同加工方法对应的指数与系数。由表中可看出 $z_{\theta} > y_{\theta} > x_{\theta}$,即 v_c 的指数最大, f 的指数其次, a_p 的指数最小,这说明切削速度对切削温度的影响最大,进给量的影响次之,切削深度的影响最小。

综上所述,为了有效地控制切削温度,在机床允许的情况下,在选择切削用量时,为使切削温度较低,选用较大的背吃刀量或进给量比选用大的切削速度有利。

2) 工件材料的影响

工件材料的硬度和强度越高,切削力大,切削时所消耗的功多,产生的热量多,切削温度就越高。工件材料导热系数大,热量容易传出,则切削温度低。

表 1-4 切削温度的系数和指数

刀具材料	加工方法	C_θ	z_θ		γ_θ	x_θ
高速钢	车削	140~170	0.35~0.45		0.2~0.3	0.08~0.10
	铣削	80				
	钻削	150				
硬质合金	车削	320	$f/(mm/r)$		0.15	0.05
			0.1	0.41		
			0.2	0.31		
			0.3	0.26		

切削灰铸铁等脆性材料时,金属塑性变形小,形成崩碎切屑,与前刀面摩擦小,产生切削热少,故切削温度一般都低于切削钢料时的温度。

3) 刀具几何参数的影响

(1) 前角 γ_0 对切削温度的影响。前角增大时,变形和摩擦减少,产生的热量少,切削温度低。但当前角达到 $18^\circ \sim 20^\circ$ 后若继续增大会使楔角变小,使刀具散热条件变差,反而使切削温度升高。

(2) 主偏角 κ_r 对切削温度的影响。主偏角 κ_r 加大后,使切削宽度减小,切削刃工作长度缩短,切削热相对集中,同时刀尖角减小,散热条件变差,切削温度将升高。

4) 刀具磨损对切削温度的影响

刀具磨损后切削刃变钝,刀具后刀面磨损处后角等于零,与工件的摩擦挤压加剧,使切削温度上升。

5) 切削液对切削温度的影响

采用冷却性能良好的切削液能吸收大量的热量,对降低切削温度有明显的效果。

1.5 刀具磨损与刀具耐用度

在刀具将多余的金属从毛坯上切除,使毛坯变成零件的过程中,刀具也不可避免地受到损耗。当刀具的损耗积累到一定的程度后,会使工件的加工精度降低,表面粗糙度增大,并导致切削力和切削温度增加,甚至产生振动,或突然损坏,不能继续正常切削,即刀具失效,必须及时进行重磨或更换新刀。

刀具的失效形式可分为磨损和破损两类,前者表现为连续地、逐渐地发生,后者表现为突然发生或过早产生的损坏现象,如崩刃、碎断、剥落和卷刃等。

1.5.1 刀具磨损形态及其原因

1. 刀具磨损形态

切削时,刀具的前刀面与切屑、后刀面与工件常常相互挤压和剧烈摩擦,产生很高的温度。因此,磨损发生在刀具的前刀面和后刀面上,前刀面磨损形成月牙洼,后刀面磨损形成磨损带,通常前、后刀面的磨损是同时发生,相互影响的。

刀具正常磨损时,按其发生的部位不同,可分为前刀面磨损、后刀面磨损及边界磨损三种形式,如图 1.57 所示。

1) 前刀面磨损

所谓前刀面磨损是指切屑沿前刀面流出时,在刀具前刀面上经常会磨出一个月牙洼,如图 1.57 所示。在连续磨损过程中,月牙洼的宽度、深度不断增大,其最大深度的位置就是切削温度最高处,磨损逐渐向切削刃方向发展(见图 1.58),当接近刃口时,会使刃口突然崩去。加工塑性金属时,当刀具材料的耐热性、耐磨性不足,切削速度较高,切削厚度较大(大于 0.5mm)时,常在前刀面上发生磨损。由于切屑底面和刀具前刀面在切削过程中是化学活性很高的新鲜表面,在接触面的高温高压作用下,接触面积的 80% 以上是空气和切削液较难进入的,切屑沿前刀面的滑动逐渐在前刀面上磨出一个月牙形凹窝,所以这种磨损形态又常称为月牙洼磨损。

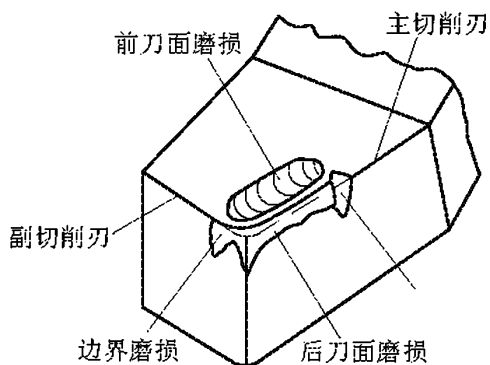


图 1.57 刀具的磨损形态

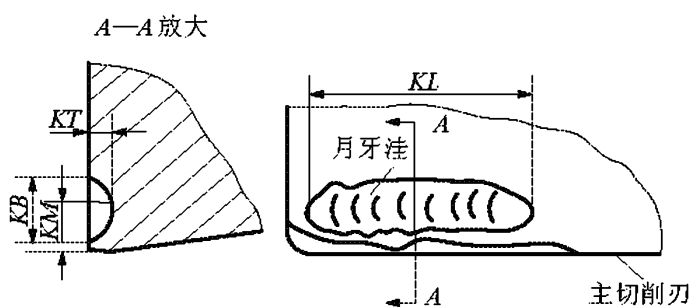


图 1.58 前刀面磨损

前刀面磨损量的大小,用月牙洼的宽度 KB 和深度 KT 来表示。

2) 后刀面磨损

切削时,工件的新鲜加工表面与刀具后刀面接触,并相互摩擦,从而引起后刀面磨损。后刀面虽然有后角,但由于切削刃不如理想中的锋利,存在一定的钝圆,后刀面与工件表面的接触压力很大,存在着弹性和塑性变形。因此,后刀面与工件实际上是小面积接触,磨损就发生在这个接触面上,形成后角为零的小棱面。

后刀面的磨损往往不均匀,如图 1.59 所示。刀尖部分(C区)强度较低,散热条件又差,磨损比较严重,其最大值为 VC 。主切削刃靠近工件外表面处的后刀面上(N区),由于加工硬化层或毛坯表面硬层等影响,往往被磨成比较严重的深沟,以 VN 表示。在后刀面磨损带中间部位上(B区),磨损比较均匀,平均磨损带宽度以 VB 表示,而最大磨损带宽度以 VB_{max} 表示。加工脆性材料时,由于形成崩碎切屑,一般出现后刀面的磨损;切削塑性材料时,当切削速度较低,切削厚度较薄(小于 0.1mm)时容易产生后刀面的磨损。

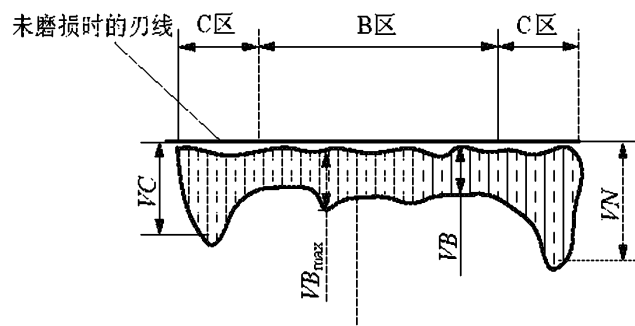


图 1.59 后刀面磨损

当以中等速度及其中等厚度时加工塑性金属,会经常出现前、后刀面同时磨损的形式。这种磨损发生时,月牙洼与刀刃之间的棱边和楔角逐渐减小,切削刃强度下降,因此多数情况下伴随着崩刃的发生。

3) 边界磨损

切削钢料时,常在主切削刃靠近待加工表面处以及副切削刃靠近刀尖处的后刀面上,磨出较深的沟纹。这两处分别是在主、副切削刃与工件待加工表面或已加工表面接触的地方。发生这种边界磨损的主要原因有以下两点:

(1) 切削时,在主切削刃附近的前后刀面上,压应力和切应力很大,但在工件外表面处的切削刃上应力突然下降,形成很高的应力梯度,引起很大的切应力。同时,前刀面上切削温度最高,而与工件外表面接触点由于受空气或切削液冷却温度相对低,这造成很高的温度梯度,也引起很大的切应力。因而,在主切削刃后刀面上发生边界磨损。

(2) 由于加工硬化作用,靠近刀尖部分的副切削刃处的切削厚度减薄到零,引起这部分刀刃打滑,促使副后刀面上发生边界磨损。加工铸、锻件外皮粗糙的工件时,也容易发生边界磨损。

2. 刀具磨损机理

刀具经常工作在高温、高压下,在这样的条件下,刀具磨损经常是机械的、热的、化学的三种作用的综合结果,实际情况很复杂,尚待进一步研究。到目前为止,认为刀具磨损的机理主要有以下几个方面:

(1) 磨料磨损。由于切屑或工件表面经常含有一些硬度极高的微小的硬质颗粒,如一些碳化物(Fe_3C 、 TiC)、氮化物(Si_3N_4 、 AlN)和氧化物(SiO_2 、 Al_2O_3)等硬质点以及积屑瘤碎片等,它们不断滑擦前后刀面,在刀具表面划出沟纹,这就是磨料磨损。这是一种纯机械的作用。

(2) 粘结磨损。粘结是指刀具与工件材料接触到原子间距离时所产生的结合现象。切削时,工件表面、切屑底面与前后刀面之间,存在着很大的压力和强烈的摩擦,形成新鲜表面的接触,在足够大的压力和温度的作用下发生冷焊粘结。由于摩擦面之间的相对运动,粘结处将被撕裂,刀具表面上强度较低的微粒被切屑或工件带走,而在刀具表面上形成粘结凹坑,造成刀具的粘结磨损。在产生积屑瘤的条件下,切削刃可能很快因粘结磨损而损坏。

(3) 相变磨损。刀具材料都有一定的相变温度(如高速钢的相变温度为 $550\sim 600^\circ\text{C}$)。当切削温度超过了相变温度时,刀具材料的金相组织发生转变,硬度显著下降,从而使刀具迅速磨损。

(4) 扩散磨损。在切削高温下,刀具表面始终与被切出的新鲜表面接触,因此具有巨大的化学活泼性。当刀具与工件材料的化学元素浓度相差较大时,它们就会在固态下互相扩散到对方中去,引起摩擦面两侧刀具和工件材料化学成分的改变,使刀具材料性能下降,从而造成刀具磨损,这种磨损称为扩散磨损。扩散磨损的速度主要与切削温度、工件和刀具材料的化学成分等因素有关。

例如,用硬质合金刀具切钢时,在高温下硬质合金中的 WC 分解, W 、 C 、 Co 等扩散到切屑、工件中去,而切屑中的 Fe 会向硬质合金刀具表面中扩散,形成低硬度、高脆性的复合碳化物。扩散的结果使刀具磨损加剧。

(5) 化学磨损。化学磨损是指在一定温度下, 刀具材料与空气中的氧、切削液中的硫、氯等某些周围介质之间起化学作用, 在刀具表面形成一层较软的化合物, 从而使刀具表面层硬度下降。较软的氧化物被切屑或工件带走, 加速了刀具的磨损。由于空气不易进入刀—屑接触区, 化学磨损中因氧化而引起的磨损最容易在主、副切屑刃的工作边界处形成, 从而产生较深的磨损沟纹。例如, 硬质合金中的 WC、Co 与空气中的氧化合成为脆性、低强度的氧化膜 WO 磨料, 它受到工件表层中的氧化皮、硬化皮等的摩擦和冲击作用, 形成了化学磨损。

不同的刀具材料在不同的使用条件下造成磨损的主要原因是不同的。在低温时, 以磨料磨损为主; 在较高的温度下, 以粘结、扩散和化学磨损为主。对高速钢刀具来说, 磨料磨损和粘结磨损是使它产生正常磨损的主要原因, 相变磨损是使它产生急剧磨损的主要原因。对硬质合金刀具来说, 在中、低速切削时, 磨料磨损和粘结磨损是使它产生正常磨损的主要原因; 在高速切削时, 刀具磨损主要由磨料磨损、扩散磨损和化学磨损造成, 而扩散磨损是使它产生急剧磨损的主要原因。

1.5.2 刀具磨损过程及磨钝标准

1. 刀具磨损过程

随着切削时间的延长, 刀具磨损增加。根据切削实验, 可得图 1.59 所示的刀具磨损过程的典型磨损曲线。该图分别以切削时间和后刀面上 B 区平均磨损量 VB 为横坐标与纵坐标。由图可知, 刀具磨损过程可分为三个阶段:

(1) 初期磨损阶段。这一阶段的磨损较快。因为新刃磨的刀具切削刃较锋利, 而且其后刀面存在着粗糙不平、显微裂纹、氧化及其脱碳层等缺陷, 所以后刀面与加工表面之间为凸峰点接触, 实际接触面积很小, 压应力较大, 导致在极短的时间内 VB 上升很快。初期磨损量 VB 的大小与刀具刀面刃磨质量关系较大。经过仔细研磨的刀具, 其初期磨损量较小而且耐用。初期磨损量 VB 的值一般为 $0.05 \sim 0.10\text{mm}$ 。

(2) 正常磨损阶段。经过初期磨损阶段后, 刀具后刀面的粗糙表面已经磨平, 后刀面与工件接触面积增大, 压应力减小, 所以使磨损速率明显减小, 进入到正常磨损阶段。这个阶段的时间较长, 是刀具工作的有效阶段。

(3) 急剧磨损阶段。刀具经过一段时间的正常使用后, 切削刃逐渐变钝。当磨损带宽度增加到一定限度后, 刀具与工件接触情况恶化, 摩擦增加, 切削力、切削温度均迅速升高, VB 在较短的时间内增加很快, 以致刀具损坏而失去切削能力。生产中, 为合理使用刀具, 保证加工质量, 应当在这个阶段到来之前, 及时更换刀具或重新刃磨刀具。

2. 刀具的磨钝标准

刀具磨损到一定限度就不能继续使用, 这个磨损限度称为刀具的磨钝标准。在生产中, 评定刀具材料切削性能和研究实验都需要规定刀具的磨钝标准。由于后刀面磨损最常见, 且易于控制和测量, 因此通常按后刀面磨损宽度来制定磨钝标准。国际标准化组织(ISO)统一规定以 $1/2$ 背吃刀量处后刀面上测定的磨损带宽度 VB 作为刀具磨钝标准(见图 1.60)。

对于粗加工和半精加工, 为充分利用正常磨损阶段的磨损量, 充分发挥刀具的切削性能, 充分利用刀具材料, 减少换刀次数, 使刀具的切削时间得到最大, 其磨钝标准应较大。一般取正常磨损阶段终点处的磨损量 VB 作为磨钝标准, 该标准称为经济磨损限度。

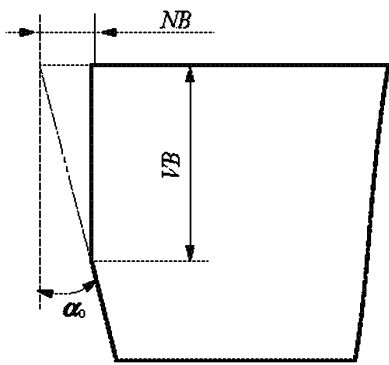


图 1.60 车刀的磨损量

对于精加工,为了保证零件的加工精度及其表面质量,应根据加工精度和表面质量的要求确定磨钝标准。此时,磨钝标准应取较小值,该标准称为工艺磨损限度。

自动化生产中用的精加工刀具,常以沿工件径向的刀具磨损尺度作为衡量刀具的磨钝标准,称为刀具径向磨损量,以 NB 表示(见图 1.60)。

在柔性加工设备上,经常用切削力的数值作为刀具的磨钝标准,从而实现对刀具磨损状态的自动监控。

当机床—夹具—刀具—工件组成的工艺系统刚性较差时,应规定较小的磨钝标准,否则会使加工过程产生振动,影响加工过程的进行。

加工过程的进行。

加工难加工材料时,由于切削温度较高,因此一般选用较小的磨钝标准。

磨钝标准的具体数值可查阅有关手册。ISO 推荐的车刀耐用度实验的磨钝标准如下:

1) 高速钢或陶瓷刀具,可以是下列的任何一种

(1) 破损。

(2) 如果后刀面在 B 区内是有规则的磨损,取 $VB=0.3\text{mm}$ 。

(3) 如果后刀面在 B 区内是无规则的磨损、划伤、剥落或有严重的沟痕,取 $VB_{\max}=0.6\text{mm}$ 。

2) 硬质合金刀具,可以是下列的任何一种

(1) $VB=0.3\text{mm}$ 。

(2) 如果后刀面是无规则的磨损,取 $VB_{\max}=0.6\text{mm}$ 。

(3) 前刀面磨损量 $KT=0.06+0.3f$,其中 f 为进给量。

1.5.3 刀具耐用度及其经验公式

1. 刀具耐用度的定义

所谓刀具耐用度,是指刃磨后的刀具自开始切削直到磨损量达到磨钝标准为止的切削时间,以 T 表示,单位为分钟。

一把新刀从开始投入切削到报废为止总的实际切削时间,称为刀具寿命。因此刀具寿命等于这把刀的刃磨次数(包括新刀开刃)乘以刀具耐用度。

刀具耐用度是一个表征刀具材料切削性能优劣的综合指标。在相同的切削条件下,耐用度越高,表明刀具材料的耐磨性越好。在比较不同的工件材料切削加工性时,刀具耐用度也是一个重要的指标,刀具耐用度越高,表明工件材料的切削加工性越好。

2. 刀具耐用度的经验公式

由于切削速度对切削温度影响最大,因而对刀具磨损影响最大,因此切削速度是影响刀具耐用度的最主要因素。为了合理地确定刀具的耐用度,必须首先求出刀具耐用度与切削速度的关系。实验中固定其他切削条件,在常用的切削速度范围内,取不同的切削速度 v_{c1} , v_{c2} , v_{c3} ... 进行刀具磨损试验,得到一组刀具磨损曲线,如图 1.61 所示。选定刀具后刀面的磨钝标准,在各条磨损曲线上根据规定的磨钝标准 VB 求出在各种切削速度下所对应的刀具耐用度 T_1, T_2, T_3 。

经过处理, $T-v_c$ 关系式可以写成:

$$v_c T^m = C_0 \quad (1-26)$$

式中, v_c ——切削速度, m/min;

T ——刀具耐用度;

m ——指数, 表示 $T-v$ 间影响的程度;

C_0 ——系数, 与刀具、工件材料和切削条件有关。

式(1-26)为重要的刀具寿命方程式。如果将 $T-v_c$ 画在双对数坐标上, 则在一定的切削速度范围内, 可发现这些点基本上在一条直线上, m 则是该直线的斜率。图 1.62 所示为不同刀具材料的 $T-v_c$ 曲线。

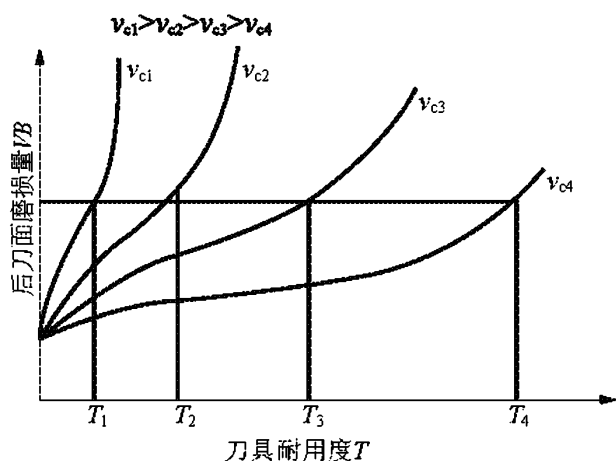


图 1.61 不同速度下的刀具磨损曲线

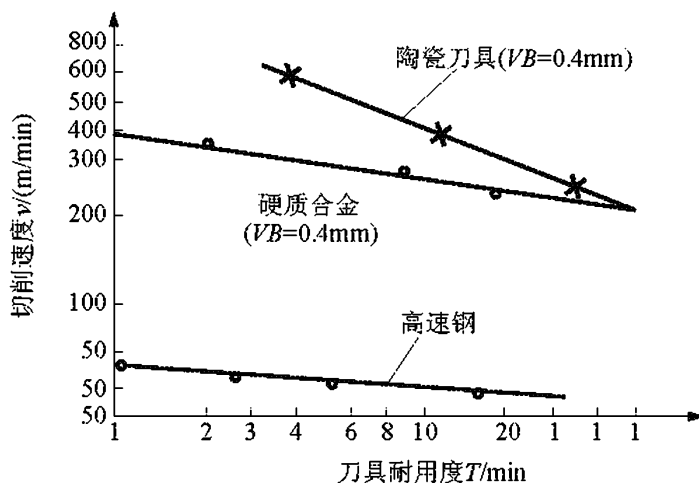


图 1.62 各种刀具材料的 $T-v_c$ 曲线

$T-v_c$ 关系式反映了切削速度与刀具耐用度之间的关系。耐热性越低的刀具材料, 指数 m 越小, 斜率应该越小, 表示切削速度对刀具耐用度的影响越大。即切削速度稍稍改变一点, 则刀具耐用度的变化就很大。例如, 对于高速钢刀具, 一般 $m=0.1\sim 0.125$; 硬质合金刀具, $m=0.2\sim 0.3$; 陶瓷刀具的 m 值约为 0.4。陶瓷刀具的曲线斜率比硬质合金和高速钢的都大, 表示陶瓷刀具的耐热性很高。

同样按照求 $T-v_c$ 关系式的方法, 固定其他切削条件, 分别改变进给量和背吃刀量, 求得 $T-f$ 和 $T-a_p$ 关系式:

$$f T^{m_1} = C_1 \quad (1-27)$$

$$a_p T^{m_2} = C_2 \quad (1-28)$$

综合整理后, 得出下列刀具耐用度的实验公式:

$$T = \frac{C_T}{v^{\frac{1}{m}} f^{\frac{1}{m_1}} a_p^{\frac{1}{m_2}}} \quad (1-29)$$

令 $x = \frac{1}{m}$, $y = \frac{1}{m_1}$, $z = \frac{1}{m_2}$, 则

$$T = \frac{C_T}{v^x f^y a_p^z} \quad (1-30)$$

式中, C_T ——刀具耐用度系数, 与工件材、刀具材料和其他切削条件有关。

例如, 用 YT5 硬质合金车刀切削 $\sigma_b = 0.63\text{GPa}$ 的钢碳时 ($f > 0.7\text{mm/r}$), 切削用量与刀具耐用度的关系为

$$T = \frac{C_T}{v^5 f^{2.25} a_p^{0.75}} \quad (1-31)$$

由上式可见,切削速度 v 对刀具耐用度的影响最大,进给量 f 次之,背吃刀量 a_p 最小。这与三者对切削温度的影响顺序完全一致,说明切削温度对刀具耐用度有着重要的影响。在保证一定刀具耐用度的条件下,为提高生产率,应首先选取大的背吃刀量,然后选取较大的进给量,最后选择合理的切削速度。

1.5.4 刀具耐用度的选择

从以上的分析可以得知,切削用量与刀具耐用度密切相关。若刀具耐用度选得过高,切削用量势必被限制在很低的水平,使切削工时增加。虽然此时刀具的消耗及其费用较少,但过低的加工效率也会使经济效果变得很差。若刀具耐用度选得过低,虽可提高切削用量,降低切削工时,但由于刀具磨损加快使装刀、卸刀刃磨的工时及调整机床的时间和费用显著增加,生产率反而会下降。生产中确定刀具耐用度有两种不同的原则,以单位时间内加工工件的数量为最多,或以加工每个零件所消耗的生产时间为最少的原则来确定的刀具耐用度,称为最大生产率耐用度 T_p ;以每件产品或工序的加工费用为最低的原则来确定刀具耐用度,称为最低成本耐用度 T_c 。

一般常根据最低成本来确定刀具耐用度,当任务紧迫或生产中出现不平衡的薄弱环节时,才采用最大生产率耐用度。

选择刀具耐用度时,还应考虑如下几点:

(1) 刀具复杂程度、制造和磨刀成本低的简单的刀具,如车刀、钻头等,耐用度选的低些;结构复杂和精度高的刀具,如拉刀、齿轮刀具等,耐用度选得高些。

(2) 对于机夹可转位车刀和陶瓷刀具,由于换刀时间短,为了充分发挥其切削性能,提高生产率,耐用度可选得低些,一般取 15~30min。

(3) 对于装刀、换刀和调刀比较复杂的多刀机床、组合机床与自动化加工刀具,耐用度应选得高些。

(4) 精加工尺寸很大的工件时,刀具耐用度应按零件精度和表面粗糙要求决定。为避免在加工同一表面时中途换刀,耐用度应规定至少能完成一次走刀。

1.5.5 刀具的破损

硬质合金和陶瓷刀具在切削时,在机械和热冲击作用下,经常发生突然损坏,使刀具提前失去切削能力,这种情况就称为刀具破损。

1. 刀具破损的形式

刀具破损有脆性破损和塑性破损两种类型。

(1) 脆性破损。

硬质合金和陶瓷刀具在进行断续切削时,或者加工高硬度材料时,在机械冲击力和热效应作用下,经常发生脆性破损。刀具的脆性破损又有崩刃、碎断、剥落及裂纹等几种不同的形式。

崩刃是指在切削刃上产生小的缺口,在断续、冲击切削条件下,或用脆性刀具材料切削时易引起崩刃,如陶瓷刀具最常发生这种崩刃。碎断是指在切削刃上发生小块碎裂或大块

断裂,不能继续正常切削。剥落是指在前、后刀面上几乎平行于切削刃而剥下一层碎片,经常连切削刃一起剥落,有时也在离切削刃一小段距离处剥落,常因为刃磨造成内应力、积屑瘤脱落和重载切削而形成。裂纹破损是指在较长时间切削后,由于疲劳而引起裂纹的一种破损,当这些裂纹不断扩展合并,就会引起切削刃的碎裂或断裂。

(2) 塑性破损。

切削时,由于高温和高压的作用,有时在切削刃或刀面上发生塌陷或隆起的塑性变形现象,就是刀具的塑性破损,如卷刃等。刀具材料和工件材料的硬度比越高,越不容易发生塑性破损。硬质合金、陶瓷刀具的高温硬度高,一般不容易发生这种破损;高速钢刀具因其耐热性比较差,就容易出现塑性破损。

2. 防止刀具破损的措施

刀具破损和刀具磨损一样,都是刀具失效的形式。为了防止或减少刀具破损,可以调整刀具几何角度,增加切削刃和刀尖的强度;在遇到冲击切削、重型切削和难加工材料的切削时,要注意合理选择刀具材料,必须采用具有较高的冲击韧度、疲劳强度和热疲劳抗力的刀具材料;可以选择合适的切削用量,一方面避免切削速度过低时导致切削力过大而崩刃,另一方面也要防止切削速度过高时可能产生热裂纹;要尽可能地保证工艺系统有较好的刚性,以减小切削时的振动。

1.6 金属切削条件的合理选择

1.6.1 工件材料的切削加工性

工件材料切削加工性是指在一定切削条件下,对工件材料进行切削加工的难易程度。根据不同的加工要求,可以用不同的指标来衡量材料的切削加工性。

1. 衡量材料切削加工性的指标

(1) 刀具耐用度 T 或一定耐用度下允许的切削速度 v_T 指标。

在相同切削条件下加工不同材料时,刀具使用寿命较长或在保证相同刀具耐用度的前提下,切削这种工件材料所允许的切削速度 v_T 较高的材料,其加工性较好;刀具的使用寿命较短或 v_T 较小的材料,加工性较差。

在切削普通金属材料时,常用刀具耐用度达到 60min 时所允许的切削速度的高低来评定材料加工性的好坏,记作 v_{60} 。 v_{60} 较高,则该加工材料的切削加工性较好;反之,其加工性较差。

衡量金属材料的切削加工性,经常使用相对加工性指标。即以正火状态 45 钢的 v_{60} 为基准,写作 $(v_{60})_j$,然后把其他各种材料的 v_{60} 同它相比,这个比值 K_r 称为该材料的相对加工性,即

$$K_r = v_{60} / (v_{60})_j \quad (1-32)$$

根据 K_r 的值,可将常用工件材料的相对加工性分为八级,见表 1-5。当 K_r 大于 1 时,材料比 45 钢易切削;当 K_r 小于 1 时,材料加工性比 45 钢差。

表 1-5 材料切削加工性等级

加工性等级	名称及种类		相对加工性 K_r	典型材料
1	很容易切削材料	一般有色金属	>3.00	5 5 5 铜铅合金, 9 4 铝铜合金, 铝镁合金
2	容易切削材料	易切削钢	2.50~3.00	退火 15Cr, $\sigma_b=0.37\sim0.441\text{GPa}(38\sim45\text{kg/mm}^2)$ 自动机钢 $\sigma_b=0.393\sim0.491\text{GPa}(40\sim50\text{kg/mm}^2)$
3		较易切削钢	1.60~2.50	正火 30 钢 $\sigma_b=0.441\sim0.549\text{GPa}(45\sim56\text{kg/mm}^2)$
4	普通材料	一般钢及铸铁	1.00~1.60	45 钢, 灰铸铁
5		稍难切削材料	0.65~1.00	2Cr13 调质 $\sigma_b=0.834\text{GPa}(85\text{kg/mm}^2)$ 85 钢 $\sigma_b=0.883\text{GPa}(90\text{kg/mm}^2)$
6	难切削材料	较难切削材料	0.50~0.65	45Cr 调质 $\sigma_b=1.03\text{GPa}(105\text{kg/mm}^2)$ 65Mn 调质 $\sigma_b=0.932\sim0.981\text{GPa}(95\sim100\text{kg/mm}^2)$
7		难切削材料	0.15~0.50	50CrV 调质, 1Cr18Ni9Ti, 某些钛合金
8		很难切削材料	<0.15	某些钛合金, 铸造镍基高温合金

(2) 切削力、切削温度或切削功率指标。

在粗加工或机床刚性、动力不足时,可用切削力作为工件材料切削加工性指标。在相同加工条件下,凡切削力大、切削温度高、消耗功率大的材料较难加工,切削加工性差;反之,则切削加工性好。例如,加工铜、铝及其合金时的切削力比加工钢料时小,故其切削加工性比钢料好。

(3) 加工表面质量指标。

加工中凡容易获得好的加工表面质量的材料,其切削加工性较好;反之,较差。

(4) 切屑控制或断屑的难易指标。

对于自动机床或自动线、柔性制造系统,常以此作为衡量材料切削加工性好坏的指标。切削时,凡切屑易于控制或断屑性能良好的材料,其切削加工性好;反之,则较差。

2. 改善材料切削加工性的途径

材料的切削加工性对生产率和表面质量影响很大,因此在满足零件使用要求的前提下,尽量选用或改善材料的切削加工性。当前,在实际生产中,经常通过进行适当的热处理或调整材料的化学成分两种方法来改善材料的切削加工性。

(1) 采用热处理改善材料切削加工性。

同样成分的材料,当金相组织不同时,它们的物理机械性能就不一样,因而可切削加工性就有差别。此时,可通过适当的热处理来改善材料的切削加工性。如低碳钢塑性太高,通过正火处理适当提高硬度并降低塑性;高碳钢硬度偏高,经过球化退火可降低硬度;对高硬度的铸铁,一般在切削加工前采用退火处理,可降低表层硬度,消除内应力,提高其可切削加工性。

实践证明,通过热处理改变材料的金相组织和机械性能,是有效改善材料的切削加工性的主要方法。

(2) 调整材料的化学成分。

材料的化学成分直接影响其力学性能,如碳素钢的强度、硬度随其含碳量的增加而提高,而塑性韧性则降低。因此,高碳钢和低碳钢的切削加工性都不如综合机械性能居于其中

的中碳钢。

在钢中添加如硫、磷、铅、钙等元素,对改善钢的切削加工性是有利的,这样的钢叫“易切钢”。但只有在满足零件对材料性能要求的前提下才能这样做。

1.6.2 刀具几何参数的选择

在保证加工质量的前提下,能够满足刀具使用寿命长、生产效率高、加工成本低的刀具几何参数,称为刀具的合理几何参数。

1. 刀具角度的选择

1) 前角 γ_0 的选择

增大前角可以减小切削变形和摩擦,从而减小切削力和切削功率,使切削时产生的热量减少,刀具寿命得以提高。增大前角还可以抑制积屑瘤的产生,改善已加工表面质量。但是,增大前角会使切削刃强度降低,容易造成崩刃;另一方面会降低散热效应,使切削温度升高。因此,前角过大,刀具寿命也会下降。

在一定的加工条件下,存在一个使刀具耐用度为最大值的前角 γ_{opt} ,通常称为刀具的合理前角。

加工塑性材料时,为了减小切屑变形和摩擦,宜选择较大的前角;加工脆性材料时,切屑呈崩碎状,切削力集中在切削刃附近,为了减少崩刃,宜选择较小前角。工件材料强度或硬度较小时,宜选较大前角,以使切削刃锋利;反之,宜选较小前角;当材料的强度或硬度特别大时,甚至可采用负前角。

前角选择与刀具材料有关,如高速钢刀具的前角可比硬质合金刀具选得大一些,因为高速钢的强度和冲击韧度比硬质合金高一些。

另外,前角的选择与加工性质有关。粗加工时,切削力及其冲击都比较大,为使切削刃有足够强度,宜选用较小前角;精加工时,切削力小,为使刃口锐利,保证加工质量,宜选用较大前角。

2) 后角 α_0 的选择

增大后角可减轻刀具后面与过渡表面之间的摩擦,使刀具后刀面磨损减小,寿命提高,故后角不能取负值。但是后角过大,刀具刃区强度降低,散热效果减小,刀具磨损加快,反而会使刀具耐用度降低。因此,在一定的条件下同样存在一个刀具耐用度较高的合理后角。

当切削层厚度很小时,磨损主要发生在刀具后面,为了减少后面磨损和使切削刃锋利,宜选用较大后角;当切削层厚度很大时,后角宜小,这样可以增强切削刃及改善散热条件。

其次,工件材料强度或硬度较高时,为了加强切削刃,宜取较小后角;工件塑性较大时,取较大后角可减轻刀具后面的摩擦。

工艺系统刚性差,容易出现振动时,应适当减小后角。

对于尺寸精度要求高的刀具,宜取较小后角,以增加刀具的重磨次数。

3) 主偏角 κ_r 和副偏角 κ_r' 的选择

主偏角和副偏角影响已加工表面的残留面积高度,减小主偏角和副偏角可以减小已加工表面粗糙度值,特别是副偏角对已加工表面粗糙度影响更大。

主偏角直接影响切削刃工作长度和单位长度切削刃上的切削负荷。在切削深度和进给量一定的情况下,增大主偏角,切削宽度减小,切削厚度增大,切削刃单位长度上的负荷随之

增大。因此,主偏角直接影响刀具的磨损和使用寿命。

粗加工和半精加工时,硬质合金车刀一般选用较大的主偏角,以利于减小振动,延长刀具使用寿命,容易断屑和可以采用大的切削深度。加工很硬的材料时,如淬硬钢和冷硬铸铁,为减轻单位长度切削刃上的负荷,同时为改善刀头导热和容热条件,延长刀具使用寿命,宜取较小的主偏角。工艺系统刚性较好时,较小主偏角可延长刀具使用寿命;刚性不足(如车细长轴)时,应取较大的主偏角,甚至 $\kappa_r \geq 90^\circ$,以减小背向力 F_P 。

选取副偏角首先应满足已加工表面质量要求,然后再考虑刀尖强度、导热和容热要求。在不引起振动的情况下,一般副偏角可选取较小的数值,即 $\kappa'_r = 5^\circ \sim 10^\circ$ 。精加工刀具的副偏角应取小值。加工高强度高硬度材料或断续切削时,应取小的副偏角($\kappa'_r = 4^\circ \sim 6^\circ$),以提高刀尖强度。对于切断刀、锯片铣刀和槽铣刀等,为了保证刀头强度和重磨后刀头宽度变化较小,只能取很小的副偏角,即($\kappa'_r = 1^\circ \sim 2^\circ$)。

4) 刃倾角的选择

刃倾角的大小影响刀尖强度和散热条件,如图 1.63 所示。当 $\lambda_s < 0^\circ$ 时,使远离刀尖的切削刃先切入工件,避免刀尖受到冲击,同时可使刀头强固,刀尖处导热和散热条件较好,有利于延长刀具使用寿命。刃倾角控制切屑流出方向,当 $\lambda_s = 0^\circ$ 时,切屑流出的方向垂直于主切削刃;当 $\lambda_s > 0^\circ$ 时,切屑流向待加工表面;当 $\lambda_s < 0^\circ$ 时,切屑流向已加工表面,会缠绕或划伤已加工表面。

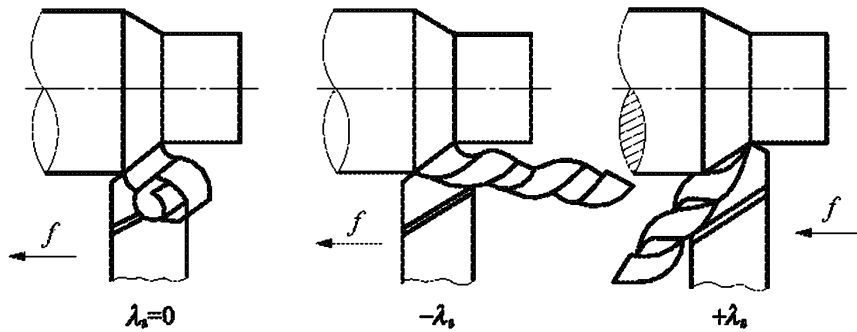


图 1.63 刃倾角对切屑流向的影响

一般精加工钢、铸铁时 $\lambda_s = 0^\circ \sim +5^\circ$,粗加工时 $\lambda_s = 0^\circ \sim -5^\circ$ 。在加工高硬质、高强度金属,加工断续表面或有冲击载荷时,取 $\lambda_s = -5^\circ \sim -15^\circ$,冲击特别大时取 $\lambda_s = -30^\circ \sim -45^\circ$ 。

1.6.3 切削用量的选择

1. 切削用量的选用原则

选择切削用量就是根据切削条件和加工要求,确定合理的背吃刀量 a_p 、进给量 f 和切削速度 v_c 。所谓合理的切削用量,就是指在保证加工质量的前提下,能获得较高生产效率和较低生产成本的切削用量。

1) 切削用量与生产率、刀具耐用度的关系

切削用量的合理选择对生产效率和刀具耐用度有着重要的影响。机床的切削效率可以用单位时间内切除的材料体积 Q 表示:

$$Q = a_p f v_c \tag{1-33}$$

由式(1-33)可知, Q 同切削用量三要素 a_p 、 f 、 v_c 均有着线性关系, 它们对机床切削效率影响的权重是完全相同的。仅从提高生产效率看, 切削用量三要素 a_p 、 f 、 v_c 中任一要素提高一倍, 机床切削效率都能提高一倍, 但 v_c 提高一倍与 f 、 a_p 提高一倍对刀具耐用度的影响却是大不相同的。由式(1-31)可知, 切削用量三要素中对刀具耐用度影响最大的是 v_c , 其次是 f , 最小的是 a_p 。因此, 制定切削用量时不能仅仅单一地考虑生产效率, 还要兼顾到刀具耐用度。

2) 切削用量的选用原则

据上述分析可知, 在保证刀具耐用度一定的条件下, 提高背吃刀量 a_p 比提高进给量 f 的生产效率高, 比提高切削速度 v_c 的生产效率更高。由此, 切削用量选用的基本原则可以从切削加工的两个阶段来考虑:

(1) 粗加工阶段切削用量的选用。粗加工阶段加工精度要求和表面质量要求低, 切削用量应根据切削用量对刀具耐用度的影响大小, 首先选取尽可能大的背吃刀量 a_p , 其次选取尽可能大的进给量 f , 最后按照刀具耐用度的限制确定合理的切削速度 v_c 。

(2) 精加工阶段切削用量的选用。精加工阶段加工精度要求和表面粗糙度要求都较高, 而切削用量三要素 a_p 、 f 、 v_c 对加工精度和表面粗糙度的影响是不同的。精加工阶段的切削用量应选用较高的切削速度 v_c 、尽可能大的背吃刀量 a_p 和较小的进给量 f 。

2. 切削用量三要素的选用

1) 背吃刀量 a_p 的选用

背吃刀量 a_p 根据加工余量确定。粗加工时, 一般是在保留半精加工和精加工余量的前提下, 尽可能用一次进给切除全部加工余量, 以使走刀次数最少。在中等功率的机床上, a_p 可达 8~10mm。只有在加工余量太大, 导致机床动力不足或刀具强度不够; 加工余量不均匀, 导致断续切削; 工艺系统刚性不足等的情况下, 为了避免振动才分成两次或多次走刀。采用两次走刀时, 通常第一次走刀取 $a_{p1} = (2/3 \sim 3/4)$ 加工余量, 第二次走刀取 $a_{p2} = (1/4 \sim 1/3)$ 加工余量。切削表层有硬皮的铸锻件或切削冷硬倾向较为严重的材料(如不锈钢)时, 应尽量使 a_p 值超过硬皮或冷硬层深度, 以免刀具过快磨损。

半精加工时, 通常取 $a_p = 0.5 \sim 2\text{mm}$ 。精加工时背吃刀量不宜过小。若背吃刀量太小, 因刀具刃口都有一定的钝圆半径, 使切屑形成困难, 已加工表面与刃口的挤压、摩擦变形较大, 反而会降低加工表面的质量。所以, 精加工时, 通常取 $a_p = 0.1 \sim 0.4\text{mm}$ 。

2) 进给量 f 的选用

粗加工时, 对加工表面粗糙度的要求不高, 进给量 f 的选用主要受切削力的限制。在工艺系统刚性和机床进给机构强度允许的情况下, 合理的进给量应是它们所能承受的最大进给量。半精加工和精加工时, 进给量 f 的选用主要受表面粗糙度和加工精度要求的限制。因此, 进给量 f 一般选得较小。

实际生产中, 经常采用查表法确定进给量。粗加工时, 根据加工材料、车刀刀杆直径、工件直径及已确定的背吃刀量 a_p 查取进给量 f 的值。半精加工和精加工时, 需按表面粗糙度选择进给量 f 。

3) 切削速度 v_c 的选用

粗加工时, 切削速度 v_c 受刀具耐用度和机床功率的限制; 精加工时, 机床功率足够, 切削

速度 v_c 主要受刀具耐用度的限制。

(1) 用公式计算切削速度 v_c 。根据已经选定的背吃刀量 a_p 、进给量 f 及刀具寿命 T ，可以用公式计算切削速度 v_c ：

$$v_c = \frac{C_v}{T^m a_p^{x_v} f^{y_v}} K_v \quad (1-34)$$

式中， C_v 为切削速度系数； m 、 x_v 和 y_v 分别是 T 、 a_p 和 f 的指数； K_v 为切削速度的修正系数（即工件材料、毛坯表面状态、刀具材料、加工方式、主偏角 κ_r 、副偏角 κ_r' 、刀尖圆弧半径 r_c 及刀杆尺寸对切削速度的修正系数的乘积）。

上述系数、指数和各项修正系数均可由有关资料查得。

(2) 用查表法确定。切削速度 v_c 还可以用查表法确定，可参见有关文献。

(3) 在确定切削速度时，还需注意的是，精加工时，应尽量避免产生积屑瘤的速度区；断续切削时，应适当降低切削速度；在易产生振动的情况下，机床主轴转速应选择能进行稳定切削的转速区进行；加工大件、细长件、薄皮件及带铸、锻外皮的工件时，应选较低的切削速度。

1.6.4 切削液的选择

金属切削液在金属切削、磨削加工过程中具有相当重要的作用。实践证明，选用合适的切削液，除了能有效地降低切削温度和切削力，起到冷却作用外，还可以起到润滑和防锈的作用。对提高加工精度、减小已加工表面粗糙度数值、减少工件热变形、延长刀具的使用寿命具有很重要的作用。切削加工中最常用的切削液可分为水溶液、乳化液和切削油三大类。

1) 水溶液

水溶液的主要成分为水，并加入一定的添加剂。其冷却性能最好，加入防锈添加剂和油性添加剂后又具有一定的润滑和防锈性能，呈透明状，便于操作者观察。广泛应用于普通磨削和粗加工中。

2) 乳化液

乳化液是由 95%~98% 的水加入适量的乳化油（矿物油、乳化剂及其他添加剂配制而成）形成的乳白色或半透明切削液。按乳化油的含量不同，可配制成不同浓度的乳化液。低浓度乳化液主要起冷却作用，适用于磨削、粗加工；高浓度乳化液主要起润滑作用，适用于精加工及复杂工序的加工。

3) 切削油

切削油主要有各种矿物油（如机械油、轻柴油、煤油等）、动植物油（如豆油、猪油等）和加入矿物油与动植物油的混合油，主要起润滑作用。

金属切削过程中，要根据加工性质、工件材料、刀具材料和加工方法来合理选择切削液。如选用不当，就得不到应有的效果。

1.7 磨削原理

1.7.1 砂轮的特性与选择

砂轮是由磨料和结合剂以适当的比例混合，经压坯后烧结而成。它由磨料、结合剂和气

孔三个要素组成。磨粒相当于切削刀具的切削刃,起切削作用;结合剂使各磨料位置固定;气孔则有助于容屑、排屑。决定砂轮特性的五个要素分别是:磨料、粒度、结合剂、硬度和组织。

1. 磨料

磨料是砂轮的主要成分,常用的磨料有氧化物系、碳化物系和高硬磨料系三类。氧化物系磨料的主要成分是三氧化二铝;碳化物系磨料的主要成分是碳化硅和碳化硼;高硬磨料系中主要有人造金刚石和立方氮化硼(CBN)。常用磨料的特性及适用范围见表 1-6。

表 1-6 磨料的特性及使用范围

系 列	磨料名称	代 号	颜 色	特 性	用 途
氧化物系	棕刚玉	A	棕褐色	硬度高,韧性大,价格便宜	磨削、研磨和珩磨碳钢、合金钢、可锻铸铁及硬青铜
	白刚玉	WA	白色	硬度比棕刚玉高,韧性较棕刚玉低	磨削、研磨和珩磨淬火钢、高速钢、高碳钢等
碳化物系	黑碳化硅	C	黑色,有光泽	硬度比白刚玉高,性脆而锋利,导热性和导电性良好	磨削和研磨铸铁、黄铜、铝及非金属材料
	绿碳化硅	GC	绿色	硬度和脆性比黑碳化硅高,具有良好的导热性和导电性	磨削和研磨硬质合金、宝石、陶瓷、玉石、玻璃
高硬磨料系	人造金刚石	D	无色透明或淡黄色、黄绿色、黑色	硬度高,比天然金刚石脆	磨削和研磨硬质合金、宝石等脆性材料
	立方氮化硼	CBN	黑色或淡白色	立方晶体,硬度仅次于金刚石,耐磨性高	磨削和研磨各种高温合金、不锈钢等各种高硬度高韧性材料

2. 粒度

粒度表示磨料尺寸的大小。当颗粒尺寸较大时(磨料直径 $>40\mu\text{m}$),常用粒度号表示其粒度。其粒度号数值就是该种颗粒能通过筛网上每英寸(25.4mm)长度上的孔数,如 60 号粒度表示磨料能通过每英寸有 60 个孔眼的筛网。粒度号越大,磨料越细。当磨料直径 $\leq 40\mu\text{m}$ 时,粒度以实际尺寸表示,称为微粉。如粒度号为 W20,表示用显微镜测得实际尺寸为 $20\mu\text{m}$ 的微粉。W 后的数字越小,微粉越细。

粗磨时,使用颗粒较粗的砂轮,以提高磨削生产率;精磨时,使用颗粒较细的砂轮,以减小加工表面粗糙度;砂轮速度较高时,或砂轮与工件间接触面积较大时,选用颗粒较粗的砂轮,以免发热过大引起工件表面烧伤;磨削材料较软、塑性较大的材料时,为避免砂轮堵塞,也常采用颗粒较粗的砂轮;磨削材料较硬、脆性较大的材料时,常选用颗粒较细的砂轮,以增加同时参加磨削的磨粒数,提高生产率。常用磨料的粒度、尺寸及应用范围

见表 1-7。

表 1-7 常用粒度及适用范围

类别	粒度	颗粒尺寸/ μm	应用范围	类别	粒度	颗粒尺寸/ μm	应用范围
磨料	12 [#] ~36 [#]	2000~1600	荒磨	微粉	W40~W28	40~28	珩磨
		500~400	打毛刺			28~20	研磨
	46 [#] ~80 [#]	400~315	粗磨、半 精磨、精磨		W20~W14	20~14	研磨、超级加 工、超精磨削
		200~160				14~10	
	100 [#] ~280 [#]	160~125	精磨		W10~W5	10~7	研磨、超级加 工、超精磨削
		50~40	珩磨			5~3.5	

3. 结合剂

结合剂的作用是将磨料粘合,使砂轮具有一定的强度和形状。砂轮的强度、抗冲击性、耐热性、抗腐蚀性及抗潮湿等性能,主要取决于结合剂的性能。常用的结合剂有陶瓷、树脂、橡胶和金属,它们的性能及适用范围见表 1-8。

表 1-8 结合剂的种类及适用范围

结合剂	代号	性能	使用范围
陶瓷	V	耐热、耐蚀,气孔率大,易保持廓形,弹性差	最常用,适用于各类磨削加工
树脂	B	强度较陶瓷高,弹性好,耐热性差	适用于高速磨削,切断、开槽等
橡胶	R	强度更高,弹性更好,耐热性差,易堵塞	适用于切断、开槽及作无心磨的导轮
金属	M	强度最高,型面保持性好,磨耗少,自锐性差	常用的是青铜结合剂,适用于金刚石砂轮

4. 硬度

砂轮的硬度是指砂轮上磨料受力后从砂轮表层脱落的难易程度,它反映了磨料与结合剂的粘结强度。砂轮硬度高,磨料不易脱落;反之,磨料容易脱落。磨削时,若砂轮太硬,则磨钝了的磨料不能及时脱落,会使磨削温度升高而造成工件烧伤;若砂轮太软,则磨料脱落过快而不能充分发挥磨料的磨削效能。

砂轮硬度的选用应遵循以下原则。

(1) 工件材料较硬时应选用较软的砂轮,工件材料较软时应选用较硬的砂轮;但若工件材料太软,则材料易使砂轮堵塞,故也要选用软些的砂轮,这样可使堵塞处较易脱落。

(2) 砂轮与工件的磨削接触面大时,应选用较软的砂轮,使磨料容易脱落,以防止砂轮堵塞;砂轮颗粒较细时,选用较软的砂轮,以防止砂轮堵塞。

(3) 精磨与成形磨时,应选用硬些的砂轮,以利于保持砂轮的廓形。

砂轮硬度等级和代号见表 1-9。机械加工中,最常使用的砂轮硬度等级是软 2(H)至中 2(N)。

表 1-9 砂轮的硬度等级名称及代号

大级名称	超软			软 1			中软		中		中硬			硬		超硬
小级名称	超软			软 1	软 2	软 3	中软 1	中软 2	中 1	中 2	中硬 1	中硬 2	中硬 3	硬 1	硬 2	超硬
代号	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P	Q	R	S	T	Y

5. 组织

砂轮组织表示磨料、结合剂、气孔三者体积的比例关系。磨料在砂轮总体积中所占比例越大,则气孔越小(少),砂轮组织越紧密;反之,组织越疏松。

表 1-10 为砂轮的等级及适用范围。

砂轮组织级别分为紧密、中等、疏松三大类。紧密组织砂轮适用于重压下的磨削;中等组织砂轮适用于一般磨削;疏松组织砂轮不易堵塞,适用于平面磨、内圆磨等磨削接触面大的磨削,以及磨削热敏感性强的材料或薄壁工件。

表 1-10 砂轮的等级及适用范围

组织号	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
磨料率/%	62	60	58	56	54	52	50	48	46	44	42	40	38	36	34	
疏密程度	紧 密				中 等				疏 松							
适用范围	重负荷磨削,成形、精密磨削,间断磨削,或加工脆性材料等				无心磨,内、外磨和工具磨,淬火钢及刀具刃磨				粗磨和磨削韧性大、硬度不高的工件,适合磨削薄壁、细长工件或平面磨削				有色金属及非金属材料			




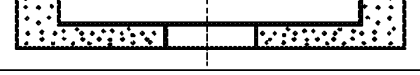
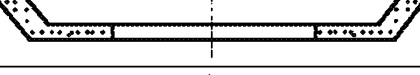
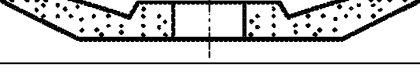

6. 砂轮的形状及尺寸

为了适应不同的加工要求,砂轮应制成不同的形状。同样形状的砂轮,还制成多种不同的尺寸。常用的砂轮形状、代号及用途见表 1-11。

7. 砂轮的规格尺寸标志

在砂轮的端面上一般均印有砂轮的标志。标志的顺序是:形状代号,尺寸,磨料,粒度号,硬度,组织号,结合剂,线速度。例如,一砂轮标记为“砂轮 1-400×60×75-WA60-L5V-35m/s”则表示外径为 400mm,厚度为 60mm,孔径为 75mm;磨料为白刚玉(WA),粒度号为 60;硬度为 L(中软 2),组织号为 5,结合剂为陶瓷(V);最高工作线速度为 35m/s 的砂轮。

表 1-11 常用砂轮形状、代号及用途

砂轮名称	代号	断面形状	主要用途
平行砂轮	1		外圆磨,内圆磨,平面磨,无心磨,工具磨
筒形砂轮	2		端磨平面
双斜边砂轮	4		磨齿轮,磨螺纹
杯形砂轮	6		磨平面,磨内圆,刃磨刀具
碗形砂轮	11		刃磨刀具,磨导轨
蝶形 1 号砂轮	12a		磨齿轮,磨铣刀,磨铰刀,磨拉刀
薄片砂轮	41		切断、切槽

1.7.2 磨削过程

1. 磨粒形状特征

磨削时砂轮表面上有许多磨料参与磨削工作,每颗磨料都可以看作一把微小的刀具。磨粒一般是用机械方法破碎磨料而获得,所以形状是极不规则的多面体,常见的几种磨粒形状如图 1.64 所示。磨粒的顶锥角通常为 $90^\circ \sim 120^\circ$,因此,磨削时磨粒基本上以较大的负前角($-60^\circ \sim -80^\circ$)进行切削;同时尖部均有钝圆,钝圆半径 r_n 大约在几微米至几十微米之间,磨粒磨损后 r_n 还将增大。此外,由于砂轮上的磨粒具有形状各异和分布的随机性,导致了它们各自的几何形状和切削角度差异很大,工作情况相差甚远。工作时,磨削速度高达 $1000 \sim 7000\text{m/min}$,磨削点的瞬时温度可达 1000°C 以上,使去除相同体积的材料所消耗的能量达到车削时的 30 倍。

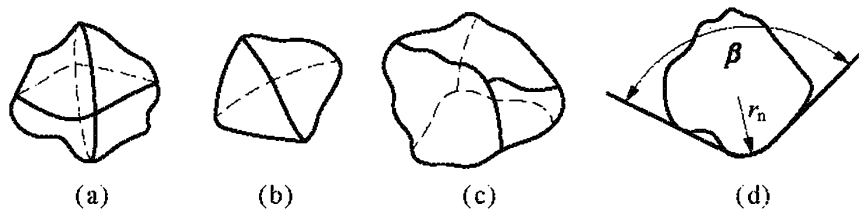


图 1.64 磨粒的形状

2. 磨屑的形成过程

砂轮表面的磨粒在切入零件时,其作用大致可分为 3 个阶段,如图 1.65 所示。

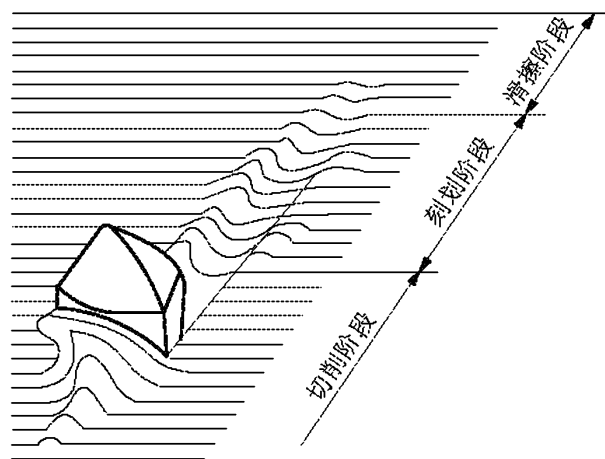


图 1.65 磨料的切削过程

(1) 滑擦阶段(弹性变形阶段)。

磨粒开始与零件接触,切削厚度由零逐渐增大。磨料仅在工件表面滑擦而过并发生强烈的挤压摩擦,不能切入工件,仅在工件表层产生热应力。

(2) 刻划阶段(塑性变形阶段)。

随着磨削深度的增加,磨粒与零件表面的摩擦和挤压作用加剧,磨粒开始切入零件,工件表面由弹性变形逐步过渡到塑性变形,使工件材料因受挤压而向两旁隆起,工件表面出现划痕,但磨料前刀面上没有磨屑流出。

(3) 切削阶段(磨屑形成阶段)。

当磨料的磨削深度继续增大时,磨削温度不断升高,挤压力大于零件材料的强度,材料明显地沿剪切面滑移,从而形成切屑由磨料前刀面流出。

以上仅是单颗磨料的磨削过程,由于磨料在砂轮上的分布极不规则,各磨料在磨削中所起作用便不相同,砂轮上只能有部分磨料完成整个切削过程的三个阶段,切下磨屑。而有些磨料只能起到滑擦或刻划作用。所以磨削过程是包含切削、滑擦和刻划作用的综合过程。

1.7.3 磨削力

磨削也与其他切削加工一样,磨削力来源于两方面:工件材料产生变形时的抗力和与工件间的摩擦力。同样也可将磨削力分解为三个方向:轴向、径向与切向。

1. 磨削力

磨削时,总磨削力 F 可分为相互垂直的三个分力:主磨削力(沿砂轮切向的切向磨削力) F_c 、背向力(沿砂轮径向的径向磨削力) F_p 和进给力 F_f (沿砂轮回转轴线方向的轴向磨削力),如图 1.66 所示。

由于磨料形状的特殊和磨削过程的复杂性,磨削力有以下不同于其他切削力的主要特征:

(1) 单位磨削力很大。

由于磨料几何形状的随机性和几何参数的不合理,单位磨削力值 K_c 一般在 $7 \times 10^4 \sim 20 \times 10^4 \text{ MPa}$ 之间变化,远远高于其他切削加工的单位切削力。其他切削加工的 K_c 值均在 7000 MPa 以下。

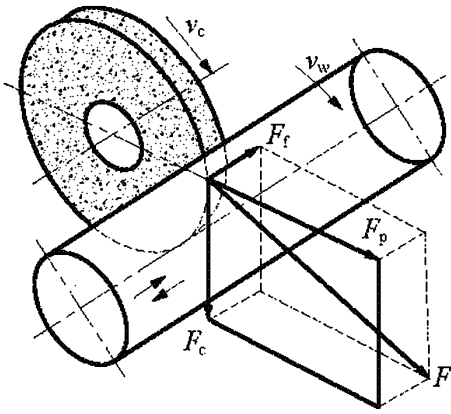


图 1.66 磨削受力分析

(2) 三项磨削分力中径向分力 F_p 最大。

一般切削加工中往往切向分力为最大,在正常的磨削时,径向分力远远超出切向分力, F_p/F_c 的比值约为 2.0~2.5。径向力虽然不耗功,但会使工件产生水平方向的弯曲变形,影响加工精度。

(3) 磨削力随不同的磨削阶段而变化。

在初磨阶段,径向分力 F_p 较大,工艺系统产生弹性变形,实际径向进给量远小于名义进给量。在稳定阶段,径向分力逐渐稳定,工艺系统弹性变形基本保持稳定,实际进给量基本等于名义进给量。在清磨阶段,实际进给量逐渐减小到零,径向分力逐渐减小。

2. 磨削功率

磨削时,砂轮速度很高,所以功率消耗很大,主运动所消耗的功率为

$$P_m = F_c v_c \text{ (W)} \tag{1-35}$$

式中, P_m ——为主运动所消耗的功率;

F_c ——主磨削力, N;

v_c ——为砂轮线速度, m/s。

3. 磨削用量

(1) 砂轮线速度 v_c 。

砂轮的回转运动为主运动,其速度即砂轮线速度称作磨削速度,用 v_c 表示:

$$v_c = \frac{\pi d_c n_c}{1000} \text{ (m/s)} \tag{1-36}$$

式中, d_c ——砂轮直径, mm;

n_c ——砂轮转速, r/s。

砂轮线速度一般比车削速度大 10~15 倍左右,但 v_c 太高时,可能会产生振动或工件表面烧伤。一般 $v_c = 30 \sim 35$ m/s; 高速磨削时,可用 $v_c = 45 \sim 100$ m/s 或更高些。

(2) 工件速度 v_w 。

外(内)圆磨削时,进给运动为工件的回转运动,平面磨削时,进给运动为工作台的直线往复运动。工件速度 v_w 是指工件圆周线速度,或工作台移动速度。

粗磨时,时常取 $v_w = 15 \sim 85$ m/min; 精磨时为 15~50 m/min。外圆磨时,速比 $q = v_c/v_w = 60 \sim 150$; 内圆磨时, $q = 40 \sim 80$ 。 v_w 太低时工件易烧伤; v_w 太高时磨床可能产生振动。

(3) 磨削深度 a_p 。

粗磨时,可取 $a_p = 0.01 \sim 0.07$ mm; 精磨时,可取 $a_p = 0.0025 \sim 0.02$ mm; 镜面磨削时,可取 $a_p = 0.0005 \sim 0.0015$ mm。

(4) 砂轮轴向进给量 f_a 。

砂轮轴向进给量 f_a 是指工件每转一转或每一往复时砂轮的轴向位移量(mm)。设砂轮宽度为 b , 则粗磨时,取 $f_a = (0.3 \sim 0.85)b$; 精磨时,取 $f_a = (0.1 \sim 0.3)b$ 。

1.7.4 磨削温度

1. 磨削温度

砂轮上的磨粒由于在负前角和极高速度下进行切削,磨粒和工件产生强烈的摩擦,并发生急剧的塑性变形。磨削切除单位体积切削层所消耗的功率为车、铣等切削加工方式的10~20倍。磨削中所消耗的大量能量迅速转变为热能,使磨削区表层的温度升高达1000℃以上,这将引起加工表面物理力学性能改变,引起工件尺寸精度和表面质量的降低,甚至会导致磨削表面的热损伤,热损伤表现为表面烧伤和热裂纹。因此,研究磨削温度并加以控制是提高表面质量和保证加工精度的重要方面。

磨削温度主要分为以下3种:

(1) 砂轮与工件接触面平均温度。

磨削温度通常指的是砂轮与工件接触面平均温度,接触面温度对磨削烧伤、磨削裂纹及工件的加工变质层的性质有很大影响。

(2) 磨粒接触区温度。

磨粒接触区温度是指单个磨粒和工件接触面的温度,这个温度可以达到1400℃以上。但是它仅作用在砂轮与工件接触区的一些离散点上,因此对工件的表面质量没有明显影响,但对磨粒的磨损有很大影响。

(3) 工件的平均温升。

砂轮与工件接触面的热量传到工件,工件的整体温度就会逐渐积累而升高。

由此可见,磨削温度虽然通常指的是砂轮与工件接触面平均温度,但实际上,磨粒和工件接触面的温度才是真正的磨削点的温度。例如,磨粒磨削点温度瞬时可达1000℃左右,可砂轮磨削区的磨削温度只有几百度,而整个工件的温升却不到几十度。

2. 影响磨削温度的主要因素

(1) 砂轮速度。

随着砂轮线速度 v_c 的增大,单位时间内通过工件表面的磨料数增多,单颗磨料的切削深度减小,挤压和摩擦作用加剧,单位时间内产生的热量增加,使磨削温度升高。

(2) 径向进给量。

随着径向进给量 f_r 的增大,单颗磨料的切削深度增大,产生的热量增多,磨削温度升高。

(3) 工件速度。

随着工件速度 v_w 的增大,单位时间内进入磨削区的工件材料增加,单颗磨料的切削深度增大,磨削温度升高;但从热量传递的方面分析,工件表面被磨削点与砂轮的接触时间缩短,工件上受热影响区的深度较浅,可以有效防止工件表面层产生磨削烧伤和磨削裂纹;

所以,要使磨削温度降低,应该采用较小的径向进给量(即磨削深度) f_r 和砂轮线速度 v_c ,并加大工件速度 v_w 。

(4) 工件材料。

磨削韧性大、强度高、导热性差的材料,因为消耗于金属变形和摩擦的能量大,发热多,散热性能又差,所以磨削温度较高;磨削脆性大、强度低、导热性好的材料,磨削温度相对较低。

(5) 砂轮特性。

砂轮硬度对磨削温度的影响有明显的规律。硬度低,砂轮自锐性好,磨料的切削刃锋利,磨削力小,磨削温度就低,反之,磨削温度就高;砂轮粒度粗,容屑空间大,磨屑不易堵塞砂轮,磨削温度就低,反之,磨削温度就高。

思考与练习题

- 1-1 什么是切削用量三要素?什么是切削层参数?在外圆车削中,两者有什么关系?
- 1-2 刀具标注角度参考系是由哪些参考平面构成的?如何定义?
- 1-3 车刀的角度是如何定义的?标注角度与工作角度有何不同?
- 1-4 刀具材料应具备哪些性能?常用的刀具材料有哪些?各有什么用途?
- 1-5 常用的车刀有哪几大类?各有什么特点?
- 1-6 常用的孔加工刀具具有哪些?比较麻花钻、扩孔钻、铰刀在结构上的异同。
- 1-7 铣刀有哪些类型?它们的用途如何?
- 1-8 切削过程的3个变形区各有何特点?它们之间有什么关联?
- 1-9 什么是积屑瘤?它对切削过程有什么影响?如何控制积屑瘤的产生?
- 1-10 常见的切屑形态有哪几种?它们一般在什么情况下产生?怎样对切屑形态进行控制?
- 1-11 车削时切削合力为什么分为3个相互垂直的分力?试说明这3个分力的作用?
- 1-12 切削温度的含义是什么?它在刀具上是如何分布的?影响切削温度的主要因素有哪些?
- 1-13 刀具磨损的机理有哪些?刀具磨损过程分为哪几个阶段?
- 1-14 什么是刀具磨钝标准?什么是刀具耐用度?
- 1-15 何谓工件材料的切削加工性?衡量工件材料切削加工性的评价指标和评价方法有哪些?如何改善材料的切削加工性?
- 1-16 试述刀具角度的功用及选择原则?
- 1-17 选择切削用量的原则是什么?粗加工阶段和精加工阶段的切削用量的选择原则各有哪些?为什么?
- 1-18 粗加工时进给量的选择受哪些因素限制?当进给量受到表面粗糙度限制时,有什么办法能增加进给量而保证表面粗糙度要求?
- 1-19 在CA6140车床上粗车、半精车一套筒的外圆,材料为45钢(调质),抗拉强度 $\sigma_b = 681.5 \text{ MPa}$,硬度为200~230HBS,毛坯尺寸为 $d_w \times l_w = 80 \text{ mm} \times 350 \text{ mm}$,车削后的尺寸为 $d = \phi 75_{-0.25}^0 \text{ mm}$, $l = 340 \text{ mm}$,表面粗糙度值均为 $R_a 3.2 \mu\text{m}$ 。试选择刀具类型、材料、结构、几何参数及切削用量。
- 1-20 切削液的主要作用有哪些?切削液有哪些种类?如何选用?
- 1-21 试比较磨削和单刃刀具切削的异同。
- 1-22 砂轮的特性由哪些因素决定?
- 1-23 什么是砂轮硬度?砂轮硬度与磨料硬度和结合剂硬度各有什么关系?

第 2 章 机械加工方法与机床

教学提示:本章着重介绍常规的机械加工方法;金属切削机床型号的编制方法;常用的金属切削机床及其加工工艺范围;CA6140 型普通车床的传动系统及其主要结构;同时,对数控机床及加工中心也做了简单介绍。

教学要求:熟悉工件组成表面的类型及加工方法,学会正确选用机床的类型;掌握切削机床型号的编制方法及常见机床型号的含义;了解常用机床的结构组成、熟悉其加工工艺范围及加工方式;重点掌握 CA6140 卧式车床的主要部件结构、工作原理及传动系统分析方法,并能对其他类型机床的传动系统进行分析;了解数控机床及加工中心的加工特点。

机器零件尽管种类繁多,形式多样,但就其结构而言,均是由外圆、内圆、平面、螺纹、齿轮等典型表面组成的。加工零件的过程,实际上就是加工这些表面的过程。机械加工是利用机械对各种工件进行加工的方法。机械加工方法包括切削加工、磨削加工和精密加工。掌握合理的机械加工工艺方法是提高加工效率、降低成本的重要途径。

2.1 机械加工方法

2.1.1 零件表面的形成方法

1. 零件表面的形状

机器零件的结构形状尽管千差万别,但其轮廓都是由一些单一的几何表面(如平面、内外旋转表面及自由曲面等)按一定位置关系构成的。

零件表面可以看作一条线(称为母线)沿另一条线(称为导线)运动的轨迹。母线和导线统称为形成表面的发生线。常见的零件表面按形状可分为 3 类:

(1) 旋转表面。如图 2.1(a)所示,圆柱表面由平行于轴线的母线 A 沿圆导线 B 转动形成;图 2.1(b)所示圆锥表面由不平行于轴线但与轴线相交的母线 A 沿圆导线 B 转动形成;图 2.1(c)所示球面由圆母线 A 沿导线 B 转动形成。

(2) 纵向表面。如图 2.1(d)所示,平面由直母线 A 沿直导线 B 移动形成;图 2.1(e)所示曲面由直母线 A 沿曲线导线 B 移动形成;或者视为由曲线母线 A 沿直导线 B 移动形成,如图 2.1(f)所示。

(3) 特型表面。如图 2.1(g)所示,螺旋面由直母线 A 沿螺旋导线 B 运动(边做旋转运动 v' ,边做旋转运动 v'')形成。

2. 零件表面的形成方法及成形运动

要研究零件表面的形成方法,首先应研究表面发生线的形成方法。发生线是由刀具的

切削刃和工件间的相对运动得到的。根据使用的刀具切削刃形状和采取的加工方法,形成表面发生线的方法可归纳为以下 4 种:

(1) 轨迹法。

如图 2.2(a)所示,刀具切削点 1 按一定的规律作轨迹运动 3,形成所需的发生线 2。采用轨迹法形成发生线,刀具需要有一个独立的成形运动。

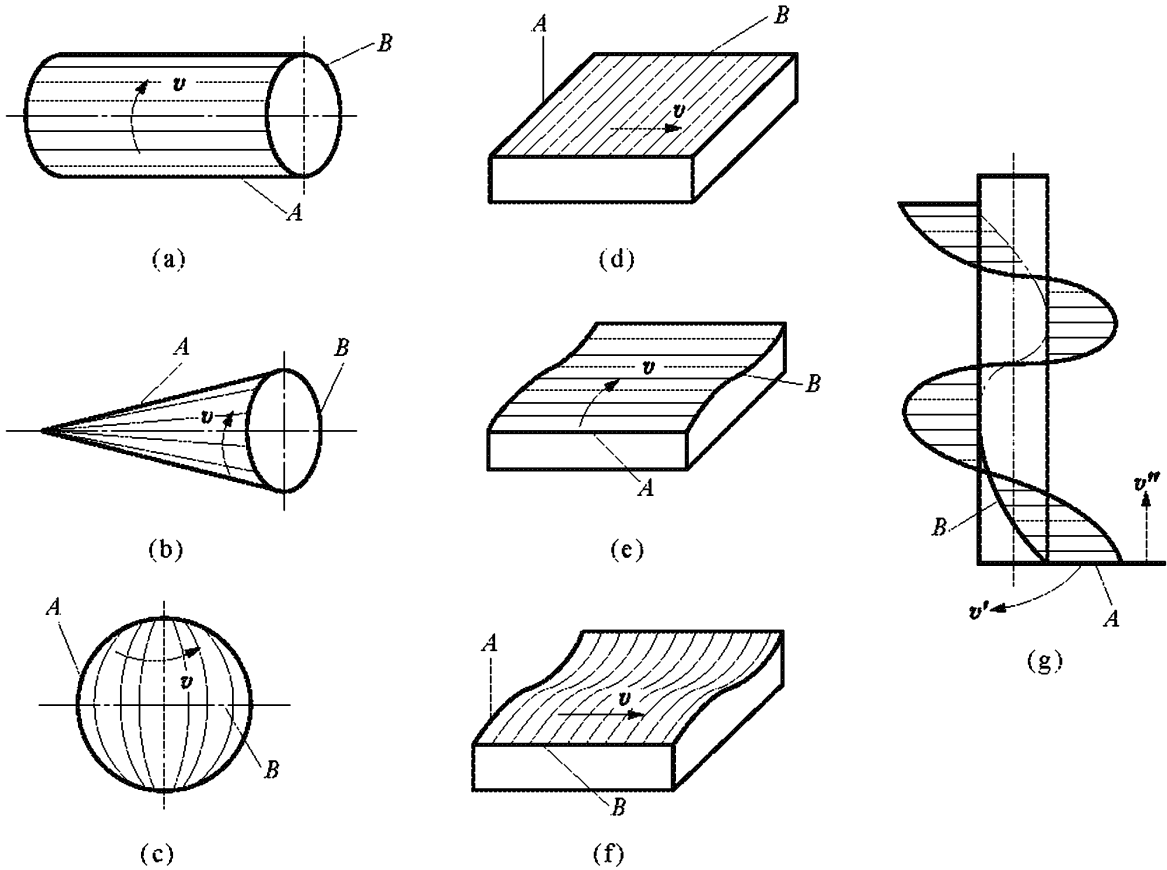


图 2.1 组成工件轮廓的各种几何表面

(2) 成形法。

如图 2.2(b)所示,切削刃为一条切削线 l ,它的形状及尺寸与需要成形的发生线 2 完全一致,因此刀具不需要专门的成形运动。

(3) 相切法。

如图 2.2(c)所示,当采用铣刀等旋转刀具加工时,刀具中心按一定规律作轨迹运动。切削刃可看作一个切削点 1,切削点运动轨迹与工件相切就形成了发生线 2,所以用相切法形成发生线,刀具需要有两个独立的成形运动,即刀具的旋转和刀具中心按一定规律运动。

(4) 展成法(范成法)。

如图 2.2(c)所示,用齿条插刀加工直齿圆柱齿轮时,刀具切削刃的形状为一条切削刃 1,切削线 1 与发生线 2 做纯滚动运动(展成运动),切削线 1 与发生线逐点相切,发生线是切削线的包络线。因此,用展成法形成发生线,刀具和工件需要有一个独立的复合成形运动 3 (展成运动)。

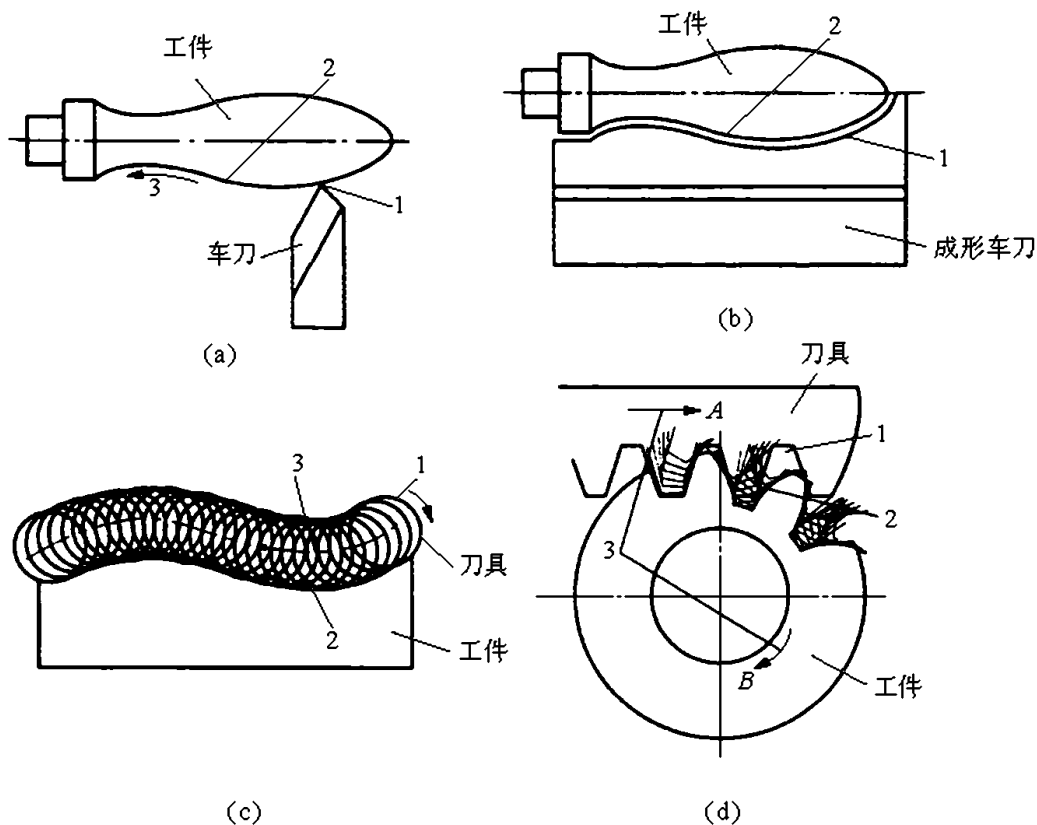


图 2.2 形成表面发生线的方法

2.1.2 切削加工

切削加工是利用切削工具从工件上切去多余材料,使工件获得符合图纸要求的几何形状、尺寸和表面质量的加工过程。切削加工是机械制造的重要方法之一,是提高零件的尺寸精度和表面质量的主要手段,在机械制造业中占有十分重要的地位,约占机械总制造量的40%~60%。切削加工对于零件的形状和尺寸一般不受限制,可加工如外圆、内圆、锥面、平面、螺纹、齿形面及空间曲面等各种型面。到目前为止,切削加工的精度等级一般为IT12~IT3,表面粗糙度 R_a 值为25~0.008 μm 。传统的切削加工的基本方法有车削、铣削、刨削、镗削和钻削等。

1. 车削加工

车削是指工件作回转主运动,车刀作进给运动的切削加工方法。车削加工主要用于加工回转面,并能加工平面,而这两种面在机械零件中应用最为广泛。因此,车削加工是机械加工方法中应用最普遍的加工方法。

车削加工由于加工过程连续,切削层公称横截面积恒定,切削力变化不大,切削过程平稳,所以车削加工的加工精度较高。而且车削加工经一次装夹就能加工出外圆面、内圆面、锥面、台阶面以及端面等,因此,依靠车床自身的精度就能保证各加工面之间的位置精度。

车削加工在一般情况下,车刀与工件始终接触,基本上没有冲击现象,可以采用很高的切削参数进行切削,所以生产率较高。而且,车削加工适应多种材料、多种表面、较大尺寸范围和精度等级,因此加工范围广泛。

此外,车削加工还有刀具简单、生产成本较低的特点。

2. 钻削加工

用钻头或铰刀、铰刀在工件上加工孔的方法统称钻、铰、铰加工,它可以在台式钻床、立式钻床、摇臂钻床上进行,也可以在车床、铣床、镗床或专用机床上进行。

1) 钻孔

钻孔是用钻头在实体材料上加工孔的一种加工方法,是最常见的孔加工方法之一。钻孔属于粗加工,按深径比(孔深与孔径之比)可分为浅孔钻和深孔钻。

(1) 浅孔钻是深径比 $L/D \leq 5$ 的孔。加工浅孔使用的刀具通常为麻花钻,加工精度等级一般为 IT12~IT10,表面粗糙度 R_a 值为 $25 \sim 3.2 \mu\text{m}$ 。

(2) 深孔钻是深径比 $L/D > 5$ 的孔。其中 $L/D = 5 \sim 20$ 的孔称为普通深孔,加工普通可用深孔刀具或接长麻花钻在车床或钻床上完成; $L/D = 20 \sim 100$ 的孔称为特殊深孔,加工特殊深孔需用深孔刀具在深孔加工机床上进行。

钻孔加工有两种方式,一种是钻头旋转,例如在钻床、镗床上钻孔;另一种是工件旋转,例如在车床上钻孔。钻头旋转时,当因切削刃不对称和钻头刚性不足而使钻头引偏时,被加工孔的中心线会发生偏斜或不直,但孔径基本不变;工件旋转时则相反,钻头引偏会引起孔径变化,孔的中心线仍是直的,如图 2.3 所示。

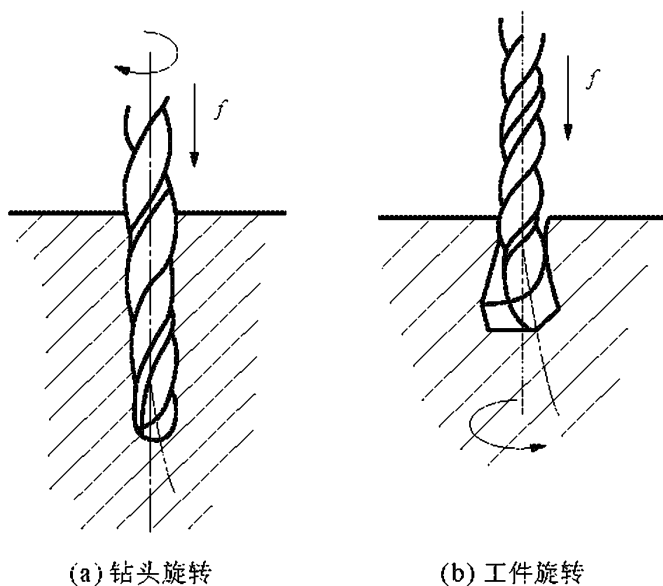


图 2.3 钻孔的两种方式

2) 扩孔

扩孔是用扩孔刀具扩大工件孔径的一种加工方法。扩孔钻与钻头类似,结构形式有:整体锥柄扩孔钻,扩孔直径为 $\phi 10 \sim \phi 32 \text{mm}$;镶齿套式扩孔钻,扩孔直径为 $\phi 25 \sim \phi 80 \text{mm}$;此外还有硬质合金可转位扩孔钻。扩孔属于半精加工,加工精度等级一般为 IT10~IT9,表面粗糙度 R_a 值为 $6.3 \sim 3.2 \mu\text{m}$ 。

3) 铰孔

铰孔是用铰刀在未淬硬工件孔壁上切除微量金属层,以提高工件尺寸精度和降低表面粗糙度的加工方法。铰孔可加工圆柱孔和圆锥孔,可以机铰,也可以手铰。铰孔属于精加工,可分为粗铰和精铰。粗铰的尺寸精度为 IT8~IT7,表面粗糙度 R_a 值为 $1.6 \sim 0.8 \mu\text{m}$;精

铰的尺寸精度为 IT7~IT6, 表面粗糙度 R_a 值为 $0.8\sim 0.4\mu\text{m}$ 。

4) 铰孔

铰孔是用铰钻加工各种沉头螺栓孔、锥孔、凸台面等的加工方法。铰孔一般在钻床上完成。

3. 镗削加工

镗削加工是在预制孔上用刀具使孔扩大的一种加工方法。镗孔工作既可以在镗床或镗铣床上进行, 也可以在车床上进行。在车床上镗孔时, 工件做旋转运动, 刀具作轴向进给运动。它的工艺特点是: 加工后孔的轴心线与工件的回转轴线一致, 孔的圆度主要取决于机床主轴的回转精度, 孔的轴向几何形状误差主要取决于刀具进给方向相对于工件回转轴线的位置精度。这种镗孔方式适于加工与外圆表面有同轴度要求的孔。

在镗床或镗铣床上镗削时, 镗刀作旋转主运动, 工件或镗刀作进给运动。下面分别加以介绍。

1) 刀具旋转, 工件作进给运动

图 2.4(a) 所示为在镗床上镗孔的情况, 镗床主轴带动镗刀旋转, 工作台带动工件作进给运动。这种镗孔方式镗杆的悬伸长度 L 一定, 镗杆变形对孔的轴向形状精度无影响。但工作台进给方向的偏斜会使孔中心线产生位置误差。镗深孔或离主轴端面较远孔时, 为提高镗杆刚度和镗孔质量, 镗杆由主轴前端锥孔和镗床后立柱上的尾座孔支撑。图 2.4(b) 为用专用镗模镗孔的情形, 镗杆与机床主轴采用浮动连接, 镗杆支撑在镗模的两个导向套中, 刚性较好。在这种镗孔方式中, 进给方向相对主轴轴线的平行度误差对所加工孔的位置精度无影响, 此项精度由镗模精度直接保证。

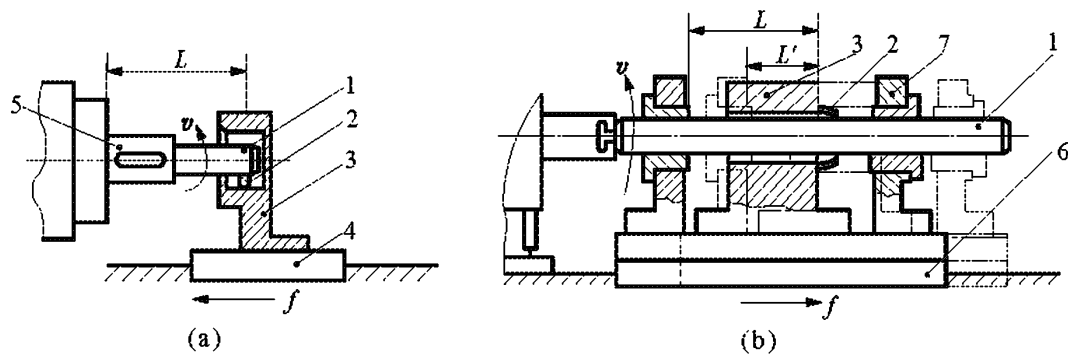


图 2.4 刀具旋转、工件进给的镗孔方式

1 镗杆; 2 镗刀; 3 工件; 4 工作台

2) 刀具旋转并作进给运动

如图 2.5 所示, 镗杆的悬伸长度是变化的, 镗杆的受力变形也是变化的, 镗出来的孔必然会产生形状误差, 靠近主轴箱处的孔径小, 造成形状误差。

镗孔是加工较大孔径最常用的方法之一, 箱体类零件上的孔以及要求相互平行或垂直的孔系通常都在镗床或镗铣床上镗孔。镗孔可作为粗加工、半精加工、精加工和精细加工。粗镗孔的尺寸精度为 IT12~IT11, 表面粗糙度 R_a 值为 $25\sim 12.5\mu\text{m}$; 精镗孔的尺寸精度为 IT8~IT7, 表面粗糙度 R_a 值为 $1.6\sim 0.8\mu\text{m}$; 精细镗孔的尺寸精度为 IT7~IT6, 表面粗糙度 R_a 值为 $0.8\sim 0.2\mu\text{m}$ 。

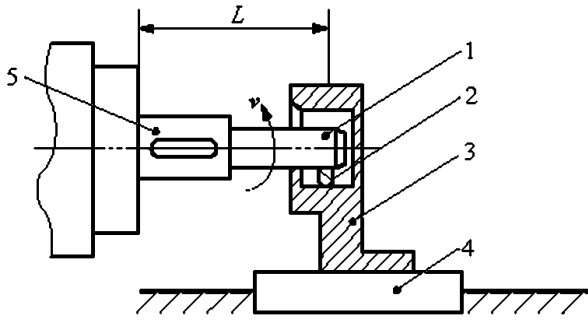


图 2.5 刀具旋转并进给的镗孔方式

1 镗杆;2 镗刀;3 工件;4 工作台;
5 主轴

4. 铣削加工

铣削是指铣刀作旋转主运动,工件作进给运动的切削加工方法。铣削加工可以在卧式铣床、立式铣床、龙门铣床、工具铣床以及各种专用铣床上进行。铣削加工的范围很广泛,能加工平面、台阶面、各种槽、型腔以及成形面。根据铣刀形式不同,用分布于铣刀端平面上的刀齿进行铣削称为端铣;用分布于铣刀圆柱面上的刀齿进行铣削称为周铣。周铣分为逆铣和顺铣两种方式。

(1) 逆铣。

铣削时,铣刀切入工件时的切削速度方向和工件的进给方向相反,这种铣削方式称为逆铣,如图 2.6(a)所示。

逆铣时,刀齿的切削厚度从零逐渐增大至最大值。刀齿在开始切入时,由于切削刃钝圆半径的影响,刀齿在已加工表面上滑擦一段距离后才能真正切入工件,因而刀齿磨损快,加工表面质量较差。此外,刀齿对工件的垂直铣削分力向上,容易使工件的装夹松动。铣床工作台的纵向进给运动一般是依靠丝杠和螺母来实现的。螺母固定不动,丝杠转动带动工作台一起移动。逆铣时,纵向铣削分力 F_f 与纵向进给方向相反,使丝杠与螺母间传动面始终贴紧,故工作台不会发生窜动现象,铣削过程较平稳。

(2) 顺铣。

铣削时,铣刀切出工件时的切削速度方向与工件的进给方向相同,这种铣削方式称为顺铣。如图 2.6(b)所示。

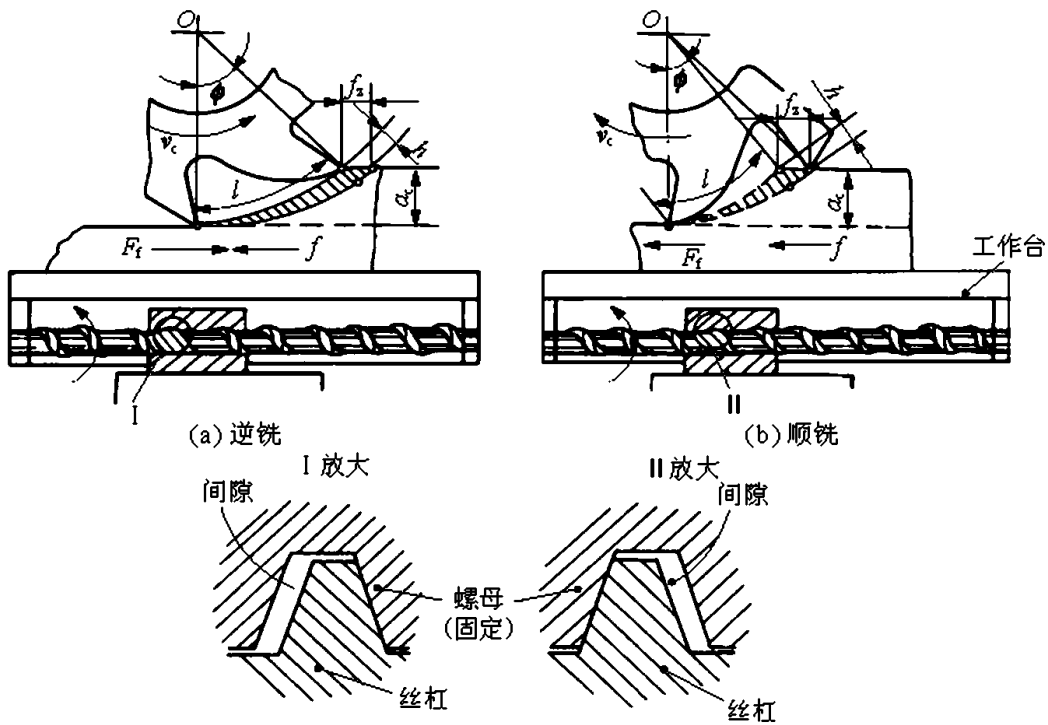


图 2.6 逆铣和顺铣

顺铣时,刀齿的切削厚度从最大逐渐递减至零,没有逆铣时的刀齿滑行现象,加工硬化程度大为减轻,已加工表面质量较高,刀具使用寿命也比逆铣时高。从图 2.6(b)中可看出,顺铣时,刀齿对工件的垂直铣削分力始终将工件压向工作台,避免了上下振动,加工比较平稳。纵向铣削分力 F_f 方向始终与进给方向相同,由于丝杠与螺母传动副有间隙,铣刀会带动工件和工作台窜动,使铣削进给量不均匀,容易打刀。因此,如采用顺铣,必须要求铣床工作台进给丝杠螺母副有消除侧向间隙机构,或采取其他有效措施。

从以上分析可知,顺铣和逆铣各有特点,应根据加工的具体条件合理选择。

铣削可分为粗铣、半精铣和精铣。粗铣的尺寸精度为 IT12~IT11,表面粗糙度 R_a 值为 25~12.5 μm ;半精铣的尺寸精度为 IT10~IT9,表面粗糙度 R_a 值为 6.3~2.2 μm ;精铣的尺寸精度为 IT8~IT7,表面粗糙度 R_a 值为 2.2~1.6 μm ,直线度可达 0.08~0.12mm/m。

5. 刨削加工

刨削是指用刨刀对工件作水平相对直线往复运动的切削加工方法。刨削加工可以在牛头刨床和龙门刨床上进行。刨削主要用来加工平面(包括水平面、垂直面和斜面),也用来加工各种沟槽(包括直角槽、燕尾槽和 T 形槽等)。刨削可分为粗刨、半精刨和精刨,粗刨后两平行平面之间的尺寸精度为 IT12~IT11,表面粗糙度 R_a 值为 25~12.5 μm ;半精刨的尺寸精度为 IT10~IT9,表面粗糙度 R_a 值为 6.3~2.2 μm ;精刨的尺寸精度为 IT8~IT7,表面粗糙度 R_a 值为 2.2~1.6 μm ,直线度可达 0.04~0.08mm/m。

6. 插削加工

插削是指用插刀对工件作垂直相对直线往复运动的加工方法。插削加工在插床上进行。插床主要用来加工工件的内表面,如键槽、花键多边形孔等。插削加工的生产率很低,只能用于单件小批量生产。

7. 拉削加工

拉削是指用拉刀加工工件内、外表面的加工方法。它能加工各种形状贯通的内、外表面,如圆孔、四方孔、六方孔、键槽、花键、内齿轮、半圆弧面、组合表面和平面等。拉削后的尺寸精度为 IT9~IT7,表面粗糙度 R_a 值为 2.2~0.8 μm 。拉削加工的精度和生产率高,但拉刀制造复杂,成本高,主要用于大批量生产。

2.1.3 磨削加工

磨削加工是指用磨具以较高的线速度对工件表面进行加工的方法。磨具的种类很多,有砂轮、砂带、油石和研磨料等。磨削加工主要在磨床上进行。磨削属于精加工,尤其适合对淬硬钢件和高硬度材料的精加工。磨削加工可分为以下两种。

1. 普通磨削

普通磨削是一种应用十分广泛的精加工方法,它是用砂轮在通用磨床(包括外圆磨床、内圆磨床、平面磨床以及无心磨床等)上进行的磨削加工,它可以对内外圆、平面、锥面等进行磨削加工。普通磨削可分为粗磨和精磨,粗磨后的尺寸精度为 IT8~IT7,表面粗糙度 R_a

值为 $0.8\sim 0.4\mu\text{m}$, 精磨后的尺寸精度为 IT6~IT5, 表面粗糙度 R_a 值为 $0.4\sim 0.2\mu\text{m}$ 。

普通磨削包括磨外圆、磨内圆、磨平面以及无心磨削。

2. 高效磨削

高效磨削是随着科学技术的发展, 在传统的普通磨削的基础上逐步发展起来的高效率、高精度的磨削方法。它包括高速磨削、强力磨削、宽砂轮与多砂轮磨削和砂带磨削等。

(1) 高速磨削是指磨削速度高于 50m/s 的磨削加工(普通磨削一般为 $30\sim 35\text{m/s}$ 左右)。目前, 国外实验速度已达 $200\sim 250\text{m/s}$, 国内普遍采用 $50\sim 60\text{m/s}$ 的速度, 有的高达 80m/s 。

(2) 强力磨削就是以大的磨削深度(可达 $3\sim 30\text{mm}$, 大约为普通磨削深度的 $100\sim 1000$ 倍)和小的纵向进给速度(相当于普通磨削的 $1/100\sim 1/10$)进行磨削, 故而又称其为缓进给深磨削。

(3) 宽砂轮与多砂轮磨削是用增大磨削宽度来提高磨削效率的。普通磨削的砂轮宽度为 50mm 左右, 而宽砂轮外圆磨削的砂轮宽度可达 300mm , 平面磨削可达 400mm , 无心磨削可达 1000mm 。磨后的尺寸精度可达 IT6, 表面粗糙度 R_a 值为 $0.4\mu\text{m}$ 。

(4) 砂带磨削是用高速运动的砂带作为磨削工具磨削各种表面的加工方法。砂带磨削的效率和精度都较高, 强力砂带磨削的效率是铣削的 10 倍, 是普通砂轮磨削的 5 倍。尺寸精度可达 $5\sim 0.5\mu\text{m}$, 平面度可达 $1\mu\text{m}$ 。

2.1.4 精密加工

精密加工是指加工精度在 $1\sim 0.1\mu\text{m}$, 表面粗糙度 R_a 值在 $0.1\sim 0.02\mu\text{m}$ 之间的加工方法。精密加工主要指研磨、珩磨、精密磨削和抛光等。

1. 研磨

研磨是利用研磨工具和研磨剂, 从工件上研去一层极薄表面层的精密加工方法。研磨的应用很广, 可加工常见的各种表面, 如平面、圆柱面、圆锥面、螺纹表面、齿轮齿面等。在现代工业中, 研磨常用于精密零件的最终加工, 如机械制造业中的精密量具、精密刀具、精密配合件; 光学仪器制造业中的镜头、棱镜、光学平晶等仪器零件; 电子工业中的石英晶体、半导体晶体、陶瓷元件等。

2. 珩磨

珩磨是利用带有磨条(油石)的珩磨头对孔进行精密加工的方法。珩磨时, 珩磨头上的磨条对工件施加一定压力, 珩磨头同时作相对旋转和直线往复运动。在相对运动的过程中, 磨条从工件表面切除一层极薄的金属, 加之磨条在工件表面上的切削轨迹是交差而又不重复的网纹, 所以可获得很高的加工精度和很小的表面粗糙度。珩磨广泛用于大批量生产中的发动机汽缸孔、连杆大头孔、挤出机机筒等, 珩磨的孔径范围为 $15\sim 500\text{mm}$, 孔的深径比值可达 10 以上, 珩磨后的孔尺寸公差等级为 IT6~IT4, 表面粗糙度 R_a 值为 $0.8\sim 0.05\mu\text{m}$ 。

3. 超精加工

超精加工是用极细磨料的油石, 以恒定压力和复杂相对运动对工件进行微量切削, 以减小表面粗糙度为主要目的的精密加工方法。超精加工的加工余量极小, 一般不留加工余量

或只留极小的加工余量(0.003~0.01mm)。超精加工一般不能提高加工精度,但生产率很高,可以获得较好的表面质量,常用于大批量生产中加工曲轴、凸轮轴的轴颈外圆,飞轮、离合器盘的端平面以及滚动轴承的滚道等。

4. 抛光

抛光是在高速旋转的抛光轮上涂以抛光膏对工件进行微弱切削,从而减小表面粗糙度,提高光亮度的一种精密加工方法。抛光和研磨一样,也使用研磨剂,只是更加细小($1\mu\text{m}$ 以下)的微细磨粒。抛光同样不能提高加工精度,抛光后的表面粗糙度 R_a 值可达 $0.1\sim 0.012\mu\text{m}$ 。抛光一般在精磨或精车、精铣、精刨的基础上进行,主要用于表面的修饰及电镀前的预加工。

2.2 金属切削机床

金属切削机床是用刀具切削的方法将金属毛坯加工成机器零件的机器,通常简称机床,它是制造机器的机器。

2.2.1 机床的分类、型号和技术参数

机床的品种规格繁多,为了便于区别、使用和管理,必须对机床进行分类,并编制型号。

1. 机床的分类

机床的传统分类方法,主要是按加工性质和所用的刀具进行分类。根据国家制定的机床型号编制方法,目前将机床分为12大类:车床、钻床、镗床、磨床、齿轮加工机床、螺纹加工机床、铣床、刨插床、拉床、特种加工机床、锯床和其他机床。在每一类机床中,又按工艺范围、布局形式和结构,分为若干组,每一组又细分为若干系(系列)。

在上述基本分类方法的基础上,还根据机床的其他特征进一步区分。

同类型机床按应用范围(通用性程度)又可分为通用机床、专门化机床、专用机床。

(1) 通用机床。它可用于加工多种零件的不同工序,加工范围较广,通用性较强。这种机床主要适用于单件小批生产,如卧式车床、万能升降台铣床等。

(2) 专门化机床。它的工艺范围较窄,专门用于加工某一类或几类零件的某一道(或几道)特定工序,如丝杆车床、曲轴车床、凸轮轴车床等。

(3) 专用机床。它的工艺范围最窄,只能用于加工某一种零件某一道特定工序,适用于大批量生产,如机床主轴箱的专用镗床、机床导轨的专用磨床等。各种组合机床也属于专用机床。

同类型机床按工作精度又可分为普通精度机床、精密机床和高精度机床。

机床还可按自动化程度分为手动、机动、半自动和自动机床。

机床还可按重量与尺寸分为仪表机床、中型机床(一般机床)、大型机床(10~30t)、重型机床(30~100t)和超重型机床(大于100t)。

按机床主要工作部件的数目,可分为单轴和多轴或单刀与多刀机床等。

一般情况下,机床根据加工性质分类,再按机床的某些特点加以进一步描述,如高精度

万能外圆磨床、立式钻床等。

随着机床的发展,其分类方法也将不断发展。现代机床正向数控化方向发展,数控机床的功能日趋多样化,工序更加集中。现在一台数控机床集中了越来越多的传统机床的功能。例如,数控车床在卧式车床的基础上,又集中了转塔车床、仿形车床、自动车床等多种车床的功能。车削中心出现以后,在数控车床功能的基础上,又加入了钻、铣、镗等类机床的功能。又如,具有自动换刀功能的数控镗铣床(习惯上称为“加工中心”),集中钻、铣、镗等多种类型机床的功能;有的加工中心的主轴既能立式又能卧式,即集中了立式加工中心和卧式加工中心的功能。由此可见,机床数控化引起了机床分类方法的变化,使得机床品种趋于综合。

2. 机床的型号

机床型号是机床产品的代号,用以简明地表示机床的类型、通用特性和结构特性、主要技术参数等。GB/T 15375—1994《金属切削机床型号编制方法》规定:机床的型号由汉语拼音字母和阿拉伯数字按一定规律排列组成,适用于各类通用机床和专用机床(组合机床除外)。

通用机床型号的表示方法见图 2.7。

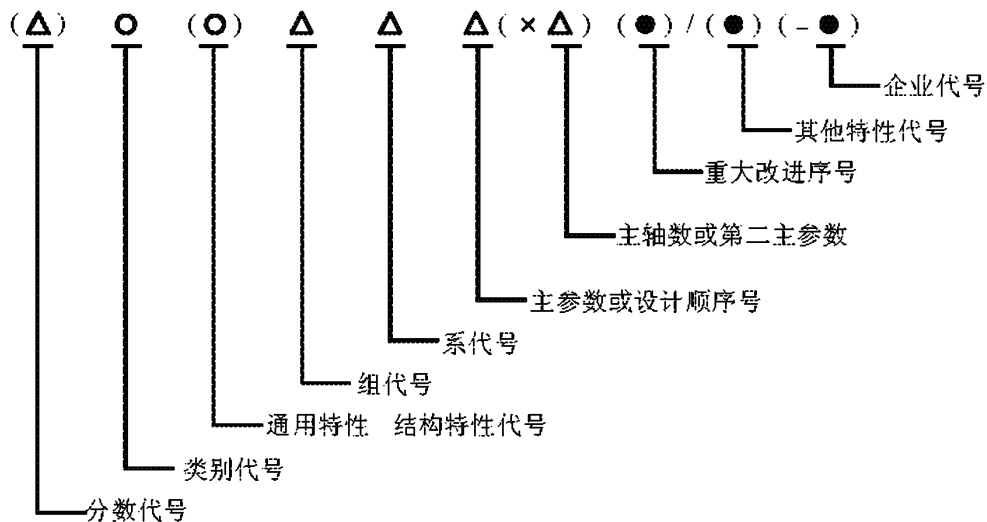


图 2.7 机床型号的表示方法

△ 阿拉伯数字;○ 大写的汉语拼音字母;() 其中表示可选项,当无内容时不表示,有内容时不带括号;● 大写的汉语拼音字母,或阿拉伯数字,或两者兼有之。

1) 机床的类别代号

机床的类别代号用汉语拼音字母(大写)表示。例如,“车床”的汉语拼音是“Che chuang”,所以用“C”表示,读作“车”。当需要时,每一类又可以分为若干分类。其表示方法是在类别代号之前用阿拉伯数字表示,但当分类是“1”时不予表示。例如,磨床类分为 M、2M、3M 三个分类,读作 1 磨、2 磨、3 磨。机床的类别代号如表 2-1 所示。

表 2-1 普通机床类别代号

类别	车床	钻床	镗床	磨床			齿轮加工机床	螺纹加工机床	铣床	刨插床	拉床	特种加工机床	锯床	其他机床
代号	C	Z	T	M	2M	3M	Y	S	X	B	L	D	G	Q
读音	车	钻	镗	1 磨	2 磨	3 磨	牙	丝	铣	刨	拉	电	割	其

2) 机床的特性代号

机床的特性代号表示机床所具有的特殊性能,它包括通用特性和结构特性。

(1) 通用特性代号。

当某类机床除了有普通型外,还有某些通用特性时,在类代号之后加通用特性代号予以区别。通用特性的代号在各类机床中所表示的意义相同。例如,CM6132型精密普通车床型号中的“M”表示“精密”,“XK”表示数控铣床。机床的通用特性代号如表2-2所示。

表2-2 机床通用特性代号

通用特性	高精度	密	动	半自动	数控	加工中心 (自动换刀)	仿形	轻型	加重型	筒式	柔性加工单元	数显	高速
代号	G	M	Z	B	K	H	F	Q	C	J	R	X	S
读音	高	密	自	半	控	换	仿	轻	重	筒	柔	显	速

