

实用焊接技术丛书

标准分享网
www.bzfxw.com

特种焊接技术 及应用

李亚江 王娟 刘鹏 编著



化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

实用焊接技术丛书

第1批 **标准分享网**

www.bzfxw.com

特种焊接技术及应用

实用钎焊技术及应用

焊接材料的选用

异种难焊材料的焊接及应用

ISBN 7-5025-4860-2



9 787502 548605 >

ISBN 7-5025-4860-2/TH · 147 定价：38.00元

销售分类建议：机械/机械加工技术

实用焊接技术丛书

特种焊接技术及应用

李亚江 王娟 刘鹏 编著

化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

·北京·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

特种焊接技术及应用/李亚江, 王娟, 刘鹏编著.
北京: 化学工业出版社, 2003. 10
(实用焊接技术丛书)
ISBN 7-5025-4860-2

I. 特… II. ①李…②王…③刘… III. 焊接, 特
种 IV. TG456

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 093681 号

实用焊接技术丛书
特种焊接技术及应用

李亚江 王娟 刘鹏 编著

责任编辑: 任文斗

文字编辑: 韩庆利

责任校对: 凌亚男

封面设计: 潘峰

*

化学工业出版社 出版发行
工业装备与信息工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

http: www.cip.com.cn

*

新华书店北京发行所经销

北京市昌平振南印刷厂印刷

三河市宇新装订厂装订

开本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 18 字数 442 千字

2004 年 1 月第 1 版 2004 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-4860-2 I·H·147

定 价: 38.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

在工业形势和科学技术发展的推动下，焊接技术获得了迅速发展。随着科学技术的进步，新产品、新结构不断涌现，新材料、新工艺的应用日益广泛，对焊接质量、接头性能和生产率不断提出新的更高的要求。在许多情况下，任何一种焊接方法都不可能完全满足工程结构中的使用要求。因此，寻求特殊的焊接方法及工艺受到人们的高度重视。

特种焊接技术是指除常规焊接方法（如手工电弧焊、埋弧焊、气体保护焊等）之外的焊接技术。20世纪中期，新的高能密束热源（激光束、电子束、等离子弧等）相继问世，其功率密度达到 $10^9 \sim 10^{14} \text{ W/cm}^2$ ，比电弧高出好几个数量级。采用新的高能密束热源的特种焊接技术应运而生。高能密束焊接与一般电弧焊相比具有明显的优点：焊缝熔深大、焊接速度快、热影响区小、焊缝组织细化、焊接变形小，可以焊接许多原先非常难焊的材料。因此，在电子、能源、汽车、航空航天、核工业等部门中得到了广泛的应用。激光束具有可以在大气中进行焊接的优点，聚焦后的光斑只有 $0.2 \sim 2 \text{ mm}$ ，既可以深熔焊，又可以完成微型精密连接。焊接过程热量输入小，结构变形小，接头质量好。电子束焊可以一次焊透厚度 200 mm 的板材，焊缝的深宽比可达 $20 \sim 60$ 。固态连接是21世纪将有重大发展的连接技术。许多新材料（如耐热合金、高技术陶瓷、金属间化合物等），特别是异种材料之间的连接，采用常规的焊接方法已经无法完成，固态连接的优越性日益显现，真空扩散焊和摩擦焊逐步成为焊接界关注的热点。近年来，超塑性成形扩散焊技术在飞机的钛合金蜂窝结构中得到成功的应用。金属与陶瓷已经能够采用扩散焊进行连接。摩擦焊已经在焊接发动机转子部件上得到应用，线性摩擦焊、搅拌摩擦焊等新技术的应用，解决了某些用熔焊方法无法焊接的材料连接问题。显然，特种焊接技术的广泛应用产生了明显的经济效益和社会效益，符合优质、高效、低耗、无污染生产的发展方向，是值得大力推广的先进焊接技术。

本书从实用性角度对工程中常用的特种焊接方法及应用作了系统阐述，力求突出新颖性、实用性和先进性等特色。本书主要针对激光焊、电子束焊、等离子弧焊、真空扩散焊、摩擦焊和超声波焊等，突出了各种特种焊接方法的工艺特点和应用范围，给出了具体的工艺参数、相关技术数据及针对一些典型结构产品的焊接应用实例。突出了焊接技术要点，可以指导特殊应用场合的焊接生产和新产品开发。

本书内容反映了当前特种焊接技术的最新应用现状。本书主要供从事与焊接技术相关的工程技术人员、管理人员和操作人员使用，也可供高等院校、科研单位的有关教学和科研人员参考。

其他写作人员还有张永喜、陈茂爱、孙俊生、高进强、郭国林、张永兰、吴会强、王芳、任江伟、孙宾、黄海啸、刘强、张燕、石海玉、周冰、张元金、孟繁军、郭怀力等。

书中错误和不当之处，敬请广大读者批评指正。

李亚江

2003年8月

目 录

第 1 章 概 述	1
1.1 焊接方法的分类及发展	1
1.1.1 焊接方法的分类	1
1.1.2 高能束流焊接现状及发展	3
1.2 焊接方法的选择	6
1.2.1 选择焊接方法应考虑的因素	6
1.2.2 一些特种焊接方法的适用范围	8
1.2.3 焊接技术的新发展	9
第 2 章 激光焊	12
2.1 激光焊原理、分类及特点	12
2.1.1 激光焊原理及分类	12
2.1.2 激光焊的特点及应用	13
2.2 激光焊设备及装置	16
2.2.1 激光焊设备的组成	16
2.2.2 激光焊设备选用及技术参数	17
2.3 材料激光焊的焊接性	17
2.3.1 激光焊的焊缝形成特点	17
2.3.2 金属的激光焊接性	18
2.4 激光焊接工艺及参数	19
2.4.1 脉冲激光焊工艺及参数	19
2.4.2 连续 CO ₂ 激光焊工艺及参数	22
2.5 典型材料的激光焊	30
2.5.1 钢的激光焊	30
2.5.2 有色金属的激光焊	31
2.5.3 高温合金的激光焊	32
2.5.4 异种材料的激光焊	33
2.6 激光切割	34
2.6.1 激光切割的分类	34
2.6.2 激光切割的特点	35
2.6.3 激光切割设备	36
2.6.4 激光切割工艺	36
2.6.5 激光切割的应用	41
2.7 激光安全与防护	42
2.7.1 激光的危害	42
2.7.2 激光的安全防护	42

第3章 电子束焊	43
3.1 电子束焊的特点及分类	43
3.1.1 电子束焊的特点	43
3.1.2 电子束焊的分类	44
3.1.3 电子束焊的优缺点	45
3.1.4 电子束焊的应用范围	46
3.2 电子束焊的设备与装置	47
3.2.1 电子束焊机的分类	47
3.2.2 电子束焊机的组成	48
3.2.3 电子束焊机的技术参数	49
3.3 电子束焊的焊接工艺	49
3.3.1 电子束焊工艺特点	49
3.3.2 焊前准备及接头设计	51
3.3.3 电子束焊的工艺参数	53
3.3.4 获得深熔焊的工艺方法	54
3.4 金属材料的电子束焊	56
3.4.1 钢铁材料的电子束焊	56
3.4.2 有色金属的电子束焊	56
3.4.3 难焊金属的电子束焊	59
3.4.4 异种材料的电子束焊	60
3.4.5 高温合金的电子束焊	66
3.5 电子束焊的应用实例	68
3.5.1 在电子和仪表工业中的应用	68
3.5.2 在汽车零件生产中的应用	68
3.5.3 电子束焊应用前景	69
3.6 电子束焊的操作与安全防护	71
3.6.1 真空系统的操作及注意事项	71
3.6.2 焊接操作	71
3.6.3 安全防护	71
第4章 等离子弧焊接与切割	73
4.1 等离子弧的类型及应用特点	73
4.1.1 等离子弧的类型	73
4.1.2 等离子弧的应用特点	74
4.2 等离子弧焊的分类及设备组成	75
4.2.1 等离子弧焊的分类	75
4.2.2 等离子弧焊设备的组成	77
4.3 等离子弧焊工艺	81
4.3.1 等离子弧焊的工艺参数	81
4.3.2 强流(大电流)等离子弧焊工艺	82
4.3.3 微束等离子弧焊工艺	84

4.3.4	脉冲等离子弧焊工艺	88
4.3.5	等离子弧焊的缺陷	89
4.4	材料的等离子弧焊接	89
4.4.1	高温合金的等离子弧焊接	89
4.4.2	铝及铝合金的等离子弧焊接	90
4.4.3	钛及钛合金的等离子弧焊接	91
4.4.4	银与铂的微束等离子弧焊接	92
4.5	等离子弧焊接的应用实例	92
4.5.1	超薄壁管子的微束等离子弧焊接	92
4.5.2	保温瓶不锈钢外壳纵缝的焊接	94
4.5.3	焊接波纹管的微束等离子弧焊接	95
4.6	等离子弧堆焊工艺	97
4.6.1	冷丝和热丝等离子弧堆焊	98
4.6.2	熔化极等离子弧堆焊	98
4.6.3	粉末等离子弧堆焊	99
4.7	等离子弧切割	99
4.7.1	等离子弧切割的特点	99
4.7.2	等离子弧切割方法	99
4.7.3	等离子弧切割设备	101
4.7.4	等离子弧切割工艺	102
4.7.5	提高切割质量的途径	107
4.7.6	特种等离子弧切割方法	109
第5章	真空扩散焊	111
5.1	扩散焊的分类及特点	111
5.1.1	扩散焊的分类	111
5.1.2	扩散焊的特点	112
5.2	扩散焊原理及扩散机制	113
5.2.1	扩散焊原理	113
5.2.2	扩散焊机制	114
5.3	真空扩散焊设备	116
5.3.1	扩散焊设备的组成	116
5.3.2	扩散焊设备的技术参数	117
5.4	真空扩散焊工艺	118
5.4.1	接头形式与表面清理	118
5.4.2	中间层的选择	119
5.4.3	扩散焊的主要工艺参数	119
5.4.4	瞬态液相扩散焊(TLP)	121
5.4.5	扩散焊接头的质量检验	122
5.5	材料扩散焊的应用	123
5.5.1	同种材料的扩散焊	123

5.5.2	异种材料的扩散焊	125
5.5.3	金属间化合物的扩散焊	134
5.6	陶瓷与金属的扩散焊接	137
5.6.1	主要工艺参数	138
5.6.2	界面结合状态	140
5.6.3	陶瓷扩散焊应用实例	142
5.7	复合材料的扩散焊	145
5.7.1	连续纤维增强金属基复合材料	145
5.7.2	非连续纤维增强金属基复合材料	147
第6章	惰性气体保护焊	151
6.1	惰性气体保护焊的分类及特点	151
6.1.1	惰性气体保护焊的分类	151
6.1.2	惰性气体保护焊的工艺特点	151
6.1.3	惰性气体保护焊的应用	153
6.2	钨极氩弧焊(TIG)	153
6.2.1	钨极氩弧焊设备的分类及型号编制	153
6.2.2	钨极氩弧焊设备的组成	154
6.2.3	钨极氩弧焊设备的特点	156
6.2.4	钨极氩弧焊的焊接材料	158
6.2.5	钨极氩弧焊(TIG)工艺	160
6.3	熔化极氩弧焊(MIG)	167
6.3.1	熔化极氩弧焊的熔滴过渡特点	167
6.3.2	熔化极氩弧焊设备的分类及组成	168
6.3.3	熔化极氩弧焊工艺参数的选择	171
6.3.4	不同材料的熔化极氩弧焊工艺	176
6.4	脉冲惰性气体保护焊	179
6.4.1	脉冲钨极氩弧焊	179
6.4.2	脉冲熔化极氩弧焊	182
第7章	冷压焊和热压焊	185
7.1	冷压焊的工艺特点	185
7.1.1	冷压焊分类及应用	185
7.1.2	冷压焊质量的影响因素	187
7.1.3	冷压焊模具	190
7.2	冷压焊的应用	194
7.2.1	异种材料的冷压焊	194
7.2.2	高真空金属壳的冷压焊	196
7.3	热压焊的工艺特点	197
7.3.1	热压焊的分类和特点	197
7.3.2	气压焊	198
7.3.3	锻焊和滚焊	200

7.4	热压焊的应用及质量控制	201
7.4.1	钢轨焊接	201
7.4.2	钢筋的焊接	203
7.4.3	热压焊接头性能与质量控制	205
第8章	摩擦焊	208
8.1	摩擦焊的原理及特点	208
8.1.1	摩擦焊原理	208
8.1.2	摩擦焊的特点	208
8.2	摩擦焊的分类	209
8.2.1	普通摩擦焊	209
8.2.2	新型摩擦焊	211
8.3	摩擦焊设备	214
8.3.1	摩擦焊设备的组成	214
8.3.2	摩擦焊机的技术参数	216
8.4	摩擦焊工艺	217
8.4.1	接头设计与表面准备	217
8.4.2	摩擦焊的工艺参数	219
8.4.3	典型摩擦焊工艺参数实例	223
8.4.4	焊接质量及其控制	225
8.5	摩擦焊的应用	228
8.5.1	不同行业中的应用	228
8.5.2	不同材料中的应用	230
第9章	超声波焊	232
9.1	超声波焊原理、特点及分类	232
9.1.1	超声波焊的原理	232
9.1.2	超声波焊的特点	232
9.1.3	超声波焊的分类	233
9.2	超声波焊接设备	236
9.2.1	超声波焊接设备的组成	236
9.2.2	超声波焊接设备的技术参数	238
9.3	超声波焊接工艺	238
9.3.1	接头设计与表面准备	238
9.3.2	焊接工艺参数	239
9.3.3	其他工艺因素	242
9.4	超声波焊的应用	243
9.4.1	不同行业中的应用	243
9.4.2	不同材料的应用	244
第10章	铝热剂焊	246
10.1	铝热剂焊的基本原理及特点	246
10.1.1	铝热剂焊的基本原理	246

10.1.2	铝热剂焊的特点	247
10.2	铝热剂焊材料	248
10.2.1	铝热焊剂	248
10.2.2	铸型、坩埚及浇注孔和堵片	248
10.3	铝热剂焊工艺及应用	249
10.3.1	铝热剂焊工艺步骤	249
10.3.2	铝热剂焊的应用	250
10.3.3	电气工程中的铝热剂焊	253
10.3.4	铝热剂焊的修复补焊	255
10.3.5	铝热剂焊安全事宜	257
第 11 章	爆炸焊	258
11.1	爆炸焊的分类及特点	258
11.1.1	爆炸焊的分类	258
11.1.2	爆炸焊的特点	259
11.2	爆炸焊原理及结合面形态	259
11.2.1	爆炸焊的基本原理	259
11.2.2	爆炸结合面形态	260
11.3	爆炸焊工艺	261
11.3.1	接头形式与表面清理	261
11.3.2	爆炸焊的工艺参数	262
11.3.3	其他工艺因素	265
11.4	爆炸焊的应用及缺陷检验	268
11.4.1	爆炸焊的适用范围	268
11.4.2	爆炸焊的常见缺陷	270
11.4.3	爆炸焊的质量检验	271
11.4.4	爆炸焊安全事项	274
参考文献		275

第 1 章 概 述

焊接技术是指通过适当的手段，使两个分离的物体（同种材料或异种材料）产生原子或分子间结合而连接成一体的连接方法。特种焊接技术是指除了手工电弧焊、埋弧焊、气体保护焊等一些常规的焊接方法之外的一些先进的焊接方法，如激光焊、电子束焊、等离子弧焊、扩散焊等。这些焊接方法对于一些特殊材料及结构的焊接具有非常重要的作用。特种焊接方法在航空航天、电子、计算机、核动力等高新技术领域中得到广泛应用，并日益受到人们的关注。

1.1 焊接方法的分类及发展

1.1.1 焊接方法的分类

近半个世纪以来，随着近代物理、化学、材料科学、机械、电子、计算机等学科的发展，焊接技术已经取得令世人瞩目的进展，成为制造业中不可缺少的基本制造技术之一。特别是近年来随着计算机与自动化技术的渗透，焊接技术已经发展成为具有一定规模的机械化、半自动化并有少量自动化焊接的独立加工领域。

科学技术的发展和焊接技术不断进步，使新的焊接方法不断产生。国内外文献有多种焊接方法的分类法，各有差异。应用最多的是首先将焊接方法划分为三大类，即熔化焊、压力焊和钎焊；其次，再根据不同的加热方式、工艺特点将每一大类方法再细分为若干小类，见表 1.1。

表 1.1 焊接方法的分类

第一层次 (根据母材是否熔化)	第二层次	第三层次	第四层次	是否易于实现自动化
熔化焊：利用一定的热源，使构件的被连接部位局部熔化成液体，然后再冷却结晶成一体的方法称为熔焊	电弧焊	熔化极电弧焊	手工电弧焊	△
			埋弧焊	○
			熔化极氩弧焊 (MIG)	○
			CO ₂ 气体保护焊	○
			螺柱焊	△
		非熔化极电弧焊	钨极氩弧焊 (TIG)	○
			等离子弧焊	○
			氧原子焊	△
		气焊	氧-氧火焰	△
			氧-乙炔火焰	△
	空气-乙炔火焰		△	
	氧-丙烷火焰		△	
	空气-丙烷火焰		△	
	铅热剂焊		△	
	电渣焊	丝极、板极	○	
	电子束焊	高真空电子束焊	○	
		低真空电子束焊	○	
		非真空电子束焊	○	
	激光焊	YAG 激光焊	○	
		CO ₂ 激光焊	○	
电阻焊	点焊、缝焊	○		

续表

第一层次 (根据母材是否熔化)	第二层次	第三层次	第四层次	是否易于实现自动化	
压力焊:利用摩擦、扩散和加压等物理作用,克服两个连接表面的不平度,除去氧化膜及其他污染物,使两个连接表面上的原子相互接近到晶格距离,从而在固态条件下实现连接的方法	电阻对焊			○	
	冷压焊			△	
	热压焊			○	
	扩散焊			○	
	摩擦焊			○	
	超声波焊			○	
	爆炸焊			△	
钎焊:采用熔点比母材低材料作钎料,将焊件和钎料加热至高于钎料熔点、但低于母材熔点的温度,利用毛细作用使液态钎料充满接头间隙,熔化钎料润湿母材表面,冷却后结晶形成冶金结合	火焰钎焊			△	
	感应钎焊			△	
	炉中钎焊	空气炉钎焊			△
		气体保护炉钎焊			△
		真空炉钎焊			△
	盐浴钎焊			△	
	超声波钎焊			△	
	电阻钎焊			△	
	摩擦钎焊			△	
	放热反应钎焊			△	
	红外线钎焊			△	
电子束钎焊			△		

注:○易于实现自动化,△难以实现自动化。

焊接技术几乎运用了一切可以利用的热源,其中包括火焰、电弧、电阻、超声波、摩擦、等离子、电子束、激光、微波等。历史上每一种热源的出现,都伴随着新的焊接工艺的出现并推动了焊接技术的发展。至今焊接热源的研究与开发仍未终止,新的焊接方法和新工艺不断涌现,焊接技术已经渗透到国民经济的各个领域。

随着热源功率密度的不同,焊接热过程行为可分为四个区域。

a. 低功率密度区,功率密度约小于 $3 \times 10^2 \text{ W/cm}^2$ 。这时,热传导散失大量的热,被加热材料只有轻微的可以忽略不计的熔化,这种热源难于实施对金属的焊接。

b. 中功率密度区,功率密度范围为 $3 \times 10^2 \sim 10^5 \text{ W/cm}^2$ 。这时的热过程以径向导热为主,材料被加热熔化,几乎没有蒸发,绝大多数电弧焊的功率密度都在这个范围内。

c. 高功率密度区,功率密度范围为 $10^5 \sim 10^9 \text{ W/cm}^2$ 之间。处于此范围内的焊接方法主要是电子束焊和激光焊,这时以蒸发为主,强烈蒸发会在熔池中产生小孔。

d. 超高功率密度区,功率密度大于 10^9 W/cm^2 。这时蒸发更厉害,高功率的脉冲激光聚焦成很小的束斑时即出现这种情况。超高功率密度的脉冲激光束可用于打孔,其加工的小孔精度高,小孔侧壁几乎不受热传导的影响。

高能束流加工技术是利用功率密度大于 10^9 W/cm^2 的热源(激光束、电子束、等离子弧等)对材料或结构进行的特种加工技术。这里所指的“加工技术”不仅仅是把材料加工制成具有先进技术指标的构件,还包括利用高能束流制备新型材料。

20世纪80年代以后,高能束流加工技术呈现出加速发展的趋势。在世界高科技市场竞争中,一些发达国家相继建立了各自的研究开发中心,支持开展高能束流加工技术的研究和应用工作。我国在这一领域的研究和应用也取得了高速发展。

束流由单一的光子、电子和离子或两种以上的粒子组合而成,高能束流焊接的功率密度

达到 10^7 W/cm^2 以上。常见的几种热源的功率密度见表 1.2。属于高功率密度的热源有等离子弧、电子束、激光束、复合热源（激光束+电弧）等。

表 1.2 几种常见热源的功率密度

种 类	热 源	最小加热面积 cm^2	功率密度 $\cdot \text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$	正常温度 $\cdot \text{K}$
光	聚焦的太阳光束	—	$(1\sim 2) \times 10^3$	—
	聚焦的氙灯光束	—	$(1\sim 5) \times 10^3$	—
	聚焦的激光	—	$10^7 \sim 10^9$	—
电弧	电弧(0.1MPa)	10^{-1}	1.5×10^4	6000
	钨极氩弧(TIG)	10^{-2}	1.5×10^4	8000
	熔化极氩弧(MIG)	10^{-1}	$10^4 \sim 10^5$	8000~9000
高能密度束	等离子弧	10^{-2}	$(0.5\sim 1) \times 10^5$	18000~24000
	电子束	10^{-2}	$> 10^6$	—
	激光束(0.1MPa)	10^{-3}	$> 10^6$	—

当前高能束流焊接被关注的主要领域是：高能束流设备的大型化，如功率大型化及可加工零件的大型化、设备的智能化以及加工的柔性化、束流品质的提高、束流的复合及相互作用、新材料焊接及应用领域的扩展。

1.1.2 高能束流焊接现状及发展

高能束流加工技术被誉为 21 世纪最有希望的加工技术，被认为“将为材料加工和制造技术带来革命性变化”，是当前发展最快、研究最多的方法。高能束流焊接越来越引起国内外更多相关人士（如物理、材料、焊接、计算机等）的关注。国内在高能束流设备水平上与国外有一定差距，但在工艺研究上，水平则较为接近，在某些方面甚至还有自己的特色。

高能束流焊接技术的最大特点是焊接时产生“小孔效应”，焊接深度比热传导焊接方法显著提高。高能束流加工技术在高技术及国防科技的发展中起着无可替代的作用。高能束流加工技术的特点及其应用领域见表 1.3。