(2) 结构特性代号。

对于主数值相同而结构、性能不同的机床,在类代号之后加结构特性代号予以区别。例如,CA6140型普通车床型号中的“A”,可理解为在结构上有别于C6140和CY6140型普通车床。型号中有通用特性代号时,结构特性代号排在通用特性代号之后。为避免混淆,通用特性代号已用的字母及“I”、“O”都不能作为结构特性代号。结构特性代号在机床型号中没有统一的含义。

3) 机床的组别代号和系列代号

机床的组别代号和系列代号用两位阿拉伯数字表示,前者表示组别,后者表示系列。每类机床按其结构性能及使用范围划分为10个组,每个组又划分为10个系,分别用数字0~9表示。金属切削机床的类、组划分见表2-3。

4) 机床主参数和设计顺序号

机床主参数代表机床规格的大小,用折算值(主参数乘以折算系数)表示。各类机床的主参数及折算系数见表2-4。

表2-4 各类主要机床的主参数和折算系数

机 床	主参数名称	折算系数
卧式车床	床身上最大回转直径	1/10
立式车床	最大车削直径	1/100
摇臂钻床	最大钻孔直径	1/1
卧式镗床	镗轴直径	1/10
坐标镗床	工作台面宽度	1/10
外圆磨床	最大磨削直径	1/10
内圆磨床	最大磨削孔径	1/10
矩台平面磨床	工作台面宽度	1/10
齿轮加工机床	最大工件直径	1/10

(续)

机 床	主参数名称	折算系数
龙门铣床	工作台面宽度	1/100
升降台铣床	工作台面宽度	1/10
龙门刨床	最大刨削宽度	1/100
插床及牛头刨床	最大插削及刨削长度	1/10
拉床	额定拉力(t)	1/1

某些普通机床,当无法用一个主参数表示时,则在型号中用设计顺序号表示。设计顺序号用由“1”开始的自然数表示。当设计顺序号小于10时,则在其前面冠“0”,如01、02等。

第二主参数一般是指主轴数、最大跨距、最大工件长度、工作台工作长度等。第二主参数也用折算值表示。

5) 机床的重大改进顺序号

当机床的性能及结构布局有重大改进,并按新产品重新设计、试制和鉴定时,在原有机床型号的尾部加重大改进号,以区别于原有机床型号。序号按A,B,C,⋯的字母顺序选用。

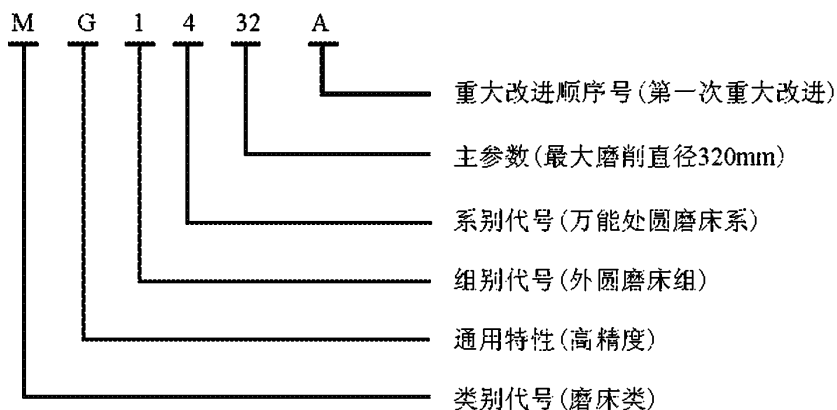
6) 其他特性代号

主要用以反映各类机床的特性,如对数控机床,可用来反映不同的数控系统;对于一般机床可用来反映同一型号机床的变型等。其他特性代号用汉语拼音字母或阿拉伯数字或二者的组合来表示。

7) 企业代号

生产企业单位的代号用企业所在城市名称或企业名称的大写汉语拼音字母表示。

例如, MG1432A 型高精度万能外圆磨床型号:



3. 机床的主要技术参数

机床的主要技术参数反映此型号机床主要技术性能的重要指标,它主要包括:尺寸参数(几何参数)、运动参数和动力参数三个方面的含义。此外,机床的其他参数还有机床的轮廓尺寸和机床净重等。

1) 尺寸参数

尺寸参数是指机床能够加工工件的最大几何尺寸。例如,对于卧式车床,除了主参数

(床身上最大工件回转直径)和第二主参数(最大工件长度)外,有时还要确定刀架上的最大工件回转直径和主轴孔内允许通过的最大棒料直径等;对于立轴平面磨床,除了主参数(工作台面直径)外,有时还要确定主轴端面到台面的最大和最小距离及工作台的行程等。

2) 运动参数

运动参数是指机床加工工件时所能提供的运动速度,包括主运动的速度范围、速度数列和进给运动范围、进给量数列,以及空行程的速度等。

(1) 主运动参数。对作回转运动的机床,主运动参数是主轴转速;对作直线运动的机床,主运动参数是机床工作台或滑枕的每分钟往复次数。通用机床的主轴需要变速,需确定它的变速范围及速度数列。

(2) 进给运动参数。大部分机床(如车床、钻床)的进给量用工件或刀具每转的位移来表示;直线往复运动的机床(如刨床、插床)的进给量,以每一往复的位移量来表示;铣床和磨床的进给量,以每分钟的位移量来表示。

(3) 动力参数。动力参数是指机床驱动主运动、进给运动和空行程运动的电动机额定参数(如额定功率、额定转速等)。

2.2.2 典型机床及其加工工艺范围

1. 车床

在机械制造中,车床是金属切削机床中应用最广泛的一种。按结构和用途的不同,可分为卧式车床、转塔车床、立式车床、单轴自动车床、多轴自动和半自动车床、仿形车床、多刀车床、专门化车床(如凸轮轴车床、曲轴车床)等。其中,卧式车床的应用最广泛。

1) 卧式车床

卧式车床由主轴箱、进给箱、溜板箱、刀架、尾架和床身等部件组成(见图 2.8)。车床的主运动是工件的旋转运动,进给运动是刀具的移动。

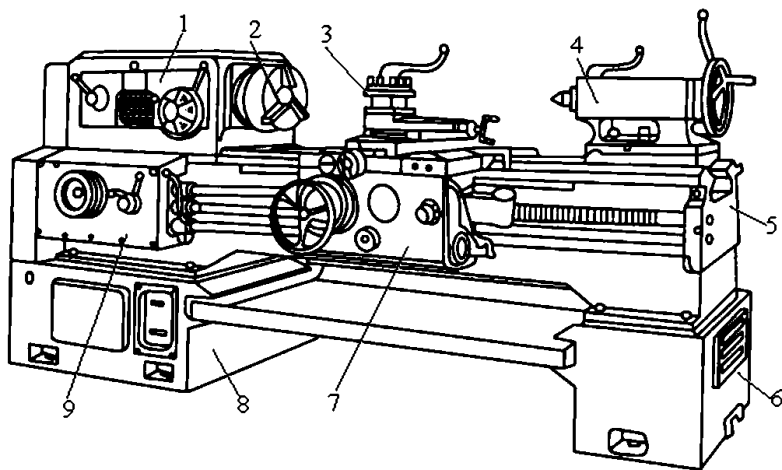


图 2.8 卧式车床

1 主轴箱;2 卡盘;3 刀架;4 尾架;5 床身;6,8 床腿;7 溜板箱;9 进给箱

卧式车床的加工范围很广,它能完成多种加工,主要包括各种轴类、套类和盘类零件上的回转表面,如车外圆、镗孔、车锥面、车环槽、切断、车成形面等;车端面;车螺纹;还能进行钻中心孔、钻孔、铰孔、攻丝、滚花等,如图 2.9 所示。

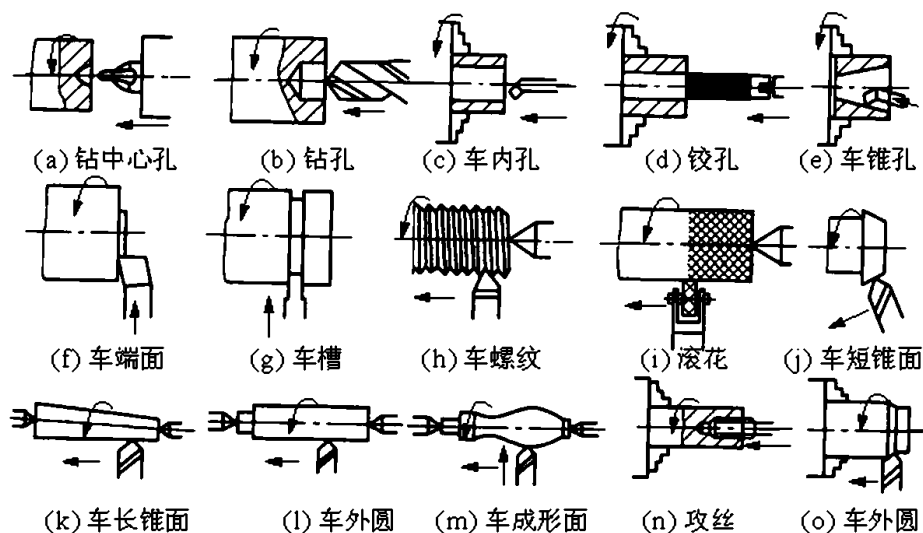


图 2.9 卧式车床加工的典型表面

2) 立式车床

立式车床主要用于加工径向尺寸大而轴向尺寸相对较小、且形状比较复杂的大型或重型零件。立式车床结构布局的主要特点是主轴垂直布置,并有一个直径很大的圆形工作台,其台面处于水平位置,用于安装工件,因而比较方便地装夹和找正比较笨重的工件。由于工件和工作台的重量由床身导轨或推力轴承承受,大大减轻了主轴及其轴承的载荷,因此较易保证加工精度。

立式车床分单立柱式和双立柱式两种(如图 2.10 所示),前者加工直径一般较小(一般小于 1600mm),后者加工直径一般较大(一般大于 2000mm)。

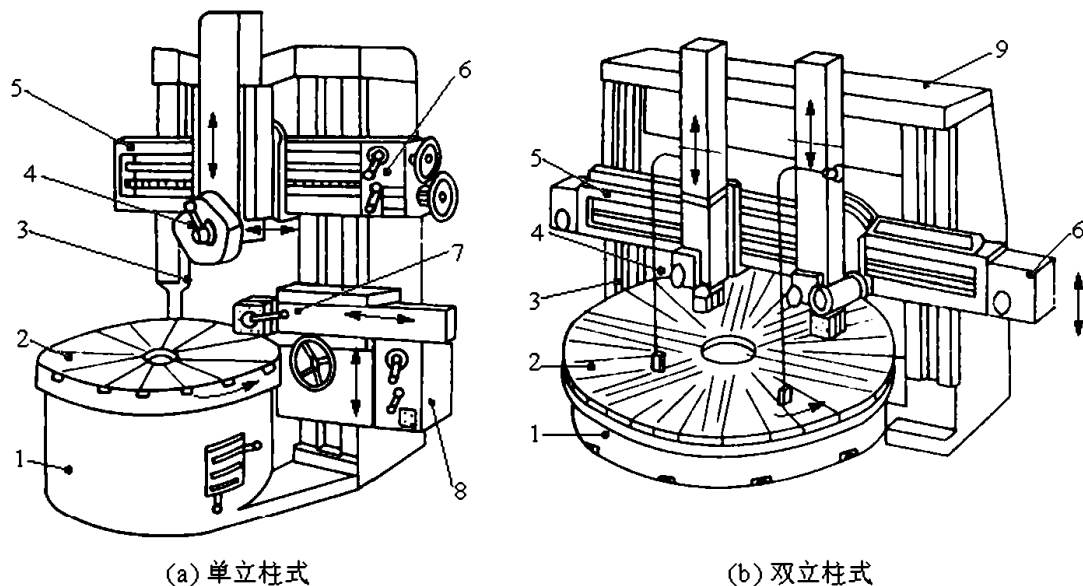


图 2.10 立式车床

- 1 底座;2 工作台;3 立柱;4 垂直刀架;5 横梁;6 垂直刀架进给箱;
7 侧刀架;8 侧刀架进给箱;9 顶梁

在图 2.10 中,立式车床的工作台 2 装在底座 1 上,工件装夹在工作台上并由工作台带动作旋转主运动。进给运动由垂直刀架 4 和侧刀架 7 实现。侧刀架 7 可以在立柱 3 的导轨上移动作垂直进给,还可沿刀架滑座的导轨作横向进给。垂直刀架 4 可在横梁 5 的导轨上移动作横向进给,垂直刀架的滑板可沿其刀架滑座的导轨作垂直进给。

3) 专用车床

专用车床种类很多,其中包括螺纹车床、曲轴车床、凸轮车床、仿形车床等。螺纹车床的

主要类型有丝杠车床、短螺纹车床和螺母车床等,它们的布局与卧式车床相似。螺纹车床使用车刀和螺纹梳刀加工螺纹,主要用于加工丝杠、等零件上的传动螺纹。其特点是:刀具结构比较简单,通用性比较好,但生产率较低。

图 2.11 是 SG8630 型高精度丝杠车床外形图,其主要部件有:交换齿轮机构 1、主轴箱 2、床身 3、刀架 4、丝杠 5 和尾架 6。这种车床的总体布局与卧式车床相似,区别是没有进给箱和溜板箱,联系主轴和刀架的螺纹进给传动比有挂轮保证,刀架由装在床身前后导轨之间的丝杠螺母传动。

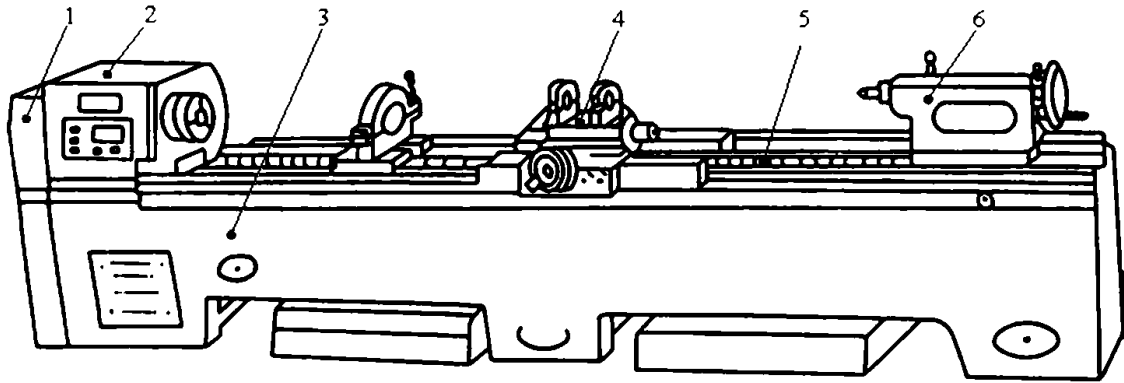


图 2.11 SG8630 型高精度丝杠车床外形图

1 交换齿轮;2 主轴箱;3 床身;4 刀架;5 丝杠;6 尾架

为了保证高的螺纹加工精度和小的表面粗糙度,SG8630 型高精度丝杠车床的螺纹进给保证传动链中只有两对交换齿轮,以缩短传动链,并提高传动件(特别是丝杠和螺母)的制造精度,以螺纹进给保证传动链的传动精度。另外,还采用螺距校正装置,有效地提高了传动精度并保持良好的精度稳定性。

高精度丝杠车床主要用于非淬硬精密丝杠的精加工,加工的螺纹精度可达 IT6 或更高,表面粗糙度 R_a 值为 $0.32 \sim 0.63 \mu\text{m}$ 。

4) 自动车床

自动机床是指那些在调整好后可无人参与便能自动完成表面成形运动和辅助运动,并能自动地重复其工作循环的机床。若机床能自动完成预定的工作循环,但装卸工件仍由人工进行,这种机床则称为半自动机床。符合上述定义的车床就称为自动车床或半自动车床。

传统的自动车床采用了凸轮和挡块控制来实现自动工作循环。当加工工件改变时,要花费较多时间去设计和制造凸轮,而且停机的时间较长,但这种机床价格远低于数控机床,工作稳定可靠,在大量生产领域里仍广泛使用。

自动车床的种类很多,图 2.12 是 CM1107 型精密单轴纵切自动车床外形图,其主要部件有:底座 1、床身 2、送料装置 3、主轴箱 4、天平刀架 5、中心架 6、上刀架 7、三轴钻铰附件 8 和分配轴 9 等部件组成。这种车床主要用于加工精度较高的小型细长轴类零件,可加工外圆柱面、锥面、端面、切槽、切断、成形表面、钻孔和加工内、外螺纹等。

2. 铣床

铣床是利用铣刀在工件上加工各种表面的机床。主要有升降台式铣床、床身式铣床、龙门铣床、工具铣床、仿形铣床、各种专门化铣床(如凸轮铣床、曲轴铣床)等,其中应用最广的

是升降台式铣床。

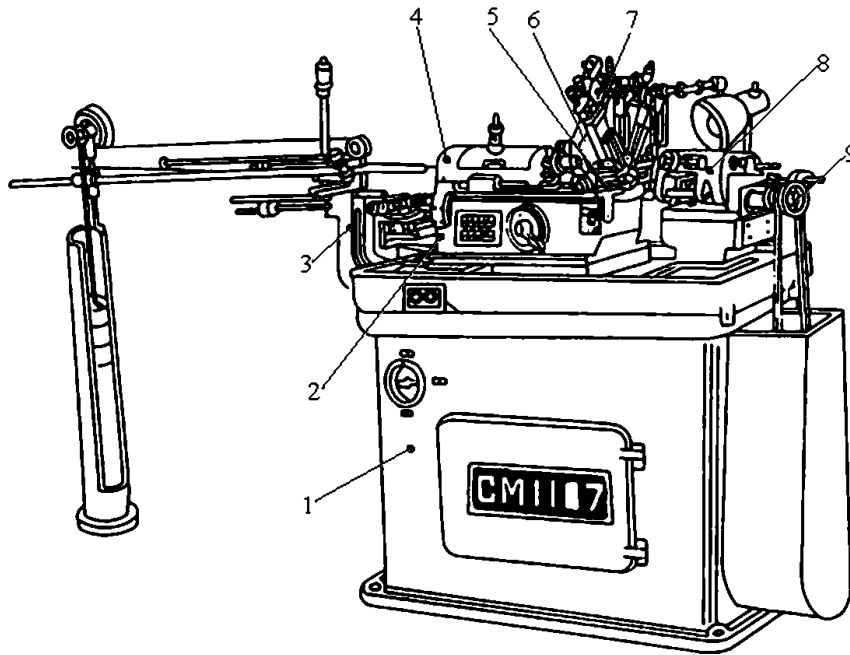


图 2.12 CM1107 型精密单轴纵切自动车床外形图

- 1 底座;2 床身;3 送料装置;4 主轴箱;5 天平刀架;6 中心架;
7 上刀架;8 三轴钻铰刀附件;9 分配轴

1) 升降台式铣床

升降台式铣床的工作台安装在可垂直升降的升降台上,使工作台可在相互垂直的三个方向上调整位置或完成进给运动。由于升降台刚性较差,所以只适合于加工中小型工件。

升降台铣床能完成多种加工,主要包括:各种平面、沟槽、键槽、T形槽、V形槽、燕尾槽、螺纹、螺旋槽,以及齿轮、链轮、花键轴、棘轮等各种成形表面,用锯片铣刀还可进行切断等,如图 2.13 所示。

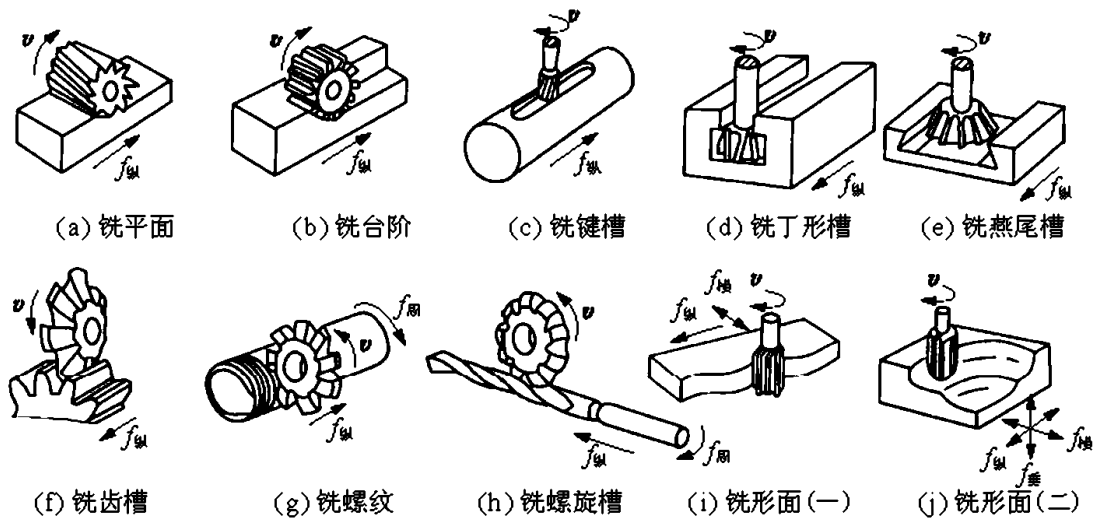


图 2.13 铣床加工的典型表面

升降台式铣床可分为卧式升降台式铣床、万能升降台式铣床和立式升降台式铣床 3 种结构形式。

(1) 卧式升降台式铣床。它主轴为水平布置,主要用于单件及成批生产中加工平面、沟槽和成型表面。

图 2.14 是卧式升降台式铣床外形图,其主要部件有:床身 1、悬梁 2、主轴 3、支梁 4、工

作台 5、滑座 6、升降台 7 和底座 8 等部件组成。

(2) 万能升降台式铣床。它与卧式升降台式铣床的结构基本相似,主要结构如图 2.15 所示,其主运动是刀具的旋转运动。工作台 6 可在互相垂直的 3 个方向调整其位置,并可在任一方向上实现进给运动。在床鞍 8 上有一个回转盘 7,可以绕垂直轴在 +45° 范围内调整角度,工作台在回转盘的导轨上移动,以便铣削各种角度的成形面。此外,万能升降台式铣床还可选配立式铣头,以扩大机床的加工范围。

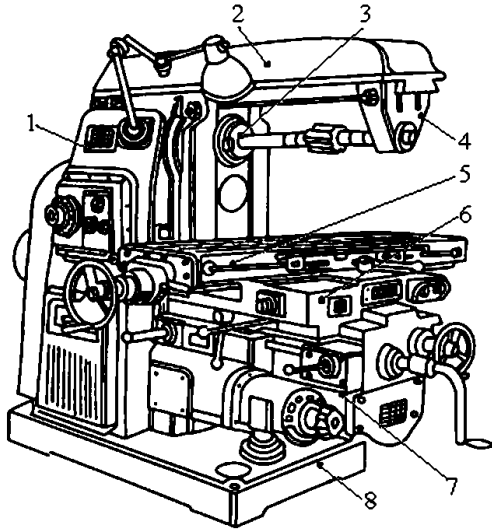


图 2.14 卧式升降台式铣床

- 1 床身;2 悬梁;3 主轴;4 刀杆支架;
- 5 工作台;6 滑座;7 升降台;8 底座

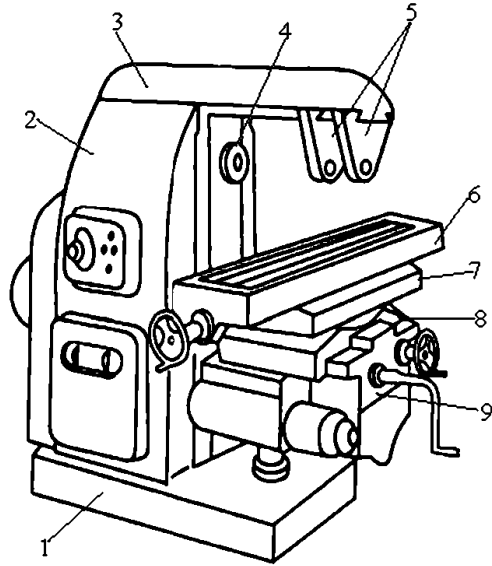


图 2.15 万能卧式升降台式铣床

- 1 底座;2 床身;3 悬梁;4 主轴;5 支架;
- 6 工作台;7 回转盘;8 床鞍;9 升降台

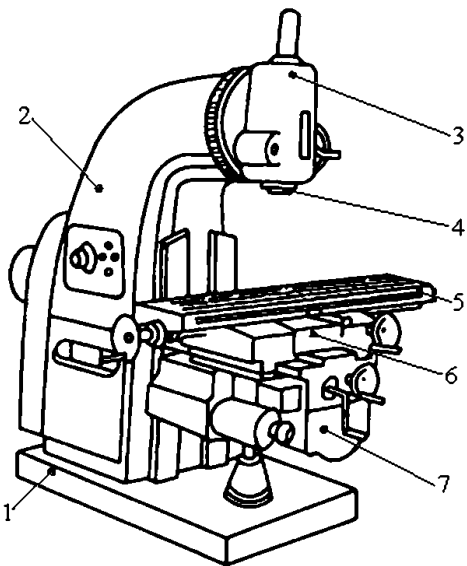


图 2.16 立式升降台式铣床

- 1 底座;2 床身;3 铣头;4 主轴;
- 5 工作台;6 滑座;7 升降台

(3) 立式升降台式铣床。它与卧式升降台式铣床的主要区别在于安装铣刀的机床主轴垂直于工作台面,主要用于单件及成批生产,可用端铣刀或立铣刀加工平面、斜面、沟槽、台阶,配以分度头或圆形工作台等机床附件,还可以铣削齿轮、凸轮以及螺旋面。

图 2.16 是立式升降台式铣床外形图,其工作台 5、滑座 6 和升降台 7 的结构与卧式升降台式铣床相同。立铣头 3 可以在垂直平面内调整角度,主轴 4 可以沿其轴线方向进给或调整位置。

2) 龙门铣床

龙门铣床是一种大型高效铣床,主要用于加工大型工件上的平面和沟槽。机床具有龙门式框架,其外形如图 2.17 所示。横梁 3 可以在立柱 5、7 上升降,以适应加工不同高度的工件。横梁 3 上的两个立铣头 4、8,可在横梁 3 上作水平横向运动。立柱上的两个卧铣头 2、9 可沿立柱导轨升降。每个铣头都是一个独立部件,内装有主运动变速机构、主轴部件及操纵机构等。各铣刀的切削深度均由主轴套筒带动铣刀主轴沿轴向运动来实现。加工时,工作台 10 连同工件作纵向进给运动。

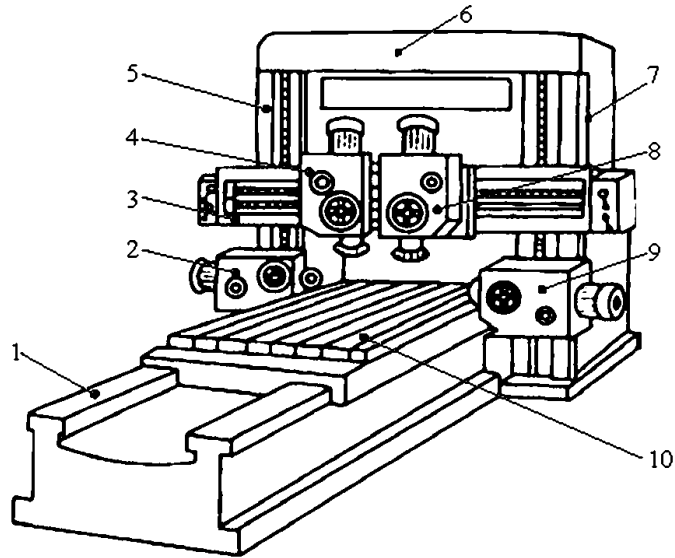


图 2.17 龙门铣床

1 床身;2,9 卧铣头;3 横梁;4,8 立铣头;5,7 立柱;6 顶梁;10 工作台

龙门铣床可用多把铣刀同时加工几个表面,生产率高,在成批和大量生产中广泛应用。

3) 工具铣床

工具铣床除了能完成卧式铣床和立式铣床的加工外,常配备有回转工作台、可倾斜工作台、平口钳、分度头、立铣头和插削头等多种附件。因而扩大了机床的万能性,能完成镗、铣、钻、插等切削加工,适用于工具、机修车间用来加工各种刀具、夹具、冲模、压模等中小型模具及其他复杂零件。

图 2.18 是万能工具铣床外形图,主轴的横向进给运动由主轴座 4 的移动来实现,纵向及垂直方向进给运动由工作台 3 及升降台 2 的移动来实现。

3. 磨床

用磨料或磨具(砂轮、砂带、油石或研磨料等)作为工具对工件表面进行切削加工的机床,统称为磨床。磨床的种类很多,主要有外圆磨床、万能磨床、内圆磨床、平面磨床、无心磨床、工具磨床和各种专门化磨床(如螺纹磨床、曲轴磨床、凸轮磨床、齿轮磨床、导轨磨床)等。此外,还有以柔性砂带为切削工具的砂带磨床以及以油石和研磨剂为切削工具的精磨磨床等。

1) 外圆磨床

外圆磨床主要用于磨削内、外圆柱和圆锥表面,也能磨削阶梯轴的轴肩和端面,可获得 IT6~7 级精度,表面粗糙度 R_a 值为 $1.25 \sim 0.08 \mu\text{m}$ 。外圆磨床的主要类型有万能外圆磨床、普通外圆磨床、无心外圆磨床、宽砂带外圆磨床和端面外圆磨床等。

(1) 万能外圆磨床。图 2.19 所示为万能外圆磨床外形图,用于磨削 IT6~7 级精度的内、外旋转表面。其主要结构有床身、工作台、砂轮架、内圆磨具、尾座等部件。万

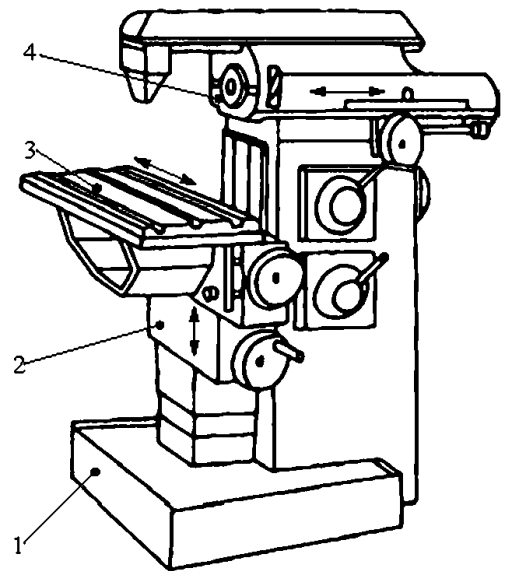


图 2.18 万能工具铣床外形图

1 底座;2 升降台;3 工作台;
4 主轴箱

能外圆磨床比普通外圆磨床多一个内圆磨头,且砂轮架和工件头架都能逆时针旋转一定角度。主运动是砂轮的高速旋转运动,进给运动有:工作台带动工件的纵向进给运动;工件旋转的周向进给运动;砂轮架在工作台两端间歇切入的横向进给运动。

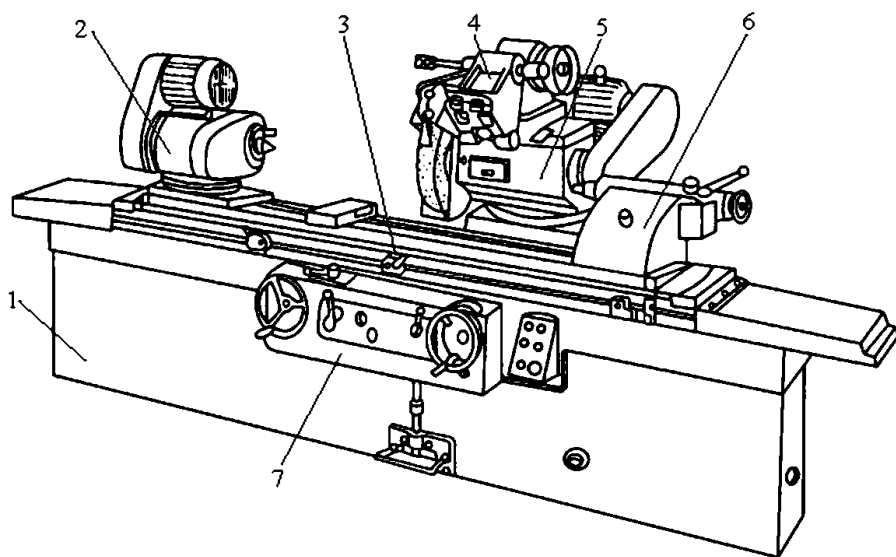


图 2.19 M1432A 型万能外圆磨床

- 1 床身;2 工作头架;3 工作台;4 内圆磨具;5 砂轮架;6 尾座;7 液压控制箱

万能外圆磨床的加工方式如图 2.20 所示。图 2.20(a)为纵向进给磨削外圆柱表面,图 2.20(b)为工作台旋转一定角度,纵向进给磨削外圆锥表面,图 2.20(c)为砂轮架旋转一定角度,横向进给磨削外圆锥表面,图 2.20(d)为工作头架旋转一定角度,横向进给磨削外圆锥表面,图 2.20(e)为内圆磨具磨内孔,若要磨削锥孔,工作头架应旋转一定角度。

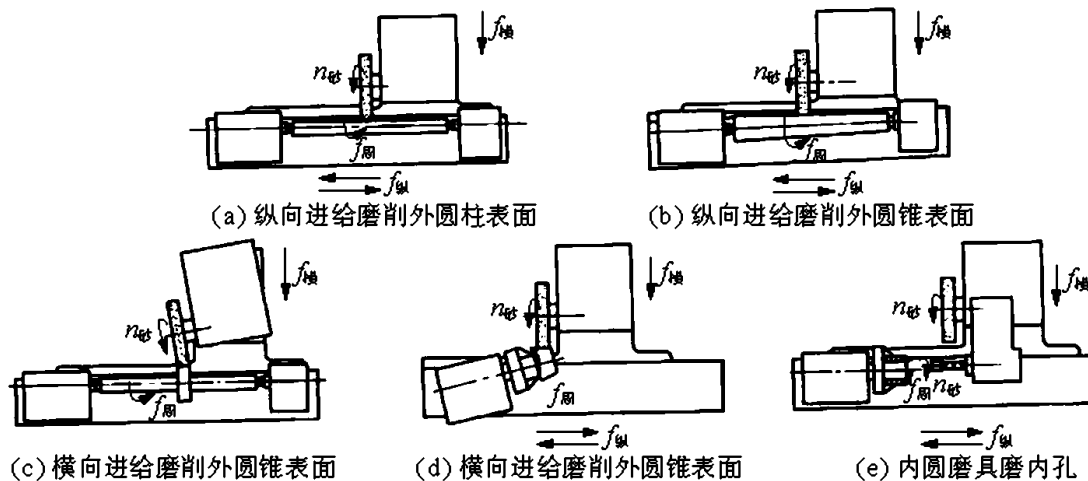


图 2.20 万能外圆磨床上典型加工示意图

(2) 普通外圆磨床。它的结构与万能外圆磨床基本相同,其主要区别是:头架和砂轮架不能绕轴心在水平内调整角度位置;头架主轴直接固定在箱体上不能转动,工件只能用顶尖支承进行磨削;不配置内圆磨具。

因此,普通外圆磨床的工艺范围比万能外圆磨床窄,但由于减少了主要部件的结构层次,头架主轴固定不动,故机床及头架主轴部件的刚度高,工件的旋转精度好。这种磨床只能用于磨削外圆柱面、锥度不大的外圆锥面以及台肩和端面。

(3) 无心磨床。它通常是指无心外圆磨床,其工作原理如图 2.21 所示。磨削时,工件 2 不用顶尖定心和支承,而将工件放在磨削砂轮 1 与导轮 3 之间,并用托板 4 支承定位进行磨削。导轮是用树脂或橡胶为粘结剂制成的刚玉砂轮,不起磨削作用,它与工件之间的摩擦系数较大,靠摩擦力带动工件旋转,实现圆周进给运动。导轮的线速度在 $10\sim 50\text{m/min}$ 范围内,砂轮的转速很高,一般为 50m/s 左右,从而在砂轮和工件间形成很大的相对速度,即磨削速度。

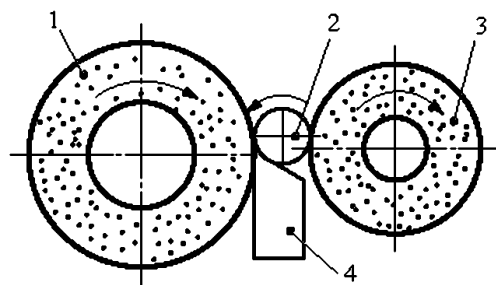


图 2.21 无心磨削工作原理

- 1 磨削砂轮;2 工件;
3 导轮;4 托板

用无心磨床加工时,工件精度较高。由于无须打中心孔,且装夹省时省力,可连续磨削,所以生产率很高。若配以自动装卸料机构,可实现自动化生产。适于在大批量生产中磨削细长轴以及不带中心孔的轴、套、销等零件。

2) 内圆磨床

内圆磨床主要用于磨削圆柱孔和圆锥孔表面,其类型主要有普通内圆磨床、无心内圆磨床和行星内圆磨床等。其中普通内圆磨床比较常用。内圆磨床的自动化程度不高,磨削尺寸通常是靠人工测量来加以控制,适用于单件小批生产。

图 2.22 所示为普通内圆磨床外形图。头架 3 装在工作台 2 上,可随同工作台沿床身 1 的导轨作纵向往复运动,还可以在水平面内调整角度位置以磨削圆锥孔。工件装在头架上,由头架主轴带动作圆周进给运动。砂轮架 4 上装有磨削内孔的砂轮主轴,它带动内圆磨砂轮作旋转运动,砂轮架可由手动或液压传动沿滑座 5 的导轨作周期性的横向进给。

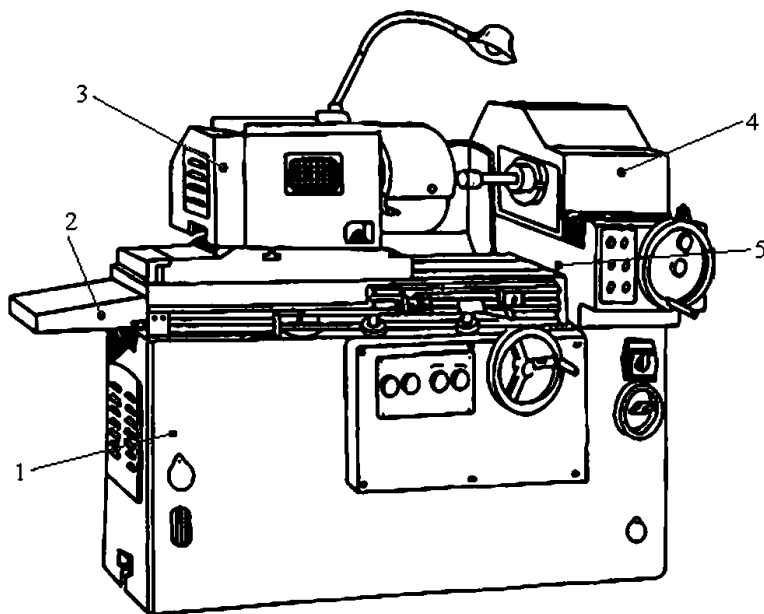


图 2.22 普通内圆磨床外形图

- 1 床身;2 工作台;3 头架;4 砂轮架;5 滑座

3) 平面磨床

平面磨床用于磨削各种零件的平面,其磨削方式如图 2.23 所示。工件安装在矩形或圆形工作台上,作纵向反复直线运动或圆周进给运动(f_1),用砂轮的周边进行磨削[图 2.23(b)]或端面进行磨削[图 2.23(c)、(d)]。周边磨削时,由于砂轮宽度的限制,需要沿砂轮轴线方

向作横向进给运动(f_2)。为了逐步地切除全部余量并获得所需要的工件尺寸,砂轮还需周期地沿垂直于工件被磨削表面的方向进给(f_3)。

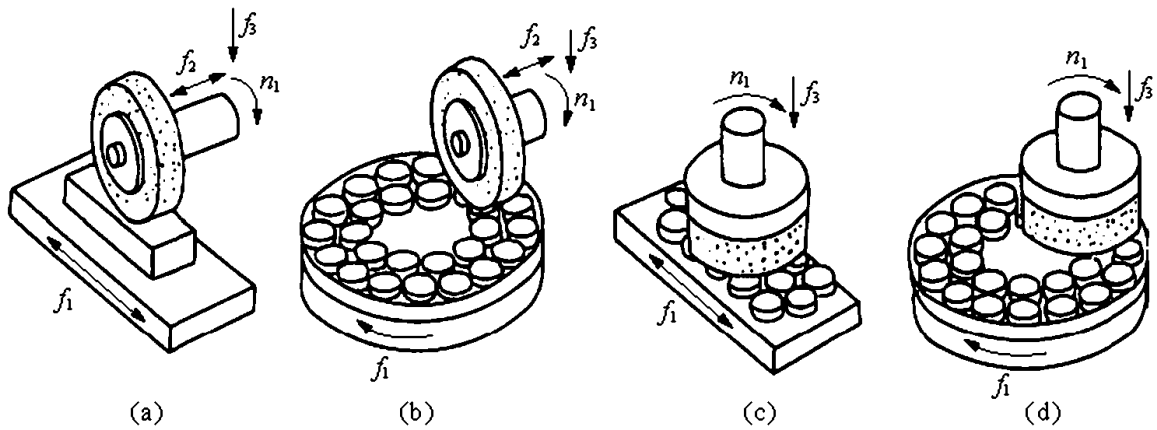


图 2.23 平面磨床磨削方式

根据砂轮主轴的布置和工作台的形状不同,平面磨床主要有:卧轴矩台式平面磨床、卧轴圆台式平面磨床、立轴矩台式平面磨床和立轴圆台式平面磨床。它们的磨削方式如图 2.23 (a)、(b)、(c)、(d)所示。

采用端面磨削时,由于砂轮与工件的接触面积较大,所以生产率较高。但磨削时发热量大,冷却和排屑条件差,所以加工精度较低,表面粗糙度值较大。而采用周边磨削时,由于砂轮与工件的接触面积较小,发热量少,冷却和排屑条件较好,可获得较高的加工精度和较小的表面粗糙度值。

另外,由于圆台式是连续进给,而矩台式有换向时间损失,所以圆台式平面磨床比矩台式平面磨床的生产率稍高些。但是圆台式只适于磨削小零件和大直径的环形零件端面,不能磨削窄长零件,而矩台式可方便地磨削各种零件,包括直径小于矩台宽度的环形零件。

目前,最常见的平面磨床是卧轴矩台式平面磨床和立轴圆台式平面磨床。图 2.24 是卧轴矩台式平面磨床的外形图。它的砂轮主轴是内连式异步电动机的轴,电动机的定子就装在砂轮架 2 的壳体内,砂轮架沿滑座 3 的燕尾导轨作横向间歇进给运动(可手动或液动)。滑座 3 与砂轮架 2 一起沿立柱 4 的导轨作间歇的切入运动。工作台 1 沿床身 5 的导轨作纵向往复运动(液压传动)。

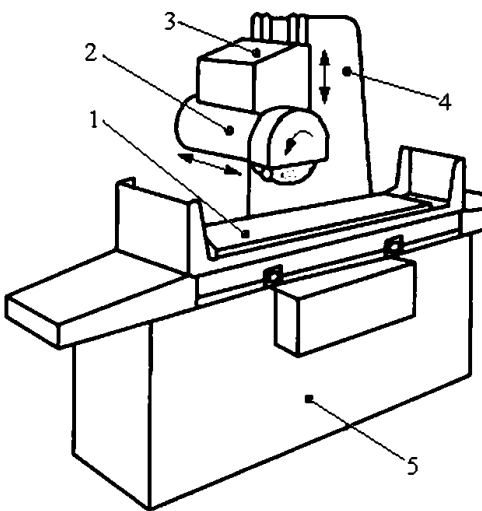


图 2.24 卧轴矩台式平面磨床
1 工作台;2 砂轮架;3 滑座;
4 立柱;5 床身

4. 镗床

镗床主要使用镗刀的孔加工机床,主要可分为卧式镗床、坐标镗床、金刚镗床等。

1) 卧式镗床

卧式镗床的主要结构见图 2.25 所示。卧式镗床的主要运动有:镗杆或平旋盘的旋转主运动;镗杆的轴向进给运动;主轴箱的垂直进给运动(加工端面);工作台的纵向、横向进给运动;平旋盘上的径向刀架进给运动(加工端面)。且工作台还能沿上滑座的圆轨道在水平面内转动,以适应加工互相成一定角度的平面和孔。

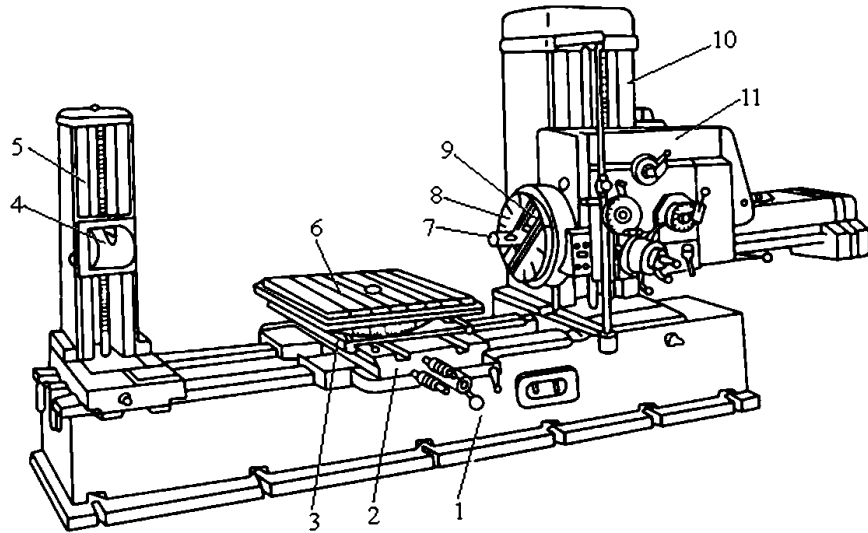


图 2.25 卧式镗床

- 1 床身;2 下滑座;3 上滑座;4 后支架;5 后立柱;6 工作台;7 镗轴;
8 平旋盘;9 径向刀架;10 前立柱;11 主轴箱

镗床特别适用于加工分布在不同位置上、孔距精度和相互位置精度要求都很高的孔系。此外还可进行钻孔、扩孔、铰孔、铣平面、加工螺纹、铣成形面等,如图 2.26 所示。

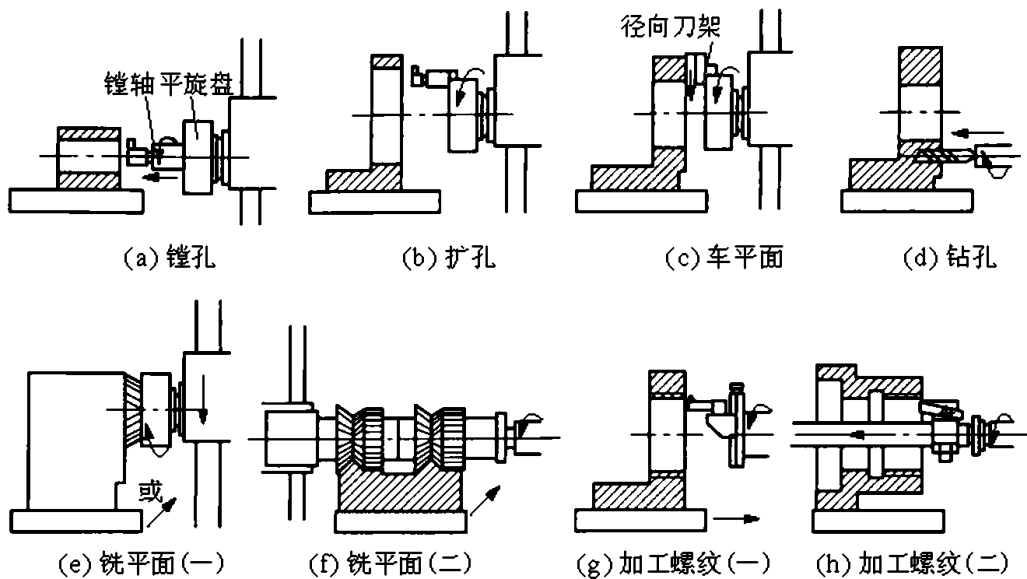


图 2.26 卧式镗床的主要加工方法

卧式镗床工艺范围较广,且一次安装可完成大部分的加工工序,主要用于加工大中型的形状复杂的工件,特别对于各种箱体、床身、机壳、机架等的加工最合适。

2) 坐标镗床

坐标镗床是指具有精密坐标定位装置的镗床。主要用于镗削尺寸、形状及位置精度要求比较高的孔系,还能进行钻孔、扩孔、铰孔、铰端面、切槽、铣削等加工。此外,在坐标镗床上还能进行精密刻度、样板的精密划线、孔间距及直线尺寸的精密测量等。

坐标镗床有立式坐标镗床和卧式坐标镗床之分,前者适于加工轴线与安装基面(底面)垂直的孔系和铣削顶面,后者适于加工与安装基面(底面)平行的孔系和铣削侧面。

图 2.27 所示为卧式坐标镗床外形图。其主轴 4 水平布置。镗孔坐标位置由下滑座 1

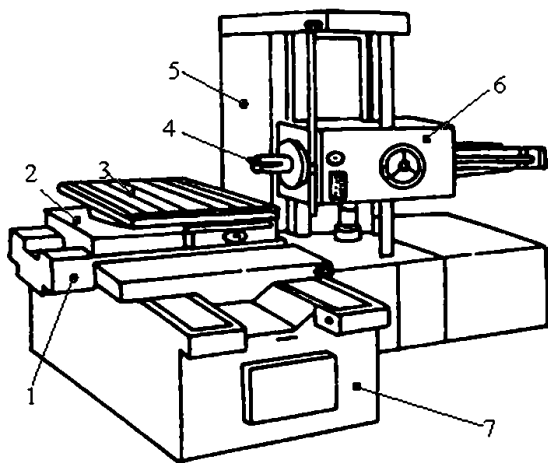


图 2.27 卧式坐标镗床外形图

- 1 滑座; 2 滑座; 3 工作台; 4 主轴;
5 立柱; 6 主轴箱; 7 床身

沿床身 7 导轨纵向移动和主轴箱 6 沿立柱 5 的导轨上下移动来实现。机床进行孔加工时的进给运动, 可由主轴 4 轴向移动完成, 也可由上滑座 2 横向移动完成。回转工作台 3 可在水平面内回转一定角度, 以进行精密分度。

5. 齿轮加工机床

齿轮加工机床是用来加工齿轮轮齿的机床, 主要有滚齿机、插齿机、剃齿机、珩齿机、磨齿机、刨齿机等。

1) 滚齿机

图 2.28 所示为 Y3150E 型滚齿机外形图, 主要用于滚切直齿和斜齿圆柱齿轮和蜗轮。床身 1 上固

定立柱 2, 刀架溜板 3 可沿力柱上的导轨作垂直方向的移动, 以实现滚刀的轴向进给。滚刀安装在刀杆 4 上, 可调整其倾斜角度 δ 。工件安装在工作台的心轴 7 上, 并支承在支架 6 的孔中, 由工作台带动作旋转运动。滚刀的旋转是主运动; 滚刀与工件之间的啮合是展成运动, 由机床的内联系传动链实现; 滚刀沿轴向的移动是进给运动; 此外, 在滚斜齿轮时, 还必须有一个附加的转动, 即差动运动。

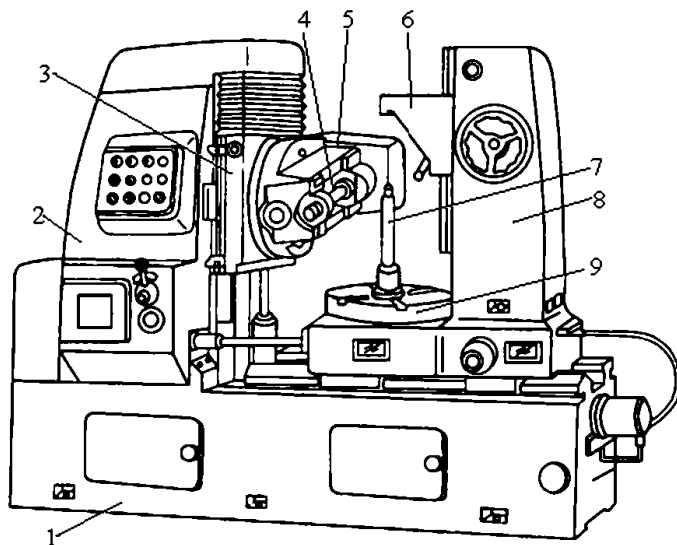


图 2.28 Y3150E 型滚齿机外形图

- 1 床身; 2 立柱; 3 刀架溜板; 4 刀杆; 5 刀架体; 6 支架;
7 心轴; 8 后立柱; 9 工作台

加工齿轮时, 为使滚刀刀齿方向与被切齿轮的齿槽方向一致, 滚刀轴线与被切齿轮的端面之间应倾斜一个角度 δ , 称为安装角, 如图 2.29 所示。安装角与工件的螺旋角 β 和滚刀的螺旋升角 γ 有关, 即 $\delta = \beta + \gamma$, 式中, 当滚刀与工件的螺旋线方向相反时取“+”号, 方向相同时取“-”号。

图 2.30 为加工斜齿轮时的滚刀安装角。可以看出, 采用与工件螺旋方向相同的滚刀, 可使滚刀安装角较小, 有利于提高机床运动平稳性及加工精度。

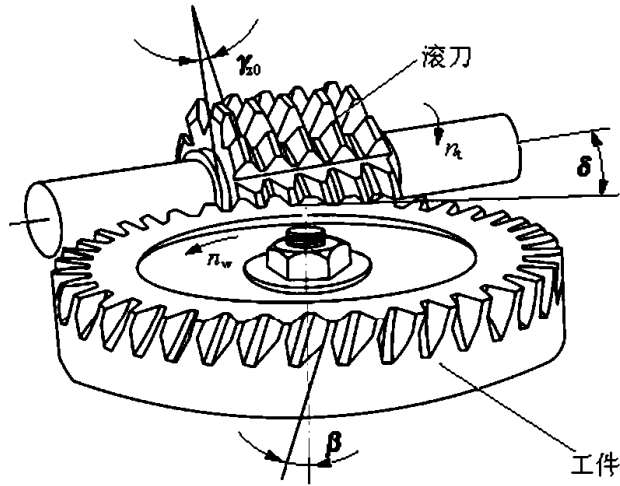


图 2.29 滚齿工作原理

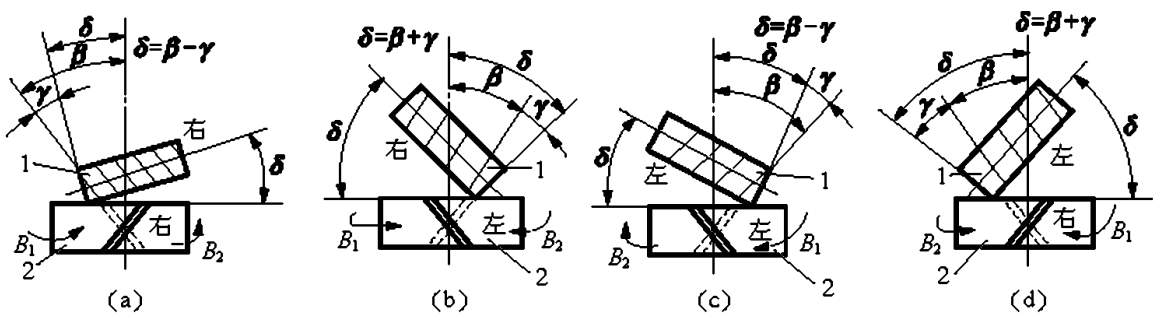


图 2.30 加工斜齿轮时滚刀的安装角

2) 插齿机

插齿机用来加工内外啮合的圆柱齿轮或齿条。图 2.31 所示为插齿机外形图，主要由工作台、刀架、横梁和床身等部件组成。插齿机是按展成法加工圆柱齿轮的，其原理如图 2.32 所示。插齿开始时，插齿刀和工件除作展成运动外，还要作相对的径向切入运动，直到全齿

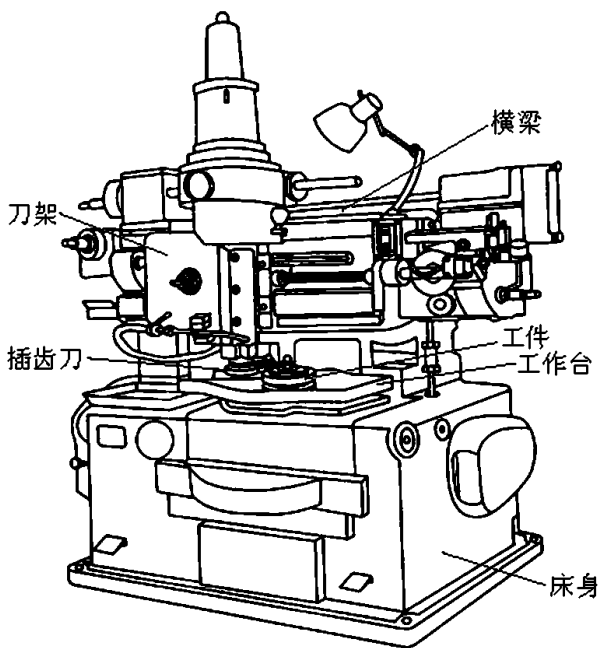


图 2.31 插齿机外形图

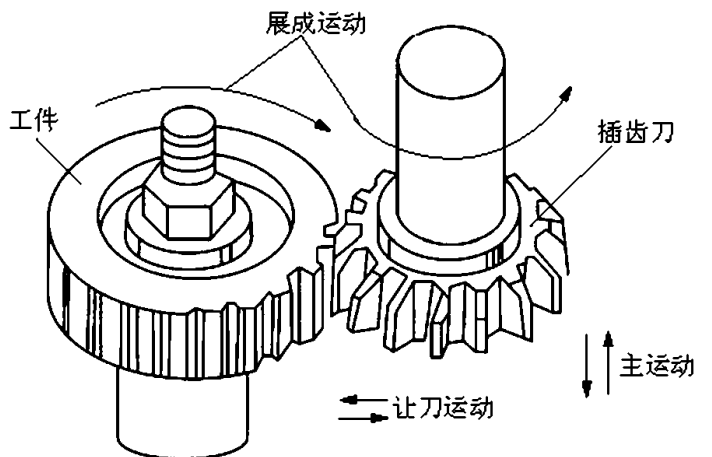


图 2.32 插齿工作原理及运动

深为止；然后工件再旋转一周，全部轮齿切削完毕，插齿刀与工件分开，机床停止。插齿刀在往复运动的回程时不切削，因此还需要有让刀运动。

6. 其他机床

1) 钻床

钻床是用钻头在工件上加工孔的机床。通常用于加工尺寸较小、精度要求不太高的孔。在钻床上钻孔时，工件一般固定不动，刀具作旋转主运动，同时沿轴向作进给运动。在钻床上可以完成钻孔、扩孔、铰孔、铰孔以及攻螺纹等加工。钻床的加工方法及所的运动如图 2.33 所示。

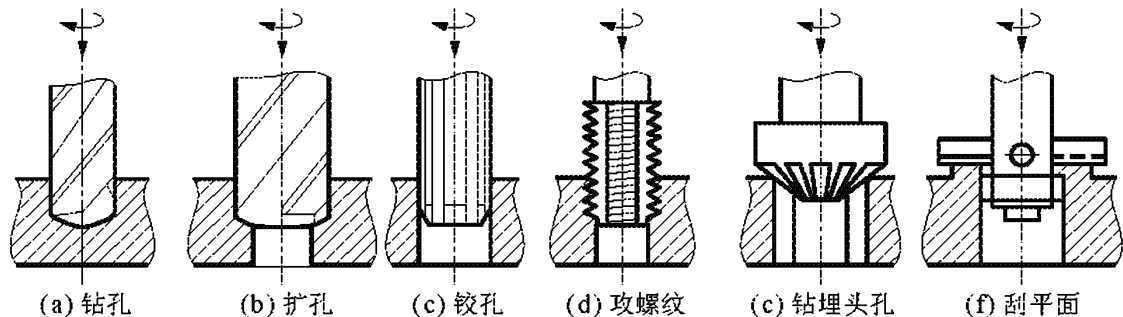


图 2.33 钻床的加工方法

钻床根据用途和结构的不同，可分为台式钻床、立式钻床、摇臂钻床、深孔钻床及其他钻床(如中心孔钻床)。

(1) 立式钻床。

图 2.34 所示为立式钻床的外形图。变速箱 5 固定在立柱顶部，装有主电动机和变速机构及其操纵机构。进给箱 4 内有主轴 3 和进给变速机构及操纵机构。进给箱右侧的手柄用于使主轴升降。加工时，工件直接或利用夹具安装在工作台 2 上，主轴 3 由电动机带动既作旋转运动，又作轴向进给运动。进给箱 4、工作台 2 可沿立柱 6 的导轨调整上下位置，以适应加工不同高度的工件。当一个孔加工完再加工第二个孔时，需要重新移动工件，使刀具旋转中心对准被加工孔的中心。因此对于大而重的工件操作不方便，适用于中小工件的单件、小批量生产。

(2) 摇臂钻床。

图 2.35 所示为摇臂钻床的外形图。工件被固定在底座 1 的工作台 10 上，主轴 9 的旋转和轴向进给运动是由电动机 6 通过主轴箱 8 来实现的。主轴箱 8 可在摇臂 7 的导轨上移动，摇臂借助电动机 5 及丝杠 4 的传动，可沿外立柱 3 上下移动。外立柱 3 可绕内立柱 2 在 $\pm 180^\circ$ 范围内回转。由于摇臂钻床结构上的这些特点，可以很方便地调整主轴 9 到所需的位置上，而无须移动工件。所以，摇臂钻床广泛地应用于单件和中、小批量生产中加工大中型零件。

(3) 台式钻床。

台式钻床简称“台钻”，是一种主轴垂直布置的小型钻床。台钻的钻孔直径一般小于 15mm，最小可加工十分之几毫米的小孔。由于加工的孔径很小，所以台钻主轴的转速很高，有的竟达每分钟几万转。台钻结构简单、使用灵活方便，但由于台钻自动化程度较低，通常是手动进给，所以适用于单件、小批量生产中加工小型零件上的各种小孔。

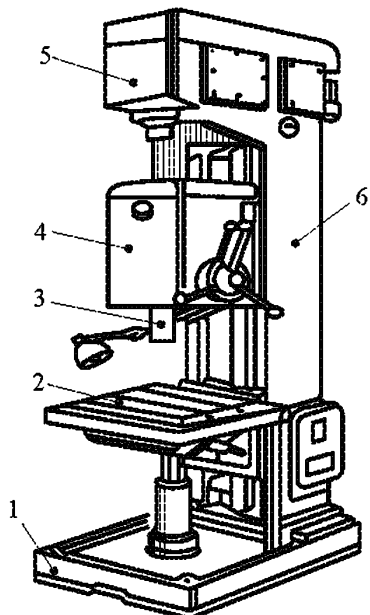


图 2.34 立式钻床的外形图

- 1 底座;2 工作台;3 主轴;
4 进给箱;5 变速箱;6 立柱

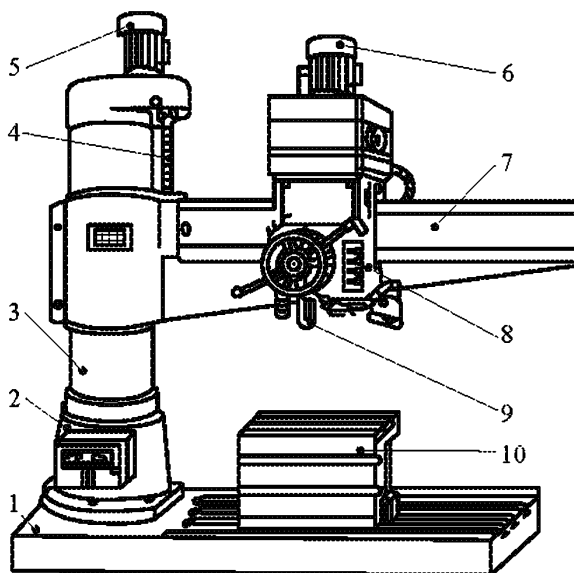


图 2.35 摇臂钻床的外形图

- 1 底座;2 内立柱;3 外立柱;4 丝杠;5、6 电
动机;7 摇臂;8 主轴箱;9 主轴;10 工作台

(4) 深孔钻床。

一般将孔的长径比大于 5 的孔称为深孔。深孔钻床是专门用于加工深孔的钻床,如加工枪管、炮筒和机床主轴等零件的深孔。由于加工的孔较深,为了减少孔中心线的偏斜,加工时通常是由工件转动来实现主运动,深孔钻头并不转动,只做直线运动。此外,由于被加工孔较深,而且工件又往往较长,为了便于排除切屑及避免机床过于高大,深孔钻床通常采用卧式布局。为保证获得好的冷却效果及避免切屑的排出对工件表面质量的影响,深孔钻床中设有切削液输送装置和周期退刀排屑装置。图 2.36 是深孔加工示意图。

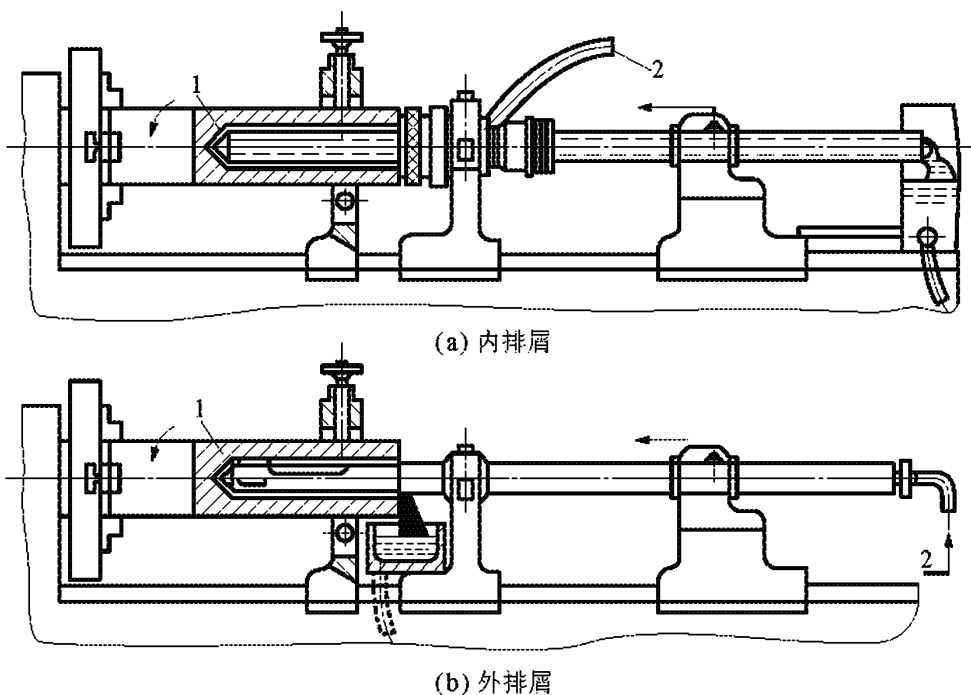


图 2.36 深孔加工示意图

- 1 工件;2 切削液

2) 刨床、插床和拉床

刨床、插床和拉床的主运动都是直线运动,故又称为直线运动机床。

(1) 刨床。

刨床主要用于加工各种平面和沟槽,其主要类型有牛头刨床和龙门刨床。

① 牛头刨床。图 2.37 所示为牛头刨床的外形图。滑枕 4 带着刀架 3 可沿床身导轨在水平方向作往复直线运动,使刀具实现主运动,而工作台 1 带着工件作间歇的横向进给运动。滑座 2 可在床身上升降,以适应加工不同的工件高度。滑枕在换向的瞬间有较大的惯量,限制了主运动速度的提高,因此切削速度较低。另外,牛头刨床的刀具在返程时不加工,浪费时间,因此生产率较低,多用于单件小批生产或机修中,用于加工中、小零件的平面、沟槽或成形面。

② 龙门刨床。图 2.38 所示是龙门刨床的外形图。龙门刨床为“龙门”式框架结构,主要用于加工大型或重型零件上的各种平面、沟槽和各种导轨面。工作台 2 可在床身上作纵向往复直线运动,使刀具实现主运动。两个立刀架 5 可在横梁 3 的导轨上间歇地作横向进给运动,以刨削工件的水平平面。刀架上的滑板可使刨刀上、下移动,作切入运动或刨削工件的竖直平面。滑板还能绕水平轴线调整一定的角度,以加工倾斜平面。装在立柱 4 上的侧刀架 9 可沿立柱导轨作间歇移动,以刨削竖直平面。横梁 3 可沿立柱升降,应调整工件与刀具的相对位置。

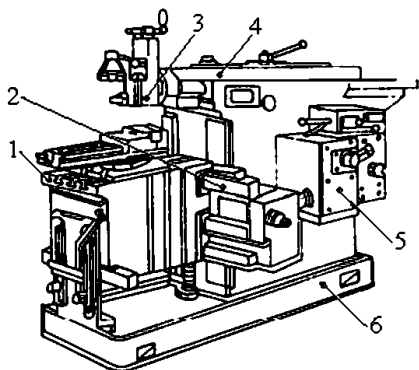


图 2.37 牛头刨床的外形图

- 1 工作台;2 滑座;3 刀架;4 滑枕;
- 5 床身;6 底座

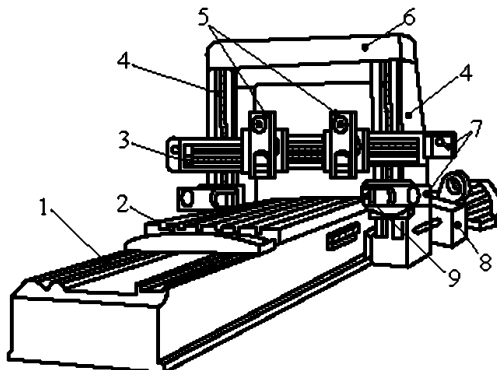


图 2.38 龙门刨床的外形图

- 1 床身;2 工作台;3 横梁;4 立柱;5 立刀架;
- 6 顶梁;7 进给箱;8 变速箱;9 侧刀架

(2) 插床。

插床可以看作立式刨床,主要用于单件小批量生产中插削与安装基面垂直的面,如孔中的键槽及多边形孔或内外成形表面。

图 2.39 所示是插床的外形图。滑枕 2 带动插刀沿立柱 3 垂直方向所作的直线往复运动为主运动。工件安装在圆工作台 1 上,通过下滑座 5 及上滑座 6 可分别作横向及纵向进给,圆工作台 1 可绕垂直轴线旋转,完成圆周进给或通过分度盘 4 实现分度。

(3) 拉床。

拉床是用拉刀加工各种内外成形表面的机床,拉床按机床布局可分为卧式和立式等。按加工表面种类不同可分为内拉床和外拉床,内拉床用于拉削工件的内表面,外拉床用于拉削工件的外表面。图 2.40(a)是卧式内拉床,是拉床中最常用的,用以拉花键孔、键槽和精加工孔;图 2.40(b)是立式外拉床,用于汽车、拖拉机行业加工汽缸体等零件的平面。

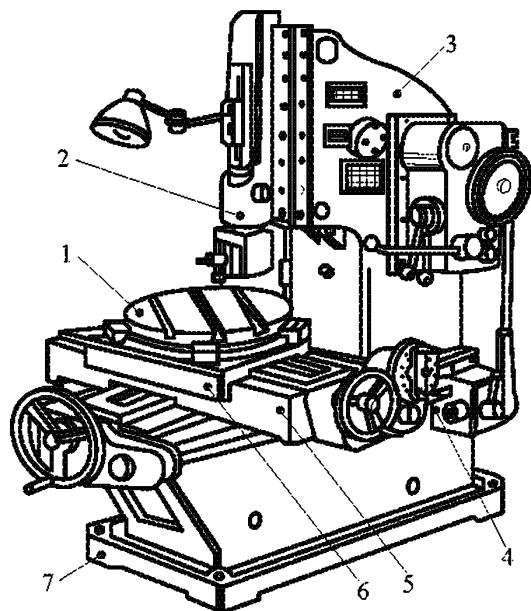
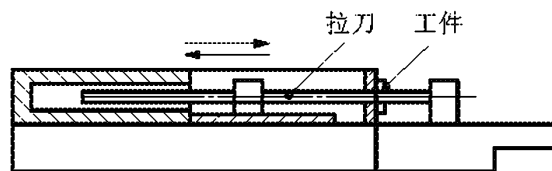
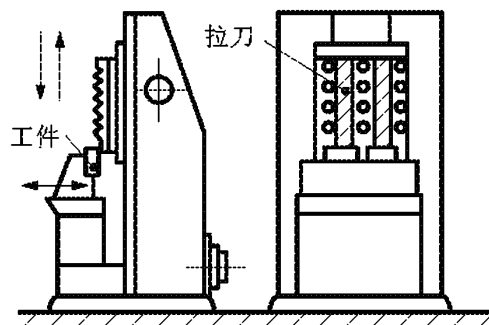


图 2.39 插床的外形图

1 工作台;2 滑枕;3 刀架;4 分度盘;
5 下滑座;6 上滑座;7 底座



(a) 卧式内拉床



(b) 立式外拉床

图 2.40 拉床的外形图

拉床可加工各种形状的通孔、平面及成形表面等,图 2.41 为拉床加工典型表面形状。

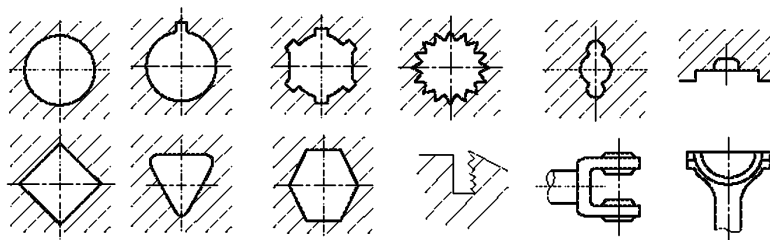


图 2.41 拉床加工的典型表面形状

拉削时,拉刀使被加工表面一次拉削成形,所以拉床只有主运动,没有进给运动。拉床的主运动是拉刀的直线运动。拉床的主运动多采用液压驱动,以承受较大的切削力并使拉削过程平稳。

拉削加工的生产率高,加工出的工件精度高、表面粗糙度值小。但刀具结构复杂,制造与刃磨费用较高,因此常用于大批大量生产中。

2.3 车床传动系统及典型部件

卧式车床是各类机床中最为广泛的一种通用机床,其传动系统和结构都具有相当的代表性和典型性。现以 CA6140 卧式车床为典型实例进行分析和介绍,以掌握卧式车床的传动原理、结构及分析方法,进而推广应用于其他各类机床的分析。

2.3.1 机床的传动联系和传动原理图

1. 机床的传动联系

机床加工零件时,是通过刀具与工件的相对运动及其他辅助运动形成加工表面。为了

实现加工过程中的各种运动,机床必须具备以下 3 个基本组成部分:

(1) 执行件。机床上最终实现所需运动的部件,如主轴、刀架、工作台等,它们带动工件或刀具旋转或移动,并保持准确的运动轨迹。

(2) 动力源。提供运动和动力的装置,是执行件的运动来源。机床可以几个运动共用一个动力源,如普通机床;也可以每个运动单独使用一个动力源,如数控机床。

(3) 传动装置。将机床动力源的运动和动力传给运动执行机构,或将运动由一个执行机构传递到另一个执行机构,以保持两个运动之间的准确传动关系。

传动装置把动力源与执行件或者把执行件与执行件联系起来,构成传动联系。构成一个传动联系的一系列传动件称为传动链。

根据传动联系的性质,传动链可分为如下两类:

(1) 外联系传动链:机床动力源与执行件之间的传动联系。外联系传动链的作用是使执行件按预定的速度运动,并传递一定的动力。外联系传动链传动比的变化只影响执行机构的运动速度,不影响加工表面的形状,因此,外联系传动链不要求动力源与执行机构间有严格的传动比关系。

(2) 内联系传动链:执行件与执行件之间的传动联系。内联系传动链的作用是将两个或两个以上的单独运动组成复合的成形运动,它决定着复合运动的轨迹。因此,内联系传动链所联系执行件之间的相对速度及相对位移量有严格的要求,不应有摩擦传动和瞬时传动比变化的传动件,如链传动。在卧式车床上用螺纹车刀车削螺纹时,联系主轴和刀架之间的螺纹传动链,就是一条传动比有严格要求的内联系传动链,它能保证并得到螺纹所需的螺距。

2. 传动原理图

为了简单明确地反映机床的传动联系,常用一些简单的符号来表示传动原理和传动路线,这就是传动原理图。图 2.42 为传动原理图常用的一部分符号。其中,表示执行件的符号还没有统一的规定,一般采用较直观的图形表示。

卧式车床的传动原理如图 2.43 所示。卧式车床在加工螺旋表面时,需要有一个刀具与工件间相对的螺旋运动。根据运动的叠加原理,我们可以将这个运动分解为主轴的旋转 B_{11} 和车刀的纵向移动 A_{12} 两部分。由图可知,车床有两条传动链:一是联系复合运动两部分 B_{11} 和 A_{12} 的内联系传动链:主轴—4—5— i_f —6—7—丝杠;二是联系动力源(电动机)与这个复合运动的外联系传动链。外联系传动链可以联系复合运动中的任一环节 B_{11} 或 A_{12} 。由于电动机提供的主要动力是给主轴的,故外联系传动链可以表达为电动机—1—2— i_v —3—4—主轴。

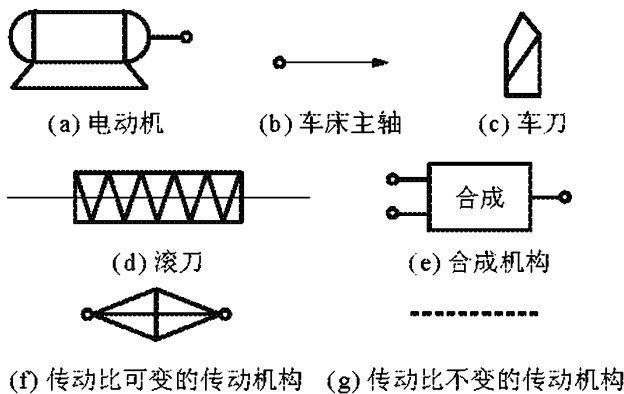


图 2.42 传动原理图常用符号

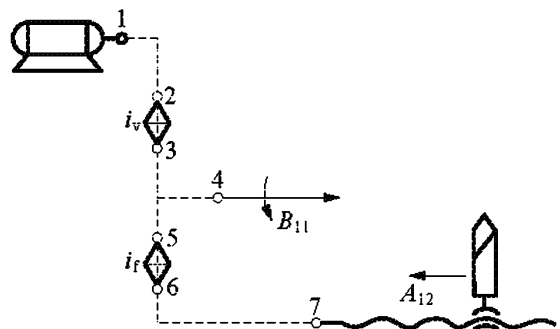


图 2.43 卧式车床的传动原理图

原理图可通过传动框图进一步具体化,如图 2.44 所示。电动机经主换向机构、主变速机构拖动主轴。主换向机构主要用于切削螺纹:切削一刀结束,主换向机构使主轴连同刀架一起换向,回到切削起点,再切第二刀。这一段相当于传动原理图的 1—2 段。主变速机构用于变速,相当于 i_0 。主变速机构至主轴为定比传动,相当于 3—4 段。

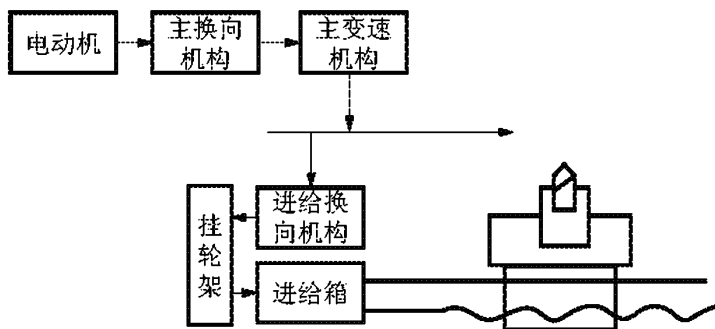


图 2.44 卧式车床传动框图

进给链(切螺纹时为螺纹链)从主轴开始,经进给换向机构、挂轮和进给箱内的变换机构、转换机构——光杠(普通车削)、溜板箱内的转换机构传至刀架;或经丝杠(车螺纹)和溜板箱内的螺母传至刀架。

进给换向机构主要用来决定车削右旋或左旋螺纹,这一段相当于 4—5 段。挂轮和进给变换机构用以变换被切螺纹的导程或进给量,相当于 i_f 。进给箱内的转换机构将运动传至丝杠(内联系传动链——螺纹链)或光杠(外传动链——进给链)。从进给变速机构至刀架,相当于 6—7 段。

溜板箱中的转换机构改变进给的方向:纵向或横向,正向或反向。若用快速电动机经溜板箱的转换机构驱动刀架,则可实现刀架的快移。

2.3.2 CA6140 型卧式车床的传动系统

机床的传动原理图所表示的传动关系要通过传动系统图来体现。传动系统图画在一个能反映机床基本外形和各主要部件相互位置的平面上,并尽可能绘制在机床外形的轮廓内,各种传动元件使用简单的符号表示,且各传动元件应尽可能按运动传递的顺序安排。无法直观表现的联系可以通过折线、大括号或虚线表示。

此图只表示传动关系,不代表各传动元件的实际尺寸和空间位置。

图 2.45 是 CA6140 型卧式车床的传动系统图。图中的符号是按照国家标准 GB4460—84《机械制图——机动示意图中的规定符号》的有关规定绘制的,各齿轮所标的数字表示齿数。传动系统包含主运动和进给运动两部分。

1. CA6140 型卧式车床的主运动传动链

1) 传动路线

主运动传动链是连接主电动机和主轴的传动链。运动由电动机(7.5kW,1450r/min)经 V 形带轮传动副 $\phi 130\text{mm}/\phi 230\text{mm}$ 传至主轴箱中的轴 I。在轴 I 上装有双向多片摩擦离合器 M_1 ,使主轴正转、反转或停止。它就是传动系统图中(图 2.44)的主换向机构。当压紧离合器 M_1 左部的摩擦片时,轴 I 的运动经齿轮副 $\frac{56}{38}$ 或 $\frac{51}{43}$ 传给轴 II,使轴 II 获得两种转速。压紧右部的摩擦片时,这时轴 I 至轴 II 间多了一个中间齿轮 34,故轴 II 的转向与经 M_1 左部传动时相反。当离合器处于中间位置时,左、右摩擦片都没有被压紧,轴 I 的运动不能传给轴 II,从而使主轴停转。

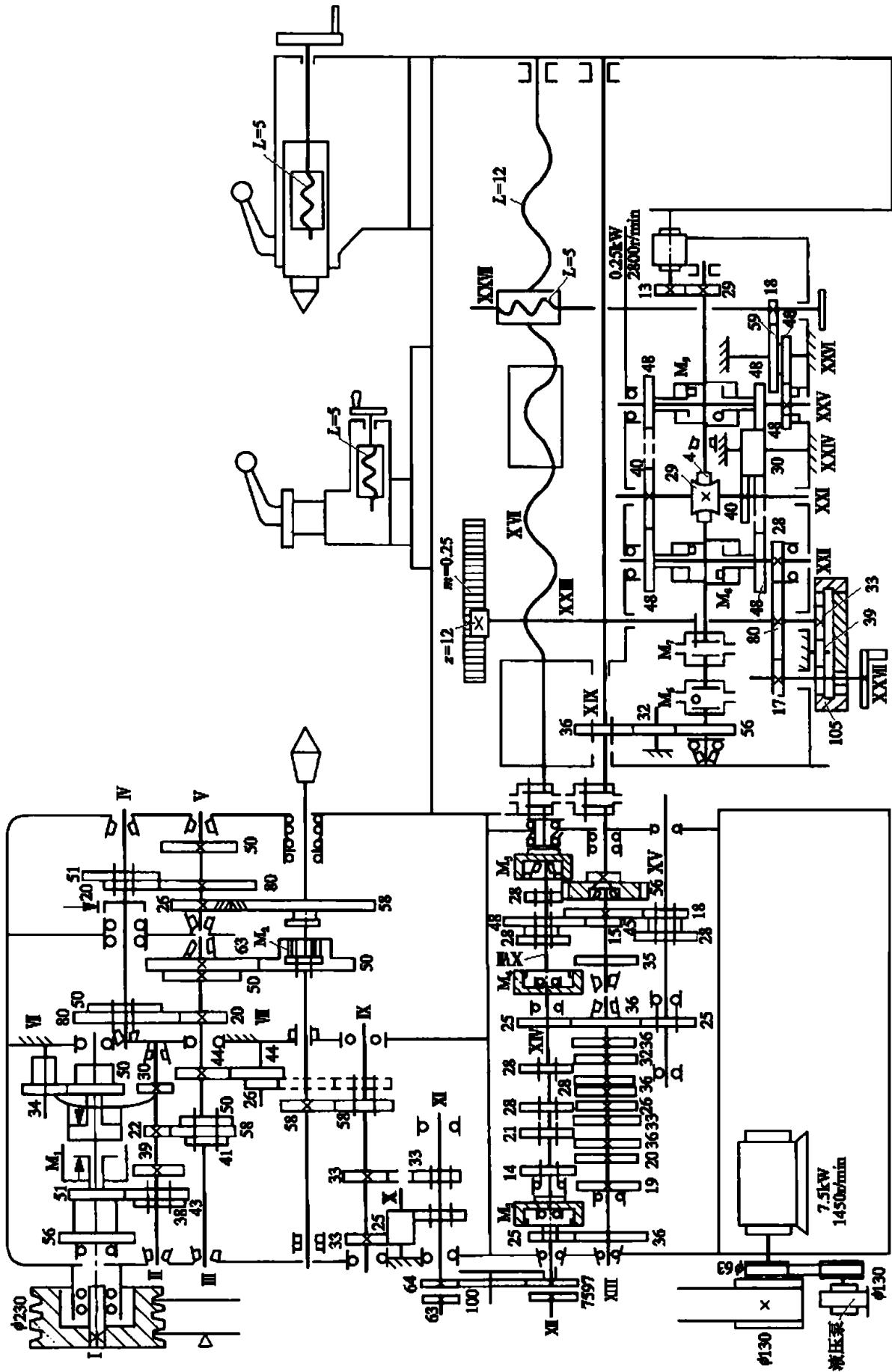


图 2.45 CA6140 型卧式车床的传动系统图

轴 II 的运动可以通过轴 II、轴 III 间 3 对齿轮的任一对传至轴 III，故轴 III 正转共 $2 \times 3 = 6$ 种转速。

运动由轴 III 传往主轴有两条路线：

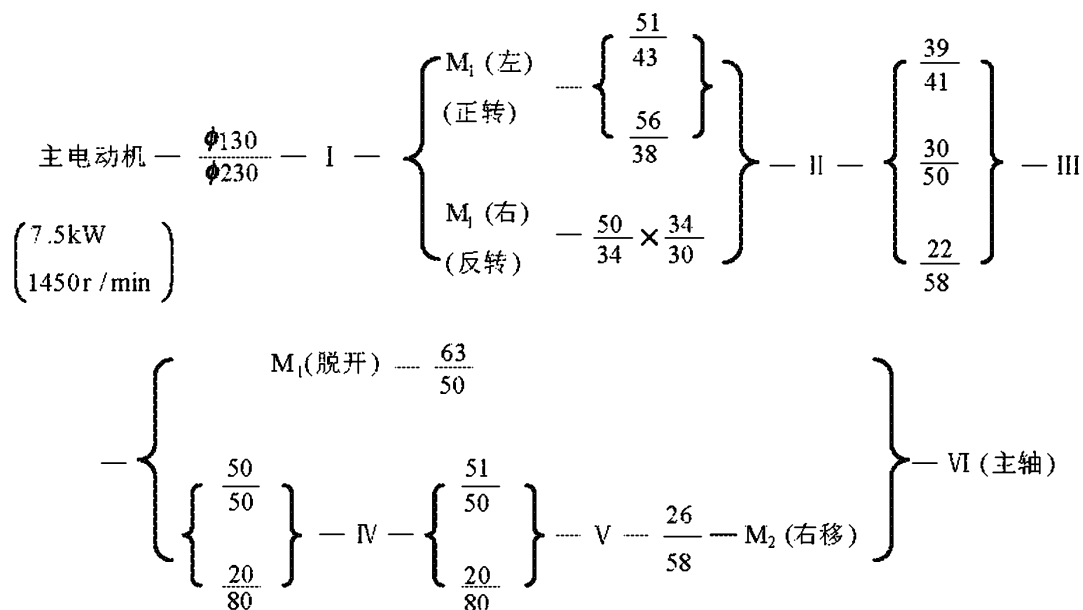
(1) 高速传动路线。主轴上的滑移齿轮 50 移至左端，使之与轴 III 上右端的齿轮 63 啮合。运动由轴 III 经齿轮副 $\frac{63}{50}$ 直接得到 450~1400r/min 的 6 种高转速。

(2) 低速传动路线。主轴上的滑移齿轮 50 移至右端，使主轴上的齿式离合器 M_2 啮合。轴 III 的运动经齿轮副 $\frac{20}{80}$ 或 $\frac{50}{50}$ 传给轴 IV，又经齿轮副 $\frac{20}{80}$ 或 $\frac{51}{50}$ 传给轴 V，再经齿轮副 $\frac{26}{58}$ 和齿式离合器 M_2 传给主轴，使主轴有 $6 \times 2 \times 2 = 24$ 种低转速。因为轴 III 到轴 V 间的 2 个双联滑移齿轮变速组得到的 4 种传动比中，有 2 种重复，即

$$\mu_1 = \frac{50}{50} \times \frac{51}{50} \approx 1, \mu_2 = \frac{50}{50} \times \frac{20}{80} = \frac{1}{4}, \mu_3 = \frac{20}{80} \times \frac{51}{50} \approx \frac{1}{4}, \mu_4 = \frac{20}{80} \times \frac{20}{80} = \frac{1}{16}$$

其中， μ_2 、 μ_3 基本相等，因此经低速传动路线时，主轴 VI 实际获得的只有 $6 \times (4 - 1) = 18$ 级转速，其中有 6 种重复转速。上述这些滑移变速齿轮副就是传动框图中的主变速机构。

传动系统可用传动路线表达式表示如下：



2) 主轴转速级数和转速

由传动系统图和传动路线表达式可知，当主轴正转时，可以获得 6 种高转速和 18 种低转速，共计 24 级转速，其范围是 10~1400r/min。同理，当主轴反转时，可以获得 12 级转速，其范围是 14~1580r/min。主轴反转通常不是用于切削，而是用于车削螺纹时的退刀运动。

主轴的各级转速，可以根据滑移齿轮的啮合状态求得。在图 2.45 所示的啮合位置时，主轴的转速为

$$n_{\pm} = 1450 \times \frac{130}{230} \times \frac{51}{43} \times \frac{22}{58} \times \frac{63}{50} \text{r/min} \approx 450 \text{r/min}$$

3) 主传动系统转速图

主轴的转速和级数可以通过转速图直观地表示出来。转速图可以表达主轴的每一级转速是通过哪些传动副得到的，这些传动副之间关系如何，以及各传动轴的转速等。

图 2.46 是 CA6140 型卧式车床主传动系统的转速图。转速图由以下三个部分组成：

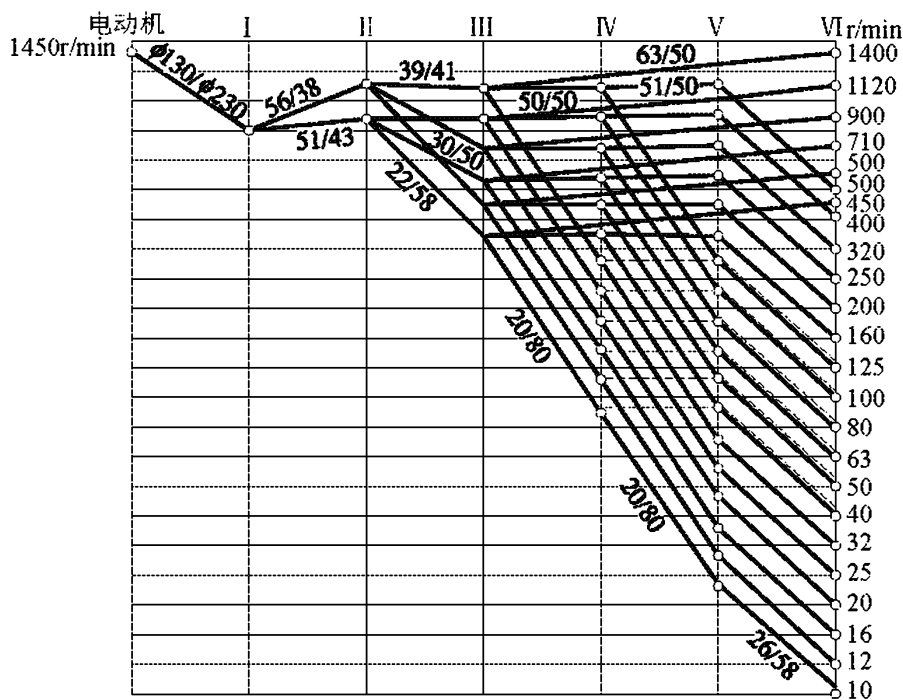


图 2.46 CA6140 型卧式车床主轴转速分布图

(1) 距离相等的一组竖线代表各轴。轴号写在上面,竖线间的距离不代表中心距。

(2) 距离相等的一组水平线代表各级转速,与各竖线的交点代表各轴的转速。由于分级变速机构的转速一般是按照等比数列排列的,故转速采用了对数坐标。相邻两水平线之间的间隔为 $\lg\phi$ (其中 ϕ 为相邻两级转速之比)。为了简单起见,转速图中省略了对数符号。

(3) 各轴之间的连线的倾斜方式代表了传动副的传动比,升速时向上倾斜,降速时向下倾斜。斜线向上倾斜 x 格表示传动副的实际传动比为 $Z_{\text{主}}/Z_{\text{被}} = \phi^x$; 斜线向下倾斜 x 格表示传动副的实际传动比为 $Z_{\text{主}}/Z_{\text{被}} = \phi^{-x}$ 。

例如,CA6140 型卧式车床的公比 $\phi = 1.26$,在轴 II 轴 III 之间传动比 $30/50 \approx 1/\phi^2$,基本下降 2 格; $22/58 \approx 1/\phi^4$,基本下降 4 格。

2. CA6140 型卧式车床的进给传动链

进给传动链是实现刀具纵向或横向移动的传动链。CA6140 型卧式车床在切削螺纹时,进给传动链是内联系传动链。主轴每转 1 转,刀架的移动量应等于螺纹的导程。在切削圆柱面和端面时,进给传动链是外联系传动链,进给量也以工件每转刀架的移动量计。因此,在分析进给传动链时,都把主轴和刀架当作传动链的两端。

运动从主轴 VI 开始,经轴 IX 传至轴 X,可经一对齿轮直接传递,也可经轴 XI 上的惰轮传递,这是进给换向机构。然后,经挂轮架至进给箱。从进给箱传出的运动,一条路线经丝杠 XIX 带动溜板箱,使刀架作纵向运动,这是切削螺纹的传动链;另一条路线经光杠 XX 和溜板箱,带动刀架作纵向或横向的机动进给运动,这是进给传动链。

1) 车削螺纹

CA6140 型卧式车床切削螺纹时,可以车削米制、英制、模数制和径节制四种标准的常用螺纹;此外,还可以车削大导程、非标准和较精密的螺纹。既可以车削右螺纹,又可以车削左

螺纹。进给传动链的作用是提供符合要求的进给量,达到车削上述四种标准螺纹的目的。

2) 车削圆柱面和端面

(1) 传动路线。为了减少丝杠的磨损和便于操纵,机动进给是由光杠经溜板箱传动的。这时,将进给箱中的离合器 M_5 脱开,使轴 X VIII 的齿轮 28 与轴 XX 左端的 56 相啮合。运动由进给箱传至光杠 XX,再经溜板箱中的齿轮副 $\frac{36}{32} \times \frac{32}{56}$ 、超越离合器及安全离合器 M_5 、轴 XXII、蜗杆蜗轮副 $\frac{4}{29}$ 传至轴 XXIII。若运动由轴 XXIII 经齿轮副 $\frac{40}{48}$ 或 $\frac{40}{30} \times \frac{30}{48}$ 、双向离合器 M_6 、轴 XXIV 及齿轮副 $\frac{28}{80}$ 、轴 XXV 传至小齿轮 12;小齿轮 12 与固定在床身上的齿条相啮合,小齿轮转动时,就使刀架作纵向机动进给以车削圆柱面。若运动由轴 XXIII 经齿轮副 $\frac{40}{48}$ 或 $\frac{40}{30} \times \frac{30}{48}$ 、双向离合器 M_7 、轴 XXVIII 及齿轮副 $\frac{48}{48} \times \frac{59}{18}$ 传至横向进给丝杠 XXX,就使横刀架作横向机动进给以车削端面。

(2) 纵向机动进给量。CA6140 型卧式车床纵向机动进给量有 64 种。当运动由主轴经正常导程的米制螺纹传动路线时,可获得 0.08~1.22mm/r 的 32 种正常进给量。其余 32 种进给量可通过英制螺纹传动路线和扩大螺纹导程机构得到。

(3) 横向机动进给量。CA6140 型卧式车床横向机动进给量是纵向机动进给量的一半。

3) 刀架的快速移动

为了减轻工人的劳动强度和缩短辅助时间,CA6140 型卧式车床的刀架可以实现纵向和横向机动快速移动。按下快速移动按钮,运动由快速电动机(250W,1360r/min)经齿轮副 $\frac{18}{24}$ 使轴 XXII 高速转动,再经蜗杆蜗轮副 $\frac{4}{29}$ 、溜板箱内的转换机构,使刀架实现纵向或横向的机动快速移动。快速移动方向仍由双向离合器 M_6 和 M_7 控制。

刀架快速移动时,不必脱开进给传动链。为了避免仍在转动的光杠和快速电动机同时传动轴 XXII,在齿轮 56 与轴 XXII 之间装有超越离合器。

2.3.3 CA6140 型卧式车床主轴箱简介

主轴箱是一个比较复杂的部件。用于支承主轴和传动机构,并使其实现旋转、启动、停止、变速和换向等功用。主轴箱通常包含传动机构,主轴部件,启动、停止以及换向装置,制动装置,操纵机构和润滑装置等。图 2.47 即是 CA6140 型普通车床主轴箱的展开图。所谓展开图,就是按照传动轴传递运动的先后顺序,沿其轴心线剖开,并将其展开在一个平面上而形成的一种结构图。图 2.47 中的展开图,就是沿轴心线 VII—IX—I—II—III[V]—VI—XI—IX—X 的剖切图 A—A(见图 2.48)展开后的结构形式。通过展开图可以得到:各传动件(轴、齿轮、带传动和离合器等)的传动关系;各传动轴及主轴上有关零件的结构形状、装配关系和尺寸,以及箱体有关部分的轴向结构和尺寸。

当然,仅用主轴箱展开图是不足以清楚反映主轴箱部件结构的,这是因为展开图不能表示出各传动件的空间位置及其他机构(如操纵机构、润滑装置等)。所以,必须通过装配图及必要的向视图及剖面图来加以补充说明。

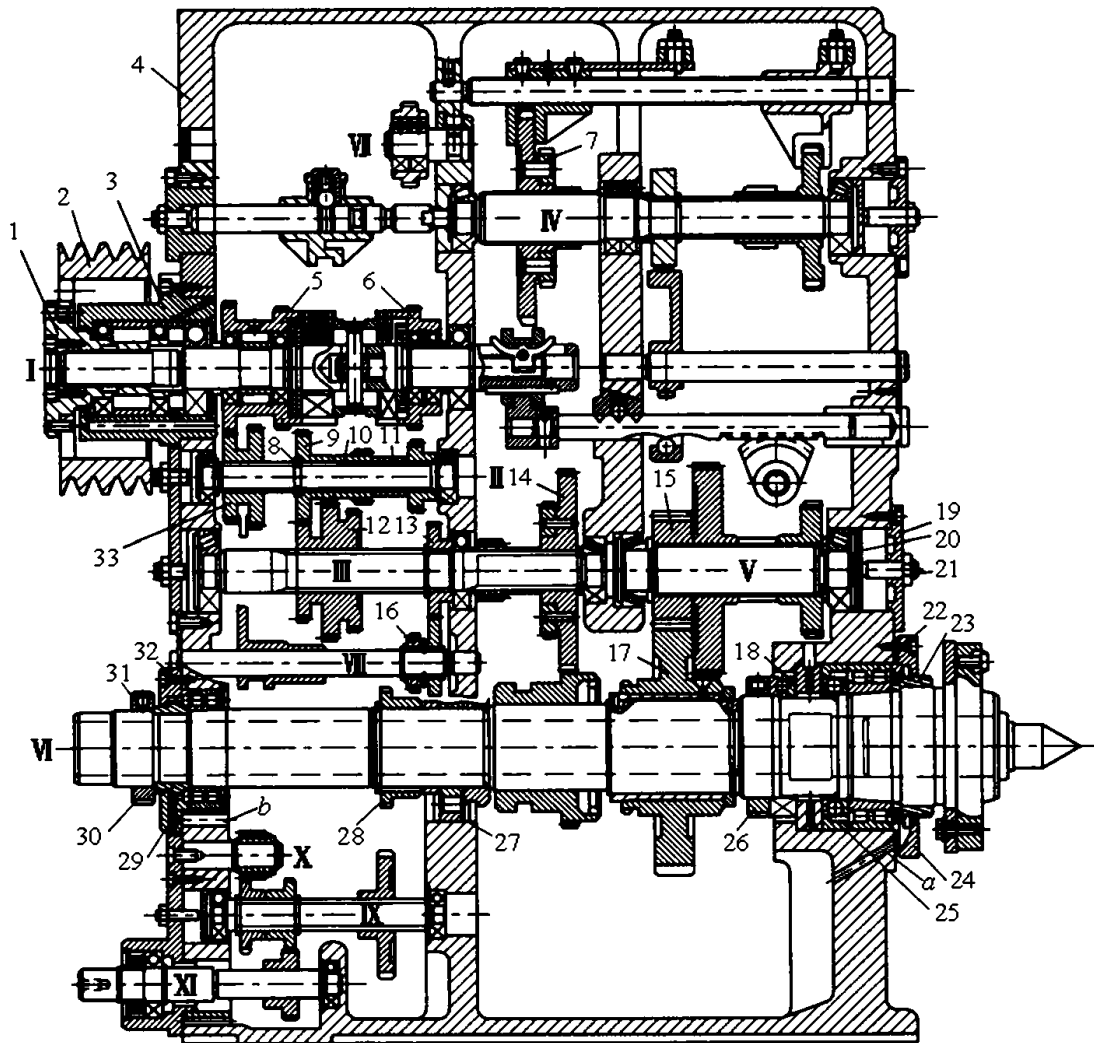


图 2.47 CA6140 型普通车床主轴箱展开图

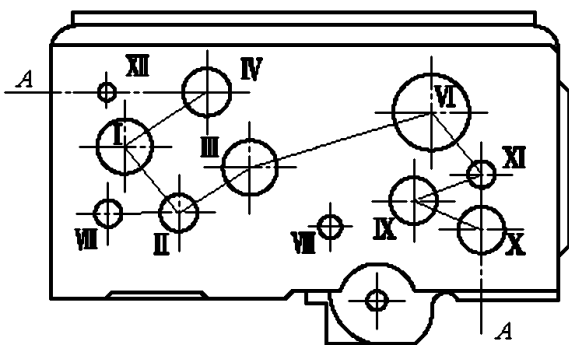


图 2.48 CA6140 型普通车床主轴箱轴示意图

1. 机床主轴部件的基本要求与结构

主轴部件是机床的重要部件之一。主轴部件由主轴、主轴支承和安装在主轴上的传动件、密封件等组成。机床工作时，主轴带动工件或刀具直接参加表面成形运动，并传递动力，它所传递的功率约占整台机床的 80%。主轴部件又是工件或刀具的支承件，承受切削力、进给力、驱动力及工件或刀具的重力等，并要保证与机床其他有关部件间有精确的相对位置。

主轴转速在很大程度上影响着机床的生产率；其旋转的精度在很大程度上影响着工件的加工精度。

1) 主轴部件的基本要求

各种机床主轴的一个共同的要求，就是主轴在工作负载下，应能长期保持所需要的稳定工作精度，以保证工件合格的加工精度和表面粗糙度。一般机床主轴部件的基本要求如下：

(1) 旋转精度。主轴部件的旋转精度是指机床在空载低速时，在主轴端安装工件、夹具或刀具部位上用千分表测得的径向跳动量和轴向跳动量。它是机床的一项主要精度指标，直接影响被加工零件的几何精度和表面粗糙度。主轴部件的旋转精度取决于主轴部件的主

要零件(如主轴、轴承等)的制造和装配精度。

主轴部件的旋转精度是在静态下测量的,能在一定程度上起到保证受载时主轴动态旋转精度的作用。对于高精度机床还需作动态旋转精度测定。

(2) 静刚度。主轴部件的静刚度是指在外力作用下抵抗变形的能力,也就是在外力作用下,主轴应仍能保持一定的工作精度。主轴部件刚度的大小通常是以主轴前端产生单位位移时,在位移方向上所需施加的作用力的大小来表示的。它综合地反映了主轴和轴承的变形。如图 2.49 所示,在主轴端部加以作用力 P ,如主轴端部产生的位移为 y ,则主轴部件的刚度值为 P/y 。因为这个位移量直接与加工精度有关,但与工件或刀具的安装方式及其尺寸无关,因而它比较能更好地反映主轴部件的结构性能。

影响主轴部件静刚度的因素较多,一般有主轴的结构尺寸、轴承的类型和装置方式、轴承间隙的大小、传动件的布置方式以及主轴部件的制造和装配质量等。

(3) 抗振性。主轴部件的抗振性是指机床进行切削时,抵抗振动、保持平稳地运转的工作能力。振动会影响工件的表面质量、刀具耐用度和主轴轴承的寿命,还会产生噪声,影响工作环境。主轴部件在运转时应尽量减少振动,这对高速和高精度机床更为重要。

影响主轴部件抗振性的主要因素是主轴部件的阻尼、刚度和固有频率,并与主轴的传动方式、轴承类型、主轴部件质量的分布情况、齿轮与轴承等零件制造与装配的质量有关。

(4) 温升和热变形。主轴部件的热变形是指机床工作时,因各相对运动处的摩擦等发热造成各部分间的温差,使主轴部件在形状和位置上产生的畸变。热变形应以主轴部件运转一段时间后因发热而造成的各部分位置变化来度量,也可用各部分的温升近似地表示。

主轴部件在运转中温升过高,会引起加工精度变化和抱轴的不良后果。

使主轴部件产生温升和热变形的热源,主要是主轴支承中的径向和轴向轴承、润滑油以及直接装在主轴上的电动机。按 JB 2278—78 规定:主轴在最高转速运转达到稳定温度(温度上升不超过每小时 5°C)时,滑动轴承温度不得超过 60°C ,温升不得超过室温 30°C ;滚动轴承温度不得超过 70°C ,温升不得超过室温 40°C 。高精度机床(如坐标镗床)主轴轴承的温度不得超过室温 10°C 。

(5) 精度持久性。主轴部件的精度持久性是指长期保持其原来制造精度的能力。为此,主轴部件的各滑动表面,包括主轴轴颈和滑动轴承配合面、钻镗床等轴向移动的主轴部件的导向表面以及主轴端部和内锥孔等都必须具有一定的耐磨性。

2) 主轴部件的结构

CA6140 型普通车床的主轴部件是由主电动机 (7.5kW) 带动,主轴转速为 $10\sim 1400\text{r}/\text{min}$ 。主轴部件(如图 2.49 所示)主要由主轴、主轴支承和传动件、密封件等组成。

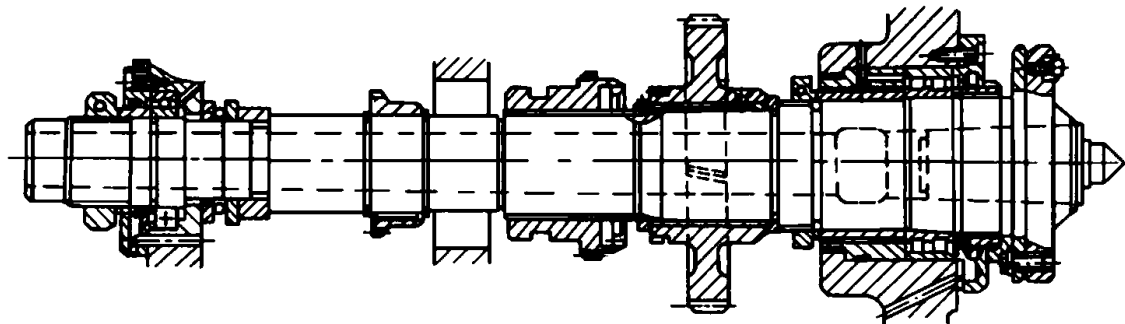


图 2.49 CA6140 型普通车床主轴部件

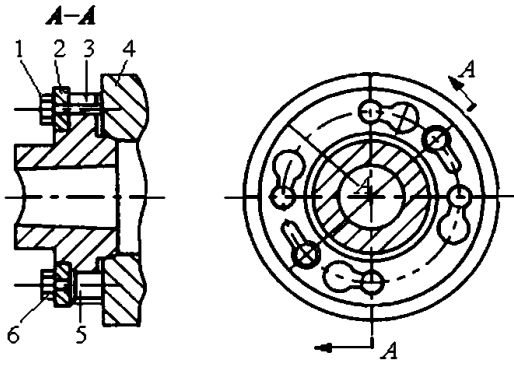


图 2.50 卡盘或拨盘的安装

(1) 轴的结构形状。CA6140 型普通车床的主轴是一个空心的阶梯轴。主轴前端采用短法兰式结构,它的作用是安装卡盘或拨盘。如图 2.50 所示,拨盘或卡盘座 4 由主轴 3 的短圆锥面定位。安装时,使拨盘或卡盘座 4 上的四个螺栓 5 及其螺母 6 通过主轴轴肩及圆环(销紧盘)2 的孔,然后将圆环 2 转动一个角度,使螺栓 5 处于圆环的沟槽内(如图示情况),并拧紧螺钉 1 及螺母 6,就可使卡盘或拨盘可靠地安装在主轴的前端。主轴轴肩右端面上的圆形拨块是用于传递扭矩的。主轴尾端的圆柱面是各种辅具(电气、液压及气动装置等)的安装基面。这种结构由于具有装卸卡盘方便、工作可靠、定心精度高,而且主轴前端的悬伸长度较短的特点,有利于提高主轴组件的刚度,所以目前得到广泛的应用。主轴的内孔是用于通过长的棒料及卸下顶尖时穿过钢棒,也可用于通过气动、电动及液压夹紧装置的机构。主轴前端的锥孔为莫氏 6 号锥度,用于安装顶尖套及前顶尖;有时,也可安装心轴,利用锥面配合的摩擦力直接带动心轴和工件转动。主轴后端的锥孔是工艺孔。

(2) 主轴支承。主轴支承的作用是定位和轴向载荷的传递。主轴安装在三个支承上。前支承中有三个滚动轴承,前面是 D 级精度的 3182121 型双列短圆柱滚子轴承,用于承受径向力。这种轴承具有刚性好、精度高、尺寸小及承载能力大等优点。前支承中还有 2 个 D 级精度的 8120 型推力球轴承(部分机床是一个双列 60° 角接触向心推力轴承),用于承受正反两方向的轴向力,因此,此主轴采用的是前端定位形式。前端定位形式使主轴受热后向后端伸长,所以对加工精度的影响较小。后支承孔采用一个 E 级精度的 3182115 型双列短圆柱滚子轴承,主轴的中间支承是一个 E 级精度的 32216 型单列向心短圆柱滚子轴承。主轴的轴向载荷靠前支承中的两个推力轴承传至主轴箱体。

(3) 轴承的间隙调整。主轴支承对主轴的旋转精度及刚度影响很大,主轴轴承应在无间隙(或少量过盈)条件下进行运转。轴承中的间隙直接影响机床的加工精度,因此,主轴轴承的间隙须定期地进行调整。前轴承间隙的调整方法为:松开支承右端的螺母(前端螺母),拧动支承左端带锁紧螺钉的调整螺母。这时,3182121 型的内环就相对于主轴锥面向右移动,由于轴承的内端很薄,而且内孔也和主轴锥面一样,具有 1:12 的锥度。因此,内环在轴向移动的同时作径向弹性膨胀,以调整轴承径向间隙,调整妥当后,拧紧前端螺母,然后稍微松动调整螺母,以免推力轴承过紧,最后,拧紧调整螺母的锁紧螺钉。主轴的径向跳动及轴向跳动允差都是 0.01mm。主轴的径向跳动影响加工表面的圆度或同轴度;轴向跳动影响加工端面的平面度及螺距精度。当主轴的跳动量超过允许值时,一般情况下,只需适当地调整前支承的间隙,就可使主轴跳动量调整到允许值内。如径向跳动仍达不到要求,应调整后轴承。中间支承的间隙不能调整。

(4) 主轴上传动元件的布局。主轴上装有三个齿轮。右端的斜齿圆柱齿轮 Z_{38} ($m=4$, $\beta=10^\circ$, 左旋)空套在主轴上。采用斜齿轮的目的是使主轴运转平稳,传动时,齿轮作用在主轴上的轴向力方向,与切削力(纵向)的方向相反,因此,可以减少主轴前支承所承受的轴向力。中间齿轮 Z_{30} 在主轴上能够滑动。当它移动到右端位置时,主轴可低速运转;移到左端

• 104 •

位置时,主轴可高速运转;当齿轮 Z_{50} 处于中间不啮合的位置(“空挡”位置)时,主轴与轴Ⅲ及轴Ⅴ间的传动联系被断开,这时可用手转动主轴,以便做测量主轴精度及装夹的找正等工作。左端的齿轮 Z_{58} ($m=2$) 固定在主轴上,用于传动进给系统。主轴上承受载荷最大的是主轴前端的左旋斜齿轮。由于这个齿轮用于转速范围中的较低转速挡,所以承受载荷最大,容易引起主轴的较大变形。而主轴刚度的强弱直接影响机床的加工精度,因此,将这个齿轮置于接近主轴前支承处。这是由于前支承采用了刚性高的双列短圆柱滚子轴承,且箱体壁厚有所加强,即支承刚性好的缘故。

(5) 主轴部件的润滑和密封。主轴前后支承的润滑,都是由润滑油泵供油,润滑油通过进油孔对轴承进行充分的润滑,并带走轴承运转所产生的热量。为了避免漏油,在前后支承处采用了油沟式密封,即在前端螺母及后支承套筒的外表面上都有锯齿截面的环形槽。主轴旋转时,由于离心力的作用,油液就沿着斜面(朝箱内方向)被甩到法兰盘的接油槽里,油液经回油孔流到箱底,然后再流回到左床腿内的油池中。

2. 双向多片式摩擦离合器、制动器及其操纵机构

关于双向多片式摩擦离合器、制动器及其操纵机构,见图 2.47、图 2.51。

1) 组成

双向摩擦离合器装在轴Ⅰ上。摩擦离合器由内摩擦片 3、外摩擦片 2、止推片 10 及 11、压块 9 及空套双联齿轮 1 等组成。离合器左、右两部分结构是相同的。左离合器传动主轴正转,正转用于切削,传递的扭矩较大,所以片数较多(外摩擦片 8 片,内摩擦片 9 片)。右离合器(图 2.51 中未画出)传动主轴反转,主要用于退刀,片数较少(外摩擦片 4 片,内摩擦片 5 片)。

2) 工作原理

图 2.51 中剖开的部分是左离合器。图 2.51 中内摩擦片 3 装在轴Ⅰ的花键上,与轴Ⅰ一起旋转。外摩擦片 2 外圆上相当于键的四个凸起装在齿轮的缺口槽中,外片空套在轴Ⅰ上。当杆 7 通过销 5 向左推动压块 9 时,使内片 3 与外片 2 互相压紧,于是轴Ⅰ的运动便通过内外片之间的摩擦力传给左侧齿轮,使主轴正向转动。当压块 9 处于中间位置时,左、右离合器都处于脱开状态,这时,轴Ⅰ虽然转动,但离合器不传递运动,主轴处于停止状态。

3) 操纵机构

离合器的接合或脱开(也就是压块 7 处于左端、右端或中间位置)是由手柄来操纵元宝销 6。为了操纵方便,在操纵轴上共有 2 个操纵手把,它们分别位于进给箱及溜板箱的右侧。由于元宝销 6 是用销装在轴Ⅰ上的,所以这时元宝销就向顺时针方向摆动,于是元宝销下端的凸缘便推动装在轴Ⅰ内孔中的杆 7 向左移动,杆 7 通过其左端的销 5 带动压块 9,使压块 9 向左压。同理,将手柄向下扳至下端位置时,主轴反转。当手柄处于中间位置时,离合器脱开,主轴停止转动。

4) 摩擦离合器的过载保险作用

当机床超载时,摩擦片间产生打滑,于是主轴就停止转动。这样,就可避免损坏机床。因此,摩擦片之间的压紧力是根据离合器应传递的额定扭矩来确定的。制动器(刹车)安装在轴Ⅴ上,它的功用是在摩擦离合器脱开的时刻制动主轴,使主轴迅速地停止转动,以缩短辅助时间。

3. 主轴箱中各传动件的润滑

CA6140 型车床主轴箱润滑的特点是(箱)体外循环。油液将主轴箱中摩擦所产生的热量带至箱体外的左床腿中,冷却后再流入箱体,因此就可减少主轴箱的热变形(主轴位置变化小),以提高机床的加工精度。

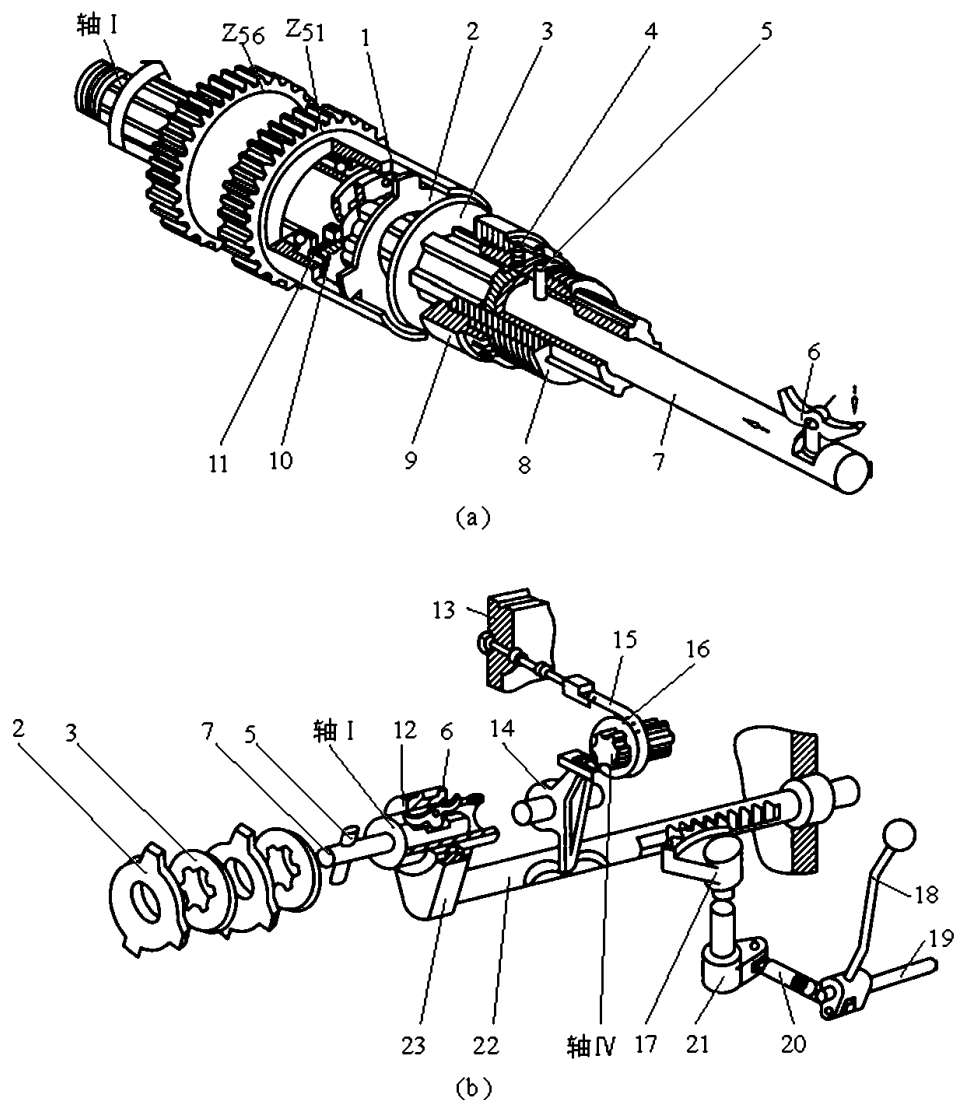


图 2.51 摩擦离合器、制动器及其操纵机构

- 1 双联齿轮;2 外片;3 内片;4 调整片;5 键;6 元宝销;7 拉杆;8 压套;9 螺母;
 10、11 止推片;12 滑套;13 调节螺钉;14 杠杆;15 制动带;16 制动轮;17 扇齿轮;
 18 手柄;19 轴;20 杆;21 曲柄;22 齿条;23 拨叉

这一外循环是靠专门的润滑系统供油的方式来实现的。装在左腿上的润滑油泵由电动机经三角皮带传动。油泵转动后,就使装在左床腿油箱内的润滑油(30号机油)经粗滤油器及油泵,由油管流到装在主轴箱左端的细滤油器中;然后再经油管流到主油箱上部的分油器内,于是润滑油便通过分油器的油孔及各分支油管,分别润滑主轴箱内各传动件(齿轮、轴承等)及操纵机构,并润滑和冷却第 I 轴上的摩擦离合器。为了使主轴轴承可靠地工作,并保证摩擦离合器充分地冷却,主轴轴承及摩擦离合器是由分油器单独用油管供应润滑油,以便供应充分的润滑油。分油器上有油管通向油标,以观察主轴箱的润滑情况是否正常。

2.4 数控机床与加工中心

2.4.1 数控机床

数控机床是计算机通过数字化信息实现对机床自动控制的机电一体化产品。现代数控机床普遍采用计算机数字控制系统,即 CNC 系统。它综合应用微电子技术、计算机自动控制、精密检测、伺服驱动、机械设计与制造技术等多方面的最新成果,是一种先进的机械加工设备。数控机床不仅能提高产品的质量、提高生产效率、降低生产成本,还能大大改善工人的劳动条件。

1. 数控机床的特点

1) 适应性广

适应性即柔性,指数控机床随生产对象而变化的适应能力。数控机床的加工对象改变时,只需重新编制相应的加工程序,输入计算机就可以自动地加工出新的工件,为解决多品种、中小批量零件的自动化加工提供了极好的生产方式。广泛的适应性是数控机床最突出的优点。随着数控技术的迅速发展,数控机床的柔性也在不断地扩展,逐步向多工序集中方向发展。

2) 加工精度高、质量稳定

数控机床是按数字指令脉冲自动工作的,这就消除了操作者人为的误差。目前,数控装置的脉冲当量普遍达到了 0.001mm,进给传动链的反向间隙与丝杠导程误差等均可由数控装置进行补偿,所以可获得较高的加工精度;尤其提高了同一批零件生产的一致性,使产品质量稳定。

3) 生产率高

数控机床能有效地减少零件的加工切削时间和辅助时间。数控机床的功率和刚度高,可采用较大的切削用量;同时可以自动换刀、自动变换切削用量、快速进退、自动装夹工件等;能在一台数控机床上进行多个表面的、不同工艺方法的连续加工;可自动控制工件的加工尺寸和精度,而不必经常停机检验。

4) 减轻劳动强度、改善劳动条件

应用数控机床时,操作者只需编程序、调整机床、装卸工件等,而后就由数控系统来自动控制机床,免除了繁重的手工操作。机床一般是封闭式加工,清洁、安全。

5) 实现复杂零件的加工

数控机床可以完成普通机床难以加工或根本不能加工的复杂曲面的零件加工,可以实现几乎是任意轨迹的运动和加工任何形状的空间曲面,因此特别适用于各种复杂形面的零件加工。

6) 便于现代化的生产管理

用计算机管理生产是实现管理现代化的重要手段。数控机床采用数字信息与标准代码处理、传递信息,特别是在数控机床上使用计算机控制,为计算机辅助设计、辅助制造和计算机管理一体化奠定了基础。

2. 数控机床的工作原理及组成

数控机床加工零件时,首先按照加工零件图纸的要求,编制加工程序,即数控机床的工作指令。把这种信息记录在信息载体上(如穿孔带、磁带或磁盘),输送给数控装置。数控装置对输入的信息进行处理之后,向机床各坐标的伺服系统发出数字信息,控制机床主运动的启停、变速,进给运动的方向、速度和位移,以及其他诸如换刀、工件装夹、冷却润滑等动作,使刀具与工件及其他辅助装置严格按数控程序规定的顺序、路线和参数,自动地加工出符合图样要求的工件。数控加工的过程是围绕信息的交换进行的。从零件图到加工出工件需经过信息的输入、信息的输出和对机床的控制等几个主要环节。所有这些工作都由计算机进行合理的组织,使整个系统有条不紊地工作。

数控机床的基本结构如图 2.52 所示,主要由控制介质、计算机数控装置、伺服驱动系统和机床机械部件组成。

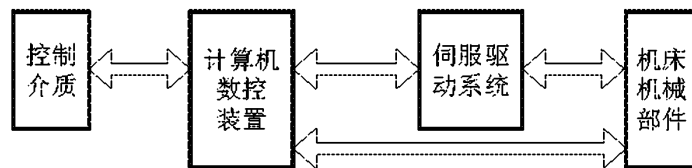


图 2.52 数控机床基本结构框图

1) 控制介质

数控加工程序是数控机床自动加工零件的工作指令。在对零件进行工艺分析的基础上,应确定:①零件坐标系,即零件在机床上的安装位置;②刀具与零件相对运动的尺寸参数;③零件加工的顺序;④主运动的启停、换向、变速等;⑤进给运动的速度、方向、位移量等工艺参数;⑥辅助装置的动作。这些加工信息用标准的数控代码,按规定的方法和格式,编制零件加工的数控程序单。编制数控程序可由人工进行,也可由计算机或数控装置完成。程序记录在控制介质(如纸带、磁带或磁盘)上。

2) 计算机数控装置

数控装置是数控机床的中枢。它接受输入装置送来的控制介质上的信息,经数控系统进行编译、运算和逻辑处理后,输出各种信号和指令给伺服驱动系统和主运动控制部分,控制机床的各部分进行有序的动作。

3) 伺服驱动系统

伺服驱动系统是数控机床的执行部分,包括伺服驱动电动机、各种驱动元件和执行部件等。它的作用是根据来自数控装置的指令发出脉冲信号,控制执行部件的进给速度、方向和位移量,是执行部件按规定轨迹移动或精确定位,加工出符合图样要求的工件。每个作进给运动的执行部件,都配有一套伺服驱动系统。每个脉冲信号使机床执行部件的位移量叫脉冲当量,常用的脉冲当量有 0.01mm/脉冲、0.005mm/脉冲、0.001mm/脉冲。伺服系统的性能是决定数控加工精度的生产效率的主要因素之一。

4) 机床的机械部件

机床的机械部件主要包括:主运动部件、进给运动(如工作台、刀架等)、支承部件(如床身、立柱等)及其他辅助装置(冷却、润滑、转位、夹紧、换刀等部件)。图 2.53 所示为数控车床的外观图。

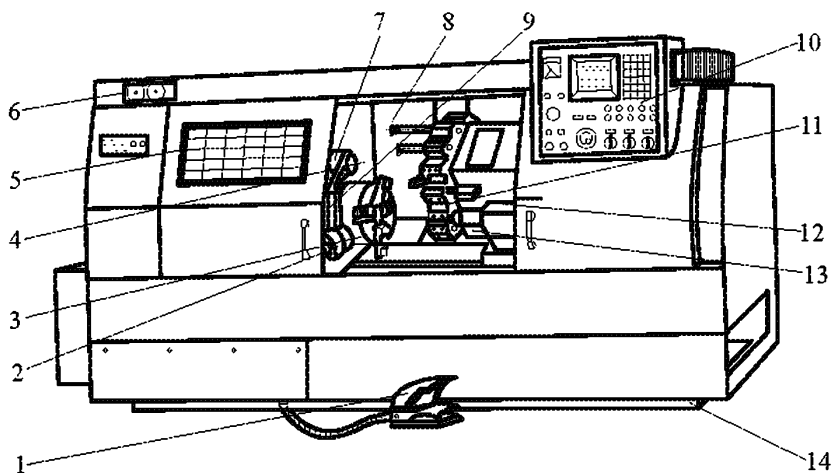


图 2.53 数控车床的外观图

- 1 脚踏开关;2 对刀仪;3 主轴卡盘;4 主轴箱;5 机床防护门;6 压力表;7 对刀仪防护罩;
8 导轨防护罩;9 对刀仪转臂;10 操作面板;11 回转刀架;12 尾座;13 滑板;14 床身

对于加工中心类的数控机床,还有存放刀具的刀库、交换刀具的机械手等部件。数控机床的机械部件的结构强度、刚度、精度和抗振性等方面的要求很高,且传动和变速系统要便于实现自动化控制。

3. 数控机床的分类

1) 按运动轨迹的方式

数控机床按运动轨迹的方式可分为点位控制、直线控制和轮廓控制 3 类。

(1) 点位控制系统只要求获得准确的加工坐标点位置,在移动过程中并不进行加工,所以运动轨迹不需要严格控制。例如,数控钻床、数控坐标镗床和数控冲床就采用点位控制系统。

(2) 直线控制系统除了要求位移起、终点的定位准确外,还要求控制两坐标点之间的位移轨迹是一条直线,并能实现平行于坐标轴的直线切削加工。例如,数控铣床铣削平面、数控车床车削台阶轴等。

(3) 轮廓控制系统能够对两个或两个以上坐标方向的运动,同时进行连续控制并切削加工。例如,在数控铣床上加工一个三维曲面。

2) 按伺服系统的类型

数控机床按伺服系统的类型可分为开环控制、闭环控制和半闭环控制 3 类。

(1) 开环控制采用开环伺服系统,一般由步进电动机、配速齿轮和丝杆螺母副等组成,如图 2.54(a)所示。伺服系统没有检测反馈装置,不能进行误差校正,故机床加工精度不高。但系统结构简单、维修方便、价格低,适用于经济型数控机床。

(2) 闭环控制采用闭环伺服系统,通常由直流(或交流)伺服电动机、配速齿轮、丝杆螺母副和位移检测装置等组成,如图 2.54(b)所示。安装在工作台上的位移检测装置将工作台的实际位移值反馈到数控装置中,与指令要求的位置进行比较,用差值进行控制,可保证达到很高的位移精度。但系统复杂、调整维修困难,一般用于高精度的数控机床上。

(3) 半闭环控制类似闭环控制,但位移检测装置安装在传动丝杆上,如图 2.54(c)所示。丝杆螺母传动机构及工作台不在控制环内,其误差无法校正,故精度不如闭环控制的。但系统结构简单、稳定性好、调试容易,因此应用比较广泛。

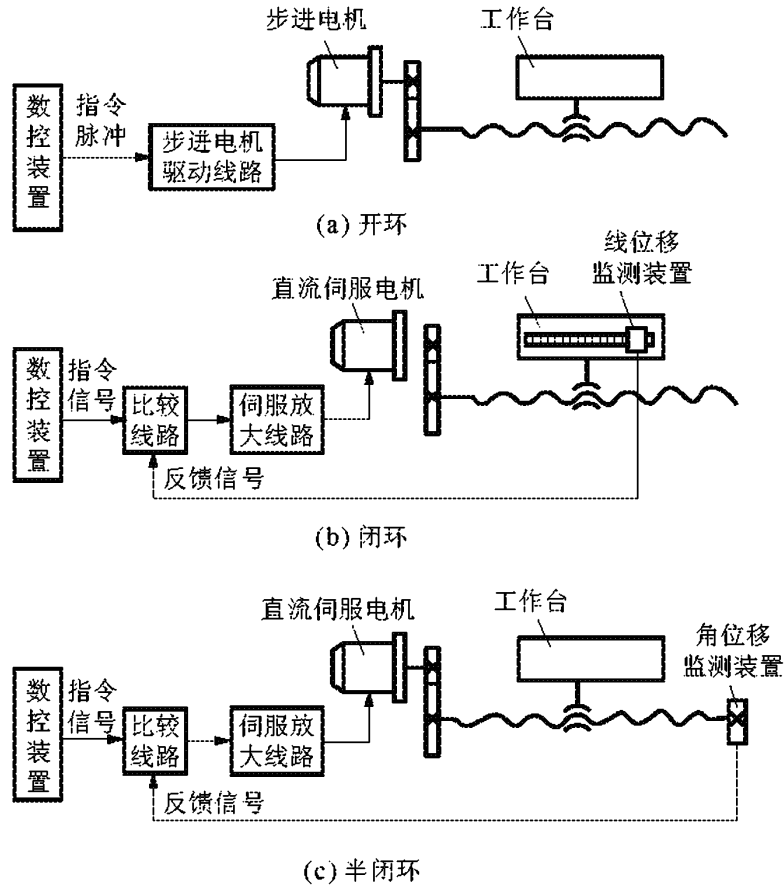


图 2.54 开环、闭环和半闭环伺服系统

2.4.2 加工中心

具有自动换刀装置的数控机床通常称为加工中心,其主要特征是带有一个容量较大的刀库(一般有 10~120 把刀具)和自动换刀机械手。工件在一次装夹后,数控系统能控制机床按不同要求自动选择和更换刀具,自动连续完成铣(车)、钻、镗、铰、镗、攻螺纹等多工种、多工序的加工。适用于加工箱体、支架、盖板、壳体、模具、凸轮、叶片等复杂零件的多品种小批量加工。

加工中心通常以主轴在加工时的空间位置分为卧式、立式和万能加工中心。图 2.55 为 JCS-018A 型立式加工中心的外观图。

床身 10 上有滑座 9,做前后运动(X 轴);工作台在滑座上做左右运动(Y 轴);主轴箱 5 在立柱导轨上做上下运动(Z 轴)。立柱左前部有刀库 4(16 把刀具)和换刀机械手 2,左后部是数控柜 3,内有数控系统。立柱右侧驱动电源柜 7,有电源变压器、强电系统和伺服装置。操作面板 6 悬伸在机床右前方,以便操作。

继镗铣加工中心之后,还有车削加工中心、钻削加工中心和复合加工中心等。车削加工中心用来加工轴类零件,是数控车床在扩大工艺范围方面的发展。除了车削工艺外,还集中了铣键槽、铣扁、铣六角、铣螺旋槽、钻横向孔、端面分度钻孔、攻螺纹等工艺功能。钻削加工中心主要进行钻孔、扩孔、铰孔、攻螺纹等,也可进行小面积的端面铣削。复合加工中心的主轴头可绕 45°轴自动回转。主轴可转成水平,也可转成竖直。若主轴转为水平,配合转位工作台,可进行四个侧面和侧面上孔的加工;主轴转为竖直,可加工顶面和顶面上的孔,故也称为“五面加工复合加工中心”。

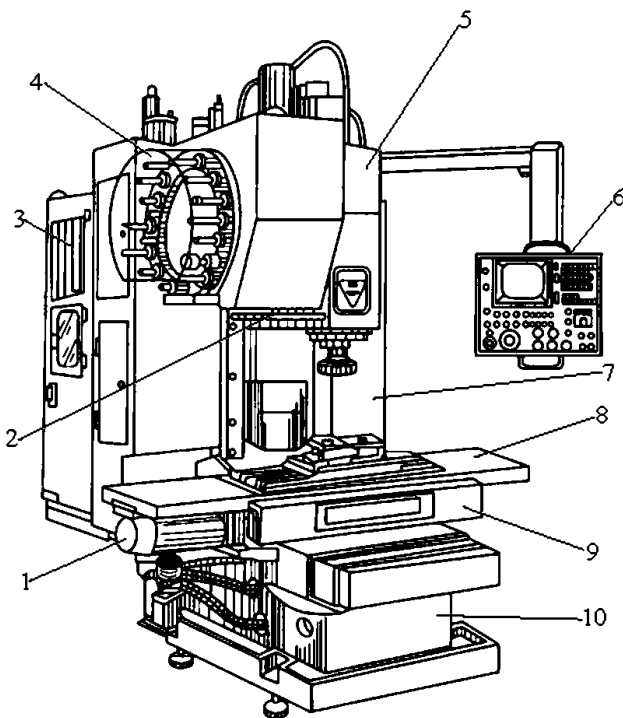


图 2.55 JCS-018A 型立式加工中心外观图

- 1 直流伺服电动机;2 换刀机械手;3 数控柜;4 盘式刀库;5 主轴箱;
6 操作面板;7 驱动电源柜;8 工作台;9 滑座;10 床身

现代加工中心配备越来越多的各种附件,以进一步增加加工中心的功能。例如,新型的加工中心可供选择的附件有:工件自动测量装置、尺寸调整装置、镗刀检验装置以及刀具破损监测装置等。

为改善加工中心的功能,出现了自动更换工作台、自动更换主轴头、自动更换主轴箱和自动更换刀库的加工中心等。自动更换工作台的加工中心一般有两个工作台,一个工作台上的工件在进行加工时;另一个工作台上可进行工件的装卸、调整等工作。自动更换主轴头的加工中心可以进行卧铣、立铣、磨削和转位铣削等加工,机床除了刀库外,还有主轴头库,由工业机器人或机械手进行更换。自动更换主轴箱的加工中心一般有粗加工和精加工主轴箱,以便提高加工精度和加工范围。自动更换刀库的加工中心,刀库容量大,便于进行多工序复杂箱体类零件的加工。

思考与练习题

- 2-1 表面发生线的形成方法有哪几种? 试简述其成形原理。
- 2-2 用钻头钻孔有哪几种运动方式? 有何特点?
- 2-3 镗孔有哪几种方式? 各有何工艺特点?
- 2-4 分析各种孔加工方法的应用特点。
- 2-5 什么是逆铣? 什么是顺铣? 试分析逆铣和顺铣的工艺特征。
- 2-6 解释下列机床型号的含义: X6132, CG6125B, Z3040, MG1432, Y3150E, T6112。
- 2-7 各类机床中能加工外圆、孔及平面的机床有哪些? 它们的适用范围有何区别?
- 2-8 机床的主要技术参数有哪些?
- 2-9 什么是内联系传动链? 什么是外联系传动链? 其本质区别是什么? 试举例说明。

- 2-10 试述 CA6140 型车床主传动链的传动路线。
- 2-11 列出 CA6140 型卧式车床最高和最低转速的传动路线表达式。
- 2-12 写出在 CA6140 型卧式车床上车削米制螺纹 $P=3\text{mm}, k=1$ 的传动路线表达式。
- 2-13 分析如图 2.55 所示机床的传动系统。

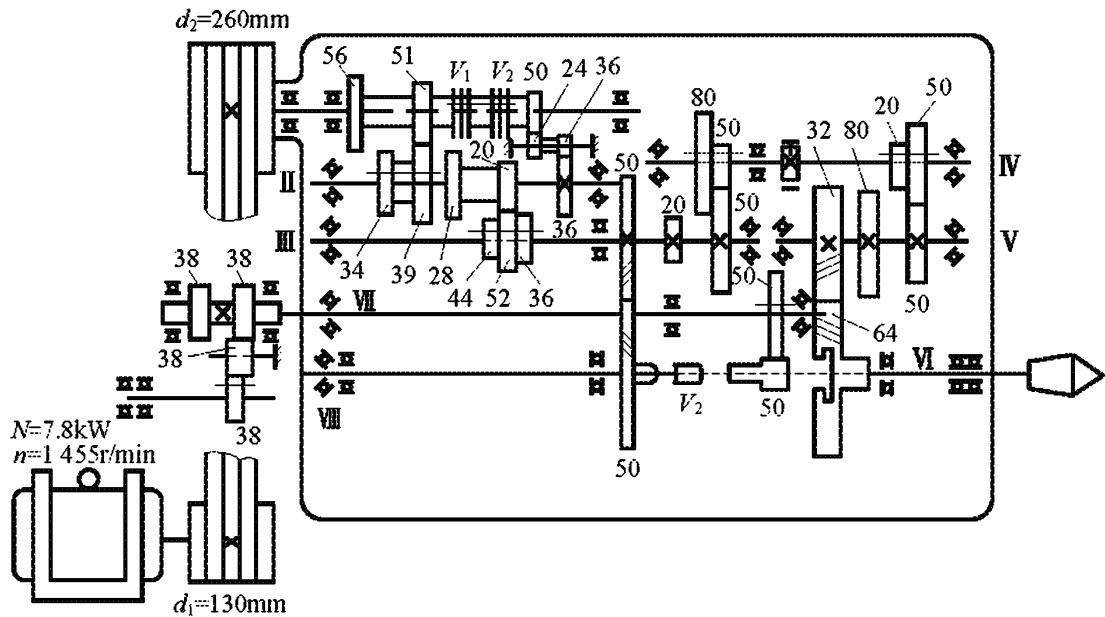


图 2.56 题 2 13

- (1) 写出主运动传动路线的表达式；
- (2) 计算主轴的转速级数；
- (3) 计算主轴的最高转速 n_{\max} 和最低转速 n_{\min} 。

2-14 CA6140 型车床是怎样通过双向多片摩擦离合器实现主轴正转、反转和制动的？

2-15 CA6140 型车床中主轴在主轴箱中是如何支承的？三爪卡盘如何装到主轴上？

2-16 简述数控机床的特点、分类及组成；说明开环、闭环、半闭环伺服系统的区别及适用场合。

第 3 章 机械加工工艺规程设计

教学提示: 机械加工工艺规程是用来规定机械加工过程和指导生产的重要技术文件。本章主要介绍机械加工过程的组成、零件的结构工艺性分析、定位基准的选择、工艺路线的拟定、工序尺寸与工艺尺寸链的计算及工艺过程的技术经济分析等内容。本章内容具有较强的实践性,学习过程中应密切注意结合实际。

教学要求: 了解生产过程和工艺过程的概念,掌握工艺过程各组成部分的含义,了解三种不同生产类型的工艺特征;了解工艺规程设计的指导思想和设计原则,了解设计工艺规程的步骤;掌握粗、精基准的选择原则,基本掌握拟定工艺路线的思路;合理选择设备,熟练掌握工序尺寸及工艺尺寸链的计算。

机器的制造是一个完整的系统工程,既包含了总体设计—部件设计—零件设计的设计过程,也包含了零件制造—部件装配—总装的生产过程的内容。一个具体的机械零件,其机械加工可以有多种不同的工艺方案。这些工艺方案在一定程度上都有其可行性,都能生产出合格零件,但在保证使用要求的前提下,应该有一种综合效益最好的方法。因此,在零件进行机械加工之前,应根据零件的材料、形状、尺寸、技术条件及生产类型等方面的要求,合理地选择各表面的加工方法及加工顺序,制定合理的机械加工工艺过程。

3.1 机械加工工艺规程的基本概念

3.1.1 机械加工工艺过程的概念及组成

采用机械加工的方法按一定顺序直接改变毛坯的形状、尺寸及表面质量,使其成为合格零件的工艺过程,称为机械加工工艺过程。它是工艺过程的重要内容,下述工艺过程均指机械加工工艺过程。

机械加工工艺过程是由一个或若干个顺序排列的工序组成的。每一个工序又可分为若干个安装、工位、工步及走刀。

1. 工序

一个或一组工人在一个工作地点对一个或同时对几个工件所连续完成的那一部分工艺过程,称为一个工序。划分工序的主要依据是工作地点是否变动和工作是否连续。只要工作地点发生了变化就构成了新的工序;即使同一工作地点,如果中间中断了加工时间,也构成不同的工序。如图 3.1 所示阶梯

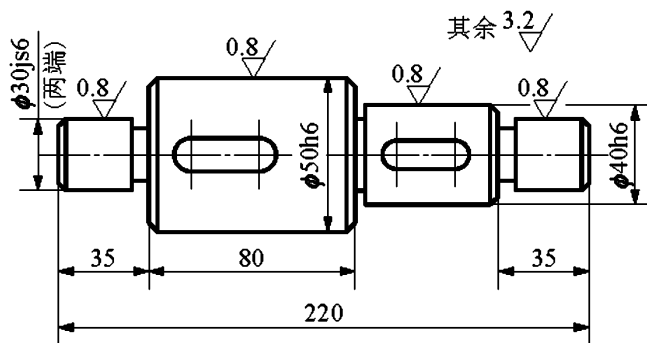


图 3.1 阶梯轴零件

轴,当生产批量较小时,其工艺过程见表 3-1。可见其工艺过程可划分为 5 个工序。其中工序 2 是对一个工件进行加工,先车工件的一端,然后调头装夹,再车另一端。如果是先车完一批工件的一端,再重新装夹车削这批工件的另一端,这时虽然工作地点没有变化,但对每一个工件来说加工已不连续,应划作两道工序。

工序是组成工艺过程的基本单元,也是生产计划的基本单元。

表 3-1 阶梯轴工艺过程

工序号	工 序 内 容	设备
1	(1) 车端面、钻中心孔 (2) 调头,车另一端面、钻中心孔	卧式车床
2	(1) 车 $\phi 50h6$ 外圆(留磨余量)、车 $\phi 30js6$ 外圆(留磨余量),车槽并倒角 (2) 车右端 $\phi 40h6$ 外圆(留磨余量)、车 $\phi 30js6$ 外圆(留磨余量),车槽并倒角	卧式车床
3	铣键槽、去毛刺	铣床
4	磨各段外圆	外圆磨床
5	检验	

2. 安装与工位

工件经一次装夹后所完成的那一部分工序称为安装。上例中,在第一道工序中应该有两次装夹即两个安装。即,安装 1:用三爪自定心卡盘装夹工件,车一端面,钻中心孔;安装 2:调头装夹工件,车另一端面,并钻中心孔。

一个工序中,工件的安装数量增加,会带来多次装夹造成的装夹误差,影响加工精度,同时也会增加装卸工件时的辅助工作时间。因此,工件在加工中应尽量减少安装个数。在大批大量生产中,常采用不需重新装夹工件而又能改变工件位置的工艺装备。工件一次装夹后,工件(或装配单元)与工件或夹具的可动部分一起相对刀具或机床的固定部分所占据的每一个位置,称为工位。如上例所示阶梯轴的加工,在大批大量生产中,工序 1 的两次安装可以合并为一次。经过一次装夹,在铣端面钻中心孔机床上完成,如图 3.2 所示。端面铣削和中心孔钻削在两个位置上完成,就是两个工位。

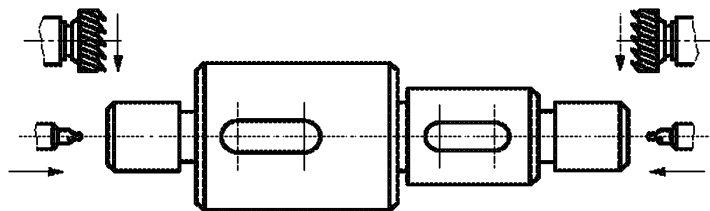


图 3.2 两工位加工工件两端面

3. 工步与走刀

在加工表面、加工工具和切削用量中的转速与进给量均保持不变的情况下,所连续完成的那一部分工序称为工步。如表 3.1 所示零件加工工序 1 中,每个安装都有车端面、钻中心孔两个工步。

为提高生产率而使用同时工作的一组刀具或一把复合刀具对零件的几个表面同时进行加工时,也把它看作一个工步,称为复合工步。图 3.3 是一个复合工步的例子。

在一个工步中,若被加工表面需切去的金属层较厚,需要分几次切削,每进行一次切削称为一次走刀。

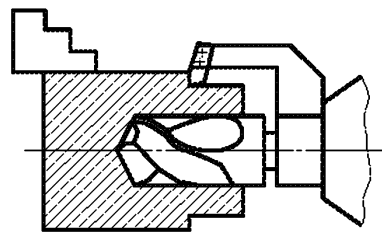


图 3.3 复合工步

3.1.2 生产纲领与生产类型

1. 生产纲领

生产纲领是指企业在计划期内应生产的产品产量和进度计划。计划期通常定为一年,所以生产纲领一般指年产量。零件的生产纲领应计入备品和废品的数量,其计算公式如下:

$$N=Qn(1+\alpha)(1+\beta) \quad (3-1)$$

式中, N ——零件的年产量,单位为件/年;

Q ——产品的年产量,单位为台/年;

n ——每台产品中该零件的数量,单位为件/台;

α ——备品率;

β ——废品率。

生产纲领的大小在一定程度上决定了产品(零件)的生产类型,而各种生产类型又有不同的工艺特征,制定工艺规程必须符合其相应的工艺特征。因此,生产纲领是制定工艺规程的重要依据。

2. 生产类型

根据生产纲领的大小和产品品种的多少,机械制造企业的生产可分为单件生产、成批生产和大量生产 3 种生产类型。

(1) 单件生产。产品品种很多,同一产品的生产量很少的情况,很少重复生产。例如,临时生产配件、新产品样机的试制等。

(2) 大量生产。产品的产量很大,大多数工作地按一定的生产节拍长期进行某一工件某一工序的加工。例如,汽车、拖拉机、轴承、自行车的制造等大都属于这种生产类型。

(3) 成批生产。一年中分批轮流地制造几种不同的产品,生产呈周期性的重复。例如,机床制造等。

成批生产中每批投入或产出的同一产品(或零件)的数量称为批量。按照批量的大小,成批生产又可分为小批生产、中批生产、大批生产 3 种类型。小批生产与单件生产有比较相似的工艺特点。

生产类型取决于产品(零件)的年产量、尺寸大小及复杂程度。表 3-2 列出了生产类型与生产纲领的关系。

表 3-2 生产类型与生产纲领的关系

生产类型		零件年生产纲领		
		重型零件	中型零件	轻型零件
单件生产		<5	<20	<100
成批生产	小批	5~100	20~200	100~500
	中批	100~300	200~500	500~5000
	大批	300~1000	500~5000	5000~50000
大量生产		>1000	>5000	>50000

产品的生产类型不同,其生产组织、生产管理、机床布置、毛坯制造、采用的工艺装备、加工方法及对工人的技术水平要求的高低也是不一样的。所以,确定的工艺规程要与产品的生产类型相适应,才能获得更好的经济效益。表 3-3 给出了各种生产类型的工艺特征。

表 3-3 各种生产类型的工艺特征

工艺内容	生产类型		
	单件生产	成批生产	大量生产
加工对象	经常变换	周期性变换	固定不变
机床设备及布局	通用机床,按机床类别成机群布置	通用及部分专用机床,部分工序按工艺路线布置成流水线	广泛采用专用设备、组合机床及自动线
刀具和量具	一般刀具,通用量具	部分专用刀具 部分专用量具	广泛采用高效专用刀具和量具
毛坯制造方法与加工余量	木模手工造型铸造或自由锻造,毛坯精度低,加工余量大	金属模造型铸造或模锻,毛坯精度和加工余量中等	采用金属模机器造型、模锻、压力铸造等高效毛坯制造方法
工件安装和尺寸精度保证方法	划线找正安装,试切法加工	部分找正,调整法加工	夹具装夹工件
零件互换性	钳工试配	大多采用互换法	完全互换
对工人技术要求	高	中等	对操作工人技术要求较低,对调整工人技术要求较高
工艺文件	编制简单的工艺过程卡	制定较详细的工艺规程	详细的工艺规程和各种工艺文件
生产率	低	中	高
生产成本	低	中	高

3.1.3 机械加工工艺规程

1. 机械加工工艺规程的概念、内容及作用

任何零件的机械加工过程都具有多样性,但在具体的生产条件下,总有一个是最合理的。用规定的图表和文字的形式将其规定下来,并用来指导生产,这样的工艺文件称为机械加工工艺规程。

工艺规程的内容,一般有毛坯的种类、零件的加工工艺路线、各工序基本加工内容、切削用量、时间定额及采用的机床和工艺装备(刀具、夹具、量具、模具、辅具)等。工艺规程的主要作用如下:

(1) 工艺规程是指导生产的主要技术文件。合理的工艺规程是建立在正确的工艺原理和实践基础上的,是科学技术和实践经验的结晶。因此,它是获得合格产品的技术保证,一切生产和管理人员必须严格遵守。

(2) 工艺规程是生产管理和组织管理的主要依据。原材料的准备、毛坯的制造、设备和工具的购置、专用工艺装备的设计制造、劳动力的组织、生产进度计划的安排等工作都是依据工艺规程来进行的。

(3) 工艺规程是新建或扩建工厂或车间的基本资料。新建工厂或车间时,需依据产品的生产类型及工艺规程来确定机床和设备的数量及种类,工人工种、数量及技术等级,车间面积及机床的布置等。

2. 机械加工工艺规程的格式

机械加工工艺规程有下列3种格式:

(1) 机械加工工艺过程卡片。机械加工工艺过程卡片是以工序为单位,简要说明零件整个加工工艺过程的一种工艺文件,其内容包括工序号、工序名称、工序内容、加工车间、设备及工艺装备、各工序时间定额等。在单件小批生产中,常以这种卡片直接指导生产。

(2) 机械加工工艺卡片。机械加工工艺卡片是以工序为单位,比较详细地说明零件加工工艺过程的一种工艺文件,简称工艺卡。它不但包含了工艺过程卡片的内容,而且详细说明了每一工序的工位及工步的工作内容;对于复杂工序,还要绘出工序简图,标注工序尺寸及公差等。机械加工工艺卡片是用来指导工人生产和帮助技术管理人员掌握整个加工过程的主要技术文件,常用于成批生产和小批生产中比较重要的零件。

(3) 机械加工工序卡片。机械加工工序卡片是针对每道工序所编制的,用来具体指导工人进行生产的工艺文件。它通过工序简图详细说明了该工序的加工内容、尺寸及公差、定位基准、夹压部位等,并注明切削用量、工步内容及工时等。工序卡片多用于大批大量生产中,每个工序都要有工序卡片。

3. 机械加工工艺规程的制定

制定零件的机械加工工艺规程,要确保零件的加工质量,可靠地加工出产品图样所提出的全部技术要求;要有合理的生产率,要能节约原材料,减少工时消耗,降低成本。此外,还应尽量减轻工人的劳动强度,并且有良好的劳动条件,保证生产安全。

1) 制定工艺规程的原始资料

制定工艺规程必须具备以下原始资料:

- (1) 产品零件图及该零件所在部件或总成的装配图。
- (2) 产品的生产纲领。
- (3) 产品验收的质量标准。
- (4) 制造厂现有生产条件,如机床设备、工艺装备、工人技术水平及毛坯的制造生产能力等。
- (5) 国内、外同类产品的生产工艺资料。
- (6) 与产品工艺过程有关的图册资料。

2) 制定工艺规程的步骤

(1) 分析产品零件图及装配图,了解该零件在部件或总成中的作用,对零件图及装配图进行工艺审查,分析零件的加工要求、结构工艺性,检验图样的完整性。

(2) 由零件的年生产纲领确定生产类型。

(3) 选择毛坯类型及制造方法。

(4) 拟定零件的加工工艺路线。其主要内容包括:选择定位基准、确定各表面加工方法、划分加工阶段、确定工序集中与分散程度、安排加工顺序等。在拟定工艺路线时,需提出几种可能的加工方案,然后通过技术、经济的对比分析,最后确定一种最为合理的工艺方案。

(5) 确定各工序的工序内容,选择机床、夹具、刀具和量具等。

(6) 确定切削用量及时间定额。

(7) 确定重要工序的检验项目及检验方法。

(8) 填写工艺文件。

3.2 零件工艺性分析与毛坯的选择

3.2.1 零件的工艺分析

为了保证产品设计的结构合理性,制造工艺的可行性与经济性,在制定工艺规程时必须对零件进行工艺分析。零件的工艺分析包括以下内容。

1. 分析和审查零件图样

通过分析零件图及相关的装配图,了解零件在机器中的作用,在此基础上进一步审查图样的完整性和正确性。例如,图样是否符合有关标准,是否有足够的视图,尺寸、公差和技术要求的标注是否合理、齐全等。若有遗漏或错误,应及时提出修改意见,并与有关设计人员协商,按一定手续进行修改或补充。

零件图上的设计尺寸标注是否正确、公差是否合理,对保证产品的使用性能和零件机械加工的难易程度都有很大的影响。因此,作为工艺人员应认真审查零件图上所标注的设计尺寸及其偏差,使其既能满足结构设计的要求,又能满足工艺要求。对需要满足结构设计要求的尺寸(通常是影响装配精度的尺寸),应按装配尺寸链计算出的尺寸及公差进行标注。其余的尺寸则应按工艺要求标注,具体有以下几个方面。

(1) 按加工顺序标注尺寸,避免多尺寸同时保证。

例如,图 3.4 所示齿轮轴齿坯加工,其加工顺序如下:

① 车两端面,保证尺寸 360mm;

② 车一端外圆保证长度尺寸 160mm(留磨削余量)、车槽,车外圆保证尺寸 120mm;

③ 车外圆保证尺寸 60mm(留磨削余量),车外圆保证尺寸 100mm;

磨削时,若按图 3.4(a),先磨削 A 面,保证尺寸 160mm,需同时保证尺寸 40mm,磨削 B 面时,保证尺寸 140mm,需同时保证 60mm 和 40mm 两个尺寸,这将增加零件的加工难度。而按图 3.4(b),尺寸按加工顺序标注,磨削端面时仅需保证尺寸 160mm 和 60mm,没有多尺寸同时保证,也不需进行工艺尺寸换算,在长度方向上的尺寸标注是合理的。

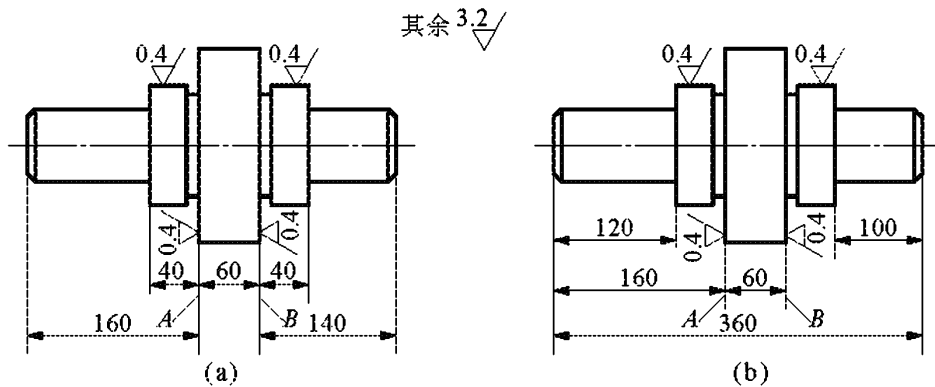


图 3.4 按加工顺序标注尺寸实例

(2) 从实际存在的和易测量的表面标注尺寸。

图 3.5(a)所示的键槽和平面加工,是以中心线或以加工去的上母线为基准标注的尺寸,不但不便于测量,而且也为夹具设计增加了困难。如按图 3.5(b)所示标注尺寸,则既便于测量,夹具的定位装置也简单。如果为了满足设计要求必须从假想的几何要素标注,亦应将尺寸换算到从实际几何要素标注。当然此时若造成公差过小、加工不经济或无法保证尺寸精度,则只能按要求标注。

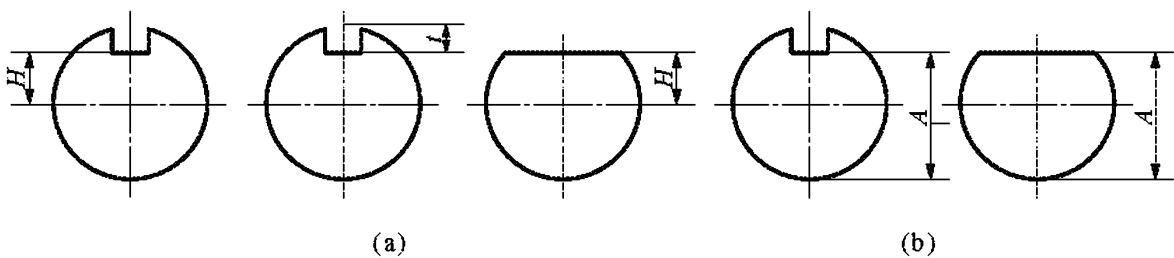


图 3.5 从实际和易测量的表面标注尺寸

(3) 零件毛坯为铸件、锻件,零件上有多个加工面和不加工面时,要合理进行标注,避免多尺寸同时保证。

如图 3.6(a)所示零件,设计基准为底面 K,如果加工时以不加工表面 P 为定位基准,按尺寸 A 加工 K 面,需同时间接保证尺寸 C、D、E,对于铸件来说,难以保证其公差。图 3.6(b)所示只有一个不加工面(P)与加工面(K)建立尺寸关系,其余不加工表面之间的尺寸联系均由铸造保证,这样标注是合理的。

零件上的尺寸公差、形位公差与表面粗糙度的标注,应根据零件的功能,经济合理地标注。总的原则是:在满足使用性能要求的前提下,尺寸精度应低些,表面粗糙度 R_a 值应大些。

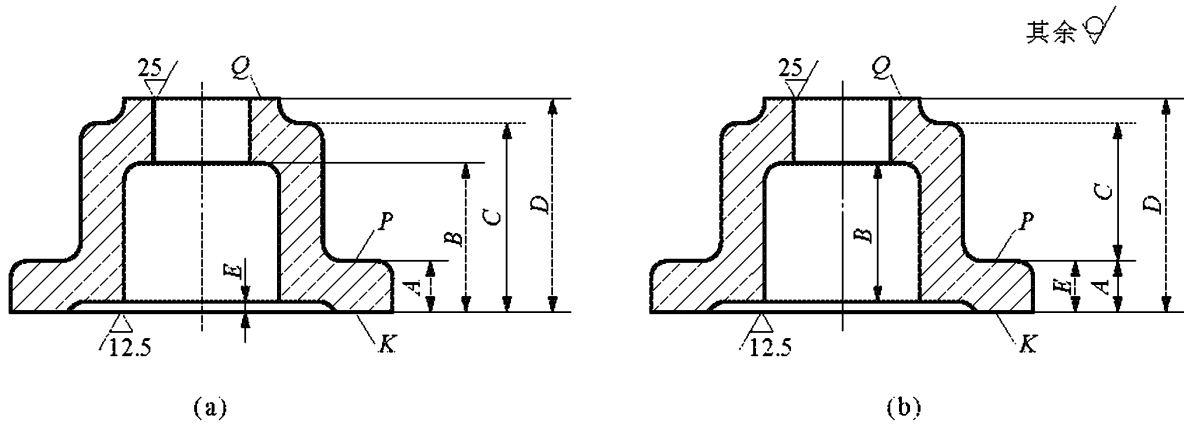


图 3.6 多个加工表面与不加工表面之间的尺寸标注

2. 审查零件材料的选择及技术要求

零件材料的选择应立足于国内,尽量采用我国资源丰富的材料,避免采用贵金属。此外,若材料选择不合理,可能会对工艺过程的安排及技术要求的实现造成困难。例如,图 3.7 所示的零件方头部分要求淬硬到 50~55HRC,零件上有一个 $\phi 2H7$ 的孔,装配时与相配件配做。

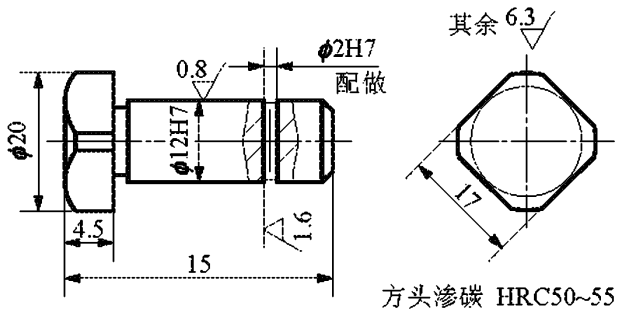


图 3.7 方头销

初始设计选用材料为 T8A(优质碳素工具钢),因零件只有 15mm 长,方头淬火时零件全部被淬硬,导致 $\phi 2H7$ 孔不能加工。若改用 20Cr,局部渗碳,在 $\phi 2H7$ 孔处镀铜保护,热处理后不影响孔的配做加工,这样就合理了。

3. 审查零件的结构工艺性

零件的结构工艺性,是指零件的结构在满足使用性能的前提下制造的经济性与可行性。

功能完全相同而结构不同的两个零件,其制造成本和制造方法可能有很大的差别。

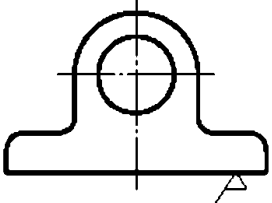
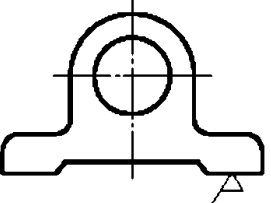
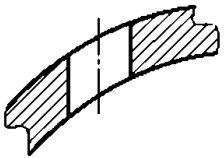
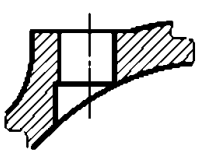
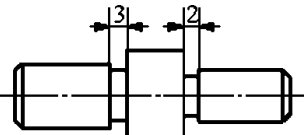
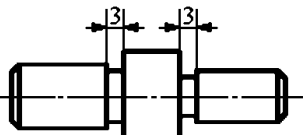
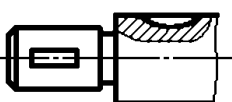
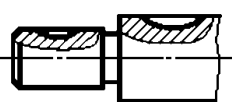
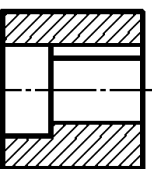
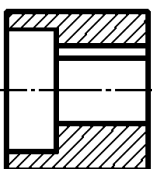
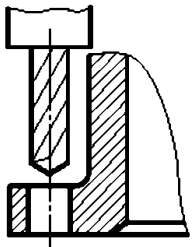
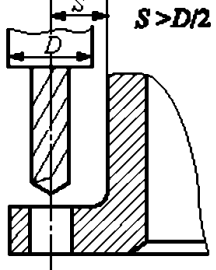
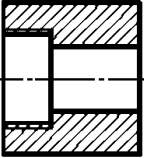
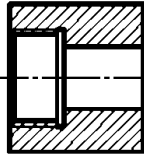

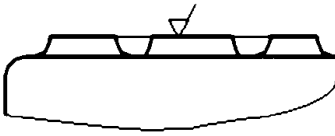
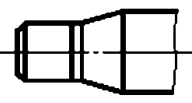
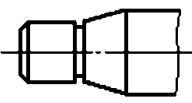
零件的结构工艺性涉及的方面较多,包括毛坯制造的工艺性(如铸造工艺性、锻造工艺性和焊接工艺性等)、机械加工工艺性、热处理工艺性和装配工艺性等。在制定机械加工工艺规程时,主要进行零件机械加工中的结构工艺性分析。

零件结构对机械加工工艺性的影响主要涉及如下几点:

- (1) 尽量减小毛坯余量和选用可加工性好的材料。
- (2) 各要素的形状应尽量简单,加工面积尽量要小,使用刀具应尽量统一。
- (3) 尽量能采用标准刀具进行加工,且刀具易进入、退出和顺利通过加工表面。
- (4) 不同加工要求的面之间应明显分开,加工时应使刀具具有良好的切削条件,以减少刀具磨损和保证加工质量。

表 3-4 列出了常见的结构工艺性的实例。

表 3-4 常见结构要素的工艺性

工艺性内容	不合理的结构	合理的结构	说明
1. 加工面积应尽量小			<ol style="list-style-type: none"> 1. 减少加工量 2. 减少刀具及材料的消耗量
2. 钻孔的入端和出端应避免斜面			<ol style="list-style-type: none"> 1. 避免钻头折断 2. 提高生产率 3. 保证精度
3. 槽宽尺寸一致			<ol style="list-style-type: none"> 1. 减少换刀次数 2. 提高生产率
4. 键槽布置在同一方向上			<ol style="list-style-type: none"> 1. 减少调整次数 2. 保证位置精度
5. 槽的底面不应与其他加工面重合			<ol style="list-style-type: none"> 1. 便于加工 2. 避免损伤加工表面
6. 孔的位置不能距壁太近			<ol style="list-style-type: none"> 1. 可以采用标准刀具 2. 保证加工精度
7. 螺纹根部应有退刀槽			<ol style="list-style-type: none"> 1. 避免损伤刀具 2. 提高生产率
8. 凸台表面位于同一平面上			<ol style="list-style-type: none"> 1. 生产率高 2. 易保证精度
9. 轴上两相接精加工表面间应设刀具越程槽			<ol style="list-style-type: none"> 1. 生产率高 2. 易保证精度

3.2.2 毛坯的选择

毛坯是指根据零件所要求的形状、工艺尺寸等制成的为提供进一步加工用的生产对象。制定机械加工工艺规程时,正确选择毛坯,对零件的加工质量、材料消耗和加工工时有很大影响。毛坯的尺寸、形状越接近成品零件,机械加工量越少,但毛坯的制造成本越高。因此应根据生产纲领,综合考虑毛坯的制造与机械加工成本来确定毛坯类型,以求得最好的经济效益。

机械加工中常用的毛坯有铸件、锻件、焊接件、冲压件和型材等,选用时主要考虑以下问题:

(1) 零件的材料与力学性能。零件材料的工艺特性和力学性能大致决定了毛坯的种类。例如,铸铁零件用铸造毛坯;钢质零件当形状较简单且力学性能要求不高时常用棒料,对于重要的钢质零件,为获得良好的力学性能,应选用锻件,当形状复杂力学性能要求不高时用铸钢件;有色金属零件常用型材或铸造毛坯。

(2) 零件的结构形状与外形尺寸。大型且结构较简单的零件毛坯多用砂型铸造或自由锻;结构复杂的毛坯多用铸造;小型零件可用模锻件或压力铸造毛坯;板状钢质零件多用锻件毛坯;轴类零件的毛坯,若台阶直径相差不大,可用棒料;若各台阶尺寸相差较大,则宜选择锻件。

(3) 生产类型。大批大量生产中,应采用精度和生产率都较高的毛坯制造方法。铸件采用金属模机器造型和精密铸造,锻件用模锻或精密锻造。在单件小批生产中,用木模手工造型或自由锻来制造毛坯。

(4) 具体生产条件。确定毛坯时,必须结合具体的生产条件,如现场毛坯制造的实际水平和能力、外协的可能性等。有条件时,可组织地区专业化生产,统一供应毛坯。

(5) 充分利用新工艺、新材料。为节约材料和能源,提高机械加工生产率,应充分考虑精密铸造、精锻、冷轧、冷挤压、粉末冶金、异型钢材及工程塑料等在机械中的应用。这样,可大大减少机械加工量,甚至不需要进行加工,经济效益非常显著。

3.3 定位基准的选择

在零件加工过程中,不但要保证被加工表面本身的精度,而且还要保证被加工表面间的位置精度要求。正确选择定位基准,对保证零件加工表面间的位置精度和安排加工顺序都有很大的影响。

3.3.1 基准的概念及分类

零件的几何要素(点、线、面)之间有着一定的尺寸要求和位置关系,在零件的设计和加工过程中,经常要用到某些点、线、面来确定其他几何要素间的几何关系,这些作为依据的点、线、面称为基准。

基准根据其作用不同,分为设计基准和工艺基准两大类。

1. 设计基准

设计基准是零件设计图样上采用的基准。在零件设计过程中,确定某些点、线、面的位

置时所依据的那些点、线、面称为设计基准。它是由设计人员从零件在装配关系中的要求出发,确定各几何要素之间的尺寸及相互位置关系时标定的。在零件图上,以设计基准为依据标出一定的尺寸和位置要求。图 3.8(a)所示零件中表面 A 与 B 互为设计基准;图 3.8(b)中 $\phi 30\text{mm}$ 外圆柱面轴线以 $\phi 50\text{mm}$ 外圆柱面轴线为设计基准;图 3.8(c)中,平面 C 以下素线 D 为设计基准。在设计图样中一个方向往往只有一个设计基准。

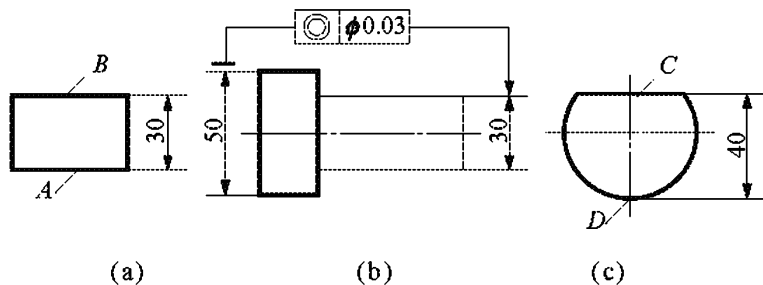


图 3.8 设计基准

2. 工艺基准

工艺基准是在工艺过程中采用的基准。工艺基准按用途可分为工序基准、定位基准、测量基准和装配基准。

(1) 工序基准。在工序图上为了标注本工序所加工表面、尺寸、形状、位置所采用的基准称为工序基准。工序基准应尽量与设计基准重合。

(2) 测量基准。测量工件已加工表面的尺寸和位置时所采用的基准称为测量基准。如图 3.9 所示,为零件的同一加工表面采用的两种不同的测量基准。

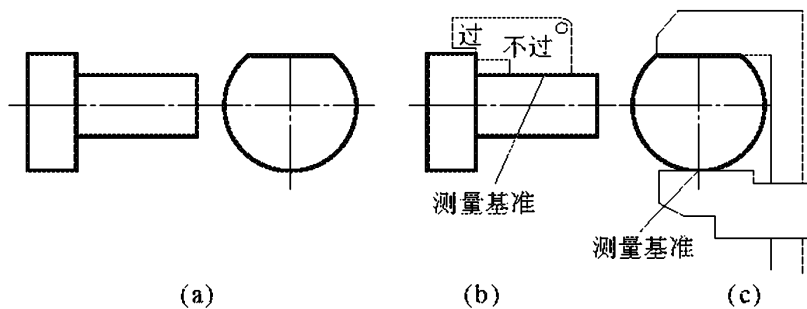


图 3.9 测量基准

(3) 装配基准。装配时用来确定零件或部件在产品中的相对位置所采用的基准,称为装配基准。例如,齿轮在装配时分别以孔和端面作为径向和轴向上的装配基准。

(4) 定位基准。在加工中用作定位的基准称为定位基准。

工件上作为定位基准的点或线,总是由具体表面来实现的,这个表面称为基准面。工件以平面定位时,该平面即为定位基准,或称为定位基准面。工件以圆柱面或圆锥面定位时,是以该圆柱面或圆锥面的轴线作为定位基准,而圆柱面或圆锥面则为定位基准面。如轴类工件以两中心孔定位时,中心孔内圆锥面即是加工各段外圆时的定位基准面。图 3.10 为以平面定位加工槽和以两中心孔定位加工心轴时的情况。

定位基准还分为粗基准和精基准。工件在起始工序加工中只能选择未经加工的毛坯表面作为定位基准,这种基准称为粗基准。在以后的工序中则可以选择已加工过的表面定位,

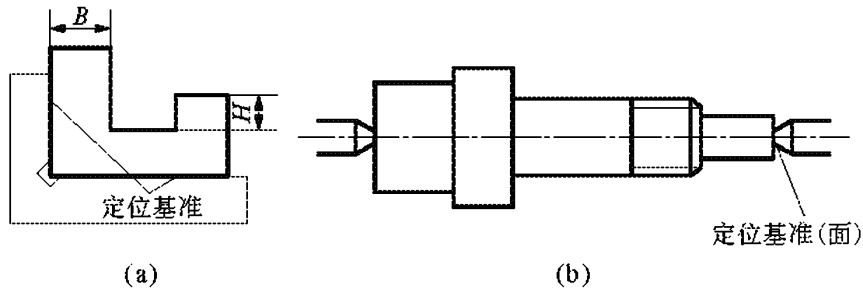


图 3.10 定位基准

这种基准称为精基准。

3.3.2 精基准的选择原则

在工艺规程设计中,正确选择定位基准,对保证零件加工要求、合理安排加工顺序有着至关重要的影响。在选择定位基准时往往先根据零件的加工要求选择精基准,由工艺路线向前反推,最后考虑用哪一组表面作为粗基准才能把精基准加工出来。

精基准的选择应有利于保证零件精度、安装方便可靠。其选择原则如下。

1) 基准重合原则

基准重合原则是指选择的定位基准与设计基准重合,以避免因基准不重合而引起定位误差。

图 3.11 所示零件,设计尺寸为 $A \pm T_A/2$ 和 $B \pm T_B/2$,底面 P 和顶面 N 已加工,并经检验尺寸 $A \pm T_A/2$ 是合格的,现欲用调整法铣削平面 M 。为保证设计尺寸 $B \pm T_B/2$,可以采用两种方案:

(1) 以设计基准顶面 N 为主要定位基准,如图 3.11(b)所示。此时刀具实际是按 N 面调整位置,加工尺寸 $B \pm T_B/2$ 仅受刀具调整误差的影响。

(2) 以底面 P 为主要定位基准,如图 3.11(c)所示。即刀具按 P 面调整位置,加工尺寸 $B \pm T_B/2$ 除了受刀具调整误差的影响之外,由于加工尺寸 A 的误差的影响,使 N 面的位置有 T_A 的变动量,因此造成尺寸 B 附加了一个 T_A 的变动量。这是由于所选的定位基准与设计基准不重合而产生的,称为基准不重合误差。

2) 基准统一原则

基准统一原则,即在各工序中尽可能选择相同的定位基准加工零件的多个表面,它避免了基准变化带来的安装误差,容易保证各表面之间的相互位置精度,同时还可减少夹具的结构设计量。例如,轴类零件在大多数工序中均采用两中心孔定位,箱体零件在各工序中则常采用一面两孔定位。

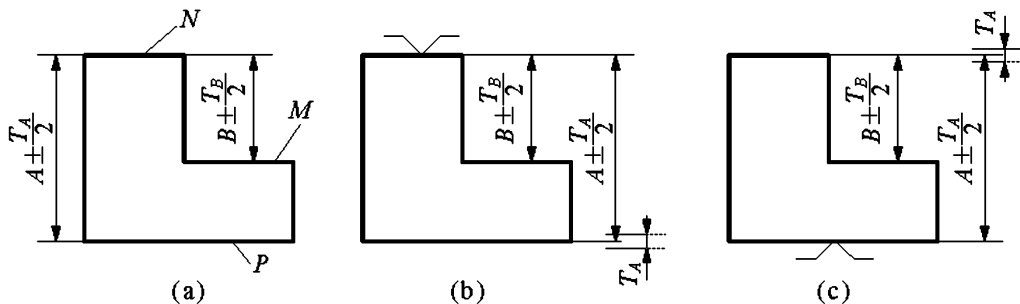


图 3.11 精基准的选择

基准统一原则与基准重合原则有时不可能同时满足,应根据实际条件决定取舍。

3) 自为基准原则

在某些精加工工序中要求其加工余量小而均匀,加工时可以以加工表面自身作为定位基准。该表面相对于其他表面的位置精度由前面的各道工序保证,本道工序的加工主要是为了降低表面粗糙度,并进一步提高尺寸精度。例如,浮动铰孔、拉孔、无心磨以及用板牙或丝锥攻螺纹等,都是利用前面工序已加工出的表面自身作为定位基准进行加工的。

4) 互为基准、反复加工的原则

当需要获得均匀的加工余量或两表面间要求位置精度较高时,可采用这两个表面互为基准进行加工。如车床的主轴,其支承轴径和锥孔同轴度及加工精度要求都很高,因此采用以锥孔为基准磨削轴径,再以轴径为基准磨削锥孔,经过多次反复加工达到这一要求。再譬如,加工精密淬火齿轮时,因其淬硬层较薄,所以磨削余量应小而均匀,因此就先以齿面为基准磨削内孔,然后再以孔为基准磨削齿面,以保证齿面磨削余量均匀,且与装配基准有较高的位置精度。

3.3.3 粗基准的选择原则

粗基准的选择应能保证加工面与不加工面之间的位置要求,合理分配各加工面的余量,同时为后续工序提供精基准。可按下列原则选择。

(1) 保证零件加工表面与不加工表面之间的相互位置关系。此时应选不加工面为粗基准。如果零件上有多个不加工表面,应选择其中与加工表面位置精度要求最高的表面作为粗基准。

如图 3.12 所示工件毛坯的壁厚不均匀,如采用待加工的内孔表面自身作为定位基准则不能消除壁厚的不均,而若以外圆面定位则可以消除。

(2) 保证各加工表面都有足够的加工余量。此时应选择余量小的表面作为粗基准。图 3.13 所示阶梯轴的毛坯,应选择 $\phi 55$ 外圆为粗基准;若以 $\phi 108$ 外圆作为粗基准则有可能造成小端外圆加工余量不足而报废。

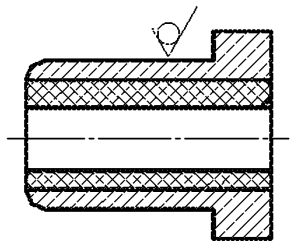


图 3.12 以不加工表面作为粗基准

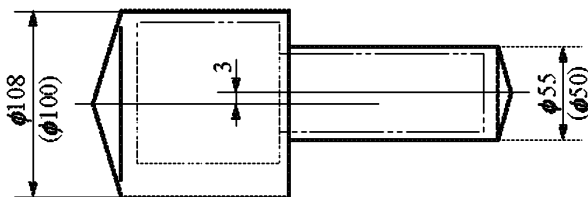


图 3.13 以加工余量小的表面作为粗基准

(3) 保证零件上的某些重要表面上的余量均匀。此时应选择重要表面自身作为粗基准。如机床的床身,其上导轨面是最重要的表面,要求硬度高而且有均匀的耐磨性能,这就要求其表面有均匀的组织。为此,在毛坯制造完毕进行机械加工时,应切去小而均匀的余量。选择导轨面自身作为粗基准,先加工床腿,由于毛坯误差带来的余量不均可以得到纠正,再以加工过的床腿面定位加工床身导轨,就可以保证切去的余量小而均匀(如图 3.14 所示)。

(4) 保证工件定位稳定,夹紧可靠。选作粗基准的表面应尽量平整、光洁,避开锻造飞边、铸造浇冒口切痕及其他缺陷,且具有较大的表面尺寸。

(5) 粗基准要避免重复使用。因为粗基准本身都是未经加工过的毛坯表面,其精度和表面粗糙度较差,如果在某一个方向上重复使用,则不能保证每次装夹时工件与机床、刀具的

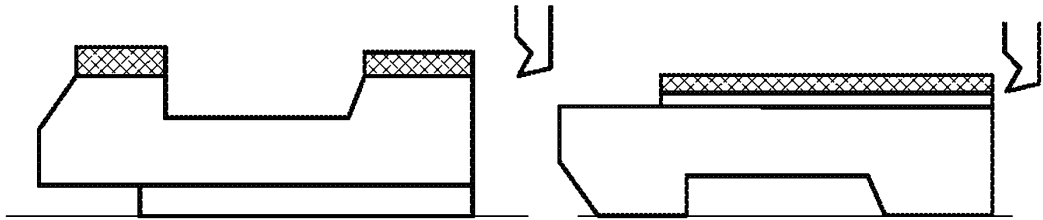


图 3.14 以床身导轨面自身作为粗基准

相对位置一致,产生较大的误差。

3.4 机械加工工艺流程线的拟定

零件机械加工的工艺路线是指零件生产过程中,由毛坯到成品所经过的工序先后顺序。拟定工艺路线的主要内容,除选择定位基准外,还应包括选择零件各表面的加工方法、安排工序的先后顺序、确定工序的集中与分散程度以及选择设备与工艺装备等。机械加工工艺路线不但影响零件的加工质量和生产效率,而且还影响企业的设备投资、生产面积和生产成本。拟定工艺路线是制定工艺规程中关键性的一步,通常应提出几种方案,通过分析比较,从中选择最佳方案。

3.4.1 表面加工方法的选择

拟定工艺路线时,首先要确定零件各表面的加工方法。机器零件的结构形状虽然多种多样,但它们都是由一些最基本的几何表面(外圆、孔、平面等)组成的,机器零件的加工过程实际就是获得这些几何表面的过程。同一种表面可以选用各种不同的加工方法加工,在选择加工方法时主要考虑下列因素:零件各加工表面的尺寸精度、表面粗糙度、零件的材料和性质、毛坯的质量及硬度、零件的具体加工条件(生产类型、设备状况、工人的技术水平等)、各种加工方法所能达到的加工经济精度和表面粗糙度等。

1. 加工经济精度与经济粗糙度

加工经济精度是指在正常加工条件下(采用符合质量标准的设备、工艺装备和标准技术等级的工人,不延长劳动时间)所能达到的加工精度。相应的粗糙度称为经济粗糙度。加工经济精度是确定各表面加工方法的根据。各种加工方法所能达到的加工经济精度、表面粗糙度可参见表 3-5、3-6、3-7。

表 3-5 外圆表面加工方法的加工经济精度、表面粗糙度

加工方法	加工情况	经济精度 IT	表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	加工方法	加工情况	经济精度 IT	表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$
车	粗车	12~13	10~80	外磨	精磨	6~7	0.16~1.25
	半精车	10~11	2.5~10		精密磨(精修整砂轮)	5~6	0.08~0.32
	精车	7~8	1.25~55		镜面磨	5	0.008~0.08
	金刚石车 (镜面车)	5~6	0.02~1.25	抛光			0.008~1.25

(续)

加工方法	加工情况	经济精度 IT	表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	加工方法	加工情况	经济精度 IT	表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$
铣	粗铣	12~13	10~80	研磨	粗研	5~6	0.16~0.63
	半精铣	11~12	2.5~10		精研	5	0.04~0.32
	精铣	8~9	1.25~55		精密研	5	0.008~0.08
车槽	一次行程	11~12	10~20	超精加工	精	5	0.08~0.32
	二次行程	10~11	2.5~10		精密	5	0.01~0.16
外磨	粗磨	8~9	1.25~10	砂带磨	精磨	5~6	0.02~0.16
	半精磨	7~8	0.63~2.5		精密磨	5	0.01~0.04

注:加工非铁金属时,表面粗糙度取 R_a 低值。

表 3-6 内孔表面加工方法的加工经济精度、表面粗糙度

加工方法	加工情况	经济精度 IT	表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	加工方法	加工情况	经济精度 IT	表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$
钻	$\phi 15\text{mm}$ 以下	11~13	5~80	镗	粗镗	12~13	5~20
	$\phi 15\text{mm}$ 以上	10~12	20~80		半精镗	10~11	2.5~10
扩	粗扩	12~13	5~20		精镗(浮动镗)	7~9	0.63~5
	一次扩孔(铸孔或冲孔)	11~13	10~40		金刚镗	5~7	0.16~1.25
铰	精扩	9~11	1.25~10	内磨	粗磨	9~11	1.25~10
	半精铰	8~9	1.25~10		半精磨	9~10	0.32~1.25
	精铰	6~7	0.32~2.5		精磨	7~8	0.08~0.63
	手铰	5	0.08~1.25		精密磨(精修整砂轮)	6~7	0.04~0.16
拉	粗拉	9~10	1.25~10	珩	粗珩	5~6	0.16~1.25
	一次拉孔(铸孔或冲孔)	10~11	0.32~2.5		精珩	5	0.04~0.32
	推	精拉	7~9	0.16~0.63	研磨	粗研	5~6
半精推		6~8	0.32~1.25	精研		5	0.04~0.32
精推		6	0.08~0.32	精密研		5	0.008~0.08
				挤	滚珠、滚柱扩孔器, 挤压头	6~8	0.01~1.25

注:加工非铁金属时,表面粗糙度取 R_a 低值。

表 3-7 各种平面加工方法的加工经济精度、表面粗糙度

加工方法	加工情况	经济精度 IT	表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	加工方法	加工情况	经济精度 IT	表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	
周铣	粗铣	11~13	5~20	平磨	插		2.5~20	
	半精铣	8~11	2.5~10			粗磨	8~10	1.25~10
	精铣	6~8	0.63~5			半精磨	8~9	0.63~2.5
端铣	粗铣	11~13	5~20	平磨	插		2.5~20	
	半精铣	8~11	2.5~10			精磨	6~8	0.16~1.25
	精铣	6~8	0.63~5			精密磨	6	0.04~0.32
车	半精车	8~11	2.5~10	25×25mm ² 内点数		8~10	0.32~1.25	
	精车	6~7	1.25~5			10~13	0.08~0.63	
	细车(金刚石车)	6	0.02~1.25			13~16	0.04~0.16	
						16~20	0.16~1.25	
						20~25	0.04~0.32	
刨	粗刨	11~13	5~20	研磨		粗研	6	0.16~0.63
	半精刨	8~11	2.5~10			精研	5	0.04~0.32
	精刨	6~8	0.63~5			精密研	5	0.008~0.08
	宽刀精刨	6	0.16~1.25					
拉	粗拉(铸造或冲压表面)	10~11	5~20	砂带磨		精磨	5~6	0.04~0.32
						精密	5	0.01~0.04
	精拉	6~9	0.32~2.5	滚压		7~10	0.16~2.5	

注:加工非铁金属时,表面粗糙度取 R_a 低值。

2. 零件表面加工工艺方案的选择

由于表面的要求(尺寸、形状、表面质量、力学性能等)不同,往往同一表面的加工需采用多种加工方法完成。某种表面采用各种加工方法所组成的加工顺序称为表面加工工艺方案。零件表面加工工艺方案的选择是拟定工艺路线的首要步骤,图 3.15~图 3.17 列出了外圆表面、内孔表面和平面的加工工艺方案及其所能达到的加工经济精度和表面粗糙度,供选择表面加工方案时参考。

在选择加工方法时,一般总是首先根据零件主要表面的技术要求和工厂具体条件,先选定该表面终加工工序加工方法,然后再逐一选定该表面各有关前导工序的加工方法。主要表面的加工方案和加工方法选定之后,再选定次要表面的加工方案和加工方法。

在选择加工方法时,还应使表面加工方法与零件材料的可加工性相适应、与车间的生产条件相适应、与零件的生产类型相适应,综合考虑,合理选择。

3.4.2 加工阶段的划分

当零件的加工质量要求较高或零件的结构较为复杂时,通常要将整个工艺路线划分为

几个阶段进行。

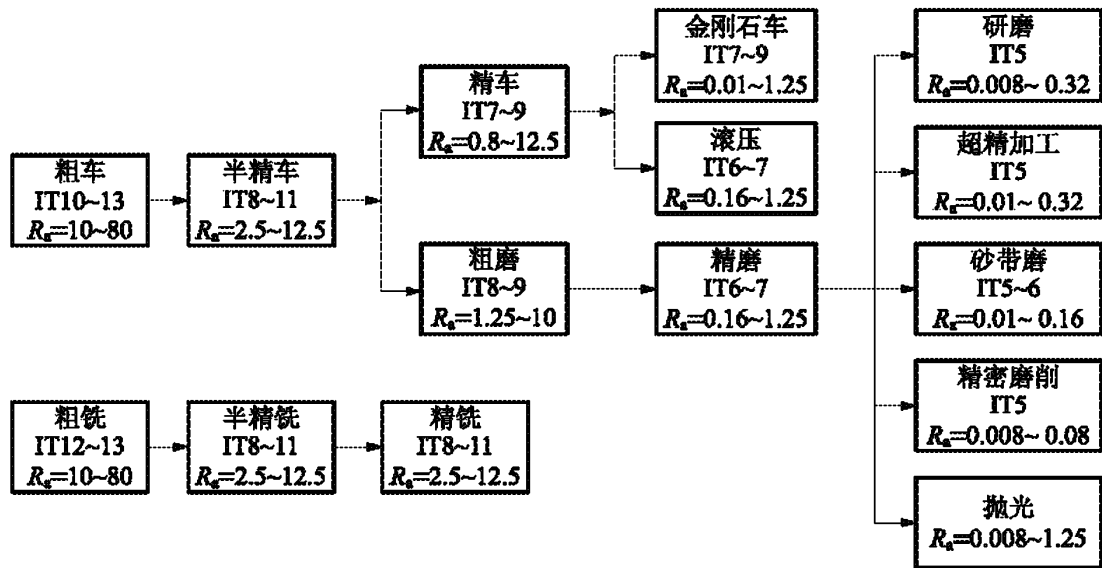


图 3.15 外圆表面的加工工艺流程

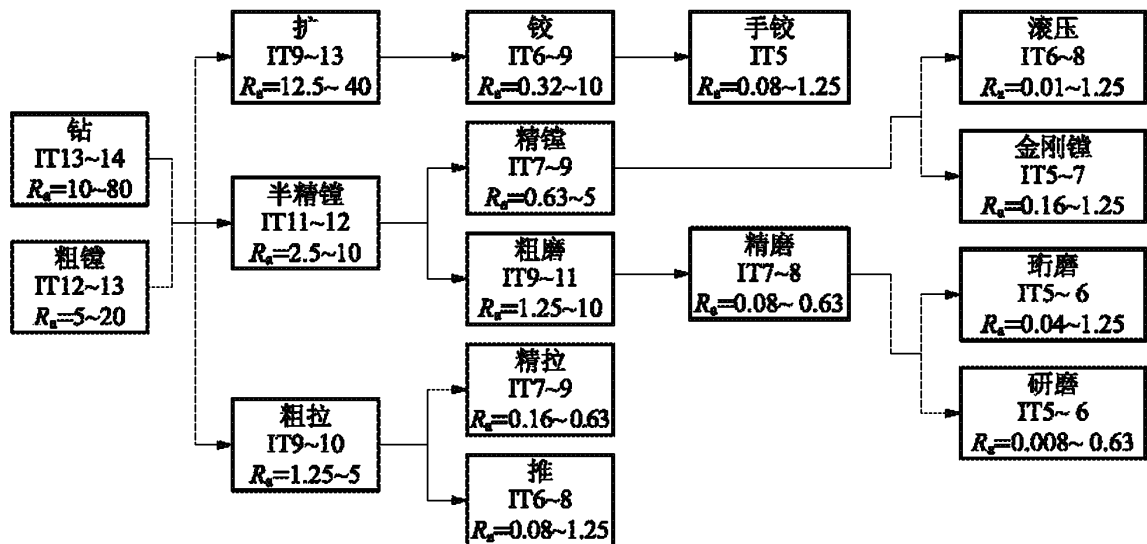


图 3.16 内孔表面的加工工艺流程

1. 加工阶段及各阶段的主要任务

(1) 粗加工阶段。该阶段的主要作用是切除毛坯的大部分金属余量,使形状和尺寸基本接近成品。该阶段主要考虑如何提高生产率。

(2) 半精加工阶段。将主要表面加工到一定尺寸精度,并为精加工留出合适的余量,同时完成零件上各次要表面的加工,如钻孔、攻螺纹、铣键槽等。

(3) 精加工阶段。从零件上切去较小余量,使各主要表面的尺寸达到精度要求。

(4) 光整加工阶段。对于精度要求很高(IT5 以上)、表面粗糙度值要求很小($R_a < 0.2\mu\text{m}$)的表面,必须在精加工之后安排光整加工。其主要任务是减小表面粗糙度和进一步提高尺寸精度和形状精度,但一般没有提高表面间位置精度的作用。

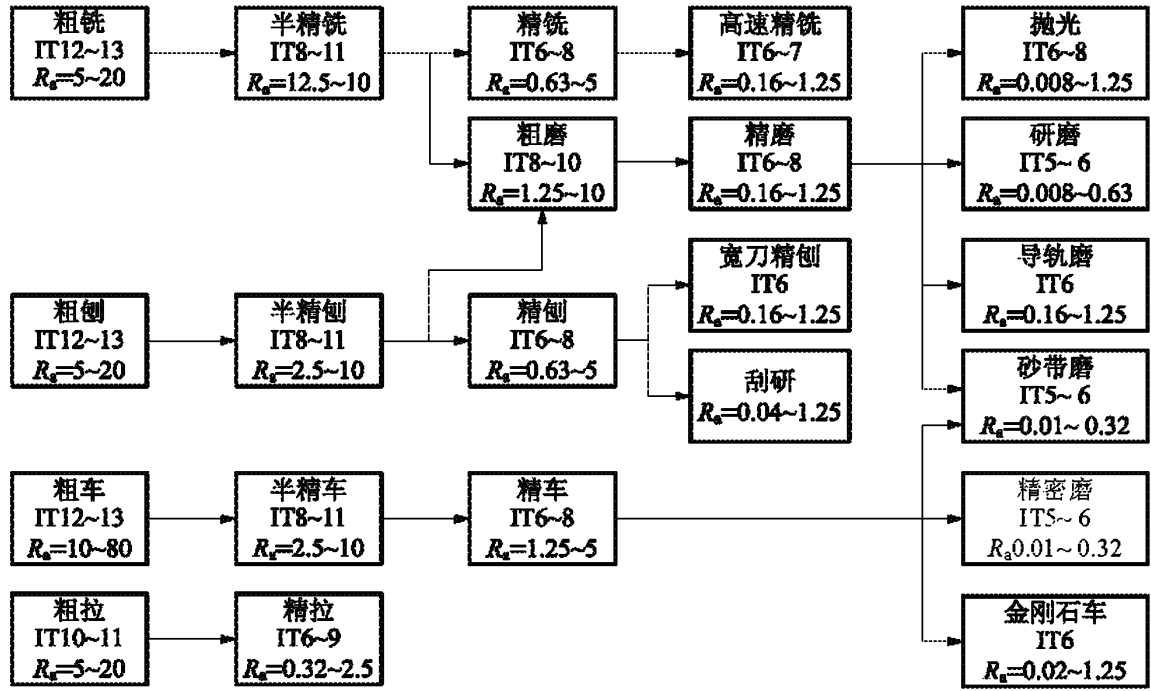


图 3.17 平面的加工工艺方案

2. 划分加工阶段的原因

(1) 保证加工质量。

粗加工阶段切除的加工余量大,切削力和切削热量都比较大,装夹工件所需夹紧力亦较大,被加工工件会产生较大的受力变形和受热变形;此外,粗加工阶段从工件上切除大部分余量后,残存在工件中的内应力要重新分布,也会使工件产生变形。将加工过程划分为几个阶段,粗加工阶段产生的变形,可以通过半精加工和精加工阶段予以修正,并逐步提高零件的加工质量。

(2) 及时发现毛坯缺陷。

粗加工切除了各加工表面的大部分加工余量,可及早发现毛坯的缺陷(气孔、砂眼、裂纹和加工余量不够),以便及时报废或修补,避免后续精加工工时及费用的浪费。

(3) 合理利用机床设备。

粗加工工序需选用功率大、精度不高的机床加工,精加工工序则应选用高精度机床加工。这样既有利于提高效率,充分发挥机床的性能,又有利于保持设备的精度。

(4) 便于合理的插入必要的热处理工序。

粗加工阶段后安排时效处理,可减少内应力变形对精加工的影响;半精加工后安排淬火不仅容易达到零件的性能要求,而且热处理产生的变形可在精加工中消除。

(5) 精加工安排在最后可防止或减少对已加工表面磕伤。

应当指出,加工阶段的划分是对整个加工过程而言的,而不能拘泥于某一表面的加工。同时,划分加工阶段也并不是绝对的。在高刚度、高精度机床设备上加工刚性好、加工精度要求不高或内应力影响不大的工件,可以不划分加工阶段。有些精度要求不太高的重型零件,由于运送工件和装夹工件费时费工,一般也不划分加工阶段,而是在一个工序中完成全部粗加工和精加工工作。为了弥补不划分加工阶段带来的缺陷,减少夹紧变形对工件加工

精度的影响,一般都在粗加工后松开夹紧装置,然后用较小的夹紧力重新夹紧工件,继续进行精加工。

3.4.3 工序的集中与分散

在确定了加工方法、划分了加工阶段之后,为了便于组织生产,需将加工表面的各次加工,按加工阶段和加工内容组合,形成以工序为基本单元的工艺过程。工序的组合原则有工序集中和工序分散两种。

1. 工序集中原则

工序集中是使每个工序所包括的加工内容尽量多些,零件的加工内容集中在少数几道工序中完成。工序集中的极端情况,就是在一个工序内完成工件所有表面的加工。

按工序集中原则,组织工艺过程的特点是:

- (1) 有利于采用自动化程度较高的高效机床和工艺装备,可大大提高劳动生产效率。
- (2) 工序数少,设备数量少,可相应减少操作工人人数和生产面积。
- (3) 工件的装夹次数少,不但可缩短辅助时间,而且由于在一次装夹中加工多个表面,有利于保证各加工表面之间的相互位置精度。
- (4) 设备和工艺装备复杂,生产准备工作量和投资较大,调整、维修费时,故转换新产品较困难。

2. 工序分散原则

工序分散是使每个工序所包括的加工内容尽量少些,零件的加工内容分散到很多工序内完成。工序分散的极端情况,是每个工序只包括一个简单工步。

按工序分散原则,组织工艺过程的特点是:

- (1) 所用机床和工艺装备简单,调整容易,易于平衡工序时间,组织流水生产。
- (2) 生产准备工作量少,对操作工人的技术水平要求不高。
- (3) 设备数量多,操作工人多,占用生产面积大。

按工序集中原则和工序分散原则组织工艺过程各有特点,生产上都有应用。传统的以专用机床、组合机床为主体组建的流水生产线、自动生产线基本是按工序分散原则组织工艺过程的,这种组织方式可以实现高生产率生产,但对产品改型的适应性较差,转产比较困难。采用数控机床和加工中心加工零件都按工序集中原则组织工艺过程,虽然设备的一次性投资较高,但由于可重组生产的能力较强,生产适应性好,转产相对容易,应受到愈来愈多的重视。

3.4.4 工序顺序的安排

工序顺序的安排对保证加工质量、提高生产率和降低生产成本都有重要的作用。

1. 机械加工工序的安排

机械加工工序先后顺序的安排,一般应遵循以下几个原则:

- (1) 先粗后精。整个零件的加工工序应按由粗到精的加工阶段对各表面交叉进行。

(2) 先主后次。先安排零件的装配基面和工作表面等主要表面的加工,次要表面的加工如键槽、紧固用的光孔和螺纹孔等,穿插在各加工阶段进行。

(3) 先面后孔。对于箱体、支架和连杆等工件,应先加工平面,后加工孔。因为平面一般面积较大,轮廓平整,先加工好平面,便于加工孔时的定位安装,利于保证孔与平面的位置精度,同时也给孔的加工带来方便,使刀具的初始工作条件得到改善。

(4) 基准先行。用作精基准的表面,要首先加工出来。所以第一道工序一般进行定位基面的粗加工或半精加工(有时包括精加工),然后以精基面定位加工其他表面。

2. 热处理及表面处理工序的安排

零件加工过程中常用的热处理方式有退火、正火、调质、淬火、时效、渗碳及氮化等,按应用目的,大致可分为预备热处理和最终热处理。

1) 预备热处理。

预备热处理的目的是改善机械加工性能、消除内应力,为最终热处理作准备,它包括退火、正火、调质和时效处理。

(1) 退火和正火。

退火和正火用于经过热加工的毛坯。含碳量大于0.5%的碳钢和合金钢,为降低其硬度以易于切削,常采用退火处理;含碳量低于0.5%的碳钢和合金钢,为避免其硬度过低切削时粘刀,而采用正火处理。退火和正火尚能细化晶粒、均匀组织,为以后的热处理作准备。退火和正火常安排在毛坯制造之后、粗加工之前进行。

(2) 时效处理。

时效处理主要用于消除毛坯制造和机械加工中产生的内应力。

为避免过多运输工作量,对于一般精度的零件,在精加工前安排一次时效处理即可。对结构复杂、精度要求较高的零件,如机床床身、立柱等,在粗加工前后都要安排时效处理工序。

除铸件外,对于一些刚性较差的精密零件,如精密丝杠、主轴等,为消除加工中产生的内应力,稳定零件加工精度,常在粗加工、半精加工之间安排多次时效处理。有些轴类零件加工,在校直工序后也要安排时效处理。

(3) 调质。

调质即是在淬火后进行高温回火处理,它能获得均匀细致的回火索氏体组织,为以后的表面淬火和渗氮处理时减少变形作准备,因此调质可作为预备热处理。

由于调质后零件的综合力学性能较好,对某些硬度和耐磨性要求不高的零件,也可作为最终热处理工序。

2) 最终热处理。

最终热处理的目的主要是为了提高零件材料的硬度及耐磨性,它包括淬火、渗碳及氮化等。

(1) 淬火。

淬火有表面淬火和整体淬火。其中表面淬火因为变形、氧化及脱碳较小而应用较广,而且表面淬火还具有外部强度高、耐磨性好,而内部保持良好的韧性、抗冲击力强的优点。为提高表面淬火零件的机械性能,常需进行调质或正火等热处理作为预备热处理。

(2) 渗碳淬火。

渗碳淬火适用于低碳钢和低合金钢,先提高零件表层的含碳量,经淬火后使表层获得高的硬度,而心部仍保持一定的强度和较高的韧性和塑性。渗碳分整体渗碳和局部渗碳。局部渗碳时对不渗碳部分要采取防渗措施(镀铜或镀防渗材料)。由于渗碳淬火变形大,且渗碳深度一般在0.5~2mm之间,所以渗碳工序一般安排在半精加工和精加工之间,次要表面加工之前,淬火安排在次要表面加工之后。

(3) 氮化与氰化处理。

渗氮是使氮原子渗入金属表面获得一层含氮化合物的处理方法。渗氮层可以提高零件表面的硬度、耐磨性、疲劳强度和抗蚀性。由于渗氮处理温度较低、变形小,且渗氮层较薄(一般不超过0.6~0.7mm),渗氮工序一般安排在粗磨与精磨之间进行。

另外,对于表面装饰性镀层及发蓝处理等,一般都安排在机械加工完毕之后进行。

3. 辅助工序的安排

辅助工序包括检验、清洗、去毛刺、防锈、去磁及平衡去重等。其中检验是最主要的,也是必不可少的辅助工序,零件加工过程中除了安排工序自检之外,还应在下列场合安排检验工序:

- (1) 粗加工全部结束之后,精加工之前。
- (2) 工件转入外车间前后。
- (3) 重要工序加工前后。
- (4) 全部加工工序完成后。

3.4.5 机床设备及工艺装备的选择

1. 机床设备的选择

确定了工序集中或工序分散的原则后,基本上也就确定了机床的类型。如采用工序集中,则宜选用高效自动加工设备;若采用工序分散,则加工设备可较简单。此外,选择机床设备时还应考虑:

- (1) 机床的精度应与工序的加工精度相适应。
- (2) 机床的规格应与工件的轮廓尺寸相适应。
- (3) 机床的生产率应与零件的生产类型相适应。

(4) 机床的选择应与工厂现有加工条件相适应。如果没有现成设备供选用,经过对方案进行技术经济分析后,也可提出专用设备的设计任务书或改装旧设备。

2. 工艺装备的选择

工艺装备选择的合理与否,将直接影响工件的加工精度、生产效率和经济效益。应根据生产类型、具体加工条件、工件结构特点和技术要求等选择工艺装备。

(1) 夹具的选择。单件、小批生产应首先采用各种通用夹具和机床附件,如卡盘、机床用平口虎钳、分度头等;对于大批和大量生产,为提高生产率应采用专用高效夹具;多品种中、小批量生产可采用可调夹具或成组夹具。

(2) 刀具的选择。一般采用通用刀具或标准刀具。必要时可采用各种高效的专用刀具、

复合刀具和多刃刀具等。刀具的类型、规格和精度等级应符合加工要求。

(3) 量具的选择。单件、小批生产应广泛采用通用量具,如游标卡尺、百分尺和千分表等;大批、大量生产应采用极限量块和高效的专用检验夹具和量仪等。量具的精度必须与加工精度相适应。

3.5 加工余量与工序尺寸

零件加工工艺路线确定后,在进一步安排各个工序的具体内容时,应正确地确定各工序加工时应达到的尺寸(称为工序尺寸)。为确定工序尺寸,首先应确定加工余量。

3.5.1 加工余量的概念

由于毛坯不能达到零件所要求的精度和表面粗糙度,因此要留有加工余量,以便经过机械加工来达到这些要求。

加工余量是指加工过程中从被加工表面上切除的金属层厚度。加工余量分为工序余量和加工总余量。

1. 工序余量

工序余量是指某一表面在一道工序中切除的金属层厚度。

工序余量等于相邻两工序的工序尺寸之差。

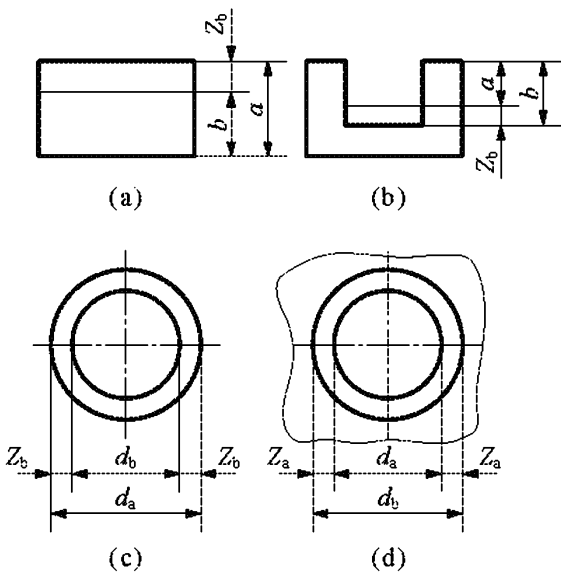


图 3.18 加工余量

对于外表面[见图 3.18(a)]:

$$Z_b = a - b \quad (3-2)$$

对于内表面[见图 3.18(b)]:

$$Z_b = b - a \quad (3-3)$$

式中, Z_b ——本工序的工序余量, mm;

a ——前工序的工序尺寸, mm;

b ——本工序的工序尺寸, mm。

上述加工余量均为非对称的单边余量,旋转表面的加工余量为双边对称余量。

对于轴[图 3.18(c)]:

$$2Z_b = d_a - d_b \quad (3-4)$$

对于孔[图 3.18(d)]:

$$2Z_b = d_b - d_a \quad (3-5)$$

式中, $2Z_b$ ——直径上的加工余量, mm;

d_a ——前工序的加工直径, mm;

d_b ——本工序的加工直径, mm。

2. 工序基本余量、最大余量、最小余量及余量公差

由于毛坯制造和各个工序尺寸都存在着误差,实际加工过程中切除的余量是有变化的,所以加工余量也有基本余量、最大余量和最小余量之分。

通常所说的加工余量是指基本余量(或称为公称余量),其值等于相邻工序的基本尺寸之差。

最小余量 Z_{\min} 是保证该工序加工表面的精度和质量所需切除的金属层最小厚度;最大余量 Z_{\max} 是该工序余量的最大值。

以外表面加工为例(如图 3.19 所示),当尺寸 l_a 、 l_b 均为工序基本尺寸时,基本余量为 $Z=l_a-l_b$,则最小余量

$$Z_{\min} = l_{a\min} - l_{b\max}$$

而最大余量

$$Z_{\max} = l_{a\max} - l_{b\min}$$

加工余量间的变动范围即为余量公差,其值为

$$T_Z = Z_{\max} - Z_{\min} = T_a + T_b \quad (3-6)$$

式中, T_Z ——本工序余量公差, mm;

T_a ——前工序的工序尺寸公差, mm;

T_b ——本工序的工序尺寸公差, mm。

所以,余量公差为前工序与本工序尺寸公差之和。

工序尺寸偏差一般采用“人体原则”。即对于被包容面(轴类),基本尺寸取公差带上限,下偏差取负值,工序基本尺寸即为最大尺寸;对于包容面(孔类),基本尺寸为公差带下限,上偏差取正值,工序尺寸即为最小尺寸。对孔中心距偏差采用双向对称布置。

3. 加工总余量

某一表面从毛坯到最后成品切除掉的金属层厚度称为加工总余量,其值等于毛坯尺寸与零件图样的设计尺寸之差,也等于该表面各工序余量之和,即

$$Z_{\text{总}} = Z_1 + Z_2 + \dots + Z_n = \sum_{i=1}^n Z_i \quad (3-7)$$

式中, Z_i ——第 i 道工序的工序余量, mm;

n ——表面的总加工工序数。

加工总余量也是个变动值,其值及公差一般可从有关手册中查得或凭经验确定。

3.5.2 影响加工余量的因素

加工余量选择过大会浪费原材料和加工工时,过小则不能修正前一工序的误差和表面缺陷,造成局部切削不到而影响加工质量,甚至造成废品。因此,应当合理确定加工余量。确定加工余量的基本原则是:在保证加工质量的前提下,加工余量越小越好。下面分析影响最小加工余量的因素。