在高能束流焊接过程中，由于热源能量密度高，在极短作用时间内，随着热源与被焊材料的相对运动形成连续的而且完全熔透的焊缝。“小孔效应”是高能束流焊接过程的显著特征，改变了能量传递方式，与一般弧焊方法相比有明显的优点。焊接时基本不需要开坡口和填丝，焊缝熔深通常大于熔宽，焊接速度快，热影响区小，焊缝组织细化，焊接变形小。

表 1.3 高能束流加工技术的特点及其应用领域

特 点	用 途	适 用 性	产 品 示 例
穿透性	重型结构的焊接	一次可焊透 300mm	核装置、压力容器、反应堆潜艇、飞行器、运载火箭、空间站、航天飞机、重武器、坦克、火炮、厚壁件
精密控制、微焦点	微电子与精密器件制造	—	超大规模集成电路元件、结点、航天（空、海）仪表、膜盒、陀螺、核燃料棒封装
高能密度、高速扫描	特殊功能结构件制造	扫描速度 10^3 孔/s, 400m/s	动力装置封产、高温耐磨涂层、沉积层、切割、气膜冷却层板结构、小孔结构、高温部件
全方位加工	特殊环境加工制造	—	太空及微重力条件、真空、冲气、水下及高压条件
高速加热、冷却	新型材料制备、特殊及异种材料	速率 10^3 K/s	超高纯材料冶炼、超细材料、非金属复合材料、陶瓷、表面改性、合成、非晶态、快速成形、立体制造

由于有上述优势，高能束流焊接技术可以焊接难熔合和难焊材料，并且具有较高的生产

率，在核工业、航空航天、汽车等工业部门得到广泛应用。并且，随着高能束流加工技术的不断推广，也被越来越多的工业部门所选用。

高能束流焊接设备向大型化发展有两层含义：一是设备的功率增大，二是采用该设备焊接的零件大型化。由于高能束流焊接设备一次性投资大，特别是激光焊和电子束焊设备，因此增大功率，提高焊接深度和焊接过程的稳定性，相对降低焊接成本，才能为工业界所接受。大型焊接设备建立之后，高能束流焊接的成本可以进一步降低，有利于在军用、民用各个工业领域中扩大应用。

对于超细晶粒钢，不论是屈服强度 400MPa 级还是 800MPa 级的钢种，由于晶粒度细小，焊接加热时会出现严重的晶粒长大倾向，导致热影响区的脆化和软化。为了解决这一问题，可采用激光焊、等离子弧焊等低热量输入的焊接方法进行焊接。

表 1.4 列出了屈服强度 400MPa 级超细晶粒钢的激光焊与传统等离子弧焊、混合气体保护焊 (MAG) 热影响区粗晶区的晶粒长大倾向对比结果。试验结果表明，激光焊热影响区粗晶区的晶粒长大倾向最小，显微组织为强韧性良好的下贝氏体 (BL) + 少量板条马氏体 (ML) + 少量铁素体和珠光体 (F+P)。

表 1.4 屈服强度 400MPa 级超细晶粒钢热影响区粗晶区的晶粒长大倾向

焊接方法	粗晶区最大晶粒尺寸 / μm	组织特征	焊接方法	粗晶区最大晶粒尺寸 / μm	组织特征
激光焊	20	BL+ML(少量)+(F+P)	活性气体保护焊(MAG)	250	(F+P)+B(少量)+W
等离子弧焊	250	(F+P)+B(少量)+W			

(1) 激光焊接

激光束作为材料加工热源的突出优点是具有高亮度、高方向性、高单色性、高相干性等几大综合性能。从 20 世纪 60 年代开始，激光在焊接领域得到应用。20 世纪 80 年代以后，激光焊接设备被成功应用在连续焊接生产线中。

固体激光焊机的功率不断增加，25kW 的 CO_2 激光器可以 1m/min 的速度焊接厚度 28mm 的板材，10kW 的激光器可以同样的速度焊接厚度 15mm 的板材。激光焊应用领域不断扩展，汽车车身的激光切割与焊接使轿车生产个性化，可以节省大量钢材，同时减小结构质量。火车铝合金车厢、管线钢也正在应用激光焊。

激光束和熔化极氩弧焊 (MIG) 复合是目前研究比较多的一种工艺方法。由于 MIG 熔化母材使激光一开始吸收率显著增加因而很快形成稳定的熔深和焊缝。又由于 MIG 形成的熔池较宽，克服了激光焊缝过窄引起的一系列问题，保证了一次熔透的高生产率。因而复合方法强化了工艺，优化了焊缝成形，也节省了总的能量而且使控制方便。把激光和 MIG 复合的方法用于金属表面熔敷，可以在不改变原激光低稀释率的条件下使熔敷效率提高 3 倍。

尽管激光焊的研究和应用的历史不长，但在船舶、汽车制造等工业领域，激光加工设备已占有一席之地，并且通常与机器人结合在一起使用。激光焊接技术从实验室走向实际生产改变着新产品设计和制造过程。

用激光焊接取代铆接结构，在飞机机身结构的制造中广泛应用。与铆接相比，激光焊接不仅可以节省材料，降低成本，而且大大减小了飞机的结构质量。

在航空航天领域中常用的材料铝合金、钛合金、高温合金和不锈钢等的激光焊接研究取得了良好进展，特别是 10kW 以上的大功率激光器出现之后，激光焊接更具有了与电子束焊接竞争的能力。在 15mm 以下厚度板的焊接应用中，由于激光焊接兼有电子束的穿透力而

又无须真空室，使其在航空航天关键零件的焊接中得到应用。

汽车工业是激光焊接应用较为广泛的领域，世界上著名的汽车制造公司都相继在车身制造中采用了激光焊接技术，尤其是 CO₂ 激光焊接。此外，在食品罐身焊接、传感器焊接、电机定转子焊接等领域，激光焊接技术都得到了应用，并且有的已经发展成为先进的自动化的焊接生产线。

(2) 电子束焊接

利用高能量密度的电子束对材料进行工艺处理的方法统称为电子束加工，其中电子束焊接以及电子束表面处理在工业上的应用最为广泛，也最具竞争力。近年来，电子束焊接技术的研究及推广应用极为迅速，在大批量生产、大厚度件生产、大型零件制造以及复杂零件的焊接加工方面显示出独特的优越性。

电子束加速电压由 20~40kV 发展为 60kV、150kV 甚至 300~500kV，其功率密度也由几百瓦发展为几千瓦，十几千瓦甚至数百千瓦。日前在工业中实际应用的电子束焊接设备的功率密度一般小于 120kW，加速电压在 200kV 以内。电子束焊接大厚度件具有得天独厚的优势，一次性焊接的钢板最大厚度可达到 300mm。电子束焊接不仅在大厚度、难焊材料的焊接领域得到广泛应用，还在高精度、自动化生产中得到推广。

为了适应更广泛的工业要求，还研制出局部真空和非真空的电子束焊接设备。局部真空和非真空避免了庞大的真空系统及真空室，主要用于大型、不太厚（一般小于 30mm）或小型薄件的大批量生产，其功率密度一般在 15~45kW，加速电压 150kV 左右。在美国，非真空电子束焊接应用最广泛，部分取代了埋弧焊，用于汽车、舰船等，获得了良好的技术经济效益。

电子束焊接在核工业、航空宇航工业、精密加工业以及重型机械等工业部门得到广泛应用。汽车工业也是电子束焊接应用的重要领域。

电子束焊接由于具有改善接头力学性能、减少缺陷、保证焊接稳定性、大大减少生产时间等优点，用途很广泛。既可用于焊接贵重零部件（如航空航天发动机部件），又可焊接廉价部件（如汽车齿轮）；既可焊接微型传感器，也可焊接结构庞大的飞机机身。可适用于大批量生产（如汽车、电子元件等），也适用于单件生产（如核反应堆）。可用于焊接极薄的锯片，也可焊接极厚的压力容器。

电子束焊可以焊接普通的结构钢，也可以焊接多种特殊金属材料（如超高强钢、钛合金、高温合金及其他稀有金属）。另外，电子束焊还可用于异种金属之间的焊接。在焊接大型铝合金零件中，采用电子束焊具有优势，在提高生产效率的同时得到了良好的焊接接头质量。汽车变速箱齿轮普遍采用电子束焊接，在航空发动机的叶片修复、涡轮盘修复中也用到电子束焊接工艺。

变截面电子束焊接技术的出现，为航空工业的发展起到了促进作用。正是由于这项技术使得许多复杂的飞机和发动机零件的一次焊接完成成为可能，避免了多次焊接出现的局部焊接缺陷，提高了飞机的整体性能。

(3) 等离子弧焊接

采用穿孔等离子弧技术焊接大厚度的材料，以及提高焊接过程稳定性一直是研究人员积极致力研究的目标。与钨极氩弧焊（TIG）相比，等离子弧焊的生产率和焊接质量都明显提高。原来采用 TIG 焊需要一层封底焊和 3~4 层填充焊的工件，采用等离子弧焊接技术，只需一层穿透焊和一层盖面焊，省去了开坡口，焊接工时缩短了一半，而且焊接质量优于钨极

氩弧焊。

变极性等离子弧焊接技术以其特有的工艺优势，在各个工业领域的钢结构焊接和铝合金结构焊接中得到广泛的应用，如对焊缝质量和焊接变形要求很高的压力容器、导弹运载系统、火箭等。

我国的等离子弧焊接技术研究始于 20 世纪 60 年代，并在航空航天工业生产中得到成功应用，如大电流穿孔等离子弧焊接 30CrMnSiA 高强度筒形容器、涡轮机匣毛坯组合件、火箭发动机壳体、钛合金高压气瓶等。

等离子弧独特的物理性能，为穿孔等离子弧焊带来焊接质量稳定性差的问题，而且厚板穿孔焊时问题更加突出。近 30 年来，焊接工作者在穿孔等离子弧焊接稳定性的影响因素及其作用规律、提高质量稳定性途径和方法等方面开展了大量的研究工作。穿孔等离子弧焊接过程中熔池的小孔行为被认为是影响焊缝成形稳定性及焊接接头质量的关键因素。为了获得高质量的焊接接头，必须在焊接过程中实施闭环质量控制，以稳定小孔的形态和尺寸。

目前，微束等离子弧焊接和中厚度材料的大电流穿孔等离子弧焊接技术在我国已得到广泛应用。在等离子弧焊接设备的研制方面，通过脉动等离子弧喷焊技术的研究，成功地实现了转移弧和非转移弧的高频交替工作，实现了单一电源下的等离子弧喷焊。近年来，国内外不断涌现关于等离子弧焊接新工艺、新技术的研究报道，不断推动等离子弧焊接技术的发展。

1.2 焊接方法的选择

1.2.1 选择焊接方法应考虑的因素

生产中选用焊接方法时，不但要了解各种焊接方法的特点和适用范围，还要考虑产品的要求，然后根据所焊产品的结构、材料以及生产技术等做出选择。选择焊接方法应在保证焊接产品质量优良可靠的前提下，有良好的经济效益，即生产率高、成本低、劳动条件好、综合经济指标好。为此选择焊接方法应考虑下列因素。

(1) 产品结构类型

焊接产品的结构类型可归纳为四类。

① 结构件类 如桥梁、建筑、锅炉压力容器、造船、金属结构件等。结构件类焊缝一般较长，可选用埋弧自动焊、气体保护焊，其中短焊缝、打底焊缝宜选用手工电弧焊、氩弧焊。

② 机械零部件类 如各种类型的机器零部件。对于机械零部件类产品，一般焊缝不会太长，可根据对焊接精度的不同要求，选用不同的焊接方法。一般精度和厚度的零件多用气体保护焊，重型件用电渣焊、气电焊，薄件用电阻焊，圆断面件可选用摩擦焊，精度高的工件可选用电子束焊。

③ 半成品类 如工字钢、螺旋钢管、有缝钢管等。半成品件的焊缝是规则的、大批量的，可选用易于机械化、自动化的埋弧焊、气体保护焊、高频焊等。

④ 微电子器件类 如电路板、半导体元器件等。微电子器件接头一般要求密封、导电、定位精确，常选用电子束焊、激光焊、超声波焊、扩散焊、钎焊等方法。

不同类型的产品有数种焊接方法可供选择，采用哪种方法更为适宜，除了根据产品类型之外，还应考虑工件厚度、接头形式、焊缝位置、母材性能、生产条件、经济效益等因素。

(2) 工件厚度

不同焊接方法的热源各异，因而各有最适宜的焊接厚度范围。在指定的范围内，容易保证焊缝质量并获得较高的生产率。常用焊接方法推荐的适用工件厚度如图 1.1 所示。

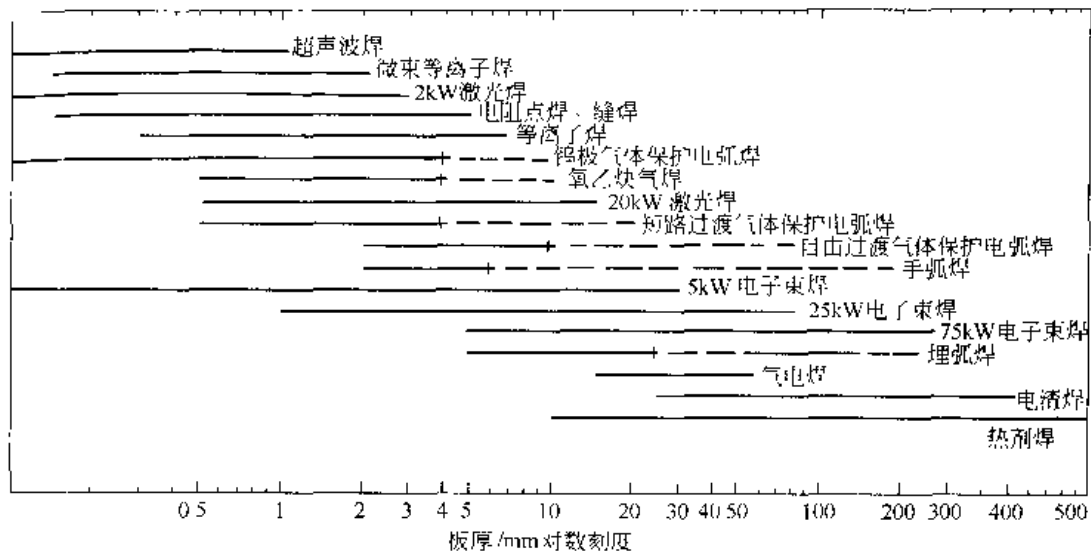


图 1.1 常用焊接方法推荐的适用工件厚度
(图中虚线表示采用多道焊)

(3) 接头形状、位置

接头形状、位置是根据产品使用要求和母材厚度、形状、性能等因素设计的，有搭接、角接、对接等形式。产品结构不同，接头位置可能需要立焊、平焊、仰焊、全位置焊接等，这些因素都影响焊接方法的选择。对接适宜于多种焊接方法，平焊位置是最易于焊接的位置，适合于多种焊接方法，这就便于选用生产率高、接头质量好的焊接方法。

不同焊接方法对接头类型、焊接位置的适应能力是不同的。表 1.5 列出了一些特种焊接方法所适用的接头形式及焊接位置。

表 1.5 一些特种焊接方法所适用的接头形式及焊接位置

适用条件		激光焊	电子束焊	等离子焊	扩散焊	冷压焊	热压焊	摩擦焊	超声波焊	闪光对焊	热剂焊	爆炸焊
接头类型	对接	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
	搭接	A	B	A	A	A	A	C	A	C	C	A
	角接	A	A	A	C	B	B	C	C	C	C	C
焊接位置	平焊	A	A	A	-	A	A	-	A	-	A	A
	立焊	A	C	A	-	B	B	-	-	-	-	-
	仰焊	A	C	A	-	-	-	-	-	-	-	-
	全位置	A	C	A	-	-	-	-	-	-	-	-
设备成本		高	高	高	高	中	中	高	高	高	低	低
焊接成本		中	高	中	高	中	中	低	中	中	低	低

注：A 好；B 可用；C 一般不用。

(1) 母材性能

被焊母材的物理化学、力学和冶金性能不同，将直接影响焊接方法的选择。对热传导快的金属，如铜、铝及其合金等，应选择热输入大、焊透能力强的焊接方法。对热敏感材料则宜选用激光焊、超声波焊等热输入较少的焊接方法。对难熔材料，如钼、钽等，宜选用电子束等高能密束的焊接方法。

对物理性能差异较大的异种材料的连接宜选用不易形成中间脆性相的固相焊接和激光焊接。对塑性区间宽的材料，如低碳钢，宜选用电阻焊。对母材强度和伸长率足够大的材料才能进行爆炸焊。对活性金属宜选用惰性气体保护焊、等离子弧焊、真空电子束焊等焊接方法。钛和锆因为对气体溶解度大，焊后易变脆，对这些金属宜选用高真空电子束焊和真空扩散焊。对沉淀硬化不锈钢，用电子束焊可以获得力学性能优良的接头。对于冶金相容性差的异种材料宜选用扩散焊、钎焊、爆炸焊等非液相结合的焊接方法。

(5) 生产条件

技术水平、生产设备和材料消耗均影响焊接方法的选用。在能满足生产需要的情况下，应尽量选用技术水平要求低、生产设备简单、便宜和焊接材料消耗少的焊接方法，以便提高经济效益。电子束焊、激光焊、等离子弧焊等，由于设备相对较复杂，要求更多的基础知识和较高操作技术水平。

真空电子束焊要有专用的真空室、电子枪和高压电源，还需要 X 射线的防护设备。激光焊需要大功率激光器以及专用的工装和辅助设备。设备复杂程度直接影响经济效益，是选择焊接方法时要考虑的重要因素之一。材料消耗的类型和数量也直接影响经济效益，在选择焊接方法时应给予充分重视。

1.2.2 一些特种焊接方法的适用范围

一些特种焊接方法的适用范围见表 1.6。不同金属材料适用的特种焊接方法见表 1.7。

表 1.6 一些特种焊接方法的适用范围

焊接方法	材料		接头形式			板厚			焊件种类									
	钢铁	有色金属	对接	T形接头	搭接	薄板	厚板	超厚板	建筑	机械	车辆	桥梁	船舶	压力容器	核反应堆	汽车	飞机	家用电器
激光焊	A	A	A	C	A	A	B	C	B	B	B	C	C	B	B	A	A	B
电子束焊	A	B	A	B	A	B	A	B	B	A	B	B	B	B	B	A	B	B
等离子弧焊	A	B	A	B	A	A	B	B	B	A	A	B	B	A	A	B	B	C
扩散焊	A	A	B	B	A	B	A	C	B	A	B	B	B	B	B	B	A	B
冷压焊	B	B	C	C	A	A	C	D	D	C	D	D	C	D	C	C	C	B
热压焊	A	D	A	B	C	C	A	C	B	C	C	C	C	C	D	C	C	D
摩擦焊	A	B	A	C	D	C	B	B	B	A	B	C	C	C	C	B	C	C
超声波焊	A	A	D	C	A	A	C	D	D	C	D	D	D	D	C	B	B	B
铝热剂焊	A	D	A	A	B	D	C	A	C	B	C	C	D	C	D	D	D	D
爆炸焊	A	A	A	B	A	B	A	A	B	B	B	B	A	B	B	B	C	C

注：A—最佳；B—佳；C—差；D—最差。

表 1.7 不同金属材料适用的一些特种焊接方法

材料	厚度/mm	激光焊	电子束焊	等离子弧焊	扩散焊	冷压焊	热压焊	摩擦焊	超声波焊	闪光焊	热剂焊	爆炸焊
碳钢	≤3	△	△				△		△	△	△	△
	3~6	△	△				△	△	△	△	△	△
	6~19	△	△				△	△	△	△	△	△
	≥19		△				△	△	△	△	△	△
低合金钢	≤3	△	△		△	△	△		△	△	△	△
	3~6	△	△		△	△	△	△	△	△	△	△
	6~19	△	△		△	△	△	△	△	△	△	△
	≥19		△		△	△	△	△	△	△	△	△

续表

材 料	厚度 mm	激光焊	电子 束焊	等离子 弧焊	扩散焊	冷压焊	热压焊	摩擦焊	超声 波焊	闪光焊	热剂焊	爆炸焊
不锈钢	≤3	△	△	△	△	△	△			△		
	3~6	△	△	△	△	△	△	△		△		
	6~19	△	△	△	△	△	△	△		△		
	≥19		△		△	△	△	△				
铸铁	3~6										△	
	6~19				△						△	
	≥19				△						△	
镍及其合金	≤3	△	△	△		△	△			△		
	3~6	△	△	△		△	△	△		△		
	6~19	△	△	△		△	△	△		△		
	≥19		△			△	△	△		△		
铝及其合金	≤3	△	△	△	△	△		△		△		
	3~6	△	△		△	△		△		△		
	6~19		△			△		△		△		
	≥19		△			△				△		
钛及其合金	≤3	△	△	△	△	△				△		
	3~6	△	△	△	△	△		△		△		
	6~19	△	△	△	△	△		△		△		
	≥19		△		△	△				△		
铜及其合金	≤3		△	△						△		
	3~6		△	△				△		△		
	6~19		△					△		△		
	≥19		△							△		
镁及其合金	≤3	△	△			△						
	3~6	△	△			△		△		△		
	6~19		△			△		△		△		
	≥19		△			△				△		
难熔金属	≤3		△	△						△		
	3~6		△	△						△		
	6~19				△					△		
	≥19				△							

注：△表示被推荐。

1.2.3 焊接技术的新发展

(1) 提高焊接生产率是推动焊接技术发展的重要驱动力

随着工业和科学技术的发展，焊接技术不断进步。提高焊接生产率的途径，一是提高焊接速度，二是提高焊接熔敷率，三是减少坡口断面及熔敷金属量。为了提高焊接生产率，焊接工作者从提高焊接熔敷效率和减少填充金属两方面作了许多努力，如熔化极气体保护焊中采用电流成形控制或多丝焊，能使焊接速度从0.5m/min提高到1~6m/min。窄间隙焊接利用单丝、双丝或三丝进行焊接，所需熔敷金属量成数倍地降低。电子束、等离子弧能够一次焊透很深的厚度，对接接头可以不开坡口，有更为广阔的应用前景。

(2) 提高焊接机械化、自动化水平是世界先进工业化国家的重点发展方向

机械化、自动化是提高焊接生产率、保证产品质量、改善劳动条件的重要手段。焊接生产自动化是未来焊接技术发展的方向。焊接自动化的主要标志是焊接过程控制系统的智能化、焊接生产系统的柔性化和集成化。提高焊接结构生产的效率和质量，仅仅从焊接工艺着手有一定的局限性。全部焊接工序（钢板划线、切割、装配、焊接）机械化、自动化，

优点不仅在于提高了生产率，更重要的是提高了产品的质量。钢板划线、切割、开坡口全部采用计算机数字控制技术以后，零部件尺寸精度大大提高，焊接坡口表面粗糙度大幅度降低。