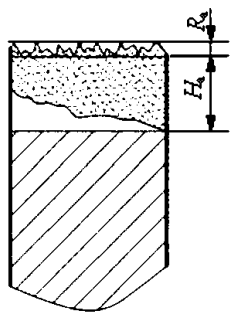


图 3.20 表面粗糙度和缺陷层

(1) 前工序的表面粗糙度 R_a 和表面缺陷层深度 H_a 。

表面层的结构如图 3.20 所示,在本工序加工时要去除这部分厚度。表面粗糙度 R_a 和表面缺陷层深度 H_a 的大小与所采用的加工方法有关。实验数据如表 3-8 所示。

表 3-8 各种加工方法的表面粗糙度 R_a 和表面缺陷层 H_a 的数值 (μm)

加工方法	R_a	H_a	加工方法	R_a	H_a
粗车内外圆	15~100	40~60	磨端面	1.7~15	15~35
精车内外圆	5~40	30~40	磨平面	1.5~15	20~30
粗车端面	15~225	40~60	粗 刨	15~100	40~50
精车端面	5~54	30~40	精 刨	5~45	25~40
钻	45~225	40~60	粗 插	25~100	50~60
粗扩孔	25~225	40~60	精 插	5~45	35~50
精扩孔	25~100	30~40	粗 铣	15~225	40~60
粗 铰	25~100	25~30	精 铣	5~45	25~40
精 铰	8.5~25	10~20	拉	1.7~35	10~20
粗 镗	25~225	30~50	切 断	45~225	60
精 镗	5~25	25~40	研 磨	0~1.6	3~5
磨外圆	1.7~15	15~25	超级加工	0~0.8	0.2~0.3
磨内圆	1.7~15	20~30	抛 光	0.06~1.6	2~5

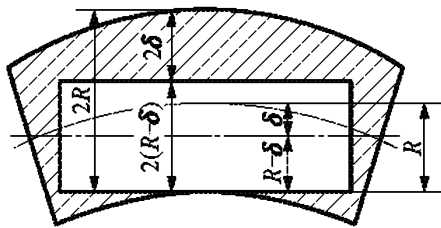


图 3.21 轴线弯曲误差对加工余量的影响

(2) 前工序的工序尺寸公差 T_a 。

本工序应切除前一工序尺寸公差中包含的各种误差。前工序加工后,表面存在的误差有尺寸误差和形状误差(如圆度、圆柱度等),这些误差的总和一般不超过前工序的尺寸公差 T_a 。所以,当考虑加工一批零件时,为了纠正这些误差,本工序的加工余量在不考虑其他误差的存在时,不应小于 T_a 。

T_a 的数值按加工方法的加工经济精度查得。

(3) 前工序的各表面间相互位置的空间误差 ρ_a 。

此项包括轴线、平面本身的形状误差(如弯曲、偏斜等)及其相互位置误差(如平行度、垂直度以及同轴度误差等)。如图 3.21 所示的轴,由于前一工序轴线有直线度误差 δ ,本工序加工余量需增加 2δ 才能保证轴在加工后无弯曲。

(4) 本工序的安装误差 ϵ_b 。

如果本工序存在装夹误差 ϵ_b (包括定位误差、夹紧误差),则在确定本工序加工余量时还应考虑 ϵ_b 的影响。

ρ_a 和 ϵ_b 都是矢量,所以计算余量时要取二者矢量和的模。

综上所述,本工序的加工余量必须满足下式:

用于双边余量时

$$Z \geq 2(R_a + H_a) + T_a + 2|\rho_a + \epsilon_b| \tag{3-8}$$

用于单边余量时

$$Z \geq R_a + H_a + T_a + |\rho_a + \epsilon_b| \tag{3-9}$$

3.5.3 确定加工余量的方法

确定加工余量的方法有经验估算法、查表修正法和计算法等3种方法。

(1) 经验估算法。根据工艺人员或工人的经验来确定加工余量。为避免产生废品,所确定的加工余量一般偏大,适于单件小批生产。

(2) 查表修正法。根据有关手册,查得加工余量的数值,然后根据实际情况进行适当修正。此法方便、迅速,是一种广泛使用的方法。

(3) 计算法。对影响加工余量的各种因素进行分析,然后根据一定的计算式来计算加工余量的方法。此法确定的加工余量较合理,但需要全面的试验资料,计算也较复杂,故很少应用。

3.5.4 工序尺寸及其公差的确

工件上的设计尺寸一般都要经过几道工序的加工才能得到,每道工序所应保证的尺寸称为工序尺寸。正确确定每道工序的工序尺寸及公差是编制工艺规程的重要工作之一。在确定工序尺寸及公差时,存在工序基准与设计基准重合和不重合两种情况。

1. 基准不重合时工序尺寸及其公差的计算

当工序基准或定位基准与设计基准重合,表面多次加工时,工序尺寸及其公差的计算相对来说比较简单。其计算顺序是:先确定各工序的加工方法,然后确定该加工方法所要求的加工余量及其所能达到的精度,再由最后一道工序逐个向前推算,即由零件图上的设计尺寸开始,一直推算到毛坯图上的尺寸。工序尺寸的公差都按各工序的经济精度确定,并按“人体原则”标注上、下偏差。

如某主轴箱体主轴孔的设计要求为 $\phi 100H7, R_a=0.8\mu\text{m}$ 。其加工工艺路线为粗镗—半精镗—精镗—浮动镗。试确定各工序尺寸及其公差。

从机械工艺手册查得各工序的加工余量和所能达到的精度,具体数值见表3-9中的第二、三列,各工序尺寸计算及上下偏差的标注见表中第四、五列。

表3-9 主轴孔工序尺寸及公差的计算

工序名称	工序余量/mm	工序的经济精度(公差/mm)	工序基本尺寸/mm	工序尺寸及偏差/mm
浮动镗	0.1	IT7(0.035)	100	$\phi 100^{+0.035}_0$
精镗	0.5	IT9(0.087)	$100-0.1=99.9$	$\phi 99.9^{+0.087}_0$
半精镗	2.4	IT11(0.22)	$99.9-0.5=99.4$	$\phi 99.4^{+0.22}_0$
粗镗	5	IT13(0.54)	$99.4-2.4=97$	$\phi 97^{+0.54}_0$
毛坯孔	8	(± 1.2)	$97-5=92$	$\phi 92 \pm 1.2$

2. 基准不重合时工序尺寸及其公差的计算

当工序基准或定位基准与设计基准不重合时,需用工艺尺寸链来进行分析计算,详见下节。

3.6 工艺尺寸链

加工过程中,工件的尺寸是不断变化的,由毛坯尺寸到工序尺寸,最后达到满足零件性能要求的设计尺寸。一方面,由于加工的需要,在工序图以及工艺卡上要标注一些专供加工用的工艺尺寸,工艺尺寸往往不是直接采用零件图上的尺寸,而是需要另行计算;另一方面,当零件加工时,有时需要多次转换基准,因而引起工序基准、定位基准或测量基准与设计基准不重合。这时,需要利用工艺尺寸链原理来进行工序尺寸及其公差计算。

3.6.1 尺寸链的基本概念

1. 尺寸链的定义及组成

在工件加工和机器装配过程中,由相互连接的尺寸形成的封闭尺寸组,称为尺寸链。如图 3.22(a)所示零件,零件图上标注的设计尺寸为 A_1 和 A_0 。当用零件的面 M 来定位加工面 N ,得尺寸 A_1 ,仍以面 M 定位加工面 P ,保证尺寸 A_2 。于是 A_1 、 A_2 和 A_0 就形成了一个封闭的尺寸组,这就是一个尺寸链,如图 3.22(b)所示。

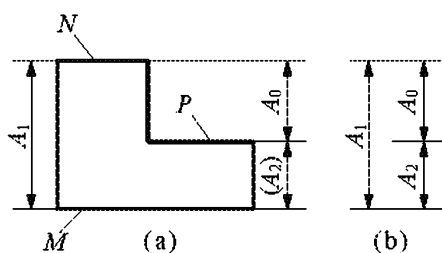


图 3.22 尺寸链示例

组成工艺尺寸链的各个尺寸称为尺寸链的环。这些环可分为封闭环和组成环。

1) 封闭环

尺寸链中在装配或加工过程最终间接形成或间接保证的那个环。在图 3.22(b)中, A_0 是间接得到的尺寸,在该尺寸链中为封闭环。

2) 组成环

尺寸链中除封闭环以外的其他环都称为组成环。组成环又分为增环和减环。

(1) 增环:尺寸链中的组成环,若其变动引起封闭环同向变动(指该环增大时封闭环也增大,该环减小时封闭环也减小),则该环为增环。图 3.22(b)中, A_1 是增环。

(2) 减环:尺寸链中的组成环,若其变动引起封闭环异向变动(指该环增大时封闭环减小,该环减小时封闭环增大),则该环为减环。图 3.22(b)中, A_2 是减环。

尺寸链一般都用尺寸链图表示。建立尺寸链的步骤是:

(1) 首先对工艺过程和工艺尺寸进行分析,确定间接保证的尺寸,并将其定为封闭环。

(2) 从封闭环两端出发,按照零件表面尺寸间的联系,依次画出直接获得的尺寸,形成封闭图形,这就是尺寸链图。

2. 尺寸链的特性

通过上述分析可知,尺寸链具有封闭特性和关联特性。

(1) 封闭性。

尺寸链是由一个封闭环和若干个相互连接的组成环组成的封闭图形。没有封闭环的不能成为尺寸链,一个封闭环对应一个尺寸链。

(2) 关联性。

由于尺寸链具有封闭性,所以尺寸链中的各环都相互关联。任何一个组成环的尺寸及

其变化,都将影响封闭环的变化,组成环是自变量,封闭环是因变量。

3. 尺寸链的分类

(1) 按应用场合不同,尺寸链可分为零件尺寸链(全部组成环为同一零件的设计尺寸)、装配尺寸链(全部组成环为不同零件的设计尺寸)和工艺尺寸链(全部组成环为同一零件的工艺尺寸)。设计尺寸是指零件图样上标注的尺寸,工艺尺寸是指工序尺寸、测量尺寸和定位尺寸等。装配尺寸链与零件尺寸链统称为设计尺寸链,通常用来分析计算零件或机器内部各尺寸及其公差之间的关系。工艺尺寸链用来分析工艺过程各工艺尺寸及其公差之间的关系。

(2) 按在空间的分布位置关系,尺寸链可分为直线尺寸链(全部组成环均平行于封闭环)、平面尺寸链(各环位于一个或几个平行平面内,各环不都平行)和空间尺寸链(各环不在同一平面内或相互平行的平面内)。

(3) 按几何特征,尺寸链可分为长度尺寸链(各环均为长度)和角度尺寸链(各环均为角度)。

3.6.2 尺寸链的计算方法

由于生产实际中最常见的是直线尺寸链,而且平面尺寸链和空间尺寸链可以通过坐标投影方法转换为直线尺寸链求解,因此本节将主要讨论直线尺寸链的计算方法。

尺寸链的计算有两种方法,即极值法和概率法。

1. 极值法

1) 封闭环的基本尺寸

封闭环的基本尺寸等于所有增环基本尺寸之和减去所有减环基本尺寸之和,即

$$A_0 = \sum_{i=1}^m \vec{A}_i - \sum_{j=m+1}^n \overleftarrow{A}_j \quad (3-10)$$

式中, A_0 ——封闭环的尺寸;

\vec{A}_i ——增环的基本尺寸;

\overleftarrow{A}_j ——减环的基本尺寸;

m ——增环数;

n ——组成环数。

2) 封闭环的极限尺寸

封闭环的最大尺寸等于所有增环的最大尺寸之和减去所有减环的最小尺寸之和;封闭环的最小尺寸等于所有增环的最小尺寸之和减去所有减环的最大尺寸之和。即

$$A_{0\max} = \sum_{i=1}^m \vec{A}_{i\max} - \sum_{j=m+1}^n \overleftarrow{A}_{j\min} \quad (3-11)$$

$$A_{0\min} = \sum_{i=1}^m \vec{A}_{i\min} - \sum_{j=m+1}^n \overleftarrow{A}_{j\max} \quad (3-12)$$

3) 封闭环的上、下偏差

封闭环的上偏差 ES_0 等于所有增环的上偏差之和减去所有减环的下偏差之和,封闭环的下偏差 EI_0 等于所有增环的下偏差之和减去所有减环的上偏差之和,即

$$ES_0 = \sum_{i=1}^m \overrightarrow{ES}_i - \sum_{j=-m+1}^n \overleftarrow{EI}_j \quad (3-13)$$

$$EI_0 = \sum_{i=1}^m \overleftarrow{EI}_i - \sum_{j=-m+1}^n \overrightarrow{ES}_j \quad (3-14)$$

4) 封闭环的公差

封闭环的公差 T 等于所有组成环公差之和, 即

$$T_0 = \sum_{i=1}^n T_i \quad (3-15)$$

5) 封闭环的平均尺寸

封闭环的平均尺寸 A_{0M} 等于所有增环的平均尺寸之和减去所有减环的平均尺寸之和, 即

$$A_{0M} = \sum_{i=1}^m \overrightarrow{A}_{iM} - \sum_{j=-m+1}^n \overleftarrow{A}_{jM} \quad (3-16)$$

式中, A_M ——环的平均尺寸, $A_M = \frac{A_{\max} + A_{\min}}{2}$ 。

6) 封闭环的中间偏差。

封闭环的中间偏差 Δ_0 等于所有增环的中间偏差之和减去所有减环的中间偏差之和, 即

$$\Delta_0 = \sum_{i=1}^m \overrightarrow{\Delta}_i - \sum_{j=-m+1}^n \overleftarrow{\Delta}_j \quad (3-17)$$

式中, Δ ——环的中间偏差, $\Delta = \frac{ES + EI}{2}$ 。

2. 概率法

概率法是利用概率论与数理统计理论来进行尺寸链计算的方法。由概率论理论可得封闭环公差与各组成环公差之间的关系为

$$T_0 = \sqrt{\sum_{i=1}^n T_i^2} \quad (3-18)$$

有关概率法具体计算在第 6 章讲述。

3. 尺寸链的计算形式

尺寸链的计算有正计算、反计算和中间计算三种形式。

1) 正计算

已知各组成环尺寸及公差, 求封闭环尺寸、公差。其计算结果是唯一的, 产品设计的校验常用这种形式。

2) 反计算

已知封闭环尺寸, 求各组成环尺寸。由于组成环通常有若干个, 所以反计算形式需将封闭环的公差值按照尺寸大小和精度要求合理地分配给各组成环。产品设计常用此形式。

3) 中间计算

已知封闭环尺寸和部分组成环尺寸及公差, 求某一组成环尺寸、公差。该方法应用最广, 常用于工艺过程中计算工艺尺寸。

3.6.3 工艺尺寸链的应用

1. 基准不重合时工艺尺寸的换算

基准不重合时工艺尺寸的换算主要有两种情形,即加工表面的定位基准与设计基准不重合,或者测量基准与设计基准不重合时。

1) 定位基准与设计基准不重合时工艺尺寸的换算

采用调整法加工零件时,若所选的定位基准与设计基准不重合,那么该加工表面的设计尺寸就不能由加工直接得到,此时需进行工艺尺寸的换算。

【例 3.1】 如图 3.23 所示零件,镗孔前 A、B、C 面已经加工,镗孔时为使装夹方便,选择 A 面为定位基准,并按工序尺寸 L_3 进行加工。试确定 L_3 的尺寸及偏差。

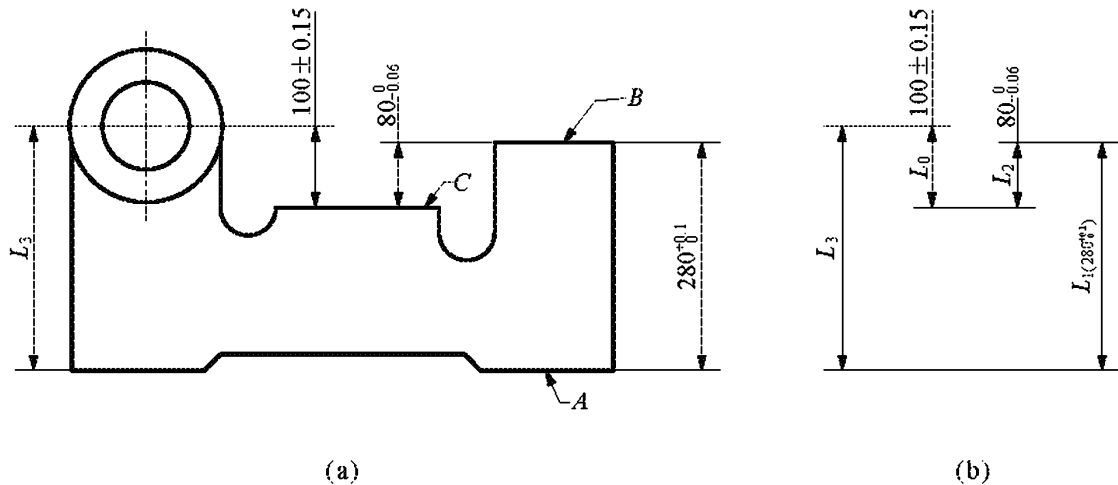


图 3.23 定位基准与设计基准不重合时工序尺寸的计算

本例中,设计尺寸 100 ± 0.15 是间接保证的尺寸,是封闭环。其大小受前工序加工得到的 B、C 间的尺寸和 B、A 间的尺寸以及本工序的工序尺寸 L_3 的影响。由以上尺寸可组成工艺尺寸链。

解:由题意,画出尺寸链,如图 3.23(b)所示。其中, L_0 为封闭环, L_2 、 L_3 为增环, L_1 为减环。

由公式(3-10),计算 L_3 基本尺寸:

$$L_0 = L_2 + L_3 - L_1$$

$$L_3 = L_0 + L_1 - L_2 = 100\text{mm} + 280\text{mm} - 80\text{mm} = 300\text{mm}$$

由公式(3-12)、公式(3-13),计算 L_3 上、下偏差:

$$ES_0 = ES_2 + ES_3 - EI_1$$

$$ES_3 = ES_0 + EI_1 - ES_2 = 0.15\text{mm} + 0\text{mm} - 0\text{mm} = 0.15\text{mm}$$

$$EI_0 = EI_2 + EI_3 - ES_1$$

$$EI_3 = EI_0 + ES_1 - EI_2 = -0.15\text{mm} + 0.1\text{mm} - (-0.06)\text{mm} = +0.01\text{mm}$$

所以

$$L_3 = 300 \begin{matrix} +0.15 \\ -0.01 \end{matrix} \text{mm}$$

孔距尺寸按双向对称布置,则为

$$L_3 = 300.8 \pm 0.07\text{mm}$$

2) 测量基准与设计基准不重合时工艺尺寸的换算

在工件加工过程中,有时会遇到一些表面加工之后,按设计尺寸不便直接测量的情况。因此,需要在零件上另选一容易测量的表面作为测量基准进行测量,以间接检验设计尺寸的要求。

【例 3.2】 套筒零件如图 3.24(a)所示,设计尺寸为 $40_{-0.17}^0$ mm 和 $10_{-0.36}^0$ mm,测量时由于尺寸 $10_{-0.36}^0$ mm 不便测量,改测大孔深度以间接检验其是否合格。当大孔深度在何范围内时便可知尺寸 $10_{-0.36}^0$ mm 是否是合格的?

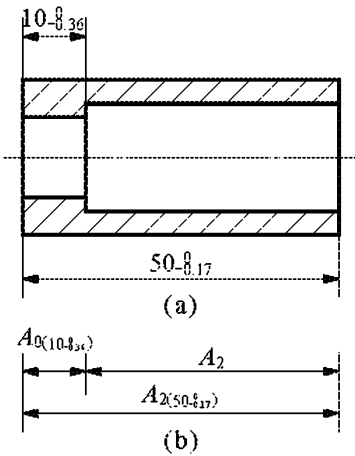


图 3.24

解:根据题意建立尺寸链,如图 3.24(b)所示。其中, L_0 为封闭环, L_1 为增环, L_2 为减环。按前述公式计算。

基本尺寸:

$$L_0 = L_1 - L_2$$

$$L_2 = L_1 - L_0 = 40\text{mm} - 10\text{mm} = 30\text{mm}$$

上下偏差:

$$ES_0 = ES_1 - EI_2$$

$$EI_2 = ES_1 - ES_0 = 0$$

$$EI_0 = EI_1 - ES_2$$

$$ES_2 = EI_1 - EI_0 = -0.17\text{mm} - (-0.36)\text{mm} = +0.19\text{mm}$$

所以,大孔深度尺寸应为

$$L_2 = 30_{+0.19}^0 \text{ mm}$$

2. 从尚需加工的表面标注的工序尺寸及其公差计算

在工件的加工过程中,有些加工表面的测量基准或定位基准是尚待加工的表面。在加工这些基面时,同时要保证两个设计尺寸的精度要求,为此要进行工艺尺寸的换算。

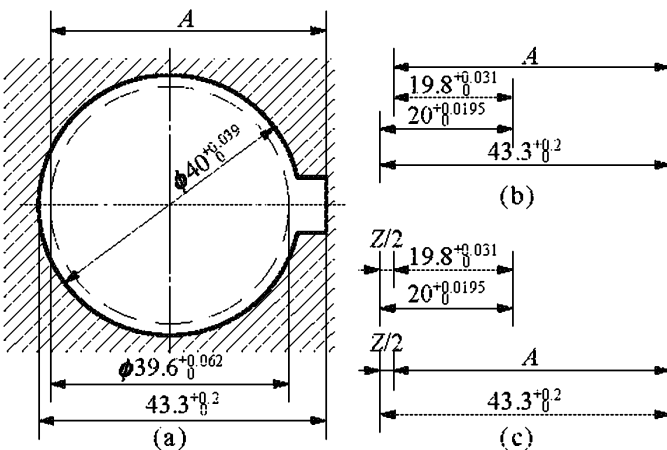


图 3.25 内孔及键槽加工尺寸链

【例 3.3】 一带有键槽的孔如图 3.25 所示,设计尺寸是 $\phi 40_{+0.039}^0$ mm,需淬硬,键槽深度为 $43.3_{+0.2}^0$ mm。孔和槽的加工顺序为:①镗孔至 $\phi 39.6_{+0.062}^0$ mm;②插键槽,工序尺寸为 A ;③淬火;④磨内孔至 $\phi 40_{+0.039}^0$ mm,同时保证 $43.3_{+0.2}^0$ mm。试确定插键槽时的工序尺寸 A 。

解:如图 3.25(b)所示,按加工顺序画出尺寸链,并判断环的性质。 $A = 43.3_{+0.2}^0$ mm

为封闭环, $A_1 = 20_{+0.0195}^0$ mm 和 A 为增环, $A_2 = 19.8_{+0.031}^0$ mm 为减环。

计算基本尺寸:

$$A_0 = A_1 + A - A_2$$

$$\begin{aligned} A &= A_0 + A_2 - A_1 = 43.3\text{mm} + 19.8\text{mm} - 20\text{mm} \\ &= 43.1\text{mm} \end{aligned}$$

计算上下偏差:

$$ES_0 = ES_1 + ES_A - EI_2$$

$$ES_A = ES_0 + EI_2 - ES_1$$

$$= 0.2\text{mm} + 0\text{mm} - 0.0195\text{mm} = 0.1805\text{mm}$$

$$EI_0 = EI_1 + EI_A - ES_2$$

$$EI_A = EI_0 + ES_2 - EI_1 = 0\text{mm} + 0.031\text{mm} - 0\text{mm} = 0.031\text{mm}$$

故所求为

$$A = 43.1 \pm_{0.031}^{0.1805} \text{mm}$$

按“人体原则”标注,并对第三位小数进行四舍五入,可得工序尺寸 $A = 43.13 \pm_{0}^{0.18} \text{mm}$ 。

为了分析磨孔余量对键槽深度的影响,也可将上述尺寸链画成图 3.25(c) 的形式求解。图 3.25(c) 中引入了半径余量 Z ,上图中 Z 是封闭环,下图中则视为已获得尺寸,而尺寸 $43.3 \pm_{0}^{0.2} \text{mm}$ 是封闭环。按照极值法分步计算后得出的结果与图 3.25(b) 是相同的。

3. 保证渗碳、渗氮层深度的工序尺寸计算

【例 3.4】 某零件上内孔 $\phi 45 \pm_{0}^{0.04}$, 表面要求渗氮, 渗氮层深度 $t_0 = 0.3 \sim 0.5 \text{mm}$ 。加工过程为: ①磨孔至 $\phi 44.76 \pm_{0}^{0.04}$; ②渗氮处理, 深度为 t ; ③精磨内孔至 $\phi 45 \pm_{0}^{0.04}$, 保证渗氮层深度 t_0 。

试确定工艺渗氮层深度 t 。

解: 依题意, 渗氮层是单边深度值, 因此在半径方向上画出尺寸链, 如图 3.26(b) 所示, 显然渗氮层深度是间接获得的, 为封闭环, 记为 $t_0 = 0.3 \pm_{0}^{0.2} \text{mm}$ 。初始渗氮层深度 t 、半径尺寸 $22.38 \pm_{0}^{0.02} \text{mm}$ 是增环, 半径尺寸 $22.5 \pm_{0}^{0.02} \text{mm}$ 是减环。

计算封闭环基本尺寸: $0.3 = t_1 + 22.38 - 22.5$

$$t_1 = 0.42\text{mm}$$

封闭环上偏差: $0.2 = ES_1 + 0.02 - 0$

$$ES_1 = 0.18\text{mm}$$

封闭环下偏差: $0 = EI_1 + 0 - 0.02$

$$EI_1 = 0.02\text{mm}$$

所以 $t_1 = 0.42 \pm_{0.02}^{0.18} \text{mm}$, 即工艺渗氮层深度为 $0.44 \sim$

0.60mm 。

验算封闭环公差; $T_0 = 0.2\text{mm}$

$$T_1 + T_2 + T_3 = 0.16 + 0.02 + 0.02 = 0.20(\text{mm})$$

计算正确。

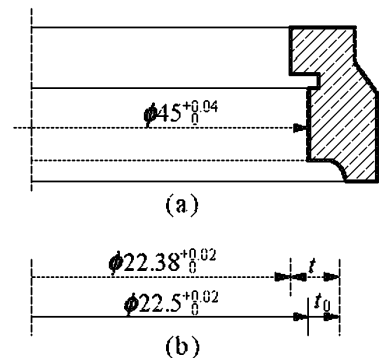


图 3.26 渗碳深度工序尺寸计算

3.7 工艺过程的生产率和技术经济分析

3.7.1 工艺过程的生产率

工艺规程的一项重要设计内容, 就是确定劳动消耗工艺定额, 简称时间定额。它是劳动生产率的重要指标。

1. 时间定额

时间定额是指在一定生产条件下, 规定生产一件产品或完成一道工序所消耗的时间。

时间定额是安排作业计划、进行成本核算的重要依据,也是设计或扩建工厂(或车间)时计算设备和工人数量的依据。

完成零件加工中一个工序的时间定额称为单件时间定额,它由以下几个部分组成。

1) 作业时间 T_j

直接用于制造产品或零、部件所消耗的时间称为作业时间。它是由基本时间 T_j 和辅助时间 T_f 组成的。

(1) 基本时间 T_j 。直接改变生产对象的尺寸、形状、相对位置、表面状态或材料性质等工艺过程所消耗的时间,称为基本时间 T_j 。它包括刀具的趋近、切入、切削加工和切出等时间,又称机动时间。

(2) 辅助时间 T_f 。为实现工艺过程所必须进行的各种辅助动作所消耗的时间,称为辅助时间 T_f 。如装卸工件、启动和开停机床、改变切削用量、测量工件等所消耗的时间。

2) 布置工作地时间

为使加工正常进行,工人为照管工作地(如更换刀具、润滑机床、清理切屑、收拾工具等)所消耗的时间,称为布置工作地时间,又称工作地服务时间。一般按作业时间的 2%~7% 估算。

3) 休息和生理需要时间

工人在工作班内为恢复体力和满足生理需要所消耗的时间,称为休息和生理需要时间;一般按作业时间的 2% 估算。

单件时间定额 T_d :

$$T_d = T_j + T_f + T_b + T_x = (T_j + T_f)(1 + \alpha + \beta) \quad (3-19)$$

式中, α ——布置工作地时间占作业时间的百分比;

β ——休息和生理需要时间占作业时间的百分比。

4) 准备与终结时间 T_z

工人为了生产一批产品或零、部件,进行准备和结束工作所消耗的时间。如熟悉工艺文件、领取毛坯、安装刀具和夹具、调整机床以及在加工一批零件终结后所需拆下和归还工艺装备、发送成品等所消耗的时间。

准备终结时间对一批零件只消耗一次。零件批量 N 越大,分摊到每个工件上的准备时间(T_z/N)就越少。所以,成批生产的单件核算时间定额为

$$T_h = (T_j + T_f)(1 + \alpha + \beta) + T_z \quad (3-20)$$

大量生产时由于 N 很大,通常 $T_h = T_d$

2. 提高生产率的工艺途径

劳动生产率是指一个工人在单位时间内生产出合格产品的数量,也可用完成单件产品或单个工序所耗费的劳动时间来表示。提高劳动生产率是一个与产品设计、制造工艺、组织管理等都有关的综合性任务,此处仅就提高生产率的工艺途径作一简要说明。

1) 缩短基本时间

(1) 提高切削用量。增大切削速度、进给量和切削深度,都可以缩减基本时间,从而减少单件时间。这是机械加工中广泛采用的提高劳动生产率的有效方法。

(2) 减少切削行程长度。采取措施设法缩短切削行程。例如,用几把刀具同时切削同一表面,改纵向进给为横向进给,宽砂轮作切入磨削等。

(3) 复合工步。采用复合工步,可使各工步基本时间全部或部分相重合,减少了工序的基本时间。多件装夹一次加工,也是减少基本时间的有效方法。

2) 缩短辅助时间

(1) 直接缩减辅助时间。采用先进高效夹具和各种上下料装置,可缩短装卸工件的时间。

(2) 间接缩减辅助时间。将辅助时间与基本时间全部或部分地重合,可间接缩减辅助时间。采用转位夹具或转位工作台、直线往复式工作台以及几根心轴等,使在加工时间内装卸另一个或另一组工件,从而使装卸工件的辅助时间与基本时间重合。采用连续加工,例如,在立式或卧式连续回转工作台铣床和双端面磨床上加工等。由于工件连续送进,使机床的空程时间明显缩减,装卸工件又不需停止机床,能显著提高生产率。

3) 缩短布置工作地时间

缩短布置工作地时间的主要途径是减少换刀次数和缩短换刀时间。减少换刀次数就意味着要提高刀具或砂轮的耐用度;而缩短换刀时间,则主要是通过改进刀具的安装方法和采用先进的对刀装置来实现,如采用各种快换刀夹、刀具微调装置、专用对刀样板和自动换刀装置等,以减少装卸刀具和对刀所花费的时间。

4) 缩短准备终结时间

减少准终时间的主要方法是减少机床、夹具和刀具的调整和安装时间,如采用可调夹具、可换刀架和刀夹、使用辅助对刀工具等;还可通过零件标准化、通用化或采用成组技术扩大产品生产批量,以相对减少分摊到每个零件上的准备终结时间。

5) 进行高效及自动化加工

大批大量生产中由于零件批量大、生产稳定,可采用专用的组合机床和自动线。对中、小批生产零件可采用加工中心;中型零件用数控机床、流水线或非强制节拍的自动线;小型零件则视情况不同,可用各种自动机及简易程控机床等。

3.7.2 工艺过程的技术经济分析

制定机械加工工艺规程时,可以在保证质量的前提下,拟订出几种不同的工艺方案,并通过对工艺过程的技术经济分析和比较,确定出最经济合理的方案。

工艺过程的技术经济分析,通常是对不同的工艺过程进行工艺成本的分析和评比。

1. 工艺成本的概念及组成

零件制造过程中所需费用的总和称为生产成本。生产成本中与工艺过程直接有关费用称为工艺成本。比较工艺方案的经济性,只需要计算比较工艺成本即可。这是因为在生产成本中与工艺过程无关的那部分费用,如行政人员工资、厂房折旧维修费等,不会随工艺方案的不同而不同,因此可以不进行计算。工艺成本按其随年产量的变化情况分为可变费用 V 和不变费用 S 。

(1) 可变费用 V 。可变费用是指与年产量直接有关,并随年产量的变化而成比例变动的费用。它包括材料费、操作工人工资、机床电费、通用机床的折旧费和维修费,以及通用工装的折旧费和维修费等。

(2) 不变费用 S 。不变费用是指与年产量无直接关系,不随年产量的增减而变化的费

用。它包括专用设备的折旧和修理费、专用工装的折旧费和维修费、调整工人工资等。

若工件的年产量为 N ，则工件的全年工艺成本 E 为

$$E = VN + S \quad (3-21)$$

单件工艺成本 E_d 为

$$E_d = V + S/N \quad (3-22)$$

2. 工艺方案的经济性比较

全年工艺成本 E 与年产量的关系为一条直线，如图 3.27(a) 所示；而单件工艺成本与年产量的关系为一条曲线，如图 3.27(b) 所示。由公式及关系图可以看出，单件工艺成本 E_d 随年产量 N 的增加而降低，而全年工艺成本则随年产量的增加而成比例地上升。可见对某一个工艺方案，当不变费用 S 一定时，就具有一个与此设备生产能力相适应的产量，称为最佳生产纲领 N_k 。

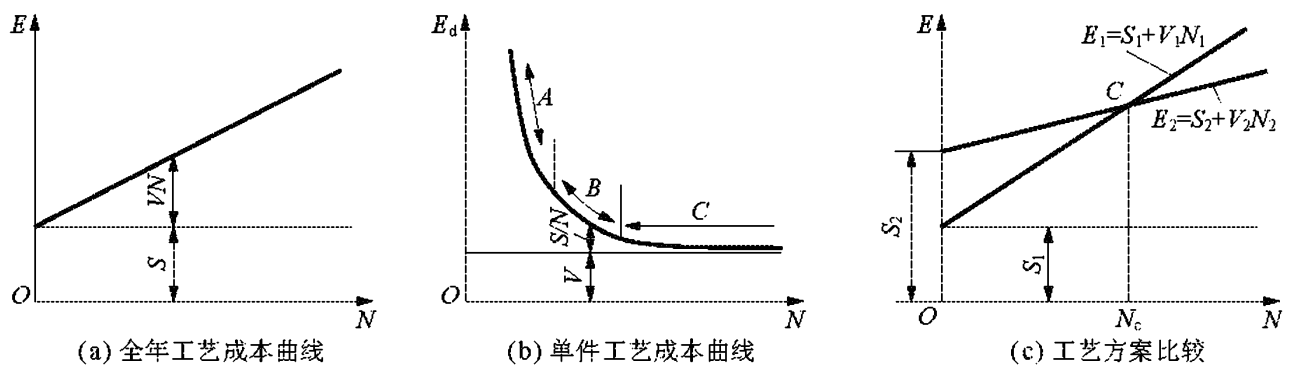


图 3.27 工艺方案的技术经济分析

当年产量小于最佳生产纲领 N_k ，即 $N < N_k$ 时，由于 S/N 较大，工艺成本增加，这种工艺方案显然是不经济的。应减少专用设备，降低不变费用，改善其经济效果。

当年产量超过最佳生产纲领 N_k ，即 $N > N_k$ 时， S/N 的值变小且趋于稳定。这时应选用生产率高、投资大的设备，即增加不变费用 S 而降低可变费用 V ，最终降低单件工艺成本。

在图 3.27(b) 中， A 为单件小批生产区， B 为中批生产区， C 为大批大量生产区。

比较不同工艺方案的经济性可分两种情况：

(1) 两种工艺方案的基本投资相近，或使用现有设备的情况时，工艺成本就是衡量各方案经济性的依据。

若有两种工艺方案，其全年工艺成本分别为

$$E_1 = V_1 N_1 + S_1$$

$$E_2 = V_2 N_2 + S_2$$

如图 3.27(c) 所示，两条工艺成本曲线相交于 C 点。 N_c 称为临界年产量，当年产量等于 N_c 时，两种工艺方案的全年工艺成本相等，即经济性相当。由 $E_1 = E_2$ 可得

$$N_c = \frac{S_1 - S_2}{V_2 - V_1}$$

当实际年产量 N 小于 N_c 时，采用第一方案比较经济；当年产量 N 大于 N_c 时，则宜采用第二工艺方案。

(2) 基本投资额相差较大时，单纯比较工艺成本难以全面评价其经济性。如第一个方案

采用高生产率、价格较贵的机床和工艺装备,基本投资 K_1 较大,但工艺成本 E_1 较低;第二种方案采用投资节省的一般机床及工艺装备,基本投资 K_2 较小,但工艺成本 E_2 较大。第一种工艺方案工艺成本的降低是因增加基本投资得到的,此时应考虑投资差额的回收期。

回收期可用下式表示:

$$\tau = \frac{K_1 - K_2}{E_2 - E_1} = \frac{\Delta K}{\Delta E} \quad (3-23)$$

显然,回收期越短,则经济效果越好。一般回收期应满足下列要求:

- ① 回收期应小于所采用设备或工艺装备的使用年限;
- ② 回收期应小于所开发生产的产品市场寿命;
- ③ 回收期应小于国家规定的标准回收期。一般新夹具的标准回收期为 2~3 年,新机床的标准回收期为 4~6 年。

工艺成本对于工艺过程方案的技术经济分析具有重要的意义,但这种方法在有些情况下并不全面,因此有时还需借助其他一些指标,如投资回收年限、相对技术经济指标等。

思考与练习题

3-1 什么是机械加工工艺过程? 什么叫机械加工工艺规程? 工艺规程在生产中起什么作用?

3-2 什么叫工序、工位和工步?

3-3 什么叫基准? 粗基准和精基准选择的原则有哪些?

3-4 零件加工表面加工方法的选择应遵循哪些原则?

3-5 在制定机械加工工艺规程中,为什么要划分加工阶段?

3-6 切削加工顺序安排的原则是哪些?

3-7 在机械加工工艺规程中通常有哪些热处理工序? 它们各有什么作用? 如何安排?

3-8 什么叫工序集中? 什么叫工序分散? 什么情况下采用工序集中? 什么情况下采用工序分散?

3-9 什么叫加工余量? 影响加工余量的因素有哪些?

3-10 在粗、精加工中如何选择切削用量?

3-11 如图 3.28 所示:图 3.28(a)为一轴套零件,尺寸 $40_{-0.10}^0$ mm 和 $8_{-0.05}^0$ 已加工好;图 3.28 (b)、(c)、(d)为钻孔加工时 3 种定位方案的简图。试计算 3 种定位方案的工序尺寸 A_1 、 A_2 、和 A_3 。

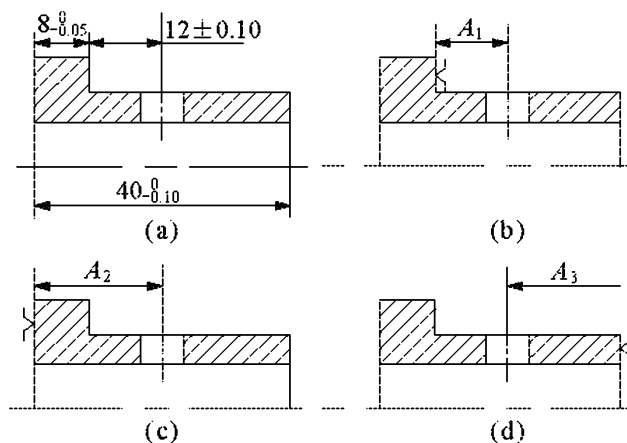


图 3.28 题 3 11

3-12 图 3.29 所示为某轴铣键槽工序,轴颈设计尺寸是 $\phi 30_{-0.032}^0$ mm,键槽深度尺寸为 $26_{-0.20}^0$ mm。轴和槽的加工顺序如下:

- (1)半精车外圆至 $\phi 30.6_{-0.10}^0$ mm;
- (2)铣键槽,工序尺寸为 A ;
- (3)热处理;
- (4)磨外圆至 $\phi 30_{-0.032}^0$ mm,同时保证 $26_{-0.20}^0$ mm。

求铣键槽时的工序尺寸 A 。

3-13 套筒零件如图 3.30 所示,除缺口 B 外,其余表面均已加工,当加工缺口 B 保证尺寸 $L_3 = 10_{+0.18}^0$ mm 时,可以 A 面或 C 面定位,已知 $L_1 = 60 \pm 0.05$ mm, $L_2 = 30_{+0.04}^0$ mm,计算两工序尺寸,并说明哪个方案更好。

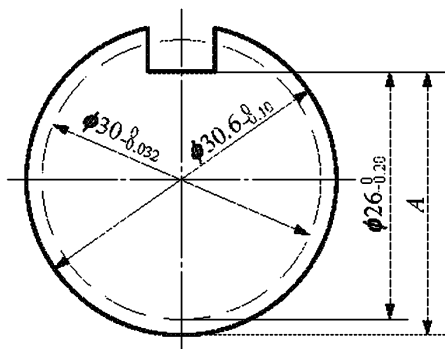


图 3.29 题 3 12

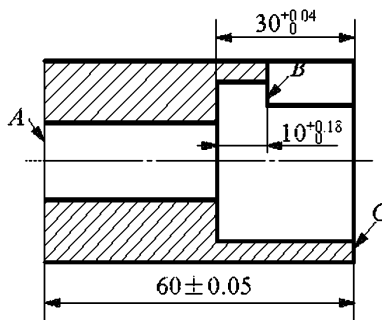


图 3.30 题 3 13

- 3-14 什么叫时间定额? 单件时间定额包括哪些方面? 举例说明各方面的含义。
- 3-15 什么叫工艺成本? 由哪些部分组成? 如何对不同工艺方案进行技术经济分析?
- 3-16 提高机械加工生产率的工艺措施有哪些?

第 4 章 机床夹具设计原理

教学提示:夹具是保证产品质量、提高劳动生产率及减轻工人劳动强度的重要工艺装备。本章简明扼要地叙述了机床夹具的定位、夹紧原理,定位元件与夹紧机构的设计原则,以及几种典型夹具的结构、设计方法等。

教学要求:通过本章内容的学习,应能熟练地应用工件定位的基本原理,根据工件加工的技术要求,合理选择定位基准,进行定位误差的分析计算;应能合理选择或设计定位元件、夹紧装置,熟悉典型夹紧机构的结构特点和典型机床夹具的设计特点,掌握机床夹具设计的一般方法。

4.1 机床夹具概述

4.1.1 工件装夹的基本概念

在机床上加工工件时,为使工件在该工序所加工表面能达到规定的尺寸与形位公差要求,在开动机床进行加工之前,必须首先使工件在机床上占有正确的加工位置,这一过程称为定位。

工件在定位之后还不一定能承受外力的作用。为了使工件在加工过程中,不致因外力(切削力、惯性力、重力等)的作用而破坏其正确位置,还必须对工件施加夹紧力,这一过程称为夹紧。

工件的装夹,就是在机床上对工件进行定位和夹紧。其目的是使工件在加工过程中始终保持其正确的加工位置,以保证达到加工要求。机床上用来装夹工件的工艺装备,称为机床夹具,简称夹具。

4.1.2 机床夹具的分类

机床夹具种类繁多,分类的方法也有多种,一般可按其应用的范围、使用的机床和夹紧动力源进行分类。

1) 按夹具的应用范围分类

(1) 通用夹具。通用夹具是指已经标准化的,在一定范围内可用于加工不同工件的夹具。例如,车床上常用的三爪自定心卡盘、四爪单动卡盘和顶尖,铣床上的平口虎钳、万能分度头和回转工作台,平面磨床上的电磁吸盘等均属此类夹具。

(2) 专用夹具。专用夹具是指专为某一工件的某一工序而专门设计的夹具,因其用途专一而得名。其特点是结构紧凑,操作迅速、方便、省力,可以保证较高的加工精度和生产效率,但设计制造周期较长、制造费用也较高,主要适用于产品固定且批量较大的生产中。

(3) 通用可调夹具和成组夹具。其特点是夹具的部分元件可以更换,部分装置可以调

整,以适应不同零件的加工。用于相似零件成组加工的夹具,通常称为成组夹具。通用可调夹具与成组夹具相比,加工对象不很明确,适应范围更广。

(4) 组合夹具。组合夹具是指按零件的加工要求,由预先制造好的通用标准元件和部件组装而成的专用夹具,是一种标准化、系列化、通用化程度高的工艺装备。其特点是灵活多变、通用性强、制造周期短、元件和部件可反复使用。

(5) 随行夹具。随行夹具是一种在自动线上或柔性制造系统中使用的夹具。工件安装在随行夹具上,除完成对工件的定位和夹紧外,还载着工件随输送装置送往各机床,并在各机床上被定位和夹紧,完成不同工序的加工。

2) 按使用的机床分类

按所使用的机床不同,夹具可分为车床夹具、铣床夹具、钻床夹具、镗床夹具、磨床夹具、齿轮机床夹具和其他机床夹具等。

3) 按夹紧动力源分类

根据夹具所采用的夹紧动力源不同,夹具可分为手动夹具、气动夹具、液压夹具、气液夹具、电动夹具、磁力夹具、真空夹具等。

4.1.3 机床夹具的组成

机床夹具的组成,可以通过一个专用夹具的实例来说明。

图 4.1(a) 所示为某轴套工件,要求加工 $\phi 6H7$ 孔并保证轴向尺寸 $\phi 37.5 + 0.02$ 。图 4.1(b) 为其钻床夹具,工件以内孔及端面为定位基准,通过夹具上的定位销 6 及其端面即可确定了工件在夹具中的正确位置。拧紧螺母 5,通过开口垫圈 4 可将工件夹紧,然后由装在钻模板 3 上的快换钻套 1 导引钻头进行钻孔。

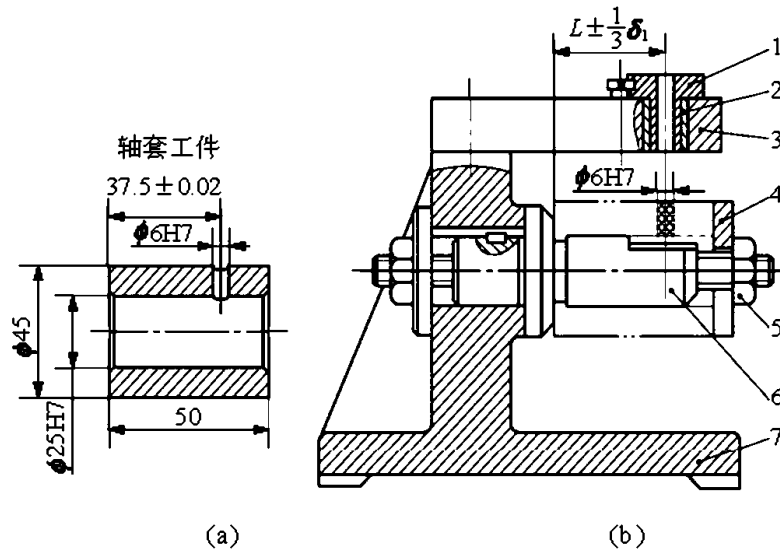


图 4.1 钻床夹具

1 快换钻套;2 衬套;3 钻模板;4 开口垫圈;5 螺母;6 定位销;7 夹具体

通过上述例子可以看出,夹具一般由以下几部分组成:

(1) 定位元件及定位装置。它与工件的定位基面相接触,用于确定工件在夹具中的正确位置。如图 4.1 中的定位销 6,使工件在夹具中占据正确位置。

(2) 夹紧装置。用于将工件夹紧压牢,保证工件在加工过程中,不致受外力影响改变位

置,同时能防止或减少振动,如图 4.1 中的螺母 5 和开口垫圈 4 等。

(3) 对刀与导引元件。用于确定刀具在加工前正确位置的元件称为对刀元件,如铣床夹具上的对刀块、塞尺等。用于确定刀具位置并导引刀具进行加工的元件称为导引元件,如图 4.1 中的快换钻套 1。

(4) 夹具体。夹具体是用于连接或固定夹具上各元件及装置,使其成为一个整体的基础件。它与机床有关部件进行连接、对定,使夹具相对机床具有确定的位置,如图 4.1 中的夹具体 7。

(5) 连接元件。确定夹具在机床上正确位置的元件,如定位键、定位销及紧固螺栓等。

(6) 其他装置。有些夹具根据工件的加工要求,还设有分度机构、靠模装置、上下料装置、安全防护装置等。

以上这些组成部分,并不是对每种机床夹具都是缺一不可的。但是,定位元件、夹紧装置和夹具体作为夹具的基本组成部分,一般来说是不可缺少的。

4.1.4 机床夹具的功能

机床夹具的主要功能如下:

(1) 保证工件的加工精度,稳定产品质量。机床夹具的首要任务是保证加工精度,特别是保证被加工工件的加工面与定位面之间以及被加工表面相互之间的尺寸精度和位置精度。使用夹具后,这种精度主要靠夹具和机床来保证,不再依赖于工人的技术水平。

(2) 提高劳动生产率、降低成本。使用夹具后可减少画线、找正等辅助时间,而且易于实现多件、多工位加工。在现代夹具中,广泛采用气动、液压等机动夹紧等装置,还可使辅助时间进一步减小。因而可以提高劳动生产率、降低生产成本。

(3) 扩大机床工艺范围。例如,在普通车床或摇臂钻床上使用镗削夹具,就可以代替镗床对工件进行镗削加工;又例如,使用靠模夹具,可在车床或铣床上进行仿形加工。

(4) 改善工人劳动条件。使用夹具后,可使装卸工件方便、省力、安全。如采用气动、液压等机动夹紧装置,可以大大减轻工人劳动强度,保证安全生产。

4.2 工件定位的基本原理

在机械加工中,工件、夹具、刀具和机床之间必须保持正确的相互位置才能加工出合格的零件。工件在夹具中定位的目的,就是使同一工序的一批工件在夹具中占据正确的位置。工件在夹具中的定位,由工件的定位基准与夹具上的定位元件表面相接触或配合来实现。

4.2.1 六点定位原理

任何一个工件在夹具中未定位之前,都可以看成是空间直角坐标系中的自由物体,即其空间位置是不确定的,可以有 6 个独立的运动。以图 4.2(a)所示的长方体为例,它在直角坐标系中可以有 3 个平移运动和三个转动。即沿 X, Y, Z 3 个坐标轴的平移运动,记为 \vec{X} 、 \vec{Y} 、 \vec{Z} ; 绕 X, Y, Z 3 个坐标轴的转动,记为 \hat{X} 、 \hat{Y} 、 \hat{Z} 。通常把上述 6 个独立运动称为 6 个自由度。要使工件在某个方向上有确定的位置,就必须限制工件在该方向上的自由度,当 6 个自由度完全被限制后,工件在空间的位置就被确定了。

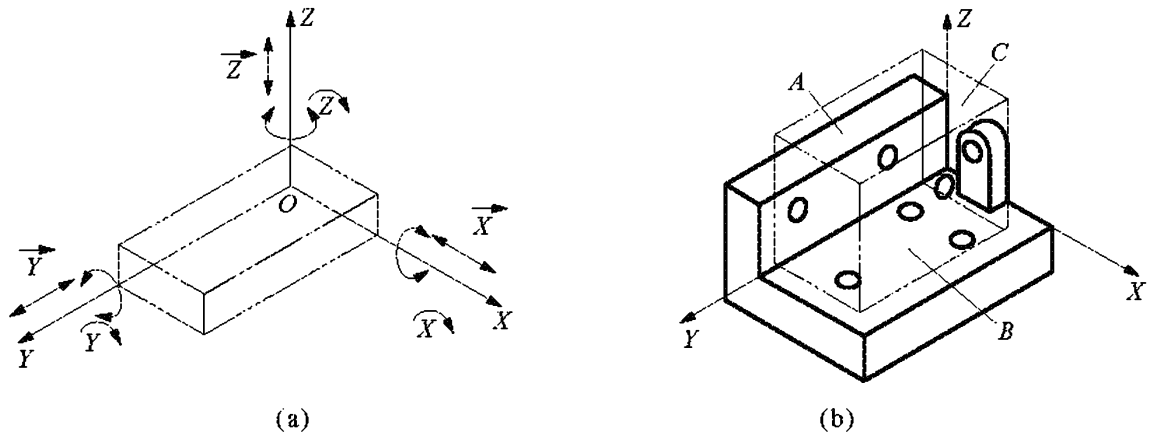


图 4.2 工件六点定位原理

工件的定位就是采取一定的约束措施来限制自由度,通常可用如图 4.2(b)所示的 6 个支承约束的方法来描述。图中工件以平面 A、B、C 为定位基准,其中工件的底面 B 放置在 3 个不共线的支承上,消除了工件沿 Z 轴移动、绕 X 轴转动和绕 Y 轴转动 3 个自由度;侧面 A 靠在两个支承上,消除了工件沿 X 轴的移动和绕 Z 轴的转动两个自由度;端面 C 与一个支承接触,消除了沿 Y 轴移动一个自由度。工件每次都放置在与 6 个支承相接触的位置,从而使每个工件得到确定的位置,一批工件也就获得了同一位置。在分析工件定位时,由于每个支承与工件接触的面积很小,可以抽象为一个点,因此,可用一个支承点限制工件的一个自由度。

从以上分析可知,用合理分布的 6 个支承点限制工件的 6 个自由度,其中每个支承相应地限制一个自由度,使工件在夹具中的位置完全确定,这个原理称为“六点定位原理”,简称“六点定则”。

在实际夹具中,工件的定位是通过工件上的定位基面和夹具上定位元件的定位表面相接触或配合来实现的。

4.2.2 六点定位原理的应用

实际生产中,应用六点定位原理对工件进行定位分析时,常有以下几种情况。

1. 完全定位

工件的 6 个自由度全部被限制而在夹具中占有完全确定的唯一位置,称为完全定位。如图 4.3 所示加工工件上的不通槽,为保证槽底面与工件底面的平行度与尺寸 A,必须限制工件 \vec{Z} 、 \vec{X} 、 \vec{Y} 3 个自由度;为保证槽侧面与工件侧面的平行度和尺寸 B,必须限制 \vec{X} 、 \vec{Z} 两个自由度;为保证槽的长度尺寸 C,必须限制 \vec{Y} 。这样,工件的 6 个自由度都被限制了。

2. 不完全定位

在有些情况下,根据加工工艺的要求,有些自由度可以不予限制。例如,车削外圆时只需限制 4 个自由度,沿轴向的移动和绕轴线的转动两个自由度可以不限;磨平面时则只需限制 3 个自由度。我们把这种工件被限制的自由度少于 6 个,但能够保证加工要求的定位称为不完全定位。

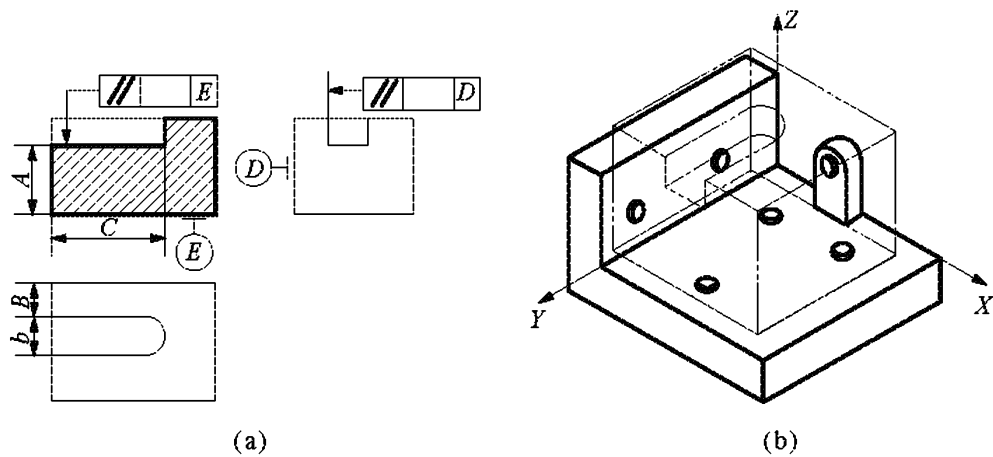


图 4.3 完全定位

如铣削图 4.4 所示工件上的通槽时,沿 Y 轴的移动自由度 \vec{Y} 无需限制。因为,加工一批工件时,即使各个工件沿 Y 轴的位置不同,也不会影响加工精度。从上面的分析可知,工件定位时,影响加工要求的自由度必须限制,不影响加工要求的自由度,有时可以不限。在实际生产中,不完全定位普遍存在。

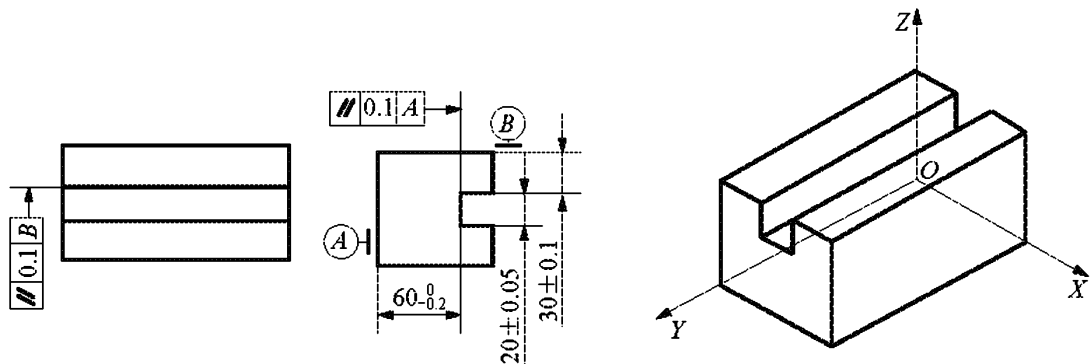


图 4.4 不完全定位

3. 欠定位

根据工件的加工要求,应该限制的自由度没有完全被限制的定位称为欠定位。欠定位无法保证加工要求,因此,在确定工件在夹具中的定位方案时,决不允许有欠定位的现象产生。如铣削图 4.4 所示零件上的通槽时,应该限制 \hat{X} 、 \hat{Y} 、 \hat{Z} 3 个自由度以保证槽底面与 A 面的平行度及尺寸 $60_{-0.2}^0$ mm 两项加工要求;应该限制 \vec{X} 、 \vec{Z} 两个自由度以保证槽侧面与 B 面的平行度及尺寸 30 ± 0.1 mm 两项加工要求; \vec{Y} 自由度不影响通槽加工,可以不限。如果 \vec{Z} 没有限制, $60_{-0.2}^0$ mm 就无法保证;如果 \hat{X} 或 \hat{Y} 没有限制,槽底与 A 面的平行度就不能保证。

由于欠定位不能保证工件的加工精度要求,所以,在确定工件加工中是决不允许的。

4. 过定位

工件的一个或几个自由度被不同的定位元件重复限制的定位称为过定位。过定位分两种情况:

(1) 当工件的一个或几个自由度被重复限制,并对加工产生有害影响的重复定位,称为

不可用过定位。

(2) 当工件的一个或几个自由度被重复限制,但仍能满足加工要求,不但不会产生有害影响,反而可增加工件装夹刚度和稳定性的定位,称为可用过定位。

如图 4.5 所示的连杆定位方案,长销限制了 $\vec{X}, \vec{Y}, \vec{X}, \vec{Y}$ 四个自由度,支承板限制了 $\vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z}$ 3 个自由度,其中 \vec{X}, \vec{Y} 被两个定位元件重复限制,这就产生了过定位。当连杆小头孔与端面有较大的垂直度误差时,夹紧力 F 将使长销弯曲或使连杆变形,见图 4.5(b)、(c),造成连杆加工误差,这时为不可用过定位。若采用如图 4.5(d)所示方案,将长销改为短销,就不会产生过定位。

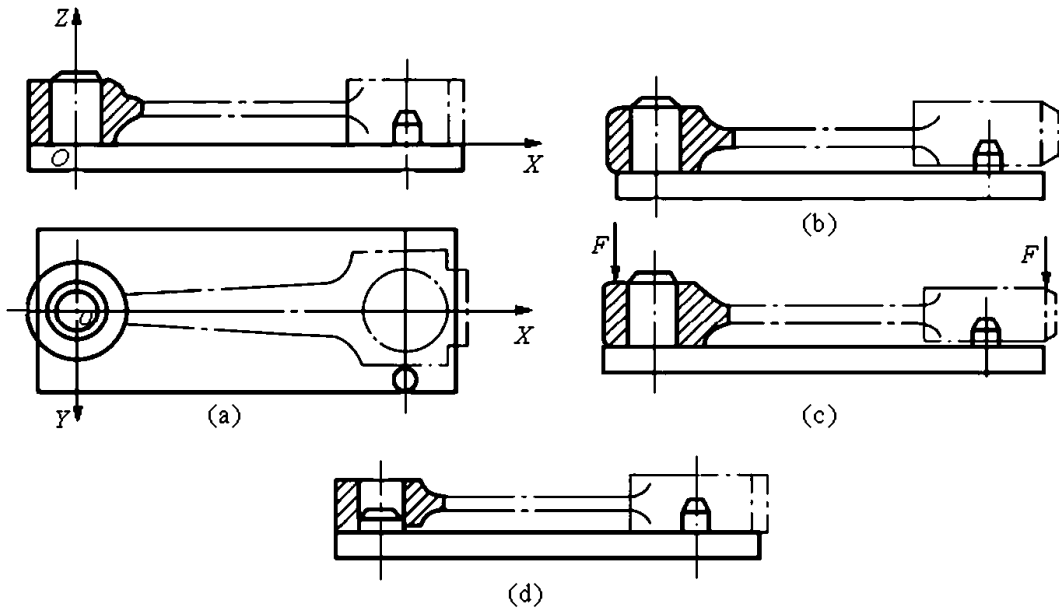


图 4.5 连杆大头孔加工时工件在夹具中的定位

由以上例子可以看出,过定位会产生下列不良后果:

- (1) 可能使定位变得不稳定而使定位精度下降。
- (2) 可能使工件或定位元件受力后产生变形。
- (3) 导致部分工件不能顺利地 与定位件配合,即可能阻碍工件装入夹具中,造成干涉。

消除或减少过定位的方法主要有:

(1) 提高工件定位基准之间及定位元件工作表面之间的位置精度,减少过定位对加工精度的影响,使不可用过定位变为可用过定位。

(2) 改变定位方案,避免过定位。改变定位元件的结构,如圆柱销改为菱形销、长销改为短销等;或将其重复限制作用的某个支承改为辅助支承(或浮动支承)。

在某些情况下,过定位不仅是允许的,而且还会带来一定的好处,特别在精加工和装配中,过定位有时是必要的。例如,在加工长轴时,为了增强刚性、减少加工变形,也常常采用过定位的定位法,即将长轴的一端用三爪卡盘定心夹紧,而另一端又用尾顶尖顶住。

4.3 定位方式与定位元件

工件在夹具中的定位,主要是通过各种类型的定位元件实现的。在机械加工中,虽然被加工工件的种类繁多,形状各异,但从它们的基本结构来看,不外乎是由平面、圆柱面、圆锥

面及各种成形表面组成。工件在夹具中定位时,可根据各自的结构特点和工序加工精度要求,选取其上的平面、圆柱面、圆锥面和它们之间的组合表面作为定位基准。为此,在工件定位中可根据需要选用不同类型的定位元件进行定位。

4.3.1 工件以平面定位

工件以平面作为定位基准时,通常根据其限制自由度的数目,分为主要支承面、导向支承面和止推支承面,如图4.6所示。限制工件3个自由度的定位平面称为主要支承面,常用于精度比较高的工件定位表面。当工件平面的精度很高时,可以直接将定位元件设计成为平面;在多数情况下,往往布置尽量放远一些的3个支承点,使工件的中心落在3个支承点之间,以保证工件定位的稳定可靠。限制工件两个自由度的定位平面,称为导向支承面。该平面时常做成窄长面。在工件定位表面精度不高时,甚至将窄长面的中间部分切除,只保留远端位置上的短面,以确保定位效果的一致性。限制一个自由度的平面,称为止推支承面。这时,为了确保定位准确,往往将平面面积做得尽可能小。

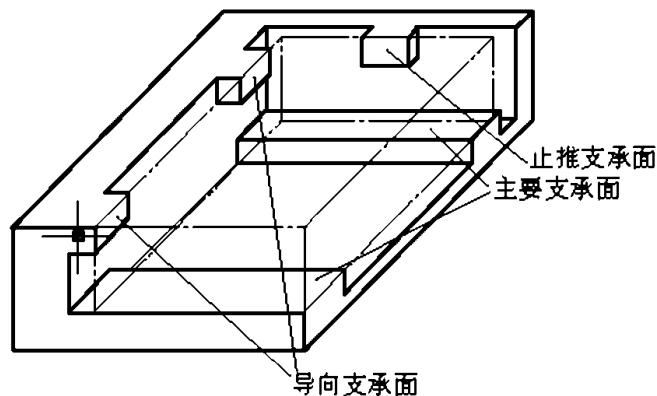


图 4.6 工件以平面定位简图

工件以平面定位时,常用定位元件有主要支承和辅助支承。

1. 主要支承

用来限制工件的自由度,起定位作用的支承,分为固定支承、可调支承、浮动支承3类。

1) 固定支承

固定支承有支承钉和支承板两种形式,它们在夹具中的位置固定不变。

(1) 支承钉。如图4.7所示,图4.7(a)为平头支承钉,主要用于精基准定位;图4.7(b)为圆头支承钉,它与定位基面之间为点接触,因此容易保证接触点位置的相对稳定;多用于粗基准定位;图4.7(c)为网纹支承钉,常用于要求摩擦力较大的侧面定位;图4.7(d)为带衬套支承钉,由于它便于拆卸和更换,一般用于批量大、磨损快、需要经常修理的场合。一个支承钉只限制一个自由度。

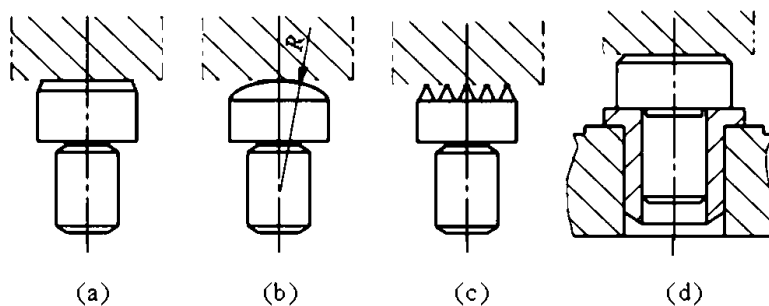


图 4.7 支承钉

(2) 支承板。如图4.8所示,图4.8(a)为平板式支承板,它结构简单、紧凑,但沉头螺钉处积存的切屑不易清除,影响定位精度,多用于侧面和顶面定位;图4.8(b)所示为斜槽式支承板,其上开有排屑槽,可以避免上述缺点,适用于底面定位。一个短支承板限制一个自由

度,一个长支承板限制两个自由度。

工件以已加工过的平面定位时所用的平头支承钉或支承板,一般在安装到夹具体上后,应进行一次最终的精磨加工。支承钉、支承板的结构、尺寸均已标准化,设计时可查有关国家标准手册;也可以根据需要进行设计非标准结构的支承钉和支承板,如圆形支承板等。

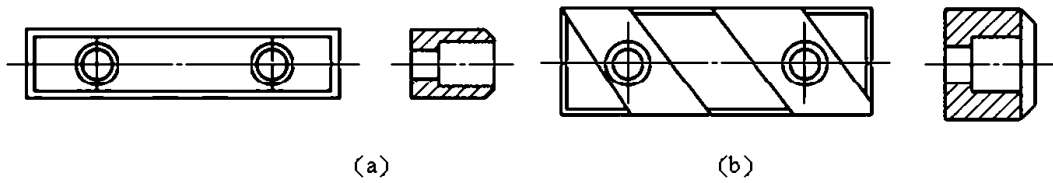


图 4.8 支承板

2) 可调支承

支承钉的高度可以调整的支承,称为可调支承。其典型结构如图 4.9 所示。可调支承的工作位置一经调整好,需用锁紧螺母固定,相当于固定支承。

可调支承常用于粗基准定位,可以适用于定位面的尺寸在一定范围内的变化。

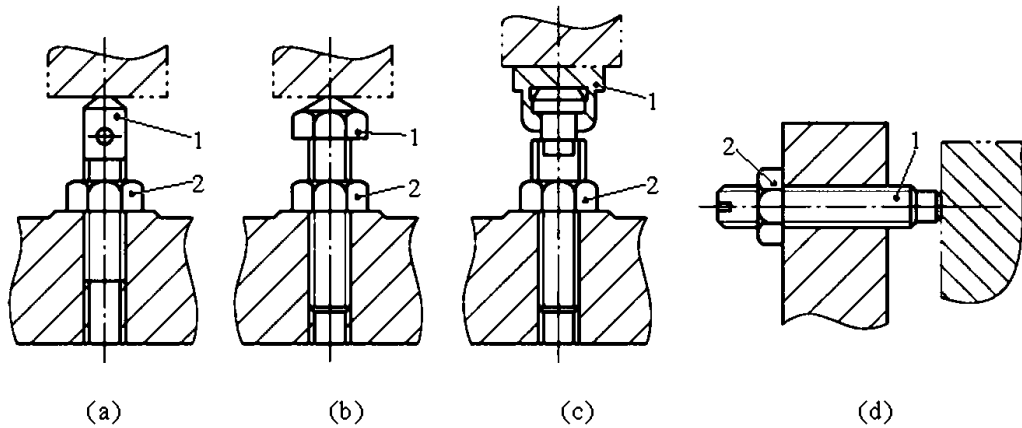


图 4.9 可调支承

3) 浮动支承

工件定位过程中能随着工件定位基准位置的变化而自动调节的支承,称为浮动支承(或自位支承)。

如图 4.10 所示为几种常见的浮动支承。图 4.10(a)是杠杆式浮动支承,绕销轴活动,与工件有两点接触,作用相当于一;图 4.10(b)所示为球面多点式浮动支承,绕球面活动,与工件有多点接触(图中为三点接触),作用相当于一;图 4.10(c)与图 4.10(a)相同,适用于阶梯定位。

浮动支承的工作特点是:支承点的位置能随着工件定位基面位置的变化而自动调节,当定位基面压下其中一点时,其余点便上升,直至各点都与工件接触。与工件作两点、三点(或更多点)接触,作用相当于一个定位支承点,只限制一个自由度,但由于增加了接触点数,提高了工件的安装刚度和定位稳定性。

2. 辅助支承

在夹具中,对工件不起限制自由度作用的支承称为辅助支承。工件因尺寸、形状特征或因局部刚度较差,在切削力或工件自身重力作用下,主要支承定位不稳定或加工部件易产生变形时,可增设辅助支承。

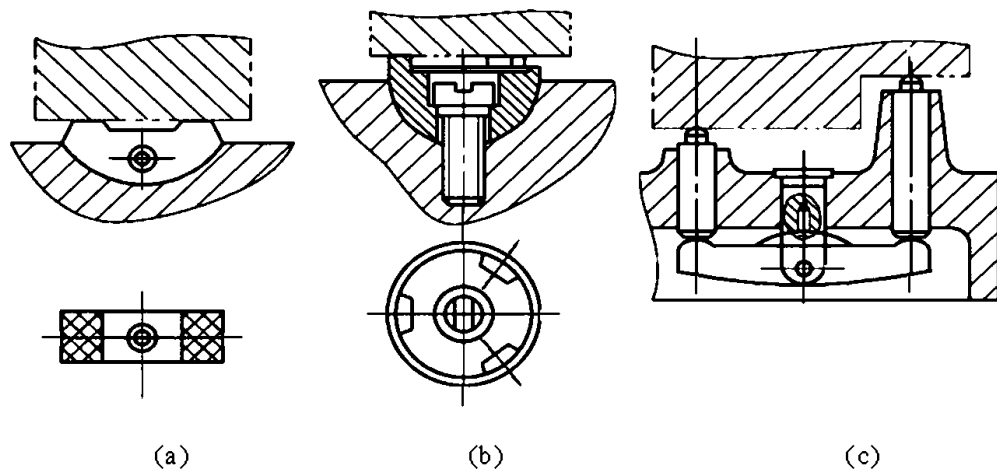


图 4.10 浮动支承

例如,图 4.11 所示为一阶梯形工件,当用平面 1 定位铣平面 2 时,则必须在工件右部底面增加辅助支承 3,以提高其安装刚度和稳定性。常见的辅助支承结构有螺旋式辅助支撑(如图 4.11)、自位式辅助支承和推引式辅助支承(如图 4.12)。螺旋式辅助支撑结构简单,但在转动支承 3 时,有可能因摩擦力矩带动工件而破坏定位。自位式辅助支承如图 4.12(a)所示,支承 1 的高度低于主要支承,当工件放在主要支承上后,支承 1 被工件的定位基面压下,但在弹簧 3 的弹力作用下始终与工件接触,转动手柄 4 可将支承 1 锁紧。推引式辅助支承的结构如图 4.12(b)所示,支承 5 的高度低于主要支承。当工件放在主要支承上后,推动手柄 7 通过楔块 6 的作用使支承 5 与工件定位基面接触,然后锁紧。

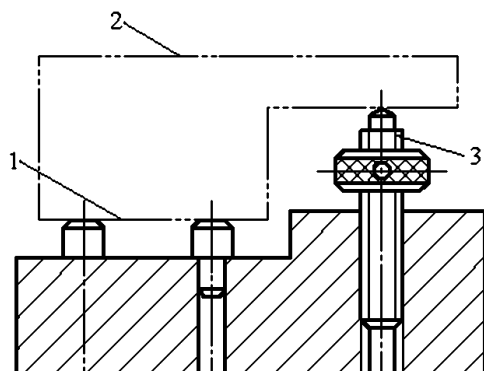


图 4.11 辅助支承的应用实例

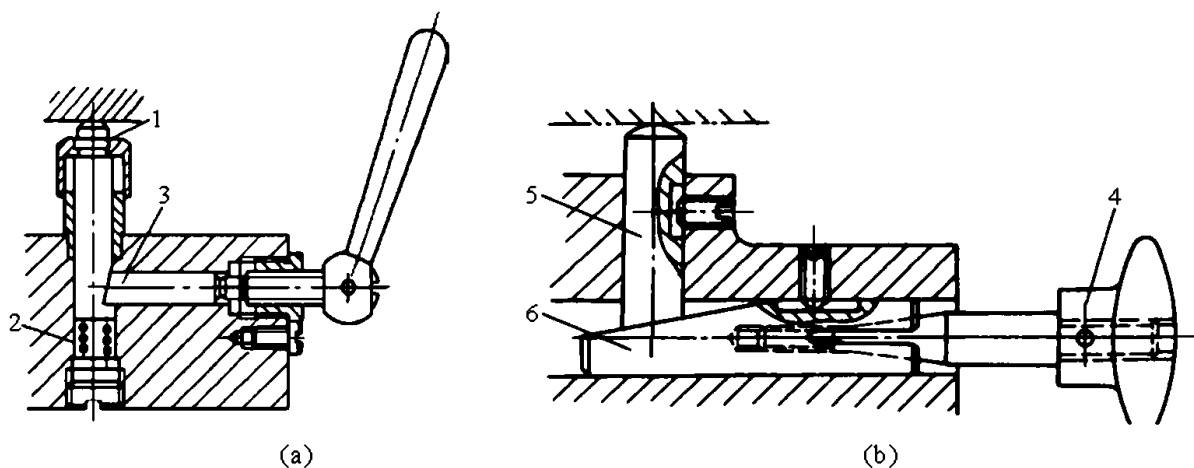


图 4.12 自位式与推引式辅助支承

1、5 支承;2 弹簧;3 顶柱;4 手柄;6 楔块

辅助支承的工作特点是在主要支承对工件定位后才参与支承,不限制工件的自由度。

4.3.2 工件以圆柱孔定位

齿轮、汽缸套、盘类、杠杆类工件的加工,常以圆柱孔(孔的中心线)作为定位基准。常用的定位方式有:在圆柱体上定位;在圆锥体上定位;在定心夹紧机构中定位等。

工件以圆孔为定位基面,常用的定位元件是定位销和定位心轴等。

1. 定位销

1) 圆柱定位销

图 4.13 所示为国家标准规定的常用圆柱定位销的结构。图 4.13(a)、(b)、(c)所示为固定式定位销,定位销与夹具体的连接一般采用过盈配合,直接压配在夹具体上,用于定位元件不经常更换的情况。图 4.13(d)所示为可换式定位销,多用于大批量生产中,当销子磨损后,便于更换而不损坏夹具体。

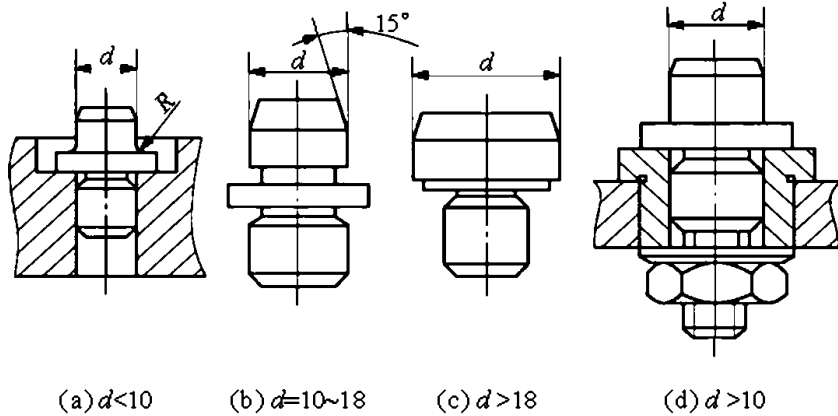


图 4.13 圆柱定位销

定位销工作部分的直径通常根据加工要求和考虑到便于装夹,按 g5、g6、f6、f7 制造。定位销头部均有 15°倒角,以便引导工件套入。短圆柱销限制工件 2 个移动自由度,长圆柱销限制工件 4 个自由度。标准结构定位销属于短定位销。

在固定式和可换式定位销中,有时要求孔销配合只在一个方向上限制工件的移动自由度,这时可使用菱形销。图 4.14 所示为菱形销的标准结构。标准菱形销限制工件的一个移动自由度。

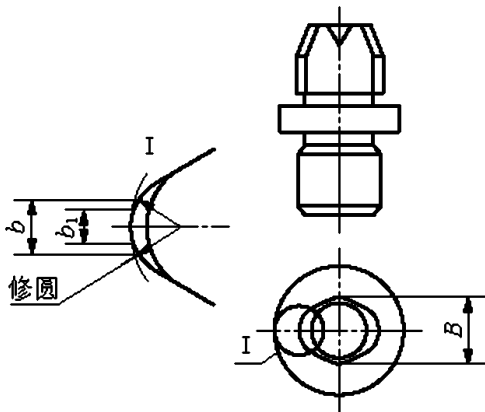


图 4.14 菱形销

2) 圆锥销

在加工套筒、空心轴等类工件时,也经常用到圆锥销。图 4.15 为圆锥销定位的情况,图 4.15(a)用于粗基准,图 4.15(b)用于精基准。工件圆孔与锥销定位,圆孔与锥销的接触是一个圆,限制工件 \bar{X} 、 \bar{Y} 、 \bar{Z} 三个移动自由度。

根据需要可以设计菱形锥销,限制工件两个移动自由度。

工件以圆孔与锥销定位能够实现无间隙配合,但是在单个圆锥销上定位容易倾斜,因此,圆锥销常与其他定位元件组合使用。如图 4.16 所示,工件以底面作为主要定位基面,采用活动圆锥销,只限制 \bar{X} 、 \bar{Y} 两个移动自由度。即使工件的孔径变化较大,也能准确定位,起到较好的定心作用。

2. 定位心轴(或刚性心轴)

套筒类和空心盘类工件的车、铣、磨及齿轮加工中经常采用心轴定位。常见的有圆柱心轴和圆锥心轴等。

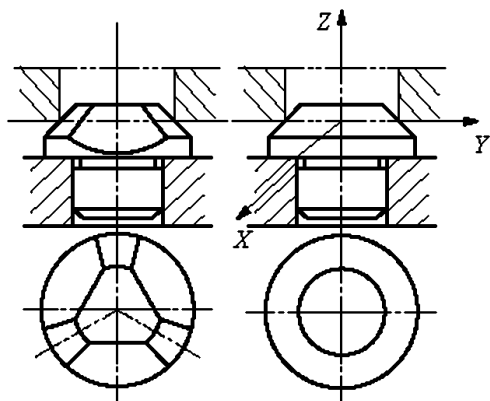


图 4.15 圆锥销

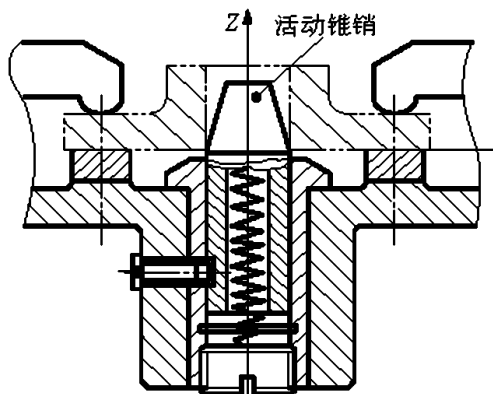


图 4.16 圆锥销组合定位

1) 圆柱心轴

常见结构形式如图 4.17 所示。

图 4.17(a)为间隙配合圆柱心轴,这种心轴结构简单,其定位基面一般按 h6、g6 或 f7 制造,装卸工件方便;但其定心精度不高。图 4.17(b)为过盈配合心轴,多用于定心精度要求高的精加工。图 4.17(c)为花键心轴,心轴用于加工以花键孔定位的工件。当工件孔的长径比 $L/D > 1$ 时,心轴的工作部分可稍带点锥度。

短圆柱心轴限制工件 2 个自由度,长圆柱心轴限制工件的 4 个自由度。

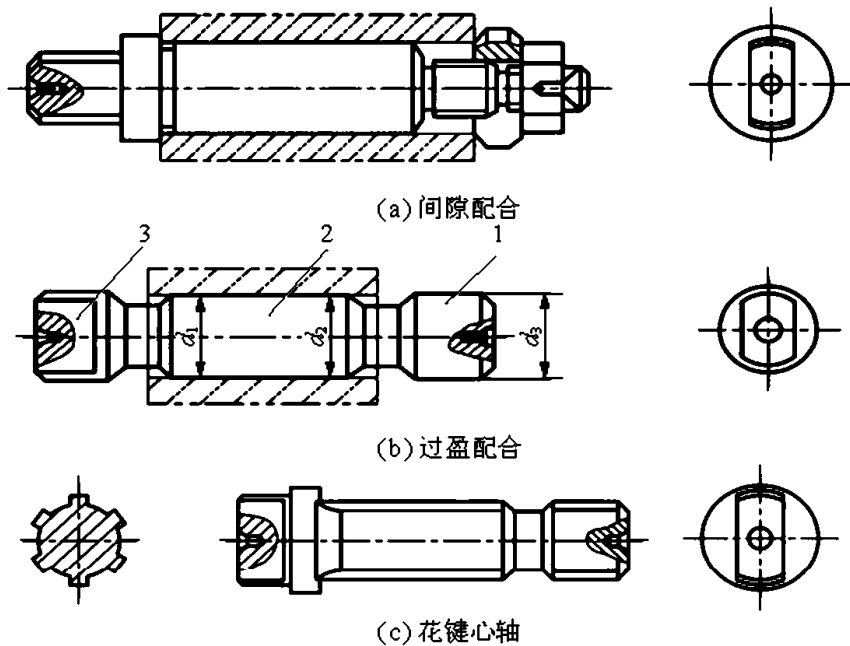


图 4.17 圆柱心轴

2) 圆锥心轴

为了消除工件与心轴的配合间隙,提高定心定位精度,在夹具设计中还可选用如图 4.18 所示的小锥度心轴。为防止工件在心轴上定位时的倾斜,此类心轴的锥度通常取 $K = \frac{1}{5000} \sim \frac{1}{1000}$ 。心轴的长度则根据被定位工件圆孔的长度、孔径尺寸公差和心轴锥度等参数确定。

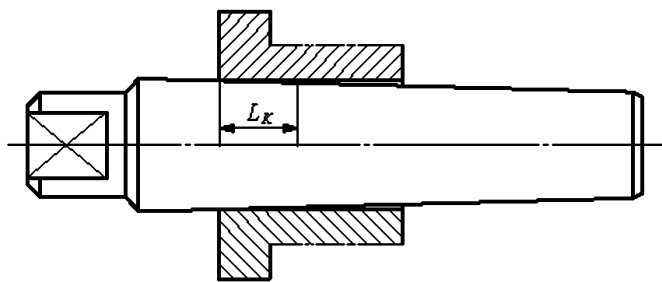


图 4.18 圆锥心轴

这种定位方式的定心精度很高,可达到 $\phi 0.005 \sim \phi 0.01\text{mm}$ 。K 越小,接触长度越大,定心精度越高,但因孔径变化而引起的轴向位置变化也越大,造成加工的不方便。所以适用于工件定位孔精度不低于 IT7 的精车和磨削加工,不能用于加工端面。

此外,心轴定位还有弹性心轴、液塑心轴、定心心轴等,它们在完成工件定位的同时完成工件的夹紧,使用方便,但结构较复杂。

4.3.3 工件以外圆柱面定位

工件以外圆柱面定位有两种方式,一种是支承定位,一种是定心定位。支承定位常以支承钉或支承板作为定位元件;工件以外圆柱面定心定位时,常用的定位元件有 V 形块、定位套、圆锥套、半圆套、支承板以及自动定心机构(如三爪卡盘、弹簧夹头)等。

1. 定位套

图 4.19 为几种常用的定位套结构。图 4.19(a)为短定位套定位,限制工件 2 个自由度;图 4.19(b)为长定位套定位,限制工件 4 个自由度;图 4.19(c)为锥面定位套,和锥面销对工件圆孔定位一样限制 3 个自由度。定位套结构简单、制造容易,但定心精度不高,一般适用于精基准定位。

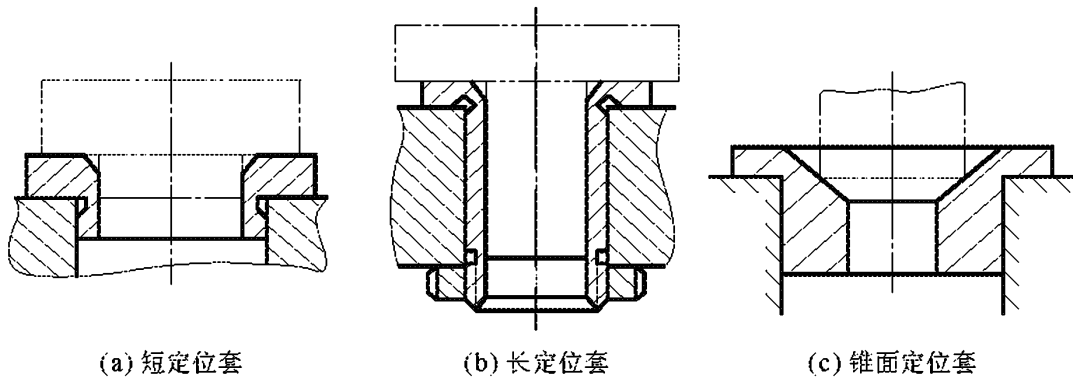


图 4.19 工件以定位套定位

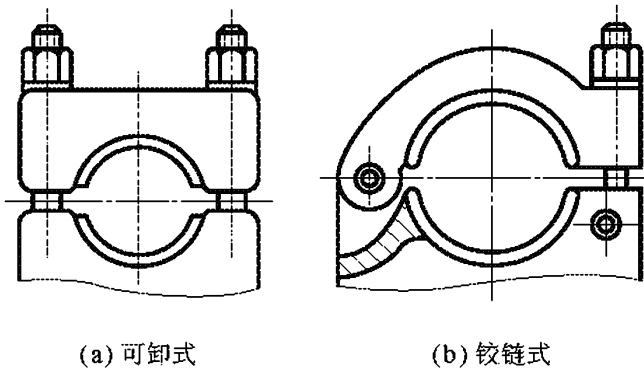


图 4.20 半圆套结构简图

2. 半圆套

图 4.20 为半圆套结构简图,下半圆套是定位元件,上半圆套起夹紧作用。图 4.20(a)为可卸式,图 4.20(b)为铰链式,装卸工件方便。短半圆套限制工件 2 个自由度,长半圆套限制工件 4 个自由度。这种定位方式主要用于大型轴类零件及不便于轴向装夹的零件。定位基面的精度不低于 IT8~IT9,半圆套的最小内径应取工件定位基面的最大直径。

3. V 形块

图 4.21 所示为几种常用的 V 形块。图 4.21(a)用于较短的外圆柱表面精基准定位;图 4.21(b)用于较长的粗基准或阶梯轴定位;图 4.21(c)用于两段精基准面相距较远的工件定

位;图 4.21(d)用于工件较长、直径较大的重型工件,这种 V 形架一般做成在铸铁底座上镶淬硬支承板或硬质合金板的结构形式。窄 V 形块定位限制工件的两个移动自由度;宽 V 形块或两个窄 V 形块组合定位,则限制工件的两个移动自由度和两个转动自由度。V 形块有固定和活动之分,活动式 V 形块在可移动方向上对工件不起定位作用。

V 形块两斜面间夹角 α 常取 60° 、 90° 、 120° ,其中以 90° 的 V 形块应用最多。 90° V 形块的典型结构和尺寸均已标准化,如图 4.22 所示,设计时可查有关国家标准手册。

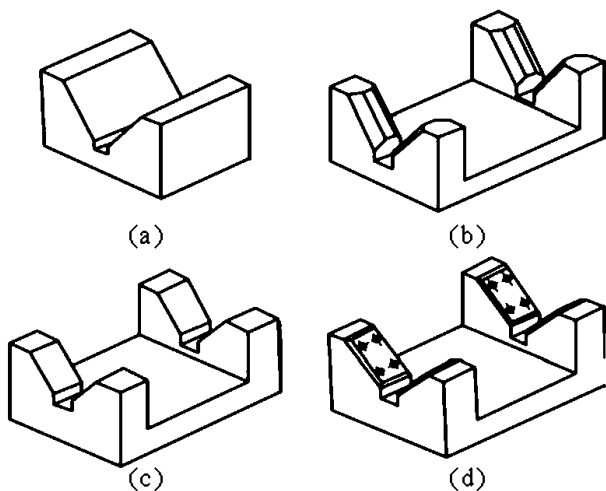


图 4.21 常见 V 形块的结构形状

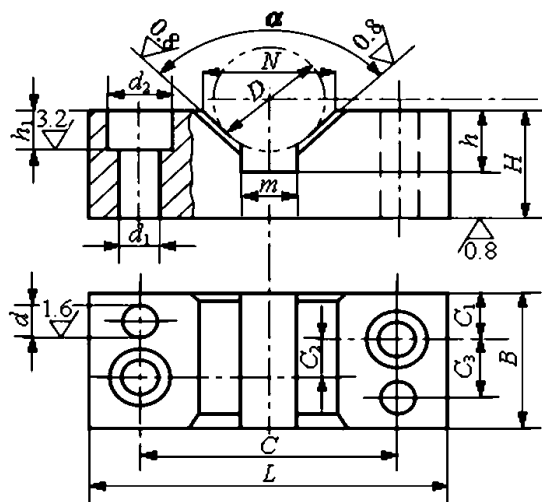


图 4.22 V 形块的结构

V 形块的优点是:

(1) 对中性好,可以实现对外圆表面的定心对中定位,使工件的定位基准轴线保持在 V 形块两斜面的对称平面上,而且不受工件直径误差的影响,安装方便。

(2) 它既适用于完整外圆,也适用于非完整外圆及局部曲线柱面定位,还能与其他定位元件组合使用,因此应用广泛。

图 4.23 为活动 V 形块的实例。活动 V 形块限制工件一个自由度,它除定位外还兼有夹紧作用。

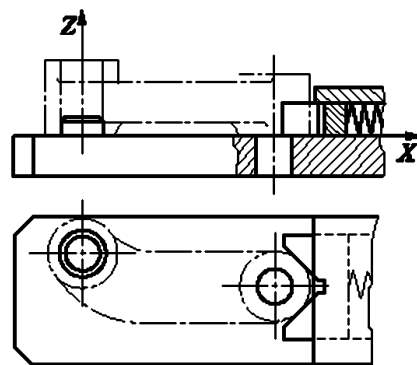


图 4.23 活动 V 形块的应用

4.3.4 工件以组合表面定位

实际生产中,工件往往不是采用单一表面的定位,而常常是以一组表面作为定位基准,采用组合定位方式。其中常见的方式有平面与平面组合、孔与平面组合、锥面与锥面组合等。

例如,在加工箱体、支架类零件时,常用工件的一面两孔作为定位基准。此时,工件上的孔可以是专门为工艺的定位需要而加工的工艺孔,也可以是工件上原有的孔。采用的定位元件是一块支承板和两个定位短销,定位方式简单,夹紧方便,是机械加工过程中最常用的定位方式之一。

1. 一面两孔组合定位时要解决的主要问题

一面两孔定位需要解决的主要问题是:在保证工件加工精度的条件下,使工件两孔能够顺利地套在两定位销上。如图 4.24 所示,由于平面限制工件的 \vec{Z} 、 \hat{X} 、 \hat{Y} 三个自由度,第一

个短圆柱定位销限制工件的 \vec{X} 、 \vec{Y} 两个自由度。第二个短圆柱定位销限制工件的 \vec{X} 、 \vec{Z} 两个自由度。因此， \vec{X} 自由度就被重复限制了，显然出现了过定位，所以有可能会使同一批工件中的部分工件两孔无法套在两定位销上，如图 4.24(a)所示，无法进行正确的定位。

为了避免由于过定位引起的工件安装时的干涉，可以采取以下措施：

减小孔 2 定位销[图 4.24(a)]的直径 d_2 。采用这种方法可使孔与销之间的间隙增大，用以补偿中心距的误差，实现工件的顺利装卸。但是增加了工件的转动误差，影响定位精度，因此只有在工件加工精度不高时才使用这种方法。

采用削边销，沿垂直于两孔中心的连线方向削边，通常把削边销[图 4.24(b)中的短削边销 3]做成菱形销提高其强度。由于这种方法只增大连心线方向的间隙，不增加工件的转动误差，因而定位精度较高，在生产中获得广泛应用。

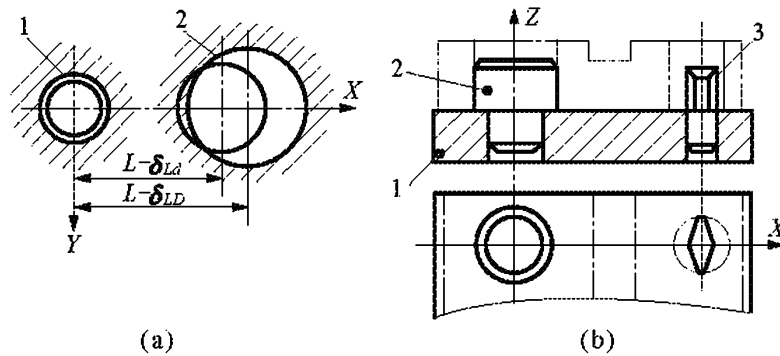


图 4.24 一面两孔组合定位情况

1 平面; 2 短圆柱销; 3 短削边销

2. 一面两孔定位装置的设计计算

(1) 确定两销中心距尺寸及其公差。

两销中心距的基本尺寸等于两孔中心距的基本尺寸(两孔中心距应转化为对称标注)。

两销中心距的偏差一般取两孔中心距偏差的 $\frac{1}{5} \sim \frac{1}{3}$ ，当孔距公差大时，取小值；反之，取大值，以便于制造。

(2) 确定圆柱定位销直径尺寸 d_1 及其公差。

取相应孔的最小直径作为圆柱销直径的基本尺寸，定位销的直径公差一般按 g6、f7 选取， $d_1 = D_{1\min}g6(f7)$ ，最后应对销尺寸进行圆整处理。

(3) 确定菱形销宽度 b 及其公差和 B 值。

菱形销的尺寸已标准化，可以通过计算或按照有关标准(见表 4-1)，由孔直径 D_2 选取菱形销的宽度 b (对于修圆菱形销按 b_1 选取)和尺寸 B (参见图 4.14)。

(4) 计算菱形销直径的基本尺寸 d_2 。

首先按下式计算孔 2 与销 2 的最小配合间隙 $\Delta_{2\min}$ ，再计算菱形销直径的基本尺寸 d_2 ，并按 h6 或 h7 确定菱形销直径公差：

$$\Delta_{2\min} = \frac{2b(\delta_{LD} + \delta_{Ld})}{D_2} \quad (4-1)$$

$$d_2 = D_2 - \Delta_{2\min} \quad (4-2)$$

定位精度要求较高时,可按 h5 制造。

表 4-1 菱形销的结构尺寸

(单位:mm)

D_2	>3~6	>6~8	>8~20	>20~25	>25~32	>32~40	>40~50
B	$d-0.5$	$d-1$	$d-2$	$d-3$	$d-4$	$d-5$	$d-5$
b_1	1	2	3	3	3	4	5
b	2	3	4	5	5	6	8

4.4 定位误差的分析与计算

定位误差是由于工件在夹具上(或机床上)定位不准确而引起的加工误差。对一批工件来说,刀具经调整后位置是不动的,即被加工表面的位置相对于定位基准是不变的,所以同一批工件的工序基准在加工尺寸或位置要求方向上的最大变动量,就是定位误差,用 Δ_D 表示。计算定位误差的目的就是要判断定位精度,看定位方案能否保证加工要求。为了保证加工质量,定位误差与加工精度一般应满足下列关系:

$$\Delta_D \leq \left(\frac{1}{3} \sim \frac{1}{5} \right) T \quad (4-3)$$

式中, T ——工件的工序尺寸公差或位置公差。

4.4.1 定位误差产生的原因及计算方法

1. 产生定位误差的原因及组成

1) 基准不重合误差

由于定位基准与工序基准不一致所引起的定位误差,称基准不重合误差,即工序基准相对定位基准在加工尺寸方向上的最大变动量,以 Δ_B 表示。

如图 4.25 所示,图 4.25(a)是在工件上铣缺口的工序简图,加工尺寸为 A 和 B 。图 4.25(b)是加工示意图,工件以底面和 E 面定位。 C 是确定夹具与刀具相互位置的对刀尺寸,在一批工件的加工过程中, C 的大小是不变的。加工尺寸 A 的工序基准是 F ,定位基准是 E ,两者不重合。当一批工件逐个在夹具上定位时,受尺寸 $S \pm \frac{\delta_S}{2}$ 的影响,工序基准 F 的位置是变动的。 F 的变动直接影响 A 的大小,造成 A 的尺寸误差,这个误差就是基准不重合误差,用 Δ_B 表示。显然,这是因定位基准与工序基准不重合所产生的误差,其大小等于定位基准与工序基准之间的尺寸公差。由图 4.25(b)可知: S 是定位基准 E 与工序基准 F 间的距离尺寸(称为定位尺寸),基准不重合误差为:

$$\Delta_B = A_{\max} - A_{\min} = S_{\max} - S_{\min} = \delta_S$$

需要注意的是当定位基准与工序基准不重合,并且工序基准的变动方向与加工尺寸的方向不一致,存在一夹角 α 时,基准不重合误差等于定位尺寸的公差在加工尺寸方向上的投影,即 $\Delta_B = \delta_S \cos \alpha$ 。

在图 4.25 中,加工尺寸 B 的工序基准与定位基准均为底面,基准重合,所以 $\Delta_B = 0$ 。

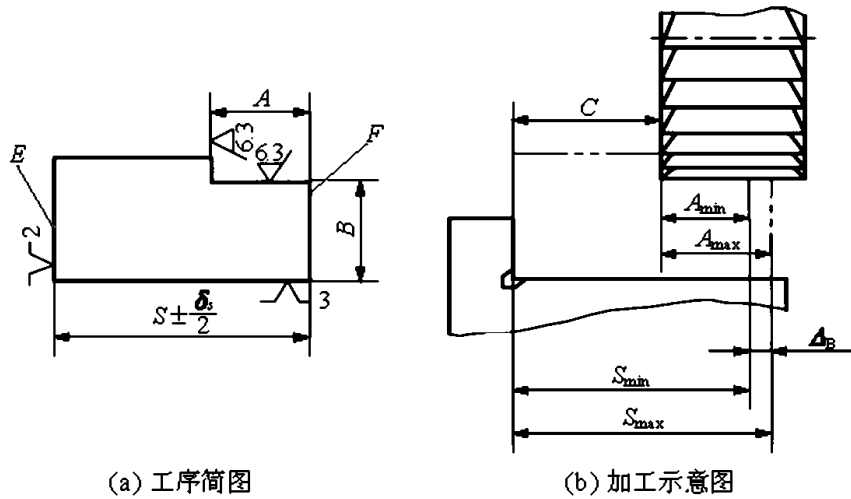


图 4.25 基准不重合误差

2) 基准位移误差

由于定位副制造不准确及其配合间隙所引起的定位误差,称基准位移误差,即定位基准的相对位置在加工尺寸方向上的最大变动量,以 Δ_w 表示。

如图 4.26 所示,图 4.26(a)是在工件的圆柱面上铣槽的工序简图,加工尺寸为 A 和 B 。图 4.26(b)是加工示意图,工件以孔 D 在水平心轴上定位, O 是心轴中心, C 是对刀尺寸。在加工尺寸中,尺寸 A 是由工件相对于刀具的位置决定的。尺寸 A 的工序基准是内孔轴线,定位基准也是内孔轴线,两者重合,所以 $\Delta_B = 0$ 。但是,由于工件的定位孔与心轴的圆柱面制造误差及两者间隙配合的原因,工件孔在心轴上定位时因自重的影响,使工件的定位基准(孔的轴线)下移,这种定位基准的位置变动影响到加工尺寸 A 的大小,给尺寸 A 造成误差,这个误差就是基准位移误差,用 Δ_w 表示。 Δ_w 的大小等于因定位基准的变动造成的加工尺寸变化的最大变动量 δ_i 。

由图 4.26 可知,
$$\Delta_w = A_{max} - A_{min} = i_{max} - i_{min} = \delta_i$$

式中, i 定位基准的位移量。

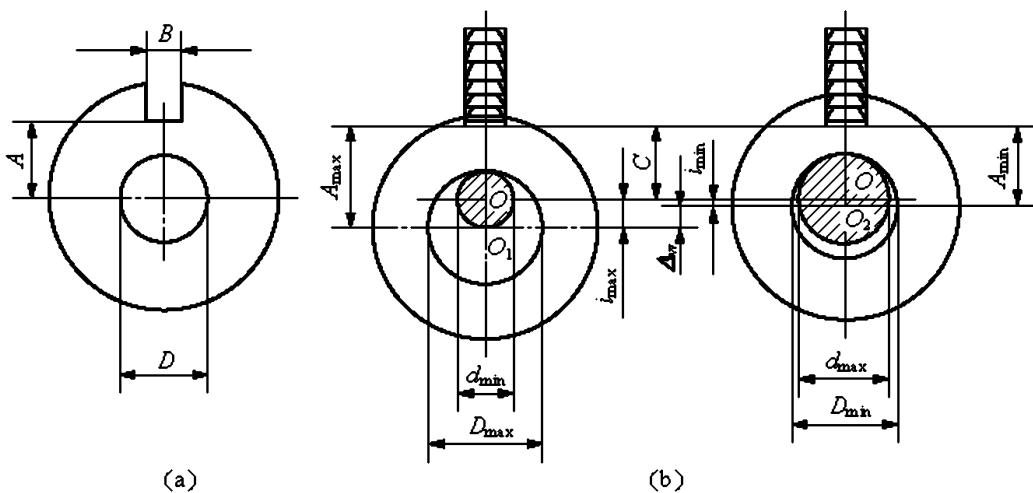


图 4.26 基准位移误差

应当注意:

(1) 当定位基准的变动方向与加工尺寸的方向相同时,基准位移误差等于定位基准的最大变动范围,即 $\Delta_w = \delta_i$ 。

(2) 当定位基准的变动方向与加工尺寸方向不同时,基准位移误差等于定位基准的最大变动范围在加工尺寸方向上的投影,即 $\Delta_w = \delta_i \cos \alpha$ 。 α 为定位基准的变动方向与工序尺寸方向间的夹角。

由实例分析可以进一步明确,定位误差是指一批工件在用调整法加工时,仅仅由于定位不准确而引起工序尺寸或位置要求的最大可能变动范围。

2. 定位误差的计算方法

常用的定位误差计算方法有以下几种。

1) 合成法

定位误差是由基准不重合误差与基准位移误差两部分误差组成的。因此,计算时可以先根据定位方法分别计算出基准不重合误差 Δ_B 和基准位移误差 Δ_w ,然后将两者合成定位误差 Δ_D ,即

$$\Delta_D = \Delta_B \cos \beta \pm \Delta_w \cos \gamma \quad (4-4)$$

式中, β —— Δ_B 与工序尺寸(或位置要求)方向的夹角;

γ —— Δ_w 与工序尺寸(或位置要求)方向的夹角。

若工序基准不在定位基面上,取“+”号。若工序基准在定位基面上,在定位基面尺寸变动方向一定的条件下,当 Δ_B 与 Δ_w 变动方向相同,即对工序尺寸影响相同时,取“+”号;当二者变动方向相反,即对工序尺寸影响相反时,取“-”号。

2) 极限位置法

根据定位误差的定义,直接计算出一批工件的工序基准在工序尺寸方向上的相对位置最大位移量,即工序尺寸的最大变动范围。在具体计算时,通常要画出工件的定位简图,并在图中画出工序基准变动的两个极限位置,然后直接按照几何关系求出工序尺寸的最大变动范围,即为定位误差。

3) 微分法(尺寸链分析计算法)

此法对包含多误差因素的复杂定位方案的定位误差分析计算比较方便,应用时可查有关资料。

从上面分析可知,分析计算定位误差的关键,在于找出同一批工件的工序基准在工序尺寸方向上可能的最大位移变动量。定位误差只发生在采用调整法加工一批工件的条件下,如果一批工件逐个按试切法加工,则不存在定位误差。

下面讨论常见定位方法的定位误差分析与计算。

4.4.2 几种典型表面定位时的定位误差

1. 工件以平面定位时的定位误差

(1) 工件以粗基准定位时,只能用3个球头支承钉实现三点定位,消除工件的3个自由度。若一批工件的定位状况相差较大,如平面度误差为 Δ_H ,则定位误差 $\Delta_D = \Delta_w = \Delta_H$ 。

(2) 工件精基准定位时,由于定位基准面本身的形状精度较高,故可采用平头支承钉、支承板等定位元件消除工件的三个自由度。此时,平面度误差很小,通常可以不计,即定位误差为 $\Delta_D = \Delta_w = 0$ 。

【例 4.1】 如图 4.25 所示,当工件以已加工过的底面和 E 面定位时,求工序尺寸 A 的定位误差。

解:用合成法求工序尺寸 A 的定位误差。由于用已加工过的平面定位, $\Delta_w = 0$ 。

定位基准 E 与工序基准 F 不重合,基准尺寸为 $S + \frac{\delta_S}{2}$,所以基准不重合误差为

$$\Delta_B = \delta_S$$

工序尺寸 A 的定位误差为

$$\Delta_D(A) = \Delta_B + \Delta_w = \delta_S$$

2. 工件以圆柱孔定位时的定位误差

工件以圆柱孔定位时,定位基准是内孔中心线。其可能产生的定位误差将随定位方式和定位时圆孔与定位元件配合性质的不同而各不相同,现分别进行分析和计算。

1) 工件孔与定位心轴(或定位销)过盈配合定位

用定心机构定位(如弹性心轴)或用过盈配合定位心轴(圆柱定位销)定位时,可以实现无间隙配合,基准位移误差 $\Delta_w = 0$ 。如图 4.27 所示。

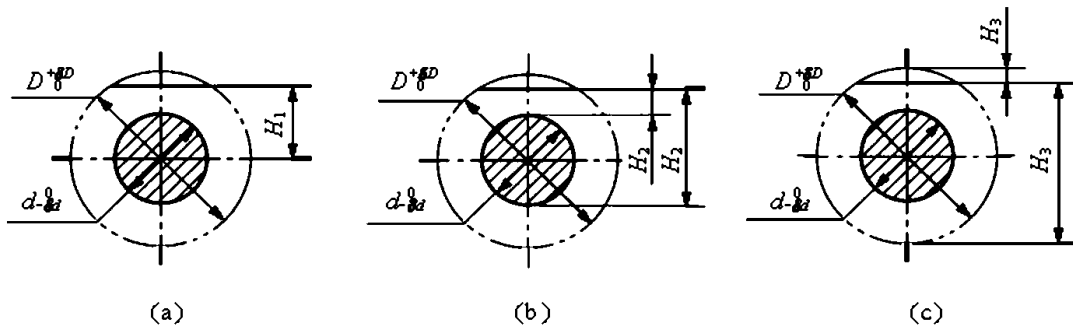


图 4.27 工件以圆柱孔在过盈配合心轴上定位时定位误差分析

若工序基准与定位基准重合,如图 4.27(a)中的工序尺寸 H_1 ,则定位误差为

$$\Delta_D = \Delta_B + \Delta_w = 0 \tag{4-5}$$

若工序基准在工件定位孔的母线上,如图 4.27(b)中的 H_2 尺寸,则定位误差为

$$\Delta_D = \Delta_B + \Delta_w = \Delta_B = \frac{\delta_d}{2} \tag{4-6}$$

若工序基准在工件外圆母线上,如图 4.27(c)中的 H_3 尺寸,则定位误差为

$$\Delta_D = \Delta_B + \Delta_w = \Delta_B = \frac{\delta_D}{2} \tag{4-7}$$

2) 工件孔与定位心轴(或定位销)间隙配合定位

用间隙配合定位心轴(或圆柱定位销)定位时,由于定位基面和定位元件的制造公差及配合间隙的存在,将产生基准位移误差 Δ_w 。此时孔与轴的接触有两种情况:

(1) 孔与定位心轴任意边接触。

设孔与轴配合基本尺寸为 D ;孔的极限尺寸为 D_{max} 、 D_{min} ,公差为 δ_D ;轴的极限尺寸为 d_{max} 、 d_{min} ,公差为 δ_d 。

如图 4.28 所示,当孔的尺寸为 D_{max} ,心轴尺寸为 d_{min} 时,定位基准的变动量最大,等于孔轴的最大配合间隙 X_{max} ,基准位移误差为

$$\Delta_w = X_{max} = \delta_D + \delta_d + X_{min} \tag{4-8}$$

【例 4.2】 如图 4.29 所示,工件以孔 $\phi 60_{0}^{+0.15}$ mm 定位,加工孔 $\phi 10_{0}^{+0.1}$ mm,定位销直径为 $\phi 60_{-0.03}^{0}$ mm,要求保证尺寸 40 ± 0.10 mm,计算定位误差。

解:定位基准与工序基准重合, $\Delta_B = 0$, 则

$$\Delta_W = \delta_D + \delta_d + X_{\min} = 0.15 \text{ mm} + 0.03 \text{ mm} + 0.03 \text{ mm} = 0.21 \text{ mm}$$

所以

$$\Delta_D = \Delta_B + \Delta_W = 0.21 \text{ mm}$$

经过分析和计算,定位误差已经超过工序尺寸公差 $1/3$,故需要改变定位方案。

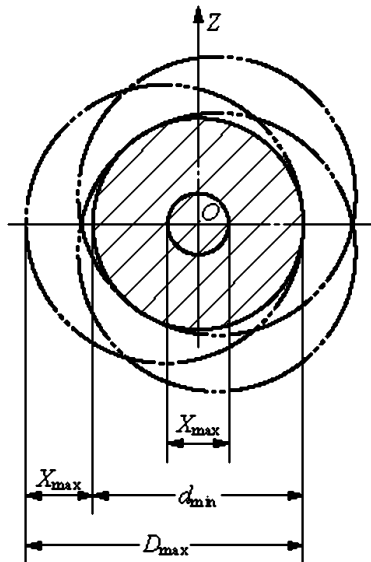


图 4.28 孔与定位心轴任意边接触时基准位移误差

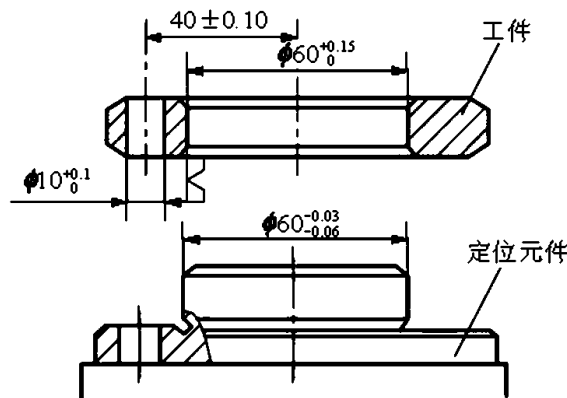


图 4.29 定位误差的计算

(2) 孔与定位心轴固定边接触。

如图 4.26 所示的情况,当定位销直径为 d_{\min} ,工件孔径为 D_{\max} 时,定位基准位于 O_1 。此时定位基准的位移量最大: $i_{\max} = \frac{D_{\max} - d_{\min}}{2}$; 当定位销直径为 d_{\max} ,工件孔径为 D_{\min} 时,定位基准为 O_2 ,此时定位基准的位移量最小: $i_{\min} = \frac{D_{\min} - d_{\max}}{2}$ 。基准位移误差为定位基准的最大变动量 $\delta_i = i_{\max} - i_{\min} = \frac{\delta_D - \delta_d}{2}$, 即

$$\Delta_W = \frac{\delta_D - \delta_d}{2} \quad (4-9)$$

3. 工件以外圆柱面定位时的定位误差

下面主要分析外圆柱面在 V 形块上定位的情形。如图 4.30(a) 所示,工件以外圆柱面在 V 形块上定位铣槽。定位基准是外圆柱面的中心线,外圆柱面是定位基面。若不考虑 V 形块的制造误差,则工件定位基准在 V 形块的对称面上,因此工件中心线在水平方向上的位移为零。但在垂直方向上,因工件外圆柱面有制造误差 δ_d ,而产生基准位移误差 Δ_W 。

设 O 是定位基准的理想状态,由于工件外圆柱面 d 的制造误差 δ_d 的存在, O 在 O_1 、 O_2 之间变动。定位基准的最大变动量 O_1O_2 为基准位移误差。由图示几何关系可得:

$$\Delta_W = O_1O_2 = \frac{O_1M - O_2N}{\sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\frac{1}{2}d - \frac{1}{2}(d - \delta_d)}{\sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\delta_d}{\sin \frac{\alpha}{2}} \quad (4-10)$$

式中, δ_d 工件定位外圆柱面的直径公差;
 α V形块的夹角。

图 4.30(b)、(c)、(d)所示为工件槽深的 3 种不同工序尺寸标注情况,现分别分析计算其定位误差。

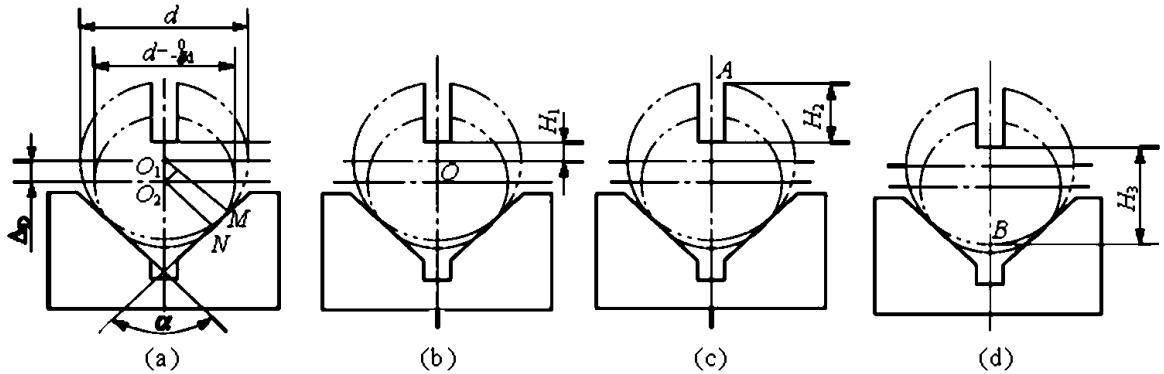


图 4.30 工件在 V 形块上定位时的误差分析

(1) 图 4.30(b)中,工序基准为外圆柱面的中心线,工序尺寸为 H_1 ,工序基准与定位基准重合,因此 $\Delta_B = 0$,只有基准位移误差,故影响工序尺寸 H_1 的定位误差为

$$\Delta_D = \Delta_w = \frac{\delta_d}{\sin \frac{\alpha}{2}} \quad (4-11)$$

(2) 图 4.30(c)中,工序基准为圆柱面的上母线 A,工序尺寸为 H_2 。此时,工序基准与定位基准不重合,其误差为 $\Delta_B = \frac{\delta_d}{2}$,基准位移误差 Δ_w 同上。当工件直径尺寸减小时,工件定位基准将下移;当工件定位基准位置不变时,若工件直径尺寸减小,则工序基准 A 下移,两者变化方向相同,故定位误差为

$$\Delta_D = \Delta_w + \Delta_B = \frac{\delta_d}{\sin \frac{\alpha}{2}} + \frac{\delta_d}{2} \quad (4-12)$$

(3) 图 4.30(d)中,工序基准为圆柱面的下母线 B,工序尺寸为 H_3 。当工件直径尺寸减小时,定位基准将下移,但是,当工件定位基准位置不变时,若工件直径尺寸减小,工序基准将上移,两者变化方向相反,故定位误差为

$$\Delta_D = \Delta_w - \Delta_B = \frac{\delta_d}{\sin \frac{\alpha}{2}} - \frac{\delta_d}{2} \quad (4-13)$$

可以看出,当以工件下母线为工序基准时,定位误差最小,而以工件上母线为工序基准时定位误差最大,所以图 4.30(d)所示尺寸标注方法最好。另外,随 V 形块夹角 α 的增大,定位误差 Δ_D 减小,但夹角过大时,将引起工件定位不稳定,故一般多采用 90° 的 V 形块。

4. 工件以组合表面定位时的定位误差

工件以多个表面组合定位时,工序基准的位置与多个定位基准有关。下面以一面两孔定位为例,介绍组合定位时定位误差的分析计算方法。

工件以一面两孔在一面两销上定位时,其中一为圆柱销,另一为菱形销。其定位误差包

括位移误差和转角误差两部分。如图 4.31 所示,由于孔 O_1 与圆柱销存在最大配合间隙 $\Delta_{1\max}$,孔 O_2 与菱形销存在最大配合间隙 $\Delta_{2\max}$,因此产生基准位置(位移和转角)误差。

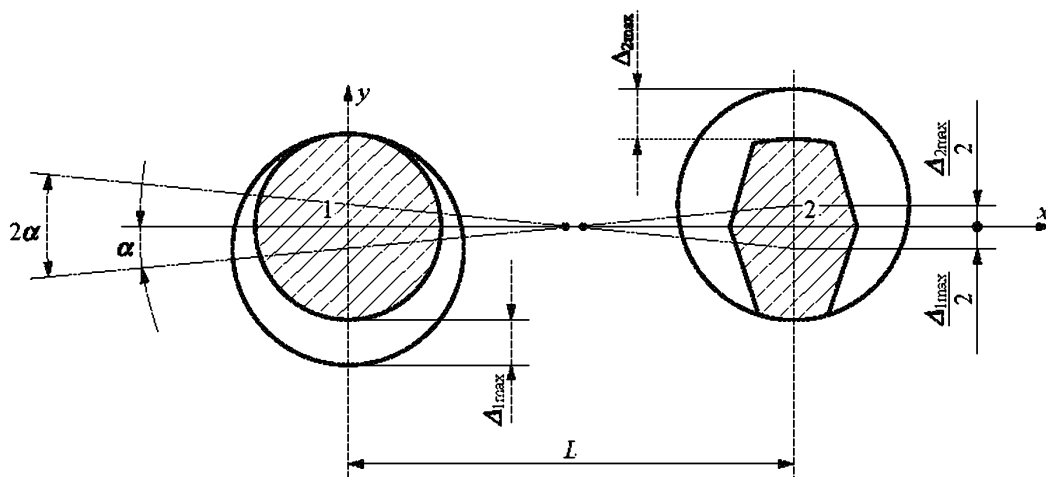


图 4.31 一面两孔定位的基准位移误差和基准转角误差

(1) 孔 1 中心 O_1 的基准位移误差。在任何方向上均为

$$\Delta_w(O_1) = \Delta_{1\max} = \delta_{D1} + \delta_{d1} + \Delta_{1\min} \quad (4-14)$$

式中, δ_{D1} 、 δ_{d1} 分别为定位孔 1、圆柱销 1 直径上的公差; $\Delta_{1\min}$ 为孔 1 与定位销 1 之间的最小间隙。

(2) 孔 2 中心 O_2 的基准位移误差。孔 2 在两孔连线 X 方向上不起定位作用,所以在该方向上不计基准位移误差。在垂直于两孔连线方向 Y 上存在最大配合间隙 $\Delta_{2\max}$,产生的基准位移误差为

$$\Delta_w(O_{2y}) = \Delta_{2\max} = \delta_{D2} + \delta_{d2} + \Delta_{2\min} \quad (4-15)$$

式中, δ_{D2} 、 δ_{d2} 分别为定位孔 2、削边销 2 直径上的公差; $\Delta_{2\min}$ 为孔 2 与削边销之间在 Y 方向上的最小间隙。

(3) 转角误差。由于 $\Delta_{1\max}$ 和 $\Delta_{2\max}$ 的存在,在水平面内,两孔连线 O_1O_2 产生基准转角误差。从图 3.1 中可知,转角误差为

$$\alpha = \arctan^1 \frac{\delta_{D1} + \delta_{d1} + \Delta_{1\min} + \delta_{D2} + \delta_{d2} + \Delta_{2\min}}{2L} = \arctan \frac{\Delta_{1\max} + \Delta_{2\max}}{2L} \quad (4-16)$$

考虑到工件可能向另一方向偏转,故全部转角定位误差应为 2α 。

将所求得的相关基准位移和基准转角误差,按照最不利的情况,反映到工序尺寸方向上,就是基准位置误差引起工序尺寸的定位误差。

4.5 工件在夹具中的夹紧

工件在机床或夹具中定位后,还应采用一定的机构将它压紧夹牢,以保证在加工过程中工件不会因受切削力、惯性力和重力等外力作用而产生位移或振动。这种把工件压紧夹牢的装置称为夹紧装置。

4.5.1 夹紧装置的组成及基本要求

1. 夹紧装置的组成

一般夹紧装置由力源装置、中间传力机构和夹紧元件三部分组成,如图 4.32 所示。

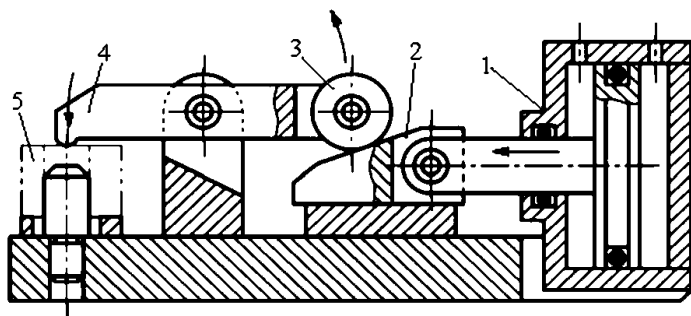


图 4.32 夹紧装置组成示例

1 气缸;2 斜楔;3 滚子;4 压板;5 工件

(1) 力源装置。其用于产生夹紧力。常用的力源装置有:液压装置、气压装置、电磁装置、电动装置、气液联动装置和真空装置等。图 4.32 中的气缸 1 便是力源装置。具有力源装置的夹具为机动夹具;以人力为动力的夹具是手动夹具,它无力源装置。

(2) 中间传力机构。即在力源装置和夹紧元件之间,传递夹紧力的机构,如图

4.32 中的斜楔 2。其主要作用是:①改变作用力的方向和大小;②具有一定的自锁性能。

(3) 夹紧元件。是实现夹紧的最终执行元件,通过它和工件直接接触而完成夹紧任务。如图 4.32 中的压板 4。

2. 对夹紧装置的基本要求

(1) 在夹紧过程中应能够保持工件在定位时已获得的正确位置。

(2) 夹紧应可靠,夹紧力大小应适当。既要保证在加工过程中工件不会产生松动或振动,同时又不许工件产生不适当的变形和表面损伤。

(3) 夹紧机构应操作方便、安全省力,夹紧动作要准确迅速,以便减轻劳动强度,缩短辅助时间,提高生产效率。

(4) 夹紧机构的复杂程度和自动化程度应与工件的生产批量和生产方式相适应。工件的生产批量越大,设计的夹紧装置的功能应越完善,工作效率越高,进而越复杂。

(5) 结构设计应具有良好的工艺性和经济性,结构力求简单、紧凑和刚性好。

4.5.2 夹紧力的确定

在夹紧机构的设计中,首先要解决的问题是夹紧力的确定。夹紧力包括大小、方向和作用点三个要素,下面分别予以讨论。

1. 夹紧力的方向

1) 夹紧力的作用方向应不破坏工件定位的准确性和可靠性

在夹紧力的作用下,工件不应离开支承点。首先要保证主要定位基准与定位元件可靠接触,最好是使工件对各定位支承都有一定的压力。为此,一般要求主要夹紧力的方向应指向主要定位基准面,如图 4.33 所示。

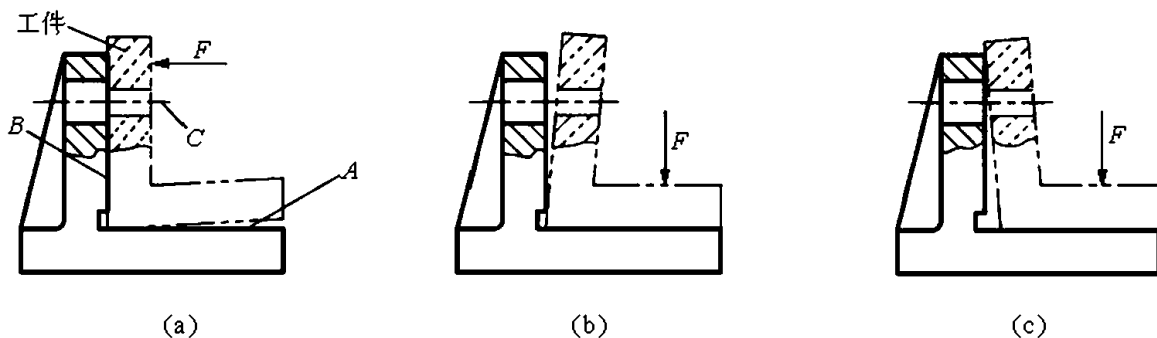


图 4.33 夹紧力方向指向主要定位基准面

又如图 4.34(a) 所示, 夹紧力 F 的垂直分力背向限位基面, 而可能会使工件翻转。图 4.34(b) 中夹紧力的两个分力分别指向两限位基面, 将有助于定位稳定。

2) 夹紧力的方向应与工件刚度最大的方向一致, 以减小工件变形

由于工件在不同方向上刚度是不等的, 不同的受力表面也因其接触面积大小而变形各异。尤其在夹压薄壁零件时, 更需注意。

如图 4.35 所示的薄壁套筒工件, 它的轴向刚度比径向刚度大, 应沿轴向均匀施加夹紧力。若用图 4.35(a) 所示的三爪卡盘将薄壁套筒径向夹紧, 将会引起较大的变形, 若采用如图 4.35(b) 所示的特制螺母轴向夹紧, 则不容易产生变形。

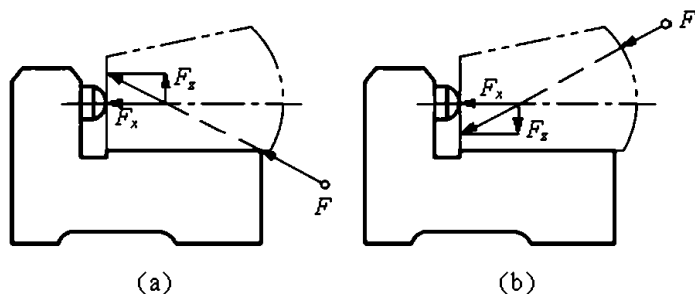


图 4.34 夹紧力方向应有助于定位稳定

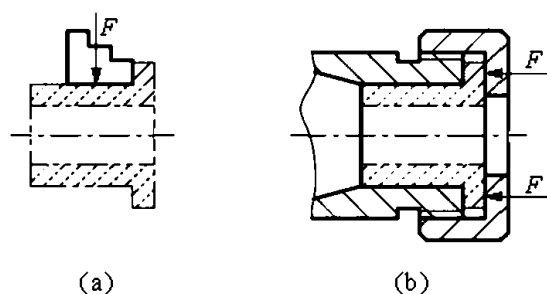


图 4.35 薄壁套筒工件的夹紧

3) 夹紧力方向应使所需夹紧力尽可能小

在保证夹紧可靠的情况下, 减小夹紧力可以减轻工人的劳动强度, 提高生产效率, 同时可以使机构轻便、紧凑以及减少工件变形。为此, 应使夹紧力的方向最好与切削力、工件的重力方向一致, 这时所需要的夹紧力为最小。

如图 4.36 所示, 在钻床上钻孔, 图 4.36(a) 即为夹紧力 F 、切削力 P 、工件的重力 G 三力方向重合的理想情况, 夹紧力 F 最小; 在图 4.36(b) 中, P 、 G 均与 F 反向, $F > P + G$, 此方案的夹紧力 F 比图 4.36(a) 中所需的夹紧力大得多; 在图 4.36(c) 中, P 、 G 都与 F 垂直, 为避免工件加工过程中移位, 应使夹紧后产生的摩擦力 $Ff_s > P + G$ (f_s 为工件与夹具定位面间的静摩擦系数), 这时所需的夹紧力 F 最大。

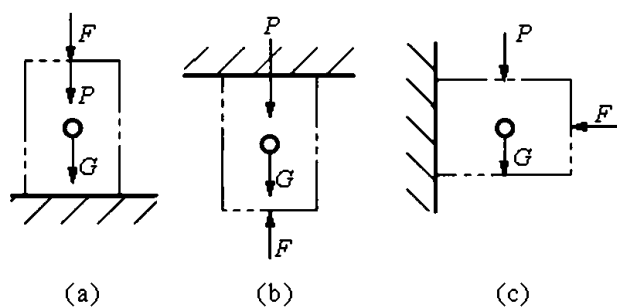


图 4.36 夹紧力的方向与夹紧力大小的关系

由以上分析可知, 夹紧力大小与夹紧方向直接有关。在考虑夹紧方向时, 只要满足夹紧条件, 夹紧力越小越好。

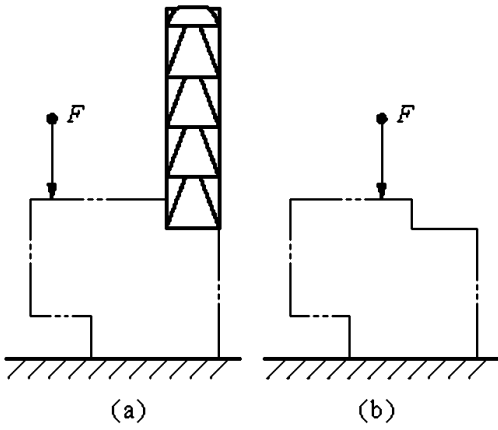


图 4.37 夹紧力应在支承面内

2. 夹紧力的作用点

(1) 夹紧力的作用点应能保证工件定位稳定,不致引起工件产生位移或偏转。

产生位移或偏转会破坏工件的定位,为此,夹紧力的作用点应落在定位元件上或几个支承元件所形成的支承平面内,否则夹紧力与支承反力会构成力矩,夹紧时工件将发生偏转。

如图 4.37(a)所示,夹紧力虽垂直于主要定位基准面,但作用点却在支承范围以外,夹紧力与支反力构成力矩,工件将产生偏转使定位基准与支承元件脱离,从而破坏原有定位。为此,应将夹紧力作用在如图 4.37(b)所示的稳定区域内。

(2) 夹紧力的作用点应有利于减小夹紧变形。

夹紧力的作用点应落在工件刚性较好的方向和部位,这对刚度较差的工件尤其重要。

如图 4.38 所示的薄壁箱体,若将作用点由箱体的顶面中间单点改成刚性较好的两旁凸边两点夹紧,变形会大大减小,且夹紧也较可靠。若箱体没有凸边时,如图 4.38(c)所示,可将单点夹紧改为三点夹紧,使着力点落在刚性好的箱壁上,也可以减小工件的夹紧变形。

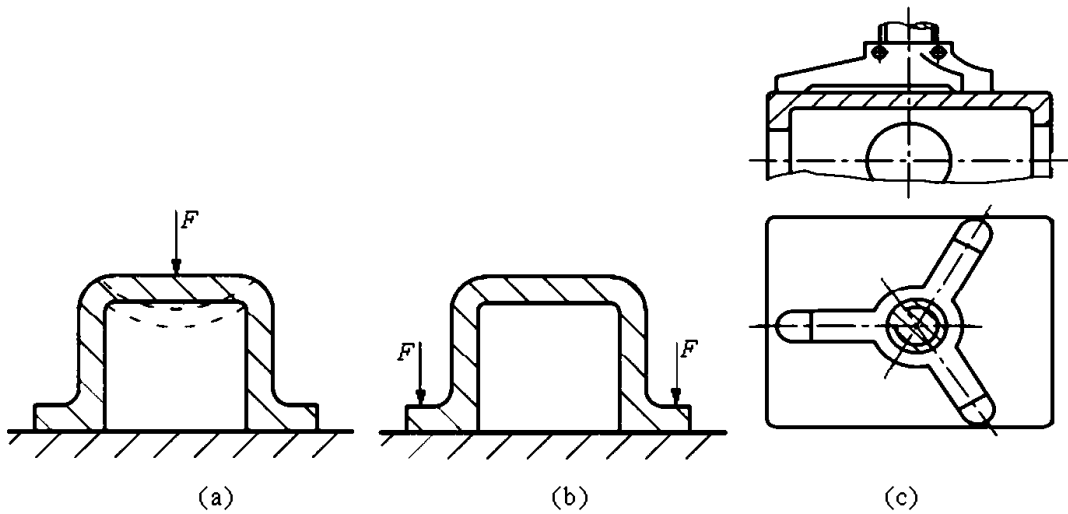


图 4.38 夹紧力应在刚性较好的部位

对于一些薄壁件,如果必须夹在刚性较差的部位,为了减少工件的夹紧变形,可采用增大工件受力面积的措施。

(3) 夹紧力的作用点应尽量靠近工件加工表面,以提高定位稳定性和夹紧可靠性,减少加工中的振动。

如图 4.39 所示工件,被加工面处于工件的长悬臂的端头。若只采用夹紧力 F 进行夹紧时,虽然工件在加工中不会产生移动,但因 F 的作用点离被加工面很远,使工件夹紧刚

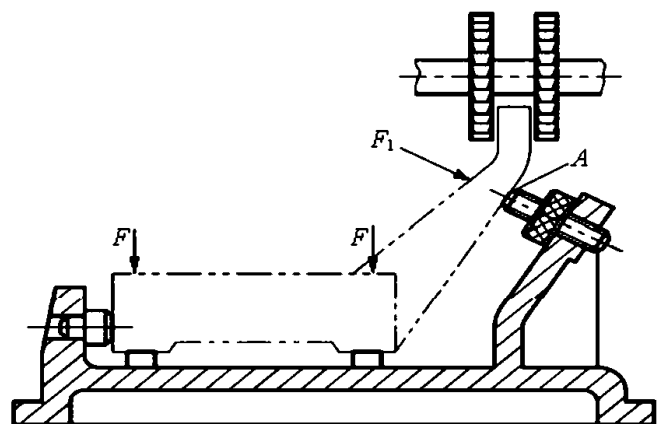


图 4.39 夹紧力应靠近加工表面

度很差。加工时不仅会产生较大的振动,影响加工质量,而且还可能引起悬臂折裂。若在离加工位置较近的 A 点增添辅助支承,并附加夹紧力 F_1 将悬臂夹紧,则夹紧点与加工部位间的悬臂梁长度大大缩短,从而使夹紧刚度得到很大的提高,减少了加工中的振动。

3. 夹紧力的大小

夹紧力的大小对于保证定位稳定、可靠,确定夹紧装置的结构尺寸,都有很大关系。夹紧力过小,则夹紧不稳固,在加工过程中工件仍会发生位移或振动而破坏定位;夹紧力过大,会使工件及夹具产生过大的夹紧变形,影响加工质量,此外,夹紧装置的结构尺寸也不必要地增大了。所以,夹紧力的大小必须恰当。

夹紧力 F 的大小主要取决于切削力 P 和工件重力 G ,必要时还需要考虑离心力、惯性力等的影响。除此而外,夹紧力的大小还与工艺系统的刚性、夹紧机构的传递效率等有关。切削力在加工过程中是变化的,因此确定夹紧力大小是相当复杂的,只能进行粗略估算。

通常采用下述两种方法来确定所需的夹紧力:一是根据同类夹具的使用情况,用类比法进行估算,这种方法在生产中应用较广;二是根据加工情况,确定出工件在加工过程中对夹紧最不利的瞬时状态,再将此时工件所受的各种外力看作静力,并用静力平衡原理,计算出所需的理论夹紧力 F_0 。由于所加工的工件的状态各异,切削工具不断地磨损等因素的影响,所计算出的理论夹紧力与实际所需的夹紧力之间存在着较大的差异。为确保夹紧安全可靠,还要考虑一个安全系数 K ,因此实际需要的夹紧力为

$$F = KF_0 \quad (4-17)$$

K 的取值范围一般为 $1.5 \sim 3$ 。粗加工时取 $2.5 \sim 3$;精加工时取 $1.5 \sim 2$ 。

4.5.3 常用夹紧机构

夹紧机构的种类很多,在实际生产中常用的典型夹紧机构主要有斜楔夹紧机构、螺旋夹紧机构和偏心夹紧机构及其它们的组合。

1. 斜楔夹紧机构

斜楔夹紧机构是采用斜楔作为传力元件或夹紧元件的夹紧机构。它是最基本的夹紧机构,螺旋夹紧机构、偏心夹紧机构等均是斜楔夹紧机构的变形。

图 4.40 所示为几种典型的斜楔夹紧机构,图 4.40(a)是在工件上钻相互垂直的 $\phi 8\text{mm}$ 、 $\phi 5\text{mm}$ 两组孔。当工件 3 装入后,锤击斜楔 2 大头,夹紧工件;当工件被加工完毕后,锤击斜楔 2 小头,松开工件。可见,斜楔是利用其移动时斜面的楔紧作用所产生的压力夹紧工件。图 4.40(b)是将斜楔与滑柱组合成一种夹紧机构,一般用气压或液压驱动。当斜楔 2 在气压或液压驱动下向左或向右移动时,通过滑柱和压板夹紧或松开工件。图 4.40(c)是由端面斜楔与压板组合而成的夹紧机构,通过转动端面斜楔 2 带动压板夹紧或松开工件。

1) 斜楔的夹紧力

取图 4.40(a)所示的斜楔 2 为脱离体,其受力情况如图 4.41 所示。图 4.40(a)是外作用力 F_Q 存在时斜楔的受力情况,作用在斜楔上的力有:工件的反作用力(即夹紧力的反作用力) F ,由 F 引起的摩擦力 F_1 ,其合力为 F_{R1} ;夹具体的反作用力 F_N ,由 F_N 引起的摩擦力 F_2 ,其合力为 F_{R2} ;建立静力平衡方程式:

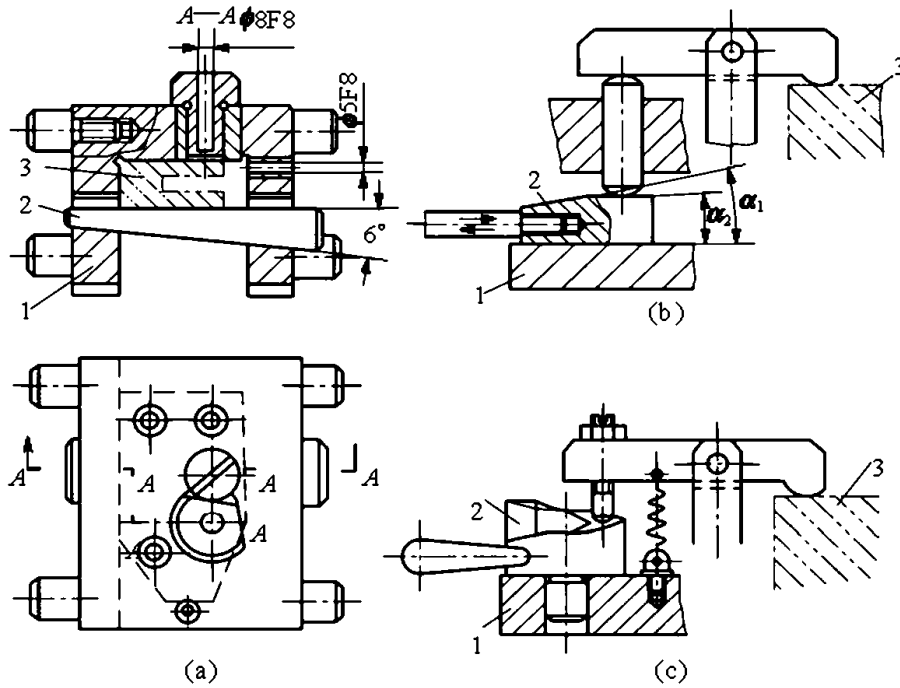


图 4.40 斜楔夹紧机构

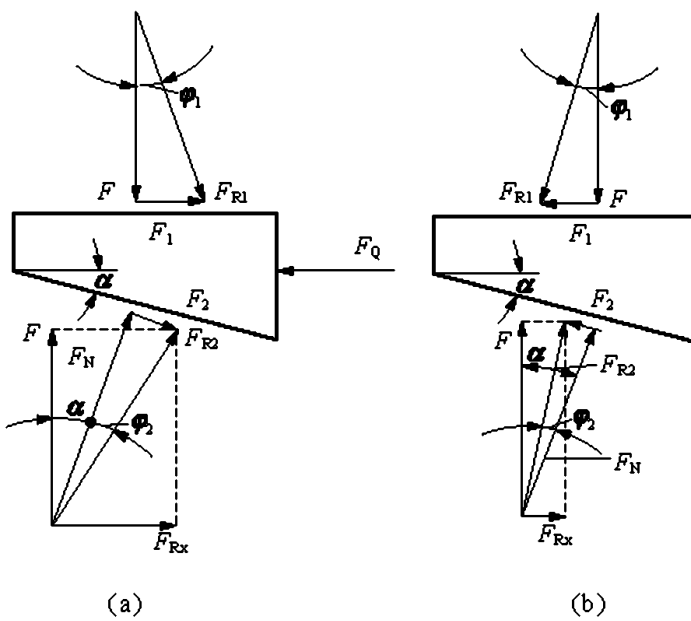


图 4.41 斜楔的受力分析

$FF_1 + F_{RX} - F_Q$
 式中, $F_1 = F \tan \varphi_1$, $F_{RX} = F \tan(\alpha + \varphi_2)$
 代入上式得

$$F = \frac{F_Q}{\tan \varphi_1 + \tan(\alpha + \varphi_2)} \quad (4-18)$$

式中, F 斜楔对工件的夹紧力, N;
 α 斜楔升角, ($^\circ$);
 F_Q 加在斜楔上的作用力, N;
 φ_1 斜楔与工件间的摩擦角, ($^\circ$);
 φ_2 斜楔与夹具体间的摩擦角, ($^\circ$).
 设 $\varphi_1 + \varphi_2 = \varphi$, 当 α 很小时 ($\alpha \leq 10^\circ$),
 可用下式作近似计算:

$$F = \frac{F_Q}{\tan(\alpha + 2\varphi)} \quad (4-19)$$

2) 斜楔的自锁条件

当工件夹紧并撤除原始作用力 F_Q 后, 夹紧机构依靠摩擦力的作用, 仍能保持对工件的夹紧状态的现象称为自锁。此时摩擦力的方向与斜楔企图松开和退出的方向相反, 如图 4.41(b) 所示是作用力 F_Q 撤去后斜楔的受力情况。从图中可以看出, 要自锁必须满足 $F_1 \geq F_{RX}$

因 $F_1 = F \tan \varphi_1$, 得 $F_{RX} = F \tan(\alpha - \varphi_2)$
 代入上式得 $F \tan \varphi_1 \geq F \tan(\alpha - \varphi_2)$
 整理后得

$$\varphi_1 \geq \alpha - \varphi_2 \quad \text{或} \quad \alpha \leq \varphi_1 + \varphi_2 \quad (4-20)$$

因此, 斜楔的自锁条件是: 斜楔的升角小于或等于斜楔与工件、斜楔与夹具体之间的摩擦角之和。

一般的钢件接触面的摩擦系数 $f = 0.1 \sim 0.15$, 故摩擦角 $\varphi = \arctan(0.10 \sim 0.15) =$

$5^{\circ}43' \sim 8^{\circ}30'$ 。为保证自锁可靠,手动夹紧机构一般取 $\alpha = 6^{\circ} \sim 8^{\circ}$;对于气动或液压夹紧,在不考虑自锁时(通常由气动或液压系统保证),可取 $\alpha = 15^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 。

3) 斜楔的扩力比与夹紧行程

夹紧力 F 与原始作用力 F_Q 之比称为扩力比或增力系数,用 i_Q 表示,即

$$i_Q = \frac{F}{F_Q} = \frac{1}{\tan\varphi_1 + \tan(\alpha + \varphi_2)} \quad (4-21)$$

若 $\varphi_1 = \varphi_2 = 6^{\circ}$, $\alpha = 10^{\circ}$, 则 $i_Q = 2.6$ 。可见,斜楔具有扩力或增力作用, α 越小, i_Q 越大。夹紧机构的扩力作用越明显。

斜楔夹紧行程是斜楔在夹紧工件过程中在夹紧方向上的行程。如图 4.42 所示,夹紧行程 h 的大小与斜角 α 和斜楔轴向移动距离 s 的关系是

$$h = s \tan \alpha \quad (4-22)$$

要增大夹紧行程,就必须增大斜楔轴向移动距离 s 或增大斜角 α ,但往往都是不可行的。增大斜角会受到自锁条件的限制;增大斜楔轴向移动距离会使夹紧机构的尺寸增大、体积增大,还会延长操作时间,影响劳动生产率。在生产实际中常采用双斜角结构的斜楔,如图 4.40(b)所示,前段采用较大斜角 α_1 ,使滑柱迅速上升,后段采用较小斜角 α_2 确保自锁。

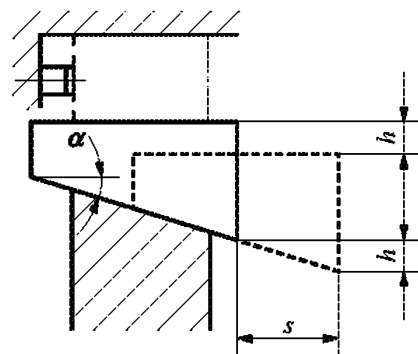
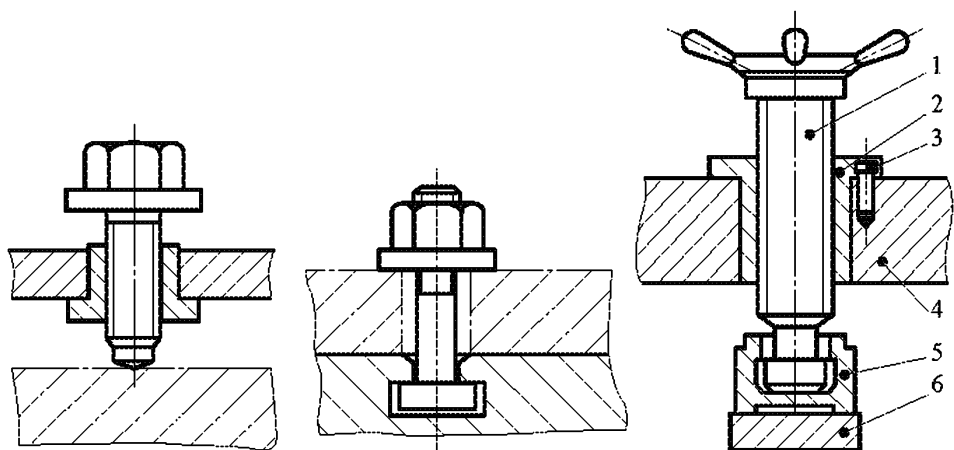


图 4.42 斜楔夹紧行程

2. 螺旋夹紧机构

利用螺旋直接夹紧工件,或与其他元件组合实现工件夹紧的机构,统称为螺旋夹紧机构。螺旋夹紧机构中所用的螺旋,实际上相当于把斜楔绕在圆柱体上,因此它的夹紧作用原理与斜楔是一样的。

图 4.43 所示是手动螺旋夹紧机构。图 4.43(a)中螺栓头部直接对工件表面施加夹紧力,螺栓转动时,容易损伤工件表面或使工件转动。图 4.43(b)是通过转动螺母来夹紧工件。图 4.43(c)是在螺杆头部装有摆动压块的螺旋夹紧机构,通过摆动压块 5 夹紧工件,既能保证与工件表面有良好的接触,防止夹紧时螺栓带动工件转动,又可避免螺栓头部直接与工件接触而造成压痕。摆动压块的结构已经标准化,可根据夹紧表面来选择。



(a) 旋转螺栓夹紧

(b) 旋转螺母夹紧

(c) 借助摆动压块的螺旋夹紧

图 4.43 螺旋夹紧机构

1 螺杆;2 螺纹衬套;3 止动螺钉;4 夹具体;5 摆动压块;6 工件

1) 螺旋夹紧机构的夹紧力

螺旋可以视为绕在圆柱体上的斜楔,因此可以从斜楔的夹紧力计算公式直接导出螺旋夹紧力的计算公式:

$$F = \frac{PL}{r_i \tan(\alpha + \varphi_2) + r' \tan \varphi_1} \quad (4-23)$$

- 式中, F 沿螺旋轴线作用的夹紧力, N;
 P 作用在手柄上的力, N;
 L 作用力的力臂, mm;
 r_i 螺纹中径的一半, mm;
 α 螺纹升角, ($^\circ$), 一般为 $2^\circ \sim 4^\circ$;
 φ_1 螺杆(或螺母)端部与工件(或压块)的摩擦角, ($^\circ$);
 φ_2 螺纹副当量摩擦角, ($^\circ$);
 r' 螺杆(或螺母)端部与工件(或压块)之间的当量摩擦半径, mm。

2) 螺旋夹紧机构的特点及应用

螺旋夹紧机构结构简单、紧凑,扩力比大,增力性能好,行程不受限制,自锁性能好。适合于手动夹紧,在机床夹具中得到了广泛的应用。但因夹紧、松开动作慢,在机动夹紧机构中应用较少。

(1) 快速螺旋夹紧机构。为了克服螺旋夹紧动作慢、效率低的缺点,常采用各种快速螺旋夹紧机构,如图 4.44 所示。

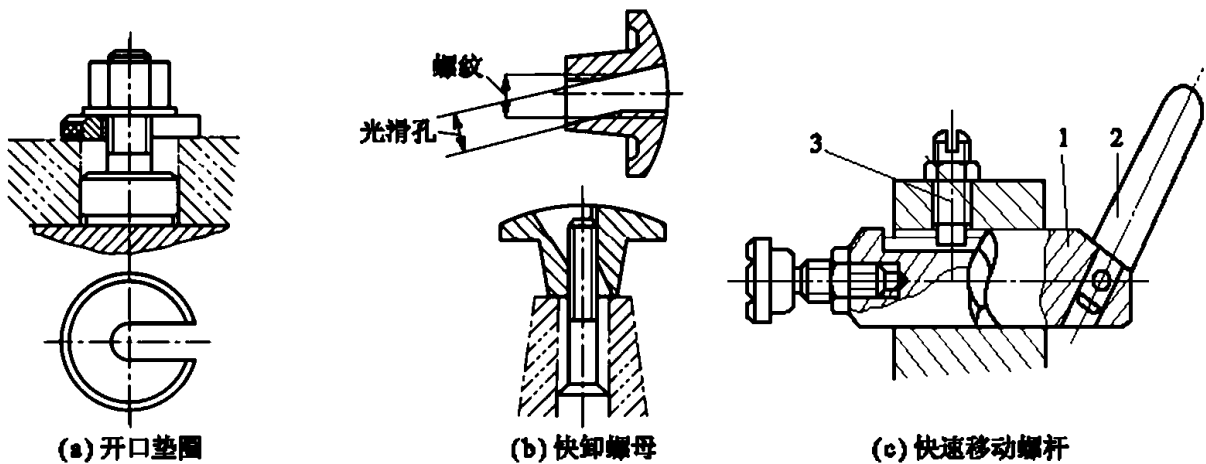


图 4.44 快速螺旋夹紧机构

(2) 螺旋压板夹紧机构。螺旋常与各种形式的压板组合构成螺旋压板夹紧机构。它具有结构简单、制造容易、自锁性能好等优点,在实际生产中应用非常广泛。如图 4.45 所示,这种螺旋压板夹紧机构利用杠杆原理实现对工件的夹紧,杠杆比不同,夹紧力也不同。其结构形式变化很多,图 4.45(a)、(b)所示的为移动压板,图 4.45(c)、(d)所示为转动压板,其中图 4.45(d)所示的增力倍数最大。

3. 偏心夹紧机构

用偏心件直接或间接夹紧工件的机构称为偏心夹紧机构。图 4.46 是几种常见的偏心夹紧机构。图 4.46(a)为直接利用偏心轮夹紧工件,图 4.46(b)和图 4.46(c)为偏心压板夹紧机构。

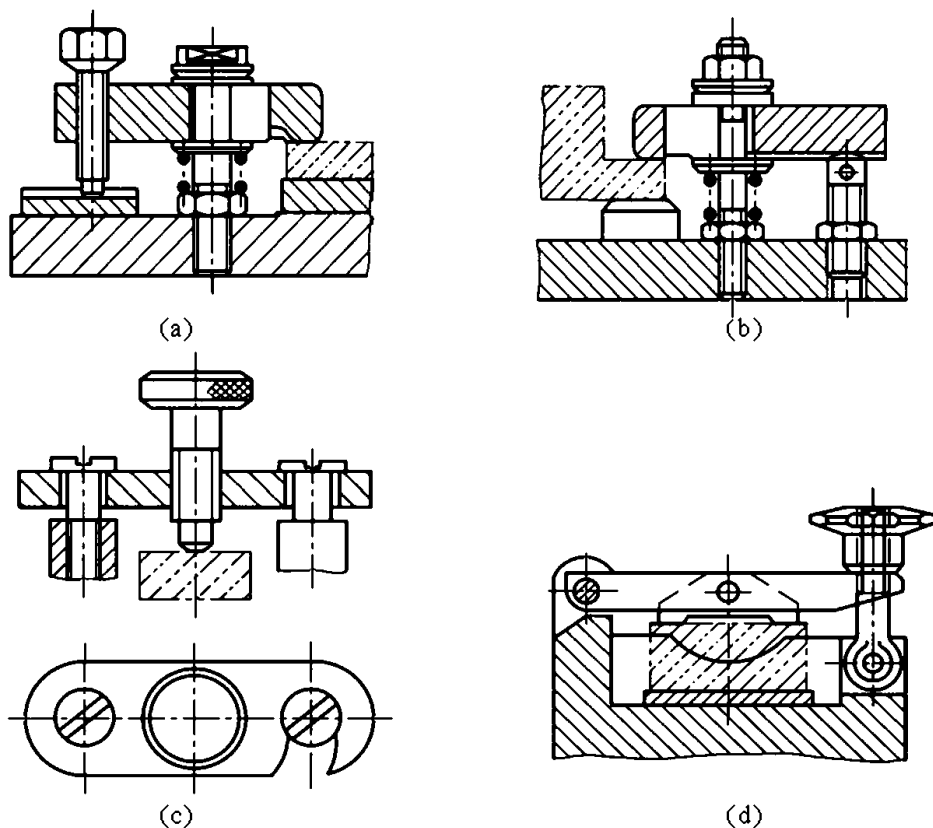


图 4.45 螺旋压板夹紧机构

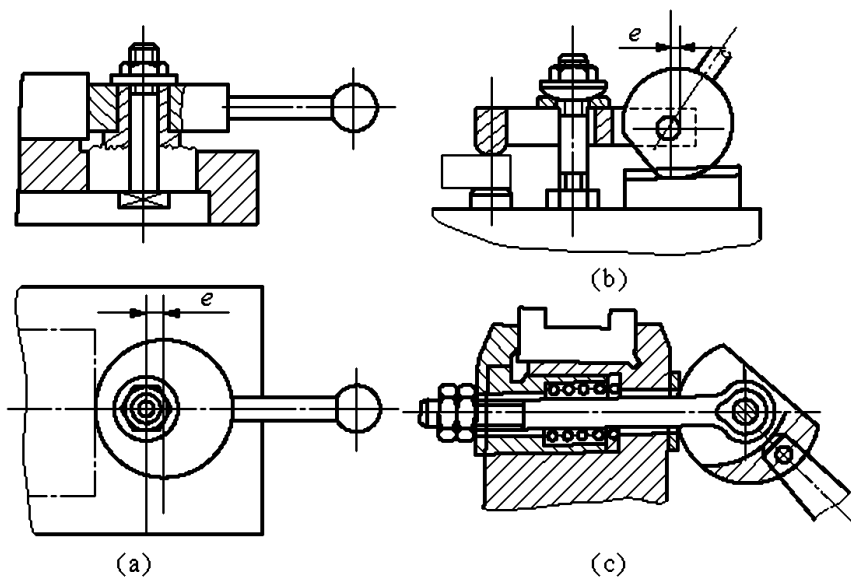


图 4.46 偏心夹紧机构

偏心夹紧机构靠偏心轮回转时回转半径变大而产生夹紧作用,其原理和斜楔夹紧机构相似。只是斜楔夹紧的楔角不变,而偏心夹紧的楔角是变化的。将图 4.47(a)所示的圆偏心轮展开,可得到图 4.47(b)所示的图形。

由图 4.47(a)可知: O_1 是圆偏心轮的几何中心, R 是其几何半径, O_2 是圆偏心轮的回转中心, e 是偏心距,延长 O_1O_2 交圆于 O 、 A 两点, O_2O 为其最小回转半径[对应图 4.47(b)中的位置 1], O_2A 为其最大回转半径[对应图 4.47(b)中的位置 3]。圆偏心轮与销轴间为间隙配合,当偏心圆绕 O_2 点顺时针回转时, OA 间的圆弧工作面上各夹紧点到回转中心点 O_2 的距离(各夹紧点的回转半径)逐渐增大,相当于曲线楔向前楔紧在回转销轴与工件夹紧面之间,

使 O_2 到工件受压面之间的距离 h 逐渐增大, 因而把工件夹紧。

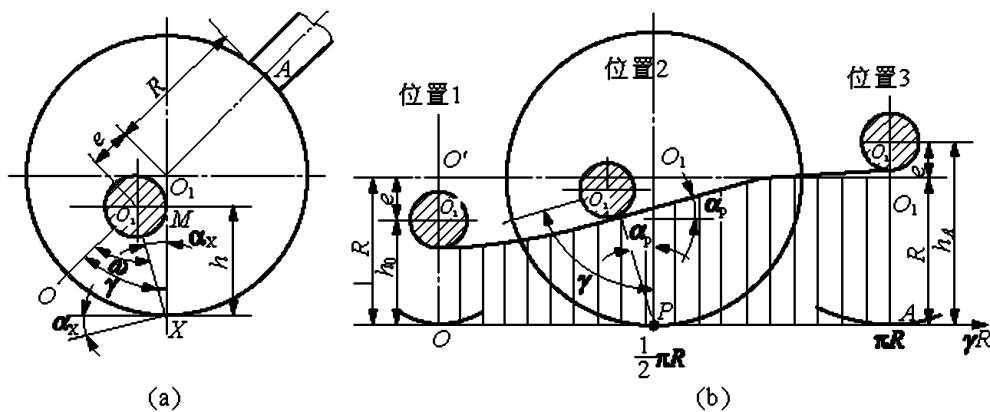


图 4.47 偏心夹紧工作原理

偏心夹紧机构夹紧动作快, 操作方便, 结构简单; 但夹紧行程较小, 夹紧力小, 自锁性能不是很好。一般用于没有振动或振动较小, 切削力变化较小、夹紧力要求不大的场合。

4. 铰链夹紧机构

采用以铰链相连接的连杆作中间传力元件的夹紧机构, 称为铰链夹紧机构。图 4.48 所示为常用的铰链夹紧机构, 图 4.48(a) 为单臂铰链夹紧机构, 图 4.48(b) 为双臂双作用铰链夹紧机构。

现以图 4.48(a) 所示的单臂铰链夹紧机构为例说明其作用原理。臂 3 两头是铰链连接, 一头带滚子 2。滚子 2 由气缸活塞杆推动, 可在垫板 1 上来回运动。当滚子向左运动到垫板左端斜面时, 压板 4 离开工件, 当滚子向右运动时, 通过臂 3 使压板 4 压紧工件。

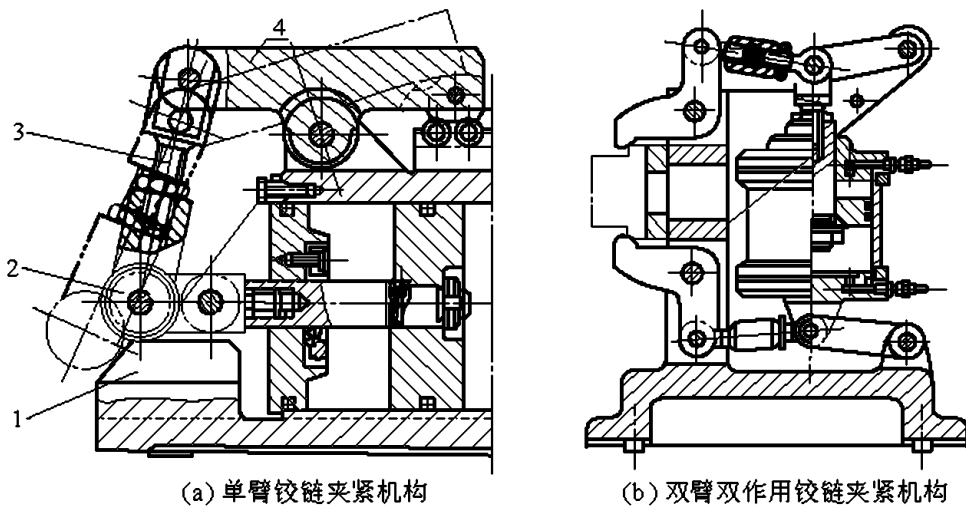


图 4.48 铰链夹紧机构

铰链夹紧机构是一种增力机构, 其结构简单, 增力比大, 易于改变力的作用方向, 但自锁性能差, 常与具有自锁性能的机构组成复合夹紧机构; 适用于多点、多件夹紧, 在气动、液压夹具中获得广泛应用。

5. 定心、对中夹紧机构

定心、对中夹紧机构是一种特殊夹紧机构, 其定位和夹紧是同时实现的, 夹具上与工件

定位基准相接触的元件,既是定位元件,又是夹紧元件。根据各自实现定心和对中的工作原理不同,可分为以下两种类型。

(1) 定位 夹紧元件按等速移动原理实现定心、对中夹紧。如斜楔定心夹紧机构、杠杆定心夹紧机构、螺旋定心夹紧机构等。

图 4.49 为带锥体的双排楔式卡爪自动定心夹紧装置,图 4.50 为螺旋定心夹紧机构。

这类定心夹紧机构的特点是结构简单、制造方便,夹紧力和夹紧行程较大,通用性好。但由于制造误差和组成元件间的间隙较大,故定心精度不高,主要适用于粗加工或半精加工场合。

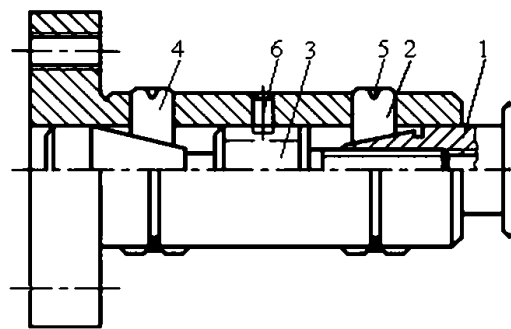


图 4.49 斜楔定心夹紧机构

1 螺套;2 卡爪;3 螺杆;4 卡爪;
5 弹性卡环;6 销子

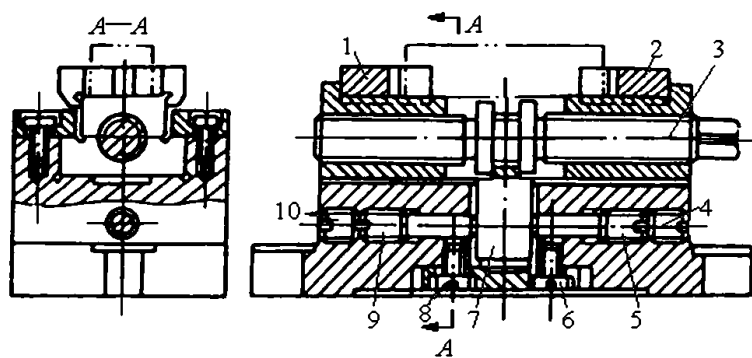


图 4.50 螺旋定心夹紧机构

1、2 V形块;3 螺帽;4、5、6 螺帽;7 叉形体;8、9、10 螺钉

(2) 定位 夹紧元件按均匀弹性变形原理实现定心夹紧。主要有弹簧夹头、弹性薄膜卡盘、液塑定心夹紧机构、碟形弹簧定心夹紧机构等。

6. 联动夹紧机构

凡由一个原始作用力同时对一个工件的不同部位进行夹紧,或对多个工件进行同时夹紧的机构称为联动夹紧机构。有些机构还能够完成夹紧与其他动作的联动。

1) 多点联动夹紧机构

如图 4.51 所示,在图 4.51(a)中,拧紧螺母 2,能使夹紧力作用在两个垂直的方向上,从而使压板 1 从两个方向上夹紧工件 3。两个方向上的夹紧力的大小可通过改变杠杆臂 L_1 和 L_2 的长度来调整。由于每个方向各有两个夹紧点,故称为四点垂直联动夹紧机构。图 4.51(b)中拧紧螺母 2 能够使压板 1 从方向相同的两点夹紧工件,两夹紧力的大小也可通过调整 L_1 和 L_2 的长度比来进行。因夹紧力互相平行,故称为两点平行联动夹紧机构。图 4.51(c)所示的联动机构,在推力 Q 作用下,通过浮动件 1 使两个夹紧点都接触到工件,直到最后均衡夹紧。

2) 多件联动夹紧机构

如图 4.52 所示,图 4.52(a)是多件平行夹紧机构,图 4.52(b)是对向式夹紧机构。多件夹紧是施加一个原始作用力,通过传力件平行地把作用力传给各工件,同时把全部工件夹紧。其优点是不产生积累误差,缺点是作用力被工件均分,对整个夹紧机构需要较大的原始力。

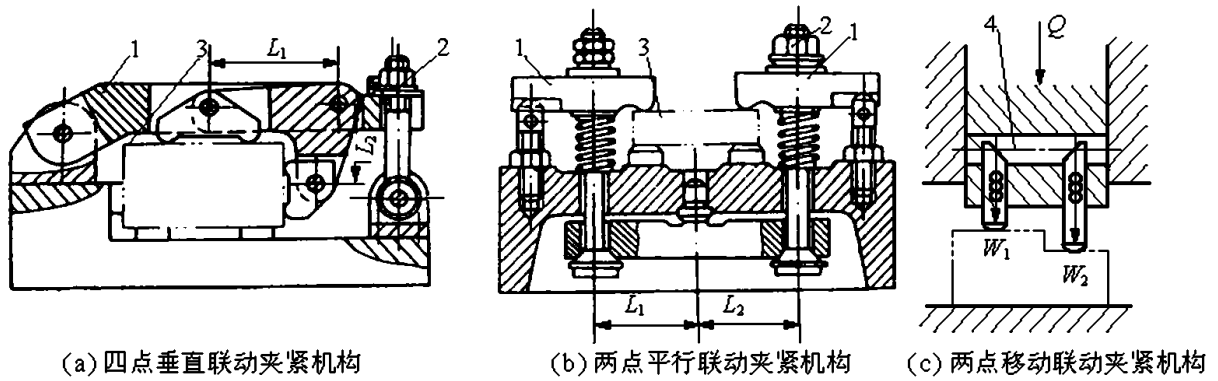


图 4.51 多点联动夹紧机构

1 压板;2 螺母;3 工件;4 浮动件

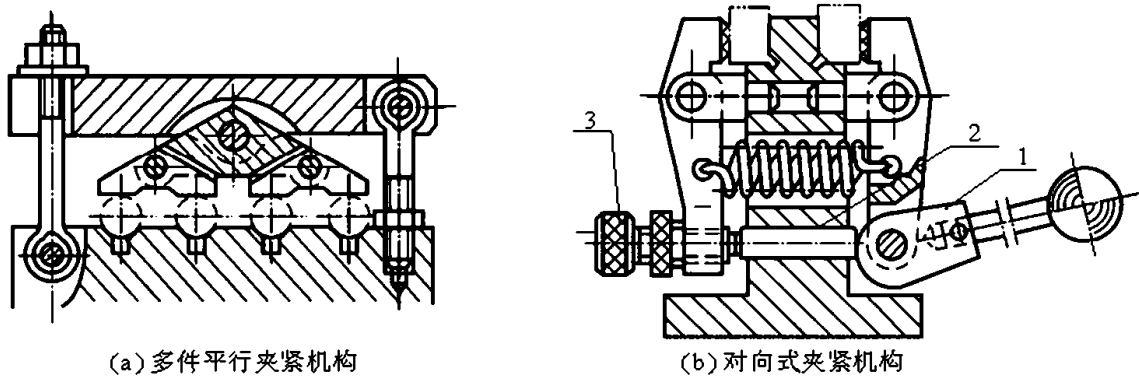


图 4.52 多件联动夹紧机构

1 偏心轮;2 传力顶杆;3 调整螺钉

4.6 典型机床夹具

4.6.1 钻床类夹具

在钻床上用来钻、扩、铰孔的机床夹具称为钻床夹具,其特点是装有钻套和安装钻套用的钻模板,因此习惯上也称为钻模。

1. 钻床夹具的主要类型及其特点

钻床夹具的种类繁多,根据钻模板的工作方式可分为以下 5 种类型。

1) 固定式钻模

这类钻模在加工过程中是固定不动的,夹具体上一般设有专门用来固定夹具的凸缘或耳座。这类钻模加工精度较高,常用于在立式钻床上加工单孔或在摇臂钻床上加工平行孔系,也可在多轴组合机床上加工孔系。如图 4.1 所示,在某轴套工件上钻孔的钻床夹具就是一种固定式钻模。

2) 回转式钻模

回转式钻模用于加工工件上同一圆周上的平行孔系,或加工分布在同一圆周上的径向孔系。它包括立轴、卧轴和斜轴回转三种基本形式。这种钻模的特点是具有一套回转分度装置,工件一次装夹中,通过钻模依次回转加工所有孔。夹具的回转分度装置多采用标准回转工作台,也可以单独设计。回转式钻模使用方便、结构紧凑,在成批生产中广泛使用。

如图 4.53 所示为一卧轴式回转钻模,用于加工套筒零件上 3 个径向均布孔 $\phi 6H9$ 。

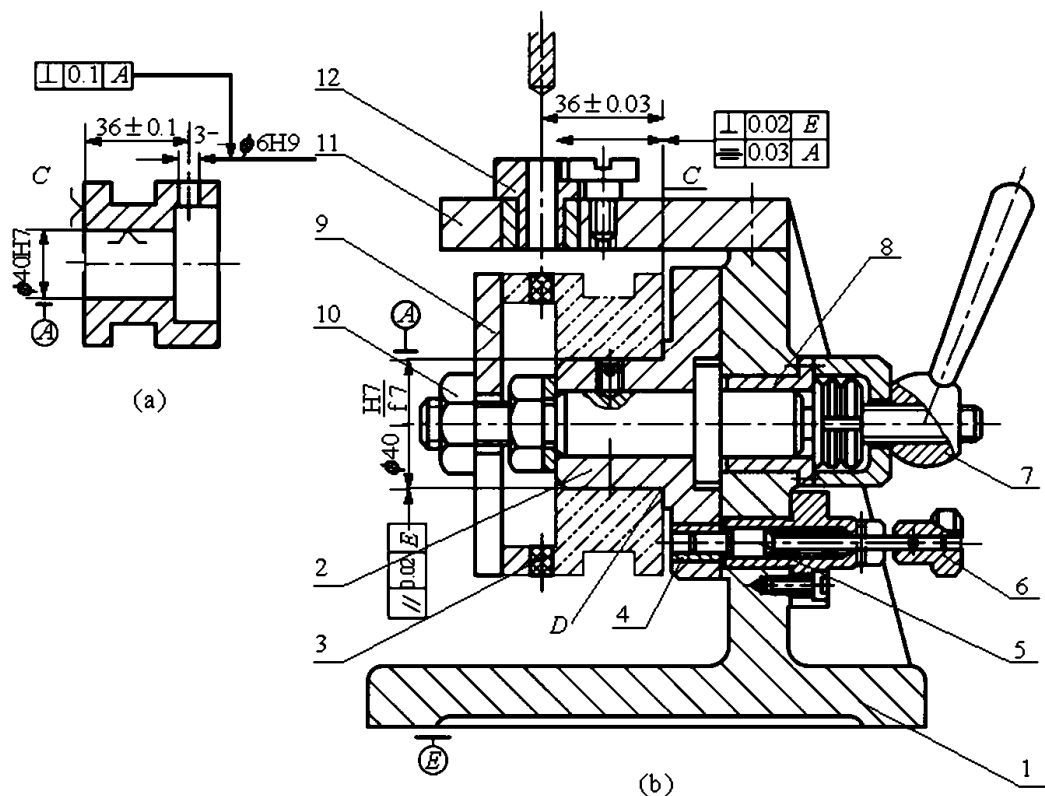


图 4.53 回转式钻模

- 1 夹具体;2 心轴;3 工件;4 定位套;5 对定销;6 把手;
7 手柄;8 压紧套;9 开口垫圈;10 螺母;11 钻模板;12 钻套

3) 翻转式钻模

翻转式钻模是一种没有固定回转轴的回转钻模。这类钻模可以和工件一起在机床工作台上翻转。在使用过程中,需要用手进行翻转。为减轻工人劳动强度,夹具连同工件的总重量一般限制在 10kg 以内。主要适用于加工小型工件上分布几个方向的孔,这样可减少工件的装夹次数,提高工件上各孔之间的位置精度。

如图 4.40(a)所示为翻转式钻模的实例,工件放入夹具后,通过锤击斜楔大头,把工件定位加紧。在钻完工件顶面上的 $\phi 8$ 孔后,翻转钻模,即可钻工件侧面上的孔 $\phi 5$ 。

4) 盖板式钻模

盖板式钻模实际上就是一块钻模板,没有夹具体,其上除钻套外,一般还设有定位元件和夹紧机构,将它覆盖在工件上,定位夹紧后即可进行加工。

图 4.54 为加工车床溜板箱上多个小孔的盖板式钻模。钻模以圆柱销 2 和削边销 3 在工件两孔中定位,通过 3 个支承钉 4 安放在工件表面上,因工件沉重,加工时不需要夹紧。

盖板式钻模的主要特点是结构简单轻巧,制造方便、成本低、切屑易于清除、加工孔的位置精度较高。但由于需要经常搬动,应尽可能减轻重量。

5) 滑柱式钻模

滑柱式钻模是一种带有升降钻模板的通用可调夹具,一般由夹具体、滑柱、升降模板、传动和锁紧机构组成。滑柱式钻模结构已标准化,其特点是夹具可调、装卸工件迅速、操作方便;钻孔的垂直度和孔距精度不太高,适用于中等精度的孔和孔系加工。在生产中得到广泛应用。

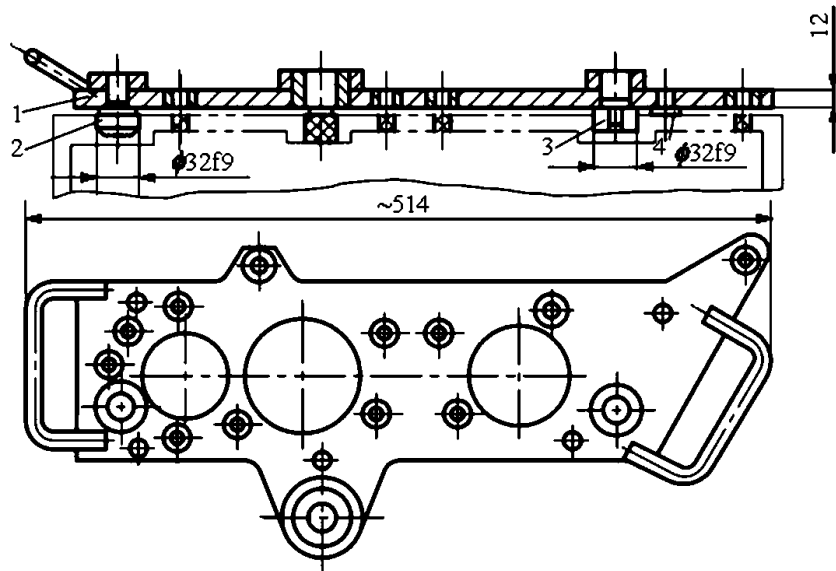


图 4.54 盖板式钻模

1 盖板;2 圆柱销;3 菱形销;4 支承钉

图 4.55 是手动滑柱式钻模通用底座,升降钻模板 1 通过两根导柱 7 与夹具体 5 的导孔相连。当转动手柄 6 时,经齿轮轴 8、斜齿轮 4 带动斜齿条轴杆 3 移动,使钻模板实现升降。由于钻模结构已系列化、标准化,选用时可查相关的夹具手册。

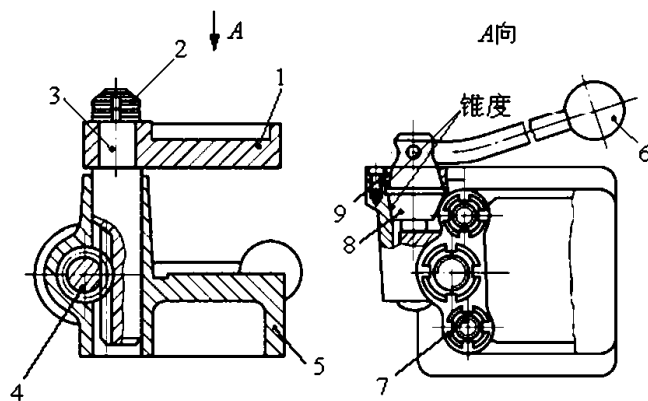


图 4.55 手动滑柱式钻模通用底座

1 升降钻模板;2 锁紧螺母;3 斜齿条轴杆;4 斜齿轮;5 夹具体;
6 操纵手柄;7 导柱;8 齿轮轴;9 套环

2. 钻套的选择与设计

钻套是钻模的特有元件。其作用是确定刀具的位置,同时引导刀具,以防刀具引偏和加工时产生振动。当加工平行孔系时,孔间的相互位置精度也依靠钻套在钻模板上的分布位置来保证。

1) 钻套的类型

按钻套的结构及使用情况,可分为以下四种类型:

(1) 固定钻套。图 4.56(a)所示为固定式钻套的两种形式,钻套外圆以 H7/n6 或 H7/r6 配合,直接压入钻模板或夹具体孔中。这种钻套结构简单,位置精度较高,但磨损后不易更换。适用于中小批生产或孔距小及孔位精度高的孔加工。

(2) 可换钻套。图 4.56(b)所示为可换式钻套,钻模板和钻套之间有一个衬套。衬套 2

和钻模板 3 之间常用 H7/n6 或 H7/r6 配合,衬套 2 与可换钻套 1 间用间隙配合(F7/m6),并用螺钉 4 固定,以防止加工时钻套在衬套中转动和轴向移动。当钻套磨损后,拧出螺钉,便可更换新的可换钻套。这种钻套多用于大批量生产的场合。

(3) 快换钻套。当同一个孔需连续经钻、扩、铰等多种工步加工时,因刀具直径逐渐增大,需要不断更换相应孔径的钻套,这时采用快换钻套。图 4.56(c)所示为快换钻套,更换时不必拧出螺钉,只需将钻套逆时针转过一定角度,使削边处正对螺钉头部,即可取出钻套。快换钻套与衬套的配合为 F7/m6 或 F7/k6,衬套与钻模板的配合为 H7/n6 或 H7/r6。在设计快换钻套时,应注意其台肩部位应与刀具加工时的旋转方向相适应,以防钻套在加工过程中自动脱出。

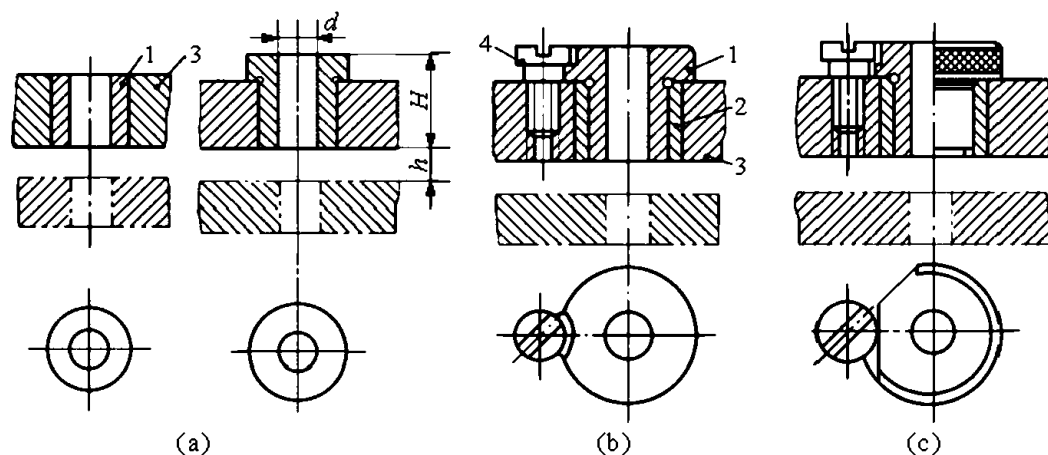


图 4.56 标准钻套

1 钻套;2 衬套;3 钻模板;4 螺钉

以上三种钻套均已标准化,使用时其规格参数可查阅有关夹具设计手册。

(4) 特殊钻套。特殊钻套是在特殊情况下加工孔用的,一般在无法使用标准钻套时,才考虑设计特殊钻套,它只能结合具体情况自行设计。

图 4.57 所示是根据不同的加工条件专门设计的几种特殊钻套。图 4.57(a)是斜面钻套;图 4.57(b)是加长钻套;图 4.57(c)、(d)是小孔距钻套。

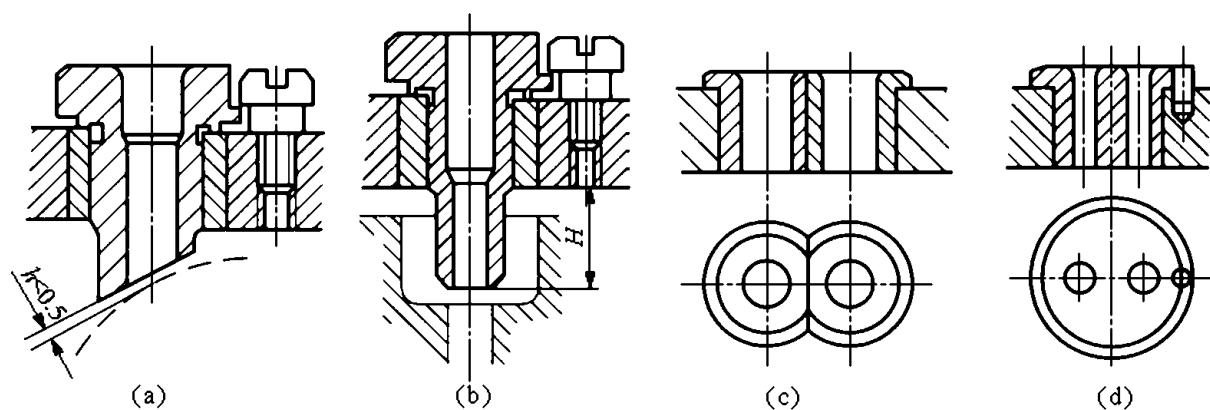


图 4.57 特殊钻套

2) 钻套的尺寸

(1) 钻套的高度 H 。钻套的高度 H (图 4.58)对被加工孔的位置精度和钻套内孔的磨损都有显著的影响。钻套的高度 H 增大,则导向性能好,刀具刚度提高,易于保证加工孔的精

度,但钻套与刀具的磨损加剧。 H 值过小,则导向性能不良。 H 值应根据孔距精度、工件材料、孔深、刀具耐用度、工件表面形状等因素决定。通常取 $H - (1 \sim 2.5)d$, 当加工的孔径较小或加工精度较高时,可以取 $H - (2.5 \sim 3.5)d$, d 为被加工孔径。

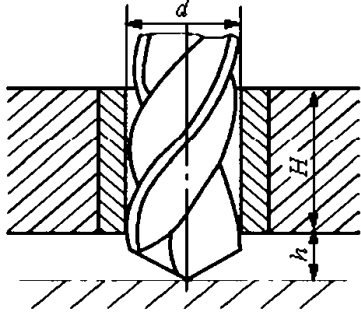


图 4.58 钻套高度与排屑间隙

(2) 钻套内孔的尺寸及其公差。一般取刀具的最大极限尺寸为钻套导向孔的基本尺寸,采用基轴制间隙配合。钻孔和扩孔时选用 F7 或 F8,粗铰时选用 G7,精铰时选用 G6;若刀具不是用切削部分导向,而是用刀具的导柱部分导向,应按基孔制的相应配合 H7/f7、H7/g6 或 H6/g5 选取。

(3) 排屑间隙 h 的确定。排屑间隙 h 值的大小(见图 4.60)对于排屑、导向有很大的影响。 h 值过小,排屑困难,特别是加工塑性材料时,切屑易阻塞在工件与钻套之间,有可能使钻套顶出,还会损坏加工表面和将钻头折断; h 值过大,排屑方便,但导向性能降低,不能发挥钻套引导刀具的作用而影响加工精度。加工铸铁件等形成碎粒状切屑的材料时,常选 $h - (0.3 \sim 0.7)d$;加工钢件等塑性材料时, $h - (0.7 \sim 1.5)d$,工件精度高时, h 取小值。

3. 钻模板的选择与设计

钻模板是用来安装钻套的,并和夹具体相连接。它决定着钻套在夹具上的正确位置,因而要求具有一定的精度、强度和刚度。按照它与夹具体的连接方式可分为以下几种类型。

(1) 固定式钻模板。这种钻模板直接固定在夹具体上,图 4.1、图 4.56 采用的就是固定式钻模板。固定式钻模板与夹具体的连接,一般采用 3 种结构:①与夹具体铸造成一整体铸造结构;②与夹具体焊接成一整体焊接结构;③用销钉、螺钉装配成一整体。

(2) 可卸式钻模板,又称为分离式钻模板。当装卸工件时需将钻模板从钻模上取下,则可采用这种钻模板,如图 4.59 所示。其导向精度较低。

(3) 铰链式钻模板。当钻模板妨碍工件装卸及钻孔后需要铹平面、攻丝时,常采用如图 4.60 所示的铰链式钻模板。由于铰链轴孔之间存在配合间隙,所以它的加工精度不如固定式钻模板高。

(4) 悬挂式钻模板。将钻模板悬挂在钻床主轴上,并随主轴一起运动的钻模板称为悬挂式钻模板。图 4.61 所示为一种在立式钻床上与多轴头配合使用的悬挂式钻模板。

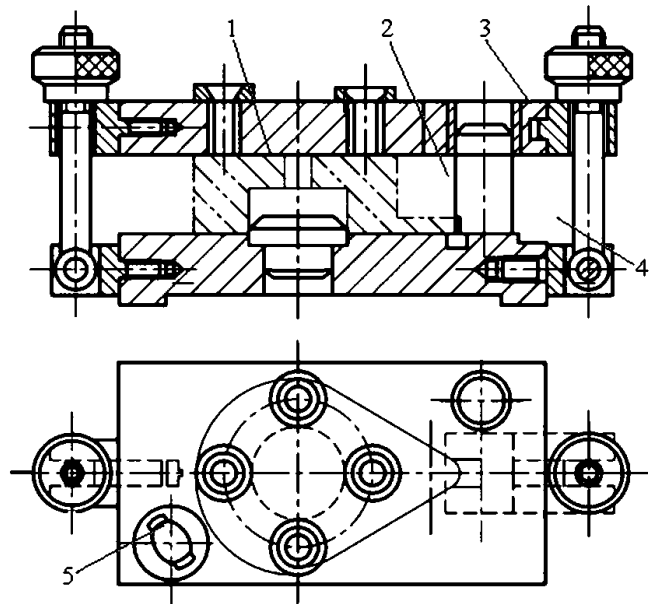


图 4.59 可卸式钻模板

- 1 钻模板; 2 圆柱销; 3 圆螺母;
- 4 铰链螺栓; 5 削边销

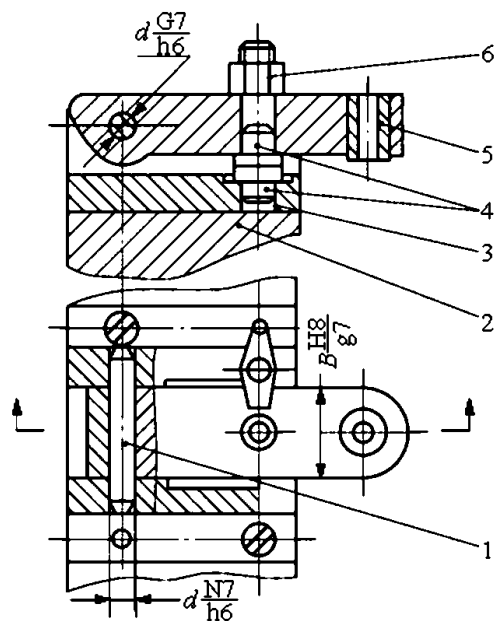


图 4.60 铰链式钻模板

- 1 铰链轴;2 夹具体;3 铰链座;4 支承钉;
5 钻模板;6 菱形螺母

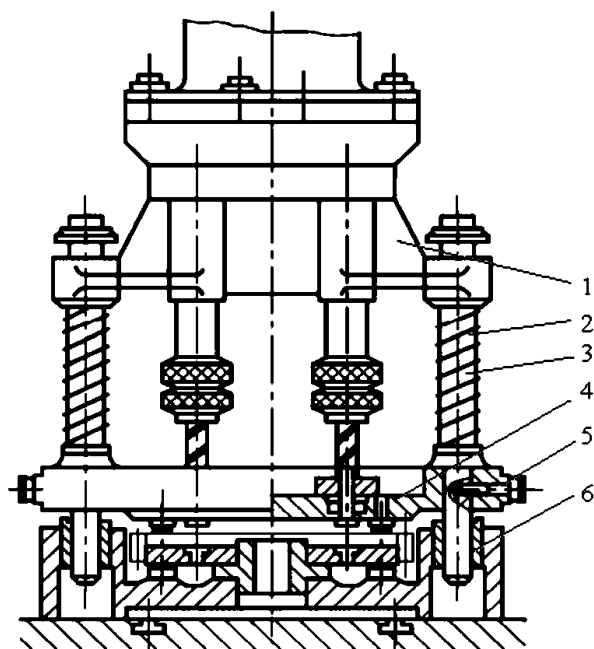


图 4.61 悬挂式钻模

- 1 多轴传动头;2 弹簧;3 导柱;
4 钻模板;5 锥端紧固螺钉;6 导套

4.6.2 铣床夹具

铣床夹具主要用于加工平面、键槽、沟槽、缺口、花键、齿轮以及各种成形表面等,一般由定位元件、夹紧机构、对刀装置(对刀块与塞尺)、定位键和夹具体组成。

1. 铣床夹具的主要类型及其特点

铣床夹具的种类较多。在铣削过程中,夹具大都与工作台一起做进给运动,而铣床夹具的整体结构又常常取决于铣削加工的进给方式,因此,通常按不同的进给方式将铣床夹具分为直线进给、圆周进给和靠模进给三种类型。

图 4.62 所示为加工壳体侧面棱边所用的铣床夹具。工件以端面、大孔和安装边上的一个小孔作定位基准,在定位平板 2、定位轴 6 和菱形销 10 上进行定位。夹紧装置是采用螺旋压板的联动夹紧机构,操作时只需要拧动左边的螺母 4,即可使左右两个压板 3 同时压紧工件。右端的螺母可以用来调整杠杆 8 的位置。夹具上设置了对刀块 5,用来调整铣刀的位置。底面下边的两个定向键 11 用来确定夹具在机床工作台上的位置。

1) 夹具的安装与定位键

为了确定夹具与机床工作台的相对位置,在夹具体底面上应设置定位键。铣床夹具通过定位键与机床工作台 T 形槽配合,确定夹具在机床上的位置。每个夹具一般设置两个定位键(小型夹具也可使用一个断面为矩形的长键),两个定位键之间的距离应尽可能远些。

定位键有矩形和圆柱形两种,常用的是矩形定位键,其结构尺寸已标准化。如图 4.63 所示,矩形定位键有 A 型和 B 型两种结构形式。图 4.63(a)所示为 A 型定位键,其宽度按统一尺寸 $B(h6$ 或 $h8)$ 制作,适用于夹具的定向精度要求不高的场合。图 4.63(b)、(c)所示为 B 型定位键,其侧面开有沟槽,沟槽的上部与夹具体的键槽配合。在制造时, B_1 应留有 0.5mm 的修磨量,以便按 $h6$ 的配合关系与工作台 T 形槽修配,进一步提高夹具定位精度。

定位精度要求高的夹具、重型夹具以及专用机床上的夹具，可不设置定位键，而在夹具体的侧面加工一窄长平面作为夹具安装时的找正基面，通过找正获得较高的定位精度。

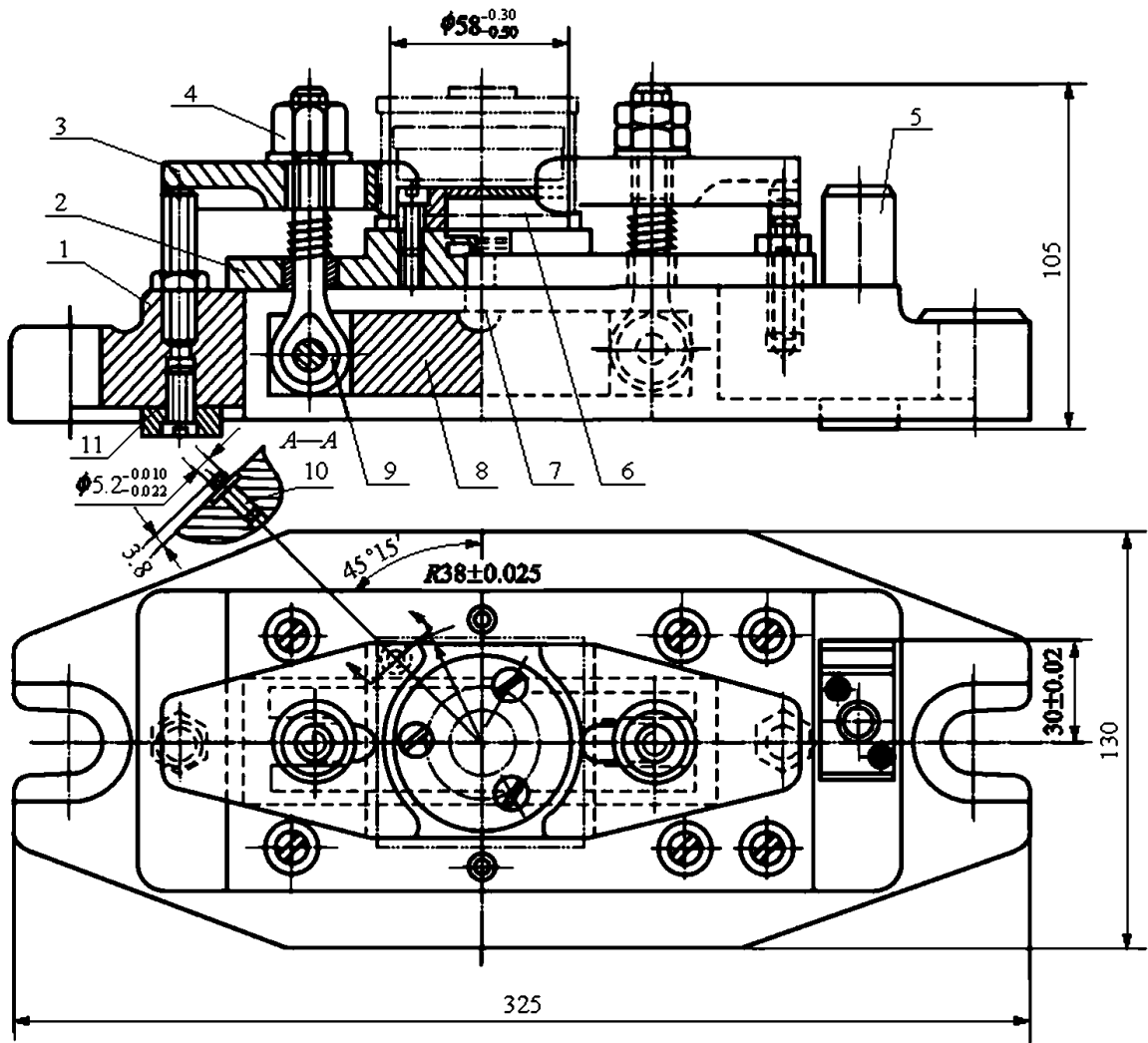


图 4.62 加工壳体侧面用铣床夹具

- 1 夹具体; 2 定位平板; 3 压板; 4 螺母; 5 对刀块;
6 定位轴; 7 顶出件; 8 杠杆; 9 螺栓; 10 菱形销; 11—定向键

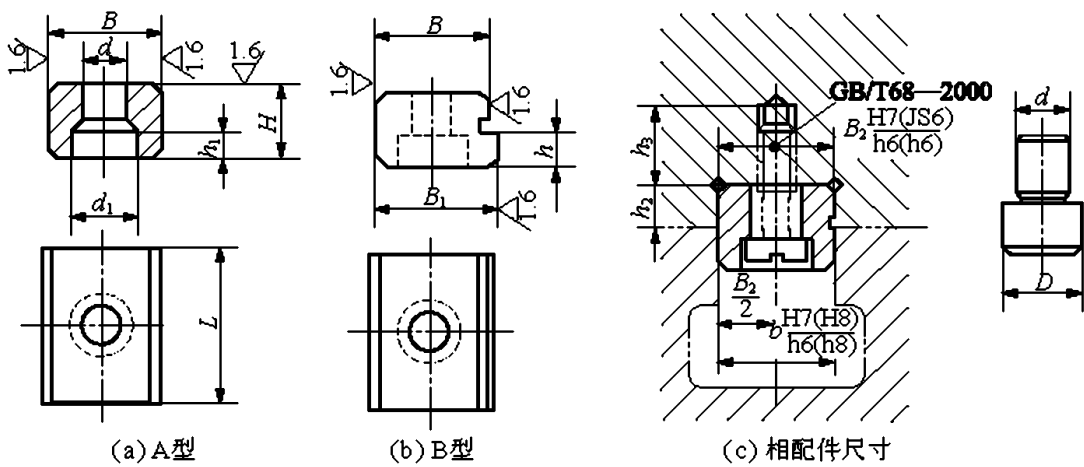


图 4.63 定位键

2) 对刀装置

铣床夹具在工作台上安装好之后,还要调整铣刀对夹具的相对位置,以便于进行定距加工。这可以采用试削调整,用标准件调整和用对刀装置调整等方法,其中以用对刀装置(对刀块和塞尺)调整最为方便。对刀装置由对刀块和塞尺组成,用来确定刀具与夹具的相对位置。

图 4.64 所示为常见几种铣刀的对刀装置,图 4.64(a)是高度对刀装置,用于加工平面时对刀,3 是标准圆形对刀块;图 4.64(b)中 3 是直角对刀块,用于对准铣刀的高度和水平方向位置,如加工键槽或台阶面时的对刀;图 4.64(c)是组合刀具对刀装置,3 是方形对刀块,用于组合铣床的垂直和水平对刀;图 4.64(d)是侧装对刀块,安装在侧面,用于加工两相互垂直面时对刀,这些对刀装置的对刀块的结构已标准化;图 4.64(e)是根据需要专门设计的成形对刀装置,用于加工成形表面时对刀。

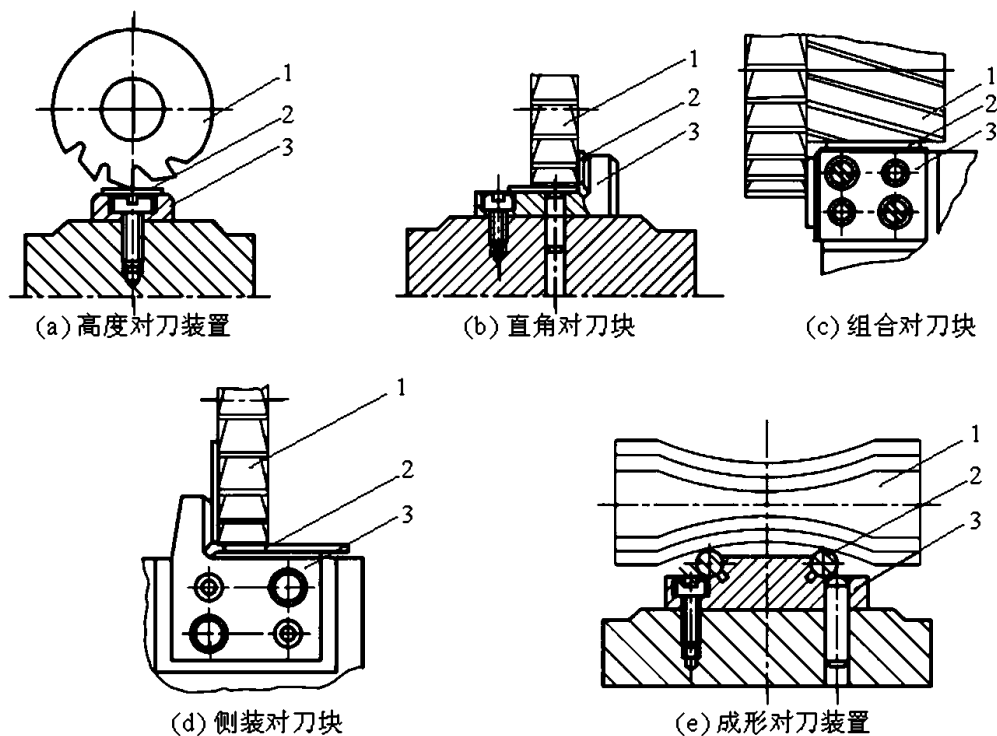


图 4.64 对刀装置

对刀时为防止刀具与对刀块直接接触而损坏刀刃或对刀块,应在刀具与对刀块之间塞入塞尺,凭抽动的松紧感觉来判断。图 4.65 是常用的两种标准塞尺结构,图 4.65(a)是对刀平塞尺,图 4.65(b)是对刀圆塞尺。

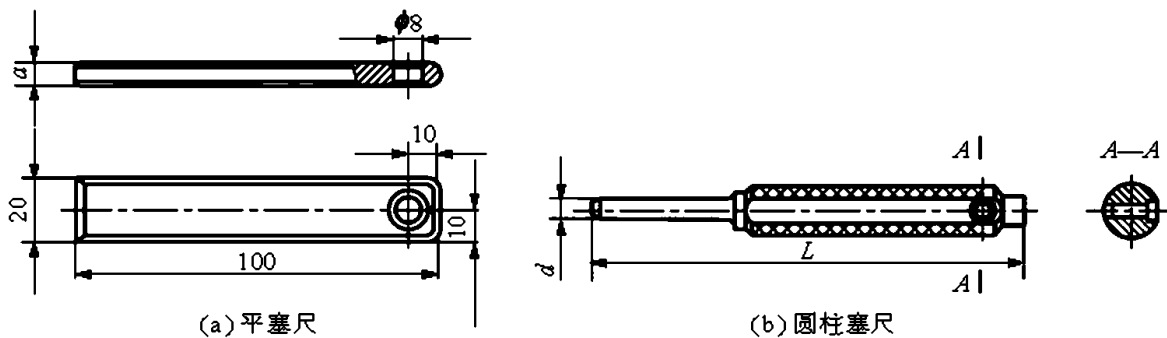


图 4.65 对刀块用标准塞尺

4.7 机床夹具的设计步骤

4.7.1 专用夹具设计的基本要求

机床专用夹具设计的基本要求可以概括为下面几个方面。

(1) 能保证工件的加工质量。

保证工件的加工质量是夹具设计必须首先满足的最基本要求。保证加工质量的关键是要正确地确定定位方案、夹紧方案、刀具引导装置及合理制定夹具的尺寸公差及技术要求。必要时应进行夹具误差分析与计算。

(2) 夹具总体方案应与生产纲领相适应,以便提高生产效率,降低成本。

在大批量生产时,应尽量采用各种快速、高效的夹具结构,如多件夹紧、联动夹紧和多工位加工等,以缩短辅助时间,提高生产率。在中、小批生产中,则要求在满足夹具功能前提下,尽可能采用标准元件和标准结构,力求夹具结构简单、容易制造,以降低夹具的制造成本,提高经济性。

(3) 操作方便、安全,能减轻工人劳动强度。

在客观条件允许且又经济的前提下,尽可能采用气动、液压等夹紧装置,以减轻工人劳动强度,并可较好地控制夹紧力。另外应使工件在夹具中装卸方便,夹具操作位置应符合工人的习惯,必要时应有安全保护装置,以确保工作安全。

(4) 便于排屑。

切屑积聚在夹具中,会破坏工件的正确定位;切屑带来大量的热量,会引起夹具和工件的热变形,影响加工质量;清除切屑会增加辅助时间,影响夹具工作效率;切屑积聚严重时,还会损伤刀具或造成工伤事故。因此,在设计夹具时,要对排屑问题给予足够重视,这一点在设计高效机床和自动线夹具时尤为重要。

(5) 具有良好的结构工艺性。

所设计的机床专用夹具应便于制造、装配、检验、调整和维修等。

4.7.2 夹具设计的一般步骤

设计机床专用夹具一般应按下列步骤进行。

1. 明确设计任务,研究原始资料,做好设计准备工作

夹具设计的原始依据是夹具设计任务书。因此,在开始设计时,就必须认真研究设计任务书,明确设计任务并收集有关资料,具体包括以下几个方面。

(1) 收集零件工作图、工序图、零件工艺规程等技术文件。清楚了解零件的作用、结构特点、所用材料及在尺寸、位置等方面的精度要求;充分了解工序图给出的工序尺寸、工序基准、已加工表面、待加工表面、工序加工精度等。它们是设计夹具的重要依据。

(2) 认真地研究零件的工艺规程,了解该工序所使用的机床、刀具,以及对加工余量、切削用量、工时定额、同时加工的工件数目等的要求。这些都是确定夹具结构尺寸、形式、夹紧装置的主要依据。

(3) 准备好设计夹具要使用的各种零部件标准、夹具设计手册、工厂规定、典型夹具图册和有关夹具设计的指导性及参考性资料等,尽量采用国家标准。

(4) 了解生产批量和对夹具需用情况。根据生产批量的大小和使用的特殊要求,来决定夹具结构的复杂程度。若生产批量大,要多采用气动、液压或其他机动夹具,应使夹具功能强和自动化程度高,尽可能地缩短辅助时间以提高生产率。若中小批生产,宜采用结构简单、成本低廉的手动夹具以及万能通用夹具、可调夹具或组合夹具。对于某些特殊要求,应该结合工序特点和生产的具体情况,有的放矢地采取措施。

(5) 收集有关机床方面的资料。了解机床主要技术参数、规格、安装夹具的有关连接部分的尺寸(如工作台 T 形槽的尺寸、主轴端部尺寸)等。

(6) 收集有关刀具方面的资料。了解刀具的主要结构尺寸、制造精度、主要技术条件等。

(7) 了解本厂制造、使用夹具情况。了解同类零件加工所用过的夹具及其使用情况,必要时收集国内、外有关设计和制造同类型夹具的资料,作为设计的参考。

2. 拟定夹具结构方案,绘制夹具结构草图

确定夹具结构方案时,主要应考虑下列问题:

(1) 确定工件定位方式,选择定位元件,验算定位误差。根据零件加工工艺所给定的定位基准和六点定位原理,确定工件的定位方法并选择相应的定位元件。确定定位方案时,首先要保证满足工件的加工精度,尽量减少定位误差。同时还要考虑定位的稳定性、可靠性,及定位元件的精度、耐磨性和支承刚性。一般要求定位误差控制在相应工序公差的 1/3 以内。

(2) 确定工件夹紧方案,选择适宜的夹紧装置。确定夹紧方案时,首先根据定位方案的不同合理选择夹紧力的方向和作用点,进行夹紧力大小的估算,以保证工件定位稳定和防止工件在切削力、重力及惯性力作用下发生位置移动;然后设计出相应的夹紧机构,实现对工件的夹紧。夹紧装置的设计可采用经验法或类比法等。

(3) 确定刀具的对刀或引导方式,并设计引导装置或对刀装置。

(4) 确定其他元件或装置的结构形式,如定向元件、分度装置、微调机构等。

(5) 协调各元件、装置的布局,确定夹具体结构尺寸和总体结构。

在确定夹具结构方案的过程中,定位、夹紧、对定等各个部分的结构及总体布局可能有多个方案,应从中择优,以使夹具设计得先进、合理。在构思夹具结构方案时,应绘制出夹具结构草图,以帮助构思,并检验方案的合理性和可行性,同时也为绘制夹具总装图做好准备。

3. 进行误差分析

在夹具结构方案确定以后,就先把有关尺寸公差及相互位置要求确定下来。然后,应根据本工序加工要求,分析夹具结构中影响加工精度的因素,进行必要的误差分析与计算,以检验结构方案和有关尺寸的公差配合及相互位置要求是否合理。这时进行误差分析的目的,就是为了在正式绘制总图之前能发现问题并得到及时解决,防止较大的返工。

4. 绘制夹具总装图

当夹具的结构方案确定之后,又经误差分析符合加工要求,就可以按国家标准正式绘制夹具总图。绘图比例最好按 1:1,使之具有良好的直观性;对于很大的夹具,可使用 1:2 或

1:5 的比例绘制;夹具很小时,可使用 2:1 的比例绘制。夹具总图中视图的布置也应符合国家制图标准,视图应尽量少,但必须能够清楚地表示出夹具的工作原理和构造,表示出各种机构或元件之间的位置关系等。主视图应取操作者实际工作时的位置,以作为装配夹具时的依据,并供使用时参考。

绘制总图时,可参考下面的顺序进行。

(1) 用双点画线画出工件在加工位置的外形轮廓(注意将工件视为透明体,不挡夹具)和主要表面,这里主要表面是指定位基准面、夹紧表面和被加工表面;用粗实线或网格线表示本工序的加工余量。

(2) 画出定位元件及刀具引导元件(必要时用假想线画出刀具的最终位置)。

(3) 按夹紧状态画出夹紧元件及夹紧机构(必要时用假想线画出夹紧元件的松开位置)。

(4) 画出其他装置,如分度装置、动力装置等。

(5) 画出夹具体及连接件,把夹具的组成元件、装置连成一体。

5. 标注夹具总装配图上必要的尺寸、公差和技术要求

在夹具总装图上标注各部分应标注的尺寸、公差配合,制定技术条件及编写零件明细表。

6. 绘制夹具零件图

对夹具总图中的非标准零件都必须绘制零件图,零件图视图的选择应尽可能与零件在总图上的工作位置相一致。在确定这些零件的尺寸、公差或技术条件时,应注意使其满足夹具总图的要求。对所设计的零件图要求结构工艺性良好,以便于制造、检验和装配。

上述方法和步骤,只反映了夹具设计的一般规律和一些经验,对于初学者来说是有一定的借鉴意义的。但在实际工作中,上述设计次序并非是一成不变的,要根据具体情况进行具体分析。

4.7.3 夹具设计中应注意的几个问题

在夹具总图上标注尺寸及技术要求的目的,主要是为了便于夹具的制造、装配、检验、使用和维修,保证夹具的工作精度,因此,必须给予高度重视。

在夹具总图上,应标注下列 5 类尺寸。

1) 夹具的外形轮廓尺寸

夹具的外形轮廓尺寸是指夹具的长、宽、高等最大外形轮廓尺寸。对于活动部分,应表示其处于极限位置时所占的空间的最大尺寸,这样可避免机床、夹具、刀具发生干涉。这类尺寸主要用于检查夹具能否在机床允许的范围内安装和使用。

2) 影响定位精度的尺寸

这类尺寸包括夹具定位元件与工件的配合尺寸及其公差,如定位销与工件孔的配合尺寸及其公差;各定位元件之间的位置尺寸及位置公差,如定位销对定位平面的垂直度,一面两销定位时两销中心距离尺寸及其公差等。一般是依据工件在本道工序的加工技术要求,并经定位误差验算后标注。

3) 影响对刀精度的尺寸

这类尺寸主要是指对刀元件(或导引元件)与刀具之间的配合尺寸、对刀元件(或导引元

件)与定位元件之间的位置尺寸、导引元件之间的位置尺寸,其作用是保证对刀精度。

对于铣床、刨床夹具来说,是指对刀块工作表面与定位元件的位置尺寸及公差,以及对刀塞尺的厚度或直径尺寸及其公差。若使用标准塞尺对刀时,也可给出塞尺的公称尺寸及标准编号。当采用标准样件对刀或按试切法调刀时,可以不予标注,但应在总图中说明。

对于钻、镗夹具是指钻(镗)套与定位元件间的位置尺寸及公差、钻(镗)套之间的位置尺寸及公差,以及钻(镗)套与刀具导向部分的配合尺寸及公差、钻(镗)套与衬套、衬套与衬套孔之间的配合尺寸及公差等。

4) 夹具与机床的连接尺寸

它是指用于确定夹具在机床上正确位置的尺寸,其作用是保证夹具的安装精度,包括夹具安装基准面的尺寸及其公差、定位元件至夹具安装面的尺寸及相互位置公差等。对于车床、磨床而言,主要是夹具与车床的主轴端的连接尺寸及公差;对铣、刨床来说,则是夹具定位键、U形槽与机床工作台T形槽的配合尺寸及公差。当采用找正法调整夹具在机床上的位置时,则应标注定位元件至找正基准面的尺寸及相互位置公差。

5) 其他重要配合尺寸

这类尺寸属于夹具内部的配合尺寸,主要是为了保证夹具装配后能满足规定的使用要求而标注的,与工件、刀具、机床等无关。例如,定位元件与夹具体的配合尺寸等。

思考与练习题

4-1 什么是机床夹具?它在机械加工中有何作用?