坡口几何尺寸和装配质量相当准确，在自动施焊之后，整个焊接结构工整、精确、美观，完全改变了过去焊接车间人工操作的落后现象。电子及计算机技术的发展，尤其是计算机控制技术的发展，为焊接自动化打下了良好基础。

(3) 焊接过程自动化、智能化是提高焊接质量稳定性的重要方向

工业机器人作为现代制造技术发展的重要标志之一和新兴技术产业，对现代高技术产业各领域产生了重要影响。由于焊接制造工艺的复杂性和焊接质量要求严格，而焊接技术水平和劳动条件往往较差，因而焊接过程的自动化、智能化受到特殊重视，实现智能机器人焊接成为几代焊接工作者追求的目标。智能机器人的出现迅速得到焊接工业界的热烈响应。目前，全世界机器人中有 25%~50% 用在焊接技术上。焊接机器人最初多应用于汽车工业中的点焊生产流水线上，近年来已经拓展到弧焊领域。

机器人虽然是一个高度自动化的装备，但从自动控制的角度来看，它仍是一个程序控制的开环控制系统，因而它不可能根据焊接时的具体情况而进行适时调节。为此智能化焊接成为当前焊接发展的重要方向之一。智能化焊接的第一个发展重点是视觉系统，目前已开发出的视觉系统可使机器人根据焊接过程中的具体情况自动修改焊枪运动轨迹，有的还能根据坡口尺寸适时地调节工艺参数。

目前，国内已有大量的焊接机器人系统应用于各类自动化生产线上，但总的来说，我国的焊接机器人发展与生产总体需求相差甚远。目前的智能化焊接机器人仍处在初级阶段，这方面的研究及发展将是一个长期的任务。

(4) 新热源的研究与开发是推动焊接技术发展的根本动力

焊接新热源的开发将推动焊接工艺的发展，促进新的焊接方法的产生。焊接工艺已成功地利用电弧、等离子、电子束、激光、超声波、摩擦、微波等热源形成相应的焊接方法。历史上每一种热源的出现，都伴随着新的焊接工艺的出现。今后的发展将从改善现有热源和开发新的更有效的热源两方面着手。

在改善现有热源，提高焊接效率方面，如扩大激光器的能量、有效利用电子束能量、改善焊接设备性能、提高能量利用率都取得了进展。在开发焊接新能源方面，为了取得更高的能量密度，采用叠加热源，如在等离子弧中加激光，在电弧中加激光等。有些预热焊也是出于这种考虑。进行太阳能焊接试验也是为了寻求新的焊接热源。

(5) 新兴工业的发展不断推动焊接技术前进

焊接技术是一项与新兴学科发展密切相关的先进工艺技术，计算机技术、信息技术、电子技术、人工智能技术、数控及机器人技术的发展为焊接过程自动化提供了十分有利的技术基础，并已渗透到焊接技术的各个领域。高新技术、新型材料的不断发展与应用以及各种特殊环境对产品性能要求的不断提高，对焊接工艺及设备提出了更高的要求。最近 20 年来，在新兴工业和基础学科的带动下，半自动焊、专机设备以及自动焊接方面都得到迅速发展。

逆变焊机的出现也是推动焊接技术前进的一个成功例子。逆变焊机体积小、质量小，具有较高的技术特性，显著的节能、节材等优点，受到国内外焊接界的普遍重视，发展速度很快。目前世界上的主要焊接设备生产厂商基本上完成了全系列逆变焊机的商品化，使之成为

先进与高技术的标志之一。

从 20 世纪 80 年代初的晶闸管逆变焊机开始，到场效应晶体管逆变焊机、大功率晶体管逆变焊机、IGBT 管逆变焊机不断推入市场，使焊机制造呈现出一个崭新的景象。但是逆变焊机输入电流产生畸变，存在较大的谐波，一些元器件的稳定性有待提高，焊机的功率因数并不很高。为此人们正在研究谐波控制技术，以便取得更好的效果。

第2章 激光焊

激光焊 (Laser Welding) 是利用高能量密度的激光束作为热源进行焊接的一种高效精密的焊接方法。随着航空航天、微电子、医疗及核工业等的迅猛发展, 对材料性能要求越来越高, 传统的焊接方法难以满足要求, 激光焊日益得到广泛应用。激光焊具有高能量密度、深穿透、高精度、适应性强等优点而受到各发达国家的重视。激光焊对于一些特殊材料及结构的焊接具有非常重要的作用, 这种焊接方法在航空航天、电子、汽车制造、核动力等高新技术领域中得到应用, 并且受到工业发达国家的重视。

2.1 激光焊原理、分类及特点

激光 (Laser) 是英文 Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation 的缩写, 意为“通过受激辐射实现光的放大”。激光利用辐射激发光放大原理而产生一种单色、方向性强、光亮度大的光束。经透射或反射镜聚焦后可获得直径小于 0.01mm 、功率密度高达 $10^{10}\text{W}/\text{m}^2$ 的能束, 可用作焊接、切割及材料表面处理的热源。

2.1.1 激光焊原理及分类

(1) 材料对激光的吸收

激光焊接时, 激光照射到被焊接材料的表面, 与其发生作用, 一部分被反射, 一部分进入材料内部。对于不透明材料, 透射光被吸收, 金属的线性吸收系数约为 $10^7 \sim 10^8\text{m}^{-1}$ 。对于金属, 激光在金属表面 $0.01 \sim 0.1\mu\text{m}$ 的厚度中被吸收转变成热能, 导致金属表面温度升高, 再传向金属内部。

激光焊接的原理是: 光子轰击金属表面形成蒸气, 蒸发的金属可防止剩余能量被金属反射掉。如果被焊金属有良好的导热性能, 则会得到较大的熔深。激光在材料表面的反射、透射和吸收, 本质上是光波的电磁场与材料相互作用的结果。激光光波入射材料时, 材料中的带电粒子依着光波电矢量的步调振动, 使光子的辐射能变成了电子的动能。物质吸收激光后, 首先产生的是某些质点的过量能量, 如自由电子的动能, 束缚电子的激发能或者还有过量的声子。这些原始激发能经过一定过程再转化为热能。

激光是一种崭新的光源, 它除了与其他光源一样是一种电磁波外, 还具有其他光源不具备的特性, 如高方向性、高亮度 (光子强度)、高单色性和高相干性。激光加工时, 材料吸收的光能向热能的转换是在极短的时间 (约为 10^{-9}s) 内完成的。在这个时间内, 热能仅仅局限于材料的激光辐照区, 而后通过热传导, 热量由高温区传向低温区。

金属对激光的吸收, 主要与激光波长、材料的性质、温度、表面状况以及激光功率密度等因素有关。一般来说, 金属对激光的吸收率随着温度的上升而增大, 随电阻率的增加而增大。

(2) 激光焊分类

激光焊通常按激光对工件的作用方式以及作用在工件上的功率密度进行分类。按照激光发生器工作性质的不同, 激光有固体、半导体、液体、气体激光之分。根据激光对工件的作用方式和激光器输出能量的不同, 激光焊可分为连续激光焊和脉冲激光焊。连续激光焊在焊

接过程中形成一条连续的焊缝。脉冲激光焊接时，输入到工件上的能量是断续的、脉冲的，每个激光脉冲在焊接过程中形成一个圆形焊点。

按激光聚焦后光斑作用在工件上功率密度的不同，激光焊可分为传热焊（功率密度小于 10^5 W/cm^2 ）和深熔焊（锁孔焊）。

1) 传热焊

采用的激光光斑功率密度小于 10^5 W/cm^2 时，激光将金属表面加热到熔点与沸点之间。焊接时，金属材料表面将所吸收的激光能转变为热能，使金属表面温度升高而熔化，然后通过热传导方式把热能传向金属内部，使熔化区逐渐扩大，凝固后形成焊点或焊缝，其熔深轮廓近似为半球形，这种焊接机理称为传热焊。

传热焊时，工件表面温度不超过材料的沸点，工件吸收的光能转变为热能后，通过热传导将工件熔化，熔池形状近似为半球形。传热焊的特点是激光光斑的功率密度小，很大一部分光被金属表面所反射，光的吸收率较低，焊接熔深浅，焊接速度慢。其主要用于薄（厚度 $<1\text{mm}$ ）、小工件的焊接加工。

2) 深熔焊

当激光光斑上的功率密度足够大时（ $\geq 10^6 \text{ W/cm}^2$ ），金属表面在激光束的照射下被迅速加热，其表面温度在极短的时间内（ $10^{-8} \sim 10^{-6} \text{ s}$ ）升高到沸点，使金属熔化和气化。产生的金属蒸气以一定的速度离开熔池，逸出的蒸气对熔化的液态金属产生一个附加压力，使熔池金属表面向下凹陷，在激光光斑下产生一个小凹坑。

当光束在小孔底部继续加热时，所产生的金属蒸气一方面压迫坑底的液态金属使小坑进一步加深。另一方面，向坑外飞出的蒸气将熔化的金属挤向熔池四周，此过程连续进行下去，便在液态金属中形成一个细长的孔洞。当光束能量所产生的金属蒸气的反冲压力与液态金属的表面张力和重力平衡后，小孔不再继续加深，形成一个深度稳定的孔而进行焊接，因此称之为激光深熔焊（也称锁孔焊）。

深熔焊的激光束可深入到焊件内部，因而形成深宽比较大的焊缝。如果激光功率足够大，材料相对较薄，激光焊形成的小孔贯穿整个板厚且背面可以接收到部分激光，这种方法也可称之为薄板激光小孔效应焊。

从机理上看，这两种焊接方法的前提都是焊接时存在小孔，二者没有本质的区别。图2.1所示为不同功率密度激光束的加热现象。小孔周围为熔池金属所包围，熔化金属的重力及表面张力有使小孔弥合的趋势，而连续产生的金属蒸气则力图维持小孔的存在。随光束的运动，小孔将随着光束运动但其形状和尺寸却是稳定的。

小孔的前方形成一个倾斜的烧蚀前沿。在这个区域，小孔的周围存在压力梯度和温度梯度。在压力梯度的作用下，烧熔材料绕小孔的周边由前沿向后沿流动。温度梯度沿小孔的周边建立了一个前面大后面小的表面张力，这就进一步驱使熔融材料绕小孔周边由前沿向后沿流动，最后在小孔后方凝固起来形成焊缝。激光焊焊接时伴有声音和颜色的变化，可据此监控焊接过程。

2.1.2 激光焊的特点及应用

(1) 激光焊的特点

激光焊以高能量密度的激光束作为热源，对金属进行熔化形成焊接接头的熔焊方法。采用激光焊，不仅生产率高于传统的焊接方法，而且焊接质量也得到了显著提高。与一般焊接方法相比，激光焊具有以下特点。

a. 聚焦后的激光束具有很高的功率密度 ($10^5 \sim 10^7 \text{ W/cm}^2$ 或更高), 加热速度快, 可实现深熔焊和高速焊。由于激光加热范围小 ($< 1 \text{ mm}$), 在同等功率和焊接厚度条件下, 焊接速度快、热影响区小、焊接应力和变形小。

b. 激光能发射、透射, 能在空间传播相当距离而衰减很小, 可进行远距离或一些难以接近的部位的焊接; 激光可通过光导纤维、棱镜等光学方法弯曲传输、偏转、聚焦, 特别适合于微型零件、难以接近的部位或远距离的焊接。

c. 一台激光器可供多个工作台进行不同的工作, 既可用于焊接, 又可用于切割、合金化和热处理, 一机多用。

d. 激光在大气中损耗不大, 可以穿过玻璃等透明物体, 适合于在玻璃制成的密封容器里焊接铍合金等剧毒材料; 激光不受电磁场影响, 不存在 X 射线防护, 也不需要真空保护。

e. 可以焊一般焊接方法难以焊接的材料, 如高熔点金属等, 甚至可用于非金属材料焊接, 如陶瓷、有机玻璃; 焊后无需热处理, 适合于某些对热输入敏感材料的焊接。

目前影响大功率激光焊扩大应用的主要障碍如下。

a. 激光器特别是高功率连续激光器, 价格昂贵; 目前工业用激光器的最大功率为 20 kW , 可焊接的最大厚度为 20 mm , 比电子束焊小得多。

b. 对焊件加工、组装、定位要求均很高; 激光焊难以焊接反射率较高的金属。

c. 激光器的电光转换及整体运行效率都很低, 光束能量转换率仅为 $10\% \sim 20\%$ 。

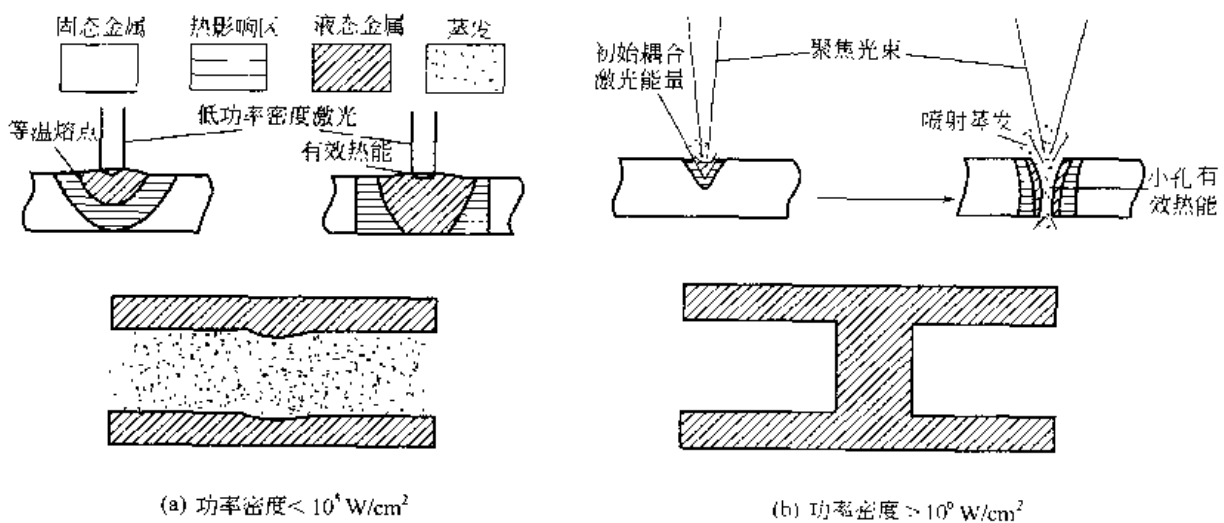


图 2.1 不同功率密度激光束的加热现象

采用激光焊时, 影响其焊接性的金属性能是: 热力学、机械、表面条件、冶金和化学性能等。高反射率的表面条件不利于获得良好的激光焊接质量。激光能使不透明的材料气化或熔成孔洞。而且, 激光能自由地穿过透明材料而又不会损伤它。这一特点使激光焊能够焊接预先放在电子管内的金属。

(2) 激光焊的应用

激光焊作为一种独特的焊接方法日益受到重视。目前世界上 1 kW 以上的激光加工设备已超过 1 万台以上, 其中 $1/3$ 用于焊接。早期的激光应用大都是采用脉冲固体激光器, 进行小型零部件的点焊和由焊点搭接而成的缝焊。

20 世纪 70 年代, 大功率 CO_2 激光器的出现, 开辟了激光应用于焊接的新纪元。激光焊在汽车、钢铁、船舶、航空、轻工等行业得到了日益广泛的应用, 特别是在航空航天领域得

到了成功的应用。大功率 CO₂ 激光焊用于生产的越来越多，激光焊接的部分应用实例见表 2.1。

表 2.1 激光焊接的部分应用实例

应用部门	应用实例
航空	发动机壳体、机翼隔架、膜盒等
电子仪表	集成电路内引线、显像管电子枪、全钨电容、调速管、仪表游丝等
机械	精密弹簧、针式打印机零件、金属薄壁波纹管、热电偶、电液伺服阀等
钢铁冶金	焊接厚度 0.2~8mm、宽度 0.5~1.8mm 的硅钢片、高中低碳钢和不锈钢，焊接速度为 100~1000cm/min
汽车	汽车车架、传动装置、齿轮、点火器中轴与拨板组合件等
医疗	心脏起搏器以及心脏起搏器所用的锂电池等
食品	食品罐（用激光焊代替传统的锡焊或接触高频焊，具有无毒、焊速快、节省材料以及接头美观、性能优良等特点）等
其他	燃气轮机、换热器、干电池锌筒外壳、核反应堆零件等

脉冲激光焊主要用于微型件、精密元件和微电子元件的焊接。低功率脉冲激光焊常用于直径 0.5mm 以下金属丝与丝（或薄膜）之间的点焊。

连续激光焊主要用于厚板深熔焊。对接、搭接、端接、角接均可采用连续激光焊。最常见的接头形式是对接和搭接。对接间隙小于 0.15 δ ，错边小于 0.25 δ ；搭接间隙小于 0.25 δ （ δ 为板厚）。

激光焊接虽然在焊接深度方面比电子束焊小一些，但由于可免去电子束焊真空室对零件的局限、无需在真空条件下进行焊接，故其应用前景更为广阔。国外 20 世纪 80 年代以来，激光焊设备每年以 25% 的比例增长。激光加工设备常与机器人结合起来组成柔性加工系统，使其应用范围得到进一步扩大。

在电厂的建造及化工行业，有大量的管管、管板接头，用激光焊可得到高质量的单面焊双面成形焊缝。在舰船制造业，用激光焊焊接大厚度板（可加填充金属），接头性能优于通常的电弧焊，能降低产品成本，提高构件的可靠性，有利于延长舰船的使用寿命。激光焊还应用于电动机定子铁心的焊接，发动机壳体、机翼隔架等飞机零件的生产，航空涡轮叶片的修复等。

激光焊接还有其他形式的应用，如激光钎焊、激光-电弧焊、激光填丝焊、激光压焊等。激光钎焊主要用于印刷电路板的焊接，激光压焊主要用于薄板或薄钢带的焊接。

焊接领域目前主要采用两种激光器：

- a. YAG 固体激光器（含 Nd³⁺ 的 Yttrium-Aluminium-Garnet，简称 YAG）；
- b. CO₂ 气体激光器。

这两种激光器的特点见表 2.2。这两种激光器可以互相弥补彼此的不足。

表 2.2 焊接中采用的两种激光器的类型

类型	波长 (μm)	发射	焊接功率密度 ($\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$)	最小加热面积 (cm^2)
YAG 固体激光器	1.06	通常是脉冲式的	$10^3 \sim 10^7$	10^{-3}
CO ₂ 气体激光器	10.6	通常是连续式的	10^2	10^{-2}

脉冲 YAG 和连续 CO₂ 激光焊接应用举例见表 2.3。

表 2.3 脉冲 YAG 和连续 CO₂ 激光焊接应用举例

激光类型	材 料	厚度 mm	焊接速度	焊缝类型	备 注
脉冲 YAG	钢	<0.6	8 点 s 2.5 m/min	点焊	适用于受到限制的复杂件
	不锈钢	1.5	0.001 m/min	对接	最大厚度 1.5mm
	钛	1.3		对接	反射材料(如 Al,Cu)的焊接; 以脉冲提供能量,特别适于点焊
连续 CO ₂ 激光器	钢	0.8	1~2m/min	对接	最大厚度: 0.5mm, 300W 5mm, 1kW 7mm, 2.5kW 10mm, 5kW
		20	0.3m/min	对接	
	钢 >2	2~3m/min	小孔		

2.2 激光焊设备及装置

2.2.1 激光焊设备的组成

激光焊接设备按激光工作物质不同,分为固体激光焊设备和气体激光焊设备;按激光器工作方式不同,分为连续激光焊设备和脉冲激光焊设备。激光器是激光设备的核心部分,焊接用激光器的特点见表 2.4,不同 CO₂ 激光器的性能特征见表 2.5。

表 2.4 焊接用激光器的特点

激光器	波长 / μm	工作方式	重复频率 / Hz	输出功率或能量范围	主要用途
红宝石激光器	0.6943	脉冲	0~1	1~100J	点焊、打孔
钕玻璃激光器	1.06	脉冲	0~1/10	1~100J	点焊、打孔
YAG 激光器	1.06	脉冲 连续	0~400	1~100J 0~2kW	点焊、打孔 焊接、切割、表面处理
封闭式 CO ₂ 激光器	10.6	连续	—	0~1kW	焊接、切割、表面处理
横流式 CO ₂ 激光器	10.6	连续	—	0~25kW	焊接、表面处理
快速轴流式 CO ₂ 激光器	10.6	连续 脉冲	0~5000	0~6kW	焊接、切割

表 2.5 不同 CO₂ 激光器的性能特征

性 能	低速轴流型	高速轴流型	横流型	封闭型
优点	可获稳定单模	小型高输出,易维修,可获单模及多模	易获高输出功率	
缺点	尺寸庞大,维修难	压气机稳定性要求高,气耗量大	只能获多模,效率低	输出功率低
气流速度 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	1	500	10~100	0
气体压力 / kPa	0.66~2.67	6.66	100 13.33	5~10 0.66~1.33
单位长度输出功率 / $\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$	50~100	1000	5000	50
商品化输出功率 / W	1000	5000	15000	100

无论哪一种激光焊设备,基本组成大致相似。完整的激光焊接、切割设备由激光器、光束传输和聚焦系统、焊炬或割炬、工作台、电源及控制装置、气源、水源、操作盘、数控装置等组成。

① 激光器 CO₂ 气体激光器按照气冷方式分为低速轴流型、高速轴流型、横流型及早期的封闭型。

② 光束传输和聚焦系统 又称为外部光学系统，用来把激光束传输并聚焦在工件上，其端部安装提供保护或辅助气流的焊炬或割炬。

③ 气源 目前的 CO₂ 激光器采用 He、N₂、CO₂ 混合气体作为工作介质，其配比为 60% : 33% : 7%。He 价格昂贵，因此高速轴型 CO₂ 激光器运行成本显著提高，选用时应考虑其成本。

④ 电源 为保证激光器稳定运行，均采用快响应、恒稳性高的固态电子控制电源。

⑤ 工作台 伺服电机驱动的工作台可供安放工件实现焊接或切割。

⑥ 控制系统 多采用数控系统。

2.2.2 激光焊设备选用及技术参数

选择或购买激光焊设备时，应根据工件尺寸、形状、材质和设备的特点、技术指标、适用范围以及经济效益等综合考虑。表 2.6 列出了部分国产激光焊设备的主要技术参数。

表 2.6 部分国产激光焊设备的主要技术参数

型 号	NJH-30	JKg	DH-WM01	GD-10-1
名称	钕玻璃脉冲激光焊机	钕玻璃数控脉冲激光焊机	全自动电池壳 YAG 激光焊机	红宝石激光点焊机
激光波长/ μm	1.06	1.06	1.06	0.69
最大输出能量/J	130	97	40	13
重复率	1~5Hz	30次/min (额定输出时)	1~100Hz(分7档)	16次/min
脉冲宽度/ms	0.5(最大输出时) 6(额定输出时)	2~8	0.3~10(分7档)	6(最大)
激光工作物质尺寸/mm	—	$\phi 12 \times 350$	—	$\phi 10 \times 165$
用途	点焊、打孔	用于细线材、薄板对接焊、搭接焊和叠焊，焊接熔深可达 1mm	焊接电池壳、双重工作台，焊接过程全部自动化	点焊和打孔。适用板厚小于 0.4mm、线材直径小于 0.6mm