4-2 什么是六点定位原理?何谓完全定位、不完全定位?

4-3 为什么不允许出现欠定位?如何正确处理过定位?

4-4 什么是浮动支承(自位支承)?它与辅助支承的作用有何不同?

4-5 根据六点定位原理,试分析图4.66所示定位方案中定位元件所消除的自由度?有无过定位现象?如何改正?

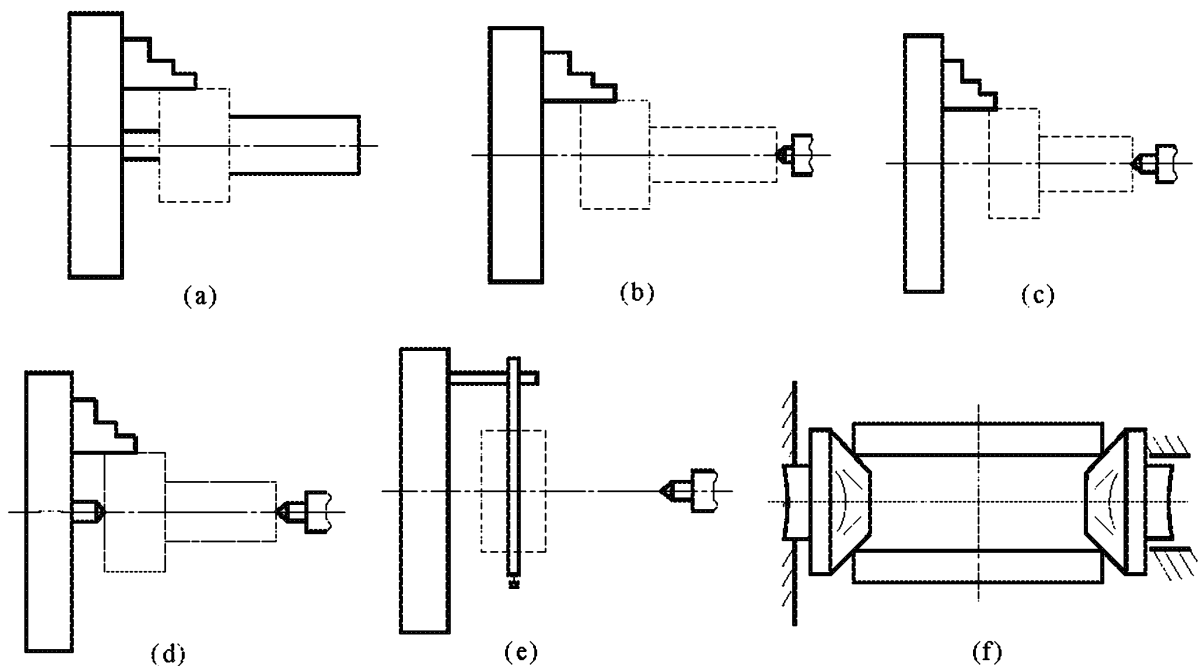
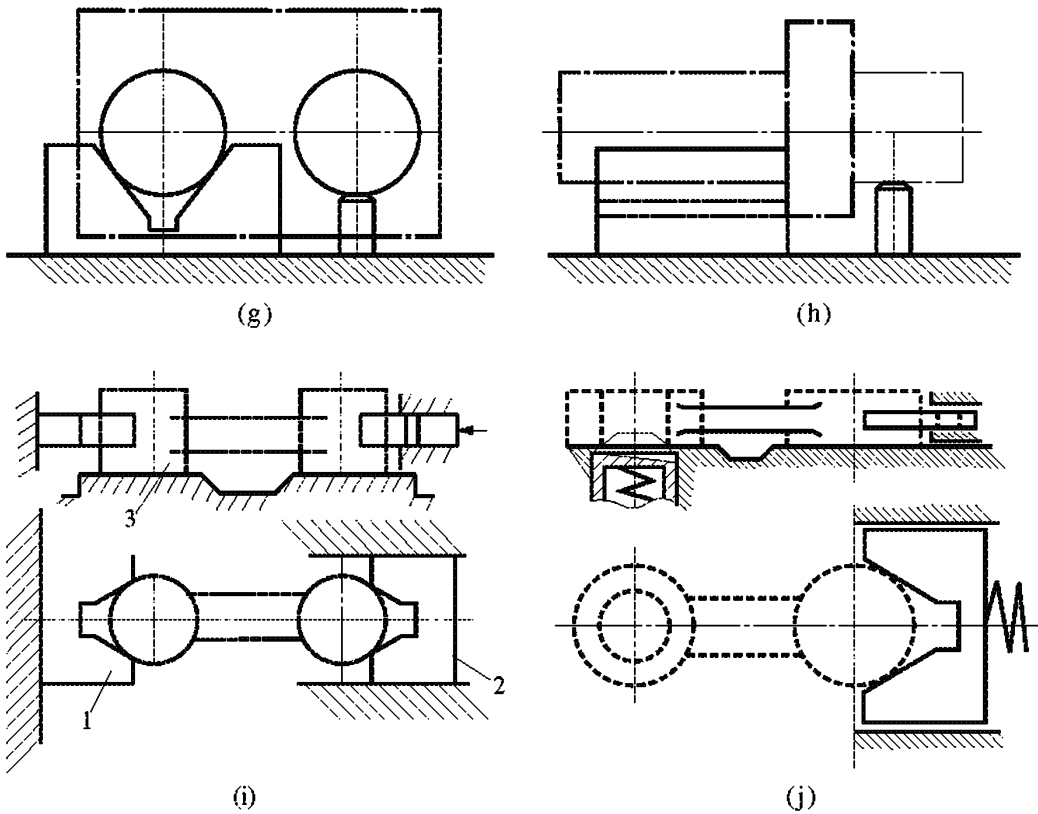


图 4.66 题 4 5



续图 4.66 题 4 5

4-6 什么是定位误差？试述产生定位误差的原因。

4-7 求图 4.67 中所示加工尺寸 A 的定位误差。

4-8 如图 4.68 所示，一批工件以孔 $\phi 20^{+0.021}$ mm 在心轴 $\phi 20^{-0.007}$ mm 上定位，在立式铣床上用顶针顶住心轴铣键槽。其中 $\phi 40h6(-0.016)$ 外圆、 $\phi 20H7(+0.021)$ 内孔及两端面均已加工合格，而且 $\phi 40h6$ 外圆对 $\phi 20H7$ 内孔的径向跳动在 0.02mm 之内。要保证铣槽的主要技术要求为：

- (1) 槽宽 $b = 12h9(-0.048)$ mm；
- (2) 槽距一端面尺寸为 $20h12(-0.21)$ mm；
- (3) 槽底位置尺寸为 $34.8h11(-0.16)$ mm；
- (4) 槽两侧面对外圆轴线的对称度误差不大于 0.10mm。

试分析其定位误差对保证各项技术要求的影响。

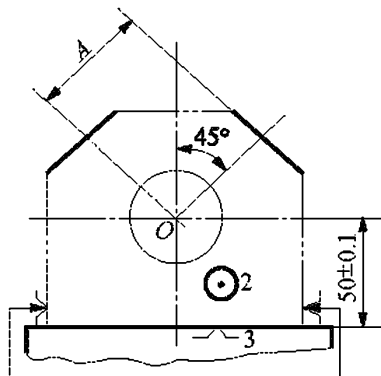


图 4.67 题 4 7

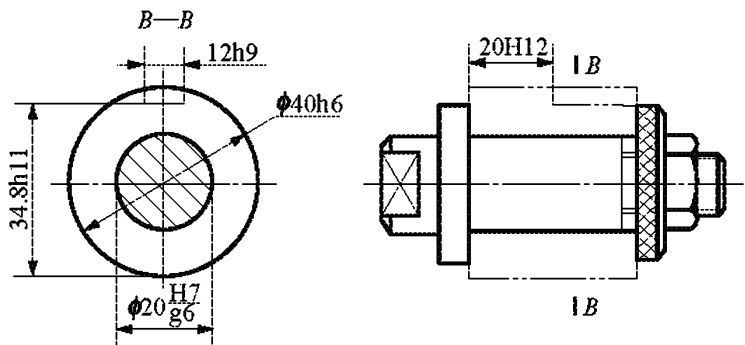


图 4.68 题 4 8

4-9 有一批套类零件,如图 4.69 所示,欲在其上铣一键。试分析计算各种定位方案中 h_1 、 h_2 、 h_3 的定位误差。

(1) 在可涨心轴上定位[图 4.69(b)]。

(2) 在处于水平位置的刚性心轴上具有间隙的定位,定位心轴直径为 $d_{\text{ET}_d}^{\text{ES}}$ [图 4.69(c)]。

(3) 在处于垂直位置的刚性心轴上具有间隙定位,定位心轴直径为 $d_{\text{ET}_d}^{\text{ES}}$ 。

如果工件内外圆同轴度为 t ,上述三种定位方案中, h_1 、 h_2 、 h_3 的定位误差各是多少?

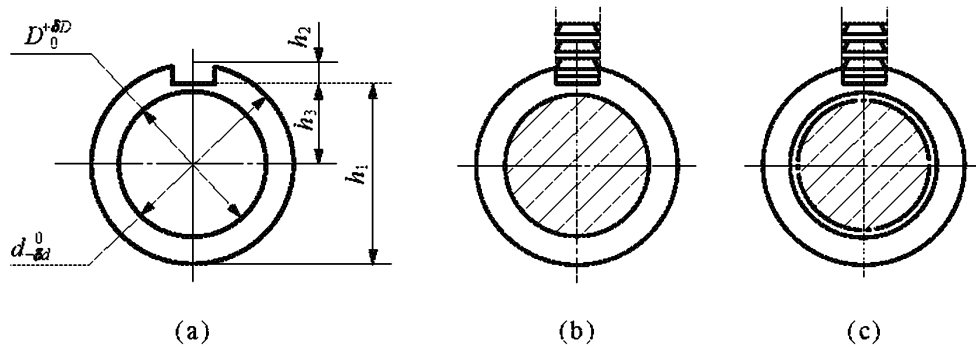


图 4.69 题 4 9

4-10 工件尺寸如图 4.70 图所示,欲钻 O 孔并保证尺寸 $30_{-0.1}^0 \text{mm}$ 。试分析计算图示各种定位方案的定位误差(加工时工件轴线处于水平位置), α 均为 90° 。

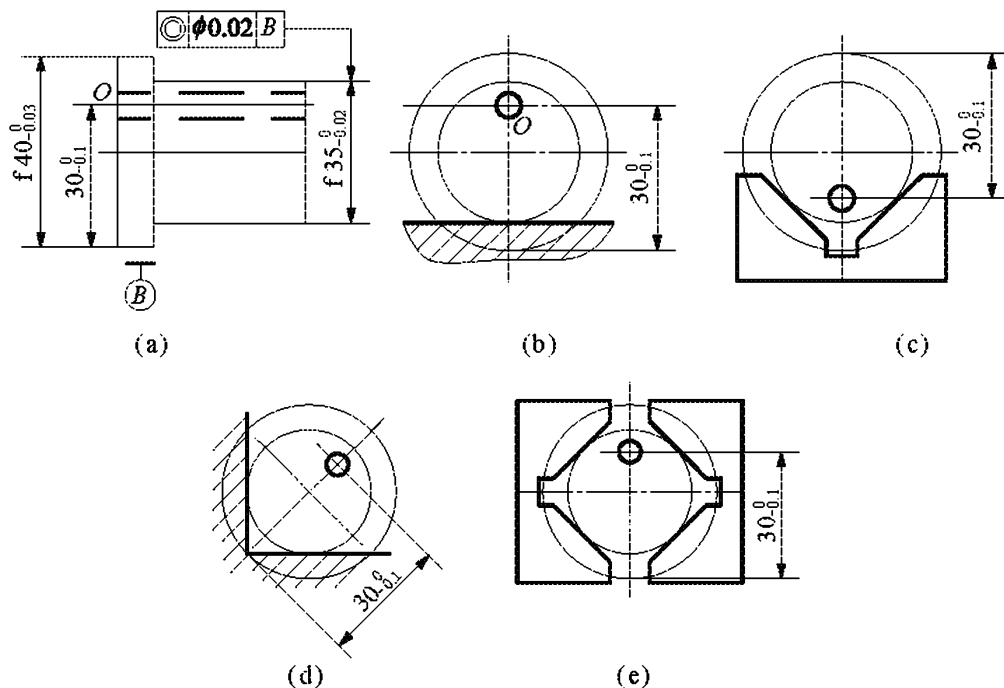


图 4.70 题 4 10

4-11 夹紧装置由哪几部分组成? 常用的夹紧装置有哪些? 各有什么特点?

4-12 设计夹紧装置时应注意哪些问题? 如何正确施加夹紧力?

4-13 分析图 4.71 中夹紧力的作用点和方向是否合理,为什么? 如何改进?

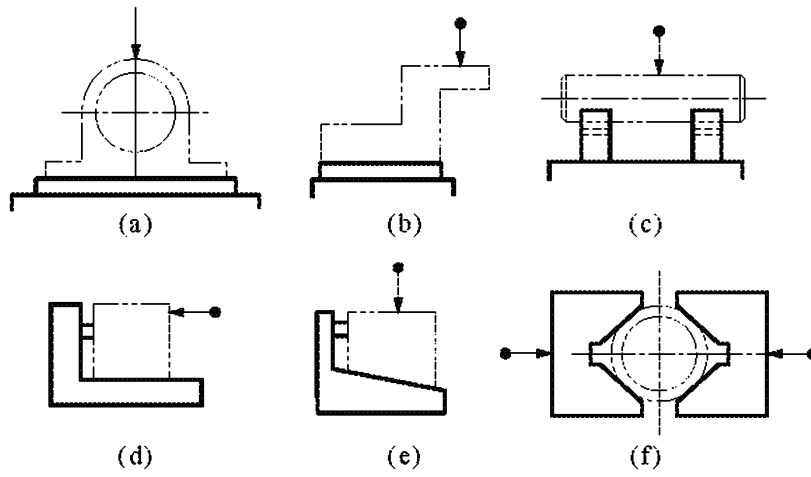


图 4.71 题 4 13

- 4-14 钻模的主要类型有哪些？各有什么特点？
- 4-15 根据铣床加工的特点，铣削夹具结构设计应注意哪些问题？
- 4-16 如何绘制夹具总图？夹具上应标注哪些尺寸和技术要求？如何确定夹具公差？

第 5 章 机械加工精度与表面质量

教学提示:机械加工质量是机械制造技术基础课程研究的重要问题之一。机械加工质量主要包括加工精度和加工表面质量两个方面。在本章中,机械加工精度主要分析工艺系统各环节中存在的原始误差对加工精度的影响、加工误差的统计分析方法及保证机械加工精度的措施;机械加工表面质量的内容涉及表面质量的含义、影响表面粗糙度及物理力学性能的主要因素及保证表面质量的措施,最后对机械加工中的振动作了简要分析。

教学要求:了解机械加工精度的概念及获得加工精度的方法,了解影响加工精度的原始误差因素并掌握单因素分析的方法,学会用工艺系统刚度理论分析工艺系统受力变形对加工精度的影响,了解工艺系统受热变形对加工精度的影响规律,掌握加工误差的统计分析方法及在生产实际中的应用,熟悉机械加工表面质量的含义及影响因素,了解机械振动的基本知识。

机器(或机械产品)质量是由零件的加工质量和机器的装配质量两方面保证的,其中机械零件的加工质量是保证机器质量的基础,直接影响到产品的使用性能和寿命。机械零件的加工质量一般用机械加工精度和加工表面质量两个重要指标来表示,本章将针对这两项内容进行讨论。

5.1 机械加工精度

5.1.1 概述

1. 机械加工精度的基本概念

机械加工精度是指零件加工后的实际几何参数(尺寸、形状和相互位置)与理想几何参数相符合的程度。符合的程度越高,则加工精度越高。理想几何参数是指图纸规定的理想零件的几何参数,即形状误差为零、位置误差为零、尺寸为零件尺寸公差带中心(平均值)。受加工过程中的各种因素影响,实际上不可能把零件做得与理想零件完全一致。零件加工后的实际几何参数(尺寸、形状和位置)对理想几何参数的偏差称为加工误差。通常用加工误差的数值表示加工精度高低。加工误差越小,加工精度越高;反之,加工精度越低。

零件加工精度包含 3 个方面的内容,即尺寸精度、形状精度和位置精度,这 3 方面的内容是既有区别又有联系的。一般来说,形状精度应高于相应的尺寸精度;大多数情况下,相互位置精度也应高于尺寸精度;但形状精度要求高时,相应的尺寸精度和位置精度不一定要高。

2. 获得加工精度的方法

1) 获得尺寸精度的方法

(1) 试切法。通过试切—测量—调整—再试切,反复进行直到被加工尺寸达到要求为止的加工方法称为试切法。试切法的生产效率不高,加工精度主要取决于工人的技术水平和计量器具的精度,故常用于单件小批量生产,特别是新产品试制中。

(2) 调整法。按工件预先规定的尺寸调整好机床、刀具、夹具和工件之间的相对位置,并在一批工件的加工过程中保持这个位置不变,以保证获得一定尺寸精度的方法称为调整法。影响调整法精度的主要因素有:测量精度、调整精度、重复定位精度等。当生产批量较大时,调整法有较高的生产率。调整法对调整工的要求高,对机床操作工的要求不高,常用于成批生产和大量生产中。

(3) 定尺寸刀具法。用刀具的相应尺寸来保证工件被加工部位尺寸精度的方法称为定尺寸刀具法。影响尺寸精度的主要因素有:刀具的尺寸精度、刀具与工件的位置精度等。定尺寸刀具法操作简便,生产效率高,加工精度也较稳定,可应用于各种生产类型。

(4) 自动控制法。将测量装置、进给装置和控制系统组成一个自动加工系统,加工过程中由自动测量装置测量工件的加工尺寸,并与所要求的尺寸进行比较后发出信号,信号通过转换、放大后控制机床或刀具作相应调整,直到达到规定的加工尺寸要求后,加工自动停止,这种方法称为自动控制法。早期的自动控制法多采用机械—液压控制系统,近年来,由于数控技术的发展,数控机床得到广泛的应用。在数控机床上,加工尺寸的获得由预先编好的程序自动控制,使工件获得规定的加工精度更为方便。特别是计算机数字控制(CNC),更为发展计算机辅助制造(CAM)奠定了基础。

2) 获得形状精度的方法

(1) 轨迹法。利用切削运动中刀尖的运动轨迹,形成被加工表面形状精度的方法称为轨迹法。刀尖的运动轨迹取决于刀具和工件的相对成形运动,因而所获得的形状精度取决于成形运动的精度。普通的车削、铣削、刨削、磨削均属于轨迹法。

(2) 仿形法。刀具按照仿形装置进给,对工件进行加工的方法称为仿形法。仿形法所获得的形状精度取决于仿形装置的精度和其他成形运动精度。仿形车、仿形铣等均属于仿形法加工。

(3) 成形法。利用成形刀具对工件进行加工的方法称为成形法。成形刀具代替一个成形运动,所获得的形状精度取决于刀具的形状精度和其他成形运动精度。如用成形刀具或砂轮的车、铣、刨、磨、拉等均属于成形法。

(4) 展成法(滚切法或范成法)。利用工件和刀具作展成切削运动进行加工的方法称为展成法。被加工表面是工件和刀具作展成切削运动过程中所形成的包络面,刀刃形状必须是被加工面的共扼曲线。所获得的形状精度取决于刀具的形状精度和展成运动精度。如滚齿、插齿、磨齿、滚花键等均属于展成法。

3) 获得位置精度的方法

机械加工中,被加工表面对其他表面位置精度的获得,主要取决于工件的装夹。工件的装夹方式,即获得位置精度的方法有直接找正装夹、划线找正装夹和用夹具装夹3种。

(1) 直接找正装夹。将工件直接放在机床上,用划针、百分表和直角尺或通过目测直接

找正工件在机床上的正确位置之后再夹紧。图 5.1 所示为用四爪卡盘装夹套筒，先用百分表按工件外圆找正，再夹紧工件进行加工外圆 A、B，保证 A、B 圆柱面的同轴度。此法的生产效率较低，对工人技术水平要求高，一般用于单件小批量生产中。

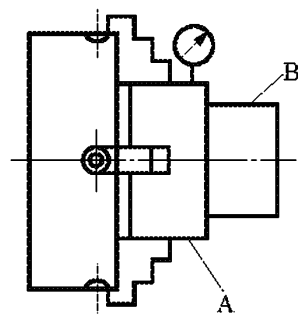


图 5.1 直接找正装夹

(2) 划线找正装夹。工件在切削加工前，预先在毛坯表面上划出加工表面的轮廓线，然后按所划的线将工件在机床上找正(定位)再夹紧。如图 5.2 所示的车床床身毛坯，为保证床身各加工面和非加工面的位置尺寸及各加工面的余量，可先在钳工台上划好线，然后在龙门刨床工作台上用千斤顶支撑床身毛坯，用划针按线找正并夹紧，再对床身底平面进行刨削加工。由于划线找正既费时，又需技术水平高的划线工，定位精度较低，故划线找正装夹只用于批量不大、形状复杂而笨重的工件，或毛坯尺寸公差很大而无法采用夹具装夹的工件。

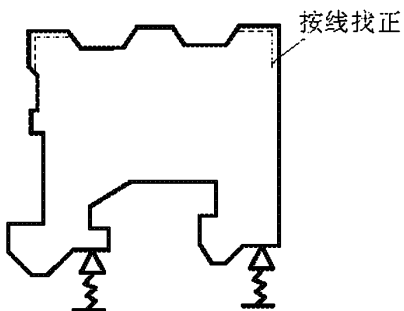


图 5.2 划线找正装夹

(3) 用夹具装夹。夹具是用于装夹工件的工艺装备(或装置)。夹具固定在机床上，工件在夹具上定位、夹紧以后便获得了相对刀具的正确位置。因此，工件定位方便，定位精度高而稳定，生产率高，广泛用于大批和大量生产中。

3. 影响加工精度的误差因素

1) 影响加工精度的原始误差因素

机械加工工艺系统是由机床、夹具、刀具和工件组成的。在机械加工过程中，工艺系统各组成部分本身存在各种形式的误差，这些误差在不同的加工条件下会以各种不同的方式(或扩大、或缩小)反映为工件的加工误差。工艺系统的误差是产生加工误差的根源，是“因”，工件的加工误差是“果”。因此，我们把工艺系统的误差称为原始误差。研究加工精度应从研究原始误差着手。在工艺系统的诸多原始误差中，一部分与工艺系统的初始状态有关，另一部分与切削过程有关。按照这些原始误差性质进行的归类如图 5.3 所示。

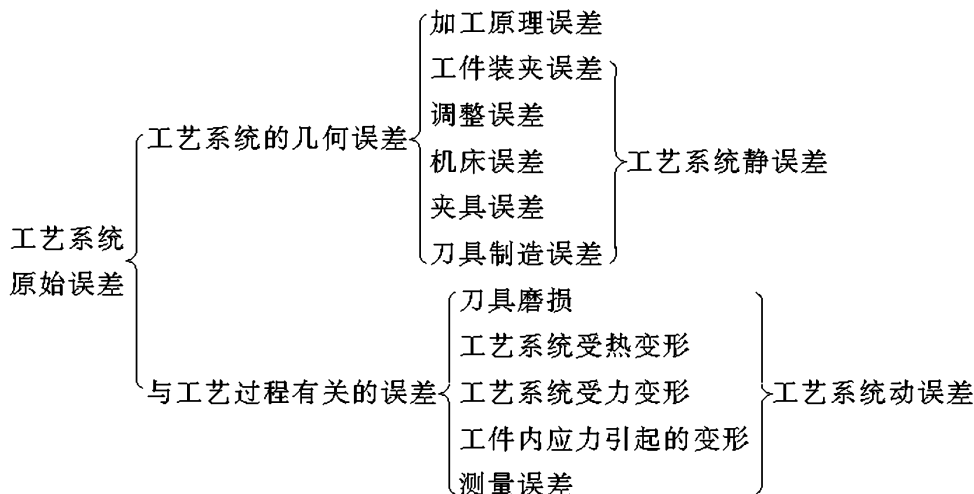


图 5.3 按原始误差归类

2) 原始误差与加工误差之间的关系

在加工过程中,各种原始误差的影响结果会使刀具和工件间正确的几何关系遭到破坏,引起加工误差。加工误差的大小决定于原始误差的大小和方向,下面以在卧式车床上车削外圆为例说明两者的关系。

如图 5.4 所示,车削时工件的回转中心为 O ,刀尖正确位置在 A 。设某一瞬时由于各种原始误差的影响,使刀尖位移到 A' 点, $\overline{AA'}$ 即为原始误差 δ ,它与 OA 间的夹角为 φ ,由此引起工件加工后的半径由 $R_0 = \overline{OA}$ 变为 $R = \overline{OA'}$ 。故半径上的加工误差 ΔR 为

$$\begin{aligned} \Delta R &= \overline{OA'} - \overline{OA} = \sqrt{R_0^2 + \delta^2 + 2R_0\delta\cos\varphi} - R_0 \\ &= \delta\cos\varphi + \frac{\delta^2}{2R_0} \end{aligned} \quad (5-1)$$

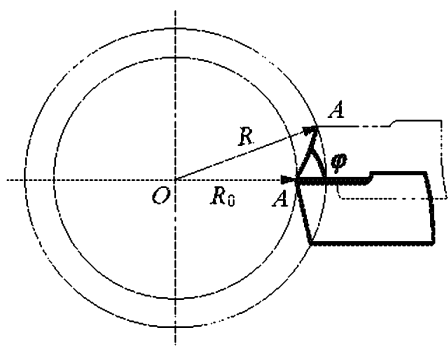


图 5.4 原始误差与加工误差的关系

可以看出:当 $\varphi = 0^\circ$ 时,即原始误差的方向为加工表面的法线方向时, $\Delta R = \delta$,引起的加工误差最大;当 $\varphi = 90^\circ$ 时,即原始误差的方向为加工表面的切线方向时, $\Delta R = \delta^2/2R_0$,引起的加工误差最小,通常可忽略不计。

为了便于分析原始误差对加工精度的影响程度,将原始误差对加工精度影响最大的方向,即通过切削刃的加工表面的法线方向称为误差敏感方向;而将原始误差对加工精度影响最小的方向,即通过切削刃的加工表面的切线方向称为误差不敏感方向。

4. 研究加工精度的方法

研究加工精度的方法有两种:

(1) 单因素分析法。即研究某一确定因素对加工精度的影响规律,将其余因素尽量缩小和控制,使之对结果影响最小而将研究对象因素放大。通过分析计算或测试、实验得出该因素与加工误差的关系,主要是分析各项误差单独的变化规律。

(2) 统计分析法。以生产中一批工件的实测结果为基础,用数理统计方法进行数据处理,从中找出加工误差产生和分布的规律,用于控制工艺过程的正常进行。此方法用于大批大量生产状态中,主要是研究各种误差综合影响条件下的加工误差变化规律。

在实际生产中,常把两种方法结合起来使用。单因素分析方法可以帮助获得误差因素的影响规律;统计分析法寻找判断产生加工误差的可能原因,然后运用单因素分析法,找出影响加工精度的主要原因,以便采取有效的工艺措施提高加工精度。

5.1.2 工艺系统几何误差对加工精度的影响

工艺系统的几何误差主要是指机床、刀具和夹具本身在制造中产生的误差,以及使用中产生的调整及磨损误差。这类误差在切削加工之前已经存在。

1. 加工原理误差

加工原理误差是指由于采用了近似的成形运动或近似的切削刃轮廓进行加工所产生的

加工误差,也称为理论误差。例如,用齿轮滚刀加工齿轮,一般都会存在两种加工原理误差:一种是刀具齿廓近似造型误差,这是由于制造上的困难,用阿基米得或法向直廓基本蜗杆代替渐开线基本蜗杆造成的;另一种是包络造型原理误差,这是由于滚刀齿数有限,加工齿形由许多微小折线段组成,与理论上的光滑渐开线有差异而造成的。所以,滚齿加工加工精度不高(7~10级精度的齿轮),但生产率高。

在实际生产中,采用近似的成形运动或近似的切削刃轮廓,虽然会带来加工原理误差,但往往可以简化机床或刀具的结构,降低生产成本,提高生产率。因此,只要将这种加工原理误差控制在允许的范围内,在实际加工过程中是完全可以利用的。

2. 机床误差

机床误差包括机床制造误差、磨损和安装误差。其中对加工精度影响较大的误差有:机床主轴系统回转误差、导轨误差和传动链误差。

1) 机床主轴回转误差

机床主轴是用来装夹工件或刀具,并将运动和动力传给工件或刀具的重要零件。主轴回转误差将直接影响被加工工件的形状精度和位置精度。主轴的回转误差是指主轴的实际回转轴线相对于平均回转轴线,在规定的测量平面内的变动量。变动量越小,主轴的回转精度越高;反之,回转精度越低。主轴回转误差可以分解为端面圆跳动、径向圆跳动和角度摆动3种基本形式。

(1) 径向圆跳动。指主轴瞬时回转轴线沿平行于平均回转轴线方向的径向运动,如图5.5(a)所示,它主要影响圆柱面的精度。

(2) 端面圆跳动(轴向窜动)。指主轴瞬时回转轴线沿平均回转轴线方向的轴向运动,如图5.5(b)所示。车端面时它使工件端面产生垂直度、平面度误差,它主要影响端面形状和轴向尺寸精度。

(3) 角度摆动。指瞬时回转轴线与平均回转轴线成一倾斜角度,但其交点位置固定不变的运动,如图5.5(c)所示。在不同横截面内,轴心运动轨迹相似,它主要影响圆柱面和端面的加工精度。

实际加工中的主轴回转误差是上述的3种基本形式的合成。所以它既影响工件圆柱面的形状精度,也影响端面的形状精度,同时还影响端面与内、外圆的位置精度。

影响主轴回转误差的主要因素是主轴的误差、轴承的误差、轴承的间隙、与轴承配合零件的误差以及主轴系统的径向不等刚度和热变形等。

对于滑动轴承主轴,影响主轴回转误差的直接因素是主轴轴颈的圆度误差、轴瓦内孔圆度误差(轴承孔的圆度误差)及配合间隙。而不同类型的机床,其影响因素也各不相同。对工件回转类机床(如车床、外圆磨床等),因切削力的方向不变,主轴回转时作用在支承上的作用力方向也不变化。此时主轴的支承轴颈的圆

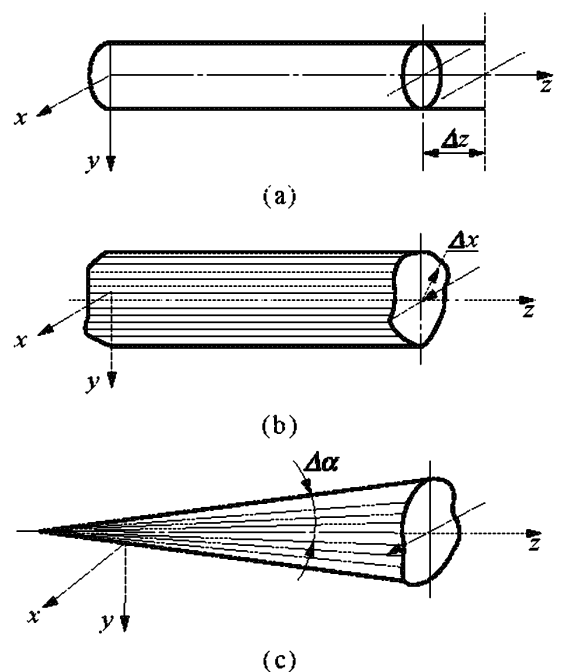


图 5.5 主轴回转误差的三种基本形式

度误差影响较大,而轴承孔的圆度误差影响较小,如图 5.6(a)所示。对刀具回转类机床(如钻床、镗床、铣床等),因切削力的方向随主轴旋转而改变,此时,主轴支撑轴颈的圆度误差影响很小,而轴承孔的圆度误差影响较大,如图 5.6(b)所示。

对于滚动轴承主轴,轴承内、外圈滚道的圆度误差对主轴回转误差影响较大。对于工件回转类机床,轴承内圈外滚道的圆度误差影响较大;而对于刀具回转类机床,则是轴承外环内滚道的圆度误差影响较大。轴承滚动体的不一致、滚动轴承的间隙也影响主轴的回转误差。

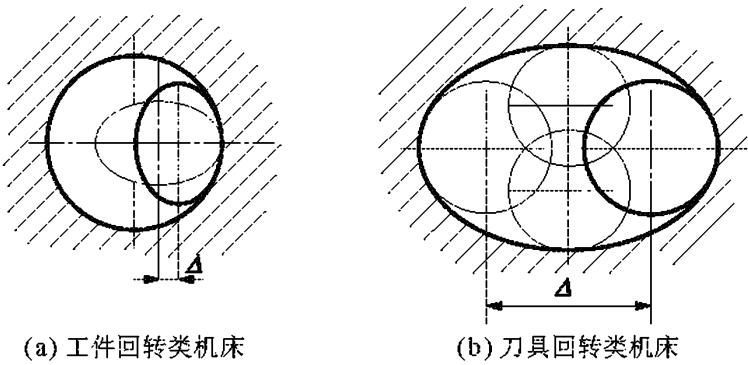


图 5.6 两类主轴回转误差的影响

2) 机床导轨误差

机床导轨副是实现直线运动的主要部件,其制造和装配精度是影响机床移动部件直线运动精度的主要因素,直接影响工件的加工精度。

导轨的误差对不同的加工方法和加工对象,将会产生不同的加工误差。分析导轨误差对加工精度的影响时,主要应考虑导轨误差引起刀具与工件在误差敏感方向上的相对位移。

(1) 导轨在水平面内的直线度误差对加工精度的影响。如图 5.7 所示,卧式车床导轨在水平面内有直线度误差 Δy ,在导轨全长上刀具相对于工件的正确位置将产生 Δy 的偏移量,使工件半径产生 $\Delta R = \Delta y$ 的误差。导轨在水平面内的直线度误差将直接反映在被加工工件表面的法线方向(误差敏感方向)上,对加工精度的影响最大。

(2) 导轨在垂直平面内的直线度误差对加工精度的影响。如图 5.8 所示,导轨在垂直平面内有直线度误差 Δz ,会使车刀在垂直面内发生位移。由于该方向为加工面的切线方向,即为误差不敏感方向,对加工精度的影响较小,其在半径上产生的误差 $\Delta R \approx \Delta z^2 / 2R$,一般可忽略不计。

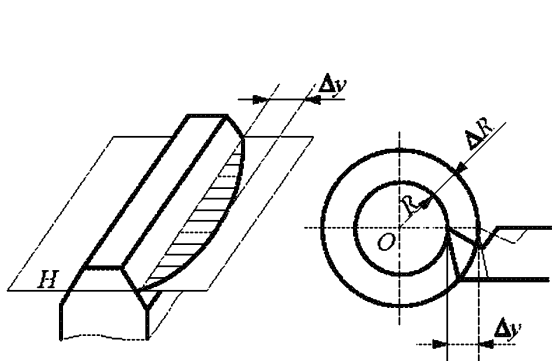


图 5.7 导轨水平面内的直线度误差对加工精度的影响

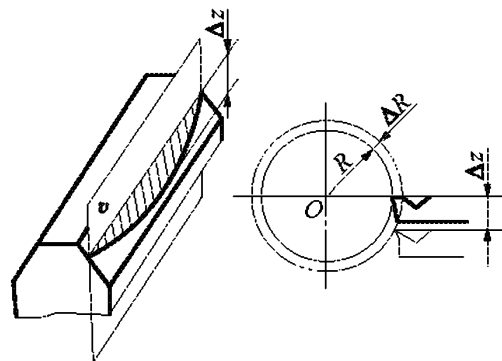


图 5.8 导轨垂直面的直线度误差对加工精度的影响

(3) 前后导轨的平行度误差(扭曲)。车床两导轨的平行度误差(扭曲),使前、后导轨在纵向不同位置有不同的高度差。由于这种误差的作用,使得切削过程中车床溜板沿导轨纵向移动时发生倾斜,从而使刀尖相对于工件产生摆动,造成加工表面的形状误差(圆柱度误差),如图 5.9 所示。由几何关系可知,工件半径产生的误差为 $\Delta R = \Delta y = H\Delta / B$

式中, H ——车床中心高度;

B ——导轨宽度;

Δ ——前后导轨的扭曲量(平行度)。

一般车床的 $H/B \approx 2/3$, 外圆磨床的 $H/B \approx 1$, 所以导轨扭曲量引起的加工误差是不可忽略的。

3) 导轨与主轴回转轴线的位置误差

若车床导轨与主轴回转轴线在水平面内有平行度误差, 车出的内外圆柱面会产生锥度误差。由于该方向为误差敏感方向, 对加工精度的影响比较大; 若车床导轨与主轴回转轴线在垂直面内有平行度误差, 车出的内外圆柱面会产生双曲线形误差, 但该方向为误差不敏感方向, 对加工精度影响较小, 可忽略不计。

车端面时, 两者出现垂直度误差, 会引起加工面的平面度误差。

除了导轨本身的制造误差之外, 导轨磨损是造成导轨精度下降的主要原因。选用合理的导轨形状和导轨组合形式, 采用耐磨合金铸铁导轨、镶钢导轨、贴塑导轨、滚动导轨以及对导轨进行表面淬火处理等措施均可提高导轨的耐磨性。

4) 传动链误差

传动链误差是指内联系传动链始末两端传动元件之间相对运动的误差。它是在螺纹加工或用展成法加工齿轮、蜗轮等工件时, 影响加工精度的主要因素。

例如, 在滚齿机上用单头滚刀加工直齿轮时, 要求滚刀与工件之间具有严格的运动关系: 即滚刀转一转, 工件转过一个齿; 又如, 在车床上加工螺纹, 要求工件每转一转, 刀具必须移动一个导程, 这些运动之间的速比关系将直接影响加工精度。

当传动链中的各传动元件, 如齿轮、蜗轮、蜗杆等, 因有制造误差(主要影响运动精度)、装配误差(主要是装配偏心)和磨损时, 就会破坏正确运动关系, 使工件产生误差。各元件在传动链中的位置不同, 其转角误差对加工精度影响程度也不一样。如传动链为升速传动, 则传动元件的转角误差将被放大; 反之, 则缩小。在一般传动链中, 末端元件的影响误差最大, 故末端元件的精度要求应比中间传动件的精度高 1~2 级。

3. 工艺系统的其他几何误差

1) 刀具误差

刀具误差对加工精度的影响, 主要表现为刀具的制造误差和刀具的磨损, 其影响程度随刀具的种类不同而异。机械加工中常用的刀具有般刀具、定尺寸刀具和成形刀具。一般刀具, 如普通车刀、单刃镗刀、刨刀及端面铣刀等的制造误差对加工无直接影响; 定尺寸刀具, 如钻头、铰刀、键槽铣刀及拉刀等的尺寸误差直接影响加工工件的尺寸精度; 成形刀具, 如成形车刀、成形铣刀及齿轮刀具等的制造误差将直接影响被加工表面的形状精度。任何刀具在加工过程中都不可避免地要产生磨损, 并由此影响工件的尺寸和形状精度。

2) 夹具误差

夹具误差主要包括: 定位元件、刀具导向件、分度机构、夹具体等的制造误差; 夹具装配

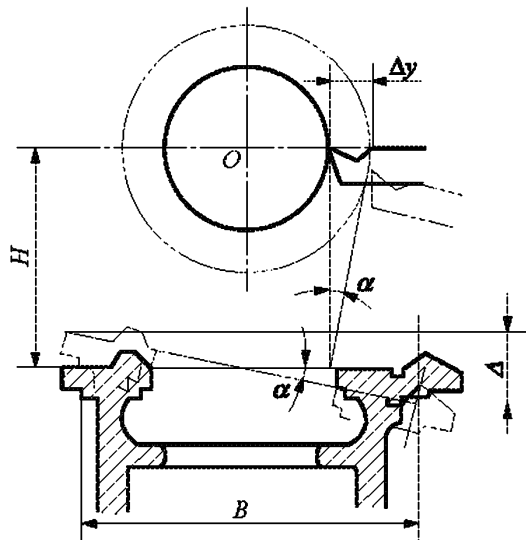


图 5.9 导轨扭曲对加工精度的影响

后,以上各种元件工作面之间的相对位置误差;夹具使用过程中工作表面的磨损。夹具误差将直接影响工件加工表面的位置精度或尺寸精度。

3) 装夹误差

工件的装夹误差是指定位误差和夹紧误差,将直接工件加工表面的位置精度或尺寸精度。

4) 测量误差

工件在加工过程中,要用各种量具、量仪进行检验测量,再根据测量结果对工件进行试车或调整机床。量具本身的制造误差、测量时的接触力、温度及目测正确度等,都直接影响加工误差。因此,要正确地选择和使用量具,保证测量精度。

5) 调整误差

在机械加工的各个工序中,需要对机床、夹具及刀具进行调整。调整误差的来源,视不同加工方法而异。

(1) 试切法。单件小批量生产中,通常采用试切法调整。引起调整误差的因素有:测量误差、机床进给机构的位移误差及试切时与正式切削时切削层厚度不同的影响。

(2) 调整法。在成批、大量生产中,广泛采用调整法调整。采用调整法对工艺系统进行调整时,也要以试切为依据。因此,上述影响试切法调整精度的因素,同样对调整法也有影响。此外,影响调整精度的因素还有:用定程机构调整时,调整精度取决于行程挡块、靠模及凸轮等机构的制造精度和刚度以及与其配合使用的离合器、控制阀等的灵敏度;用样件或样板调整时,调整精度取决于样件或样板的制造、安装和对刀精度。

5.1.3 工艺系统受力变形对加工精度的影响

机械加工中,工艺系统在切削力、夹紧力、传动力、惯性力和重力等的作用下,将产生相应变形,使工件产生加工误差。例如,在车床上用顶尖装夹车削细长轴(不用跟刀架或中心架)时,会产生中间粗、两端细的腰鼓形形状误差,如图 5.10 所示。

工艺系统在外力作用下产生变形的大小,不仅取决于作用力的大小,还取决于工艺系统的刚度。

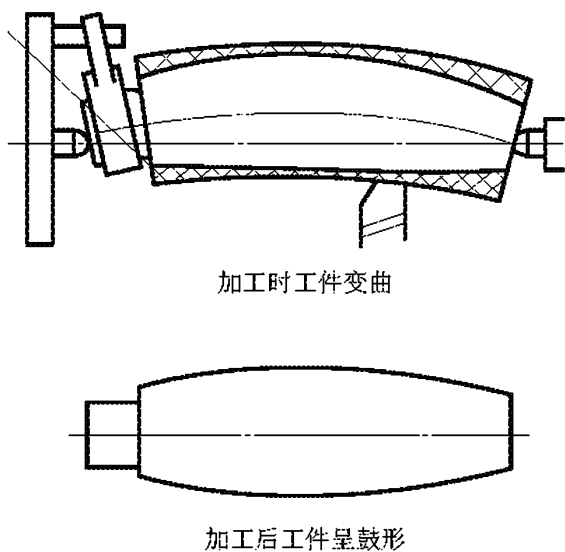


图 5.10 受力变形对加工精度的影响

1. 工艺系统的刚度

1) 基本概念

刚度一般是指物体或系统抵抗变形的能力,用加到物体的作用力 F 与沿此作用力方向上产生的位移(或变形) y 的比值表示,即

$$K = \frac{F}{y} \quad (5-2)$$

K 越大,物体或系统抵抗变形能力越强,加工精度就越高。

在切削加工中,在各种外力作用下,工艺系统各组成环节将在各个受力方向产生相应变形,使刀具和工件的相对位置发生改变。对于工艺系统受

力变形,主要研究误差敏感方向上的位移量。因此,工艺系统刚度 K_{xt} 定义为:工件和刀具的法向切削分力 F_p 与刀具在总切削力作用下在该方向上的相对位移 y_{xt} 的比值,即

$$K_{xt} = \frac{F_p}{y_{xt}} \quad (5-3)$$

在上述工艺系统刚度定义中,力和变形是在静态下测定的,因此 K_{xt} 又称工艺系统静刚度。由于法向位移 y_{xt} 是在总切削力作用下工艺系统综合变形的结果,因此,有可能出现变形方向与 F_p 的方向不一致的情况,当 F_p 与 y_{xt} 方向相反时,即出现负刚度。负刚度使刀尖扎入工件表面(扎刀),还会使工件产生振动,应尽量避免,如图 5.11 所示

2) 工艺系统刚度的计算

工艺系统在某处的法向总变形量 y_{xt} 应是各个组成环节在同一位置处的法向变形的叠加,即

$$y_{xt} = y_{jc} + y_{jj} + y_d + y_g \quad (5-4)$$

式中, y_{xt} —— 工艺系统的总变形量;

y_{jc} —— 机床的变形量;

y_{jj} —— 夹具的变形量;

y_d —— 刀具的变形量;

y_g —— 工件的变形量。

根据刚度定义,工艺系统各组成环节的刚度为

$$K_{jc} = \frac{F_p}{y_{jc}}, K_{jj} = \frac{F_p}{y_{jj}}, K_d = \frac{F_p}{y_d}, K_g = \frac{F_p}{y_g} \quad (5-5)$$

式中, K_{jc} 、 K_{jj} 、 K_d 、 K_g 分别为机床、夹具、刀具、工件的刚度。

代入式(5-3),可得工艺系统刚度计算的一般式为

$$K_{xt} = \frac{1}{\frac{1}{K_{jc}} + \frac{1}{K_{jj}} + \frac{1}{K_d} + \frac{1}{K_g}} \quad (5-6)$$

因此,已知工艺系统各组成环节的刚度,即可求得工艺系统的刚度。对于工件和刀具,一般来说都是一些简单构件,可用材料力学公式近似计算。如车刀的刚度可以按悬臂梁计算,用三爪卡盘夹持工件,工件的刚度可以按悬臂梁计算;用顶尖加工细长轴,工件的刚度可以按简支梁计算等;对于机床和夹具,结构比较复杂,通常用实验法测定其刚度。

2. 工艺系统受力变形对加工精度的影响

当工艺系统受力变形引起刀具相对于工件的位移量在一次进给中是常量时,只会造成工件尺寸误差,可通过尺寸调整予以补偿。但当受力变形引起刀具相对于工件的位移量不是常量时,工件将产生形状误差。下面主要讨论受力变形引起的工件形状误差。

工艺系统受力变形对加工精度的影响可以归纳为如下几种形式:

1) 切削力作用点位置变化引起的工件形状误差

以在车床两顶尖间加工光轴为例,假定切削过程中切削力为常值,车刀悬伸很短,受力变形可忽略,把顶尖、刀架都看成机床的一部分。因此工艺系统的总变形为

$$y_{xt} = y_{jc} + y_g$$

(1) 机床的变形。

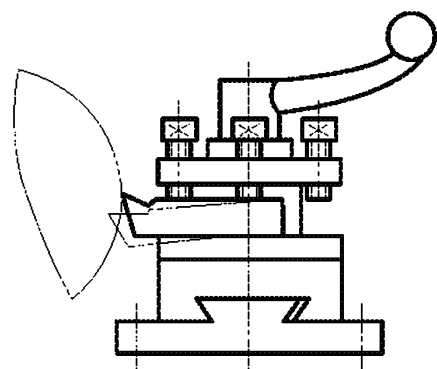


图 5.11 工艺系统的负刚度现象

如图 5.11 所示,假定工件短而粗,即其刚度很好,其受力变形相对机床的变形要小得多,可忽略不计。则工艺系统的总变形主要取决于机床,即机床头架、尾座(包括顶尖)、刀架的变形。若头架和尾座的刚度分别为 K_{tj} 、 K_{wz} , 则头架和尾座的变形可用下式表示:

$$y_{tj} = \frac{F_A}{K_{tj}} = \frac{F_p}{K_{tj}} \left(\frac{L-x}{L} \right), \quad y_{wz} = \frac{F_B}{K_{wz}} = \frac{F_p}{K_{wz}} \left(\frac{x}{L} \right)$$

式中, F_A 、 F_B 为切削力 F_c 进给到如图 5.12 所示的 x 位置处时,引起的头架及尾座处的作用力。由图 5.12 中几何关系,刀具切削点处工件轴线的位移为

$$y_x = y_{tj} + \Delta x = \frac{F_p}{K_{tj}} \left(\frac{L-x}{L} \right) + \left[\frac{F_p}{K_{wz}} \left(\frac{x}{L} \right) - \frac{F_p}{K_{tj}} \left(\frac{L-x}{L} \right) \right] \times \frac{x}{L} = \left(\frac{x}{L} \right)^2 \frac{F_p}{K_{wz}} + \left(\frac{L-x}{L} \right)^2 \frac{F_p}{K_{tj}}$$

若刀架的刚度为 K_{dj} , 切削力 F_p 作用于 x 处引起的刀架的变形为 y_{dj} , 则工艺系统的总变形,即机床变形为

$$y_{jc} = y_x + y_{dj} = F_p \left[\left(\frac{x}{L} \right)^2 \frac{1}{K_{wz}} + \left(\frac{L-x}{L} \right)^2 \frac{1}{K_{tj}} + \frac{1}{K_{dj}} \right] \quad (5-7)$$

工艺系统的刚度,即机床刚度为

$$K_{jc} = \frac{1}{\left(\frac{x}{L} \right)^2 \frac{1}{K_{wz}} + \left(\frac{L-x}{L} \right)^2 \frac{1}{K_{tj}} + \frac{1}{K_{dj}}} \quad (5-8)$$

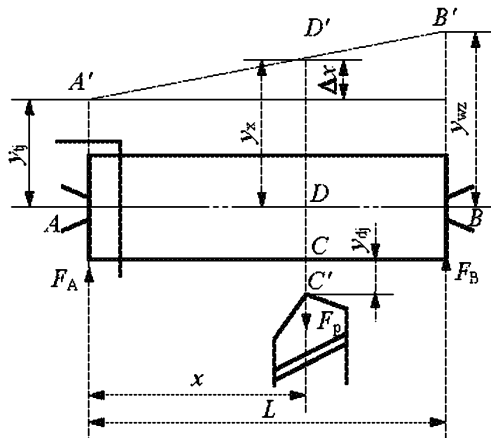


图 5.12 工艺系统的位移随受力点位置变化

由上述关系可知,机床的刚度或变形是随受力点位置而变化的。变形大的地方(刚度小的部位)切除的金属层薄;变形小的地方(刚度大的部位)切除的金属层厚。所以,由于机床受力变形而产生的形状误差为两端粗、中间细的鞍形圆柱度误差。

(2) 工件的变形。

若在两顶尖间车削细长轴,由于工件细长、刚度小,在切削力作用下,其变形大大超过机床、夹具和刀具所产生的变形。因此,机床、夹具和刀具的受力变形可忽略不计,工艺系统的刚度主要取决于工件的变形。工件的变形一般

可按材料力学知识计算。工件可视为简支梁,在距头架 x 处工件的变形 y_g 为

$$y_g = \frac{F_p (L-x)^2 x^2}{3EI} \quad (5-9)$$

工件的刚度为

$$K_g = \frac{3EI}{(L-x)^2 x^2} \quad (5-10)$$

显然,当 $x=0$ 或 $x=L$ 时, $y_g=0$; 当 $x=L/2$ 时,工件刚度最小,变形最大。加工后工件产生两端细、中间粗的腰鼓形圆柱度误差。

(3) 工艺系统的变形。

当同时考虑机床和工件的变形时,工艺系统的总变形为二者的叠加:

$$y_{xt} = y_{jc} + y_g = F_p \left[\left(\frac{x}{L} \right)^2 \frac{1}{K_{wz}} + \left(\frac{L-x}{L} \right)^2 \frac{1}{K_{tj}} + \frac{1}{K_{dj}} + \frac{(L-x)^2 x^2}{3EIL} \right] \quad (5-11)$$

工艺系统的刚度为

$$K_{xt} = \frac{1}{\left(\frac{x}{L}\right)^2 \frac{1}{K_{wz}} + \left(\frac{L-x}{L}\right)^2 \frac{1}{K_{vj}} + \frac{1}{K_{dj}} + \frac{(L-x)^2 x^2}{3EIL}} \quad (5-12)$$

由上述可知,工艺系统刚度随受力点位置变化而变化,因此各点位移量也不相同。加工后,工件表面产生形状误差。不同类型的机床,由于切削力作用点的变化而引起刚度的变化形式各不相同,其造成的加工误差也有区别。例如,立式车床、龙门刨床、龙门铣床等的横梁及刀架、铣床滑枕内的主轴等,其刚度均随刀架位置或滑枕伸出长度不同而异,对它们的分析一般也可按照上面的方法进行。

2) 切削力大小变化引起的工件形状误差

在切削过程中,毛坯余量和材料硬度的不均匀,会引起切削力大小的变化。工艺系统由于受力大小的不同,变形的大小也相应发生变化,从而产生加工误差。

如图 5.13 所示,车削一个有椭圆形状误差的短圆柱毛坯,刀具调整到一定的背吃刀量(图中虚线圆位置)。由于毛坯的形状误差,在工件每一转中,背吃刀量在 $a_{p2} \sim a_{p1}$ 之间变化。因此切削分力 F_p 也随着背吃刀量 a_p 的变化由最小(F_{p2})变到最大(F_{p1});工艺系统将产生相应的变形,即由 y_2 变到 y_1 (刀尖相对于工件在法线方向的位移变化)。工件转一周,工艺系统变形不同,加工后工件表面仍有椭圆形的圆度误差。由此可见,当车削具有圆度误差 $\Delta_m = a_{p1} - a_{p2}$ 的工件毛坯时,由于工艺系统受力变形的变化而使工件产生与毛坯形状相似的圆度误差 $\Delta_g = y_1 - y_2$,这种现象称为“误差复映”。因误差复映现象而使工件产生的加工误差称为复映误差。

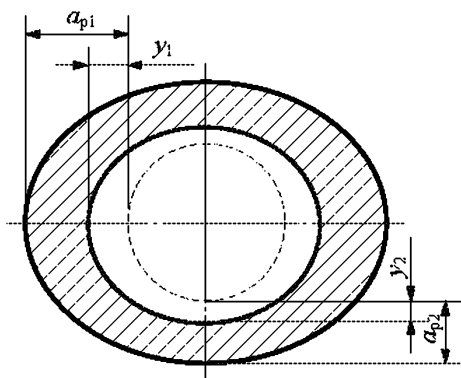


图 5.13 毛坯形状误差的复映

工件误差对毛坯误差的复映程度用误差复映系数 ϵ 表示,即为工件误差 Δ_g 与毛坯误差 Δ_m 的比值:

$$\epsilon = \frac{\Delta_g}{\Delta_m}$$

设工艺系统的刚度为 K_{xt} ,则工件的圆度误差为

$$\Delta_g = y_1 - y_2 = \frac{1}{K_{xt}} (F_{p1} - F_{p2}) \quad (5-13)$$

由切削力的经验公式可知:

$$F_p = \lambda C_{Fp} a_p f^{0.75}$$

式中, λ —— $\lambda = F_p / F_c$,一般取 $\lambda = 0.4$;

C_{Fp} ——与工件材料、刀具几何参数及切削条件有关的系数;

a_p ——背吃刀量;

f ——进给量。

由此引起工艺系统的受力变形为

$$y_1 = \frac{\lambda C_{Fp} a_{p1} f^{0.75}}{K_{xt}}, \quad y_2 = \frac{\lambda C_{Fp} a_{p2} f^{0.75}}{K_{xt}}$$

代入式(5-13)得工件误差为

$$\Delta_g = y_1 - y_2 = \frac{\lambda C_{Fp} f^{0.75}}{K_{xt}} (a_{p1} - a_{p2}) = \frac{\lambda C_{Fp} f^{0.75}}{K_{xt}} \Delta_m \quad (5-14)$$

于是有：

$$\epsilon = \frac{\Delta_g}{\Delta_m} = \frac{\lambda C_{Fp} f^{0.75}}{K_{xt}} \quad (5-15)$$

由于 Δ_g 总是小于 Δ_m ，所以误差复映系数 ϵ 是一个小于 1 的正数。它定量地反映了毛坯误差经过加工后减少的程度，它与工艺系统的刚度成反比，工艺系统的刚度越大，则 ϵ 越小，毛坯复映到工件上的误差也越小。减小径向切削力或增大工艺系统的刚度都可使 ϵ 减小。例如，减小进给量 f ，既可以减小 ϵ ，又可提高加工精度，但切削时间增加。如果设法增大工艺系统刚度，如车削长轴时采用跟刀架，不但能减小加工误差，而且可以在保证加工精度前提下相应增大进给量，提高生产率。

增加走刀次数可大大减小工件的复映误差。设每次走刀的误差复映系数为 $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n$ ，则

$$\Delta_{g1} = \epsilon_1 \Delta_m, \Delta_{g2} = \epsilon_2 \Delta_{g1} = \epsilon_1 \epsilon_2 \Delta_m, \dots, \Delta_{gn} = \epsilon_1 \epsilon_2 \dots \epsilon_n \Delta_m$$

总误差复映系数 $\epsilon_\Sigma = \epsilon_1 \epsilon_2 \dots \epsilon_n$ ，则 $\Delta_g = \epsilon_\Sigma \Delta_m$ 。

因为 $\epsilon < 1$ ，所以经多次走刀后， ϵ_Σ 降至一个极小的数值，工件加工误差也逐渐降低到允许的范围。这也是为什么工件加工要多次走刀，经过粗、精加工才能达到较高加工精度的原因。

3) 切削过程中受力方向变化引起的工件形状误差

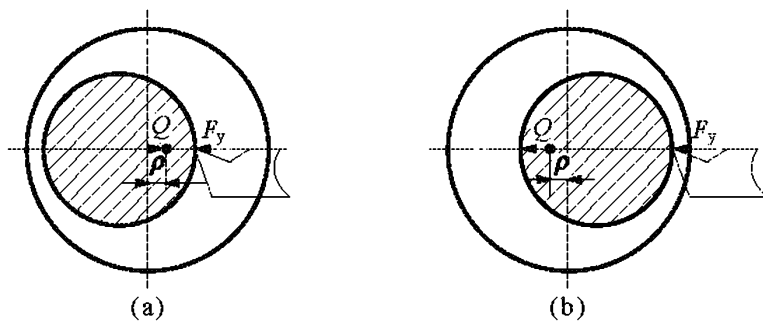


图 5.14 惯性力所引起的加工误差

切削加工中高速旋转的零部件（含夹具、工件和刀具等）不平衡将产生离心力，在每一转中不断改变方向，如图 5.14 所示。它在加工误差的敏感方向上的分力大小不断变化，其方向与切削力的方向有时相同，有时相反，从而引起工艺系统的受力变形也随之变化，使工件产生形状误差。加工后工件成心脏线形。

对于形状精度要求较高的工件，加工过程中传动力的影响也是不可忽视的。在车、磨轴类工件时，常采用单爪拨盘带动工件旋转。传动力和惯性力一样，在每一转中不断改变方向，加工后引起的误差与惯性力相似。为了减小其影响，在精密磨削时常采用双拨爪的拨盘带动工件。

4) 其他力引起的加工误差

(1) 夹紧力引起的加工误差。

被加工件在装夹过程中，由于刚度较低或着力点不当，都会引起工件变形，造成加工误差。特别是薄壁套、薄板件，易产生加工误差。

(2) 重力引起的加工误差。

在工艺系统中，零部件的自重也会引起变形。例如，龙门刨床、龙门铣床刀架导轨横梁的变形，铣镗床镗杆伸长而下垂变形等，都会造成工件的加工误差。

3. 减少工艺系统受力变形的途径

减小工艺系统受力变形是保证加工精度的有效途径之一。根据生产实际情况,可采取以下几方面措施。

1) 提高接触刚度

一般部件的接触刚度大大低于实体零件本身的刚度,所以提高接触刚度是提高工艺系统刚度的关键。常用的方法是改善工艺系统主要零件接触面的配合质量,如机床导轨副的刮研、配研顶尖锥体与主轴和尾座套筒锥孔的配合面、多次修研加工精密零件用的中心孔等。通过刮研可以改善配合的表面粗糙度和形状精度,使实际接触面积增加,从而有效提高接触刚度。

提高接触刚度的另一个措施是预加载荷,这样可消除配合面间的间隙,增加接触面积,减少受力后的变形。此方法常用于各类轴承的调整。

2) 提高工件的刚度

对刚度较低的工件,如叉架类、细长轴等,如何提高工件的刚度是提高加工精度的关键。其主要措施是减小支承间的长度,如安装跟刀架或中心架。图 5.15(a)所示是车削较长工件时采用中心架增加支承,图 5.15(b)是车细长轴时采用跟刀架增加支承以提高工件的刚度。

3) 提高机床部件刚度

在切削加工中,有时由于机床部件刚度低而产生变形和振动,影响加工精度和生产率的提高。图 5.16(a)所示是在转塔车床上采用固定导向支承套;图 5.16(b)所示是采用转动导向支承套,用加强杆和导向支承套提高部件的刚度。

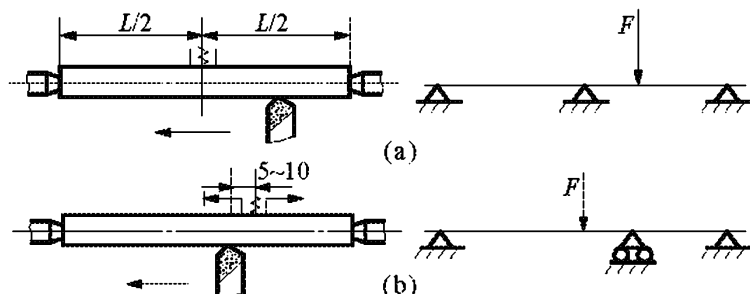


图 5.15 增加支承以提高工件的刚度

4) 合理装夹工件,减少夹紧变形

对刚性较差的工件选择合适的夹紧方法,能减小夹紧变形,提高加工精度。如图 5.17 所示,薄壁套未夹紧前内外圆都是正圆形,由于夹紧方法不当,夹紧后套筒成三棱形[图 5.17(a)],镗孔后内孔呈正圆形[图 5.17(b)],松开卡爪后镗孔的内孔又变为三棱形[图 5.17(c)]。为减小夹紧变形,应使夹紧力均匀分布,如图 5.17(d)所示,采用开口过渡环的专用卡爪。

在夹具设计或工件的装夹中,应尽量使作用力通过支承面或减小弯曲力矩,以减小夹紧变形。

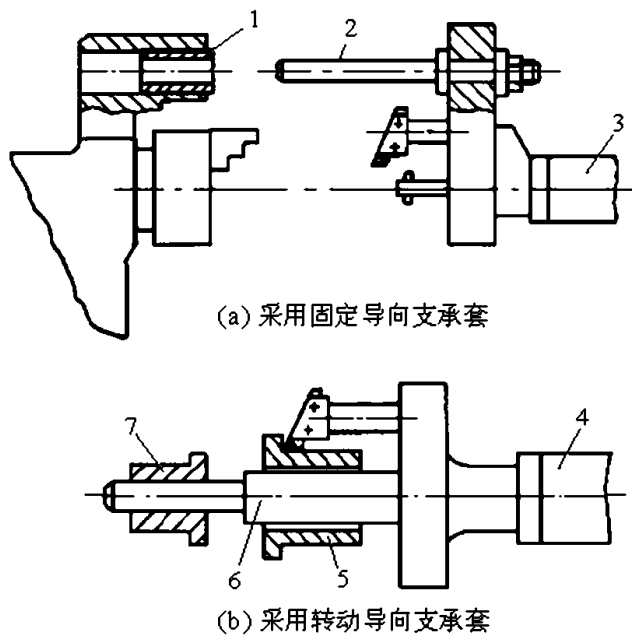


图 5.16 提高机床部件刚度的装置

- 1 固定导向支承套 2、6 加强杆 3、4 六角刀架
5 工件 7 转动导向支承套

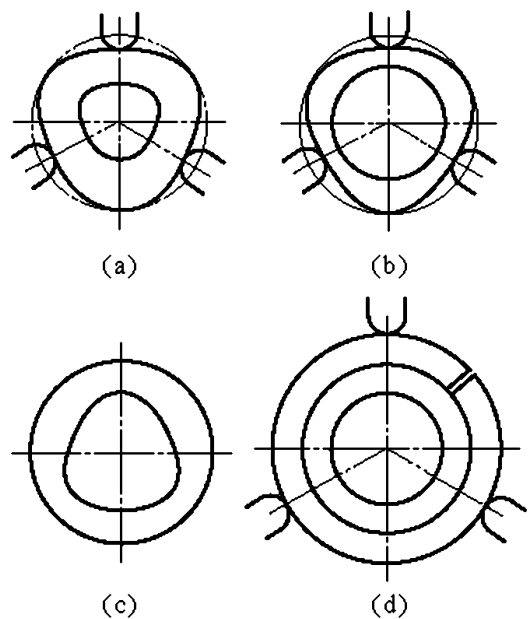


图 5.17 夹紧变形所引起的加工误差

5.1.4 工艺系统受热变形对加工精度的影响

在机械加工过程中,工艺系统会受到各种热源的影响而产生热变形,从而破坏刀具与工件的正确几何关系和运动关系,造成工件的加工误差。据统计,在精密加工中,由于热变形引起的加工误差约占总加工误差的40%~70%。高效、高精度、自动化加工技术的发展,使工艺系统热变形问题变得更加突出,已成为机械加工技术进一步发展的一个重要的研究课题。

1. 工艺系统的热源

引起工艺系统受热变形的“热源”大体分为内部热源和外部热源两大类。

内部热源主要指切削热和摩擦热,它们产生于工艺系统的内部,其热量主要是以热传导的形式传递的。外部热源主要是指工艺系统外部的、以对流换热为主要形式的环境温度(它与气温变化、通风、空气对流和周围环境等有关)和各种辐射热(包括由阳光、照明、暖气设备等发出的辐射热)。

切削热是由于切削过程中,切削层金属的弹性、塑性变形及刀具与工件、切屑之间摩擦面产生的,这些热量将传给工件、刀具、夹具、切屑、切削液和周围介质,其分配百分比随加工方法不同而异。在车削时,大量的切削热由切屑带走,传给工件的为10%~30%,传给刀具的为1%~5%。孔加工时,大量切屑滞留在孔中,使大量的切削热传入工件。磨削时,由于磨屑小,带走的热量很少,故大部分传入工件。

摩擦热主要是机床和液压系统中的运动部分产生的,如电动机、轴承、齿轮等传动副、导轨副、液压泵、阀等运动部分产生的摩擦热。摩擦热是机床热变形的主要热源。

工艺系统的外部热源,主要是指环境温度变化和热辐射的影响。如靠近窗口的机床受到日光照射的影响,不同的时间机床温升和变形就会不同,而日光照射通常是单面的或局部

的,其受到照射的部分与未被照射的部分之间产生温度差,从而使机床产生变形。这对大型和精密工件的加工影响较大。

2. 工艺系统热变形对加工精度的影响

1) 机床的热变形对加工精度的影响

由于各种机床的结构不同,热量分布不均匀,从而各部件产生的热变形不同,所以各种机床对于工件加工精度的影响方式和影响结果也各不相同。

对于车、铣、钻、镗类机床,主轴箱中的齿轮、轴承的摩擦发热、主轴箱中油池的发热是其主要热源,使主轴箱及与其相结合的床身或立柱的温度升高而产生较大的热变形。图 5.18 所示为常见的几种机床的热变形趋势。

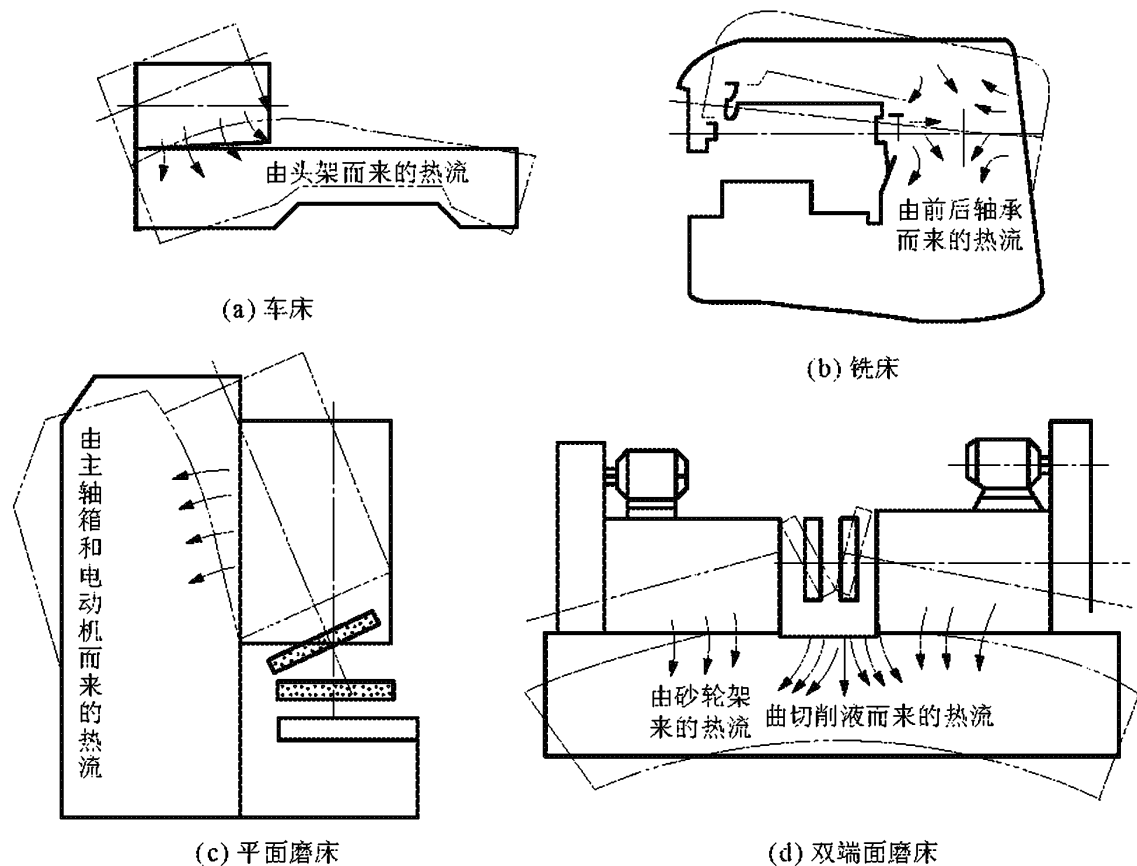


图 5.18 几种机床的热变形趋势

对于龙门刨床、导轨磨床等大型机床,由于床身较长,如导轨面与底面间稍有温差,就会产生较大的弯曲变形,故床身的热变形是影响加工精度的主要因素,摩擦热和环境温度是其主要热源。例如,一台长 12m、高 0.8m 的导轨磨床的床身,若导轨面与床身底面温差为 1°C 时,其弯曲变形量可达 0.22mm。床身上下面表面产生温差的原因,不仅是由于工作台运动时导轨面摩擦发热所致,环境温度的影响也是主要原因。例如,在夏天,地面温度一般低于车间室温,因此床身中凸;冬天则地面温度高于车间室温,因此床身中凹。

2) 工件的热变形对加工精度的影响

切削加工中,工件的热变形主要是由切削热引起的,对于大型或精密零件,外部热源如环境温度、日光等辐射热的影响也不可忽视。对于不同的加工方法,不同的工件材料、形状和尺寸,工件的受热变形也不相同,可以归纳为下列几种情况分析:

(1) 工件均匀受热。

对于一些形状简单、对称的零件,如轴、套筒等,加工时(如车削、磨削)切削热能较均匀地传入工件,工件热变形可按计算热膨胀公式求出。

直径上的热变形量(扩大量)为

$$\Delta D = \alpha D \Delta T \quad (5-16)$$

长度上的热变形量(伸长量)为

$$\Delta L = \alpha L \Delta T \quad (5-17)$$

式中, α ——工件材料的热膨胀系数, $1/^\circ\text{C}$;

ΔT ——工件温升, $^\circ\text{C}$ 。

在精密丝杠加工中,工件的热伸长会产生螺距的累积误差。如磨削 6 级精度的丝杠螺纹,丝杠长度 $L=3\text{m}$, $\alpha=12\times 10^{-6}$,每磨一次温度升高 3°C ,则被磨丝杠将伸长以下长度:

$$\Delta L = (12 \times 10^{-6} \times 3000 \times 3) \text{mm} = 0.108 \text{mm}$$

而 6 级丝杠的螺距累积误差在全长上不允许超 0.02mm ,因此热变形对工件加工精度影响很大。

在工件受热均匀的情况下,其热变形主要影响工件的尺寸精度,有时也会引起形状误差。例如,在较长的轴类零件加工中,开始切削时,工件温升为零;随着切削加工的进行,工件温度逐渐升高而使直径逐渐增大,增大量被刀具切除,因此,加工完的工件冷却后将出现锥度误差。而当工件在两固定顶尖上定位加工时,其伸长量将使工件产生压应力,从而使工件产生腰鼓形的圆柱度误差。

(2) 工件不均匀受热。

平面在刨削、铣削、磨削加工时,工件单面受热,上下平面间产生温差而引起热变形。上表面温度高,膨胀比下表面大,导致工件向上凸起,凸起部分被磨去,冷却后磨削表面下凹,使工件产生平面度误差。

因热变形引起的工件凸起量 f ,可按如下近似计算:

$$f \approx \frac{\alpha L^2 \Delta T}{8H} \quad (5-18)$$

式中, L ——工件长度,mm;

H ——工件厚度,mm。

工件的热变形在粗加工时对加工精度的影响一般可不必考虑,但在流水线、自动线以及工序集中的场合下,应予以足够的重视,否则粗加工的热变形将影响到精加工。为了避免工件热变形对加工精度的影响,在安排工艺过程时应尽可能把粗、精加工分开,以使工件粗加工后有足够的冷却时间。

3) 刀具的热变形对加工精度的影响

刀具的热变形主要是由于切削热引起的,传给刀具的热量虽不多,但由于刀具体积小、热容量小且热量又集中在切削部位,因此切削部位仍会产生很高的温升。例如,高速钢刀具车削时刃部的温度可高达 $700\sim 800^\circ\text{C}$,刀具的热伸长量可达 $0.03\sim 0.05\text{mm}$ 。因此,其影响不可忽略。

图 5.19 所示为车削时车刀的热伸长量与切削时间的关系。连续车削时,车刀的热变形情况如曲线 A,经过约 $10\sim 20\text{min}$,即可达到热平衡,车刀的热变形影响很小;当停止车削后,刀具冷却变形过程如曲线 B;断续车削时,变形曲线如曲线 C。图中 T_m 为刀具切削时间,

T_f 为刀具不参加切削时间。在开始切削阶段,其热变形显著;达到热平衡后,对加工精度的影响则不明显。

4) 减少工艺系统热变形的措施

(1) 减少发热量。

为减少机床的热变形,凡是可能分离出去的热源,如电动机、变速箱、液压系统、冷却系统等,均应移出。对于不能分离的热源,如主轴轴承、丝杠螺母副、高速运动的导轨副等,则可以从结构、润滑等方面改善其摩擦特性,减少发热;也可用隔热材料将发热部件和机床大件(如床身、立柱等)隔离开来。

对于发热量大的热源,如果既不能从机床内移出,又不便隔热,则可采用有效的冷却措施,如增加散热面积或使用强制式的风冷、水冷、循环润滑等,控制机床的局部温升和热变形。

(2) 用热补偿方法减少热变形(均衡温度场)。

单纯的减少温升有时不能收到满意的效果,可采用热补偿的方法使机床的温度场比较均匀,从而使机床产生不影响加工精度的均匀变形。

(3) 采用合理的机床部件结构减少热变形的影响。

在变速箱中,将轴、轴承、传动齿轮尽量对称布置,可使箱壁温升均匀,从而减少箱体变形。

机床大件的结构和布局对机床的热态特性有很大影响。以加工中心为例,在热源的影响下,单立柱结构的机床会产生相当大的扭曲变形,而双立柱结构的机床由于左右对称,仅产生垂直方向的热位移,很容易通过调整的方法予以补偿。因此,双立柱结构的机床的热变形比单立柱结构的机床小得多。

(4) 保持工艺系统的热平衡。

对于精密机床特别是大型机床,达到热平衡的时间较长。为了缩短这个时间,可以在加工前使机床高速空运转,或在机床的适当部位设置控制热源,人为地给机床加热,使之较快达到热平衡状态,然后进行加工。基于同样原因,精密机床尽量避免中途停车。

(5) 控制环境温度。

精密机床一般安装在恒温车间,恒温室平均温度一般为 20°C ,其恒温精度一般控制在 $\pm 1^{\circ}\text{C}$,精密级为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。

5.1.5 工件内应力对加工精度的影响

内应力是指外部载荷去除后,仍残存在工件内部的应力,又称残余应力。零件中的内应力往往处于一种很不稳定的相对平衡状态,在常温下,特别是在外界某种因素的影响下很容易失去原有状态,使内应力重新分布,零件产生相应的变形,从而破坏了原有的精度。因此,必须采取措施消除内应力对零件加工精度的影响。

1. 工件内应力产生的原因

内应力是由金属内部的相邻组织发生了不均匀的体积变化而产生的,体积变化的因素

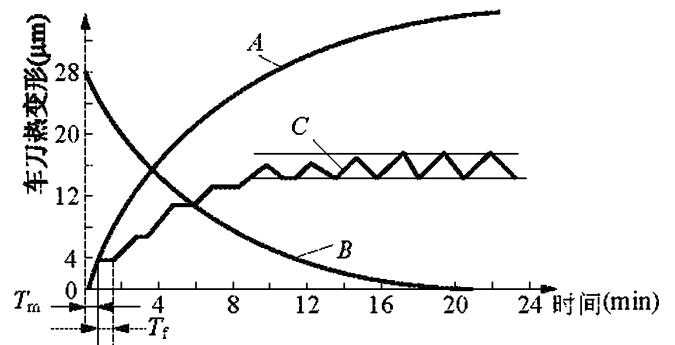


图 5.19 刀具的热伸长

主要来自热加工或冷加工。

1) 毛坯制造和热处理过程中产生的内应力

在铸、锻、焊及热处理过程中,由于零件壁厚不均匀,使得各部分热胀冷缩不均匀,以及金相组织转变时的体积变化,使毛坯内部产生相当大的内应力。毛坯的结构越复杂、壁厚越不均匀、散热条件差别越大,毛坯内部产生的内应力也越大。具有内应力的毛坯,内应力暂时处于相对平衡状态,变形缓慢,但当切去一层金属后,就打破了这种平衡,内应力重新分布,工件就明显地出现了变形。

图 5.20(a)所示为一个内外壁厚相差较大的铸件。在浇铸后的冷却过程中,由于壁 A 和壁 C 比较薄,散热较易,所以冷却较快;壁 B 较厚,冷却较慢。当壁 A 和壁 C 从塑性状态冷却至弹性状态时(约 620℃左右),壁 B 的温度还比较高,仍处于塑性状态,所以壁 A 和壁 C 收缩时,壁 B 不起阻止变形的作用,铸件内部不产生内应力。但当壁 B 冷却到弹性状态时,壁 A 和壁 C 的温度已经降低很多,收缩速度变得很慢,而这时壁 B 收缩较快,就受到了壁 A 及壁 C 的阻碍。因此,壁 B 受到了拉应力,壁 A 及壁 C 受到了压应力,形成了相互平衡的状态。

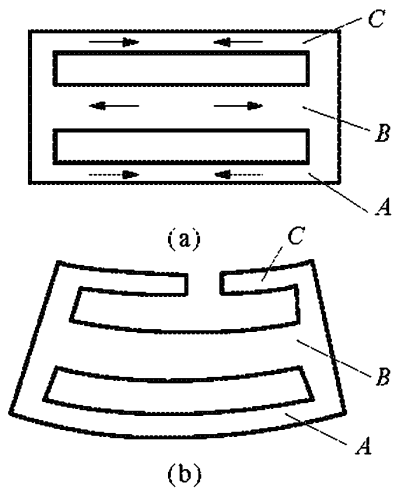


图 5.20 铸件内应力引起的变形

如果在壁 C 上切开一个缺口,如图 5.20(b)所示,则壁 C 的压应力消失。铸件在壁 B 和 A 的内应力作用下,壁 B 收缩,壁 A 膨胀,发生弯曲变形,直至内应力重新分布,达到新的平衡为止。推广到一般情况,各种铸件都难免产生由于冷却不均匀而形成内应力。

2) 冷校直产生的内应力

弯曲的工件(原来无内应力)要校直,常采用冷校直的工艺方法。此方法是在一些长棒料或细长零件弯曲的反方向施加外力 F ,如图 5.21(a)所示。在外力 F 的作用下,工件内部内应力的分布如图 5.21(b)所示,在轴线以上产生压应力(用“-”表示),在轴线以下产生拉应力(用“+”表示)。在轴线和两条虚线之间是弹性变形区域,在虚线之外是塑性变形区域。当外力 F 去除后,

外层的塑性变形区域阻止内部弹性变形的恢复,使内应力重新分布,如图 5.21(c)所示。这时,冷校直虽减小了弯曲,但工件却处于不稳定状态,如再次加工,又将产生新的变形。因此,高精度丝杠的加工,不允许用冷校直的方法来减小弯曲变形,而是用多次人工时效来消除残余内应力。

3) 切削加工产生的内应力

切削过程中产生的力和热,也会使被加工工件的表面层变形,产生内应力。这种内应力的分布情况由加工时的工艺因素决定。实践表明,具有内应力的工件,当在加工过程中切去表面一层金属后,所引起的内应力的重新分布和变形最为强烈。因此,粗加工后,应将被夹紧的工件松开,使之有一定的时间让其内应力重新分布。

2. 减少内应力的措施

(1) 合理设计零件结构。

在零件的结构设计中,应尽量简化结构,考虑壁厚均匀,减少尺寸和壁厚差,增大零件的

刚度,以减少在铸、锻毛坯制造中产生的内应力。

(2) 采取时效处理。

自然时效处理,主要是在毛坯制造之后,或粗加工后,精加工之前,让工件停留一段时间,利用温度的自然变化,经过多次热胀冷缩,使工件内部组织产生微观变化,从而达到减少或消除内应力的目的。这种过程一般需要半年至五年时间,因周期长,所以除特别精密件外,一般较少使用。

人工时效处理,这是目前使用最广的一种方法,分高温时效和低温时效。高温时效一般适用于毛坯件或在工件粗加工后进行。低温时效一般适用于在工件半精加工后进行。

人工时效需要较大的投资,设备较大,能源消耗多。振动时效是工件受到激振器的敲击,或工件在滚筒中回转互相撞击,使工件在

一定的振动强度下,引起工件金属内部组织的转变,从而消除内应力。这种方法节省能源、简便、效率高,近年来发展很快,但有噪声污染。此方法适用于中小零件及有色金属件等。

(3) 合理安排工艺。

机械加工时,应注意粗、精加工分开,在不同的工序进行,使粗加工后有一定的间隔时间让内应力重新分布,以减少对精加工的影响。

切削时应注意减小切削力,如减小余量、减小背吃刀量,或进行多次走刀,以避免工件变形。粗、精加工在一个工序中完成时,应在粗加工后松开工件,让其有自由变形的可能,然后再用较小的夹紧力夹紧工件后再进行精加工。

5.1.6 提高加工精度的途径

为了保证和提高机械加工精度,首先要找出产生加工误差的主要因素,然后采取相应的工艺措施以减少或控制这些因素的影响。

1. 直接减少或消除原始误差法

直接减少误差法在生产中应用较广。它是在查明产生加工误差的主要因素之后,设法对其直接进行消除或减少的方法。有关内容已在前面详细作了介绍,此处不再重复。

2. 误差补偿法

误差补偿法(又称误差抵消法),是人为地造出一种新的原始误差,去抵消工艺系统固有的原始误差,并尽量使两者大小相等、方向相反,从而达到减少加工误差、提高加工精度的目的。例如,用校正机构提高丝杠车床传动链精度等。在精密螺纹加工中,机床传动链误差将直接反映到加工工件螺距上,使精密丝杠的加工精度受到一定的限制。为了满足加工精度

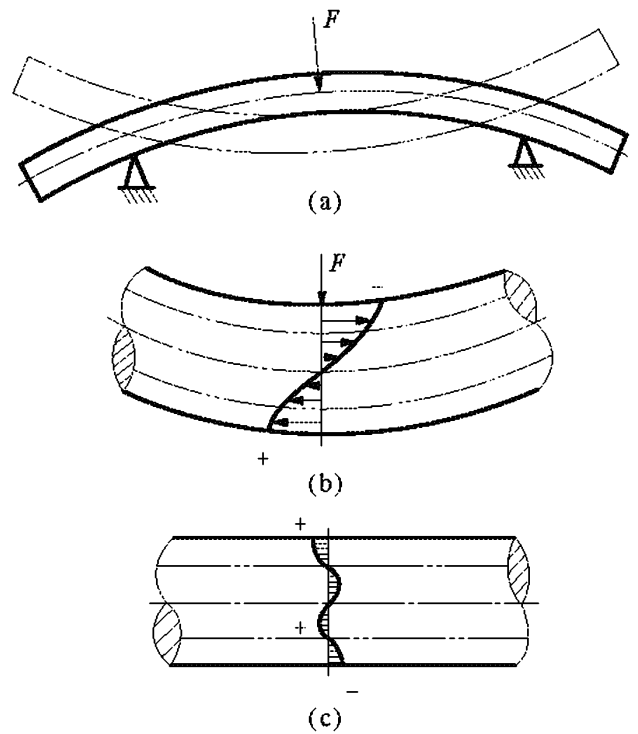


图 5.21 冷校直引起的内应力

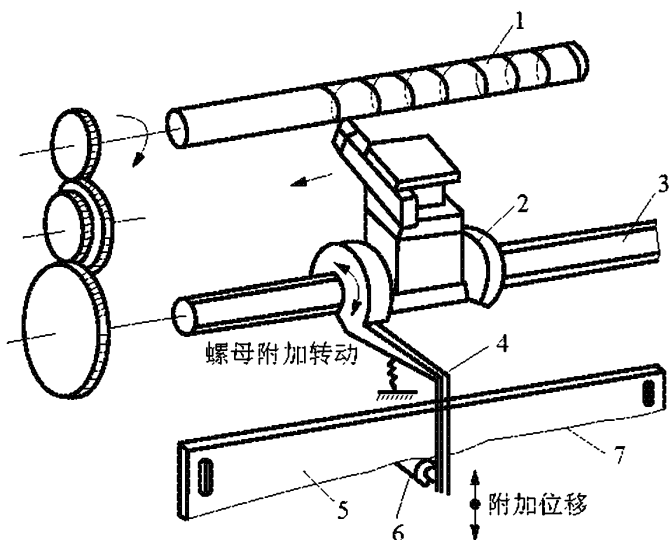


图 5.22 螺纹加工校正装置

- 1 工件; 2 螺母; 3 车床丝杠; 4 杠杆;
- 5 校正尺; 6 滚柱触头; 7 校正误差曲线

的要求,不能采取一味提高传动链中各传动件精度的办法。在实际生产中,广泛应用以误差补偿原理来消除传动链误差的方法,如图 5.22 所示的螺纹加工校正装置。

3. 误差分组法

在生产中会有这种情况:本工序的加工精度是稳定的,工序能力也足够,但毛坯或上工序加工的半成品精度太低,引起定位误差或复映误差过大,因而不能保证加工精度。如要提高毛坯精度或上工序的加工精度,往往是不经济的。这时可采用误差分组法,即把毛坯(或上工序)尺寸按误差大小分为 n 组,每组毛坯的误差范围就缩小为原来的

4. 误差转移法

误差转移法实质上是将工艺系统的几何误差、受力变形和热变形等转移到不影响加工精度的方向上去。

例如,具有分度或转位的多工位加工工序或转位刀架加工工序,其分度、转位误差将直接影响有关表面的加工精度。若采用“立刀”安装法(刀具垂直安装),可将转塔刀架转位时的重复定位误差转移到零件内孔加工表面的误差不敏感方向上,以减少加工误差的产生,提高加工精度,如图 5.23 所示。

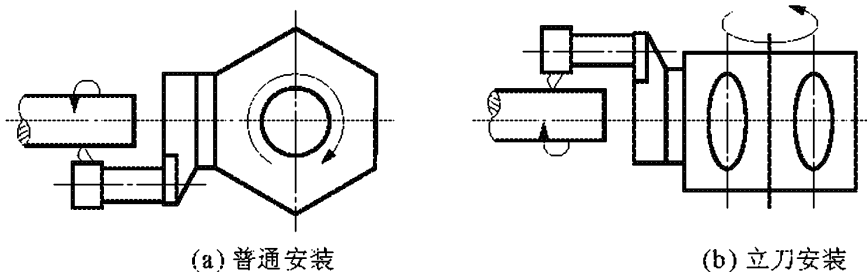


图 5.23 转塔车床刀架转位误差的转移

5.2 加工误差的统计分析

在实际生产中,影响加工精度的因素很多,工件的加工误差是多因素综合作用的结果,且其中不少因素的作用往往带有随机性。对于一个受多个随机因素综合作用的工艺系统,只有用概率统计的方法分析加工误差,才能得到符合实际的结果。加工误差的统计分析就是以概率论和数理统计学的原理为理论基础,通过调查和收集数据,整理和归纳,统计分析和统计判断,找出产生误差的原因,采取相应的解决措施。通过统计分析不仅可以客观评定工艺过程的加工精度,评定工序能力系数,而且还可以用来预测和控制工艺过程的精度。

5.2.1 加工误差的统计性质

各种单因素的误差,按其在加工一批工件时所出现的规律的性质来看,可分为系统性误差和随机性误差。

1. 系统性误差

在顺序加工一批工件时,若误差的大小和方向保持不变,或者按一定规律变化即为系统性误差。前者称为常值系统性误差,后者称为变值系统性误差。

原理误差、机床、刀具、夹具、量具的制造误差、一次调整误差、工艺系统受力变形引起的误差等都是常值系统性误差。例如,铰刀本身直径偏大 0.02mm ,则加工一批工件所有的直径都比规定的尺寸大 0.02mm (在一定条件下,忽略刀具磨损影响),这种误差就是常值系统性误差。

工艺系统(特别是机床、刀具)的热变形、刀具的磨损均属于变值系统性误差。例如,车削一批短轴,由于刀具磨损,所加工的轴的直径一个比一个大,而且直径尺寸按一定规律变化。可见刀具磨损引起的误差属于变值系统性误差。

2. 随机性误差

在顺序加工一批工件时,若误差的大小和方向是无规律的变化(时大时小,时正时负),这类误差称为随机性误差。

毛坯误差的复映、定位误差、夹紧误差、内应力引起的误差、多次调整的误差都是随机性误差。随机性误差从表面上看似乎没有什么规律,但应用数理统计方法可以找出一批工件加工误差的总体规律。

误差性质不同,其解决的途径也不一样。对于常值系统性误差,在查明其大小和方向后,采取相应调整或检修工艺装备,以及用一种常值系统性误差去抵偿原来的常值系统性误差。对于变值系统性误差,查明其变化规律后,可采取自动连续补偿,或自动周期补偿。对于随机性误差,由于其没有明显的变化规律,只能查出产生根源,采取措施以减小其影响。

必须指出,对于某一种具体误差,辨别究竟是属于系统性误差还是随机性误差是有条件的,应根据实际情况来决定。例如,机床的调整误差,一次调整中加工一批工件为系统性误差,而多次调整加工的工件为随机性误差。一般说来,某一种误差因素,若其大小强弱稳定,则引起的误差为系统性误差;若其大小强弱不稳定,则引起的误差为随机性误差。或同时兼有两种误差的性质。

5.2.2 加工误差的统计分析法

1. 分布曲线法

这种方法是通过测量一批零件加工后的实际尺寸做出尺寸分布曲线,然后按此曲线判断这种加工方法所产生的误差大小。

1) 实际分布曲线

测量每个工件的加工尺寸,把测得的数据记录下来,按尺寸大小将整批工件进行分组,

则每一组中的零件尺寸处在一定的间隔范围内。同一尺寸间隔内的零件数量称为频数,频数与该批零件总数之比称为频率。以零件尺寸为横坐标,以频数(或频率)为纵坐标,便可得到实际分布曲线。

例如,检查一批精镗后的活塞销孔直径,图纸规定的尺寸及公差为 $\phi 28_{-0.015}^0\text{mm}$,检查件数为 100 个,将测量所得的数据按尺寸大小分组,每组的尺寸间隔为 0.002mm,然后填在表格内,如表 5-1 所示。表中, n 是测量的工件数, m_j 是每组的件数。以工件尺寸 x 为横坐标,以频率 m_j/n 为纵坐标,便可绘出实际分布曲线图(如图 5.24 所示)。在图上再标出公差带及其中心,测得尺寸的分散范围及其中心,便可分析加工质量。

表 5-1 数据统计表

组别	尺寸范围/mm	中点尺寸/mm	频数/ m_j	频率/ m_j/n
1	27.992~27.994	27.993	4	4/1000
2	27.994~27.996	27.995	16	16/1000
3	27.996~27.998	27.997	32	32/1000
4	27.998~28.000	27.999	30	30/1000
5	28.000~28.002	28.001	16	16/100
6	28.002~28.004	28.003	2	2/100

公差带中心 = $28 - 0.015/2\text{mm} = 27.9925\text{mm}$;

分散范围 = 最大孔径 - 最小孔径 = $28.004\text{mm} - 27.992\text{mm} = 0.012\text{mm}$;

分散范围中心 = $\frac{1}{n} \sum_{j=1}^k m_j x_j = 29.9979\text{mm}$ 。

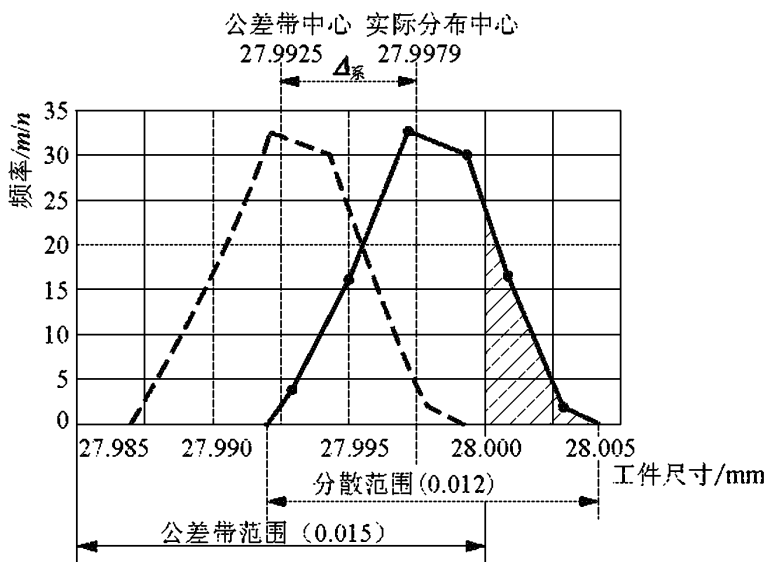


图 5.24 活塞销孔直径尺寸实际分布曲线图

分析上面分布曲线图,可看出:

(1) 分散范围小于公差带,即 $0.012 < 0.015$,表明本工序能满足加工精度要求。

(2) 废品率占 18% ($28.00 - 28.004$)。分析其原因为尺寸分散范围中心与公差带中心不重合,表明存在常值系统性误差为 $27.9979 - 27.9925\text{mm} = 0.0054\text{mm}$,将镗刀伸出量缩短 $0.0054/2(\text{mm})$,使尺寸分散范围中心与公差带中心重合,便解决了废品问题。

2) 正态分布曲线

大量的试验、统计和理论分析表明:当一批工件总数极多,加工中的误差是由许多相互独立的随机因素引起的,而且这些误差因素中又都没有任何优势的倾向时,则其分布是服从正态分布的。这时的分布曲线称为正态分布曲线(即高斯曲线)。正态分布曲线的形态,如图 5.25 所示。

正态分布曲线的表达式为

$$y = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}(\frac{x-\bar{x}}{\sigma})^2} \quad (5-19)$$

式中, \bar{x} ——工件平均尺寸(尺寸分布中心), 影响曲线位置;

σ ——样本均方根偏差(标准偏差), $\sigma =$

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{1}{n} (x_i - \bar{x})^2}, \text{影响曲线形状, 如}$$

图 5.26 所示。

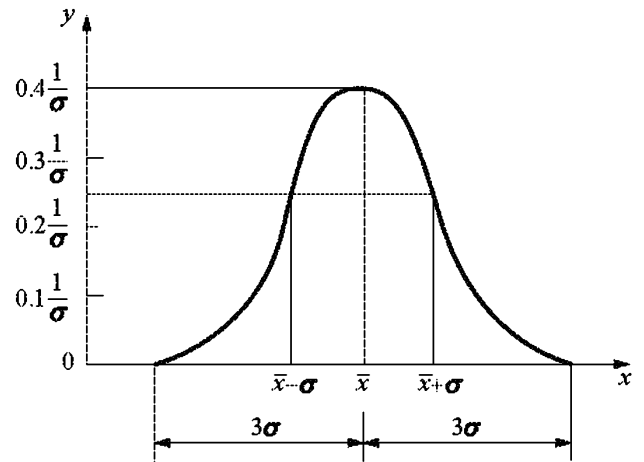


图 5.25 正态分布曲线图

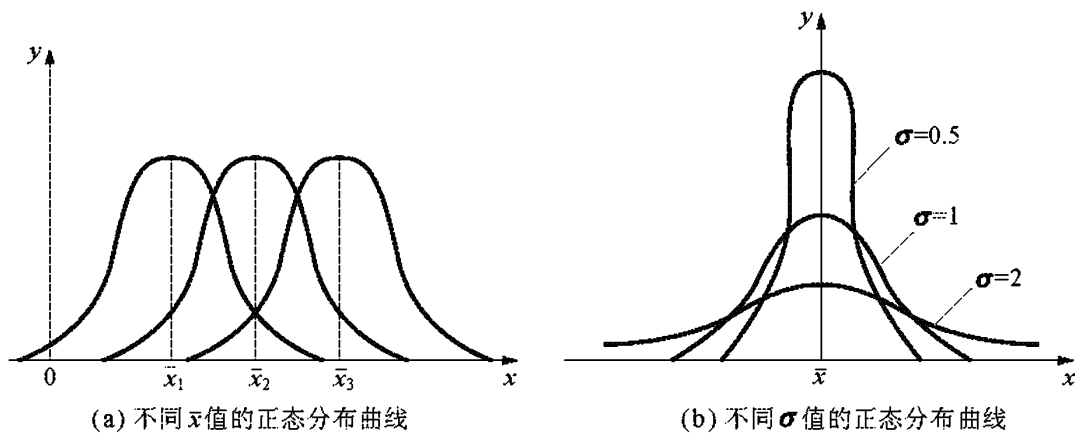


图 5.26 \bar{x}, σ 对正态分布曲线的影响

由图 5.25 可以看出, 正态分布曲线具有如下特点:

(1) 曲线以 $x = \bar{x}$ 直线左右对称, 呈钟形, 中间高、两边低。表示尺寸靠近分散中心的工件占大多数, 而远离尺寸分散中心的工件占少数。

(2) 对 \bar{x} 的正偏差和负偏差的概率相等。

(3) 分布曲线与 x 轴所围成的面积包括了全部零件数(即 100%), 故其面积等于 1。

(4) 在尺寸 x_1 到 x_2 间的零件的频率(即占的百分比)可由积分获得:

$$F(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{x_1}^{x_2} e^{-\frac{1}{2}(\frac{x-\bar{x}}{\sigma})^2} dx \quad (5-20)$$

为简化计算, 可计算曲线下方某一数值 x 到尺寸中心 \bar{x} 范围的面积。令 $z = \frac{x-\bar{x}}{\sigma}$,

则 $dx = \sigma dz$, 于是

$$F(x) = \varphi(z) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-\frac{1}{2}z^2} \sigma dz = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-\frac{1}{2}z^2} dz \quad (5-21)$$

对于不同 z 值的 $\varphi(z)$, 可由表 5-2 查出。

表 5-2 $\varphi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-\frac{z^2}{2}} dz$ 的数值表 ($z = \frac{|x-\bar{x}|}{\sigma}$)

z	$\varphi(z)$	z	$\varphi(z)$	z	$\varphi(z)$	z	$\varphi(z)$
0.01	0.0040	0.29	0.1141	0.64	0.2389	1.50	0.4332
0.02	0.0080	0.30	0.1179	0.66	0.2454	1.55	0.4394
0.03	0.0120	0.31	0.1217	0.68	0.2517	1.60	0.4452
0.04	0.0160	0.32	0.1255	0.70	0.2580	1.65	0.4505
0.05	0.0199	0.33	0.1293	0.72	0.2642	1.70	0.4554
0.06	0.0239	0.34	0.1331	0.74	0.2703	1.75	0.4599
0.07	0.0279	0.35	0.1368	0.76	0.2764	1.80	0.4641
0.08	0.0319	0.36	0.1406	0.78	0.2823	1.85	0.4678
0.09	0.0359	0.37	0.1443	0.80	0.2881	1.90	0.4713
0.10	0.0398	0.38	0.1480	0.82	0.2939	1.95	0.4744
0.11	0.0438	0.39	0.1517	0.84	0.2995	2.00	0.4772
0.12	0.0478	0.40	0.1554	0.86	0.3051	2.10	0.4821
0.13	0.0517	0.41	0.1591	0.88	0.3106	2.20	0.4861
0.14	0.0557	0.42	0.1628	0.90	0.3159	2.30	0.4893
0.15	0.0596	0.43	0.1664	0.92	0.3212	2.40	0.4918
0.16	0.0636	0.44	0.1700	0.94	0.3264	2.50	0.4938
0.17	0.0675	0.45	0.1736	0.96	0.3315	2.60	0.4953
0.18	0.0714	0.46	0.1772	0.98	0.3365	2.70	0.4965
0.19	0.0753	0.47	0.1808	1.00	0.3413	2.80	0.4974
0.20	0.0793	0.48	0.1844	1.05	0.3531	2.90	0.4981
0.21	0.0832	0.49	0.1879	1.10	0.3643	3.00	0.49865
0.22	0.0871	0.50	0.1915	1.15	0.3749	3.20	0.49931
0.23	0.0910	0.52	0.1985	1.20	0.3849	3.40	0.49966
0.24	0.0948	0.54	0.2054	1.25	0.3944	3.60	0.499841
0.25	0.0987	0.56	0.2123	1.30	0.4032	3.80	0.499928
0.26	0.1023	0.58	0.2190	1.35	0.4115	4.00	0.499968
0.27	0.1064	0.60	0.2257	1.40	0.4192	4.50	0.499997
0.28	0.1103	0.62	0.2324	1.45	0.4265	5.00	0.49999997

(5) 可以看出,在 $|x-\bar{x}|=3\sigma$ (即 $\bar{x}\pm 3\sigma$)范围内的零件数所占的面积为 99.73%,即 99.73%的工件尺寸落在 $\pm 3\sigma$ 范围内,仅有 0.27%的工件在范围之外,可忽略不计。因此,一般取正态分布曲线的分布范围是 $\pm 3\sigma$ 。

$\pm 3\sigma$ (或 6σ)的概念: 6σ 的大小代表了某一种加工方法在正常加工条件下所能达到的加

工精度,因此选择加工方法时,应该保证所选择的加工方法的标准偏差与工件要求的公差带宽度有如下关系: $6\sigma \leq T$ 。

3) 非正态分布曲线

在机械加工中,工件实际尺寸的分布情况,有时并不符合正态分布。例如,将在两台机床上分别调整加工出的工件混在一起测定,如图 5.27 所示的双峰曲线,实际上是两组正态分布曲线(如虚线所示)的叠加。也即随机性误差中混入了常值系统性误差,每组有各自的分散中心和均方根偏差。