微型件、精密件的焊接可选用小功率焊机，中厚件的焊接应选用功率较大的焊机。点焊可选用脉冲激光焊机，要获得连续焊缝则应选用连续激光焊机或高频脉冲连续激光焊机。快速轴流式 CO₂ 激光焊机的运行成本比较高（因消耗 He 多），选择时应适当考虑。此外，还应注意激光焊机是否具有监控保护等功能。

小功率脉冲激光焊机适合于直径 0.5mm 以下金属丝与丝、丝与板（或薄膜）之间的点焊，特别是微米级细丝、箔膜的点焊。脉冲能量和脉冲宽度是决定脉冲激光点焊熔深和焊点强度的关键。

连续激光焊机特别是高功率连续激光焊机大都是 CO₂ 激光焊机，可用于形成连续焊缝以及厚板的深熔焊。焊接工艺参数有激光功率、焊接速度、光斑直径、离焦量、保护气体等。焊缝成形主要由激光功率和焊接速度确定。

2.3 材料激光焊的焊接性

2.3.1 激光焊的焊缝形成特点

激光传热焊缝类似于某些常规焊接方法的特点。对激光焊的熔池研究发现，熔池有周期性变化，主要原因是激光与物质作用过程中的自振荡效应。这种自振荡的频率与激光束的

参数、金属的热物理性能和金属蒸气的动力学特性有关。一般其频率为 $10^2 \sim 10^4$ Hz，而温度波动的振幅约为 $(1 \sim 5) \times 10^2$ K。

由于自振荡效应，使熔池中的小孔和金属的流动现象也发生周期性的变化。当金属蒸气和等离子体屏蔽激光束时，金属蒸发也减少，作为充满金属蒸气的小孔也会缩小，底部就会被液态金属所填充。一旦解除对激光束的屏蔽，又重新形成小孔。同样，液态金属的流动速度和扰动状态也会发生周期性变化。

熔池的周期性变化，有时会在焊缝中产生两个特有的现象。第一是气孔，按它们的大小而言，也可以称为空洞。充满金属蒸气的小孔，由于发生周期性变化，同时熔化的金属又在它的周围从前沿向后沿流动，加上金属蒸发造成的扰动，有可能将小孔拦腰阻断，使蒸气留在焊缝中，凝固之后形成气孔。第二是焊缝根部熔深的周期性变化，这与小孔的周期性变化有关，是由激光深熔焊自振荡现象的物理本质所决定的。

由于激光深熔焊的热输入是电弧焊的 $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{10}$ ，因此凝固过程很快，特别是在焊缝的下部，因很窄且散热情况好，故有很高的冷却速度，使焊缝内产生细化的等轴晶，晶粒的尺寸为电弧焊的 1.3 左右。

从焊缝的纵剖面来看，由于熔池中熔化金属从前部向后部流动的周期变化，使焊缝形成层状组织。由于周期变化的频率很高，所以层间距离很小。这些因素和激光的净化作用，都有利于提高焊缝的力学性能和抗裂性。

2.3.2 金属的激光焊接性

激光焊接具有一些常规焊接方法所不能比拟的性能，这就是接头良好的抗热裂能力和抗冷裂能力。

(1) 抗热裂能力

CO₂ 激光焊与钨极氩弧焊 (TIG) 相比，焊接低合金高强度钢时，热裂纹敏感性较低。激光焊虽然有较高的焊接速度，但其热裂纹敏感性却低于 TIG 焊。这是因为激光焊焊缝组织晶粒较细，可有效防止热裂纹的产生。如果焊接参数选择不当，也会产生热裂纹。热裂纹产生的同时也会促使冷裂纹形成和扩展。

(2) 抗冷裂能力

冷裂纹的评定指标是 24h 在试样中心不产生裂纹所加的最大载荷产生的应力，即临界应力 (σ_c)。对于低合金高强度钢，激光焊的临界应力 σ_c 大于 TIG 焊，这就是说激光焊的抗冷裂纹能力大于 TIG 焊。焊接低碳钢时，这两种焊接方法的临界应力 σ_c 几乎相同。

焊接含碳量较高的 35 钢，激光焊与 TIG 焊相比，有较大的冷裂纹敏感性。35 钢的原始组织是珠光体，由于 TIG 焊焊接速度慢，热输入大，冷却过程中奥氏体发生高温转变，焊缝和热影响区的组织大都为珠光体。激光焊的冷却速度较快，焊缝和热影响区是典型的奥氏体低温转变产物马氏体。因为含碳量高，所形成的马氏体有很高的硬度 (650HV)，具有较高的组织转变应力，冷裂纹敏感性高。

合金结构钢 12Cr2Ni4A 进行 TIG 焊时，焊缝和热影响区组织为马氏体 + 贝氏体，而激光焊时，组织是低碳马氏体，两者的显微硬度相当，但激光焊时的晶粒却细得多。高的焊接速度和较小的热输入，使激光焊用于合金结构钢时，可获得综合性能（特别是抗冷裂性能）良好的低碳细晶粒马氏体，接头具有较好的抗冷裂纹能力。

激光焊冷却速度快，导致含碳量高的材料产生硬度高、含碳量高的片状或板条状马氏体，是冷裂纹敏感性大的主要原因。若接头设计不当而造成应力集中，也会促使焊接冷裂纹

的形成。

(3) 残余应力及变形

CO₂激光焊加热光斑小，热输入小，使得焊接接头的残余应力和变形比常规焊接方法小得多。激光焊虽有较陡的温度梯度，但焊缝中最大残余拉应力仍然要比 TIG 焊时略小一些，而且激光焊工艺参数的变化几乎不影响最大残余拉应力的幅值

由于激光焊加热区域小，拉伸塑性变形区小，因此最大残余压应力比 TIG 焊减少 40%~70%。这对于薄板的焊接格外重要，因为用 TIG 焊焊接薄板时，常常因为残余应力的存在而发生波浪变形，而且这种变形很难消除。但用激光焊焊接薄板时，变形大大减小，一般不会产生波浪变形。激光焊残余应力和变形小，使它成为一种精密的焊接方法。

(4) 冲击韧性

研究 HY-130 钢激光焊焊接接头的冲击性能中发现，激光焊接头的冲击吸收功大于母材金属的冲击吸收功（见表 2.7）。进一步研究发现，HY-130 钢 CO₂ 激光焊接头冲击吸收功提高的主要原因之一是焊缝金属的净化效应。

表 2.7 HY-130 钢激光焊焊接接头的冲击吸收功

激光功率 /kW	焊接速度 /cm·s ⁻¹	试验温度 /°C	冲击吸收功 J	
			焊接接头	母材
5.0	1.90	23.9	52.9	35.8
5.0	1.90	23.9	52.9	36.6
5.0	1.48	23.9	38.4	32.5
5.0	0.85	23.9	36.6	33.9

2.4 激光焊接工艺及参数

激光焊按激光器输出能量的形式可分为脉冲激光焊和连续激光焊，按聚焦后光斑上的功率密度，可分为传热焊和锁孔焊两种。

当激光聚焦后，光斑的功率密度小于 10⁷ W/cm² 时，金属表面的加热温度不会超过其沸点，所吸收的激光能转变为热能后，通过热传导将焊件母材金属熔化而熔合成焊缝。当光斑上的功率密度大于 10⁸ W/cm² 时，金属表面的加热速度剧增，在相当短的时间内，表面温度可达到沸点而使金属气化，激光束可直接射到坑底，形成穿透性小孔。当激光束前移，熔池金属温度降低时，底部小孔自行封闭，完成锁孔焊过程。

2.4.1 脉冲激光焊工艺及参数

脉冲激光焊类似于点焊，其加热斑点很小，约为微米数量级，每个激光脉冲在金属上形成一个焊点。主要用于微型、精密元件和一些微电子元件的焊接，它是以点焊或由点焊点搭接成的缝焊方式进行的。常用于脉冲激光焊的激光器有红宝石、钕玻璃和 YAG 等几种。

脉冲激光焊有四个主要焊接参数：脉冲能量、脉冲宽度、功率密度和离焦量。

(1) 脉冲能量和脉冲宽度

脉冲激光焊时，脉冲能量决定了加热能量大小，它主要影响金属的熔化量。脉冲宽度决定焊接时的加热时间，它影响熔深及热影响区大小。脉冲能量一定时，对于不同的材料，各存在一个最佳脉冲宽度，此时焊接熔深最大。图 2.2 所示为脉冲宽度对各种材料熔深的影响。脉冲加宽，熔深逐渐增加，当脉冲宽度超过某一临界值时，熔深反而下降。对于每种材料，都有一个可使熔深达到最大的最佳脉冲宽度。钢的最佳脉冲宽度为(5~8)×10⁻¹s。

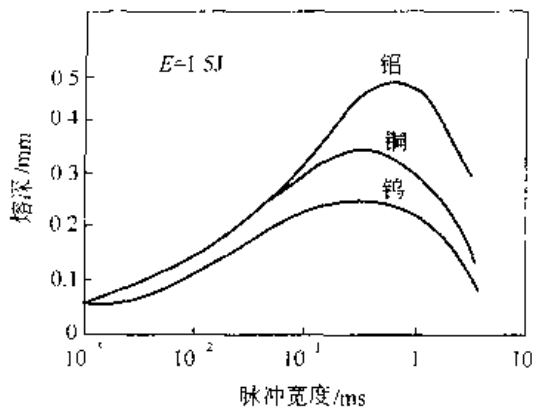


图 2.2 脉冲宽度与熔深之间的关系

脉冲能量主要取决于材料的热物理性能，特别是热导率和熔点。导热性好、熔点低的金属易获得较大的熔深。脉冲能量和脉冲宽度在焊接时有一定的关系，随着材料厚度与性质的不同而变化。

焊接时，激光的平均功率 P 由下式决定，即

$$P = E / \tau \quad (2.1)$$

式中 P ——激光功率，W；

E ——激光脉冲能量，J；

τ ——脉冲宽度，s。

可见，为了维持一定的功率，随着脉冲能量的增加，脉冲宽度必须相应增加，才能得到较好的焊接质量。同时焊接时所采用的接头形式也影响焊接的效果。

(2) 功率密度

在功率密度较小时，焊接以传热焊的方式进行，焊点的直径和熔深由热传导所决定，当激光斑点的功率密度达到一定值 (10^6 W/cm^2) 后，焊接过程中将产生小孔效应，形成深宽比大于 1 的深熔焊点，这时金属虽有少量蒸发，并不影响焊点的形成。但功率密度过大后，金属蒸发剧烈，导致气化金属过多，在焊点中形成一个不能被液态金属填满的小孔，不能形成牢固的焊点。

脉冲激光焊时，功率密度 P_0 由下式决定，即

$$P_0 = 4E / \pi d^2 \tau \quad (2.2)$$

式中 P_0 ——激光光斑上的功率密度， W/cm^2 ；

E ——激光脉冲能量，J；

d ——光斑直径，cm；

τ ——脉冲宽度，s。

图 2.3 所示为不同厚度材料激光点焊所需的脉冲能量和脉冲宽度。从图 2.3 可以看出，脉冲能量 E 和脉冲宽度 τ 成直线关系。同时表明，随着焊件厚度的增加，激光功率密度相应增大。

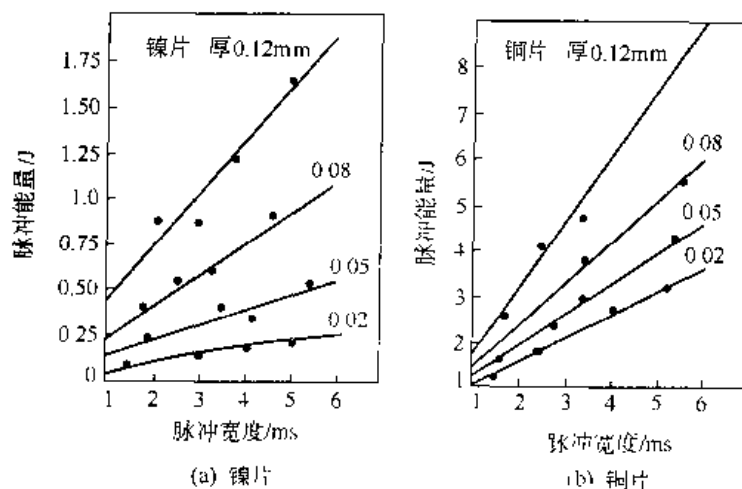


图 2.3 不同材料激光焊时脉冲能量和脉冲宽度的关系

(3) 离焦量

离焦量 F 是指焊接时焊件表面离聚焦激光束最小斑点的距离 (也称为入焦量)。激光束通过透镜聚焦后, 有一个最小光斑直径, 如果焊件表面与之重合, 则 $F=0$; 如果焊件表面在它下面, 则 $F>0$, 称为正离焦量; 反之则 $F<0$, 称为负离焦量。

改变离焦量, 可以改变激光加热斑点的大小和光束入射状况。焊接较厚板时, 采用适当的负离焦量可以获得最大熔深。但离焦量太大会使光斑直径变大, 降低光斑上的功率密度, 使熔深减小。

在使用脉冲激光焊时, 还应注意: 通常把反射率低、热导率大、厚度较小的金属选为上片; 细丝与薄膜焊接前可先在丝端熔结直径为丝径 2~3 倍的球, 以增大接触面和便于激光束对准; 脉冲激光焊也可用于薄板缝焊, 这时焊接速度为

$$v = df(1-K)$$

式中 d — 焊点直径;

f — 脉冲频率;

K — 重叠系数, 依板厚取 0.3~0.9。

表 2.8 列出丝与丝脉冲激光焊的工艺参数及接头性能示例。

脉冲激光焊已成功地用于焊接不锈钢、铁镍合金、铁镍钴合金、铂、铯、钽、铌、钨、钼、铜及各类铜合金、金、银、铝硅丝等。脉冲激光焊可用于显像管电子枪的组装、核反应堆零件、仪表游丝、混合电路薄膜元件的导线连接等。用脉冲激光封装焊接继电器外壳、锂电池和钽电容外壳、集成电路等都是很有效的方法。

表 2.8 丝与丝脉冲激光焊的工艺参数及接头性能示例

材 料	直径/mm	接头形式	工 艺 参 数		接 头 性 能		
			输出功率/W	脉冲宽度/ms	最大载荷/N	电阻/ Ω	
301 不锈钢	$\phi 0.33$	对接	8	3.0	97	0.003	
		重叠	8	3.0	103	0.003	
		十字	8	3.0	113	0.003	
		T形	8	3.0	106	0.003	
	$\phi 0.79$	对接	10	3.4	145	0.002	
		重叠	10	3.4	157	0.002	
		十字	10	3.4	181	0.002	
		T形	11	3.6	182	0.002	
	$\phi 0.38$ 与 $\phi 0.79$	对接	10	3.4	106	0.002	
		重叠	10	3.4	113	0.003	
		十字	10	3.4	116	0.003	
		T形	11	3.6	102	0.003	
		T形	11	3.6	120	0.001	
	$\phi 0.79$ 与 $\phi 0.40$	T形	11	3.6	89	0.001	
	铜	$\phi 0.38$	对接	10	3.4	23	0.001
			重叠	10	3.4	23	0.001
十字			10	3.4	19	0.001	
T形			11	3.6	14	0.001	
镍	$\phi 0.51$	对接	10	3.4	55	0.001	
		重叠	7	2.8	35	0.001	
		十字	9	3.2	30	0.001	
		T形	11	3.6	57	0.001	

续表

材 料	直径 mm	接头形式	工 艺 参 数		接 头 性 能	
			输出功 J	脉冲宽度 ms	最大载荷 N	电阻 Ω
铝	$\phi 0.38$	对接	8	3.0	52	0.001
		重叠	8	3.0	40	0.001
		十字	8	3.2	42	0.001
		T形	8	3.0	50	0.001
	$\phi 0.63$	对接	11	3.0	67	0.001
		重叠	11	3.5	58	0.001
		T形	11	3.5	77	0.001
		对接	10	3.4	50	0.001
	$\phi 0.63$ 与 $\phi 0.63$	十字	10	3.4	41	0.001
		T形	11	3.6	87	0.001
	$\phi 0.63$ 与 $\phi 0.38$	T形	11	4.6	71	0.001
		对接	10	3.4	17	0.001
铜和铝	$\phi 0.38$	重叠	10	3.4	24	0.001
		十字	10	3.4	18	0.001
		T形	10	3.4	18	0.001

各种材料焊件的脉冲激光焊接的工艺参数示例见表 2.9。

表 2.9 各种材料焊件的脉冲激光焊接的工艺参数示例

材 料	厚度(直径) mm	脉冲能量 J	脉冲宽度 ms	激光器类别
镀金磷青铜—铝箔	0.3 ± 0.2	3.0	4.3	钕玻璃激光器
不锈钢片	0.145 ± 0.145	1.21	3.7	钕玻璃激光器
纯铜箔	0.05 ± 0.05	2.3	4.0	钕玻璃激光器
镍铬丝—铜片	0.10—0.145	1.0	3.4	
不锈钢片+镍铬丝	0.115 ± 0.10	1.1	3.2	红宝石激光器
钎铝丝+不锈钢片	0.10 ± 0.145	1.1	3.2	红宝石激光器

2.4.2 连续 CO₂ 激光焊工艺及参数

由于不同的金属室温时的反射率及熔点、热导率等性能差异，连续焊所需输出功率差异很大，一般为数千瓦至数十千瓦，最大到 25kW。各种金属连续激光焊所需输出功率的差异，主要是吸收率不同造成的。连续激光焊主要采用 CO₂ 激光器，焊缝成形主要由激光功率及焊接速度确定。CO₂ 激光器因结构简单、输出功率范围大和能量转换率高而被广泛应用于连续激光焊。

(1) 接头形式及装配要求

在激光焊时，用的最多的是对接接头。常见的 CO₂ 激光焊接头形式见图 2.4。对接接头和搭接接头装配尺寸公差要求见图 2.5。

为了获得成形良好的焊缝，焊前必须将焊件装配良好。对接时，如果接头错边太大，会使入射激光在板角处反射，焊接过程不稳定。薄板焊时，间隙太大，焊后焊缝表面成形不饱满，严重时形成穿孔。搭接时板间间隙过大，易造成上下板间熔合不良。各类激光焊接头的装配要求见表 2.10。

在激光焊过程中，焊件应夹紧，以防止焊接变形。光斑在垂直于焊接运动方向对焊缝中心的偏离量应小于光斑半径。对于钢铁等材料，焊前焊件表面除锈、脱脂处理即可。在要求较严格时，可能需要酸洗，焊前用乙醚、丙酮或四氯化碳清洗。

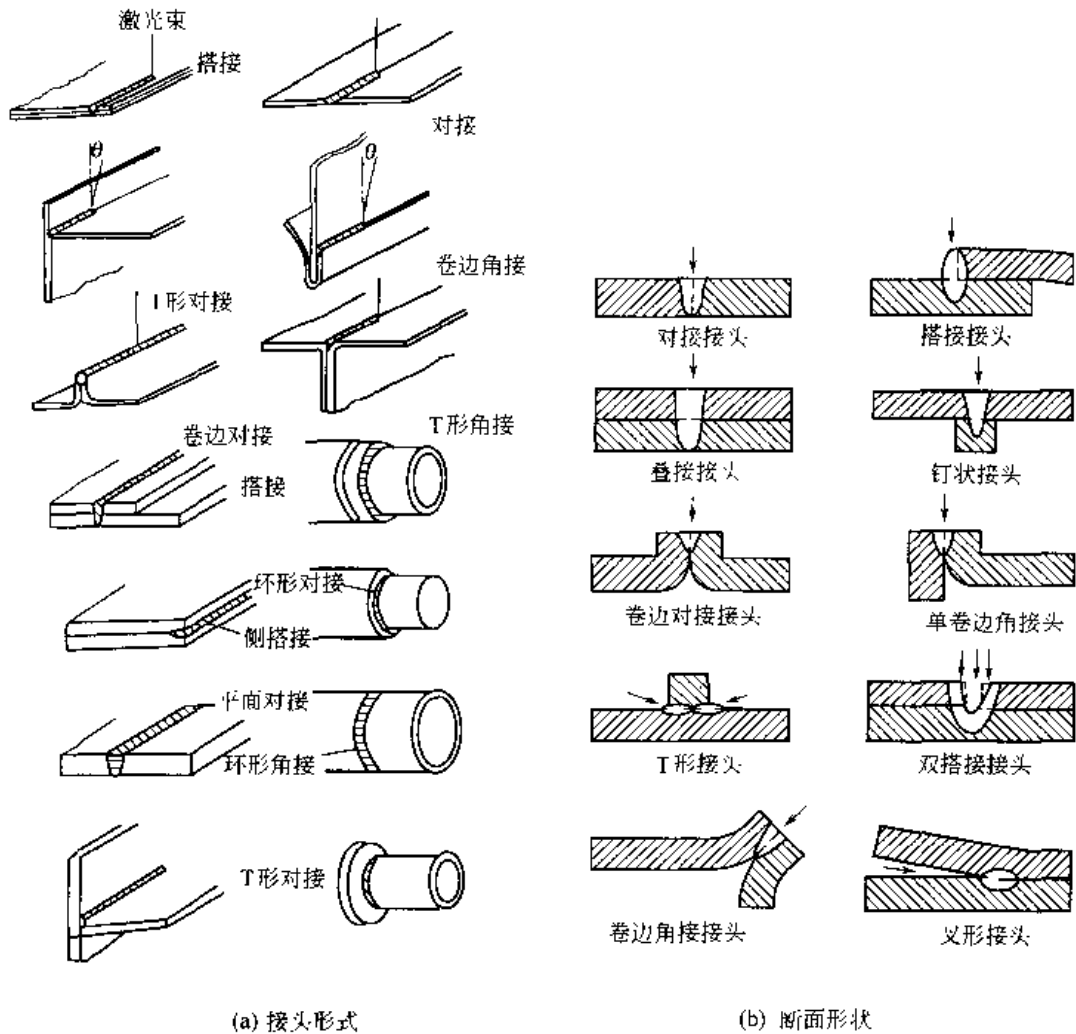


图 2.4 常见的 CO₂ 激光焊接头形式

激光深熔焊可以进行全位置焊，在起焊和收尾的渐变过渡，可通过调节激光功率的递增和衰减过程以及改变焊接速度来实现，在焊接环缝时可实现首尾平滑过渡。利用内反射来增强激光吸收的焊缝常常能提高焊接过程的效率和熔深。对搭接、对接、端接、角接等多可采用连续激光焊。