又如,在活塞销贯穿磨削中,如果砂轮磨损较快而没有自动补偿的话,工件的实际尺寸分布将成平顶分布,如图 5.28 所示。它实质上是正态分布曲线的分散中心在不断地移动,也即在随机性误差中混有变值系统性误差。

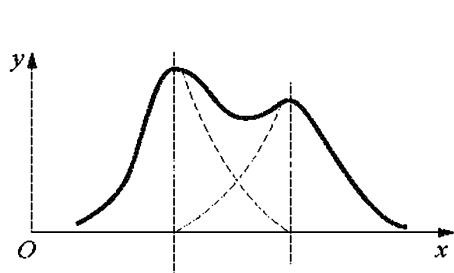


图 5.27 双峰分布曲线

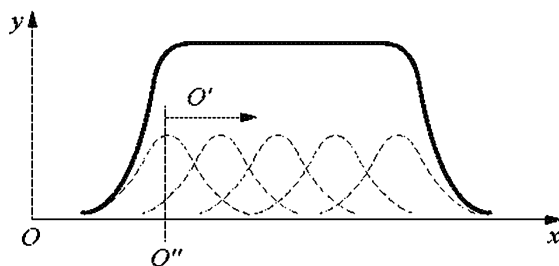


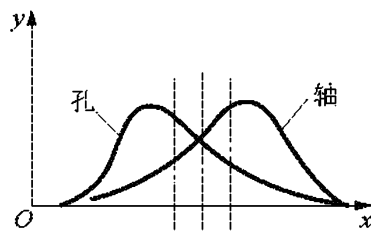
图 5.28 平顶分布曲线

再如,用试切法加工轴颈或孔径时,由于操作者为了避免产生不可修复的废品,主观地使轴颈宁大勿小,使孔径加工宁小勿大,则它们的尺寸就呈偏态分布,如图 5.29(a)所示。当用调整法加工,刀具热变形显著时,也呈偏态分布,如图 5.29(b)所示。

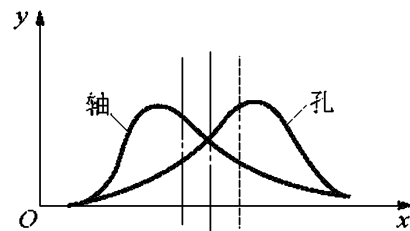
4) 分布曲线的应用

(1) 确定各种加工方法所能达到的精度等级。

由于各种加工方法在随机性因素影响下所得的加工尺寸的分散规律符合正态分布,因而可以在多次统计的基础上,为每一种加工方法求得它的均方根偏差 σ 值;然后按分布范围等于 6σ 的规律,即可确定各种加工方法所能达到的精度等级。



(a) 试切轴和孔尺寸分布



(b) 刀具热变形的影响

图 5.29 偏态分布曲线

(2) 判别加工误差的性质。

如前所述,假如加工过程中没有变值系统性误差,那么其尺寸分布应服从正态分布,这是判别加工误差性质的基本方法。用此方法即可区分常值系统性误差和随机性误差。

(3) 确定工序能力及其等级。

工序能力,即工序处于稳定状态时加工误差正常波动的幅度,常以该工序的尺寸分散范围来表示。正态分布时幅度即为 6σ 。

工序能力等级,以工序能力系数表示。工序处于稳定状态时,工序能力系数按下式计算:

$$C_p = \frac{T}{6\sigma} \quad (5-22)$$

表 5-3 工序能力等级

工序能力系数	能力等级	说明
$C_p > 1.67$	特级	工艺能力过高,可以允许有异常波动,不一定经济
$1.67 \geq C_p > 1.33$	一级	工艺能力足够,可以允许有一定的异常波动
$1.33 \geq C_p > 1$	二级	工艺能力勉强,必须密切注意
$1 \geq C_p > 0.67$	三级	工艺能力不足,可能出现少量不合格品
$0.67 \geq C_p$	四级	工艺能力差,必须加以改进

(4) 确定工件尺寸的合格品率和废品率。

正态分布曲线所包含的面积代表一批零件的总数,如果尺寸分散带大于零件的公差带 T ,则将有废品产生,如图 5.30(a)所示。对于某一规定的 x 范围的曲线面积[图 5.30(b)],可由前面给出的积分公式计算或查表获得。

【例 5.1】 在磨床上加工销轴,要求外径 $d = \phi 20_{-0.043}^{+0.016}$ mm,抽样后测得 $\bar{x} = 11.974$ mm, $\sigma = 0.005$ mm,其尺寸分布符合正态分布,试分析该工序的加工质量,并求废品率。

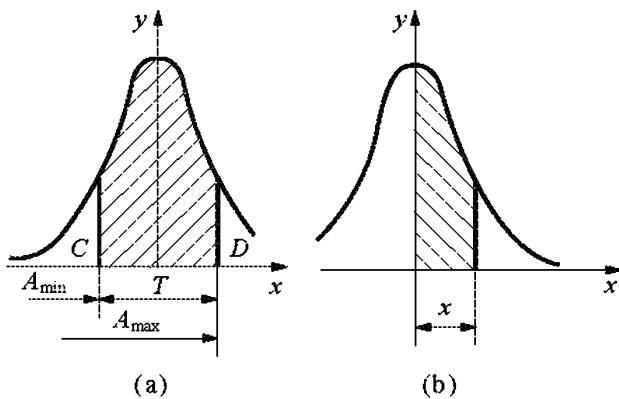


图 5.30 利用正态分布曲线估算废品率

解 工序能力系数 $C_p = \frac{T}{6\sigma} = \frac{0.027}{6 \times 0.005} =$

$0.9 < 1;$

工艺能力系数小于 1,说明该工序工艺能力不足,因此不可避免地要出现废品。

工件最小尺寸 $d_{\min} = \bar{x} - 3\sigma = 11.959$ mm 大于要求的最小尺寸 (11.957 mm),故不会产生不可修复的废品。

工件最大尺寸 $d_{\max} = \bar{x} + 3\sigma = 11.989$ mm 大于要求的最大尺寸 (11.984 mm),故要产生可修复的废品。

求废品率

$$z = \frac{x - \bar{x}}{\sigma} = \frac{|11.984 - 11.974|}{0.005} = 2$$

查表得

$$\phi(z) = 0.4772$$

故废品率为

$$(0.5 - 0.4772) \times 100\% = 2.28\%$$

2. 点图法

用分布曲线分析法研究加工误差时,因为没有考虑工件的加工顺序,所以不能区分变值系统性误差和随机性误差。又由于是待一批工件加工后才能绘制分布曲线图,因此不能在加工进行过程中提供控制工艺过程的资料。

点图法是在一批工件的加工过程中,依次测量工件的加工尺寸,并以时间间隔为序,逐个(或逐组)计入相应图表中以其进行分析的方法。点图有多种形式,这里仅介绍 $\bar{X}-R$ 点图。

(1) $\bar{X}-R$ 点图。

将一批工件的尺寸按加工顺序分为 K 组,每组有 m 个工件, \bar{X} 表示某一组的平均值, R

表示该组最大尺寸与最小尺寸之差,称为极差。则

$$\bar{X} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i \quad (5-23)$$

$$R = x_{\max} - x_{\min} \quad (5-24)$$

以组序号为横坐标,以各组的 \bar{X} 与 R 为纵坐标,就可作出其相应的 $\bar{X}-R$ 图,如图 5.31 所示。 \bar{X} 点图与 R 点图是加工误差分析中常用的两种点图。

由于 \bar{X} 在一定程度上代表了瞬时的分散中心,故 \bar{X} 点图可以反映系统性误差的变化趋势; R 在一定程度上代表了瞬时的尺寸分散范围, R 点图可反映出随机误差及其变化趋势。

(2) $\bar{X}-R$ 点图的应用。

判断工艺过程的稳定性要根据 $\bar{X}-R$ 图,同时需要在图上分别找出中心线及上下控制线位置,如图 5.32 所示。

\bar{X} 图的中心线:

$$\bar{\bar{X}} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \bar{X}_i \quad (5-25)$$

\bar{X} 图的上控制线:

$$UCL = \bar{\bar{X}} + A \bar{R} \quad (5-26)$$

\bar{X} 图的下控制线:

$$LCL = \bar{\bar{X}} - A \bar{R} \quad (5-27)$$

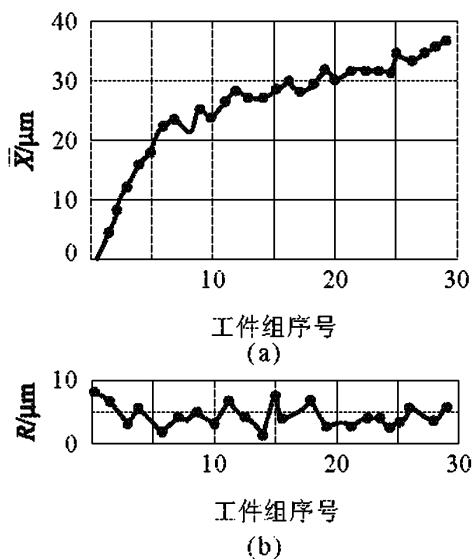


图 5.31 $\bar{X}-R$ 点图

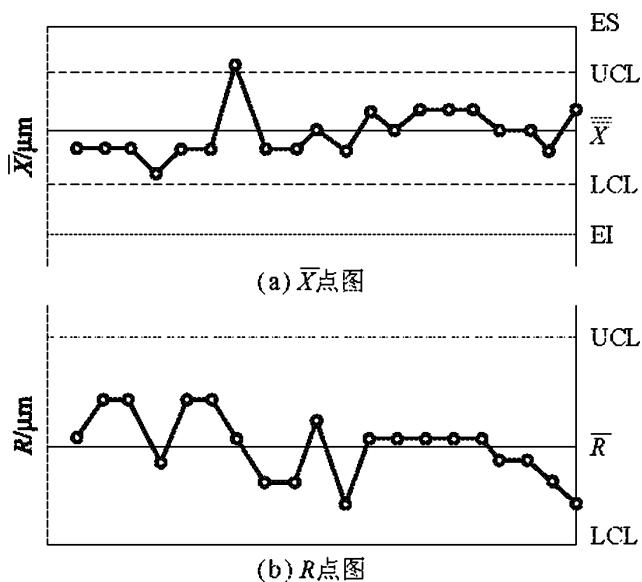


图 5.32 $\bar{X}-R$ 控制图

R 图的中心线:

$$\bar{R} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K R_i \quad (5-28)$$

R 图的上控制线:

$$UCL = D \bar{R} \quad (5-29)$$

式中, K ——组数;

\bar{X}_i ——第 i 组的平均值;

R_i ——第 i 组的极差。

式中系数 A 与 D 按表 5-3 选取。

表 5-3 A 与 D 系数表

每组个数	4	5	6	7	8
A	0.729	0.577	0.463	0.419	0.373
D	2.23	2.10	1.98	1.90	1.85

控制线是判断工艺过程稳定性的界限线。工艺过程的稳定性是指工件的加工质量比较一致,没有什么波动。点子的波动有正常波动和异常波动,正常波动说明工艺过程是稳定的;异常波动说明工艺过程不稳定。一旦出现异常波动,就要及时寻找原因,消除产生不稳定的因素。正常波动和异常波动的标志见表 5-4。

表 5-4 正常波动和异常波动的标志

正常波动	正常波动
1. 没有点子超出控制线	1. 有点子超出控制线
2. 大部分点在平均线上下波动,小部分在控制线附近	2. 点子密集分布在平均线上下附近
3. 点子没有明显的规律性	3. 点子密集分布在控制线附近
	4. 连续 7 点以上出现在平均线一侧
	5. 连续 11 点中有 10 点出现在平均线一侧
	6. 连续 14 点中有 12 点以上出现在平均线一侧
	7. 连续 17 点中有 14 点以上出现在平均线一侧
	8. 连续 20 点中有 16 点以上出现在平均线一侧
	9. 点子有上升或下降趋势
	10. 点子有周期性波动

5.3 机械加工表面质量

表面质量是零件机械加工质量的重要组成部分。机械加工表面质量是指机械加工后零件表面层的几何结构,以及受加工的影响,表面层金属与基体金属性质产生变化的情况。机械产品的工作性能,尤其是它的可靠性、耐久性,在很大程度上取决于其主要零件的表面质量,零件的磨损、腐蚀和疲劳破坏都是从零件表面开始的。随着科学技术的发展,机器向着高速重载、高温高压等方向发展,对零件表面质量的要求也越来越高。因此,研究表面质量是机械制造业必须面对的问题。

5.3.1 机械加工表面质量的含义

任何机械加工所得的表面,不可能是理想的光滑表面,总是存在一定的微观几何形状偏差,表面层的物理力学性能也发生变化。因此,加工表面质量应包括加工表面的几何特征和表面层物理力学性能的变化两方面的内容。

1. 表面的几何特征

零件加工表面的微观几何形状包括表面粗糙度和表面波度,一般以波距 L 和波高 H 的比值来加以区分。当 $L/H < 50$ 时为表面粗糙度;当 $L/H = 50 \sim 1000$ 则称为表面波度;当

$L/H > 1000$ 时称为宏观几何形状,即形状误差,属于加工精度研究范畴,如图 5.33 所示。

(1) 表面粗糙度。

表面粗糙度是完成切削运动后刀刃在被加工表面上形成的峰谷不平的痕迹。通常是由刀具的运动轨迹以及切削过程中的塑性变形和振动等因素引起的。我国现行的表面粗糙度标准是 GB/T 1031—94。表面粗糙度参数可从轮廓算术平均值 R_a 、微观不平度十点高度 R_z 或轮廓最大高度 R_y 三项中选取,推荐优先选用 R_a 。

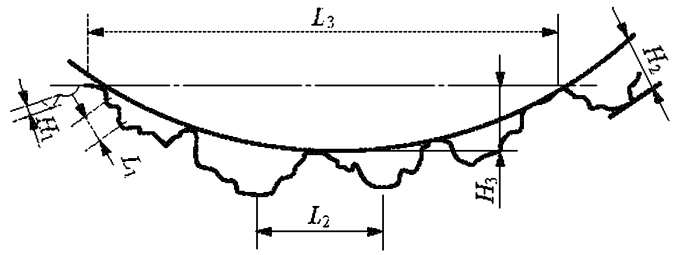


图 5.33 表面粗糙度、波度与宏观几何形状误差

(2) 表面波度。

通常指由于加工过程中工艺系统的低频振动所引起的周期性误差,用波度表示。

2. 表面层物理力学性能

加工表面层的物理力学性能的变化,主要有以下 3 方面内容。

- (1) 加工表面层因塑性变形产生的加工硬化。
- (2) 加工表面层因切削或磨削热引起的金相组织变化。
- (3) 加工表面层因力或热的作用产生的残余应力。

5.3.2 表面质量对零件使用性能的影响

1. 表面质量对零件耐磨性的影响

零件的耐磨性主要与摩擦副的材料、热处理和润滑条件有关。在这些条件已确定的情况下,零件的表面质量对零件耐磨性起决定性的作用。

零件的磨损过程,通常分为初期磨损、正常磨损、急剧磨损三个阶段。表面粗糙度对零件表面磨损的影响很大。就磨损而言,摩擦副表面存在一个最佳粗糙度值。一般来说,表面粗糙度值越小,其耐磨性越好。但是表面粗糙度值太小,不利于润滑油的储存,接触面间产生金属分子间的亲和力,甚至产生分子间的粘合,使摩擦阻力增大,磨损反而增加。表面粗糙度的数值与机器零件工况有关,图 5.34 给出了不同工况下表面粗糙度数值与初期磨损量的关系曲线。载荷加大时,初期磨损量增大,最低表面粗糙度数值也随之加大。

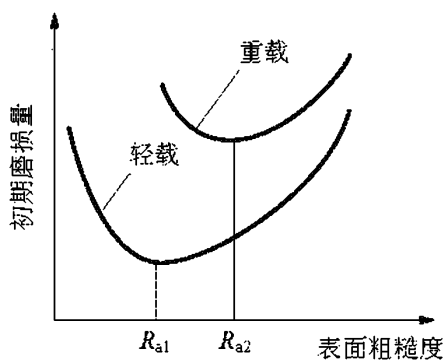


图 5.34 初期磨损与表面粗糙度的关系

表面层冷作硬化使表面层金属的显微硬度提高,塑性降低,减少了接触处的弹性和塑性变形,以及金属咬焊的可能,因而减少了磨损。但过度的冷硬会使金属组织疏松,加剧磨损,甚至出现裂纹、剥落,从而使耐磨性下降。

表面层金相组织发生变化时改变了表面材料的硬度,也直接影响耐磨性。

2. 表面质量对零件疲劳强度的影响

在交变载荷作用下,表面粗糙度的凹谷、划痕和裂纹等部位容易引起应力集中、产生疲劳裂纹,导致零件的疲劳损坏。表面越粗糙,应力集中越严重。因此,减小表面粗糙度值可以提高疲劳强度。不同材料对应力集中的敏感程度不同,一般来说,材料越致密,应力集中的敏感程度就越大,表面粗糙度对疲劳强度的影响程度也越严重。

表面一定程度的冷作硬化能阻碍表层疲劳裂纹的出现,使零件疲劳强度提高;但冷硬程度过大,反而易于产生裂纹,降低零件抵抗疲劳的能力。故冷硬程度和深度应控制在一定的范围之内。

表面层的残余压应力能部分地抵消工作载荷施加的拉应力,延缓疲劳裂纹的扩展,提高零件的疲劳强度。反之,零件表面层呈现残余拉应力时,则使疲劳裂纹加剧,降低疲劳强度。

3. 表面质量对零件耐腐蚀性能的影响

零件在潮湿的空气或有腐蚀性的介质中工作时,常会发生化学腐蚀或电化学腐蚀。化学腐蚀,是由于在粗糙表面的凹谷处容易积聚腐蚀性介质而发生化学反应;电化学腐蚀,是由于不同金属材料的零件表面相接触时,在表面的波峰处产生电化学作用而被腐蚀掉。因此,减小表面粗糙度值可以提高零件的耐腐蚀性。

零件在应力状态下工作时,会产生应力腐蚀。表面冷作硬化或产生金相组织变化时,往往都会引起表面残余应力,因而会降低零件的耐腐蚀性。

4. 表面质量对零件配合性质的影响

对于间隙配合,如果零件表面粗糙度太大,初期磨损量就大,工作时配合间隙就会迅速增大,以致改变了原来的配合性质,影响了间隙配合的稳定性。对于过盈配合表面,轴在压入孔内时,配合表面部分凸峰会挤平,从而使实际过盈量比预定的小,影响了过盈配合的可靠性。所以,对有配合要求的表面都要求较低的粗糙度值。

表面残余应力的存在会引起零件变形,使零件形状和尺寸发生变化,因此对配合性质也有一定的影响。

5.3.3 影响表面粗糙度的工艺因素及改善措施

1. 切削加工后的表面粗糙度

用金属切削工具加工工件表面时,粗糙度的形成主要有几何因素、物理因素和振动等三方面的因素。

1) 几何因素

此项主要是指刀具的形状和几何角度,特别是刀尖圆弧半径 r_c 和主偏角 κ_r 、副偏角 κ'_r 等的影响,其次是进给量和刀刃本身的粗糙度等。

图 5.35(a)表示在刀尖圆弧半径为零时主偏角 κ_r 、副偏角 κ'_r 和进给量 f 对残留面积最大高度 R_{\max} 的影响。由图中几何关系可得

$$R_{\max} = \frac{f}{\cot \kappa_r + \cot \kappa'_r} \quad (5-30)$$

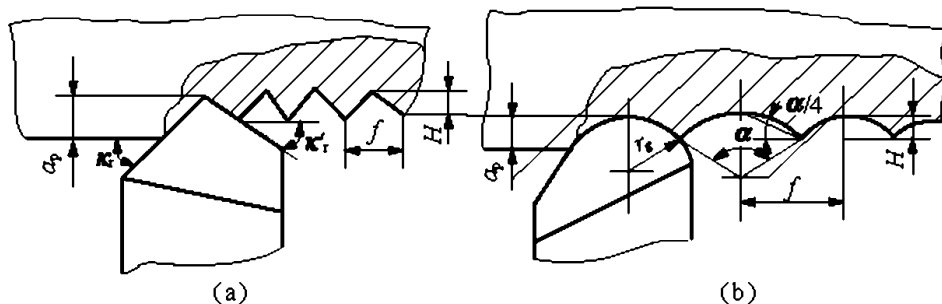


图 5.35 刀具形状对表面粗糙度的影响

图 5.35(b)所示为圆弧刀刃切削时,刀尖圆弧半径 r_c 和进给量 f 对残留面积高度的影响。由图 5.35(b)可得

$$R_{\max} = \frac{f^2}{8r_c} \quad (5-31)$$

上两式计算是理论值,切削加工后表面的实际粗糙度与理论粗糙度有较大的差别,如图 5.36所示。这是由于存在着与被加工材料的性能及切削机理有关的物理因素的缘故。



图 5.36 加工后表面实际轮廓和理论轮廓

2) 物理因素

切削过程中,刀具的刃口圆角及后面的挤压与摩擦使金属材料发生塑性变形,从而使表面粗糙度数值进一步增大。在加工塑性材料时,切削过程中出现积屑瘤和鳞刺,使表面粗糙度严重恶化。由于积屑瘤有时会伸出切削刃之外并代替刀刃进行切削,其轮廓很不规则,因而使工件表面上出现深浅和宽窄都不不断变化的刀痕。有些积屑瘤嵌入工件表面,增加了表面粗糙度。

切削加工时的振动使工件表面粗糙度增大。关于振动将在本章第 5.4 节中介绍。

3) 影响表面粗糙度的工艺因素及改善措施

(1) 刀具的几何形状、材料及刃磨质量的影响。

从几何因素看,减少刀具的主、负偏角,增大刀尖圆弧半径,均能有效地降低表面粗糙度。

刀具的前角值适当增大,刀具易于切入工件,塑性变形小,有利于减少表面粗糙度值。但前角太大,刀刃有嵌入工件的倾向,反使表面变粗糙。前角为负值时,塑性变形增大,粗糙度也将增大。

前角一定时,后角越大,切削刃钝圆半径越小。刀刃越锋利,同时还能减小后刀面与加工表面间的摩擦和挤压,有利于减小表面粗糙度值。但后角过大,对刀刃强度不利,容易产生切削振动,而使表面粗糙度值增大。

刀具的材料与刃磨质量对产生积屑瘤、鳞刺等现象影响甚大,如用金刚石车刀精车铝合金时,由于摩擦系数较小,刀面上就不会产生切屑的粘附、冷焊现象。因此,能降低粗糙度值。

(2) 工件材料性能的影响。

与工件材质相关的因素包括材料的塑性、韧性及金相组织等。一般韧性较大的塑性材

料易于产生塑性变形,与刀具的粘结作用也较大;加工后粗糙度值大;相反,脆性材料则易于得到较小的表面粗糙度值。

对于同样的材料,晶粒组织越是粗大,加工后的表面粗糙度值也越大。利用调质或正火等热处理方法可以提高材料的力学性能,细化晶粒,改善切削性能,减小表面粗糙度值。

(3) 加工条件的影响。

加工条件包括切削用量、冷却条件以及工艺系统的抗振性等。

切削用量中,切削速度 v_c 对表面粗糙度的影响比较复杂。一般情况下,低速或高速切削时,因不会产生积屑瘤,故加工表面粗糙值较小。但在中等速度下,塑性材料由于容易产生积屑瘤与鳞刺,因此表面粗糙度值会变大。

减小进给量 f 可以减少切削残留面积高度,减小切削塑性变形,减小表面粗糙度值。但若进给量太小,刀刃不能切削而形成挤压,增大了工件的塑性变形,反而使表面粗糙度值变大。

切削深度 a_p 对表面粗糙度影响不明显,一般可忽略。但当 $a_p < 0.02 \sim 0.03\text{mm}$ 时,刀刃与工件发生挤压与摩擦,从而使表面恶化。因此,加工时不能选用过小的切削深度。

另外,合理选择冷却润滑液,提高冷却润滑效果,能抑制积屑瘤与鳞刺的生成,减少切削时的塑性变形,有利于减小表面粗糙度值。当冷却润滑液中含有表面活性物质,如硫、氯等的化合物时,润滑性能增强,作用更为显著。

2. 磨削加工后的表面粗糙度

磨削加工中,影响表面粗糙度的因素是砂轮工作表面状态、磨削用量及工艺条件。

1) 砂轮表面工作状态的影响

磨削加工表面的粗糙度,是由砂轮上大量的磨粒刻划出无数极细的沟槽形成的。因此,砂轮的粒度、硬度、磨料性质、粘结剂等对粗糙度均有影响。

砂轮的粒度越细,则砂轮工作表面的单位面积上的磨粒数越多,在工件表面上的刻痕也越密而细,所以粗糙度值越小。但是粗粒度的砂轮如果经过精细修整,在磨粒上车出微刃(图 5.37)后也能加工出粗糙度值小的表面。

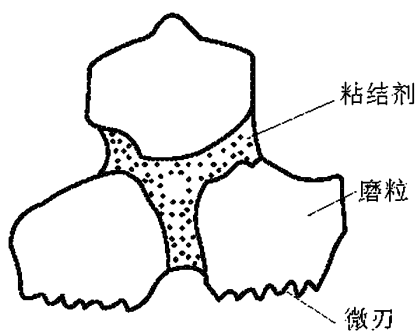


图 5.37 磨粒上的微刃

砂轮的修整是用金刚石笔尖在砂轮的工作表面上车出一道螺纹。修整导程和切深越小,修出的砂轮就越光滑,修出的微刃等高性也越好,因而磨出的工件表面粗糙度值也就越小。

砂轮的硬度太大,磨粒钝化后不容易脱落,工件表面受到强烈的摩擦和挤压,加剧了塑性变形,增大表面粗糙度数值甚至产生表面烧伤。砂轮太软则磨粒易脱落,会产生不均匀磨损现象,影响表面粗糙度。因此,砂轮的硬度应合适。

2) 磨削用量的影响

提高砂轮速度可以增加在工件单位面积上的刻痕,同时塑性变形造成的隆起量随着砂轮速度的增大而下降,所以粗糙度值减小。

在其他条件不变的情况下,增大工件速度将使磨粒在单位时间内留在工件表面上的刻痕减少,从而增大粗糙度。若磨削深度增加,磨削过程中切削力及磨削温度都增加,磨削表面塑性变形增大,也会增大粗糙度数值。

通常在磨削过程中开始采用较大的磨削深度,以提高生产率。而在最后则选用较小的切削深度或采用无进给磨削,并增加无进给磨削次数,以降低表面粗糙度值。

3) 工件材料的影响

工件材料太硬,磨粒易钝化,表面粗糙度数值变大,甚至烧伤并发生裂纹而使零件报废。材料太软,易堵塞砂轮,也难以获得较小的表面粗糙度数值。韧性大、导热性差的耐热合金易使砂粒早期崩落,使砂轮表面不平,导致磨削表面粗糙度值增大。

磨削加工中的其他因素,如冷却润滑液的选择与净化、轴向进给速度、工艺系统的振动等都是不容忽视的重要因素,在实际加工中应予以综合考虑。

5.3.4 影响零件表面层物理力学性能的因素及改善措施

机械加工过程中,工件由于受到切削力、切削热的作用,其表面层的物理力学性能比基体材料会发生很大的变化,主要有表面层的加工硬化、金相组织变化和残余应力。

1. 表面层的加工硬化

机械加工时,工件表层金属受到切削力的作用产生强烈的塑性变形,使晶体间产生剪切滑移,晶粒严重扭曲,并产生晶粒的拉长、破碎和纤维化,从而使其强度和硬度得到提高,塑性降低,这种现象称为加工硬化,又称冷作硬化。

评定表面层硬化程度的指标主要有冷硬层的深度 h 、表面层的显微硬度 HV 及硬化程度 N 。其中:

$$N = \frac{HV - HV_0}{HV_0} \times 100\% \quad (5-32)$$

式中, HV_0 ——基体材料的显微硬度。

表面层的硬化程度取决于产生塑性变形的力、变形速度以及变形时的温度。切削力越大,塑性变形越大,因而硬化程度越大。变形速度越大,塑性变形越不充分,硬化程度也就越小。变形时的温度不仅影响塑性变形程度,还会影响变形后的金相组织的回复,也就是说温度会部分地消除冷作硬化。因此,表面冷作硬化是强化和回复综合作用的结果。

影响表面层加工硬化的因素可以从3个方面来分析:

(1) 工件材料的影响。硬度越小、塑性越大的材料切削后的冷硬现象越严重。

(2) 刀具的影响。刀具的前角、刃口圆角半径及后面的磨损量对于冷硬层有很大影响,前角减小、刃口圆角半径增大及后面的磨损量增加时,冷硬层深度和硬度也随之增大。

(3) 切削用量的影响。切削速度增大,硬化层深度和硬度都有所减小。这是由于,一方面切削速度会使温度增高,有助于冷硬的回复;另一方面由于切削速度增大时刀具与工件接触时间短,使塑性变形程度减小。进给量 f 增大时,切削力增大,塑性变形程度也增大,因此冷硬现象增大。但在进给量 f 较小时,由于刀具的刃口圆角在加工表面单位长度上的挤压次数增多,因此硬化现象也会增加。

2. 表面层金相组织的变化与磨削烧伤

1) 表面层金相组织变化与磨削烧伤的原因

机械加工过程中,在工件的加工区及其邻近的区域,温度会急剧升高,当温度超过工件金相组织的临界点时,就会产生金相组织的变化。切削加工时,温度一般不会上升到如此程

度。而磨削加工时由于切除单位金属消耗的功率大,产生的热量也多,故工件表面层温度比切削时高得多。另外,砂轮与工件之间的摩擦较大,加上磨粒的微刃大多数是负前角,使工件表面产生较大的塑性变形,在磨削区产生很高的温度,容易使工件表面层产生金相组织的变化。表面层的硬度和强度也相应变化,并伴随有残余应力产生,甚至出现微裂纹,同时出现彩色氧化膜。这种现象称为表面烧伤,直接影响了零件的使用性能。

磨削淬火钢时,工件表面层上形成的瞬时高温将使金属表面产生三种金相组织变化:

(1) 当磨削区温度超过相变温度 A_{c3} 时,马氏体转变为奥氏体,如果这时无冷却液,则工件表层被退火,表面硬度急剧下降,称为退火烧伤。干磨时容易产生这种情况。

(2) 当磨削区温度超过相变温度 A_{c3} 时,马氏体转变成奥氏体,而此时如果有冷却液起充分冷却作用,则使表面出现二次淬火马氏体组织,硬度比原来的回火马氏体高,但很薄,只有几微米厚。在它的下层,因冷却较慢,出现硬度比原来回火马氏体低的回火索氏体或屈氏体,称为淬火烧伤。

(3) 当磨削区温度未超过相变温度,但超过马氏体的转变温度(一般中碳钢 $250 \sim 300^{\circ}\text{C}$),工件表面马氏体组织将转化成回火屈氏体或索氏体组织,使表面层硬度低于磨削前的硬度,这称为回火烧伤。

2) 影响磨削烧伤的因素与减轻烧伤的途径

磨削热是造成烧伤的根源,所以,减轻烧伤要从减少磨削热的产生,以及改善冷却条件,使热量尽可能少的传入工件表面层这两个方面着手。这就要合理地选择砂轮,正确地选用磨削用量,加强冷却润滑系统的作用等。

(1) 合理选择砂轮。

选择结合剂弹性大、自锐能力强、不易被磨屑堵塞的砂轮,往往可减少磨削热,防止烧伤。此外,还可采用粗修整砂轮、松组织砂轮及开槽砂轮等来解决烧伤问题。

(2) 正确选用磨削用量。

减小磨削深度、降低砂轮速度能显著降低工件表面层的热损伤程度。但这样会影响生产效率、为此生产中可采用逐步减小磨削切深、适当增大工件速度的方法来解决生产率的问题。

(3) 提高冷却效果。

砂轮高速旋转时,砂轮表面会产生强大的气流层,阻止冷却液进入磨削区,减低了冷却效果。为此,可在冷却液喷嘴上加装空气挡板,使冷却液能顺利进入磨削区,如图 5.38 所示。其次,可采用高压大流量冷却,使冷却液能冲破气流层进入磨削区,这不但能增强冷却效果,还可起到冲洗砂轮、防止磨粒空隙被切屑堵塞的作用。此外,还可采用内冷却装法,如图 5.39 所示,采用的砂轮是多孔隙能渗水的。冷却液引到砂轮中心孔后靠离心力的作用甩出,从而使冷却液可以直接冷却磨削区,起到有效的冷却作用。

3. 表面层的残余应力

切削及磨削过程中加工表面层相对基体材料发生形状、体积变化或金相组织变化时,工件表面层及其与基体材料的交界处产生相互平衡的应力,称为表面层残余应力。其产生的原因主要归纳为以下三个方面。

(1) 冷塑性变形的影响。

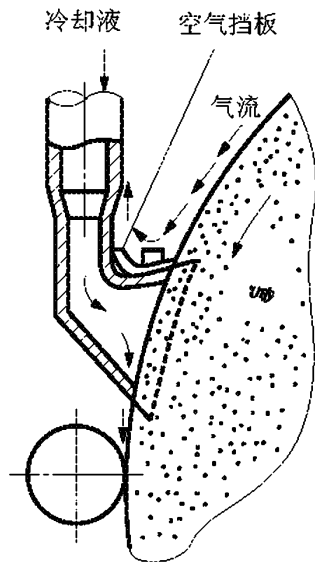


图 5.38 冷却液喷嘴

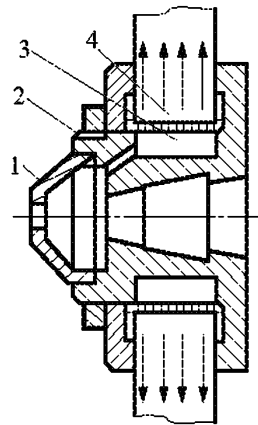


图 5.39 内冷却装置

- 1 锥形盖; 2 通道孔;
3 砂轮中心空腔;
4 有径向小孔的薄壁套

在切削力作用下,已加工表面受到强烈的塑性变形,表面层金属体积发生变化。此时基体金属受到影响而处于弹性变形状态,当切削力去除后基体金属趋向复原,但受到已产生塑性变形的表面层的限制,回复不到原状,因而产生残余拉应力,在表面层则产生残余压应力。

(2) 热塑性变形的影响。

切削或磨削时,在切削区域,表层温度高于基体的温度,表层因其热膨胀受到基体的限制而产生压缩应力。若该应力超过了材料在该温度下的屈服极限,表层就会产生压缩塑性变形。加工后,工件冷却至室温时表层趋向恢复。由于表层已产生压缩塑性变形而受到基体的限制,必然会产生残余拉应力,基体产生残余压应力。

(3) 金相组织变化的影响。

切削时产生的高温,会引起表面层的金相组织变化。由于不同的金相组织有不同的密度, $\gamma_{\text{马}}=7.75\text{g/cm}^3$, $\gamma_{\text{奥}}=7.96\text{g/cm}^3$, $\gamma_{\text{珠}}=7.78\text{g/cm}^3$, $\gamma_{\text{铁}}=7.88\text{g/cm}^3$ 。表面层金相组织变化的结果造成了体积的变化。表面层体积膨胀时,因为受到基体的限制,产生残余压应力;反之,表面层体积缩小,则产生拉应力。例如,磨削淬火钢时,若出现回火烧伤则加工表面的金相组织从马氏体转化成索氏体或屈氏体,密度增大而体积减小,产生残余拉应力。若表面温度超过 A_{c3} ,冷却又充分,则表层又成为马氏体,产生残余压应力。

实际上,机械加工后,表面层的残余应力是上述几个方面原因的综合结果。在一定的条件下,其中某一种或某两种原因可能起主导作用。例如,在切削加工过程中,若切削热不多,加工表面层以冷态塑性变形为主,将产生残余压应力;若切削热量较多,这时在表面层中由于局部高温产生的残余拉应力与冷态塑性变形产生的残余压应力相互抵消一部分。磨削加工时,一般由于磨削热量大,常以局部高温和金相组织变化产生的拉应力为主,故加工后的表面层常带有残余拉应力。

5.3.5 提高机械加工表面质量的方法

提高表面质量的加工方法分为两类,一类是着重减小加工表面的粗糙度值;另一类是着重改善表面层的物理力学性能。减小加工表面的粗糙度值可采用研磨、珩磨、超精加工及抛光等光整加工方法,在第2章已有介绍。改善表面层的物理力学性能,主要采用表面强化工艺。

表面强化工艺是指通过冷压加工方法使表面金属发生冷态塑性变形,以降低表面粗糙度值,提高表面硬度,并在表面层产生残余压应力的表面强化工艺。

(1) 喷丸强化。

这种方法是利用大量的珠丸以高速打击已加工完毕的工件表面,使表面产生冷硬层和残余压应力,这样可以显著提高零件的疲劳强度。这种方法主要用于强化形状复杂的零件,如齿轮、连杆、曲轴等。零件经喷丸强化后,硬化层深度可达 0.7mm,表面粗糙度参数值可由 $3.2\mu\text{m}$ 减小到 $0.4\mu\text{m}$,使用寿命可提高数倍至数十倍。

(2) 滚压加工。

如图 5.40 所示,这种方法是利用淬硬的滚轮或滚珠对工件表面施加压力,使其产生塑性变形。工件表面上原有的凸峰被填充到相邻的凹谷中,使金属表面晶格产生畸变、硬度增加并使表面产生冷硬层和残余压应力,从而提高零件的承载能力及疲劳强度。

滚压加工可以加工外圆、内孔、平面以及成形表面,通常在普通车床、转塔车床或自动车床上进行。

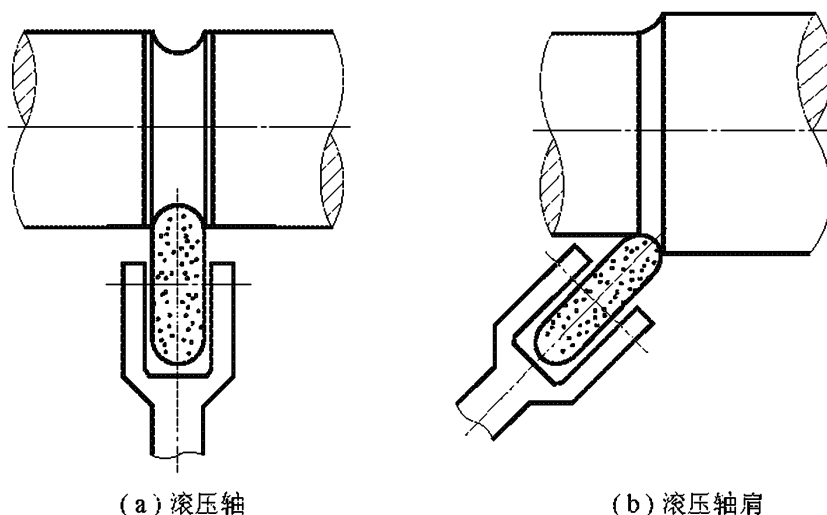


图 5.40 典型滚压加工示意图

(3) 液体磨料强化。

液体磨料强化是利用液体和磨料的混合物强化工件表面的方法。液体和磨料在 $400\sim 800\text{kPa}$ 压力作用下,经过喷嘴高速喷出,射向工件表面,借磨料的冲击作用,磨平工件表面粗糙度凸峰并碾压金属表面。由于磨料的冲击作用,工件表面层产生塑性变形,变形层仅为几十微米。加工后的工件表面层具有残余压应力,提高了工件的耐磨性、耐腐蚀性和疲劳强度。

液体磨料强化工艺最宜于加工复杂型面,如锻模、汽轮机叶片、螺旋桨、仪表零件和切削刀具等。

5.4 机械加工中的振动

机械加工过程中常产生振动,工艺系统的正常切削过程受到干扰和破坏,零件加工表面出现振纹,降低了零件的加工精度和表面质量。强烈的振动可使刀具“崩刃”,使切削过程无法进行。振动影响刀具的耐用度和机床的寿命;振动伴有刺耳的噪音,造成环境污染,影响工人健康。为避免振动,常被迫降低切削用量,致使机床、刀具的工作性能得不到充分发挥,限制了生产力的提高。因此,机械加工中产生的振动,一般来说是一种破坏正常切削过程的

有害现象。研究机械加工过程中产生振动的原因、掌握消减振动的措施,是机械加工实现优质高产、低消耗的重要保证。

机械振动大致可分为自由振动、强迫振动和自激振动3类。由于工件自由振动所占比例较小,且对机械加工影响不大,故本节仅对强迫振动和自激振动加以简单介绍。

5.4.1 强迫振动

1. 强迫振动的产生

强迫振动是指由工艺系统内部或外界周期干扰力持续作用下引起的振动。

(1) 系统外部的周期性干扰力。例如,在机床附近的振动源经过地基传入正在进行加工的机床从而引起工艺系统的振动。

(2) 高速旋转零件的质量偏心。工艺系统中的高速旋转零件,如工件、卡盘、飞轮、砂轮、带轮、联轴器等,它们在高速旋转时产生的离心力即是引起系统振动的外界激振力。

(3) 运动传递过程中引起的振动。如齿轮啮合时的冲击、皮带传动中平皮带的接头、三角皮带的厚度不均匀、皮带轮不圆、轴承滚动体尺寸及形状误差等引起的振动。

(4) 往复运动部件的惯性力。

(5) 切削过程中的冲击。如铣、拉加工时刀齿切入切出工件时,车削带有沟槽的工件表面时都会产生冲击。

2. 强迫振动的控制

强迫振动的控制方法有如下几种。

(1) 减少或消除振源的激振力。如精确平衡各回转零部件,电动机的转子和砂轮不但要做静平衡,更要进行动平衡;提高轴承的制造精度和装配质量。

(2) 隔振。在振动的传递路线中,安放具有弹性性能的隔振装置,以吸收振源能量。如将机床安置在防振地基上,在振源与刀具和工件之间设置弹簧或橡皮垫片等。

(3) 提高工艺系统的动刚度及阻尼,使强迫振动的频率 ω 远离系统的固有频率 ω_0 ,避开共振区。如刮研接触面,提高部件的接触刚度;调整镶条,加强连接刚度等。

(4) 减小冲击切削振动。如按需要改变刀具转速或机床结构,保证刀具冲击频率远离机床共振频率及其倍数;增加刀齿齿数;减小切削用量,以便减小切削力;设计不等齿距的铣刀等。

(5) 采用减振器和阻尼器。

5.4.2 自激振动

1. 自激振动系统的组成

由振动系统本身引起的交变力作用而产生的振动,称为自激振动,又称颤振。其振动频率与系统的固有频率相近。由于维持振动所需的交变力是由振动过程本身产生的,所以振动系统的运动一停止,交变力也随之消失,自激振动也就停止。自激振动系统是一个由振动系统(工艺系统)和调节系统(切削过程)两个环节组成的闭环系统,如图5.41所示。由图5.41可见,自激振动系统维持稳定振动的条件为:在一个振动周期内,从能源机构经调节系统输入到振动系统的能量,等于系统阻尼所消耗的能量。

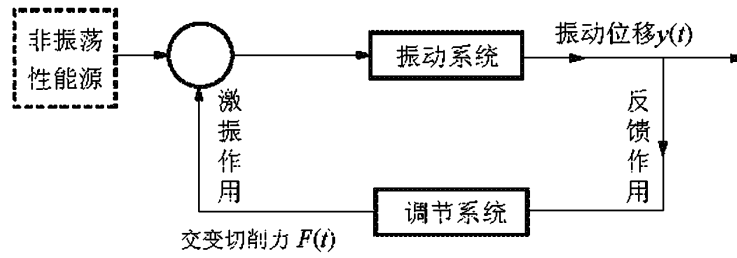


图 5.41 自激振动系统的组成

2. 产生自激振动的机理

1) 负摩擦自振原理

在切削塑性材料时,由切削原理知,径向切削分力开始随切削速度的增加而增大,自某一速度开始,随切削速度的增加而下降。在力—速度曲线下降区,极易引起自激振动。径向切削分力主要取决于切屑与刀具相对运动所产生的摩擦力。图 5.42(a)所示为车削加工的切削模型,将其简化为单自由度系统,刀具简化为等效质量 m ,仅能做径向运动。图 5.42(b)为径向切削力 F_p 与切屑和前刀面相对滑动速度 v 的关系曲线。在稳定切削时,工件表面的线速度为 v_c 。则刀具和切屑的相对滑动速度为 $v_1 = v_c / \zeta$, ζ 为切屑收缩系数。当刀具发生振动时,前刀面与切屑的相对滑动速度便要附加一个振动速度 v_2 。刀具切入工件时相对滑动速度为 $v_1 + v_2$,刀具退出工件时,相对滑动速度为 $v_1 - v_2$,它们分别对应于径向切削力 F_{p1} 和 F_{p2} 。所以,刀具切入的半个周期中,切削力所做的负功小于刀具切出工件的半个周期中所做正功,在一个振动周期中,便有多余的能量输入振动系统,从而激起振动。

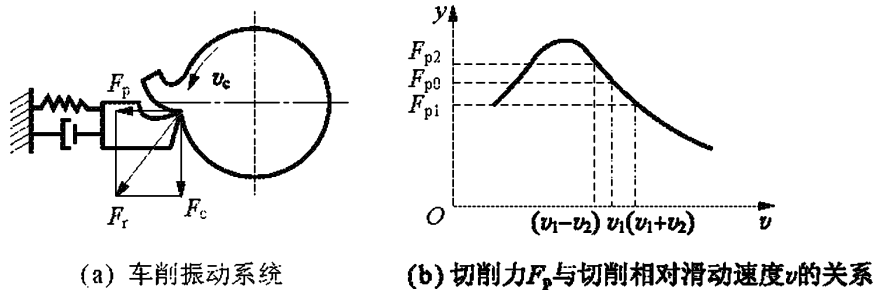


图 5.42 负摩擦原理图

2) 再生效应自振原理

切削或磨削加工时,后一次走刀和前一次走刀总会有部分重叠。如图 5.43 所示,设砂轮宽度为 B ,工件每转进给量为 f ,砂轮前一转的磨削区和后一转的磨削区有重叠部分,其大小用重叠系数 μ 表示,则

$$\mu = \frac{B - f}{B} \tag{5-33}$$

前后两次走刀完全重叠时, $\mu = 1$; 无重叠时, $\mu = 0$; 一般情况, μ 在 $0 \sim 1$ 之间。

在稳定切削过程中,由于偶然的扰动(如刀具碰到工件材料上的硬质点、余量不均匀等),引起工件与刀具发生相对的自由振动,从而在切削表面上留下振纹,当第二次走刀时,刀具将在有波纹的表面上进行切削。振动的发生与维持可用如图 5.44 所示的 3 种切削过程的能量关系说明。设第 i 次切削时刀具与工件间的振纹为 y_0 ,第 $i+1$ 次(振纹为 y)就要

从已有振纹的表面上切除切屑。图 5.44(a)表示在一个周期中切削厚度处处相等,切入时切削力 F 所做的负功(因为切入时刀具的速度方向与切削力 F 的方向相反)与切出时所做的正功相等,振纹保持原有的状态;图 5.44(b)表示振幅 y 比 y_0 滞后 φ 角,刀具切入半周期中平均切削厚度比切出的平均厚度小。因此,切入时的平均切削力比切出时的小,所以在一个振动周期中,切削力做的正功大于负功,系统得到了能量的输入,振动加强。图 5.44(c)中, y 比 y_0 超前 φ 角,刀具切入的半周期,平均切削厚度比切出时的大,因此,切削力所做的负功大于正功,振动逐渐衰减。

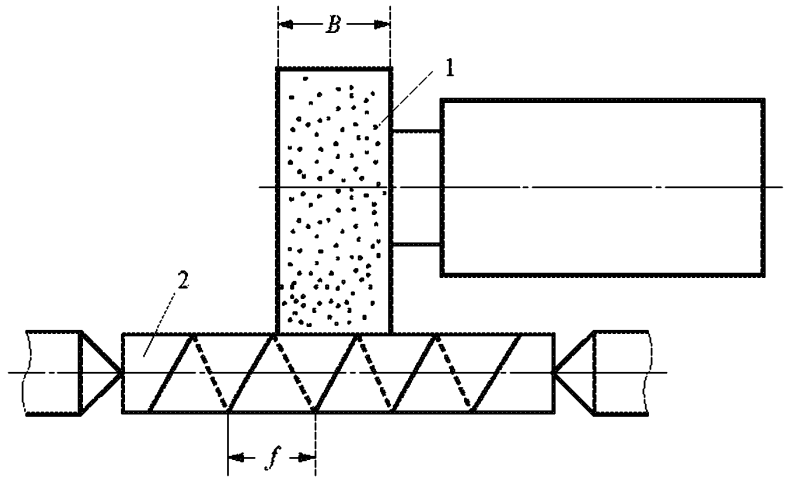


图 5.43 外圆磨削示意图

综上所述,振动 y 滞后于 y_0 是产生再生颤振的必要条件。

3) 振型耦合自振原理

振动系统实际上都是多自由度的,图 5.45 是一个二自由度振动系统。设切削前工件表面是光滑的,即不考虑再生效应。当刀架系统产生了角频率为 ω 的振动时,刀夹将在 x_1 和 x_2 两个方向上同时振动,刀具振动的轨迹一般为椭圆形的封闭曲线。如图 5.45 所示,椭圆形曲线的旋向是顺时针的,则刀具沿 ACB 的轨迹是切入工件,它的运动方向与切削力 F 的方向相反, F 做负功。沿着 BDA 轨迹退出时, F 力做正功。由于切出时平均切削厚度大于切入时平均切削厚度,故切削力做的正功大于负功,在一个振动周期中便有多余的能量输入振动系统,维持系统的振动。如果刀具和工件相对运动轨迹沿着 $ADBC$ 的方向进行,则切削力 F 做的负功大于正功,振动不能维持,而不断衰减下去。

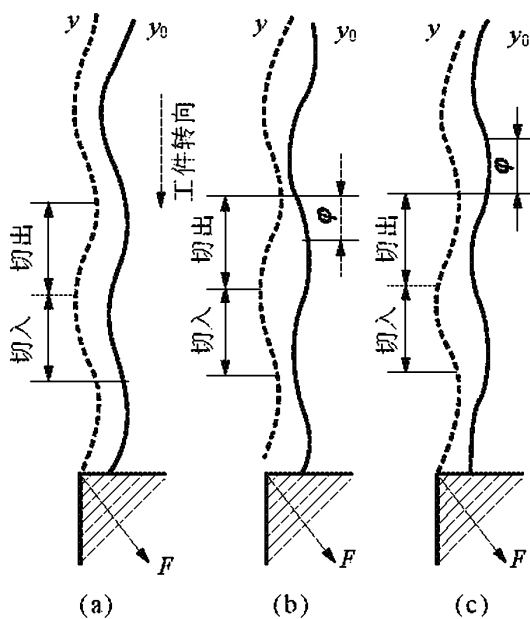


图 5.44 再生效应自振原理

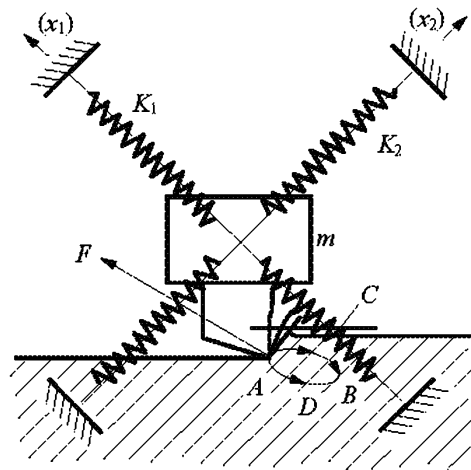


图 5.45 振型耦合自振原理

3. 自激振动的控制

1) 尽量减小重叠系数 μ

重叠系数 μ 直接影响再生效应的大小。重叠系数值取决于加工方式、刀具的几何形状、切削用量等。图 5.46 中列出了不同加工方式的 μ 值。车螺纹[图 5.46(a)]时, $\mu=0$, 工艺系统不会有再生型自激振动产生。切断工件[图 5.46(b)]时, $\mu=1$, 再生效应最大。对于一般外圆, 纵向车削时, $\mu=0\sim 1$, 此时应通过改变切削用量和刀具几何形状, 使 μ 尽量减小, 以提高切削的稳定性。

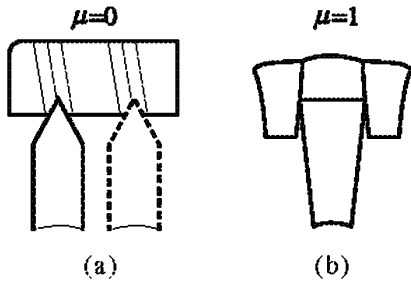


图 5.46 不同加工方式的 μ 值

2) 合理选择刀具几何参数

适当地增大前角、主偏角, 能减小 F_p , 从而减小振动。后角可尽量取小, 但精加工中由于后角较小, 刀刃不容易切入工件, 而且后角过小时, 刀具后面与加工表面间的摩擦可能过大, 反而容易引起自振。通常在刀具的主后面下磨出一段后角为负的窄棱面, 如图 5.47 所示, 这样同时可以增大工件和后刀面之间的摩擦阻尼, 起到很好的减振效果。

3) 采用高速切削或低速切削可以避免自激振动

增大进给量可使振幅减小, 在加工表面粗糙度允许的情况下, 可以选取较大的进给量以避免自激振动。切深增大, 切削宽度也增大, 则振动增强, 选择切深时一定要考虑切削宽度对振动的影响。

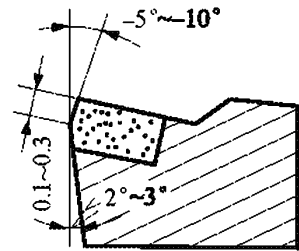


图 5.47 带负倒棱的减振刀具

4) 提高工艺系统的刚度

首先是提高机床的抗振性能。例如, 外圆磨床的主轴系统要适当地减小轴承的间隙, 滚动轴承要加适当的预应力, 以增强接触刚度。工件与刀具的抗振性能成为系统薄弱环节时, 应采取相应的技术措施。如加工细长轴时, 用中心架或跟刀架来提高工件的抗振性能; 当用细长刀杆加工孔时, 要采用中间导向支承来提高刀具的抗振性能等。

5) 采用减振装置

在采用上述措施后仍然不能达到减振目的时, 可考虑使用减振装置。

(1) 阻尼式减振器。

它利用固体和液体的摩擦阻尼来消耗振动的能量。例如, 在机床主轴系统中附加阻尼减振器(如图 5.48 所示), 它相当于间隙很大的滑动轴承, 通过阻尼套和阻尼间隙中的粘性油的阻尼作用来减振。

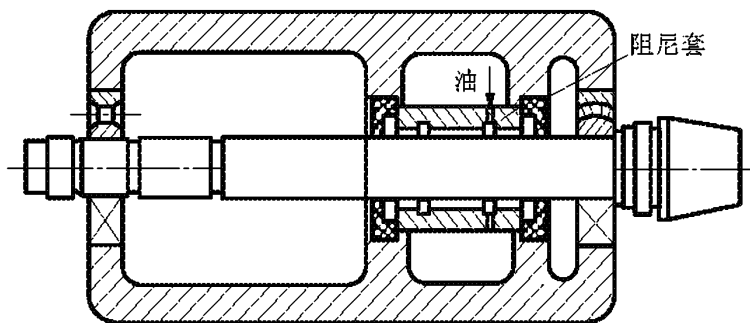


图 5.48 阻尼式减振器

(2) 动力式减振器。

如图 5.49 所示,它是用弹性元件把一个附加质量块连接到振动系统中,利用附加质量的动力作用,使弹性元件加在系统上的力与系统的激振力相抵消。

(3) 冲击式减振器。

如图 5.50 所示,它由一个与振动系统刚性相连的壳体 2 和一个在壳体内自由冲击的质量块 1 组成。当系统振动时,自由质量块反复冲击振动系统,消耗振动的能量,以达到减振效果。

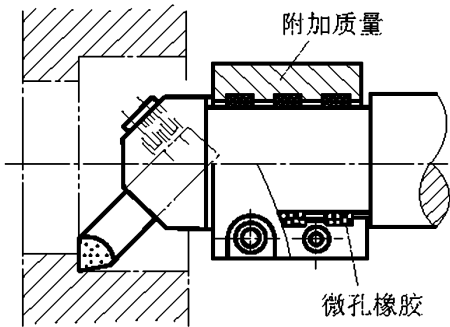


图 5.49 动力式减振器

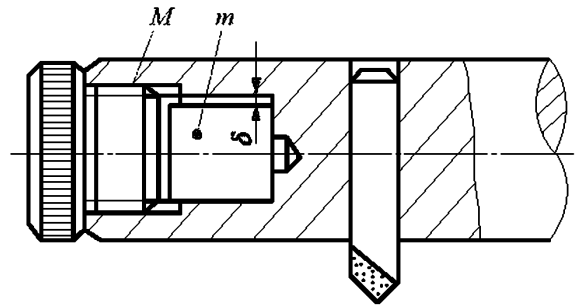
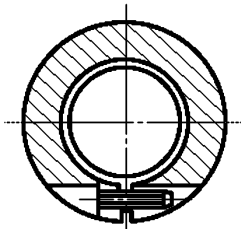


图 5.50 冲击式减振器

思考与练习题

- 5-1 举例说明加工精度、加工误差的概念以及两者的区别与关系。
- 5-2 获得加工精度的方法有哪些?
- 5-3 什么是原始误差? 包含哪些因素?
- 5-4 主轴回转误差有哪些? 对零件加工有何影响?
- 5-5 为什么卧式车床床身导轨在水平面内的直线度要求高于垂直面内的直线度要求?
- 5-6 何谓工艺系统的刚度? 对加工精度有何影响? 怎样提高工艺系统的刚度。
- 5-7 在立轴式六角车床上加工外圆时,为什么不水平装夹车刀而是垂直装夹?
- 5-8 在普通车床上车外圆时:
- (1) 如车床导轨在水平平面内有直线度误差 Δ_1 , 工件的直径误差 δ_D 等于多少?
 - (2) 如车床导轨在垂直平面内有直线度误差 Δ_2 , 工件的直径误差 δ_D 等于多少?
 - (3) 如车床的前后导轨有平行度误差 Δ_3 , 工件的直径误差 δ_D 等于多少?
- 5-9 在车床上用尾座安装镗刀镗孔会产生什么形状误差?
- 5-10 在 3 台车床上分别在两顶尖之间加工 3 批工件的外圆, 加工后经测量, 分别产生如图 5.51 所示的形状误差, 试分析其主要原因。

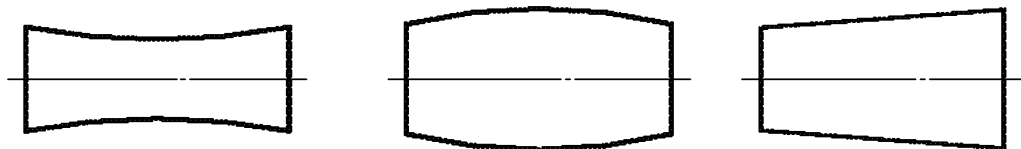


图 5.51 题 5 10

5-11 什么是误差复映? 误差复映系数的大小与哪些因素有关?

5-12 已知一工艺系统的误差复映系数为 0.25, 工件在本工序前存在 0.45mm 的圆柱度(椭圆)误差, 如本工序形状精度规定公差 0.01mm, 问至少进给几次才能使形状精度达到

要求?

5-13 在卧式铣床上铣键槽,经测量发现工件右端处的槽深大于中间的槽深,且都比未加工之前调整的深度浅,试分析产生这一现象的原因。

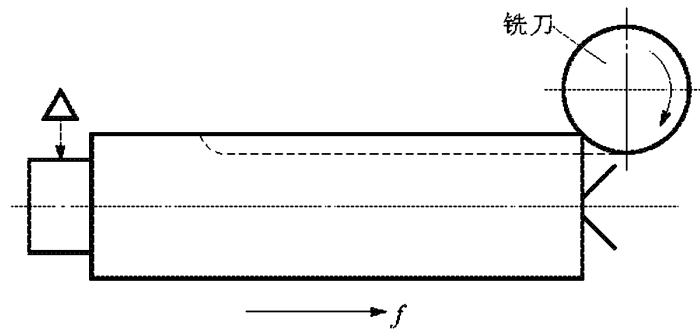


图 5.52 题 5 13

5-14 分析产生残余应力的主要原因及经常出现的场合。

5-15 加工误差按其性质可分为哪几类? 它们各有何特点或规律?

5-16 正态分布曲线的特征参数是什么? 特征参数反映了分布曲线的哪些特征?

5-17 车削一批销的外圆,其尺寸要求为 $\phi 20_{-0.12}^0$,经测量统计计算,该工序尺寸按正态分布,标准偏差 $\sigma = 0.025\text{mm}$,公差带中心小于分布曲线中心的尺寸,其偏移量为 $\Delta = 0.03\text{mm}$ 。试指出该批工件的常值系统性误差和随机性误差,计算合格品率和废品率。

5-18 在磨床上加工销轴,要求外径 $d = \phi 16_{-0.02}^0\text{mm}$,抽样后测得 $\bar{x} = 15.991\text{mm}$, $\sigma = 0.005\text{mm}$,其尺寸分布符合正态分布:

- (1) 画出尺寸分布图;
- (2) 标出可修复及不可修复的废品;
- (3) 分析产生废品的原因。

5-19 表面质量的含义包括哪些内容? 零件的表面质量对零件的使用性能有什么影响?

5-20 影响切削加工表面粗糙度的因素有哪些? 磨削加工时影响加工表面粗糙度的因素有哪些?

5-21 为什么在机械加工时,工件表面层会产生残余应力? 磨削加工工件表面层中残余应力产生的原因与切削加工时是否相同?

5-22 什么是磨削“烧伤”? 为什么磨削加工常产生“烧伤”?

5-23 何谓强迫振动? 何谓自激振动? 机械加工中引起两种振动的主要原因是什么?

第 6 章 装配工艺基础

教学提示:任何机械产品或设备都是由若干零件和部件组成的。根据规定的技术要求,将零件组合成组件、部件并进一步将零件、部件组合成机械产品或设备的过程称为装配。

机械的装配通常需要达到一定的质量要求。零件经装配后在尺寸、相对位置及运动等方面所获得的精度称为装配精度。要达到装配精度要求,不仅需要相关零件的加工达到一定尺寸精度,同时还要借助于一定的装配工艺手段,并借助装配工艺尺寸链的计算,合理确定各组成零件的相关尺寸及其偏差。

本章的重点是保证装配精度的四种方法及装配工艺尺寸链的计算。

教学要求:本章要求学生熟悉装配的概念及内容,掌握装配精度的含义,熟练掌握装配工艺尺寸链的建立及计算方法,并掌握保证装配精度的四种方法;了解装配工艺规程设计的基本思路和设计步骤。

装配是整个机械制造过程的后期工作。机器的各种零部件只有经过正确的装配,才能成为符合要求的产品。怎样将零件装配成机器、零件精度与产品精度的关系以及保证装配精度的方法,是装配工艺所要解决的问题。

6.1 机械装配概述

6.1.1 装配的概念

任何机器都是由许多零件、组件和部件组成的。根据规定的技术要求,将若干零件结合成组件和部件,并进一步将零件、组件和部件结合成机器的过程称为装配。前者称为部件装配;后者称为总装配。

装配是机器制造过程中的最后一个阶段。为了使产品达到规定的技术要求,装配不仅是指零、部件的结合过程,还应包括调整、检验、试验、油漆和包装等工作。

6.1.2 装配精度

装配精度是指零件经装配后在尺寸、相对位置及运动等方面所获得的精度。正确地规定机器和部件的装配精度是产品设计的重要环节之一,它不仅关系到产品质量,也影响产品制造的经济性。装配精度是制订装配工艺规程的主要依据,也是选择合理的装配方法和确定零件加工精度的依据。所以,应正确规定机器的装配精度。

装配精度一般包括零、部件的尺寸精度、位置精度、相对运动精度和接触精度等。

(1) 零、部件的尺寸精度。

尺寸精度包括配合精度和距离精度。配合精度是指装配后相关零部件间应该保证的距离和间隙,如轴孔的配合间隙或过盈,会影响配合性质和配合质量。距离精度是指零、部件

间的轴向间隙、轴向距离和轴线距离等。

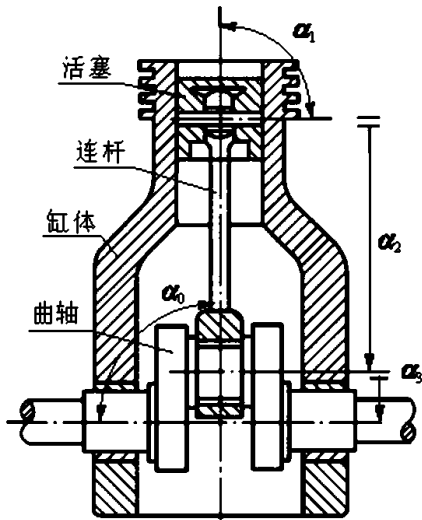


图 6.1 发动机装配的相互位置精度

(2) 零、部件的位置精度。

位置精度指装配后零部件间应该保证的平行度、垂直度、同轴度和各种跳动等。如普通车床溜板移动对尾座顶尖套筒锥孔轴心的平行度要求等；又如图 6.1 所示，发动机装配的相互位置精度、活塞外圆中心线与其销孔中心线的垂直度 α_1 、曲轴的连杆颈中心与其大头孔中心线的平行度 α_2 等。

(3) 零、部件的相对运动精度。

相对运动精度指装配后有相对运动的零部件间在运动方向和运动位置上应保证的精度要求。运动方向上的精度包括零、部件间相对运动时直线度、平行度和垂直度等。如车床溜板移动在水平面内的直线度、溜板移动轨迹对主轴回转中心的平行度等。运动位置上的精度就是传动精度，它是指传动链中，始末两端传动组件的相对运动精度，如滚齿机的滚刀主轴与工作台相对运动的精度等。

(4) 零、部件的接触精度。

接触精度指相互配合表面、接触表面间达到规定的接触面积的大小和接触点分布的情况。它影响部件的接触刚度和配合质量的稳定性。如齿轮啮合、锥体配合、移动导轨间均有接触精度的要求。

不难看出，上述各装配精度之间存在一定的关系，如接触精度是尺寸精度和位置精度的基础，而位置精度又是相对运动精度的基础。

6.1.3 装配精度与零件精度间的关系

机器及其部件都是由零件所组成，因此，机器的装配精度和零件的精度有着密切的关系。零件的精度，特别是关键零件的加工精度，对装配精度有很大影响。如图 6.2 所示，普通车床尾座移动对溜板移动的平行度要求，就主要取决于床身上溜板移动的导轨 A 与尾座移动的导轨 B 的平行度以及导轨面间的接触精度。

一般而言，多数的装配精度是和它相关的若干个零部件的加工精度有关，所以应合理地规定和控制这些相关零件的加工精度，在加工条件允许时，它们的加工误差累积起来，仍能满足装配精度的要求。但是，当遇到有些要求较高的装配精度时，如果完全靠相关零件的制造精度来直接保证，则零件的加工精度将会很高，给加工带来较大的困难。

如图 6.3 所示，普通车床床头和尾座两顶尖的等高度要求，主要取决于主轴箱 1、尾座 2、底板 3 和床身 4 等零部件的加工精度。该装配精度很难由相关零部件的加工精度直接保证。在生产中，常按较经济的精度来加工相关零部件，而在装配时则采用一定的工艺措施（如选择、修配、调整等），从而形成不同的装配方法，来保证装配精度。本例中，采用修配底板 3 的工艺措施保证装配精度，这样做虽然增加了装配的劳动量，但从整个产品制

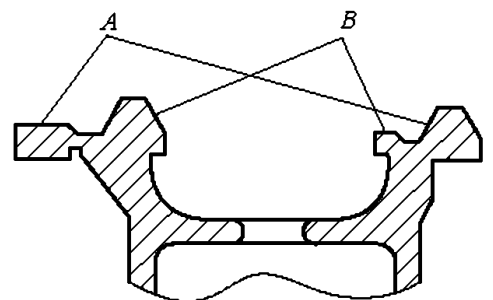


图 6.2 床身导轨简图

造的全局分析,仍是经济可行的。

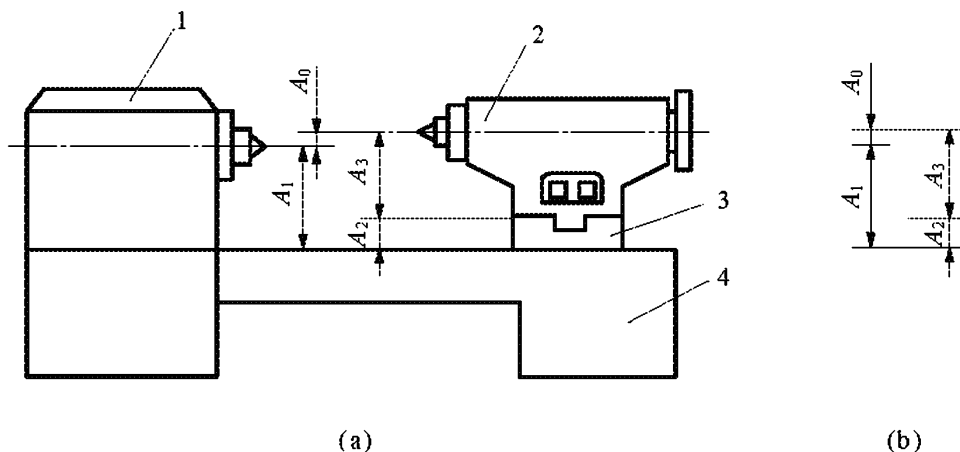


图 6.3 主轴箱主轴与尾座套筒中心线等高结构示意图

1 主轴箱;2 尾座;3 尾座底板;4 床身

综上所述,产品的装配精度和零件的加工精度有密切的关系。零件精度是保证装配精度的基础,但装配精度并不完全取决于零件的加工精度,还取决于所采用的装配方法。如果装配方法不同,对各个零件的精度要求也不同。对于某一给定的机器结构,有关零、部件的相关尺寸的精度等级和极限偏差可以根据装配精度要求和所采用的装配方法,通过解算装配尺寸链来确定。

6.2 装配尺寸链

装配尺寸链是产品或部件在装配过程中,由相关零件的相关尺寸(表面或轴线间距离)或相互位置关系(平行度、垂直度或同轴度等)所组成的尺寸链。其基本特征依然是尺寸组合的封闭性,即由一个封闭环和若干个组成环所构成的尺寸链呈封闭图形。下面重点介绍装配尺寸链的建立及计算方法。

6.2.1 装配尺寸链的建立

1. 直线装配尺寸链

1) 封闭环与组成环的查找

装配尺寸链的封闭环多为产品或部件的装配精度,凡对某项装配精度有影响的零部件的有关尺寸或相互位置精度即为装配尺寸链的组成环。查找组成环的方法为:从封闭环两边的零件或部件开始,沿着装配精度要求的方向,以相邻零件装配基准间的联系为线索,分别由近及远地去查找装配关系中影响装配精度的有关零件,直至找到同一基准零件的同一基准表面为止。这些有关尺寸或位置关系,即为装配尺寸链中的组成环。然后,画出尺寸链图,判别组成环的性质。

如图 6.3 所示装配关系中,主轴锥孔轴心线与尾座轴心线对溜板移动的等高度要求 A_0 为封闭环,按上述方法很快查找出组成环为 A_1 、 A_2 和 A_3 ,画出装配尺寸链,如图 6.3(b)。

图 6.4 所示装配关系中,齿轮轴的轴向间隙 A_0 为要求的装配精度,为封闭环,而其余尺

寸为组成环。

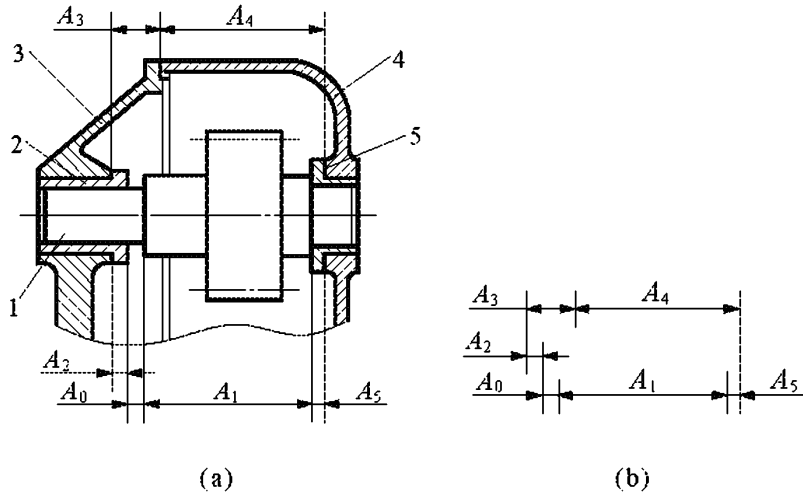


图 6.4 传动箱的装配尺寸链

1 齿轮轴; 2 左滑动轴承; 3 左箱体; 4 右箱体; 5 右滑动轴承

2) 建立装配尺寸链的注意事项

- (1) 装配尺寸链中的装配精度就是封闭环。
- (2) 按一定层次分别建立产品与部件的装配尺寸链。

机械产品通常都比较复杂,为便于装配和提高装配效率,整个产品多划分为若干部件。装配工作分为部件装配和总装配,因此,应分别建立产品总装尺寸链和部件装配尺寸链。产品总装尺寸链以产品精度为封闭环,以总装中有关零部件的尺寸为组成环。部件装配尺寸链以部件装配精度要求为封闭环(总装时则为组成环),以有关零件的尺寸为组成环。这样分层次建立的装配尺寸链比较清晰,表达的装配关系也更加清楚。

- (3) 在保证装配精度的前提下,装配尺寸链组成环可适当简化。

图 6.5 为车床头尾座中心线等高的装配尺寸链。图中各组成环的意义如下:

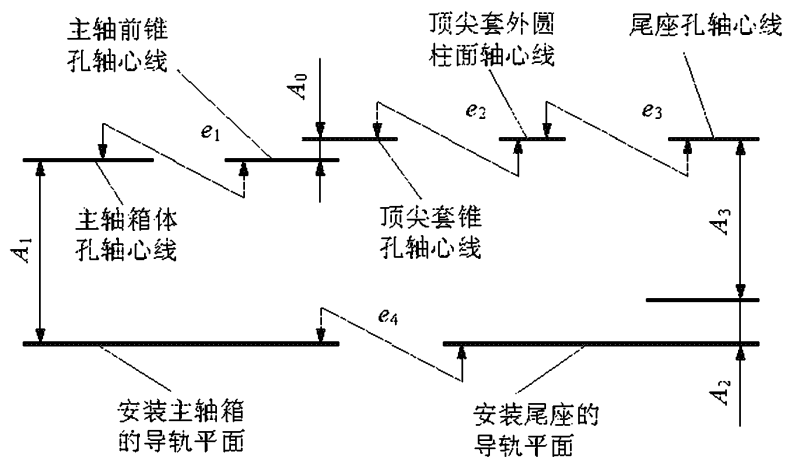


图 6.5 车床头尾座中心线等高的装配尺寸链

- A_0 ——车床头尾座中心线的等高度,即装配精度;
- A_1 ——主轴轴承孔轴心线至底面的距离;
- A_2 ——尾座底板厚度;
- A_3 ——尾座孔轴心线至底面的距离;

- e_1 ——主轴滚动轴承外圈内滚道对其外圆的同轴度误差；
- e_2 ——顶尖套锥孔相对外圆的同轴度误差；
- e_3 ——顶尖套与尾座孔配合间隙引起的偏移量(向下)；
- e_4 ——床身上安装主轴箱和尾座的平导轨之间的等高度。

通常由于 $e_1 \sim e_4$ 的公差数值相对于 $A_1 \sim A_3$ 的公差很小,故装配尺寸链可简化成图 6.3 (b)所示。

(4) 确定相关零件的相关尺寸应采用“尺寸链环数最少”原则(亦称最短路线原则)。

由尺寸链的基本理论可知,封闭环公差等于各组成环公差之和。当封闭环公差一定时,组成环越少,各环就越容易加工。因此,每个相关零件上仅有一个尺寸作为相关尺寸最为理想,即用相关零件上装配基准间的尺寸作为相关尺寸。同理,对于总装配尺寸链来说,一个部件也应当只有一个尺寸参加尺寸链。

如图 6.6 所示,是一车床尾座顶尖套装配图。装配时,要求后盖 3 装入后螺母 2 在尾座套筒内的轴向窜动不大于某一数值。如果后盖尺寸标注不同,就可建立两个不同的装配尺寸链。图 6.6(c)较图 6.6(b)多了一个组成环,其原因是和封闭环 A_0 直接有关的凸台高度 A_3 由尺寸 B_1 和 B_2 间接获得,即相关零件上同时出现两个相关尺寸,这是不合理的。

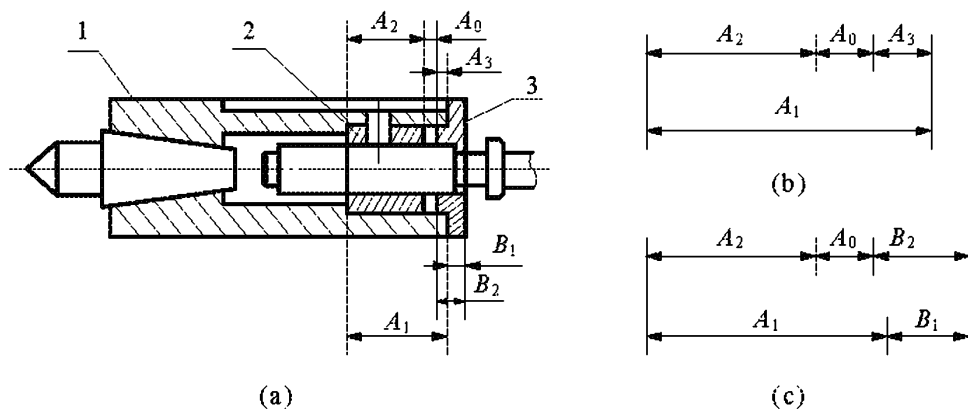


图 6.6 车床尾座顶尖套装配图

1 顶尖套;2 螺母;3 后盖

(5) 当同一装配结构在不同位置方向有装配精度要求时,应按不同方向分别建立装配尺寸链。

例如,常见的蜗杆副结构,为保证正常啮合,蜗杆副中心距、轴线垂直度以及蜗杆轴线与蜗轮中心平面的重合度均有一定的精度要求。这是三个不同位置方向的装配精度,因而需要在 3 个不同方向建立尺寸链。

2. 角度装配尺寸链

角度装配尺寸链的封闭环就是机器装配后的平行度、垂直度等技术要求。尺寸链的查找方法与长度装配尺寸链的查找方法相同。

如图 6.7(a)所示的装配关系中,铣床主轴中心线对工作台面的平行度要求为封闭环。分析铣床结构后知道,影响上述装配精度的有关零件有工作台、转台、床鞍、升降台和床身等。其相应的组成环为:

A_0 ——车床头尾座中心线的等高线,即装配精度;

- A_1 ——工作台面对其导轨面的平行度；
- A_2 ——转台导轨面对其下支承平面的平行度；
- A_3 ——床鞍上平面对其下导轨面的平行度；
- A_4 ——升降台水平导轨对床身导轨的垂直度；
- A_5 ——主轴回转轴线对床身导轨的垂直度。

为了将呈垂直度形式的组成环转化成平行度形式,可作一条和床身导轨垂直的理想直线。这样,原来的垂直度和就转化为主轴轴心线和升降台水平导轨相对于理想直线的平行度和。其装配尺寸链如图 6.7(b)所示,它类似于线性尺寸链,但是基本尺寸为零,可应用线性尺寸链的有关公式求解。

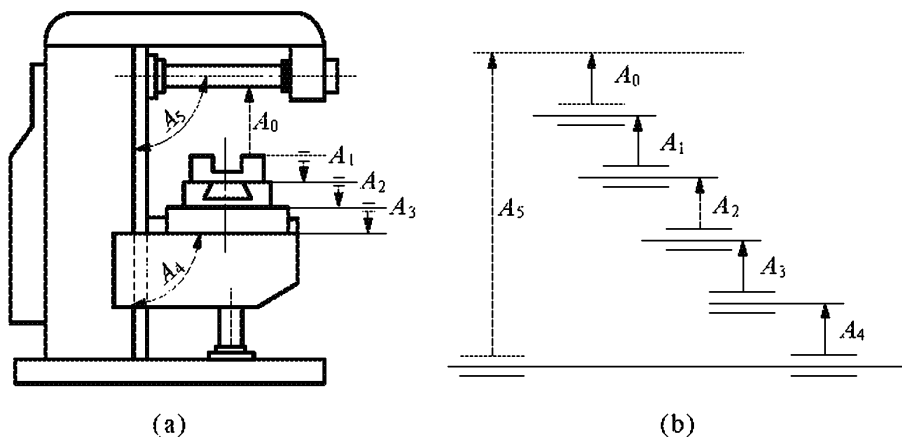


图 6.7 铣床主轴中心线对工作台面的平行度要求

6.2.2 装配尺寸链的计算方法

1. 极值法

极值法指在各组成环误差处于极端情况下,来确定封闭环与组成环关系的一种方法。该方法简单可靠,但在封闭环公差较小、组成环环数较多的情况下,各组成环的公差可能会很小,致使加工困难,零件制造成本增加。因此,极值法主要适用于组成环的环数较少或者组成环的环数较多,但封闭环的公差较大的场合。用极值法解装配尺寸链的计算方法同工艺尺寸链。

2. 概率法

概率法是指在大批、大量生产中,组成环尺寸按概率原理分布,处于极端情况下的可能性很小,从而可用概率论理论来确定封闭环和组成环关系的一种方法。

生产实践证明,加工一批零件时,其实际尺寸处于尺寸中间部分的是多数,而处于极限尺寸的零件是极少数的;而且一批零件在装配中,尤其是对于多环尺寸链的装配,同一部件的各组成环,恰好都处于极限尺寸的情况更是少见。因此,在成批、大量生产中,当装配精度要求高,而且组成环的数目又较多时,应用概率法解算装配尺寸链比较合理。

概率法比极值法更为合理,但概率法计算较为复杂,因而使其应用受到一定的限制。

6.3 保证装配精度的方法

机械产品的精度要求,最终要靠装配工艺来保证。因此,用什么方法能够以最快的速度、最小的装配工作量和较低的成本来达到较高的装配精度要求,是装配工艺的核心问题。

生产中保证产品精度的具体方法有许多种,经过归纳可分为互换法、选配法、修配法和调整法四大类。而且,同一项装配精度,因采用的装配方法不同,其装配尺寸链的解算方法亦不相同。根据产品的性能要求、结构特点、生产形式和生产条件等可以采用不同的方法。现分述如下。

6.3.1 互换法

互换法即零件具有互换性,就是在装配过程中,各相关零件不经任何选择、调整,安装后就能达到装配精度要求的一种方法。产品采用互换装配法时,装配精度主要取决于零件的加工精度。其实质就是用控制零件的加工误差来保证产品的装配精度。按互换程度的不同,互换装配法又分为完全互换法和不完全互换法两种。

1. 完全互换法

在全部产品中,装配时各零件不需挑选、修配或调整就能保证装配精度的装配方法称为完全互换法。选择完全互换装配法时,其装配尺寸链采用极值法公式计算,即各有关零件的公差之和小于或等于装配公差:

$$\sum_{i=1}^{n-1} T_{A_i} \leq T_{A_0} \quad (6-1)$$

式中, T_{A_0} —— 封闭环公差;

T_{A_i} —— 组成环公差;

n —— 尺寸链总环数。

故装配中零件可以完全互换。当遇到反计算形式时,可按“等公差”原则先求出各组成环的平均公差:

$$T_M \leq \frac{T_{A_0}}{n-1} \quad (6-2)$$

再根据生产经验,考虑到各组成环尺寸的大小和加工难易程度进行适当调整。如尺寸大、加工困难的组成环应给以较大公差;反之,尺寸小、加工容易的组成环就给以较小公差。对于组成环是标准件的尺寸则仍按标准规定;对于组成环是几个尺寸链中的公共环时,其公差值由要求最严的尺寸链确定。

确定好各组成环的公差后,按“人体原则”确定极限偏差,即组成环为包容面时,取下偏差为零;组成环为被包容面时,取上偏差为零。若组成环是中心距,则偏差按对称分布。按上述原则确定偏差后,有利于组成环的加工。

但是,当各组成环都按上述原则确定偏差时,按公式计算的封闭环极限偏差常不符合封闭环的要求值。因此,就需选取一个组成环,它的极限偏差不是事先定好,而是经过计算确定,以便与其他组成环协调,最后满足封闭环极限偏差的要求,这个组成环称为协调环。协调环一般不能选取标准件或几个尺寸链的公共组成环,其余计算公式的解算同工艺尺寸链,

不再赘述。

采用完全互换法进行装配,使装配质量稳定可靠,装配过程简单、生产率高,易于组织流水作业及自动化装配,也便于采用协作方式组织专业化生产。但是,当装配精度要求较高,尤其组成环较多时,零件就难以按经济精度制造。因此,这种装配方法多用于高精度的少环尺寸链或低精度多环尺寸链中。

【例 6.1】 图 6.8 中轴固定齿轮在轴上旋转,要求装配后保证齿轮右端的间隙在 0.10~0.35mm 之间,已知: $A_1=35\text{mm}$, $A_2=14\text{mm}$, $A_3=14\text{mm}$,用完全互换法解算各组成环的公差及其尺寸偏差。

分析:由题意得知,要保证的齿轮右端的间隙是在零件装配后间接形成的,为封闭环 A_0 。经查对,在 A_0 与 A_1, A_2, A_3 组成的尺寸链中, A_1, A_2 为减环, A_3 为增环。

解:(1) 计算封闭环基本尺寸: $A_0=A_3-(A_1+A_2)=49\text{mm}-(35\text{mm}+14\text{mm})=0\text{mm}$

(2) 计算封闭环公差: $T_{A_0}=0.35\text{mm}-0.10\text{mm}=0.25\text{mm}$

(3) 确定各组成环公差:

首先计算组成环平均公差: $T_M=\frac{T_{A_0}}{n-1}=\frac{0.25}{3}\text{mm}=0.083\text{mm}$

考虑到各组成环基本尺寸的大小及制造难易程度各不相同,故各组成环的公差应作适当调整。因 A_1, A_3 在同一尺寸分段范围内,平均公差值接近该尺寸段的 IT10,取 IT10,故

$$T_{A_1}=T_{A_3}=0.10\text{mm}$$

$$T_{A_2}=T_{A_0}-T_{A_1}-T_{A_3}=0.25\text{mm}-0.10\text{mm}-0.10\text{mm}=0.05\text{mm}$$

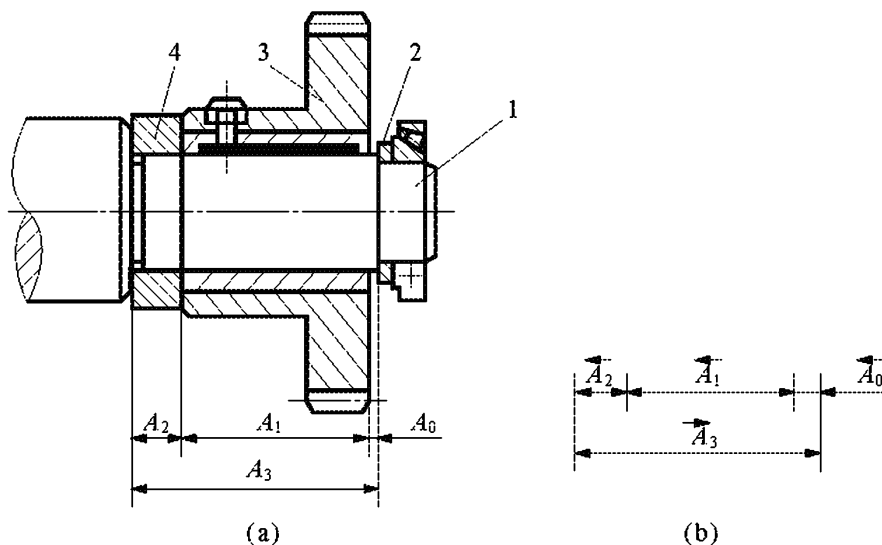


图 6.8 齿轮装配图

1 轴;2 挡圈;3 齿轮;4 轴套

(4) 确定各组成环的极限偏差。

组成环的极限偏差一般按“人体原则标注”,对于内尺寸,其尺寸偏差按 H 配置,对于外尺寸,其尺寸偏差按 h 配置。人体方向不明的长度尺寸,其极限偏差按“对称偏差”原则配置。取:

$$A_1=35\text{h}10=35_{-0.10}^0\text{mm};$$

$$A_3=49\text{j}5=49\text{mm}\pm 0.05\text{mm}$$

各组成环的极限偏差:

$$ES_{A_0} = ES_{A_3} - (EI_{A_1} + EI_{A_2})$$

$$EI_{A_0} = EI_{A_3} - (ES_{A_1} + ES_{A_2})$$

$$\text{得: } EI_{A_2} = -0.20\text{mm}, ES_{A_2} = -0.15\text{mm}, A_2 = 14 \begin{smallmatrix} 0 \\ -0.20 \end{smallmatrix}$$

$$\text{标准化后: } A_2 = 14b9 = 14 \begin{smallmatrix} 0 \\ -0.193 \end{smallmatrix} \text{mm}$$

(5) 核算封闭环的极限尺寸。

$$A_{0\max} = 49.05\text{mm} - (34.9\text{mm} + 13.807\text{mm}) = 0.343\text{mm}$$

$$A_{0\min} = 48.95\text{mm} - (35\text{mm} + 13.85\text{mm}) = 0.10\text{mm}$$

结果表明,封闭环尺寸符合要求,故得组成环尺寸及其极限偏差分别为:

$$A_1 = 35 \begin{smallmatrix} 0 \\ -0.10 \end{smallmatrix} \text{mm}, \quad A_2 = 14 \begin{smallmatrix} 0 \\ -0.193 \end{smallmatrix} \text{mm}, \quad A_3 = 49 \pm 0.05\text{mm}$$

2. 不完全互换法

不完全互换法是指在绝大多数产品中,装配时各零件不需挑选、修配或调整就能保证装配精度要求的装配方法。该方法的尺寸链计算采用概率法计算,即当各组成环呈正态分布时,各有关零件公差值的平方之和的平方根小于或等于装配公差:

$$\sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} T_i^2} \leq T_{A_0} \quad (6-3)$$

若各组成环的公差相等,则可得各组成环的平均公差 T_M 为

$$T_M = \frac{T_{A_0}}{\sqrt{n-1}} \quad (6-4)$$

将上式和极值法的 $T_M = \frac{T_{A_0}}{n-1}$ 相比,可知概率法将组成环的平均公差扩大了 $\sqrt{n-1}$ 倍。

其他计算与完全互换法相同。可见,不完全互换法的实质是使各组成环的公差比完全互换法所规定的公差大,从而使组成环的加工比较容易,降低了加工成本。但是,封闭环公差在正态分布下的取值范围为 6σ ,对应此范围的概率为 0.9973,即合格率并非 100%,结果会使一些产品装配后超出规定的装配精度,实际生产常忽略不计。

不完全互换法的特点和完全互换法的特点相似,只是互换程度不同。不完全互换法采用概率法计算,因而扩大了组成环的公差。尤其是在环数较多,组成环又呈正态分布时,扩大的组成环公差最显著,因而对组成环的加工更为方便。但是,会有少数产品超差。为了避免超差,采用不完全互换法时,应有适当的工艺措施。不完全互换法常应用于生产节拍不是很严格的成批生产。例如,机床和仪器仪表等产品中,封闭环要求较宽的多环尺寸链应用较多。

【例 6.2】 图 6.8 中轴固定齿轮在轴上旋转,要求装配后保证齿轮右端的间隙在 0.10~0.35mm 之间,已知: $A_1 = 35\text{mm}$, $A_2 = 14\text{mm}$, $A_3 = 49\text{mm}$, A_1 、 A_2 、 A_3 的尺寸分布均为正态分布,尺寸分布中心与公差带中心重合。试用不完全互换法解算各组成环的公差及其尺寸偏差。

解:(1) 计算封闭环基本尺寸: $A_0 = A_3 - (A_1 + A_2) = 49\text{mm} - (35\text{mm} + 14\text{mm}) = 0\text{mm}$

(2) 计算封闭环公差: $T_{A_0} = 0.35\text{mm} - 0.10\text{mm} = 0.25\text{mm}$

(3) 确定各组成环的平均公差: $T_M = \frac{T_{A_0}}{\sqrt{n-1}} = \frac{T_{A_0}}{\sqrt{3}} = \frac{0.25}{\sqrt{3}} \text{mm} \approx 0.144\text{mm}$

与极值法得到的平均公差 T_M 相比,放大了 73.5%,有利于组成环的制造。

(4) 确定各组成环的制造公差。

以组成环平均平方公差为基础,参考各组成环尺寸大小和加工难易程度,确定各组成环的制造公差。因 A_2 便于加工,取其为协调环。因 A_1 与 A_3 基本尺寸在同一尺寸分段范围内,平均公差值接近该尺寸段的 IT11,按 IT11 确定 A_1 与 A_3 的公差。查表得

$$T_{A_1} = T_{A_3} = 0.16 \text{ mm}$$

$$\text{则 } T_{A_2} = \sqrt{T_{A_0}^2 - T_{A_1}^2 - T_{A_3}^2} = \sqrt{0.25^2 - 0.16^2 - 0.16^2} \text{ mm} \approx 0.106 \text{ mm}$$

A_2 易于加工,按 IT10 取 $T_{A_2} = 0.07 \text{ mm}$

按“偏差人体标注”原则,取 $A_1 = 35\text{h}11 = 35_{-0.16}^0 \text{ mm}$

$$A_3 = 49\text{j}s11 = 49 \pm 0.08 \text{ mm}$$

(5) 确定协调环 A_2 的极限偏差。

$$\text{由于 } \Delta_{A_0} = \Delta_{A_3} - (\Delta_{A_1} + \Delta_{A_2})$$

$$\text{则 } \Delta_{A_2} = \Delta_{A_3} - \Delta_{A_1} - \Delta_{A_0}$$

$$\text{已知 } \Delta_{A_1} = (\text{ES}_{A_1} + \text{EI}_{A_1})/2 = [0 + (-0.16)]/2 = -0.08 \text{ mm}$$

$$\Delta_{A_3} = (\text{ES}_{A_3} + \text{EI}_{A_3})/2 = 0 \text{ mm}$$

$$\Delta_{A_0} = (\text{ES}_{A_0} + \text{EI}_{A_0})/2 = +0.025 \text{ mm}$$

$$\text{得 } \Delta_{A_2} = [0 - (-0.08) - (+0.025)] \text{ mm} = -0.145 \text{ mm}$$

$$\text{ES}_{A_2} = \Delta_{A_2} + T_{A_2}/2 = (-0.145 + 0.07/2) \text{ mm} = -0.11 \text{ mm}$$

$$\text{EI}_{A_2} = \Delta_{A_2} - T_{A_2}/2 = (-0.145 - 0.07/2) \text{ mm} = -0.18 \text{ mm}$$

$$\text{于是 } A_2 = 14_{-0.18}^{+0.11} = 13.89_{-0.07}^0 \text{ mm}$$

(6) 核算封闭环的极限偏差:

$$\Delta_{A_0} = \Delta_{A_3} - (\Delta_{A_1} + \Delta_{A_2}) = [0 - (0.08) - (-0.145)] \text{ mm} = 0.225 \text{ mm}$$

$$\text{封闭环公差: } T_{A_0} = \sqrt{T_{A_1}^2 + T_{A_2}^2 + T_{A_3}^2} = \sqrt{0.16^2 + 0.07^2 + 0.16^2} \text{ mm} \approx 0.24 \text{ mm}$$

$$\text{ES}_{A_0} = \Delta_{A_0} + T_{A_0}/2 = (0.225 + 0.24/2) \text{ mm} = +0.345 \text{ mm}$$

$$\text{EI}_{A_0} = \Delta_{A_0} - T_{A_0}/2 = (0.225 - 0.24/2) \text{ mm} = +0.105 \text{ mm}$$

由此得 $A_0 = 0_{+0.105}^{+0.345}$,符合规定的装配间隙要求。

最后的组成环的极限偏差分别为

$$A_1 = 35_{-0.16}^0 \text{ mm}, A_2 = 13.89_{-0.07}^0 \text{ mm}, A_3 = 49 \pm 0.08 \text{ mm}$$

6.3.2 选择装配法

在批量或大量生产中,对于组成环少而装配精度要求很高的尺寸链,若采用完全互换法,则对零件精度要求很高,给机械加工带来困难,甚至超过加工工艺实现的可能性。在这种情况下可采用选择装配法(简称选配法)。如内燃机的活塞与缸套的配合,滚动轴承内、外圈与滚珠的配合等,可选择选配法。

选择装配法是将相互配合的各零件仍按经济精度制造(即将组成环的公差放大到经济可行的程度),然后选择合适的零件进行装配,以保证规定的装配精度。选择装配法有三种:直接选配法、分组选配法和复合选配法。

1. 直接选配法

所谓直接选配,就是由工人凭经验从许多加工好的零件中挑选出合适的零件来装配。

一个不合适,再换另一个,直到满足装配技术要求为止。例如,在柴油机活塞组件装配时,为了避免机器运转时活塞环在环槽内卡住,可以凭感觉直接挑选易于嵌入环槽的适合尺寸的活塞环。

这种方法的优点是不需要预先将零件分组,但挑选配套零件的时间较长,因而装配工时较长,而且装配质量在很大程度上取决于装配工人的经验和技术水平。因此,这种装配法不适合在生产节拍严格要求的大批大量流水线的装配中。

2. 分组选配法

分组选配法的实质是将加工好的零件按实际尺寸的大小分成若干组,然后按对应组中的一套零件进行装配,同一组内的零件可以互换,分组数越多,则装配精度就越高。零件的分组数要根据使用要求和零件的经济公差来决定。部件中各个零件的经济公差数值可能是相同的,也可能是不相同的。

下面举例说明采用分组选配法时尺寸链的计算方法。

【例 6.3】 图 6.9 示出活塞与活塞销的装配关系,活塞销 1 外径 $d = \phi 28_{-0.0025}^0 \text{ mm}$, 相应的销孔直径 $D = \phi 28_{-0.0075}^{+0.0050} \text{ mm}$ 。根据装配技术要求,活塞销孔与活塞销在冷态装配时应有 $0.0025 \sim 0.0075 \text{ mm}$ 的过盈,与此相应的配合公差仅为 0.005 mm 。

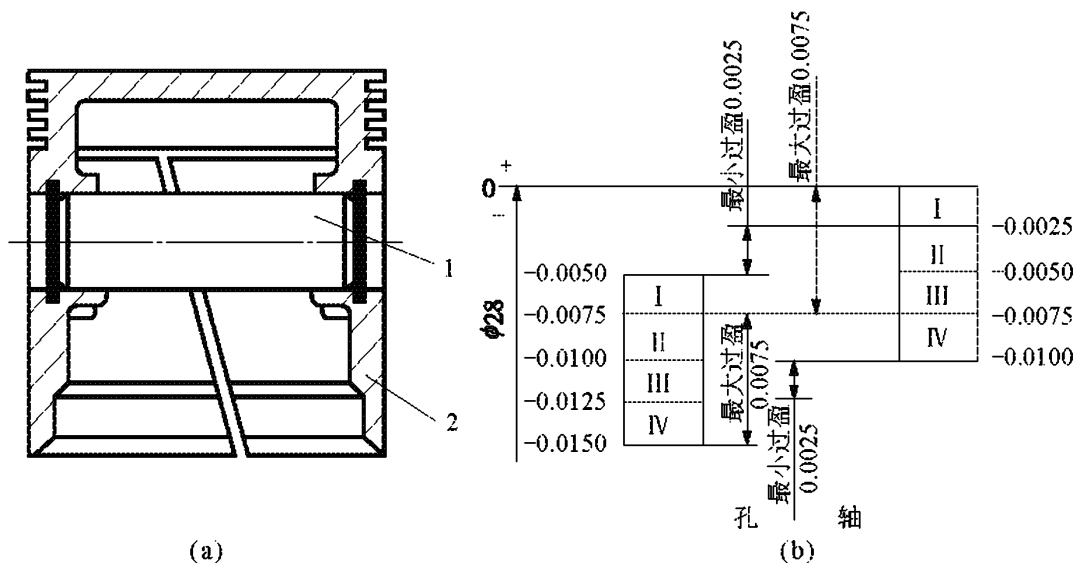


图 6.9 活塞与活塞销装配关系

解:若活塞与活塞销采用完全互换法装配,销孔与活塞销直径的公差按“等公差”分配时,则它们的公差只有 0.0025 mm 。显然,制造这样精确的销和销孔都是很困难的,也是很经济的。

首先将活塞销和活塞销孔的制造公差值分别放大四倍,这时销的直径 $d = \phi 28_{-0.010}^0 \text{ mm}$, 销孔的直径 $D = \phi 28_{-0.015}^{+0.005} \text{ mm}$ 。这样,就可以采用高效率的无心磨和金刚镗分别加工活塞外圆和活塞销孔,然后用精密仪器进行测量,并按尺寸大小分成四组,涂上不同的颜色加以区别(或装入不同的容器内)。并按对应组进行装配,即大的活塞销配大的活塞销孔,小的活塞销配小的活塞销孔,装配后仍能保证过盈量的要求。具体分组情况见图 6.9(b)和表 6-1。同样颜色的销与活塞可按互换法装配。

表 6-1 活塞销和活塞销孔的分组尺寸

单位:mm

组别	标志颜色	活塞销直径	活塞销孔直径	配合情况	
				最小过盈	最大过盈
一组	红	$\phi 28_{-0.0025}^0$	$\phi 28_{-0.0075}^{+0.0050}$	0.0025	0.0075
二组	黄	$\phi 28_{-0.0050}^{+0.0025}$	$\phi 28_{-0.0100}^{+0.0075}$	0.0025	0.0075
三组	绿	$\phi 28_{-0.0075}^{+0.0050}$	$\phi 28_{-0.0125}^{+0.0100}$	0.0025	0.0075
四组	白	$\phi 28_{-0.0100}^{+0.0075}$	$\phi 28_{-0.0150}^{+0.0125}$	0.0025	0.0075

采用分组装配时,关键要保证分组后各对应组的配合性质和配合公差满足设计要求,所以应注意以下几点:

(1) 为保证分组后各组的配合精度和配合性质符合原设计要求,各组成环的公差应按等公差原则分配。公差放大时,各组成环的公差带要向同方向增大,公差增大的倍数要相等,且等于分组数。

(2) 零件的分组数不宜太多(一般 3~4 组),尺寸公差只要放大到经济加工精度即可。否则,会增加零件的测量、分组及保管等工作量,使装配组织工作复杂化,从而使装配成本提高。

(3) 分组后各组内相配合零件的数量要尽量相等,形成配套。否则,会出现某些尺寸的零件的积压浪费现象。

(4) 分组后配合件的表面粗糙度值、相互位置精度和形状精度不能随尺寸公差的放大而放大,否则不能达到要求的配合精度和配合质量。

分组装配法的优点是可降低对组成环的加工要求,而不降低装配精度;组内零件可以互换,装配效率高。但是分组装配法增加了测量、分组和配套工作,当组成环较多时,这种工作就会变的非常复杂。所以,分组装配法适用于成批、大量生产中封闭环工厂要求很严、尺寸链组成环很少的装配尺寸链中。例如,精密偶件的装配、滚动轴承的装配等。

3. 复合选配法

该方法是上述两种方法的复合。先将零件预先测量分组,装配时再在各对应组内凭工人的经验直接选择装配。这种装配方法的优点是配合公差可以不等,装配质量高且速度快,能满足一定节拍的要求。在发动机汽缸和活塞的装配中,多采用这种方法。

6.3.3 修配装配法

在装配精度要求较高而组成环较多的部件中,若按互换法装配,会使零件精度太高而无法加工,这时常常采用修配装配法达到封闭环公差要求。修配装配法就是将装配尺寸链中各组成环按经济精度加工,装配后产生的累积误差用修配某一组成环来解决,从而保证其装配精度。为了达到规定的装配精度,装配时需修配装配尺寸链中某一组成环的尺寸(此组成环称为修配环),由于该组成环的修配是为补偿其他组成环的积累误差来保证装配精度,故又称为补偿环。

1. 修配法的分类

(1) 单件修配法。

这种方法是在多环尺寸链中,选定某一固定的零件作为修配环,装配时进行修配以达到装配精度。

(2) 合并加工修配法。

这种方法是将两个或多个零件合并在一起,当作一个修配环进行修配加工。合并加工的尺寸可看作一个组成环,这样可减少尺寸链的环数,有利于减少修配量。例如,普通车床的尾座装配,为了减少总装时尾座对底板的刮研量,一般先把尾座和底板的配合平面加工好,并配刮横向小导轨;然后再将两者装配为一体,以底板的底面为定位基准,镗尾座的套筒孔,直接控制尾座套筒孔至底板底面的尺寸。这样一来组成环 A_2 、 A_3 (图 6.3) 合并成一环 A ,使加工精度容易保证,而且可以给底板底面留较小的刮研量(0.2mm 左右)。

(3) 自身加工修配法。

在机床制造中,对于一些装配精度要求,总装时用自己加工自己的方法去保证比较方便,这种方法即自身加工修配法。如牛头刨床总装时,用自刨工作台面来达到滑枕运动方向对工作台面的平行度要求。

2. 修配环的选择和尺寸及极限偏差的确定

采用修配装配法,关键是正确选择修配环和确定其尺寸及极限偏差。

1) 修配环选择

选择修配环应满足以下要求:

- (1) 要便于拆装、易于修配。一般应选形状比较简单、修配面较小的零件。
- (2) 尽量不选公共组成环。因为公共组成环难以同时满足几个装配要求,所以应选只与一项装配精度有关的环。

2) 确定修配环尺寸及极限偏差

确定修配环尺寸及极限偏差的出发点是,要保证装配时的修配量足够和最小。为此,首先要了解修配环被修配时,对封闭环的影响是逐渐增大还是逐渐减小,不同的影响有不同的计算方法。