(2) 填充金属

尽管激光焊适合于自熔焊，但在一些应用场合，仍需加填充金属。填加填充金属的优点是能改变焊缝化学成分，从而达到控制焊缝组织、改善接头力学性能的目的。在有些情况下，还能提高焊缝抗结晶裂纹敏感性。允许增大接头装配公差，改善激光焊接头准备的不理想状态。经验表明，间隙超过板厚的 3%，自熔焊缝将不饱满。

填充金属常常以焊丝的形式加入，可以是冷态，也可以是热态。填充金属的施加量不能过大，以免破坏小孔效应。

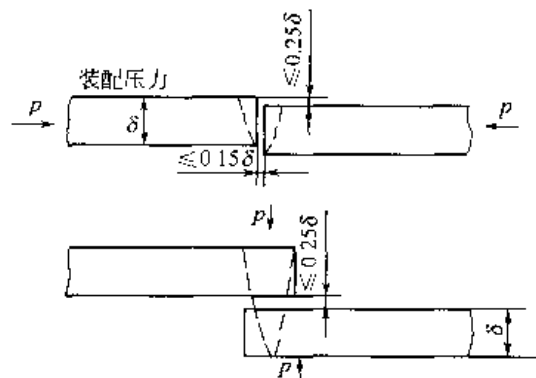


图 2.5 对接接头和搭接接头装配尺寸公差要求

表 2.10 各类激光焊接头的装配要求

接头形式	允许最大间隙 mm	允许最大上下错边量 mm
对接接头	$0.10 \times \delta$	$0.25 \times \delta$
角接接头	$0.10 \times \delta$	$0.25 \times \delta$
T形接头	$0.25 \times \delta$	—
搭接接头	$0.25 \times \delta$	—
卷边接头	$0.10 \times \delta$	$0.25 \times \delta$

(3) 连续激光焊的工艺参数

连续激光焊的工艺参数包括激光功率、焊接速度、光斑直径、焦点距离和保护气体的种类及流量。

1) 激光功率

激光功率是指激光器的输出功率，没有考虑导光和聚焦系统所引起的损失。连续工作的低功率激光器可在薄板上以低速产生普通的有限传热焊缝。高功率激光器则可用小孔法在薄板上以高速产生窄的焊缝。也可用小孔法在中厚板上以低速（但不能低于 0.6m/s ）产生深宽比大的焊缝。

激光焊熔深与输出功率密切相关。对一定的光斑直径，焊接熔深随着激光功率的增加而增加。图 2.6 所示为激光焊时激光功率与不同材料熔深的关系。

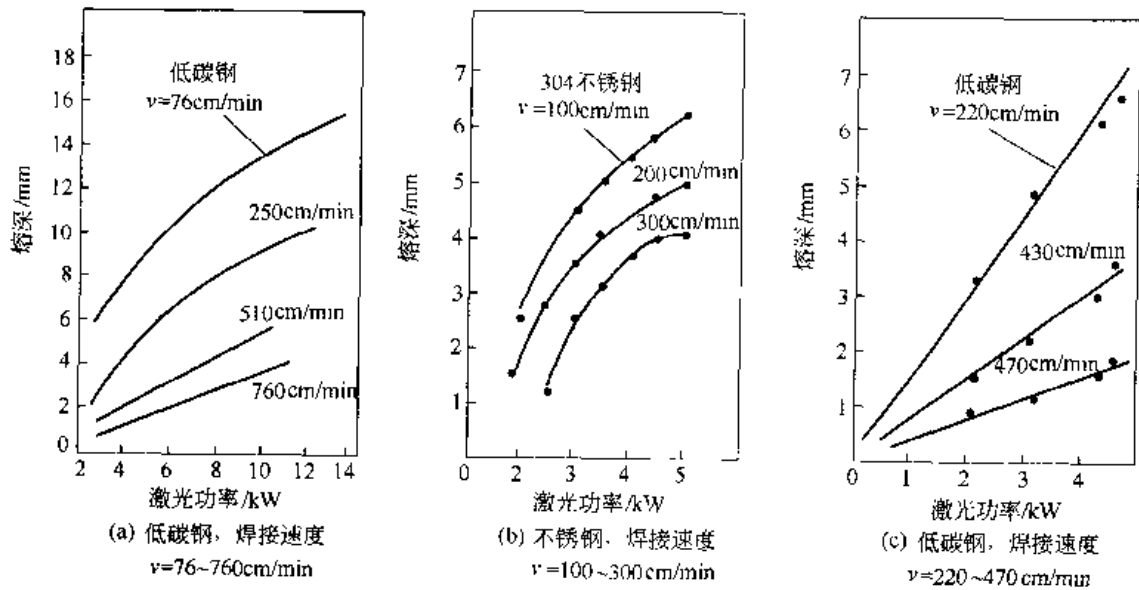


图 2.6 激光功率与不同材料熔深的关系

2) 焊接速度

在一定激光功率下，提高焊接速度，热输入下降，焊缝熔深减小。适当降低焊接速度可加大熔深，但若焊接速度过低，熔深却不会再增加，反而使熔宽增大。焊接速度对不锈钢焊缝熔深的影响见图 2.7。由图可见，当功率和其他参数保持不变时，焊缝熔深随着焊接速度加快而减小。

采用不同功率的激光焊，焊接不锈钢和耐热钢时焊接速度与熔深的关系见图 2.8。随着焊接速度的提高，熔深逐渐减小。激光焊焊接速度对碳钢熔深的影响以及不同焊接速度下所

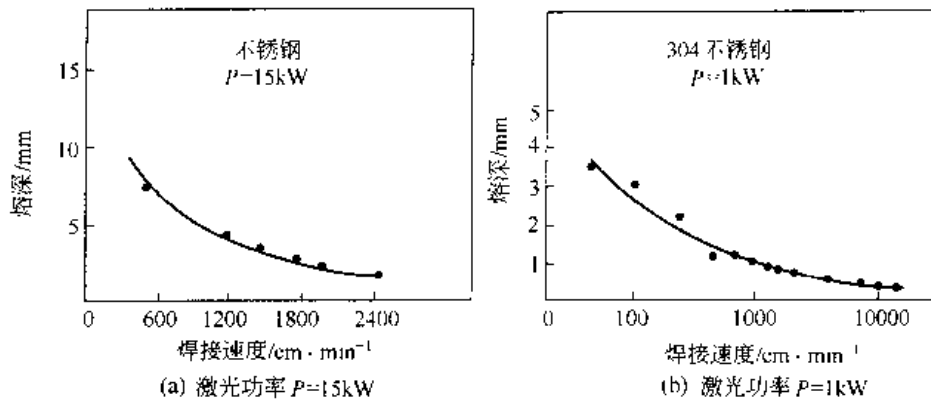


图 2.7 焊接速度对不锈钢焊缝熔深的影响

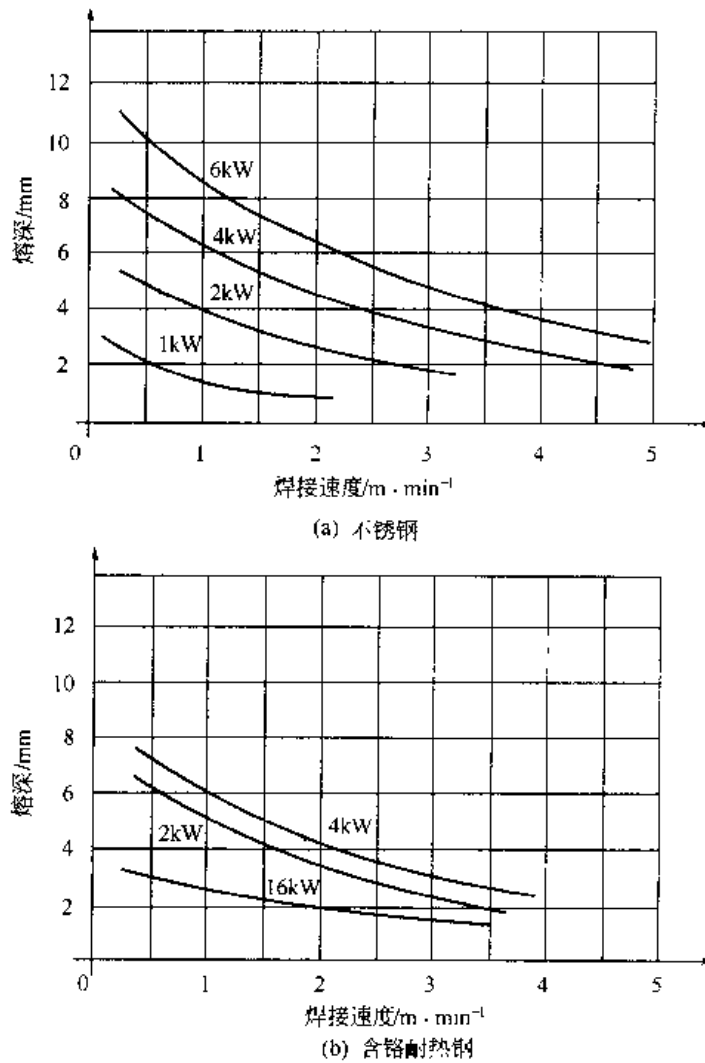


图 2.8 不同激光功率下焊接速度对焊缝熔深的影响

得到的熔深分别见图 2.9 和图 2.10。

熔深与激光功率和焊接速度的关系可用下式表示，即

$$h = \beta P^{1/2} v^{-\gamma} \quad (2.3)$$

式中 h ——焊接熔深，mm；

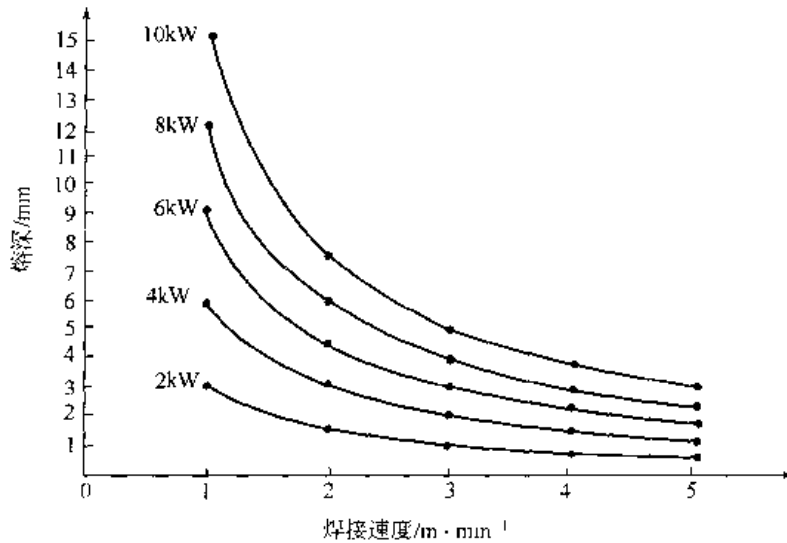


图 2.9 激光焊焊接速度对碳钢熔深的影响



图 2.10 不同焊接速度下所得到的熔深 ($P=8.7\text{kW}$, 板厚 12mm)

P —激光功率, W;

v —焊接速度, mm/s;

β 和 γ ——取决于激光源、聚焦系统和焊接材料的常数。

激光深熔焊时, 维持小孔存在的主要动力是金属蒸气的反冲压力。在焊接速度低到一定程度后, 热输入增加, 熔化金属越来越多, 当金属蒸气所产生的反冲压力不足以维持小孔的存在时, 小孔不仅不再加深, 甚至会崩溃, 焊接过程蜕变为传热焊型焊接, 因而熔深不会再加。随着金属汽化的增加, 小孔区温度上升, 等离子体的浓度增加, 对激光的吸收增加。这些原因使得低速焊时, 激光焊熔深有一个最大值。

3) 光斑直径

根据光的衍射理论, 聚焦后最小光斑直径 d_0 可以通过下式计算, 即

$$d_0 = 2.44 \times \frac{f\lambda}{D} (3m+1) \quad (2.4)$$

式中 d_0 ——最小光斑直径, mm;

f ——透镜的焦距, mm;

λ ——激光波长, mm;

D ——聚焦前光束直径, mm;

m ——激光振荡模的阶数。

对于一定波长的光束， f/D 和 m 值越小，光斑直径越小。焊接时为了获得深熔焊缝，要求激光光斑上的功率密度高。为了进行熔孔型加热，焊接时激光焦点上的功率密度必须大于 10^6 W/cm^2 。

提高功率密度的方式有两个：一是提高激光功率 P ，它和功率密度成正比；二是减小光斑直径，功率密度与直径的平方成反比。因此，通过减小光斑直径比增加功率的效果更明显。减小 d_0 可以通过使用短焦距透镜和降低激光束横模阶数，低阶模聚焦后可以获得更小的光斑。

4) 离焦量

离焦量不仅影响焊件表面激光光斑大小，而且影响光束的入射方向，因而对焊接熔深、焊缝宽度和焊缝横截面形状有较大影响。在离焦量 F 很大时，熔深很小，属于传热焊；当离焦量 F 减小到某一值后，熔深发生跳跃性增加，此处标志着小孔产生。

图 2.11 所示为离焦量对熔深、焊缝宽度和焊缝横截面积的影响，由该图所示曲线可见，焦距减小到某一值后，熔深突变，即为产生穿透小孔建立了必要的条件。激光深熔焊时，熔深最大时的焦点位置是位于焊件表面下方某处，此时焊缝成形最好。通过调节离焦量可以在光束的某一截面选择一光斑直径使其能量密度适合于焊接。

5) 保护气体

激光焊时采用保护气体有两个作用：一是保护焊缝金属不受有害气体的侵袭，防止氧化污染，提高接头的性能；二是影响焊接过程中的等离子体，抑制等离子体的形成。深熔焊时（锁孔焊），高功率激光束使金属被加热气化，在熔池上方形成金属蒸气云，在电磁场的作用下发生离解形成等离子体，它对激光束起着阻隔作用，影响激光束被焊件吸收。

为了排除等离子体，通常用高速喷嘴向焊接区喷送惰性气体，迫使等离子体偏移，同时又对熔化金属起到隔绝大气的保护作用。图 2.12 所示为各种气体对激光焊熔深的影响。可见 He 气具有最好的抑制等离子体的效果，在 He 气中加入少量的 Ar 或 O_2 可进一步提高熔深。气体流量对熔深也有一定的影响，熔深随气体流量的增加而增大，但过大的气体流量会造成熔池表面下陷，严重时还会产生烧穿现象。

保护气体多用氩 (Ar) 气或氦 (He) 气。He 具有优良保护和抑制等离子体的效果，焊接时熔深较大。若在 He 里加入少量 Ar 或 O_2 ，可进一步提高熔深。故国外广泛使用 He 作保护气体。国内因 He 价格贵，故多用 Ar 作保护气体。但由于 Ar 电离能太低易离解，故其熔深较小。

不同气体流量下得到的焊缝熔深如图 2.13 所示。由该图可见，气体流量大于 17.5 L/min 以后，焊缝熔深不再增加。吹气喷嘴与焊件的距离不同，熔深也不同。图 2.14 所示为

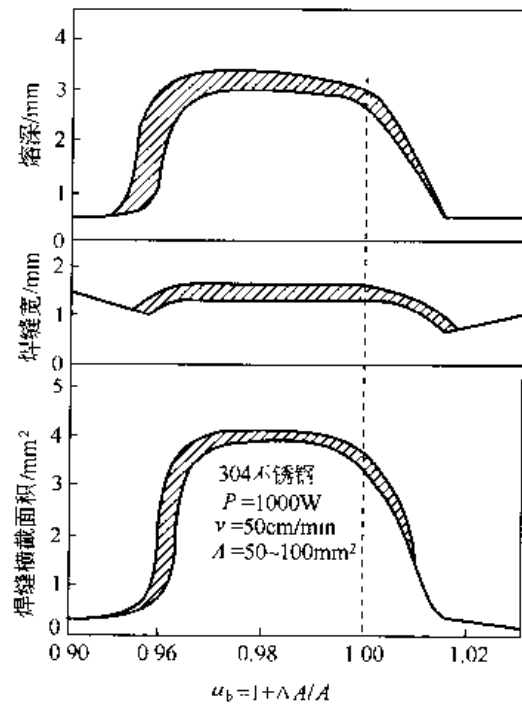


图 2.11 焦距对焊缝熔深、熔宽和横截面积的影响

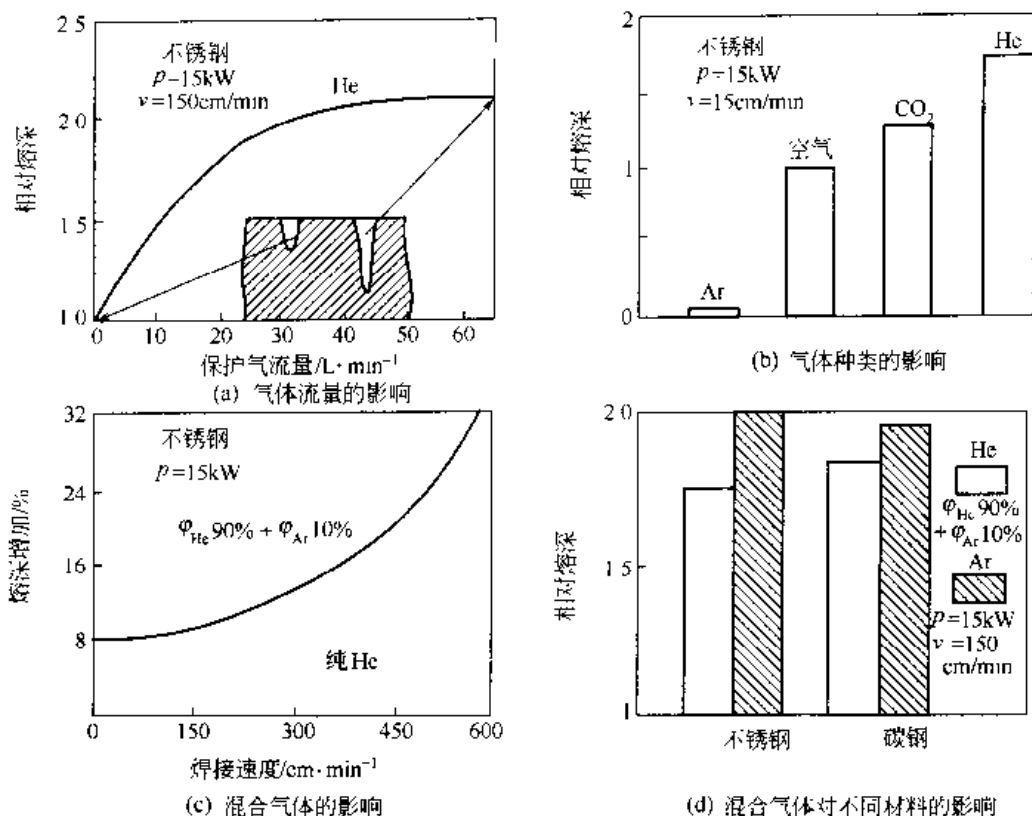


图 2.12 保护气体对熔深的影响

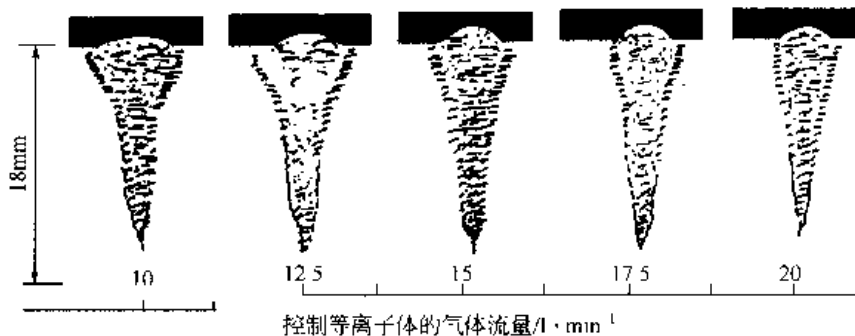


图 2.13 不同气体流量下的焊缝熔深

喷嘴到焊件的距离与焊接熔深的关系。

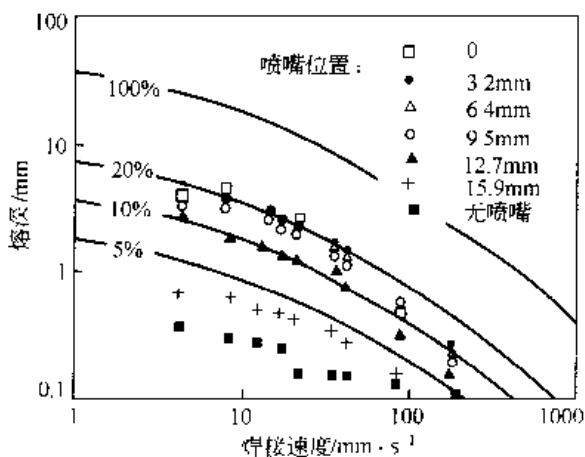


图 2.14 喷嘴到焊件的距离与焊接熔深的关系
($P=1.7\text{kW}$, Ar 气保护)

不同的保护气体作用效果不同，一般氦气的保护效果最好，但有时焊缝中气孔较多。连续 CO_2 激光焊的工艺参数见表 2.11。

(4) 激光焊工艺参数、熔深及材料热物理性能的关系

激光焊工艺参数（如激光功率、焊接速度等）与熔深、焊缝宽度以及焊接材料性质之间的关系，已有大量的经验数据并建立了它们之间关系的回归方程，即

$$P/vh = a + \frac{b}{r} \quad (2.5)$$

式中 P ——激光功率, kW;
 v ——焊接速度, mm/s;
 h ——焊接熔深, mm;
 a 和 b ——参数;
 r ——回归系数。

表 2.11 连续 CO₂ 激光焊的工艺参数

材 料	厚度/mm	焊速/cm·s ⁻¹	缝宽/mm	深宽比	功率/kW
对 接 焊 缝					
321 不锈钢	0.13	3.81	0.43	全焊透	5
	0.25	1.48	0.71	全焊透	5
	0.42	0.47	0.76	部分焊透	5
17-7 不锈钢	0.13	4.65	0.45	全焊透	5
302 不锈钢	0.13	2.12	0.50	全焊透	5
	0.20	1.27	0.50	全焊透	5
	0.25	0.42	1.00	全焊透	5
	6.35	2.14	0.70	7	3.5
	8.9	1.27	1.00	3	8
	12.7	0.42	1.00	5	20
	20.3	21.1	1.00	5	20
因康镍合金 600	0.10	6.35	0.23	全焊透	5
	0.25	1.69	0.45	全焊透	5
镍合金 200	0.13	1.48	0.45	全焊透	5
蒙乃尔合金 400	0.25	0.60	0.60	全焊透	5
工业纯钛	0.13	5.92	0.38	全焊透	5
	0.25	2.12	0.55	全焊透	5
低碳钢	1.19	0.32		0.63	0.65
搭 接 焊 缝					
镀锡钢	0.30	0.85	0.76	全焊透	5
302 不锈钢	0.40	7.45	0.76	部分焊透	5
	0.76	1.27	0.60	部分焊透	5
	0.25	0.60	0.60	全焊透	5
角 焊 缝					
321 不锈钢	0.25	0.85		—	5
端 接 焊 缝					
321 不锈钢	0.13	3.60		—	5
	0.25	1.06		—	5
	0.42	0.60	—		5
17-7PH 不锈钢	0.13	1.90		—	5
因康镍合金 600	0.10	3.60	—	—	5
	0.25	1.06	—	—	5
	0.42	0.60	—	—	5
镍合金 200	0.18	0.76	—	—	5
蒙乃尔合金 400	0.25	1.06		—	5
Ti-6Al-4V 合金	0.50	1.14		—	5

公式 (2.5) 中的参数 a 、 b 和回归系数 r 的取值见表 2.12。

表 2.12 几种材料 a 、 b 、 r 的取值

材 料	激光类型	a / $\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-2}$	b / $\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$	r
301 不锈钢	CO ₂	0.9194	0.356	0.32
低碳钢	CO ₂	0.016	0.219	0.81
	YAG	0.039	0.309	0.92
铝合金	CO ₂	0.0219	0.381	0.73
	YAG	0.0065	0.526	0.99

2.5 典型材料的激光焊

激光焊的特点之一是适用于多种材料的焊接。所有可以用常规焊接方法焊接的材料或具有冶金相容性的材料都可以用 CO₂ 激光束进行焊接。用 10~15kW 的激光功率，单道焊缝熔深可达 15~20mm。激光焊的高功率密度及高焊接速度，使得激光焊缝及热影响区很窄，所引起的焊件变形小。

2.5.1 钢的激光焊

(1) 碳素钢

由于激光焊时的加热速度和冷却速度非常快，所以在焊接碳素钢时，随着含碳量的增加，焊接裂纹和缺口敏感性也会增加。

目前对民用船体结构钢 A、B、C 级的激光焊已趋成熟。试验用钢的厚度范围分别为：A 级 9.5~12.7mm；B 级 12.7~19.0mm；C 级 25.4~28.6mm。在其成分中，碳的质量分数均不大于 0.25%，Mn 的质量分数为 0.6%~1.03%，脱氧程度和钢的纯度从 A 级到 C 级递增。焊接时，使用的激光功率为 10kW，焊接速度为 0.6~1.2m/min，焊缝除 20mm 以上厚板需双道焊外均为单道焊。

激光焊接头的力学性能试验结果表明，所有船体用 A、B、C 级钢的焊接接头抗拉性能都很好，均断在母材处，并具有足够的韧性。

焊接实例如下。

① 冷轧低碳钢板的焊接 板厚为 0.4~2.3mm，宽度为 508~1279mm 的低碳钢板，用功率 1.5kW 的 CO₂ 激光器焊接，最大焊接速度为 10m/min，投资成本仅为闪光对焊的 2/3。

② 镀锡板罐身的激光焊 镀锡板俗称马口铁，主要特点是表层有锡和涂料，是制作小型喷雾罐身和食品罐身的常用材料。用高频电阻焊工艺，设备投资成本高，并且电阻焊焊缝是搭接，耗材也多。小型喷雾罐身，由约 0.2mm 厚的镀锡板制成，用 1.5kW 激光器，焊接速度可达 26m/min。

用 0.25mm 厚的镀锡板制作的食品罐身，用 700W 的激光焊进行焊接，焊接速度为 8m/min 以上，接头的强度不低于母材，没有脆化倾向，具有良好的韧性。这主要是因为激光焊焊缝窄（约 0.3mm），热影响区小，焊缝组织晶粒细小。另外，由于净化效应，使焊缝含锡量得到控制，不影响接头的性能。焊后的翻边及密封性检验表明，无开裂及泄漏现象。英国 CMB 公司用激光焊焊接罐头盒纵缝，每秒可焊 10 条，每条焊缝长 120mm，并可对焊接质量进行实时监测。

(2) 低合金高强度钢

低合金高强度钢的激光焊，只要所选择的焊接参数适当，就可以得到与母材力学性能相当的接头。HY-130 钢是一种经过调质处理的低合金高强度钢，具有很高的强度和较高的抗裂性。采用常规焊接方法时，焊缝和热影响区组织是粗晶、部分细晶及原始组织的混合物，接

头的韧性和抗裂性与母材相比要差得多，而且焊态下焊缝和热影响区组织对冷裂纹很敏感。

激光焊后，沿着焊缝横向制作拉伸试样，使焊缝金属位于试样中心，拉伸结果表明激光焊的接头强度不低于母材，塑性和韧性比手工电弧焊和气体保护焊接头好，接近于母材的性能。

试验结果表明，激光焊焊接接头不仅具有高的强度，而且具有良好的韧性和抗裂性，它的动态断裂能与母材相比，有的甚至高于母材。激光焊接头具有高强度、良好的韧性和抗裂性，原因如下。

a. 激光焊焊缝细、热影响区窄。焊接裂纹并不总是沿着焊缝或热影响区扩展，常常是扩展进母材。冲击断口上大部分区域是未受热影响的母材，因此整个接头的抗裂性实际上很大部分是由母材所提供的。

b. 从接头的硬度和显微组织的分布来看，激光焊有较高的硬度和较陡的硬度梯度，这表明可能有较大的应力集中出现。但是，在硬度较高的区域，对应于细小的组织。高的硬度和细小组织的共生效应使得接头既有高的强度，又有足够的韧性。

c. 激光焊热影响区的组织主要为马氏体，这是由于它的焊接速度快、热输入小所造成的。HY-130 钢的含碳量很低，焊接过程中由于冷却速度快，形成低碳马氏体，加上晶粒细小，接头性能比手工电弧焊和气体保护焊的好。

d. 低合金钢激光焊时，焊缝中的有害杂质元素大大减少，产生了净化效应，提高了接头的韧性。

(3) 不锈钢

对 Ni-Cr 系不锈钢进行激光焊时，材料具有很高的能量吸收率和熔化效率。用 CO₂ 激光焊焊接奥氏体不锈钢时，在功率为 5kW，焊接速度为 1m/min，光斑直径为 0.6mm 的条件下，光的吸收率为 85%，熔化效率为 71%。由于焊接速度快，减轻了不锈钢焊接时的过热现象和线胀系数大的不良影响，焊缝无气孔、夹杂等缺陷，接头强度和母材相当。

不锈钢激光焊的另一个特点是，用小功率 CO₂ 激光焊焊接不锈钢薄板，可以获得外观上成形良好、焊缝平滑美观的接头。不锈钢的激光焊，用于核电站中不锈钢管、核燃料包等的焊接，也可用于化工等其他工业部门。

(4) 硅钢

硅钢片是一种应用广泛的电磁材料，但采用常规的焊接方法很难进行焊接。目前采用 TIG 焊的主要问题是接头脆化，焊态下接头的反复弯曲次数低或者不能弯曲，因而焊后不得不增加一道火焰退火工序，增加了工艺流程复杂性。

用 CO₂ 激光焊焊接硅钢薄板中焊接性最差的 Q112B 高硅取向变压器钢（板厚 0.35mm），获得了满意的结果。硅钢焊接接头的反复弯曲次数越高，接头的塑性和韧性越好。几种焊接方法（TIG 焊、光束焊和激光焊）的接头反复弯曲次数的比较表明，激光焊接头最为优良，焊后不经过热处理即可满足生产线对接头韧性的要求。

生产中半成品硅钢板，一般厚度为 0.2~0.7mm，幅宽为 50~500mm，常用的焊接方法是 TIG 焊，但焊后接头脆性大，用 1kW 的 CO₂ 激光焊焊接这类硅钢薄板，最大焊接速度为 10m/min，焊后接头的性能得到了很大改善。

2.5.2 有色金属的激光焊

(1) 铝及其合金的激光焊

铝及其合金激光焊的主要困难是它对激光束的反射率高。铝是热和电的良导体，高密度

的自由电子使它成为光的良好反射体，起始表面反射率超过 90%。也就是说，深熔焊必须在小于 10% 的输入能量开始，这就要求很高的输入功率以保证焊接开始时必须的功率密度。而小孔一旦生成，它对光束的吸收率迅速提高，甚至可达 90%，从而使焊接过程顺利进行。

铝及其合金激光焊时，随温度的升高，氢在铝中的溶解度急剧升高，溶解于其中的氢成为焊缝的缺陷源。焊缝中多存在气孔，深熔焊时根部可能出现空洞，焊道成形较差。在高功率密度、高焊接速度下，可获得没有气孔的焊缝。

铝及其合金对输入能量强度和焊接参数很敏感，要获得良好的无缺陷的焊缝，必须严格选择焊接参数，并对等离子体进行良好的控制。铝合金激光焊时，用 8kW 的激光功率可焊透厚度 12.7mm 的材料，焊透率大约为 1.5mm/kW。

连续激光焊可以对铝及其合金进行从薄板精密焊到板厚 50mm 深穿入焊的各种焊接。铝及其合金的 CO₂ 激光焊的工艺参数见表 2.13。

表 2.13 铝及其合金的 CO₂ 激光焊的工艺参数

材料	板厚/mm	焊接速度·cm·s ⁻¹	功率/kW
铝及其合金	?	4.17	5

(2) 钛及其合金的激光焊

钛合金化学性能高，在高温下容易氧化，在 330℃ 时晶粒开始长大。在进行激光焊时，正反面都必须施加惰性气体保护，气体保护范围须扩大到 400~500℃（即拖罩保护）。钛合金对接时，焊前必须把坡口清理干净，可先用喷砂处理，再用化学方法清洗。另外，装配要精确，接头间隙宽度要严格控制。

钛合金激光焊时，焊接速度一般较高（80~100m/h），焊透率大约为 1mm/kW。

对工业纯钛和 Ti-6Al-4V 合金的 CO₂ 激光焊研究表明，使用 4.7kW 的激光功率，焊接厚度 1mm 的 Ti-6Al-4V 合金，焊接速度可达 15m/min。检测表明，接头致密，无气孔、裂纹和夹杂，也没有明显咬边。接头的屈服强度、拉伸强度与母材相当，塑性不降低。在适当的焊接参数下，Ti-6Al-4V 合金接头具有与母材同等的弯曲疲劳性能。

钛及其合金焊接时，氧气的溶入对接头的性能有不良影响。在激光焊时，只要使用了保护气体，焊缝中的氧就不会有显著变化。激光焊焊接高温钛合金，也可以获得强度和塑性良好的接头。

2.5.3 高温合金的激光焊

激光焊可以焊接各类高温合金，包括电弧焊难以焊接的含高 Al、Ti 的时效处理合金。用于焊接的激光发生器一般为 CO₂ 连续或脉冲激光发生器，功率为 1~50kW。

激光焊焊接这类高温材料时，容易出现裂纹和气孔。采用 2kW 快速轴向流动式激光器，对厚度 2mm 的 Ni 基合金进行焊接，最佳焊接速度为 8.3mm/s；厚度 1mm 的 Ni 基合金，最佳焊接速度为 34mm/s。

高温合金激光焊的力学性能较高，接头强度系数为 90%~100%。表 2.14 列出几种高温合金激光焊焊接接头的力学性能。

激光焊用的保护气体，推荐采用氮气或氦气与少量氩的混合气体。使用氦气成本较大，但是氦气可以抑制离子云，增加焊缝熔深。高温合金激光焊的接头形式一般为对接和搭接接头，母材厚度可达 10mm。接头制备和装配要求很高，与电子束焊类似。激光焊的主要参数是输出功率和焊接速度等，它是根据母材厚度和物理性能通过试验确定的。

表 2.14 高温合金激光焊焊接接头的力学性能

母材牌号	厚度 mm	状态	试验温度 °C	拉伸性能			强度系数/%
				σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ_5 /%	
GH141	0.13	焊态	室温	859	552	16.0	99.0
			540	868	515	8.5	93.0
			760	685	593	2.5	91.0
			990	292	259	3.3	99.0
GH3030	1.0	焊态	室温	714	-	13.0	88.5
	2.0			729	-	18.0	90.3
GH163	1.0	固溶+时效		1000	--	31.0	100
	2.0			973	--	23.0	98.5
GH14169	6.4		1387	1210	16.4	100	

2.5.4 异种材料的激光焊

各种金属组合采用激光焊的可能性见表 2.15。在一定条件下，Cu-Ni、Ni-Ti、Cu-Ti、Ti-Mo、黄铜-铜、低碳钢-铜、不锈钢-铜及其他一些异种金属材料，都可以进行激光焊。对 Ni-Ti 异种材料焊接熔合区主要由高分散度的微细组织组成，并有少量金属间化合物分布在熔合区界面。不同材料连续 CO₂ 激光焊的特性见表 2.16。

表 2.15 各种金属组合采用激光焊的可能性

材料	Al	Mo	Fe	Cu	Ta	Ni	Si	W	Ti	Au	Ag	Co
Al	✓✓					✓		✓		✓		
Mo		✓✓			✓							
Fe			✓✓	✓	✓							
Cu			✓	✓✓	✓	✓	✓					
Ta		✓	✓	✓	✓✓	✓						
Ni	✓			✓	✓	✓✓		✓		✓	✓	
Si				✓						✓		
W	✓					✓		✓✓				
Ti									✓✓			
Au	✓					✓	✓					✓
Ag						✓					✓✓	
Co										✓		✓✓

注：✓为焊接性良好（✓✓为同种金属焊接）；空白为焊接性差或无报道数据。

表 2.16 不同材料连续 CO₂ 激光焊的特性

材料	熔深/mm	激光功率/W	焊接速度/cm·s ⁻¹	保护气体	接头形式
铬耐热钢	3.5	4000	1.67	Ar	对接
	5.0	3000	1.67	Ar	
	4.0	3000	2.33	Ar	
	3.5	4000	5.00	Ar	
	2.8	1600	1.67	Ar	
	2.5	1600	2.50	Ar	
	2.0	1600	3.33	Ar	
	1.7	1600	4.17	Ar	
	1.4	1600	5.00	Ar	

续表

材 料	熔深/mm	激光功率/W	焊接速度/cm·s ⁻¹	保护气体	接头形式
不锈钢	7.5	3000	1.67	He	对接
	5.0	3000	1.67	He	
	4.0	2500	2.50	He	
	3.0	5000	6.67	He	
	3.0	1100	1.33	He	
	2.0	2500	3.00	He	
	1.25	2500	7.33	He	
因康镍合金	1	1000	6.67	He	对接
铝合金	3.0	2400	1.33	Ar	对接
	1.5	2400	9.16	Ar	
	1.0	2400	6.67	He	

对于可伐合金 (Ni29-Co17-Fe54)-铜的激光焊, 接头强度为退火态铜的 92%, 并有较好的塑性, 但焊缝金属呈化学成分不均匀性。此外, 激光焊不仅可以焊接金属, 还可以用于焊接陶瓷、玻璃、复合材料及金属基复合材料等非金属材料。

2.6 激光切割

激光切割是利用高能量密度的激光束作为“切割刀具”对材料进行热切割的一种材料加工方法。20 世纪 70 年代首次用 CO₂ 激光器切割包装用夹板, 开辟了激光切割在工业领域中的应用。随着激光切割设备的不断完善、更新和先进切割工艺的发展, 激光切割技术可实现各种金属、非金属板材及众多复杂零件的切割, 在汽车、航空航天、国防工业等领域获得了日益广泛应用。

2.6.1 激光切割的分类

激光切割可分为: 激光气化切割、激光熔化切割、激光氧气切割和激光划片与断裂控制四类。

(1) 激光气化切割

利用高能量密度的激光束加热工件, 使温度迅速上升, 在非常短的时间内达到材料的沸点, 材料开始气化, 形成蒸气。这些蒸气的喷出速度很大, 在蒸气喷出的同时, 在材料上形成切口。材料的气化热一般很大, 所以激光气化切割时需要很大的功率和功率密度。

激光气化切割多用于极薄金属材料和非金属材料 (如纸、布、木材、塑料和橡皮等) 的切割。

(2) 激光熔化切割

激光熔化切割时, 用激光加热使金属材料熔化, 然后通过与光束同轴的喷嘴喷吹非氧化性气体 (Ar、He、N 等), 依靠气体的强大压力使液态金属排出, 形成切口。激光熔化切割不需要使金属完全气化, 所需能量只有气化切割的 1/10。

激光熔化切割主要用于一些不易氧化的材料或活性金属的切割, 如不锈钢、钛、铝及其合金等。

(3) 激光氧气切割

激光氧气切割原理类似于氧乙炔切割。它是用激光作为预热热源, 用氧气等活性气体作为切割气体。喷吹出的气体一方面与切割金属发生作用, 发生氧化反应, 放出大量的氧化热; 另一方面把熔融的氧化物和熔化物从反应区吹出, 在金属中形成切口。由于切割过程中的氧化反应产生了大量的热, 所以激光氧气切割所需要的能量只是熔化切割的 1/2, 而切割

速度远远大于激光气化切割和熔化切割。

激光氧气切割主要用于碳钢、钛钢以及热处理钢等易氧化的金属材料。

(4) 划片与断裂控制

激光划片是利用高能量密度的激光在脆性材料的表面进行扫描，使材料受热蒸发出一条小槽，然后施加一定的压力，脆性材料就会沿小槽处裂开。激光划片用的激光器一般为 Q 开关激光器和 CO₂ 激光器。

断裂控制是利用激光刻槽时所产生的陡峭的温度分布，在脆性材料中产生局部热应力，使材料沿小槽断开。

2.6.2 激光切割的特点

激光切割与其他切割方式相比较，具有如下特点。

(1) 切割质量好

由于激光光斑小，激光切割切口细窄。切缝两边平行并且与表面垂直，切割零件的尺寸精度可达±0.05mm。切割表面光洁美观，表面粗糙度只有几十微米，甚至激光切割可以作为最后一道工序，无需机械加工，零部件可直接使用。材料经过激光切割后，热影响区宽度很小，切缝附近材料的性能也几乎不受影响，并且变形小，切割精度高，切缝的几何形状好，切缝横截面形状呈现较为规则的长方形。

激光切割、氧-乙炔切割和等离子切割方法的比较见表 2.17。

表 2.17 激光切割、氧-乙炔切割和等离子切割方法的比较

切割方法	切缝宽度/mm	热影响区宽度/mm	切缝形态	切割速度	设备费用
激光切割	0.2~0.3	0.01~0.06	平行	快	高
氧-乙炔切割	0.9~1.2	0.6~1.2	比较平行	慢	低
等离子切割	3.0~4.0	0.5~1.0	楔形且倾斜	快	中高

注：切割材料为 6.2mm 厚的低碳钢板。

(2) 切割效率高

由于激光的传输特性，激光切割机上一一般配有数台数控工作台，整个切割过程可以全部实现数控。操作时，只需改变数控程序，就可适用不同形状零件的切割，既可进行二维切割，又可实现三维切割。

激光切割速度快。用功率为 1200W 的激光切割 2mm 厚的低碳钢板，切割速度可达 600cm/min；切割 5mm 厚的聚丙烯树脂板，切割速度可达 1200cm/min。材料在激光切割时不需要装夹固定，既可节省工装夹具，又节省了上、下料的辅助时间。

(3) 非接触式切割

激光切割时割炬与工件无接触，不存在工具的磨损。加工不同形状的零件，不需要更换“刀具”，只需改变激光器的输出参数。激光切割过程噪声低，振动小，无污染。

(4) 切割材料的种类多

与氧-乙炔切割和等离子切割比较，激光切割材料的种类多，包括金属、非金属、金属基和非金属基复合材料、皮革、木材及纤维等。但是对于不同的材料，由于自身的热物理性能及对激光的吸收率不同，表现出不同的激光切割适应性。采用 CO₂ 激光器，各种材料的激光切割性见表 2.18。

(5) 激光切割的缺点

受激光器功率和设备体积的限制，激光切割只能切割中、小厚度的板材和管材，而且随着工件厚度的增加，切割速度明显下降。此外，激光切割设备费用高，一次性投资大。

表 2.18 各种材料的激光切割性

材 料		吸收激光的能力	切 割 性 能	
金属	Au, Ag, Cu, Al	对激光的吸收量小	一般说来,较难加工,1~2mm的Cu和Al的薄板可进行激光切割	
	W, Mo, Cr, Ta, Zr, Ti (高熔点材料)	对激光的吸收量大	若用低速加工,薄板能进行切割。但Ti、Zr等金属需用Ar作辅助气体	
非金属	Fe, Ni, Pb, Sn		比较容易加工	
	有机材料	丙烯酸、聚乙烯、聚丙烯、聚酯、聚四氟乙烯	可透过白热光	大多数材料都能用小功率激光器进行切割。但因这些材料是可燃的,切割面易被碳化。丙烯酸、聚四氟乙烯不易碳化。一般可用氢气或干燥空气作辅助气体
		皮革、木材、布、橡胶、纸、玻璃、环氧树脂、酚醛塑料	透不过白热光	
	无机材料	玻璃、玻璃纤维	热膨胀大	玻璃、陶瓷、瓷器等在加工过程中或加工后易发生开裂,厚度小于2mm的石英玻璃,切割性良好
陶瓷、石英玻璃、石棉、云母、瓷器		热膨胀小		

2.6.3 激光切割设备

激光切割设备与焊接设备基本类似,区别是焊接需要使用激光焊枪,而切割需要使用激光割炬(又称割枪)。激光切割大都采用CO₂激光切割设备,主要由激光器、导光系统、数控运动系统、割炬及抽烟系统组成。

激光器由激光电源提供高压电源,产生的激光经反射镜、导光系统把激光导向切割工件所需要的方向;数控运动系统主要用于调节割炬的移动方向,割炬与工件间的相对移动有三种情况:

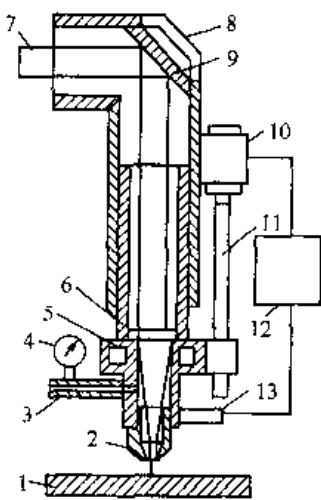


图 2.15 激光切割炬的结构

- 1- 工件; 2- 切割喷嘴;
- 3- 氧气进气管; 4- 氧气压力表;
- 5- 透镜冷却水套; 6- 聚焦透镜;
- 7- 激光束; 8- 反射冷却水套;
- 9- 反射镜; 10- 伺服电动机;
- 11- 滚珠丝杆; 12- 放大控制及驱动电器;
- 13- 位置传感器