3) 尺寸链的计算步骤和方法

下面举例说明采用修配装配法时,尺寸链的计算步骤和方法。

【例 6.4】 图 6.3(a)所示普通车床床头和尾座两顶尖等高度要求为 $0 \sim 0.06\text{mm}$ (只许尾座高)。设各组成环的基本尺寸 $A_1 = 202\text{mm}$, $A_2 = 46\text{mm}$, $A_3 = 156\text{mm}$,封闭环 $A_0 = 0\text{mm}$ 。

解:据题意,建立装配尺寸链如图 6.3(b)所示,其中封闭环 $A_0 = 0^{+0.06}\text{mm}$, $T_{A_0} = 0.06\text{mm}$, A_1 为减环, A_2 和 A_3 为增环。

据装配精度要求,此装配尺寸链如采用完全互换法解算,则各组成环公差平均值为

$$T_M = \frac{T_{A_0}}{n-1} = \frac{0.06}{4-1}\text{mm} = 0.02\text{mm}$$

由于公差太小,给加工带来困难,不宜采用完全互换法,现采用修配装配法。

计算步骤和方法如下:

(1) 选择修配环。

因组成环 A_2 尾座底板的形状简单, 表面面积小, 便于刮研修配, 故选择 A_2 为修配环。

(2) 确定各组成环公差。

根据各组成环所采用的加工方法的经济精度确定其公差。 A_1 和 A_3 采用镗模加工, 取 $T_{A_1} = T_{A_3} = 0.1\text{mm}$; 底板采用半精刨加工, 取 $T_{A_2} = 0.15\text{mm}$ 。

除补偿环外, 各组成环的极限偏差一般按“人体”原则确定, 而 A_1 和 A_3 为孔轴线和底面的中心高尺寸, 其偏差多按对称分布, 故有:

$$A_1 = 202 \pm 0.05\text{mm} \quad A_3 = 156 \pm 0.05\text{mm}$$

(3) 计算修配环 A_2 的尺寸及极限偏差。

判别修配环 A_2 修配时对封闭环 A_0 的影响。从图 6.3 中可知, 是“越修越小”情况。

$$\text{则 } A_{2\min} = A_{0\min} - A_{3\min} + A_{1\max} = [0 - (156 - 0.05) + (202 + 0.05)]\text{mm} = 46.1\text{mm}$$

$$\text{因 } T_{A_2} = 0.15\text{mm}$$

$$\text{故 } A_{2\max} = A_{2\min} + T_{A_2} = (46.1 + 0.15)\text{mm} = 46.25\text{mm}$$

$$\text{则 } A_2 = 46 \begin{matrix} +0.25 \\ -0.10 \end{matrix} \text{mm}$$

在实际生产中, 为提高接触面积, A_2 精度还应考虑底板底面在总装时必须留一定的刮研量。对底板而言, 最小刮研量可留 0.1mm , 故 A_2 应加大 0.1mm , 即 $A_2 = 46 \begin{matrix} +0.35 \\ -0.20 \end{matrix} \text{mm}$ 。

3. 修配法的特点及应用场合

修配法可降低对组成环的加工要求。利用修配组成环的方法能获得较高的装配精度, 尤其是尺寸链中环数较多时, 其优点更为明显。但是, 修配工作需要技术熟练的工人, 且大多是手工操作, 逐个修配, 所以生产率低, 没有一定节拍, 不易组织流水装配, 产品没有互换性。因而, 在大批大量生产中很少采用, 在单件小批量生产中广泛采用修配法; 在中批量生产中, 一些封闭环要求较严的多环装配尺寸链也大多采用修配法。

6.3.4 调整法

装配时用改变调整件在机器结构中的相对位置或选用合适的调整件, 来达到装配精度的装配方法称为调整装配法, 简称调整法。

调整装配法与修配装配法的原理基本相同。在以装配精度要求为封闭环建立的装配尺寸链中, 除调整环外各组成环均按经济加工精度制造, 由于组成环制造公差扩大, 结果使一部分装配超差。采用改变一个零件位置或选用一个适当尺寸的调整件加入尺寸链中, 以保证装配精度。

调整法通常采用极值法计算。

调整装配法与修配装配法的区别是调整法不是靠去除材料, 而是靠改变补偿件的位置或更换补偿件的方法来保证装配精度。常见的方法有以下三种。

1. 可动调整法

通过改变补偿件的相对位置来达到装配精度要求的方法, 称为可动调整法。调整过程中不需拆卸零件, 较为方便。在图 6.10(a) 中, 为调整滚动轴承间隙或过盈的结构, 可保证轴

承既有足够的刚度又不至于发热。图 6.10(b)中是通过转动调整螺钉 1 使斜楔块上下移动来保证螺母与丝杠螺纹副之间的合理间隙。

可动调整法的优点是:零件制造精度要求不高,但可以获得较高的装配精度;在机器使用中可随时通过调整补偿件的相对位置来补偿由于磨损、热变形等因素引起的误差,使其恢复到原来的装配精度;它比修配法操作简单,容易实现。缺点是需要增加一套调整结构,增加了结构复杂程度。可动调整法被广泛地应用于生产中。

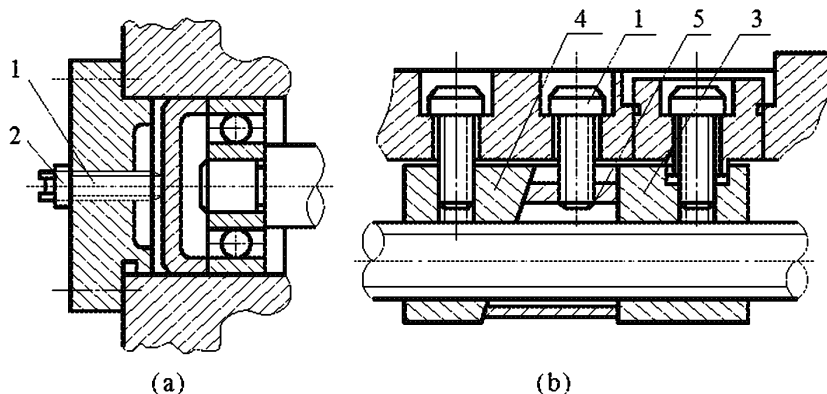


图 6.10 可动调整法示例

1 螺钉;2 螺母;3、4 螺母;5 楔块

2. 固定调整法

在尺寸链中选定一组成环为调整环,该环按一定尺寸分级制造,装配时根据实测累积误差来选定合适尺寸的调整零件(常为垫圈或轴套)来保证装配精度,这种方法称为固定调整法。该法主要问题是确定调整环的分组数及尺寸,现举例说明。

如图 6.11(a)所示齿轮在轴上的装配关系,要求保证轴向间隙为 $0.10 \sim 0.35\text{mm}$,即 $A_0 = 0 \pm 0.10\text{mm}$ 。现采用固定调整法装配,确定固定调整垫 A_5 为调整环,将其按照 4 种尺寸进行加工(调整件的尺寸分组计算方法可参考有关资料),其尺寸厚度分别为 $A_5 = 5 \pm 0.125\text{mm}$, $5 \pm 0.075\text{mm}$, $5 \pm 0.175\text{mm}$, $5 \pm 0.325\text{mm}$ 。

装配时首先测量空位尺寸 $A_0 + A_5$,并根据其大小选择合适的调整垫,使间隙尺寸 A_0 满足装配精度要求。

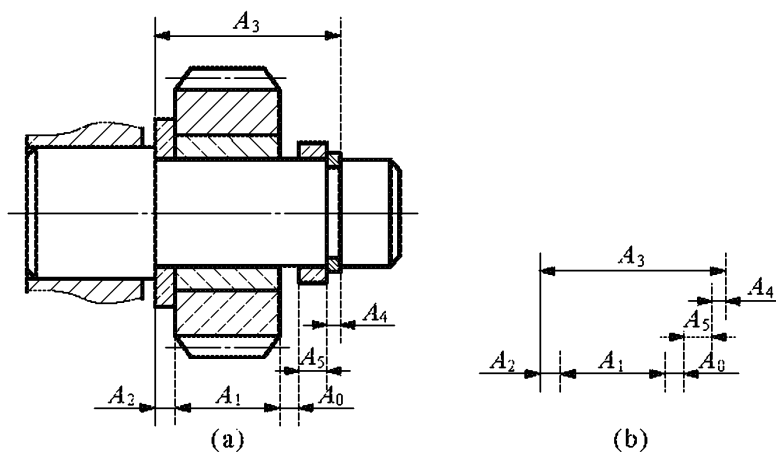


图 6.11 固定调整法装配示例

固定调整法的特点是可降低对组成环的加工要求,装配比较方便,可以获得较高的装配精度,所以应用比较广泛。但是固定调整法要预先制作许多不同尺寸的调整件并将它们分组,这给装配工作带来一些麻烦,所以一般多用于大批大量生产和中批生产,而且封闭环要求较严的多环尺寸链中。

3. 误差抵消装配法

在机器装配中,通过调整被装配零件的相对位置,使加工误差相互抵消,可以提高装配精度,这种装配方法称为误差抵消装配法。该法在机床装配中应用较多,例如:在车床主轴装配中,通过调整前后轴承的径向跳动来控制主轴的径向圆跳动;在滚齿机中工作台分度蜗轮装配中,采用调整蜗轮和轴承的偏心方向来抵消误差,以提高分度蜗轮的工作精度。

误差抵消装配法常用于机床制造,且封闭环要求较严的多环装配尺寸链中。但由于误差抵消装配法需要事先测出补偿环的误差方向和大小,装配时需要技术等级高的工人,因而增加了装配前和装配时的工作量和工作难度,并给装配组织工作带来一定麻烦。误差抵消装配法多用于批量不大的中小批量生产和单件生产。

6.3.5 装配方法的选择

上述各种装配方法各有特点。其中有些方法对组成环的加工要求不严,但装配时就要较严格;相反,有些方法对组成环的加工要求较严,而在装配时就比较方便简单。选择装配方法的出发点是使产品制造过程达到最佳效果。具体考虑的因素有:装配精度、结构特点(组成环数等)、生产类型及具体生产条件。

一般来说,当组成环的加工比较经济可行时,就要优先采用完全互换装配法。成批生产、组成环又较多时,可考虑采用不完全互换法。

当封闭环公差要求较严,采用互换装配法会使组成环加工比较困难或不经济时,就采用其他方法。大量生产时,环数少的尺寸链采用选择装配法;环数多的尺寸链采用调整法。单件小批生产时,则常用修配法。成批生产时可灵活应用调整法、修配法和选配法。

一种产品究竟采用何种装配方法来保证装配精度,通常在设计阶段即应确定。因为只有当装配方法确定后,通过尺寸链的解算,才能合理地确定各个零、部件在加工和装配中的技术要求。但是,同一种产品的同一装配精度要求,在不同的生产类型和生产条件下,可能采用不同的装配方法。例如,在大量生产时采用完全互换法或调整法保证的装配精度,在小批生产时可用修配法。因此,工艺人员特别是主管产品的工艺人员,必须掌握各种装配方法的特点及其装配尺寸链的解算方法,以便在制订产品的装配工艺规程和确定装配工序的具体内容时,或在现场解决装配质量问题时,根据工艺条件审查或确定装配方法。

6.4 装配工艺规程的制定

装配工艺规程是指用文件、图表等形式将装配内容、顺序、操作方法和检验项目规定下来,作为指导装配工作和组织装配生产的依据。装配工艺规程对保证产品的装配质量、提高装配生产效率、缩短装配周期、减轻工人的劳动强度、缩小装配车间面积、降低生产成本等方面都有重要作用。制定装配工艺规程的主要依据有产品的装配图纸、零件的工作图、产品的

验收标准和技术要求、生产纲领和现有的生产条件等。

6.4.1 制定装配工艺规程的基本要求

制定装配工艺规程的基本要求是在保证产品的装配质量的前提下,提高生产率和降低成本。具体如下:

- (1) 保证产品的装配质量,争取最大的精度储备,以延长产品的使用寿命。
- (2) 尽量减少手工装配工作量,降低劳动强度,缩短装配周期,提高装配效率。
- (3) 尽量减少装配成本,减少装配占地面积。

6.4.2 制定装配工艺规程的步骤与工作内容

1. 产品分析

- (1) 研究产品及部件的具体结构、装配技术要求和检查验收的内容和方法。
- (2) 审查产品的结构工艺性。
- (3) 研究设计人员所确定的装配方法,进行必要的装配尺寸链分析与计算。

2. 确定装配方法和装配组织形式

选择合理的装配方法,是保证装配精度的关键。要结合具体生产条件,从机械加工和装配的全过程出发应用尺寸链理论,同设计人员一起最终确定装配方法。

装配组织形式的选择,主要取决于产品的结构特点(包括尺寸、重量和复杂程度)、生产纲领和现有的生产条件。装配组织形式按产品在装配过程中是否移动,分为固定式和移动式两种。

固定式装配的全部装配工作在一个固定的地点进行,产品在装配过程中不移动,多用于单件小批生产或重型产品的成批生产,如机床、汽轮机的装配。

移动式装配是将零部件用输送带或小车按装配顺序从一个装配地点移动到下一个装配地点,各装配点完成一部分装配工作,全部装配点完成产品的全部装配工作。移动式装配常用于大批大量生产,组成流水作业线或自动线,如汽车、拖拉机、仪器仪表等产品的装配。

3. 划分装配单元,确定装配顺序

1) 划分装配单元

将产品划分为可进行独立装配的单元是制定装配工艺规程中最重要的一步,这对于大批大量生产结构复杂的产品尤为重要。任何产品或机器都是由零件、合件、组件、部件等装配单元组成。零件是组成机器的最基本单元。若干零件永久连接或连接后再加工便成为一个合件,如镶了衬套的连杆、焊接成的支架等。若干零件或与合件组合在一起成为一个组件,它没有独立完整的功能,如主轴和装在其上的齿轮、轴、套等构成主轴组件。若干组件、合件和零件装配在一起,成为一个具有独立、完整功能的装配单元,称为部件,如车床的主轴箱、溜板箱、进给箱等。

2) 选择装配基准件

上述各装配单元都要首先选择某一零件或低一级的单元作为装配基准件。基准件应当体积(或质量)较大,有足够的支承面以保证装配时的稳定性。如主轴是主轴组件的装配基

准件, 主轴箱体是主轴箱部件的装配基准件, 床身部件又是整台机床的装配基准件等。

3) 确定装配顺序的原则

划分好装配单元并选定装配基准件后, 就可安排装配顺序。安排装配顺序的原则如下:

- (1) 工件要先安排预处理, 如倒角、去毛刺、清洗、涂漆等。
- (2) 先下后上, 先内后外, 先难后易, 以保证装配顺利进行。
- (3) 位于基准件同一方位的装配工作和使用同一工艺装配的工作尽量集中进行。
- (4) 易燃、易爆等有危险性的工作, 尽量放在最后进行。

为了清晰表示装配顺序, 常用装配系统图来表示。图 6.12 和图 6.13 所示分别是产品的装配系统图和部件的装配系统图。

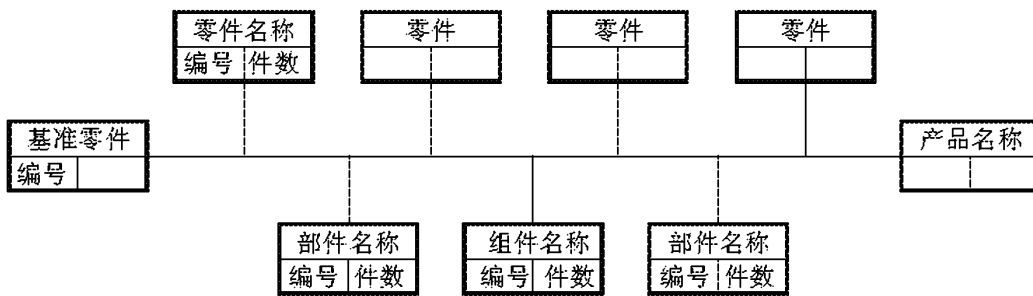


图 6.12 产品装配系统图

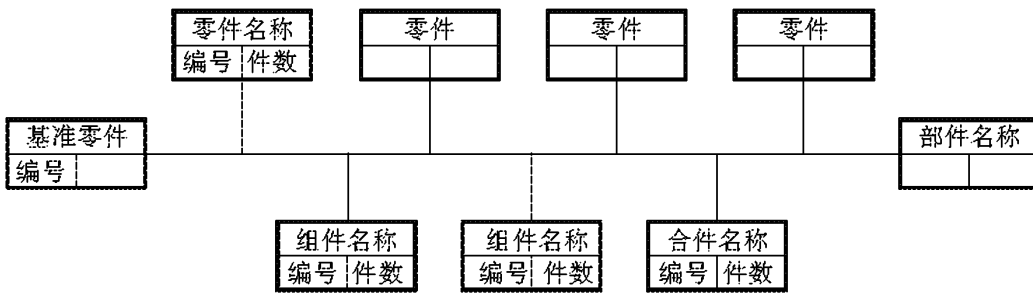


图 6.13 部件装配系统图

装配系统图比较清楚而全面地反应了装配单元的划分、装配顺序和装配工艺方法。它是装配工艺规程制定中的主要文件之一, 也是划分装配工序的依据。

4. 划分装配工序, 设计工序内容

装配顺序确定以后, 根据工序集中与分散的程度将装配工艺过程划分为若干工序, 并进行工序内容的设计。工序内容设计包括: 制定工序的操作规范、选择设备和工艺装备、确定时间定额等。

5. 填写工艺文件

单件小批生产时, 通常只绘制装配系统图。成批生产时, 除装配系统图外还编制装配工艺卡, 在其上写明工序次序、工序内容、设备和工装名称、工人技术等级和时间定额等。大批大量生产中, 不仅要编制装配工艺卡, 而且要编制装配工序卡, 以便直接指导工人进行装配。

思考与练习题

6-1 装配精度一般包括哪些内容？装配精度和零件加工精度之间有何联系？举例说明。

6-2 装配尺寸链是如何构成的？装配尺寸链的封闭环是如何确定的？它与工艺尺寸链的封闭环有何区别？

6-3 在查找装配尺寸链时应注意哪些原则？

6-4 说明装配尺寸链中的组成环、封闭环、补偿环和公共环的含义，各有何特点？

6-5 有一轴孔配合，若轴径尺寸为 $\phi 80_{-0.10}^0$ mm，孔径尺寸为 $\phi 80_{+0.20}^0$ mm，设轴径与孔径的尺寸均按正态分布，且尺寸分布中心与公差带中心重合，试用完全互换法和不完全互换法分别计算轴孔配合间隙尺寸及其偏差。

6-6 本章所举的4种装配方法各有何特点？如何进行选择？

6-7 装配工艺规程包括哪些主要内容？是经过哪些步骤制订的？

6-8 图 6.14 所示减速器，某轴结构的尺寸分别为 $A_1=40$ mm、 $A_2=36$ mm、 $A_3=4$ mm；要求装配后齿轮端部间隙 A_0 保持在 $0.10\sim 0.25$ mm 范围内，如选用完全互换法装配，试确定 A_1 、 A_2 、 A_3 的极限偏差。

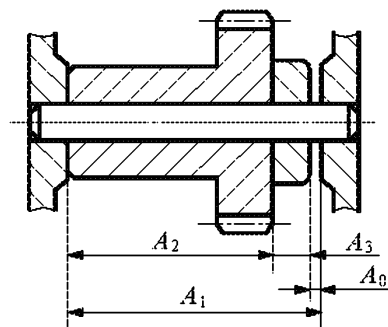


图 6.14 题 6 8

6-9 图 6.15 所示为车床横刀架座后压板与床身导轨的装配图。为保证横刀架座在床身导轨上灵活移动，压板与床身下导轨面间间隙须保持在 $0.1\sim 0.3$ mm 范围内，如选用修配法装配，试确定图示修配环尺寸 A 与其他有关尺寸的基本尺寸和极限偏差。

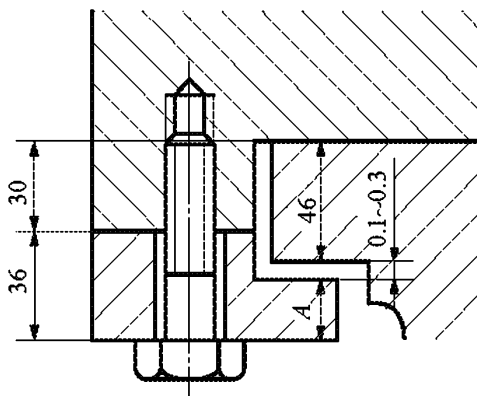


图 6.15 题 6 9

第 7 章 先进制造技术与制造模式

教学提示:先进制造技术在传统制造技术的基础上融合了计算机技术、信息技术、自动控制技术及现代管理理念等。总结 20 世纪机械制造学科取得的成就,展望其面向 21 世纪的发展趋势,机械制造技术的新发展,主要表现在 3 个方面:①与微电子、信息处理技术融合的柔性制造自动化技术;②与微型机械、微小尺度关联的精密加工和超精密加工技术;③以现代管理理论为基础的先进生产模式和方法。

教学要求:了解什么是先进制造技术及其特点,了解机械制造自动化技术,了解快速原形制造技术的基本原理、特点及常见的几种工艺方法,了解并行工程、敏捷制造、精良生产、虚拟制造、绿色制造等先进生产模式。

7.1 概 述

7.1.1 先进制造技术产生的背景

20 世纪 80 年代末,美国首先提出了先进制造技术(Advanced Manufacturing Technology, AMT)的新概念。

长期以来,美国政府只对基础研究、卫生健康、国防技术等给予经费支持,而对产业技术不予支持,主张产业技术通过市场竞争,由企业自主发展。20 世纪 70 年代,一批美国学者不断鼓吹美国已进入后工业化社会,认为制造业是夕阳工业,主张经济重心由制造业转向高科技产业和第三产业。其结果导致了美国在经济上竞争力下降,贸易逆差剧增,日本家电、汽车大量涌入并占领了美国市场。

1988 年,美国政府开始投资进行大规模“21 世纪制造企业战略”研究,并于其后不久提出了先进制造技术发展目标,制订并实施了先进制造技术计划(ATP)和制造技术中心计划(MTC)。

1991 年,白宫科学技术政策办公室发表《美国国家关键技术》报告,重新确立了制造业的地位。1993 年,克林顿在硅谷发表题为《促进美国经济增长的技术——增强经济实力的新方向》的演说,对制造业给予了实质性强有力的支持。

美国在实施上述两项计划后,取得了显著效果。例如,美国在汽车生产中启动了“2mm 工程”项目,联合多家汽车公司、大学和研究机构对汽车覆盖件的制造技术进行综合研究,最终使轿车覆盖件的制造误差控制在 2mm 之内,从而使轿车车身的制造精度达到了日本丰田公司的水平。至 1994 年,美国汽车产量重新超过日本,并重新占领欧洲市场。再如,美国的半导体,特别是芯片制造业在此期间也取得了迅猛发展,Inter 公司一跃成为世界上最大的芯片制造商。在此之前,日本的芯片制造业领先于美国,包括海湾战争中风光一时的“爱国者”导弹,其使用的芯片也来自日本。

20 世纪 90 年代,美国经济空前繁荣,失业率降低到历史最低水平,并提出了一系列先进制造技术的新理论、新思想,如并行工程(CE)、精良生产(LP)、敏捷制造(AM)、虚拟制造(VM)等。这一切均得益于对制造业的正确认识,以及制造技术的提升和制造业的发展。

7.1.2 先进制造技术的定义与特点

先进制造技术作为一个专有名词提出后,至今没有一个明确的、一致公认的定义。经过近年来对先进制造技术方面的实践和对其特征的分析研究,可以认为:“先进制造技术(AMT)是制造业不断吸收信息技术和现代管理技术的成果,将其综合应用于产品设计、加工、检测、管理、销售、使用、服务乃至回收的制造全过程,以实现优质、高效、低耗、清洁、灵活生产,提高对动态多变市场的适应能力和竞争力的制造技术的总称”。

先进制造技术的内涵是“使原材料成为产品而采用的一系列先进技术”,反映了先进制造技术的形成过程、综合集成性能,也反映了它的实用性,强调了其最终目的是提高产品市场适应能力和竞争能力。先进制造技术的外延则是一个不断发展更新的技术体系,不是固定模式,它具有动态性和相对性,在不同发展水平的国家和同一国家的不同发展阶段,有不同的技术内涵和构成。因此,不能简单地将先进制造技术理解为就是 CAD、CAM、FMS、CIMS 等各项具体的技术。

先进制造技术具有以下特点。

1) AMT 是一项综合性技术

AMT 不是一项具体的制造技术,而是利用系统工程的思想和方法,将各种与制造相关的技术集成成一个整体,并贯穿到从市场分析、产品设计、加工制造、生产管理、市场营销、维修服务直至产品报废处理、回收再生的生产全过程。AMT 特别强调计算机技术、信息技术和现代管理技术在制造中的综合应用,特别强调人的主体作用,强调人、技术、管理的有机结合。

2) AMT 是一项面向 21 世纪的动态发展技术

AMT 没有一个固定的模式,也不是一成不变的,而是动态发展的,它要不断地吸收和利用各种高新技术成果,并将其渗透到制造系统的各个部分和制造活动的整个过程,使其不断趋于完善。AMT 是制造技术发展的新阶段,它保留了传统制造技术中的有效要素,吸收并充分利用了一切高新技术,使其产生了质的飞跃。

3) AMT 是面向工业应用的技术

AMT 不仅包括制造过程本身,而且还涉及市场调研、产品设计、工艺设计、加工制造、售前售后服务等产品生命周期的所有内容,并将它们结合成一个有机的整体。

4) AMT 强调环境技术

AMT 突出能源效益,重视产品的回收和再利用,符合可持续发展的战略。AMT 既要求产品是“绿色商品”,又要求产品的生产过程是环保型的。

7.1.3 先进制造技术的发展趋势

进入 21 世纪,先进制造技术主要有以下几个方向的发展趋势。

(1) 传统制造技术向高效化、敏捷化、清洁化方向发展。

(2) 先进制造技术向精密化、多样化、复合化方向发展。

- (3) 制造系统向柔性化、集成化、智能化、全球化方向发展。
- (4) 制造科学、技术与管理向交叉化、综合化方向发展。

7.2 机械制造自动化技术

自动化技术是机械制造技术的重要发展方向之一。机械制造中采用自动化技术可以有效改善劳动条件,降低工人的劳动强度,显著提高劳动生产率,大幅度提高产品的质量,有效缩短生产周期,并能显著降低制造成本。因此,机械制造自动化技术得到了快速发展,并在生产实践中得到越来越广泛的应用。

7.2.1 机械制造自动化的概念

机械制造系统自动化技术自 20 世纪 20 年代出现以来,经历了 3 个主要发展阶段,即刚性自动化、柔性自动化及综合自动化 3 种方式,见表 7-1。综合自动化常常与计算机辅助制造、计算机集成制造等概念相连,它是制造技术、控制技术、现代管理技术和信息技术的综合,旨在全面提高制造企业的劳动生产率和对市场的响应速度。

表 7-1 3 种自动化方式比较

比较项目	自动化方式		
	刚性自动化	柔性自动化	综合自动化
产生年代	20 世纪 20 年代	20 世纪 50 年代	20 世纪 70 年代
实现目标	减小工人的劳动强度,节省劳动力,保证制造质量,降低生产成本	减小工人的劳动强度,节省劳动力,保证制造质量,降低生产成本,缩短产品制造周期	减小工人的劳动强度,节省劳动力,保证制造质量,降低生产成本,提高设计工作与经营管理工作的效率和质量,提高对市场的响应速度
控制对象	设备、工装、器械、物流	设备、工装、器械、物流	设备、工装、器械、物流
特点	通过机、电、液、气等硬件控制方式实现,因而是刚性的,变化困难	以硬件为基础,以软件为支持,通过改变程序即可实现所需的控制,因而是柔性的,易于变动	不仅针对具体操作和人的体力劳动,而且涉及人的脑力劳动,涉及设计、制造、营销、管理等方面
关键技术	继电器程序控制技术,经典控制理论	数控技术,计算机控制技术,现代控制理论	系统工程,信息技术,成组技术,计算机技术,现代管理技术
典型装备与系统	自动、半自动机床,组合机床,机械手,自动生产线	数控机床,加工中心,工业机器人,柔性制造单元(FMC)	CAD/CAM 系统,MRP II,柔性制作系统(FMS),计算机集成制造系统(CIMS)
应用范围	大批量生产	多品种、中小批量	各种生产类型

1. 刚性自动化

在大批大量生产中,常采用专用机床和单功能组合机床为主体的刚性自动化生产线。

刚性自动化生产线严格按照规定的生产节拍运行,生产率极高;此外,刚性自动化生产线还具有物料流程短、没有半成品中间库存、生产占地面积小、便于管理等优点。它的主要缺点是一次性投资额大,系统调整周期长,且它是为特定零件设计的,更换产品难,因转产而使刚性自动化生产线报废的事例屡见不鲜。为克服上述缺点,人们发展了组合机床自动线,可以大幅度缩短建线周期。更换产品时,只需要更换组合机床的某些部件(如更换主轴箱)即可,增大了生产自动线的柔性,取得了较好的使用效果和经济效果。刚性自动化生产线目前正向刚柔结合的方向发展。

刚性自动化生产线适于在生产量大、产品相对固定的场合应用。

2. 柔性自动化

随着经济的发展和人们消费水平的提高,消费要求日趋个性化,产品的生命周期变得越来越短。据统计,在机械制造企业中,单件生产、成批生产占85%,大批大量生产仅占15%左右。选用硬件设备可调的办法实现多品种、小批量生产自动化,在技术上有许多很难克服的困难。因为硬件设备的柔性毕竟是非常有限的;近年来由于计算机技术、数控技术以及加工中心、工业机器人等技术的发展,使多品种、中小批量生产自动化出现了新的选择,并相继出现了柔性制造单元、柔性制造系统、柔性制造线等自动化模式。

1) 柔性制造单元

柔性制造单元(Flexible Manufacturing Cell, FMC)是由计算机直接控制的自动化可变加工单元,它由单台具有自动交换刀具和工件功能的数控机床和工件自动输送装置所组成。采用切削监视系统实现自动加工,在不停机的情况下转换工件进行连续生产,是组成柔性制造系统的基本单元。

随着计算机技术、单元控制技术的发展和网络技术的应用,FMC会具有更好的可扩展性、更强的柔性;具有投资规模小、成本低、易实现、见效快的突出优点;在单元计算机控制下,可实现不同或相同机床上不同零件的同步加工。

图7.1是由一台加工中心和一台6工位环形自动交换托盘库组成的柔性制造单元。更换工件由加工中心上的托盘交换装置和环形托盘库协调配合完成。6个托盘可同时沿托盘库的椭圆形轨道运行,实现托盘的输送和定位。待加工件由操作工人装入托盘夹具中。托盘连同工件一道由托盘库输送装置运送到靠近加工中心的工位,再由托盘交换装置将托盘送到机床加工部位;工件加工好之后,由托盘交换装置将其送向托盘库,并由托盘库输送装置送回装卸工位。托盘的选择和定位由可编程控制器控制。托盘库具有正反向回转、随机选择及跳跃分度等功能。更换刀具由加工中心上的换刀机械手和刀具库执行。

柔性制造单元的主要优点是:

(1) 与刚性自动化生产线相比,它具有一定的生产柔性。在同一零件组内更换生产对象时,只需变换加工程序即可实现,无需对加工设备作重大调整。

(2) 与柔性制造系统相比,它占地面积少,系统结构不很复杂,投资不大,可靠性较高,使用及维护均较简便。柔性制造单元常用于中批量生产规模和产品品种变化不大的场合。

柔性制造单元既可以是一个独立的制造单元,也可以是柔性制造系统的一个组成部分。

2) 柔性制造系统

柔性制造系统(Flexible Manufacturing System, FMS)由两台以上数控机床或加工中

心、工件储运系统、刀具储运系统和多层计算机控制系统组成。在计算机及其软件的集中控制下,实现加工自动化。它具有高度柔性,是一种计算机直接控制的自动化可变加工系统。柔性制造系统主要解决单件小批生产的自动化,把高柔性、高质量、高效率结合和统一起来,是当前最有效的生产手段。与传统的刚性自动线相比,具有以下特点:

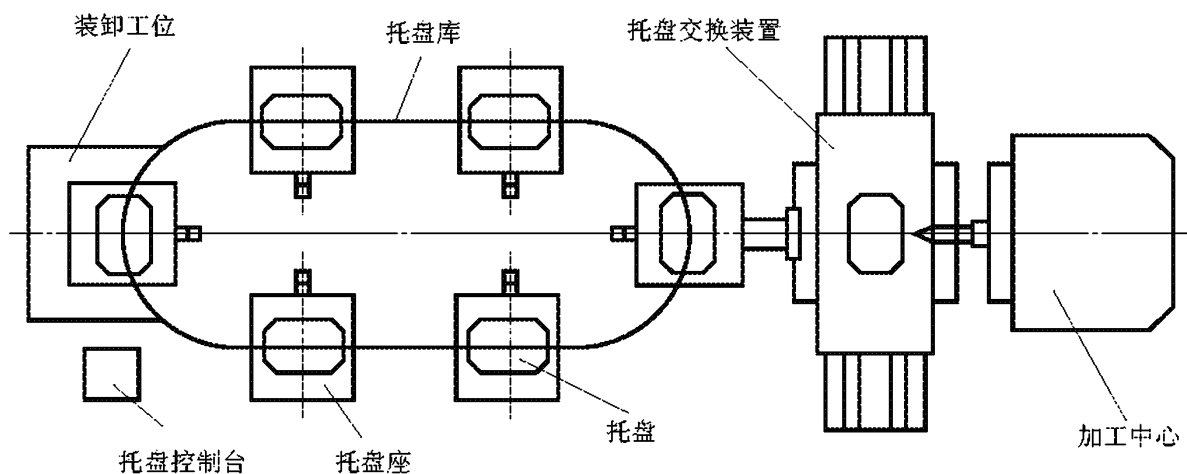


图 7.1 带托盘库的柔性制造单元

- (1) 具有高度柔性。能实现多种工艺要求的、具有一定相似性的不同零件的加工,实现自动更换工件、夹具、刀具及装夹,有很强的系统软件功能。
- (2) 设备利用率高。由于零件加工的准备时间和辅助时间大为减少,使机床的利用率提高了 75%~90%。
- (3) 自动化程度高,稳定性好,可靠性强,可以实现长时间连续自动工作。
- (4) 提高产品质量和劳动生产率。

FMS 是在成组技术、计算机技术、数控技术和自动检测等技术的基础上发展起来的,通常由物质系统、能量系统、信息系统 3 部分组成。它主要完成以下任务:以成组技术为核心的零件编组;以托盘和运输系统为核心的物料输送和存放;以数控机床(或加工中心)为核心的自动换刀、换工件的自动加工。

图 7.2 是一个比较完善的 FMS 平面布置图,整个系统由 3 台组合铣床、2 台双面镗床、双面多轴钻床、单面多轴钻床、车削加工中心、装配机、测量机、装配机器人和清洗机等组成,加工箱体零件并进行装配。物料输送系统由主通道和区间通道组成,通过沟槽内隐藏着的拖拽传动链带动无轨输送车运动。若循环时间较短,区间通道还可以作为临时寄存库。除工件在随行夹具上的安装、组合夹具的拼装等极少数工作由手工完成外,整个系统由计算机控制。

由于 FMS 实现了集中控制和实时在线控制,缩短了生产周期,解决了多品种、中小批量零件的生产率和系统柔性之间的矛盾,并具有较低的成本,故得到了迅速发展。

3) 柔性制造生产线

柔性制造生产线(Flexible Manufacturing Line, FML)针对某种类型(族)零件,并带有专业化生产或成组化生产的特点。FML 由多台数控机床或加工中心组成,其中有些机床带有一定的专用性。全线机床按工件的工艺流程布局,可以有生产节拍,但它本质上是柔性的,是可变的加工生产线,具有柔性制造系统的功能。

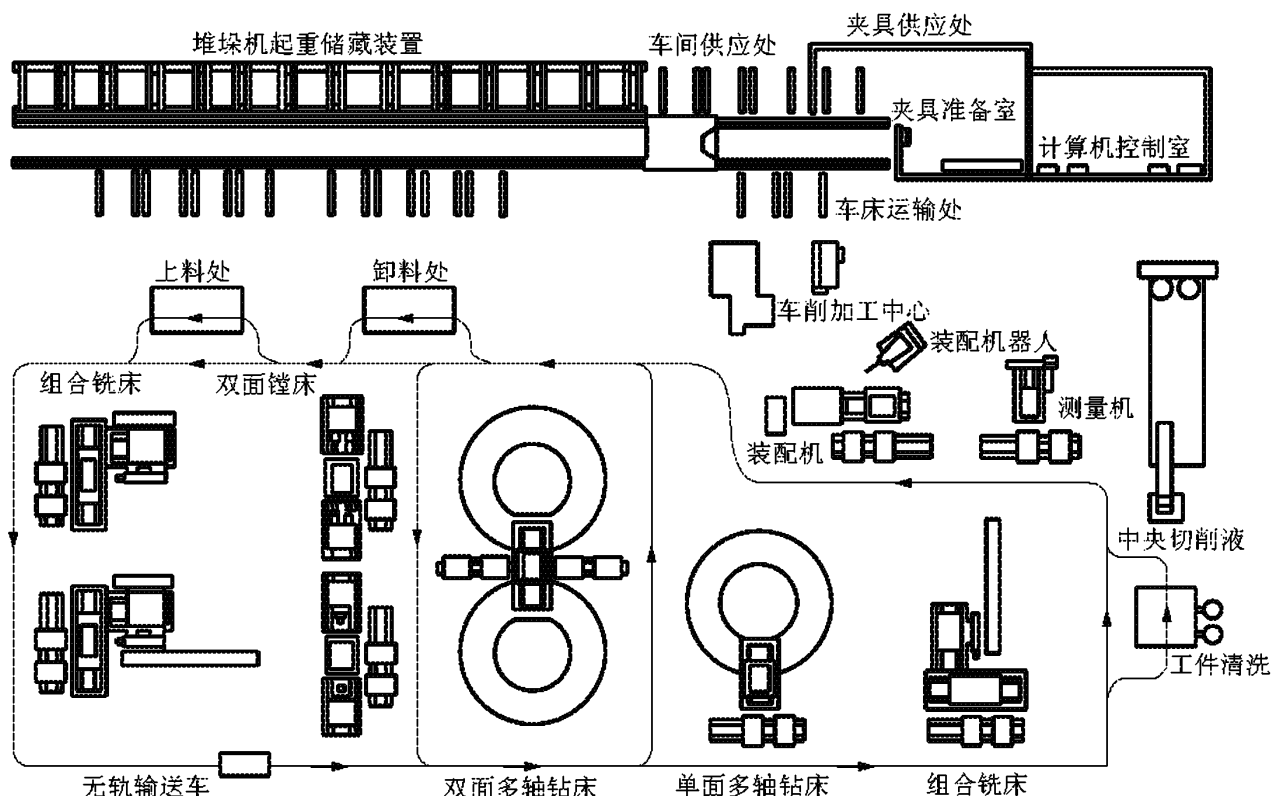


图 7.2 柔性制造系统

3. 机械制造自动化的发展趋势

随着科学技术的飞速发展和社会的不断进步,先进的生产模式对自动化系统及技术提出了多种不同的要求,这些要求也同时代表了机械制造自动化今后的发展趋势。

1) 高度智能集成性

随着计算机集成制造技术和人工智能技术在制造系统中的广泛应用,智能化已成为制造自动化系统的主要特征之一。智能集成化制造系统可以根据外部环境的变化自动地调整自身的运行参数,使自己始终处于最佳运动状态,则称系统具有自律能力。智能集成制造系统还具有决策能力,能够最大限度地自行解决系统运动过程中所遇到的各种问题。由于有了智能,系统就可以自动监视本身的运动状态,发生故障则自动给予排除。如发现故障正在形成,则采取措施防止故障的发生。智能集成化制造系统还应与 CIMS 的其他系统共同集成为一个有机的整体,以实现信息资源的共享。它的集成性不仅仅体现在信息的集成上,它还包括另一个层次的集成,即人和技术之间的集成,实现人机功能的合理分配,并能够充分发挥人的主观能动性。带有智能的制造系统还可以在最佳加工方法和加工参数选择、加工路线的最佳化和智能加工质量控制等方面发挥重要作用。总之,智能集成制造系统具有适应能力、自学习能力、自修复能力、自组织能力和自我优化能力。因而,这种具有智能的集成化制造系统将是制造自动化系统的主要发展趋势之一。

2) 人机结合的适度自动化

传统的制造自动化系统往往过分强调完全自动化,对如何发挥人的主导作用考虑甚少。但在先进生产模式下的制造自动化系统却并不过分强调它的自动化水平,而强调的是人机功能的合理分配,强调充分发挥人的主观能动性。因此,先进生产模式下的制造自动化系统是人机结合的适度自动化系统。

3) 强调系统的柔性和敏捷性

传统的制造自动化系统的应用场合往往是大批量生产环境,这种环境不特别强调系统具有柔性。但先进生产模式下的制造自动化系统,面对的却是多品种、小批量生产环境和不可预测的市场需求,这就要求系统具有比较大的柔性,能够满足产品快速更换的要求。实现制造自动化系统柔性的主要手段是采用成组技术和计算机控制的、模块化的数控设备。但这里所说的柔性与传统意义上的柔性却不同,人们称之为敏捷性。传统意义上的柔性制造系统仅能在一定范围内具有柔性,而且系统的柔性范围是在系统设计时就预先确定了的,超出这个范围时系统就无能为力。但先进生产模式下的制造自动化系统面对的是无法预测的外部环境,无法在规划系统时预先设定系统的有效范围。但由于系统具有智能,且采用了多种新技术,因此,不管外部环境如何变化,系统都可以通过改变自身的结构来适应此种变化。智能制造系统的这种“敏捷性”比“柔性”具有更广泛的适应性。

4) 功能扩展化

理论上,完整的制造自动化系统应包括毛坯的制备、物料的存储、运输、加工、辅助处理、零件检验、装配、部件及成品测试、油漆和包装等内容,并将它们集成为一个有机的整体。但目前的制造自动化主要是面向零件加工的,其他内容则涉及较少。未来的制造自动化系统应逐步向前扩展到毛坯的自动制备,向后扩展到自动装配、自动测试及自动包装等。

5) 环保化

可持续发展问题是目前人类社会最迫切需要解决的问题之一,资源和环境是可持续发展的两个主要问题。制造系统作为能源和资源消耗以及环境污染的“大户”,应该首先实施可持续发展战略。因此,在系统的规划及运行过程中,应将资源和能源的优化利用,以及环境保护作为主要目标之一进行控制。

7.2.2 计算机集成制造系统

计算机集成制造系统(Computer Integrated Manufacturing System, CIMS)是用于制造业工厂的综合自动化大系统。它在计算机网络和分布式数据库的支持下,把各种局部的自动化子系统集成起来,实现信息集成和功能集成,走向全面自动化,从而缩短产品开发周期,提高质量,降低成本。它是工厂自动化的发展方向,是未来制造业工厂的模式。

CIMS 在功能上包含了一个工厂从市场预测、产品设计、工艺设计、制造、管理至售后服务的全部功能;在各个环节的自动化上不是简单叠加,而是在计算机网络和分布式数据库支持下的信息集成、功能集成、人员集成、物质(设备)集成。

1. CIMS 的概念

计算机集成制造系统是在信息技术、自动化技术、计算机技术及制造技术的基础上,通过计算机及其软件,将制造工厂的全部生产活动——设计、制造及经营管理(包括市场调研、生产决策、生产计划、生产管理、产品开发、产品设计、加工制造以及销售经营)等与整个生产过程有关的物料流与信息流,实现计算机高度统一的综合化管理,把各种分散的自动化系统有机地集成起来,构成一个优化的完整的生产系统。从而获得更高的整体效益,缩短产品开发制造周期,提高产品质量,提高生产率,提高企业的应变能力,以赢得竞争。

2. CIMS 的构成

从功能上看,CIMS 包括一个制造企业中设计、制造、经营管理和质量保证等主要功能,并运用信息集成技术和支撑环境使以上功能有效集成。图 7.3 描述了各功能模块及其联系。

(1) 工程设计自动化系统。该系统包括计算机辅助设计(CAD)、计算机辅助工程分析(CAE)、计算机辅助工艺规程(CAPP)、计算机辅助制造的工程设计(刀具、夹具、量具等)、数控编程和分析等工作。

(2) 制造自动化系统。该系统包括车间控制器作业计划、单元控制器作业、工作站作业等的调度与监控以及刀具、夹具、量具、加工设备、测量设备、清洗设备等的管理与监控等。

(3) 经营管理信息系统。该系统包括经营分析决策支持、销售管理、物料管理、生产管理、财务管理、人事管理、资源管理、质量管理等。

(4) 质量管理信息系统。该系统包括质量控制体系结构、质量数据及处理方法、质量成本、生产车间质量保证系统的组成等。

(5) 支撑环境系统。该系统包括计算机硬件配置、系统软件的配置、数据库管理系统及开发环境、分布式数据库应用软件的开发、网络通信协议及其硬、软件接口、网络通信用户软件的开发。

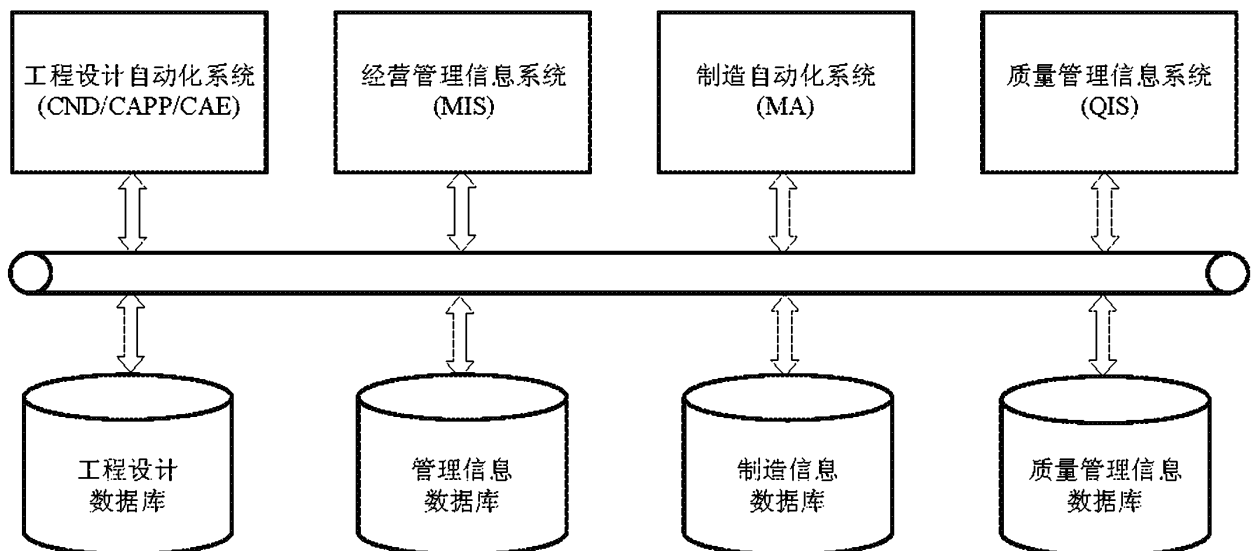


图 7.3 CIMS 的组成

CIMS 是一个跨多个学科的复杂大系统。CIMS 技术是基于现代管理技术、制造技术、信息技术、计算机科学和技术、自动化技术、系统工程技术的交互、渗透和结合产生的一门综合性技术。

设计和工艺模块主要包括计算机辅助设计(CAD)、计算机辅助工程(CAE)、成组技术(GT)、计算机辅助工艺规程设计(CAPP)、计算机辅助数控编程技术等,目的是使产品的开发更高效、优质,并自动化地进行。

柔性制造系统是制造模块的主体,主要包括零件的数控加工、生产调度、刀具管理、质量检测和控制、装配、物料储运等。

信息管理模块主要包括市场预测、经营决策、各级生产计划、生产技术准备、销售及售后跟踪服务、成本核算、人力资源管理。通过信息的集成,达到缩短产品生产周期、减少占用的流动资金、提高企业的应变能力。

公用数据库是 CIMS 的核心,对信息资源进行存储与管理,并对各个计算机系统进行通信,实现企业数据的共享和信息集成。

由上述可知,CIMS 是建立在多项先进制造技术基础上的高技术制造系统。为赶上工业先进国家的机械制造水平,我国 863 计划将 CIMS 作为自动化领域中的一个主题项目进行研究,开展了关键技术的攻关工作,确定了若干试点工厂,取得了一批重要的研究成果。CIMS 的实施过程中要实现工程设计、制造过程、信息管理、工厂生产等技术和功能的集成,这种集成不是现有生产系统的计算机化。原有的生产系统集成很困难,独立的自动化系统异构同化非常复杂,所以要考虑实施 CIMS 计划时的收益和支出。

7.3 快速原形技术

快速原形技术(Rapid Prototyping Technology,RPT)是 20 世纪 80 年代国外发展起来的一种新技术,它完全是顺应快速开发产品的客观需要而产生的。快速原形技术与虚拟制造技术,被称为未来制造业的两大支柱技术。快速原形技术是一种快速产品开发和制造的技术,利用光、电、热等手段,通过固化、烧结、粘结、熔结等方式,将材料逐层或逐点堆积,形成所需的制件。它综合应用 CAD/CAM 技术、数据处理技术、测试传感技术、激光技术等多种机械电子技术、材料技术和计算机技术,在航空航天、机械、汽车、电子、医疗等领域得到了广泛应用。用于产品开发中的设计评价、功能验证、可制造性和可装配性检验、非功能性样品制作、快速模具制造、快速制造金属型零件以及快速反求工程等。

目前,快速原形技术的发展十分迅速,应用也越来越广泛。其成形方式已从过去的激光层析扫描,使液态热固性塑料固化成实体样件,发展到今天的直接由丝状成形材料经层析融积成实体样件。快速原形技术所用的成形材料,也已由过去的液态热固性塑料,发展为采用粉丝状、丝状、片状的塑料、树脂、铸造用蜡和纸等。

快速原形技术与其他成形技术相比,不需要任何模具和任何加工,仅由三维实体造型的层析数据,就能通过快速原形机快速地制得与三维实体完全一致的实体样件。在开发新产品时,设计人员的设计方案的好坏,有时无法由计算机上的三维造型直观地表露出来,对于结构复杂的零件尤其如此。有了快速原形技术,就可以很快地把设计方案变成实体样件,对样件做出直观的判断。对于诸如手机等小家电或其他轻工产品,顾客往往对其外观很挑剔,所以结构设计尤为重要。设计人员可制成实体样件,通过实际接触实样,进行观感和手感的比较,才能同时设计出几个方案,并经 RPT 做出正确的取舍,这也是快速原形技术最基本和最原始的应用。

随着快速原形技术的发展,由它所制得的实体样件也可以作为铸造用的模具、注塑用的样板模型或电加的电极模型等。这样,就使得模具或模型的制造大为简化,不仅大大缩短了制作周期,而且大大降低了制作成本。

7.3.1 快速原形技术的基本原理

快速原形技术是综合利用 CAD 技术、数控技术、激光加工技术和材料技术实现从零件设计到三维实体原形制造的机电一体化系统技术。它是采用软件离散化和材料堆积的原理来实现实体的成形,其原理如图 7.4 所示。

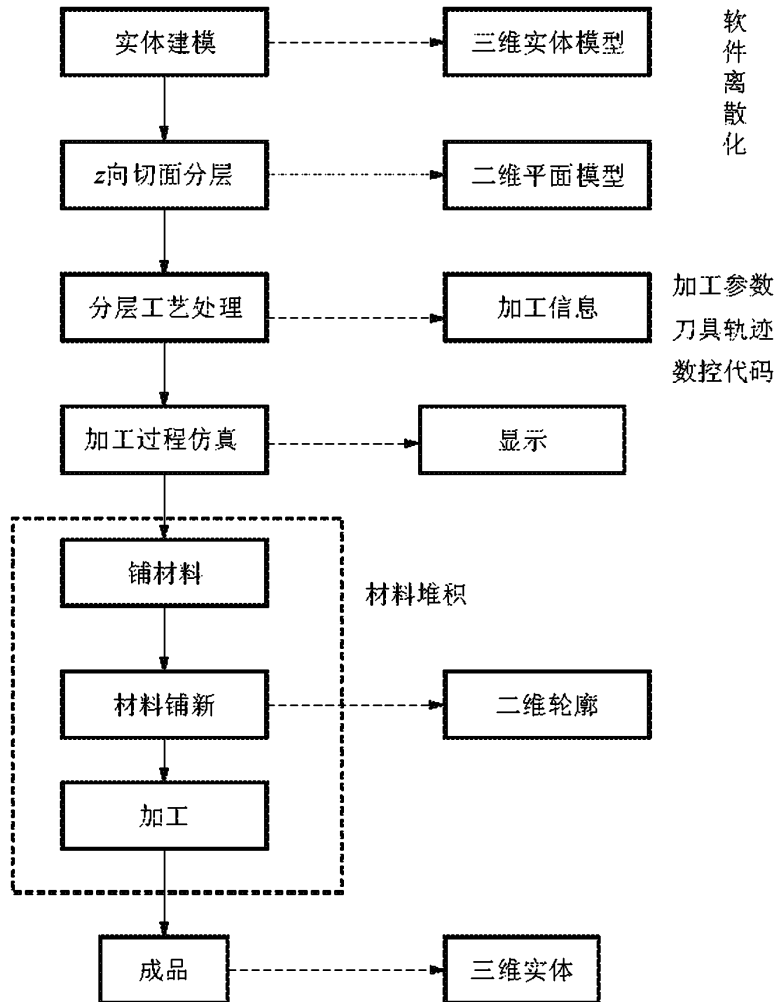


图 7.4 快速原形技术原理

利用快速原形技术制造实体样件时,按照以下步骤进行。

(1) 由 CAD 软件设计出零件的三维曲面或实体模型,按照一定的厚度在 z 向对生成的 CAD 模型进行切面分层,生成每个截面的二维平面信息。

(2) 对二维层面信息进行工艺处理,选择合适的加工参数,系统自动生成刀具移动轨迹和数控加工代码。

(3) 对加工过程进行仿真,确保数控加工代码正确无误。

(4) 利用数控装置控制激光束或其他工具的运动,在当前层上进行轮廓扫描,加工出适当的截面形状。

(5) 铺上一层新的成形材料,进行下一层面的加工,如此重复,直到整个零件加工完毕。

快速成形技术较之传统的诸多加工方法展示了以下的优越性。

(1) 可以制成几何形状任意复杂的零件,而不受传统机械加工方法中刀具无法达到某些型面的限制。

(2) 大幅度缩短新产品的开发成本和周期。一般地,采用快速成形技术可减少产品开发成本 30%~70%,减少开发时间 50%,甚至更少。开发光学照相机体如采用快速成形技术仅 3~5 天(从 CAD 建模到原形制作),花费 6000 美元;而用传统的方法则至少需 1 个月,花费约 3.6 万美元。

(3) 曲面制造过程中,CAD 数据的转化(分层)可百分之百地全自动完成,而不像在切削加工中需要高级工程人员数天复杂的人工辅助劳动才能转化为完全的工艺数控代码。

(4) 不需要传统的刀具或工装等生产准备工作。任意复杂零件的加工只需在一台设备上完成,其加工效率亦远胜于数控加工。

(5) 属非接触式加工,没有刀具、夹具的磨损和切削力所产生的影响。

(6) 加工过程中无振动、噪声和切削废料。

(7) 设备购置投资低于数控机床。

快速成形技术已经广泛应用于家电、汽车、航空航天、船舶、工业设计、医疗等领域,艺术、建筑等领域的工作者也已开始使用 RPT 设备。

(1) 设计模型的制造。这是 RPT 技术应用最广的领域。工程技术人员未采用 RPT 技术时,在产品开发过程中,需要做多个产品模型作为测试之用,如造型设计评估、功能测试、组装测试及安全测试等。而采用 RPT 技术后,设计工程师只需在三维 CAD 图上作出修改,便能及时制造出样品,并对其性能做进一步测试,迅速修改设计中的不足,从而加快产品开发速度,减少不必要的损失。

(2) 快速模具制造(Rapid Tooling, RT)。这是快速成形技术应用的又一个重要方面,无需任何专用工装和夹具,直接根据原形而将复杂的工具和型腔制造出来是 RT 的最大优势。一般来说,采用 RT 制造模具的时间和成本约为传统技术的 1/3。

(3) 医疗卫生领域。RPT 技术也常用于外科技术,患者在接受手术前需进行 CT 扫描或 MRI 等检查。以往医生们都是观看平面的扫描结果来计划手术,判断难免有误差;有了 RPT 的帮助,医生可通过观看患者的立体模型来决定如何进行手术,甚至用 RPT 进行模拟手术,增加手术的可靠性。

(4) 建筑模型。在建筑设计上,实体模型是非常重要的。实体模型除了可令客户更了解建筑物的具体设计外,更可能作各方面的测试,如光线测试、可承受风力测试等。以往建筑工程师在设计完成后,便要考虑如何把设计实体化。但有了 RPT 技术后,不论他们的设计有多复杂,也可很快被制造出来。

(5) 艺术创作。随着计算机技术的发展,新一代的艺术家及设计师,不一定整天埋头于工作间,亲手造出艺术作品来。他们现在可以安坐家中,用 CAD 软件创造出心目中的艺术品,然后再以 RPT 技术把艺术品一次性制作出来。

7.3.2 快速原形技术的主要工艺方法

1. 光固化法

光固化法(Laser Stereo Lithography, LSL)方法是采用各类树脂为成形材料,以氦-镉激光器发出的激光为能源的方法。由 CAD 设计出的三维实体零件,经计算机软件建立三维模型后进行切片分层,进一步处理后生成格式化文件,并驱动扫描激光头动作。如图 7.5 所示,在一容器中装有一定液面高度的光敏树脂溶液,内有支撑升降台,升降台上平面比液面

低一个分层高度。当激光发生器发出的光经万向反射镜扫描照射到支撑台上的液面上时,被照射到的这一层光敏树脂溶液便立即固化,从而生成与该横截面形状相一致的固化薄片,它是固化在支撑台上的。当一层生成完毕,支撑台再上升一个层面高度,进行下一层扫描成形,这样一层一层直至整个三维实体零件加工完毕。

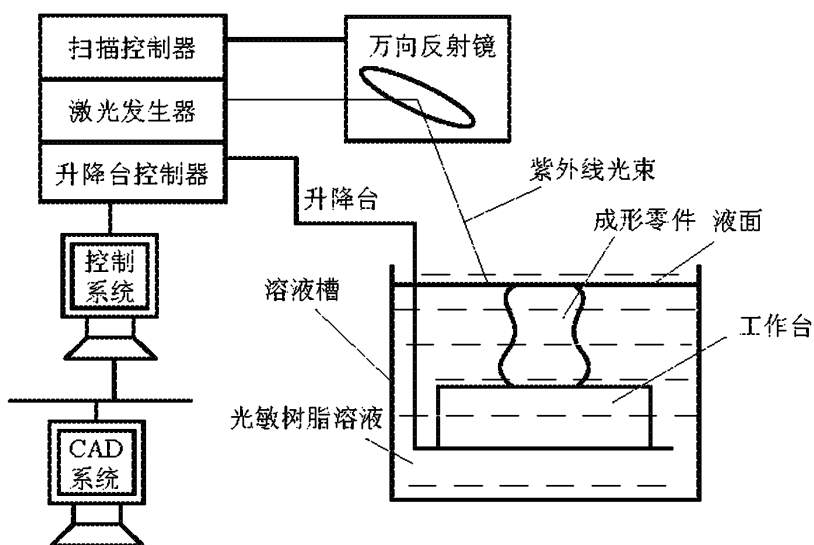


图 7.5 LSL 快速原形法工作原理

2. 迭层法

迭层法(Laminated Object Manufacturing, LOM)方法是利用片状材料(如纸片、塑料薄膜或复合材料),用 CO_2 激光器发出的激光为能源。激光束切割片材的边界线形成某一轮廓,各层间加热、加压成形,制成零件的一种快速成形方法,其加工原理如图 7.6 所示。

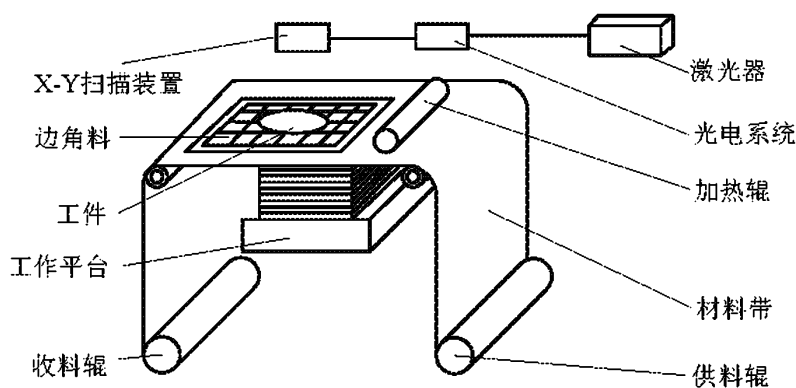


图 7.6 迭层法成形原理

3. 烧结法

烧结法(Selective Laser Sintering, SLS)方法是采用各种粉末(金属、陶瓷、蜡粉、塑料)为材料,利用滚子铺粉,用 CO_2 高功率激光器对粉末进行加热,直至烧结成块的一种成形方法。如图 7.7 所示,一层完成后,再重复做下一层烧结,直至零件成形,最后去掉多余粉末。

4. 熔融沉积法

熔融沉积法(Fused Deposition Modeling, FDM)方法是用蜡丝为原料,利用电加热方式将熔丝熔化成半流动成形材料,由喷头挤到一定位置固化的一种快速成形方法,如图 7.8 所

示。FDM 喷头受 CAD 分层数据控制,使半流动状态的熔丝材料从喷头中挤压出来,固化成轮廓形状的薄层。当一层完成后,工作台下降一个层厚,并开始叠加制造下一层。FDM 工艺的关键,是保持半流动成形材料刚好在熔点之上(通常控制在比熔点高 1℃左右)。

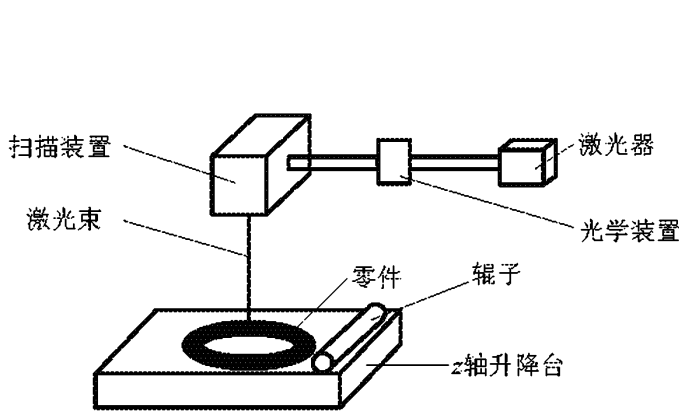


图 7.7 烧结法成形原理

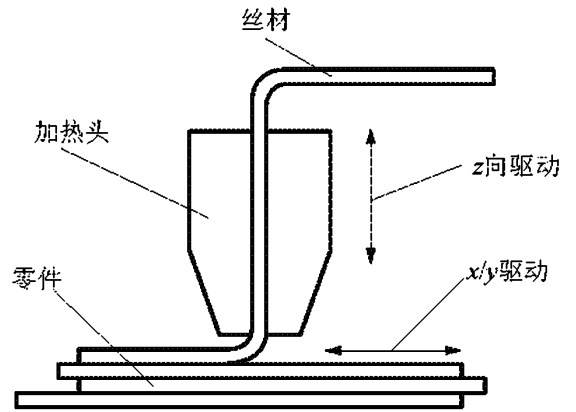


图 7.8 熔融沉积法成形原理

7.4 先进制造生产模式

7.4.1 并行工程

传统产品制造的“产品设计—工艺设计—计划调度—生产制造”工作方式是顺序进行的。如图 7.9 所示,设计与制造脱节,一旦制造出现问题,就要修改设计,整个产品开发周期很长,新产品难以很快上市。面对激烈的市场竞争,1986 年美国提出了“并行工程(Concurrent Engineering, CE)”的概念,即“并行工程是集成地,并行地设计产品及其相关的各种过程(包括制造过程和支持过程)的系统方法。这种方法要求产品开发人员在设计一开始就考虑产品整个生命周期中从概念形成到产品报废处理的所有因素,包括质量、成本、进度计划和用户要求。”并行设计将产品开发周期分解成多个阶段,各个阶段间有部分相互重叠,如图 7.10 所示。

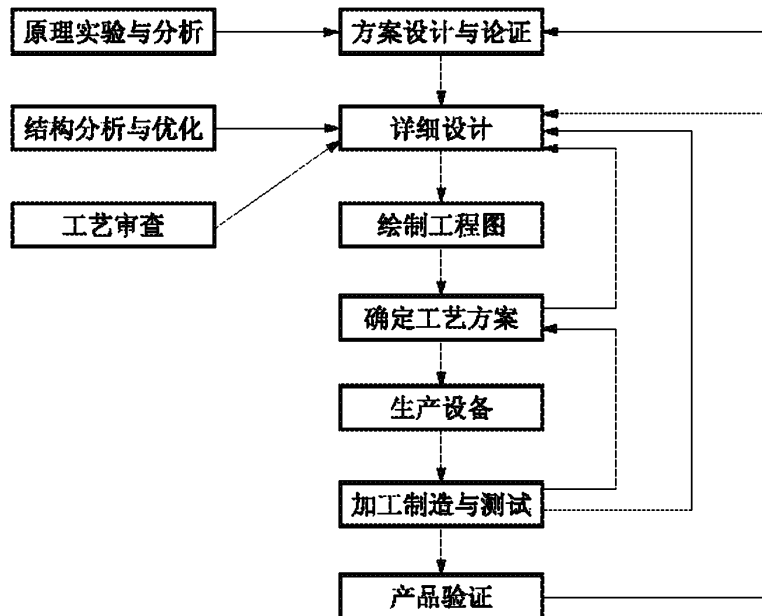


图 7.9 产品串行开发流程

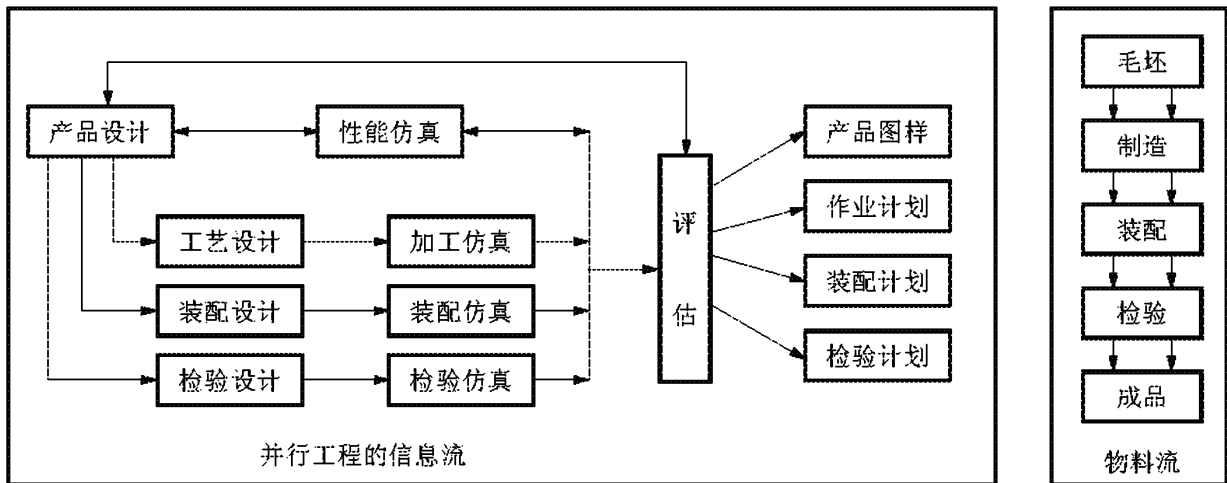


图 7.10 并行工程的内涵

7.4.2 敏捷制造

敏捷制造(Agile Manufacturing, AM)目前尚无统一、公认的定义。一般可以这样认为:敏捷制造是在“竞争合作(或协同)”机制作用下,企业通过与市场(用户)、合作伙伴在更大范围、更高程度上的集成,提高企业竞争能力,最大限度地满足市场(用户)的需求,实现对市场需求作出灵活快速反应的一种制造生产新模式。也可以指企业采用现代通信技术,以敏捷动态优化的形式组织新产品开发,通过动态联盟(又称虚拟企业)、先进柔性生产技术和高素质人员的全面集成,迅速响应客户需求,及时交付新产品并投放市场,从而赢得竞争优势,获取长期的经济效益。

敏捷制造的目标是企业能够快速响应市场的变化,根据市场需求,在最短的时间内开发制造出满足市场需求的高质量的产品。

1. 敏捷制造技术的内涵

1991年美国里海大学(Lehigh University)牵头发表的《21世纪制造企业发展战略》报告中首次提出了敏捷制造的思想。敏捷制造是指制造系统在满足低成本和高质量的同时,对变幻莫测的市场需求的快速反应。因此,敏捷制造的企业,其敏捷能力应当反映在以下六个方面。

(1) 对市场的快速反应能力。判断和预见市场变化并对其快速地作出反应的能力。

(2) 竞争力。企业获得一定生产力、效率和有效参与竞争所需的技能。

(3) 柔性。以同样的设备与人员生产不同产品或实现不同目标的能力。

(4) 快速。以最短的时间执行任务(如产品开发、制造、供货等)的能力。

(5) 企业策略上的敏捷性。企业针对竞争规则及手段的变化、新的竞争对手的出现、国家政策法规的变化、社会形态的变化等快速反应的能力。

(6) 企业日常运行的敏捷性。企业对影响其日常运行的各种变化,如用户对产品规格、配置及售后服务要求的变化、用户定货量和供货时间的变化、原料供货出现问题及设备出现故障等作出快速反应的能力。

AM的基本思想是通过把动态灵活的虚拟组织机构、先进的柔性生产技术和高素质的人员进行全方位的集成,从而使企业能够从容应付快速变化和不可预测的市场需求。它是

一种提高企业竞争能力的全新制造组织模式。

2. 敏捷制造技术的主要概念

(1) 全新企业概念。将制造系统空间扩展到全国乃至全世界,通过企业网络建立信息交流高速公路,建立“虚拟企业”,以竞争能力和信誉为依据选择合作伙伴,组成动态公司。它不同于传统观念上的有围墙的有形空间构成的实体空间,虚拟企业从策略上讲不强调企业全能,也不强调一个产品从头到尾都是自己开发、制造。

(2) 全新的组织管理概念。简化过程,不断改进过程;提倡以“人”为中心,用分散决策代替集中控制,用协商机制代替递阶控制机制;提高经营管理目标,精益求精,尽善尽美地满足用户的特殊需要;敏捷企业强调技术和管理的结合,在先进柔性制造技术的基础上,通过企业内部的多功能项目组与企业外部的多功能项目组——虚拟公司,把全球范围内的各种资源集成在一起,实现技术、管理和人的集成。敏捷企业的基层组织是多学科群体,是以任务为中心的一种动态组合。

(3) 全新的产品概念。敏捷制造的产品进入市场以后,可以根据用户的需要进行改变,得到新的功能和性能,即使用柔性的、模块化的产品设计方法。依靠极大丰富的通信资源和软件资源,进行性能和制造过程仿真。敏捷制造的产品能够保证用户在整个产品生命周期内满意,企业的这种质量跟踪将持续到产品报废为止,甚至包括产品的更新换代。

(4) 全新的生产概念。产品成本与批量无关,从产品看是单件生产,而从具体的实际和制造部门看,却是大批量生产。高度柔性的模块化的、可伸缩的制造系统的规模是有限的,但在同一系统内可生产出产品的品种却是无限的。

3. 敏捷制造技术的基本特点

1) AM 是自主制造系统

AM 具有自主性,每个工件和加工过程、设备的利用以及人员的投入都由本单元自己掌握和决定,这种系统简单、易行、有效。再者,以产品为对象的 AM,每个系统只负责一个或若干同类产品的生产,易于组织小批量或者单件生产,不同产品的生产可以重叠进行。

2) AM 是虚拟制造系统

AM 系统是一种以适应不同产品为目标而构成的虚拟制造系统,其特色在于能够随环境的变化迅速地动态重构,对市场的变化作出快速的反应,实现生产的柔性自动化。实现该目标的主要途径是组建虚拟企业。其主要特点是:

(1) 功能的虚拟化。企业虽具有完备的企业职能,但没有执行这些功能的机构。

(2) 组织的虚拟化。企业组织是动态的,倾向于分布化,讲究轻薄和柔性,呈扁平网状结构。

(3) 地域的虚拟化。企业中产品的开发、加工、装配、营销分布在不同地点,通过计算机网络加以连接。

3) AM 是可重构的制造系统

AM 系统设计是使制造系统从组织上具有可重构性、可重用性和可扩充性 3 方面能力。

7.4.3 精良生产

1. 精良生产的概念

精良生产(Lean Production, LP)也称为精益生产,是首先在日本成功实施,后来由美国麻省理工学院于 20 世纪 90 年代提出的一种新型制造系统模式。精良生产的中心思想是在各个环节去掉无用的东西,每个员工及其岗位的安排原则必须保证增值,不能增值的岗位要加以撤除。精良生产是制造系统重构设计的典型策略之一。它具有如下特征。

(1) 以“简化”为主要手段。“简化”是实行精良生产的基本手段,具体做法有:精简组织机构,简化产品开发过程,强调并行设计并成立高效率的产品开发小组;简化零部件的制造过程;协调总装厂与协作厂的关系,避免相互之间的利益冲突。

(2) 以人为中心。人包括整个制造系统所涉及的所有人。

(3) 以尽善尽美为追求目标。

2. 精良生产的内涵及体系

精良生产的核心内容是准时制生产方式 JIT。这种方式通过看板管理,成功地制止了过量生产,实现了“在必要的时刻生产必要数量的必要产品”的目标,从而彻底消除产品制造过程中的浪费,以及由之衍生出来的种种间接浪费,实现生产过程的合理性、高效性和灵活性。JIT 方式是一个完整的技术综合体,包括经营理念、生产组织、物流控制、质量管理、成本控制、库存管理、现场管理等在内的较为完整的生产管理技术与方法体系。

精良生产是在 JIT 生产方式、成组技术 GT 以及全面质量管理 TQC 的基础上逐步完善的,构造了一幅以 LP 为屋顶,以 JIT、GT、TQC 为 3 根支柱,以 CE 和小组化工作方式为基础的建筑画面,如图 7.11 所示。它强调以社会需求为驱动,以人为中心,以简化为手段,以技术为支撑,以“尽善尽美”为目标。主张消除一切不产生附加价值的活动和资源,从系统观点出发将企业中所有的功能合理地加以组合,以利用最少的资源、最低的成本向顾客提供高质量的产品服务,使企业获得最大利润和最佳应变能力。

其特征可归纳为以下几方面。

(1) 简化生产制造过程,合理利用时间,实行拉动式的准时生产,杜绝一切超前、超量生产。采用快换工装模具新技术,把单一品种生产线改造成多品种混流生产线,把小批次大批量轮番生产改变为多批次小批量生产,最大限度地降低在制品储备,提高适应市场需求的能力。

(2) 简化企业的组织机构,采用“分布自适应生产”,提倡面向对象的组织形式(Object Oriented Organization, OOO),强调权力下放给项目小组,发挥项目组的作用。采用项目组协作方式而不是等级关系,项目组不仅完成生产任务而且参与企业管理,从事各种改进活动。

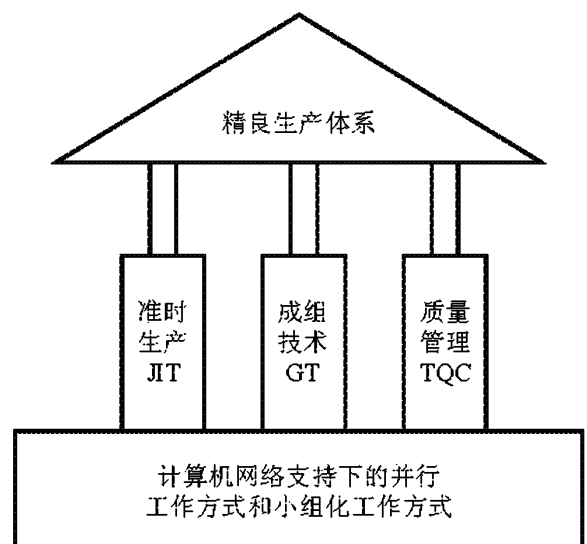


图 7.11 精良生产的体系构成

(3) 精简岗位与人员。每一生产岗位必须是增值的,否则就撤除。在一定岗位的员工都是一专多能,可互相替补,而不是严格的专业分工。

(4) 简化产品开发和生产准备工作,采取“主查”制和并行工程的方法。这克服了大量生产方式中由于分工过细所造成的信息传递慢、协调难、开发周期长的缺点。

(5) 减少产品层次。

(6) 综合了单件生产和大量生产的优点,避免了前者成本高和后者僵化的弱点,提倡用多面手和通用性大、自动化程度高的机器来生产品种多变的大量产品。

(7) 建立良好的协作关系,克服单纯纵向一体化的做法。把 70%左右的产品零部件的设计和生​​产委托给协作厂,主机厂只完成约占产品 30%的设计和制造。

(8) JIT 的供货方式。JIT 保证最小的库存和最少的在制品数。为实现这种供货关系,应与供货商建立起良好的合作关系,相互信任,相互支持,利益共享。

(9) “零缺陷”的工作目标。精良生产追求的目标不是尽可能好一些,而是“零缺陷”,即最低成本、最好质量、无废品、零库存与产品的多样性。

7.4.4 虚拟制造

1. 虚拟制造的定义

虚拟制造(Virtual Manufacturing, VM)技术是在 20 世纪 90 年代以后,虚拟现实(Virtual Reality, VR)技术发展成熟以后出现的一种全新的先进制造技术。这里的“虚拟”不是虚幻或者虚无,是指物质世界的数字化,也就是对真实世界的动态模拟,即虚拟现实;而“制造”则是指虚拟现实技术在制造中的应用或者实现。综合地讲,虚拟制造技术就是利用仿真与虚拟现实技术,在高性能计算机及高速网络的支持下,采用群组协同工作,通过模型来模拟和预测产品功能、性能及可加工性等各方面可能存在的问题;实现产品制造的本质过程,包括产品的设计、工艺规划、加工制造、性能分析、质量检测等,并进行过程管理和控制。

这种制造技术虽然不是真实的,但却是本质上的,即虚拟制造是产品实际制造过程在计算机上的模拟实现,它通过计算机来实现制造的本质内容。实际上,虚拟制造最终提供的是一个强有力的建模与仿真环境,使得产品规划、设计、制造、装配等均可在计算机上实现,且对涉及生产过程的各个方面(从车间加工到企业经营)提供支持。

虚拟制造是实际制造过程在计算机上的一种虚拟,即采用计算机仿真与虚拟现实技术,在高性能计算机及高速网络的支持下,在计算机上创造一个虚拟的制造环境。操作者身处其中,可以虚拟实现产品的设计、工艺规则、加工制造、性能分析、质量检验,包括企业各级过程的管理与控制等产品制造。通过这个过程,可以增强人们对制造过程各级的决策与控制能力。

2. 虚拟制造系统的体系结构

为了实现“在计算机里进行制造”的目的,虚拟制造技术必须提供从产品设计到生产计划和制造过程优化的建模和模拟环境。由于虚拟制造系统的复杂性,人们从不同角度构建了许多不同的虚拟制造系统体系结构。

1) 虚拟开发平台

该平台支持产品的并行设计、工艺规划、加工、装配及维修等过程,进行可加工性分析

(包括性能分析、费用估计和工时估计等)和可装配性分析。它是以全信息模型为基础的众多仿真分析软件的集成,包括力学、热力学、运动学、动力学等可制造性分析,具有以下研究环境。

(1) 基于产品技术复合化的产品设计与分析,除了几何造型与特征造型等环境外,还包括运动学、动力学、热力学模型分析环境等。

(2) 基于仿真的零部件制造设计与分析,包括工艺生成优化、工具设计优化、刀位轨迹优化、控制代码优化等。

(3) 基于仿真的制造过程包括干涉检验及运动轨迹检验的虚拟加工、虚拟机器人等。

(4) 材料加工成形仿真,包括产品设计、加工成形过程温度场、应力场、流动场的分析,加工工艺优化等。

(5) 产品虚拟装配。根据产品设计的形状特征和精度特征,三维真实地模拟产品的装配过程,并允许用户以交互方式控制产品的三维真实模拟装配过程,以检验产品的可装配性。

2) 虚拟生产平台

该平台支持生产环境的布局设计及设备集成、产品远程虚拟测试、企业生产计划及调度的优化,进行可生产性分析等,一般包括:

(1) 虚拟生产环境布局。根据产品的工艺特征、生产场地、加工设备等信息,三维真实地模拟生产环境,并允许用户交互地修改有关布局,对生产动态过程进行模拟,统计相应评价参数,对生产环境的布局进行优化。

(2) 虚拟设备集成。为不同厂家制造的生产设备实现集成提供支撑环境,对不同集成方案进行比较。

(3) 虚拟计划与调度。根据产品的工艺特征和生产环境布局,模拟产品的生产过程,并允许用户以交互方式修改生产过程和进行动态调度,统计有关评价参数,以找出最满意的生产作业计划与调度方案。

3) 虚拟企业平台

虚拟企业平台利用虚拟企业的形式,实现劳动力、资源、资本、技术、管理和信息等的最优配置。虚拟企业平台主要包括:

(1) 虚拟企业协同工作环境。支持异地设计、装配、测试的环境,特别是基于广域网的三维图形的异地快速传送、过程控制和人机交互等环境。

(2) 虚拟企业动态组合及运行支持环境,特别是 Internet 与 Intranet 下的系统集成与任务协调环境。

4) 基于 PDM 的虚拟制造集成平台

该虚拟制造平台具有统一的框架、统一的数据模型,并具有开放的体系结构,主要包括:

(1) 支持虚拟制造的产品数据模型。包括虚拟制造环境下产品全局数据模型定义的规范,多种产品信息(如设计信息、几何信息、加工信息、装配信息等)的一致组织方式。

(2) 基于产品数据管理(PDM)的虚拟制造集成技术。提供在 PDM 环境下,零部件虚拟制造平台、虚拟生产平台、虚拟企业平台的集成技术研究环境。

(3) 基于 PDM 的产品开发过程集成。提供研究 PDM 应用接口技术及过程管理技术,实现虚拟制造环境下产品开发全生命周期的过程集成。

3. 虚拟制造技术在制造业中的应用

虚拟制造技术在工业发达国家开展得较早,并首先在飞机、汽车、军事等领域获得了成功的应用。

波音公司在研制波音 777 客机时,全面实现了虚拟制造技术。它采用 CATIA 软件进行产品的数字化建模,并利用 CAE 软件对飞机的零部件进行结构性能分析。其产品设计师在虚拟现实环境中操纵模拟样机,检验产品的各项性能指标。其整机设计、部件测试、整机装配以及各种环境下的试飞均是在计算机上完成的,整机实现 100% 数字化设计,成为世界上首架以三维无纸化方式设计出来的一次研制、试飞成功的飞机,而且其开发周期也从过去的 8 年缩短到了 5 年,成本降低了 25%。

目前,虚拟制造技术的应用效果比较明显的领域有产品外形设计、产品布局设计、产品运动学和动力学仿真、热加工工艺模拟、加工过程仿真、产品装配仿真、虚拟样机与产品工作性能评测、产品广告与漫游、企业生产过程仿真与优化、虚拟企业的可合作性仿真与优化等。虚拟现实技术是计算机技术、传感技术、人机接口技术和人工智能技术等多种高新技术的结晶。随着计算机技术、微电子技术和信息技术的发展,虚拟现实和制造技术必将成为探索新的制造技术和新的生产模式的重要支撑技术,必将发挥其越来越重要的作用。

7.4.5 绿色制造

1. 绿色制造的提出

在生产力高度发展和物质产品空前丰富的今天,世界却面临着一系列令人忧虑的问题。

在经历了几百年工业发展之后,人类逐渐认识到工业文明所带来的负面影响已明显显现:越来越短的产品使用寿命(并非产品丧失了原有的功能,而是消费者选择了更好、更新的产品)造成数量越来越多的废弃物;资源过快开发和过量消耗,造成资源短缺和面临衰竭;环境污染和自然生态破坏已严重威胁到人类的生存条件。如再不采取有效措施,后果将不堪设想。在这种背景下,绿色制造技术应运而生。

2. 绿色制造的定义及内涵

20 世纪 90 年代提出的绿色制造(Green Manufacturing, GM),又称清洁生产(Green Production, GP),或面向环境的制造(Manufacturing For Environment, MFE)。绿色制造技术是指在保证产品的功能、质量、成本的前提下,综合考虑环境影响和资源效率的现代制造模式。它使产品在从设计、制造、使用到报废的整个生命周期中节约资源和能源,不产生环境污染或使环境污染最小化。

绿色制造包含制造过程和产品两个方面,如图 7.12 所示。

对于制造过程而言,绿色制造渗透到从原材料投入到形成产品的全过程,包括节省原材料和能源、环保制造、报废产品的回收再利用。对于产品而言,清洁生产覆盖产品生命周期的各个阶段,包括产品的设计、生产、包装、运输、流通、消费及报废等,以减少对人类和环境的不良影响。

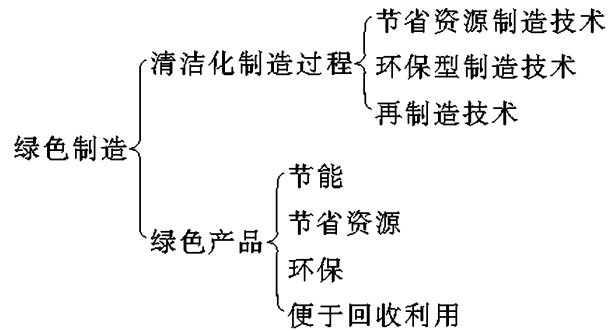


图 7.12 绿色制造的内容

3. 绿色制造过程

绿色制造过程主要包括三方面的内容：减少制造过程中的资源消耗，避免或减少制造过程对环境的不利影响以及报废产品的再生与利用。与此相应，发展了三方面的制造技术，即节省资源的制造技术、环保型制造技术和再制造技术。

1) 节省资源的制造技术

节省资源的制造技术包括减少制造过程中的能源消耗、减少原材料消耗和减少制造过程中的能源消耗和减少制造过程中的其他消耗。

制造过程中要消耗能量，消耗掉的能量除一部分转化为有用功之外，大部分能量转化为其他能量而被浪费掉了。例如，普通机床用于切削的能量仅占总消耗能量的 30%，其余 70% 的能量则消耗于摩擦、发热、振动、噪声等。这些不仅损失了能量，而且还会影响加工精度，降低机床寿命，并造成环境污染，恶化劳动条件。

因此可以采取下列措施以减少制造过程中的能量消耗。

- (1) 提高设备的传动效率，减少摩擦与磨损。
- (2) 合理安排加工工艺，合理选择加工设备，优化切削用量，使设备处于高效运行状态。
- (3) 改进产品和工艺过程设计，采用先进成形方法，减少制造过程中的能量消耗。
- (4) 采用适度自动化技术，而非全盘自动化。

产品制造过程中使用原材料越多，消耗的有限资源数量越多，并会加大运输与库存工作量，而且还会增加制造过程中的能量消耗。减少制造过程中原材料消耗的主要措施有：

(1) 科学进行材料规划，尽量避免使用稀有、贵重、有毒、有害材料，积极推行废弃材料的回收与再生。

(2) 合理设计毛坯，采用先进的毛坯制造方法（如精密铸造、精密锻造、粉末冶金等），尽量减小毛坯余量。

(3) 优化排料，尽可能减少“下脚料”。

(4) 采用少无切削加工技术。例如，采用冷挤压花键代替花键铣削，采用冷轧螺杆代替螺杆车削（或铣削），采用挤孔代替拉孔等。在可行的条件下，还应考虑采用快速原形制造技术制造零件，避免传统的“去除加工”所带来的材料损耗。

制造过程中除能源消耗、原材料消耗外，其他物料消耗（如刀具消耗、液压油消耗、润滑油消耗、冷却液消耗、涂油和包装材料消耗等）也不容忽视。

2) 环保型制造技术

环保型制造技术指在制造过程中能最大限度地减小环境污染，创造安全、舒适的工作环

境。其包括:减少废料的产生,废料的有序排放,减少有毒、有害物质的产生,有毒、有害物质的适当处理,减小噪声与振动,温度调节与空气净化,对废料的回收与再利用等。

在制造过程中,伴随着能量的转换与损失,可能会产生一些有毒、有害物质。例如,在进行电化学加工时,一些有毒、有害的气体 and 液体可能会随之产生。这样,不仅会腐蚀设备,更严重的是会造成环境污染。又如,在进行机械加工时,若冷却液使用和处理不当,也会产生毒性物质,造成环境污染。杜绝或减少有毒、有害物质的最好方法是采用预防性原则,即将对污水、废气的“事后处理”转变为“事先预防”,采用各种有效方法避免有毒、有害物质的产生。仅对机械加工中的冷却而言,目前已发展了多种新的加工工艺,如采用水蒸气冷却、液氮冷却、空气冷却和干式切削等。由于干式切削完全不需要冷却液,从而可以从根本上避免因使用冷却液而带来的种种不良后果。显然,干式切削是一种环保型制造技术,具有极大的发展前途。

粉尘污染与噪声污染是毛坯制造车间和机械加工车间最常见的污染,它会严重影响劳动者的身心健康,必须加以严格控制。其主要措施如下。

(1) 选用先进的制造工艺及设备。例如,采用金属型铸造替代砂型铸造,可显著减少有害气体的产生及粉尘污染;采用压力机锻压代替锻锤锻压,可使锻压噪声大幅度下降;采用快速原形制造技术代替去除加工,可从根本上杜绝机械加工噪声等。

(2) 优化机械结构设计,采用低噪声材料,最大限度地降低设备工作噪声。

(3) 选择合适的工艺参数。在机械加工中,选择合理的切削用量可以有效地防止切削振动与切削噪声。

(4) 对制造设备采用封闭式结构,可以有效地防止粉尘扩散和噪声传播。例如,采用全封闭的机床进行机械加工,可以有效减小机加工车间的噪声污染。

工作环境设计属于人机工程学的研究范畴,它研究如何给劳动者提供一个安全、舒适、宜人的工作环境。

3) 再制造技术

再制造的含义是指产品报废后,对其进行拆卸和清洗,对其中的某些零部件采用表面工程或其他加工技术进行翻新和再装配,使零部件的形状、尺寸和性能得到恢复和再利用。采用再制造技术可以充分地利用资源,有效地节省能源,减小退役产品对环境的负面影响,并能实现企业经济效益与社会效益的协调一致。

再制造技术是一项对产品全寿命周期进行统筹规划的系统工程,其主要研究内容包括:产品的概念描述、再制造策略研究、再制造环境分析、产品失效分析与寿命评估(包括智能测试与诊断)、回收与拆卸方法、再制造设计、质量保证与控制、再制造成本分析、再制造综合评价、相关软件工具开发等。由于再制造技术符合环境保护和可持续发展的战略,受到各国普遍重视,并已在许多领域付诸实施。

4. 绿色产品

绿色产品要求在制造过程中节省资源,在使用过程中节省能源、无污染,在产品报废后便于回收和再利用。

1) 节省资源

绿色产品应是节省资源的产品,即在完成同样功能的条件下,产品消耗资源数量要少。

例如,采用机夹式不重磨刀具代替焊接式刀具,可以大量节省刀柄材料。在机械产品中,节省资源的设计包括:可靠性设计和均衡寿命设计,以提高产品的使用寿命和使用效率;优化设计与模块化设计,以简化产品结构、节省材料;并行设计和改进产品制造工艺性,提高产品设计的一次成功率,减少材料消耗。

2) 节省能源

绿色产品应该是节能产品。节能设计通常体现在以下几方面。

(1) 提高能力转换效率,如汽油发动机的燃烧率、电动机的电-机转换效率等。

(2) 减小运动部件的质量和摩擦,提高机械传动效率,如以滚动摩擦代替滑动摩擦、采用液体或气体静压轴承和静压导轨等。

(3) 采用节能控制,如设备不使用时自动处于休眠状态。

(4) 减少不必要的能量储备。

3) 减少污染

减少污染包括减少对环境的污染和对操作者危害两个方面。为减少污染应充分考虑以下问题。

(1) 选用无毒、无害材料。

(2) 严格限制有害排放物的产品和排放数量。

(3) 产品设计符合人机工程学的要求,使操作者在使用产品过程中安全、高效、舒适和宜人。

4) 报废后的回收与再利用

随着物质的不断丰富和产品寿命周期的不断缩短,产品报废后的处理问题变得越来越突出。对于传统的产品寿命周期,从设计、制造、销售、使用到报废是一个开环系统;而绿色产品设计则要求充分考虑产品报废后的处理、回收和再利用,并将产品设计与社会生产系统融为一体,形成一个闭环系统。其中对产品回收处理方案的评价主要考察效益最大化、重新利用的零部件尽可能多和废弃部分尽可能少 3 个方面。

思考与练习题

7-1 为什么世界上许多国家和企业都把发展先进制造技术定为国家制造业或企业的发展战略?

7-2 先进制造技术的内涵和特点是什么?

7-3 机械制造自动化的发展有哪几种主要形式? 各有什么特点?

7-4 试述 FMS、CIMS 各自的构成和原理。

7-5 什么是快速原形技术? 请简述其中两种工艺方法的工艺原理。

7-6 并行工程的基本概念是什么?

7-7 敏捷制造的基本原理是什么? 其主要概念有哪些?

7-8 什么是虚拟制造? 都包含哪些内容?

参 考 文 献

- [1] 卢秉恒. 机械制造技术基础[M]2版. 北京:机械工业出版社,2005.
- [2] 于骏一,邹青. 机械制造技术基础[M]. 北京:机械工业出版社,2004.
- [3] 李凯岭. 机械制造技术基础[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [4] 韩秋实. 机械制造技术基础[M]2版. 北京:机械工业出版社,2004.
- [5] 王启平. 机床夹具设计[M]2版. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2005.
- [6] 饶华球. 机械制造技术基础[M]. 北京:电子工业出版社,2007.
- [7] 蔡安江. 机械制造技术基础[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
- [8] 陈明. 机械制造工艺学[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [9] 阎光明,侯忠滨,张云朋. 现代制造工艺基础[M]. 西安:西北工业大学出版社,2007.
- [10] 周世学. 机械制造工艺与夹具[M]. 北京:北京理工大学出版社,1999.
- [11] 王先逵. 机械制造工艺学[M]2版. 北京:机械工业出版社,2006.
- [12] 黄健求. 机械制造技术基础[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [13] 华楚生. 机械制造技术基础[M]2版. 重庆:重庆大学出版社,2003.
- [14] 张润福. 机械制造技术基础[M]. 2版. 武汉:华中理工大学出版社,2000.
- [15] 陈日濯. 金属切削原理[M]. 2版. 北京:机械工业出版社,1993.
- [16] 乐克谦. 金属切削刀具[M]. 2版. 北京:机械工业出版社,2002.
- [17] 王润孝. 先进制造技术导论[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [18] 叶蓓华. 数字控制技术[M]. 北京:清华大学出版社,2002.
- [19] 张世昌. 先进制造技术[M]. 天津:天津大学出版社,2004.
- [20] 卜昆. 计算机辅助制造[M]. 北京:科学出版社,2003.
- [21] 卢小平. 现代制造技术[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
- [22] 陈宏钧. 实用机械加工工艺手册[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [23] 刘极峰. 计算机辅助设计与制造[M]. 北京:高等教育出版社,2004.
- [24] 朱林泉. 快速成型与快速制造技术[M]. 北京:国防工业出版社,2003.
- [25] 周骥平,林岗. 机械制造自动化技术[M]. 北京:机械工业出版社,2003.
- [26] 袁哲俊. 精密和超精密加工技术[M]. 北京:机械工业出版社,2002.
- [27] 周宏甫. 机械制造技术基础[M]. 北京:高等教育出版社,2004.
- [28] 赵雪松,赵晓芬. 机械制造技术基础[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2006.
- [29] 傅水根. 机械制造工艺基础[M]. 北京:清华大学出版社,1998.
- [30] 张世昌. 机械制造技术基础[M]. 天津:天津大学出版社,2004.
- [31] 邓志平. 机械制造技术基础[M]. 成都:西南交通大学出版社,2004.
- [32] 王启平. 机械制造工艺学[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2004.
- [33] 冯之敬. 机械制造工艺基础[M]. 北京:清华大学出版社,1998.
- [34] 施平. 先进制造技术[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2006.

北京大学出版社大机械系列实用规划教材书目

序号	书 名	标准书号	主 编	定价	出版日期
1	机电工程专业英语	ISBN 7 301 10596 7	赵运才,何法江	24.00	2008.6 第 3 次印刷
2	AutoCAD 工程制图	ISBN 7 5038 4446 9	杨巧绒,张克义	20.00	2007.8 第 3 次印刷
3	工程制图	ISBN 7 5038 4442 6	戴立玲,杨世平	27.00	2007.8 第 2 次印刷
4	工程制图习题集	ISBN 7 5038 4443 4	杨世平,戴立玲	20.00	2008.1 第 2 次印刷
5	机械制造基础(上) 工程材料及热加工工艺基础	ISBN 7 5038 4435 3	侯书林,朱海	29.00	2008.6 第 3 次印刷
6	机械制造基础(下) 机械加工工艺基础	ISBN 7 5038 4436 1	侯书林,朱海	22.00	2007.7 第 2 次印刷
7	金工实习	ISBN 7 5038 4440 X	郭永环,姜银方	24.00	2008.2 第 4 次印刷
8	机械设计	ISBN 7 5038 4448 5	郑江,许瑛	33.00	2007.8 第 2 次印刷
9	机械设计基础	ISBN 7 5038 4444 2	曲玉峰,关晓平	27.00	2008.1 第 2 次印刷
10	机床电气控制技术	ISBN 7 5038 4433 7	张万奎	26.00	2007.9 第 2 次印刷
11	机床数控技术	ISBN 7 5038 4434 5	杜国臣,王士军	31.00	2007.8 第 2 次印刷
12	Pro/ENGINEER Wildfire 2.0 实用教程	ISBN 7 5038 4437 X	黄卫东,任国栋	32.00	2007.7 第 2 次印刷
13	数控加工技术	ISBN 7 5038 4450 7	王彪,张兰	29.00	2008.2 第 2 次印刷
14	计算机辅助设计与制造	ISBN 7 5038 4439 6	仲梁维,张国全	29.00	2007.9 第 2 次印刷
15	液压传动	ISBN 7 5038 4441 8	王守城,容一鸣	27.00	2007.7 第 2 次印刷
16	互换性与测量技术基础	ISBN 7 5038 4473 6	韩进宏,王长春	25.00	2007.7 第 2 次印刷
17	金属切削原理与刀具	ISBN 7 5038 4447 7	陈锡渠,彭晓南	29.00	2008.1 第 2 次印刷
18	可编程控制器原理与应用	ISBN 7 5038 4438 8	赵燕,周新建	29.00	2008.1 第 2 次印刷
19	汽车电子控制技术	ISBN 7 5038 4432 9	凌永成,于京诺	32.00	2007.7 第 2 次印刷
20	汽车构造	ISBN 7 5038 4445 0	肖生发,赵树朋	44.00	2007.8 第 2 次印刷
21	金属学与热处理	ISBN 7 5038 4451 5	朱兴元,刘忆	24.00	2007.7 第 2 次印刷
22	锻造工艺过程及模具设计	ISBN 7 5038 4453 1	胡亚民,华林	30.00	2008.6 第 2 次印刷
23	冲压工艺与模具设计	ISBN 7 5038 4449 3	牟林,胡建华	32.00	2007.8 第 2 次印刷
24	机械工程材料	ISBN 7 5038 4452 3	戈晓岚,洪琢	29.00	2008.2 第 2 次印刷
25	产品造型计算机辅助设计	ISBN 7 5038 4474 4	张慧姝,刘永翔	27.00	2006.8
26	测试技术基础	ISBN 978 7 301 11486 5	江征风	26.00	2008.1 第 2 次印刷
27	设计心理学	ISBN 978 7 301 11567 1	张成忠	48.00	2008.6 第 2 次印刷
28	工程力学(上册)	ISBN 978 7 301 11487 2	毕勤胜,李纪刚	29.00	2008.6 第 2 次印刷

(续)

序号	书 名	标准书号	主 编	定价	出版日期
29	工程力学(下册)	ISBN 978 7 301 11565 7	毕勤胜,李纪刚	28.00	2008.6 第2次印刷
30	机械原理	ISBN 978 7 301 11488 9	常治斌,张京辉	29.00	2008.6 第2次印刷
31	理论力学	ISBN 978 7 301 12170 2	盛冬发,闫小青	29.00	2007.8
32	控制工程基础	ISBN 978 7 301 12169 6	杨振中,韩致信	29.00	2007.8
33	机械制图(机类)	ISBN 978 7 301 12171 9	张绍群,孙晓娟	32.00	2007.8
34	机械制图习题集(机类)	ISBN 978 7 301 12172 6	张绍群,王慧敏	29.00	2007.8
35	汽车发动机原理	ISBN 978 7 301 12168 9	韩同群	32.00	2007.8
36	汽车电气设备	ISBN 978 7 301 12025 5	凌永成,谢在玉	27.00	2007.8
37	精密与特种加工技术	ISBN 978 7 301 12167 2	袁根福,祝锡晶	29.00	2007.8
38	机械工程控制基础	ISBN 978 7 301 12354 6	韩致信	25.00	2008.1
39	产品设计原理	ISBN 978 7 301 12355 3	刘美华	30.00	2008.2
40	汽车电气设备实验与实习	ISBN 978 7 301 12356 0	谢在玉	29.00	2008.2
41	机械设计课程设计	ISBN 978 7 301 12357 7	许瑛	35.00	2008.8
42	Pro/ENGINEER Wildfire 3.0 实例教程	ISBN 978 7 301 12359 1	张选民	45.00	2008.2
43	机械创新设计	ISBN 978 7 301 12403 1	丛晓霞	32.00	2008.7
44	汽车试验测试技术	ISBN 978 7 301 12362 1	王丰元	26.00	2008.2
45	汽车试验学	ISBN 978 7 301 12358 4	赵立军,白欣	28.00	2008.8
46	汽车检测与诊断技术	ISBN 978 7 301 12361 4	罗念宁 张京明	30.00	2008.9
47	现代汽车系统控制技术	ISBN 978 7 301 12363 8	崔胜民	36.00	2008.1
48	汽车设计	ISBN 978 7 301 12369 0	刘涛	45.00	2008.1
49	汽车工程概论	ISBN 978 7 301 12364 5	张京明,江浩斌	36.00	2008.6
50	工程流体力学	ISBN 978 7 301 12365 2	杨建国	30.00	2008.12
51	热工基础	ISBN 978 7 301 12399 7	于秋红	32.00	2008.9
52	内燃机构造	ISBN 978 7 301 12366 9	林波,李兴虎	26.00	2008.8
53	汽车运用工程基础	ISBN 978 7 301 12367 6	姜立标,张黎骅	32.00	2008.6
54	汽车制造工艺	ISBN 978 7 301 12368 3	赵桂范,杨娜	30.00	2008.6
55	机械制图与 AutoCAD 基础教程	ISBN 978 7 301 13122 0	张爱梅	35.00	2007.11
56	机械制图与 AutoCAD 基础教程习题集	ISBN 978 7301 13120 6	鲁杰,张爱梅	22.00	2007.12
57	材料成型设备控制基础	ISBN 978 7 301 13169 5	刘立君	34.00	2008.1
58	液压与气压传动	ISBN 978 7 301 13129 4	王守城,容一鸣	32.00	2008.4
59	Pro/ENGINEER Wildfire 3.0 曲面设计实例教程	ISBN 978 7301 13182 4	张选民	45.00	2008.2

(续)

序号	书 名	标准书号	主 编	定价	出版日期
60	金属切削机床	ISBN 978 7 301 13180 0	夏广岚,冯凭	32.00	2008.5
61	汽车运用基础	ISBN 978 7 301 13118 3	凌永成,李雪飞	26.00	2008.1
62	汽车运行材料	ISBN 978 7 301 13583 9	凌永成,李美华	30.00	2008.7
63	机械制造工艺学	ISBN 978 7 301 13758 1	郭艳玲,李彦蓉	30.00	2008.8
64	机械精度设计与测量技术	ISBN 978 7 301 13580 8	于峰	25.00	2008.8
65	汽车故障诊断与检测技术	ISBN 978 7 301 13634 8	刘占峰,林丽华	34.00	2008.8
66	工程材料及其成形技术基础	ISBN 978 7 301 13916 5	申荣华,丁旭	45.00	2008.8
67	测试技术实验教程	ISBN 978 7 301 13489 4	封士彩	22.00	2008.8
68	汽车维修技术与设备	ISBN 978 7 301 13914 1	凌永成,赵海波	30.00	2008.8
69	材料成形 CAD/CAE/CAM 基础	ISBN 978 7 301 14106 9	余世浩,朱春东	35.00	2008.8
70	材料力学	ISBN 978 7 301 14462 6	陈忠安,王静	30.00	2009.1
71	AutoCAD 2008 工程绘图	ISBN 978 7 301 14478 7	赵润平,宗荣珍	35.00	2009.1
72	机械制造技术基础	ISBN 978 7 301 14474 9	张鹏,孙有亮	30.00	2009.1

电子书(PDF版)、电子课件和相关教学资源下载地址:<http://www.pup6.com/ebook.htm>,欢迎下载。

欢迎免费索取样书,请填写并通过 E mail 提交教师调查表,下载地址:<http://www.pup6.com/down/>
教师信息调查表 Excel 版.xls,欢迎订购。

联系方式:010 62750667,linzhangbo@126.com,guosj2008@163.com,tjxin_0405@163.com,欢迎来电来信。

欢迎访问立体化教材建设网址:<http://blog.pup6.com/>。