2.6.4 激光切割工艺

(1) 光束横模

① 基模 又称为高斯模,是切割最理想的模式,主要出现在功率小于1kW的激光器。

a. 割炬不动,工件通过工作台运动,主要用于尺寸较小的工件;

b. 工件不动,割炬移动;

c. 割炬和工作台同时运动。

割炬主要包括枪体、聚焦透镜和辅助气体喷嘴等零件,激光切割炬的结构见图 2.15。

激光切割时,割炬必须满足下列要求:

a. 割炬能够喷射出足够的气流;

b. 割炬内气体的喷射方向必须和反射镜的光轴同轴;

c. 割炬的焦距能够方便调节;

d. 切割时,保证金属蒸气和切割金属的飞溅不会损伤反射镜。

激光切割时,要求激光器输出的光束为基模,经聚焦后的光斑直径最小,功率密度最高。喷嘴用于向切割区喷射辅助气体,其结构形状对切割效率和质量有一定影响。喷孔的形状有圆柱形、锥形和缩放形等。一般根据切割工件的材质、厚度、辅助气体压力等再经试验后确定。

② 低阶模 与基模比较接近，主要出现在 1~2kW 的中功率激光器。

③ 多模 是高阶模的混合，出现在功率大于 3kW 的激光器。

切割速度与横模及板厚的关系见图 2.16。由图可以看出，300W 的单模激光和 500W 的多模有同等的切割能力。但是，多模的聚焦性差，切割能力低，单模激光的切割能力优于多模。常用材料的单模激光切割工艺参数见表 2.19，多模激光切割工艺参数见表 2.20。

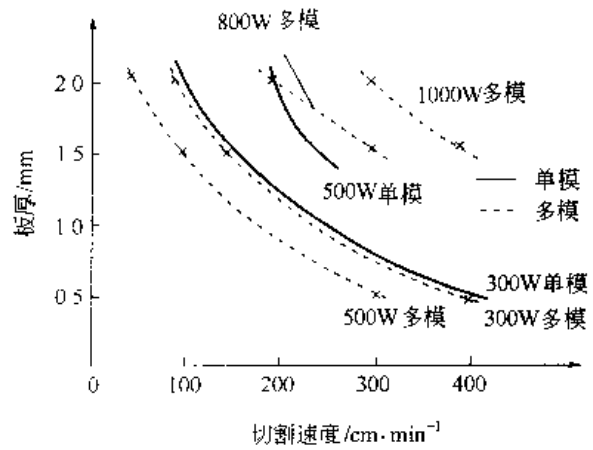


图 2.16 切割速度与横模及板厚的关系

表 2.19 常用材料单模激光切割的工艺参数

材 料	厚度/mm	辅助气体	切割速度 cm·min ⁻¹	切缝宽度 mm	功率/W
低碳钢	3.0	O ₂	60	0.2	250
不锈钢	1.0	O ₂	150	0.1	
钛合金	40.0	O ₂	50	3.5	
钛合金	10.0	O ₂	280	1.5	
有机透明玻璃	10.0	N ₂	80	0.7	
氧化铝	1.0	O ₂	300	0.1	
聚酯地毯	10.0	N ₂	260	0.5	
棉织品(多层)	15.0	N ₂	90	0.5	
纸板	0.5	N ₂	300	0.4	
波纹纸板	8.0	N ₂	300	0.4	
石英玻璃	1.9	O ₂	60	0.2	
聚丙烯	5.5	N ₂	70	0.5	
聚苯乙烯	3.2	N ₂	420	0.4	
硬质聚氯乙烯	7.0	N ₂	120	0.5	
纤维增强塑料	3.0	N ₂	60	0.3	
木材(胶合板)	18.0	N ₂	20	0.7	
低碳钢	1.0	N ₂	150	0.15	500
	3.0	N ₂	150		
	6.0	N ₂	50		
	1.2	O ₂	600		
	2.0	O ₂	100		
不锈钢	3.0	O ₂	250	0.2	—
	1.0	O ₂	300		
	3.0	O ₂	120		
胶合板	18.0	N ₂	350		

(2) 激光功率

激光切割所需要的激光功率主要取决于切割类型以及被切割材料的性质。气化切割所需要的激光功率最大，熔化切割次之，氧气切割最小。激光功率对切割厚度、切割速度和切口宽度等有很大影响。一般激光功率增大，所能切割材料的厚度也增加，切割速度加快，切口宽度也有所加大。

激光功率与板厚和切割速度的关系见图 2.17。激光功率对切口宽度的影响见图 2.18。

表 2.20 常用材料多模激光切割的工艺参数

材 料	板厚/mm	切割速度/(cm·min ⁻¹)	切缝宽度/mm	功率/kW
铝	12	230	1	15
碳钢	6	230	1	15
304 不锈钢	4.6	130	2	20
硼 环氧树脂材料	8	165	1	15
纤维 环氧树脂材料	12	460	0.6	20
胶合板	25.4	150	1.5	8
有机玻璃	25.4	150	1.5	8
玻璃	9.1	150	1	20
混凝土	38	5	6	8

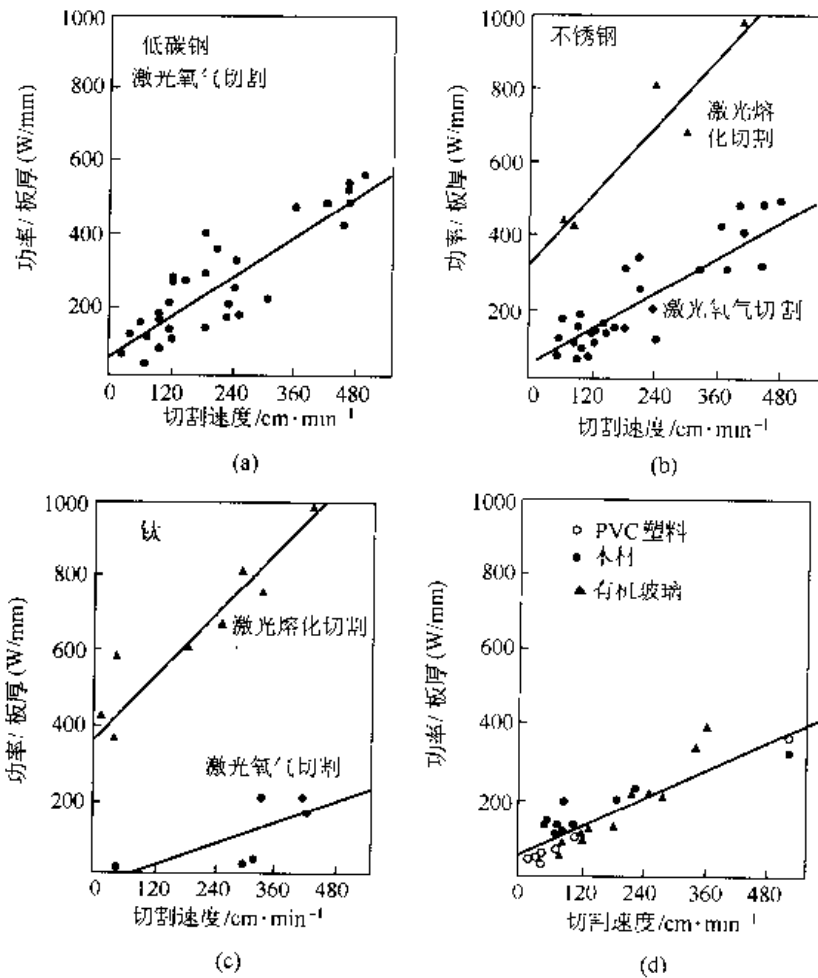


图 2.17 激光功率与板厚和切割速度的关系

(3) 焦点位置 (离焦量)

离焦量对切口宽度和切割深度影响较大。离焦量对切口宽度的影响见图 2.19。一般选择焦点位于材料表面下方的约 1/3 板厚处，切割深度最大，切口宽度最小。采用激光功率为 2.3kW、切割不同厚度钢板时，离焦量对切割质量的影响见图 2.20。

(4) 焦点深度

切割较厚钢板时，应采用焦点深度大的光束，以获得垂直度较好的切割面。但焦点深度大，光斑直径也增大，功率密度随之减小，使切割速度降低。若要保持一定的切割速度，则需要增大激光的功率；切割薄板宜采用较小的焦点深度，这样光斑直径小，功率密度高，切

割速度加快。

(5) 喷嘴

喷嘴是影响激光切割质量和效率的一个重要参数。不同切割机采用不同形状的喷嘴，图 2.21 所示为激光切割机常用的喷嘴形状。

激光切割一般采用同轴（气流与光轴同心）喷嘴，若气流与光束不同轴，则在切割时易产生大量飞溅。为了保证切割过程的稳定性，一般应尽量减少喷嘴端面至工件表面的距离，通常取 0.5~2.0mm。

(6) 切割速度

切割速度直接影响切口宽度和切口表面粗糙度。对于不同材料的板厚，不同的切割气体压力，切割速度有一个最佳值，这个最佳值约为最大切割速度的 80%。

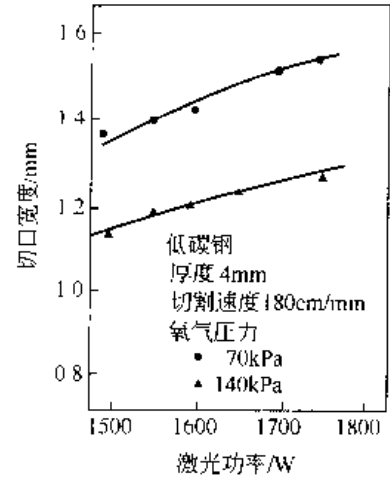


图 2.18 激光功率对切口宽度的影响

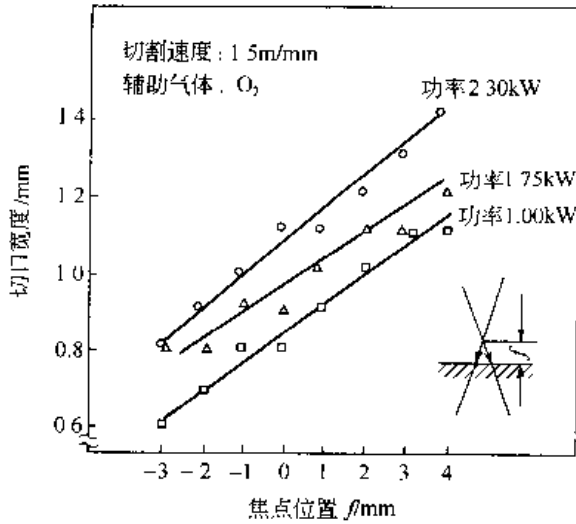


图 2.19 离焦量对切口宽度的影响

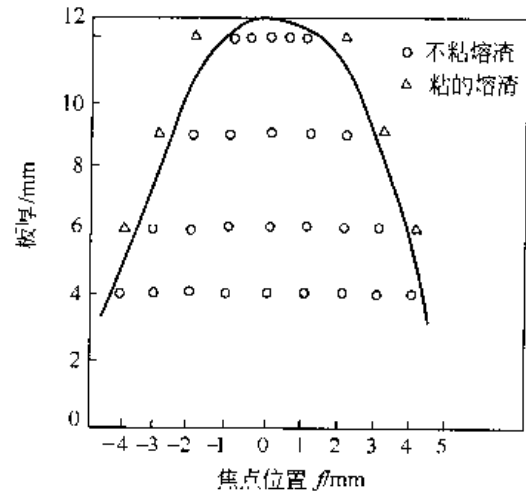


图 2.20 离焦量对切割质量的影响

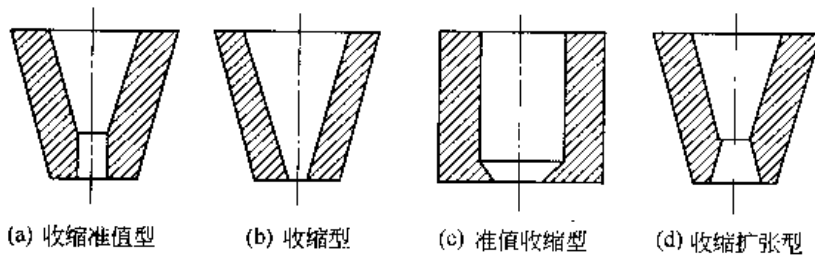


图 2.21 激光切割机常用的喷嘴形状

切割速度与材料板厚的关系见图 2.22，图中的上、下曲线分别表示能够切透材料的最大和最小切割速度。切割速度对切口宽度的影响见图 2.23。切割速度对切口表面粗糙度的影响见图 2.24。

(7) 辅助气体的种类和压力

切割低碳钢较多采用 O_2 作辅助气体，以利用铁-氧燃烧反应热促进切割过程，而且切割速度快，切口质量好，可以获得无挂渣的切口。切割不锈钢时，常使用 $O_2 + N_2$ 混合气体或

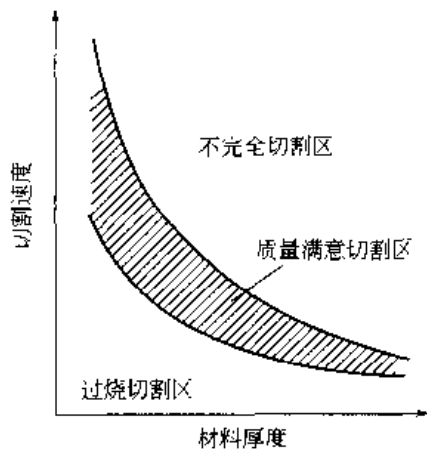


图 2.22 切割速度与材料板厚的关系

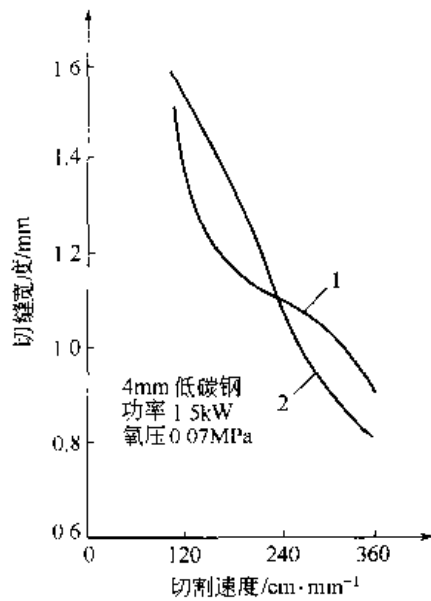
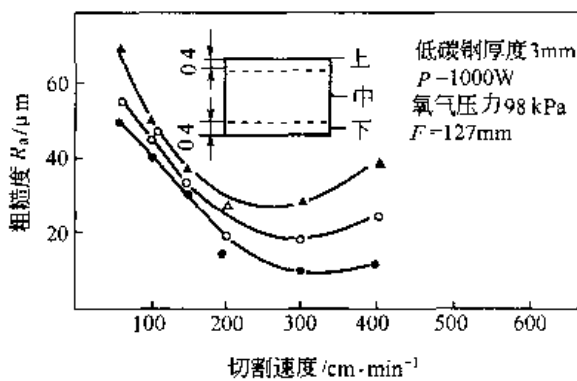
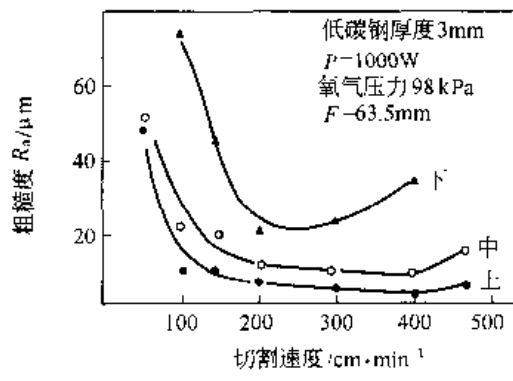


图 2.23 切割速度对切口宽度的影响
1 切口顶部；2 切口底部



(a)



(b)

图 2.24 切割速度对切口表面粗糙度的影响

双层气流。单用 O_2 在切口底边会发生挂渣。

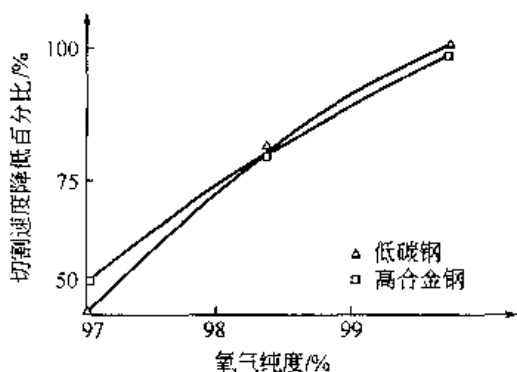


图 2.25 氧气纯度对切割速度的影响

氧气纯度对切割速度有一定的影响，研究表明，氧气纯度降低 2%，切割速度就会降低 50%。氧气纯度对切割速度的影响见图 2.25。

气体压力增大，动量增加，排渣能力增强，因此可以使无挂渣的切割速度增加。但压力过大，切割面反而会粗糙。激光氧气切割时，氧气压力对切割速度的影响见图 2.26。

从图中可以看出，当板厚一定时，存在一个最佳氧气压力，使切割速度最大；当激光功率一定时，切割氧气压力的最佳值，随板厚的增加而

减小。

常用金属材料激光切割的工艺参数见表 2.21。

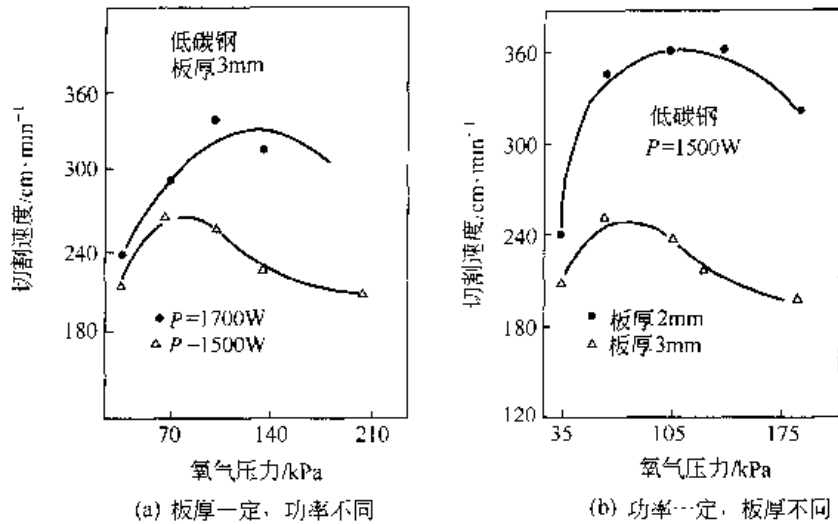


图 2.26 氧气压力对切割速度的影响

表 2.21 常用金属材料激光切割的工艺参数

材 料	厚度/mm	辅助气体	切割速度/cm·min ⁻¹	激光功率/W
低碳钢	1.5	O ₂	300	300
	3.0		200	300
	1.0		900	1000
	6.0		100	1000
	16.25		114	4000
30CrMnSi	35	O ₂	50	4000
	1.5		200	300
	3.0		120	500
不锈钢	6.0	O ₂	50	500
	0.5		450	250
	2.0		25	250
	3.2		180	500
	1.0		800	1000
	1.6		456	1000
	6.0		80	1000
	4.8		100	2000
钛合金	6.3	O ₂	150	2000
	12		10	2000
	3.0		1300	250
	8.0		300	250
	10.0	O ₂	280	250
	40.0		50	250

2.6.5 激光切割的应用

大多数激光切割机都由数控程序进行控制操作或做成切割机器人。激光切割作为一种精密的加工方法，几乎可以切割所有的材料，包括薄金属板的二维或三维切割。

在汽车制造领域，小汽车顶窗等空间曲线的切割技术都已经获得广泛应用。德国大众汽车公司用功率为 500W 的激光器切割形状复杂的车身薄板及各种曲面件。在航空航天领域，激光切割技术主要用于特种航空材料的切割，如钛合金、铝合金、镍合金、铬合金、不锈钢、氧化铍、复合材料、塑料、陶瓷及石英等。用激光切割加工的航空航天零部件有发动机火焰筒、钛合金薄壁机匣、飞机框架、钛合金蒙皮、机翼长桁、尾翼壁板、直升机主旋翼、

航天飞机陶瓷隔热瓦等。

激光切割成形技术在非金属材料领域也有着较为广泛的应用。不仅可以切割硬度高、脆性大的材料，如氮化硅、陶瓷、石英等；还能切割加工柔性材料，如布料、纸张、塑料板、橡胶等。

2.7 激光安全与防护

2.7.1 激光的危害

焊接和切割中所用激光器输出功率或能量非常高，对脉冲激光为数焦耳至数百焦耳。激光设备中有数千伏至数万伏的高压激励电源，能对人体造成伤害。激光加工过程中应特别注意激光的安全防护，防护的重点对象是眼睛和皮肤。此外，也应注意防止火灾和电击等，否则将导致人身伤亡或其他事故。

① 对眼睛的伤害 激光的亮度比太阳、电弧亮度高数十个数量级，会对眼睛造成严重损伤。眼睛受到激光直接照射，会由于激光的加热效应造成视网膜烧伤，可瞬间使人致盲，后果最严重。即使是小功率的激光，如数毫瓦的 He-Ne 激光，也会由于人眼的光学聚焦作用，引起眼底组织的损伤。

在激光加工时由于工件表面对激光的反射，强反射的危险程度与直接照射时相差无几，而漫反射光会对眼睛造成慢性损伤，造成视力下降等结果。在激光加工时，人眼是应该重点保护的对象。

② 对皮肤的伤害 皮肤受到激光的直接照射会造成烧伤，特别是聚焦后，激光功率密度十分大，伤害力更大，会造成严重烧伤。长时间受紫外光、红外光漫反射的影响，可能导致皮肤老化、炎症和皮癌等病变。

③ 电击 激光束直接照射或强反射会引起可燃物的燃烧导致火灾。激光器中还存在着数千伏至数万伏的高压，存在着电击的危险。

④ 有害气体 激光焊时，材料受激烈加热而蒸发、气化，产生各种有毒的金属烟尘，高功率激光加热时形成的等离子体会产生臭氧，对人体有一定损害。

2.7.2 激光的安全防护

(1) 一般防护

a. 电器系统外罩的所有维修门应有适当的互锁装置，外罩应有相应措施以便在进入维修门之前使电容器组放电。激光加工设备应有各种安全保护措施，在激光加工设备上应设有明显的危险警示标志和信号，如“激光危险”、“高压危险”等。

b. 激光光路系统应尽可能全封闭，例如让激光在金属管中传递，以防发生直接照射；若激光光路如不能完全封闭，光束高度应设法避开眼、头等重要器官，让激光从人的高度以上通过。

c. 激光加工工作台应用玻璃等屏蔽，防止反射光。

d. 激光加工场地应用栅栏、隔墙、屏风等隔离，防止无关人员进入危险区。

(2) 人身保护

a. 激光器现场操作和加工工作人员必须配备激光防护眼镜，穿白色工作服，以减少漫反射的影响。

b. 只允许有经验的工作人员对激光器进行操作和进行激光加工。

c. 焊接区应配备有效的通风或排风装置。

第3章 电子束焊

电子束焊 (Electronic Beam Welding) 是高能量密度的焊接方法, 它利用空间定向高速运动的电子束, 撞击工件表面后, 将部分动能转化成热能, 使被焊金属熔化, 冷却结晶后形成焊缝。电子束撞击工件时, 其动能的 96% 可转化为焊接所需的热能, 能量密度高达 $10^3 \sim 10^5 \text{ kW/cm}^2$, 而焦点处的最高温度达 5930 C 左右。电子束焊在工业上的应用只有 50 年多的历史, 首先是用于原子能及宇航工业, 继而扩大到航空、汽车、电子、电器、机械、医疗、石油化工、造船、能源等几乎所有的工业部门, 创造了巨大的社会及经济效益。

3.1 电子束焊的特点及分类

3.1.1 电子束焊的特点

电子束撞击到工件表面时, 电子动能转化为热能, 使金属迅速熔化和蒸发。在高压金属蒸气的作用下熔化的金属被排开, 电子束能继续撞击深处的固态金属, 很快在被焊工件上钻出一个锁形小孔, 表层的高温还可以向焊件深层传导。随着电子束与工件的相对移动, 液态金属沿小孔周围流向熔池后部, 逐渐冷却, 凝固形成了焊缝。提高电子束的功率密度可以增加穿透深度。

现在被公认的一个理论是在电子束焊中存在小孔效应。小孔的形成过程是一个复杂的高温流体动力学过程。高功率密度的电子束轰击焊件, 使焊件表面材料熔化并伴随着液态金属的蒸发, 材料表面蒸发走的原子的反作用是力图使液态金属表面压凹, 随着电子束功率密度的增加, 金属蒸气量增多, 液面被压凹的程度也增大, 并形成一通道。

电子束经过通道轰击底部的待熔金属, 使通道逐渐向纵深发展, 如图 3.1 所示。

液态金属的表面张力和流体静压力是力图拉平液面的, 在达到力的平衡状态时, 通道的发展才停止, 并形成小孔。小孔和熔池的形状与焊接参数有关, 如图 3.2 所示。

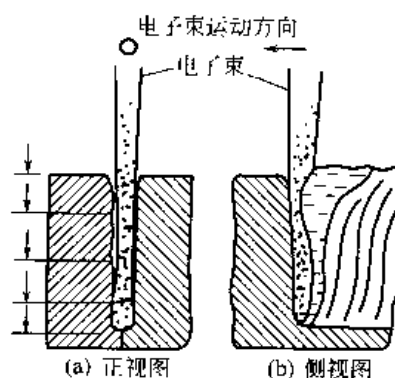


图 3.1 电子束焊时小孔形成的示意

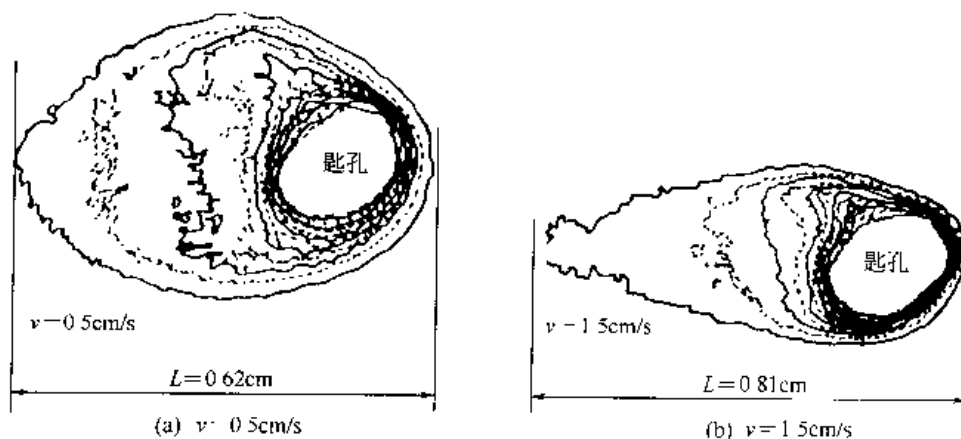


图 3.2 相同功率、不同焊接速度下, 小孔与熔池的形貌
(CCD 摄像结果, $P=3.6 \text{ kW}$, $I_f=512 \text{ mA}$, $I_b=60 \text{ mA}$)

形成深熔焊的主要原因是金属蒸气的反作用力。它的增加与电子束焊的功率密度成正比。电子束功率密度低于 10^5 W/cm^2 时，金属表面不产生大量蒸发现象，电子束的穿透能力很小。在大功率焊接中，电子束的功率密度可达 10^8 W/cm^2 以上，足以获得很深的穿透效应和很大的深宽比。在大厚度件的焊接中，焊缝的深宽比可高达 60:1，焊缝两边缘基本平行，似乎温度横向传导几乎不存在。

但是电子束在轰击路途上会与金属蒸气和二次发射的粒子碰撞，造成功率密度下降。液态金属在重力和表面张力的作用下对通道有浸灌作用和封口作用。从而使通道变窄，甚至被切断，干扰和阻断了电子束对熔池底部待熔金属的轰击。焊接过程中，通道不断被切断和恢复，达到一个动态平衡。

电子束焊具有很多优于传统焊接工艺方法的特点，归纳在表 3.1 中。

表 3.1 电子束焊的特点

特 点	内 容
焊缝深宽比高	电子束斑点尺寸小，功率密度大，可实现高深宽比（即焊缝深而窄）的焊接，深宽比达 60:1，可一次焊透 0.1~300mm 厚度的不锈钢板
焊接速度快，焊缝组织性能好	能量集中，熔化和凝固过程快。例如焊接厚度 125mm 的铝板，焊接速度达 40cm/min，是氩弧焊的 40 倍。高温作用时间短，合金元素烧损少，能避免晶粒长大，使接头性能改善，焊缝抗蚀性好
焊件热变形小	功率密度高，输入焊件的热量少，焊件变形小
焊缝纯度高	真空对焊缝有良好的保护作用，高真空电子束焊尤其适合焊接钛及钛合金等活性材料
工艺适应性强	工艺参数易于精确调节，便于偏转，对焊接结构有广泛的适应性
可焊材料多	不仅能焊接金属和异种金属材料的接头，也可焊接非金属材料，如陶瓷、石英玻璃等
再现性好	电子束焊的工艺参数易于实现机械化、自动化控制，重复性、再现性好，提高了产品质量的稳定性
可简化加工工艺	可将重复的或大型整体焊件分为易于加工的、简单的或小型部件，用电子束焊为一个整体，减少加工难度，节省材料，简化工艺

为了获得电子束焊的深熔焊效应，除了要增加电子束的功率密度外，还要设法获得减轻二次发射和液态金属对电子束通道的干扰。

3.1.2 电子束焊的分类

电子束焊是一种高能密度的电子束，轰击焊件使其局部加热和熔化而焊接起来。电子束焊按被焊工件所处环境的真空度可分为三类：高真空电子束焊、低真空电子束焊和非真空电子束焊。

① 高真空电子束焊 焊接是在高真空 ($10^{-1} \sim 10^{-1} \text{ Pa}$) 工作室的压强下进行。工作室和电子枪可用一套真空机组抽真空，也可用两套真空机组分别抽真空。为了防止扩散泵油污染工作室，工作室和电子枪室通道口处设有隔离阀。良好的高真空环境，可以保证对熔池的“保护”，防止金属元素的氧化和烧损，适用于活泼性金属、难熔金属和质量要求高的焊接。

② 低真空电子束焊 焊接是在低真空 ($10^{-1} \sim 10 \text{ Pa}$) 工作室内进行，但电子枪仍在高真空 (10^{-3} Pa) 条件下工作。电子束通过隔离阀和气阻通道进入工作室，电子枪和工作室各用一套独立的真空机组单独抽真空。低真空电子束焊也具有束流密度和功率密度高的特点。由于只需要抽到低真空，明显地缩短了抽真空的时间，提高了生产效率，适用于批量大的零件的焊接和生产线上使用。

③ 非真空电子束焊 焊机没有真空工作室，电子束仍是在高真空条件下产生的，然后通过一组光阑、气阻通道和若干级真空小室，引入到处于大气压力下的环境中对工件进行焊

接。在大气压下，电子束散射强烈，即使将电子枪的工作距离限制在 20~50mm，焊缝深宽比最大也只能达到 5:1。非真空电子束焊各真空室采用独立的抽真空系统，以便在电子枪和大气间形成压力依次增大的真空梯度。

不同类型真空电子束焊的特点及应用范围见表 3.2。

表 3.2 不同类型真空电子束焊的特点及应用范围

类型	真空度 /Pa	特点及应用范围
高真空电子束焊	5×10^{-4}	有效地防止熔化金属氧化燃烧,适合于活泼性金属、难熔金属、高要求大厚度工件的焊接
低真空电子束焊	$10^{-3} \sim 10^{-2}$	与高真空电子束焊相比,生产率高,适合于批量生产,焊接变速箱、组合齿轮取得很好的效果
非真空电子束焊	大气压	散射严重,使束流及功率密度显著降低,使焊缝熔深及深宽比明显降低,一次焊透不超过 30mm
局部真空	根据要求确定	用于移动式真空室,或在工件焊接部位制造局部真空进行焊接。适用于大型工件的焊接

目前，非真空电子束焊接能够达到的最大熔深为 30mm。这种方法的优点是不需要真空室，因而可以焊接尺寸大的工件，生产效率高。近年来，移动式真空室或局部真空电子束焊接方法，既保留了真空电子束焊高功率的优点，又不需要真空室，因而在大型工件的焊接工程上有应用前景。

3.1.3 电子束焊的优缺点

(1) 优点

a. 加热功率密度大。焊接用电子束电流为几十到几百毫安，最大可达 1000mA 以上；加速电压为几十到几百千伏；故电子束功率从几十千瓦到 100kW 以上，而电子束焦点直径小于 1mm。故电子束焦点处的功率密度可达 $10^3 \sim 10^5 \text{ kW/cm}^2$ ，比普通电弧功率密度高 100~1000 倍。

b. 焊缝深宽比 (H/B) 大。通常电弧焊的深宽比很难超过 2，电子束焊的深度比在 50 以上。电子束焊比电弧焊可节约大量填充金属和电能，可实现高深宽比的焊接，深宽比达 60:1，可依次焊透 0.1~300mm 厚度的不锈钢板。

c. 焊接速度快，焊缝热物理性能好。焊接速度快，能量集中，熔化和凝固过程快，热影响区小，焊接变形小。对精加工的工件可用作最后的连接工序，焊后工件仍能保持足够的精度。能避免晶粒长大，使焊接接头性能改善，高温作用时间短，合金元素烧损少，焊缝抗蚀性好。

d. 焊缝纯度高。真空电子束焊的真空度一般为 $5 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ ，这种焊接方式尤其适合焊接钛及钛合金等活性材料。

e. 焊接工艺参数调节范围广，适应性强。电子束焊接的工艺参数可独立地在很宽的范围内调节，控制灵活，适应性强，再现性好，而且电子束焊接参数易于实现机械化、自动化控制，提高了产品质量的稳定性。

f. 可焊材料多。不仅能焊金属和异种金属材料的接头，也可焊非金属材料，如陶瓷、石英玻璃等。

(2) 缺点

a. 设备复杂，价格贵，使用维护要求高。

b. 焊接装备要求高，尺寸受真空室大小的限制。

c. 需防护 X 射线。

电子束也可以用来在焊前对金属进行清理。这项工作是用宽的、不聚焦的电子束扫过表面实现的。把氧化物气化，同时把不干净的杂质和气体生成物清除掉，给控制栅极以脉冲电流就能精确地控制电子束的热量。这是使用一种与在电阻焊中使用的计时线路相似的线路，使频率能在很宽的范围内调节，获得短而恒定的焊接脉冲。

3.1.4 电子束焊的应用范围

电子束焊所具有的优越性，使其在工业发达国家得到了迅速发展和广泛应用。电子束焊接产品已由原子能、火箭、航空航天等国防尖端部门扩大到机械工业等民用部门。目前全世界拥有的电子束焊机约有 8000 多台，焊机功率为 2~300kW，实用的最大电子束焊机功率在 100kW 左右。

20 世纪 60 年代初，我国开始跟踪世界电子束焊焊接技术的发展，并开始其设备及工艺的研究工作。我国开展电子束焊工艺研究及应用的主要领域是航空航天、汽车、电力及电子等工业部门。

电子束焊技术在我国的一些工业部门中得到了广泛应用。我国科技人员先后对多种材料，如铝合金、钛合金、不锈钢、超高强钢、高温合金等进行了较系统的研究。在新型飞机、航空发动机、导弹等的试制中都用到了电子束焊技术。目前电子束焊已作为一种先进的制造技术应用于我国航空工业。

在我国其他工业部门中，采用电子束焊的主要有高压气瓶、核电站反应堆内构件筒体、汽车齿轮、电子传感器、雷达波导等。另外，炼钢炉的铜冷却风口、汽轮机叶片等也有的采用了电子束焊。

电子束焊接可应用于下述材料和场合：

- a. 除含锌高的材料（如黄铜）、低级铸铁和未脱氧处理的普通低碳钢外，绝大多数金属及合金都可用电子束焊接，按焊接性由易到难的顺序排列为钽、铌、钛、铂族、镍基合金、钛基合金、铜、钼、钨、铍、铝及镁；
- b. 可以焊接熔点、热导率、溶解度相差很大的异种金属；
- c. 可不开坡口焊厚大工件，焊接变形很小；能焊接可达性差的焊缝；
- d. 可用于焊接质量要求高，在真空中使用的器件，或用于焊接内部要求真空的密封器件；焊接精密仪器、仪表或电子工业中的微型器件；
- e. 散焦电子束可用于焊前预热或焊后冷却，还可用作钎焊热源。

电子束焊的研究和推广应用非常迅速。电子束加速电压由 20~40kV 发展为 60kV、150kV 甚至 300~500kV，焊机功率也由几百瓦发展为几千瓦、十几千瓦甚至数百千瓦，一次焊接的深度可达到数百毫米。

电子束焊接主要用于质量或生产率要求高的产品，前者主要用于核能、航空航天及电子工业，典型实例有核燃料密封罐、特种合金的喷气发动机部件、火箭推进系统压力容器、密封真空系统等；后者主要用于汽车、焊管、双金属锯条等，典型实例有汽车传动齿轮、直缝连续焊铜或钢管、齿部为钨钢（W6Mn65Cr4V2）背部为弹簧钢（50CrV2）的双金属机用锯条。

电子束焊接的部分应用实例见表 3.3。

近年来，国外对电子束焊及其他电子束加工技术的研究主要在于完善超高能密度电子束热源装置、掌握电子束品质和对材料的交互行为特性，以及通过计算机控制提高设备柔性、扩大应用领域等几个方面。

表 3.3 电子束焊接的部分应用实例

工业部门	应用实例
航空	发动机喷管、定子、叶片、双金属发动机、导向翼、翼盒、双螺旋线齿轮、齿轮组、主轴活门、燃料槽、起落架、旋翼桨毂、压气轮子、涡轮盘等
汽车	双金属齿轮、齿轮组、发动机外壳、发动机启动器用飞轮、汽车大梁、微动减震器、扭矩转换器、转向立柱吊架杆、旋转轴、轴承环等
宇航	火箭部件、导弹外壳、钨箔蜂窝结构、宇航站安装(宇航员用手提式电子枪)
原子能	燃料原件、压力容器及管道
电子器件	集成电路、密封包装、电子计算机的磁芯存储器及行式打印机用小锤、微型继电器、微型组件、薄膜电阻、电子管、钨加热器等
电力	电动机整流子片、双金属式整流子、汽轮机定子、电站锅炉联箱与管子的焊接
化工	压力容器、球形油罐、热交换器、环形传动带、管子与法兰焊接等
重型机械	厚板焊接、超厚板压力容器的焊接等
修理	各种修补修复有缺陷的容器、设计修改后要求的返修件。裂纹补焊、补强焊、堆焊等
其他	双金属锯条、钨坩埚、波纹管、焊接管道精密加工切割等

就工艺特性来说，真空电子束很高的能量密度保证大厚度的工件可以在不开坡口的条件下一次焊成，生产率显著提高。由于焊接热影响区宽度和变形都很小，能用于精密构件的焊接，也可以用于焊接经过热处理的构件，不致引起接头组织和性能的显著变化。因此，采用真空电子束焊，可以节约焊后校正变形及热处理所需要的人力和物力，改进焊接构件的生产工艺过程。

真空电子束焊的设备投资较高，所焊工件的尺寸受真空室大小的限制，这些因素在分析可行性时必须同时予以考虑。

3.2 电子束焊的设备与装置

3.2.1 电子束焊机的分类

电子束焊的焊接设备一般可按真空状态和加速电压分类。按真空状态可分为真空型、局部真空型、非真空型；按电子枪加速电压的高低可分为高压型（60~150kV）、中压型（40~60kV）、低压型（<40kV）。各种电子束焊机的类型、特点和适用范围见表 3.4。

表 3.4 各种电子束焊机的类型、特点和适用范围

焊机类型	技术特点	适用范围	
按焊接环境分类	高真空型	工作室真空度为 $10^{-4} \sim 10^{-1}$ Pa, 加速电压为 15 ~ 175kV, 最大工作距离可达 1000mm。电子束功率密度高, 焦点尺寸小, 焊缝深宽比大, 质量高。但真空系统较复杂, 抽真空时间长(几十分钟), 生产率低, 焊件尺寸受真空尺寸限制	适用于活泼金属、难熔金属、高纯度金属和异种金属的焊接, 以及质量要求高的工件的焊接
	低真空型	工作室真空度为 $10^{-1} \sim 10$ Pa, 加速电压为 40 ~ 150kV, 最大工作距离小于 700mm。不需要扩散泵, 焦点尺寸小, 抽真空时间短(几分钟至十几分钟), 生产率较高; 可用局部真空室满足大型件的焊接, 工艺和设备得到简化	适用于大批量生产, 如电子元件、精密仪器零件、轴承内外圈、汽轮机隔板、齿轮等的焊接
	非真空型	不需要真空工作室, 焊接在正常大气压下进行, 加速电压为 150 ~ 200kV, 最大工作距离为 25mm 左右。可焊接大尺寸工件, 生产效率高、成本低。但功率密度较低, 焊缝深宽比小(最大 5 : 1), 某些材料需用惰性气体保护	适用于大型工件的焊接, 如大型容器、导弹壳体、锅炉热交换器等

续表

焊机类型		技术特点	适用范围
按加速电压分类	高压型	加速电压为 60~150kV。同样功率下焊接所需束流小,易于获得直径小、功率密度大的束斑和深宽比大的焊缝,最小束斑直径小于 0.4mm。需附加铅板防护 X 射线,电子枪结构复杂笨重,只能做成定枪式	适用于大厚度板材单道焊以及难熔金属和热敏感性强的材料的焊接
	中压型	加速电压为 40~60kV,最小束斑直径约为 0.4mm。电子枪可做成定枪式或动枪式。X 射线无需采用铅板防护,通过真空室的结构设计(选择适当的壁厚)即可解决	适用于中、厚板焊接,可焊接的钢板最大厚度约为 70mm
	低压型	加速电压低于 40kV。设备简单,电子枪可做成定枪或小型移动式,无需用铅板防护。电子束流大、汇聚困难,最小束斑直径大于 1mm,功率限于 10kW 以内。X 射线防护由真空室结构设计解决	适用于焊缝深宽比要求不高的薄板焊接

3.2.2 电子束焊机的组成

在实际应用中,真空电子束焊机通常由电子枪、工作真空室、高压电源、控制及调整系统、真空系统、工作台以及辅助装置等几大部分组成。

(1) 电子枪

电子枪是电子束焊机的核心部件,是产生电子使之加速、会聚成电子束的装置。电子枪的稳定性、重复性直接影响焊接质量。影响电子束稳定性的主要因素是高压放电。往往在电子枪中使电子束偏转,避免金属蒸气对束源段产生直接的影响。在大功率焊接时,将电子枪中心轴线上的通道关闭,而被偏转的电子束从旁边通道通过。另外还可以采用电子枪倾斜或焊件倾斜的方法避免焊接时产生的金属蒸气对束源段污染。

电子枪一般安装在真空室的外部,垂直焊接时,放在真空室顶部,水平焊接时,放在真空室侧面,根据需要可使电子枪沿真空室在一定范围内移动。

(2) 高压电源及控制系统

高压电源为电子枪提供加速电压、控制电压及灯丝加热电流。高压电源应密封在油箱内,以防止对人体的伤害及对设备其他控制部分的干扰。近年来,半导体高频大功率开关电源已应用到电子束焊机中,工作频率大幅度提高,用很小的滤波电容器,即可获得很小的纹波系数;放电时所释放出来的电能很少,减少了其危害性。另外,开关电源通断时间比接触器短得多,与高灵敏度微放电传感器联用,为抑制放电现象提供了有力手段。

(3) 控制及调整系统

早期电子束焊机的控制系统仅限于控制束流的递减、电子束流的扫描及真空泵阀的开关。目前可编程控制器及计算机数控系统等已在电子束焊机上得到成功应用,使之控制范围和精度大大提高。

(4) 工作室及抽真空系统

真空电子束焊机的工作室尺寸由焊件大小或应用范围而定。真空室的设计一方面应满足气密性要求;另一方面应满足刚度要求;此外还要满足 X 射线防护需要。真空室上通常开一个或几个窗口用以观察内部焊件及焊接情况。

电子束焊机的真空系统一般分为两部分:电子枪抽真空系统和工作室抽真空系统。电子枪的高真空系统可通过机械泵与扩散泵配合获得。目前的新趋势是采用涡轮分子泵,其极限真空度更高,无油蒸气污染,不需要预热,节省抽真空时间。工作室真空度可在 $10^{-1} \sim$

10^{-4} Pa 之间。较低的真空可用机械泵获得，高真空则采用机械泵及扩散泵系统。

(5) 工作台和辅助装置

工作台、夹具、转台对于在焊接过程中保持电子束与接缝的位置准确、焊接速度稳定、焊缝位置的重复精度都是非常重要的。大多数的电子束焊机采用固定电子枪，让工件做直线移动或旋转运动来实现焊接。对大型真空室，也可采用使工件不动，而驱使电子枪进行焊接。为了提高生产效率，可采用多工位夹具，抽一次真空室可以焊接多个零件。

3.2.3 电子束焊机的技术参数

国外生产的电子束焊设备的品种较多，真空电子束设备已商品化。我国真空电子束焊机的研制自 20 世纪 80 年代以来取得了较大进展。目前中等功率的真空电子束焊机已形成了系列，50kV、60kV 的焊机已在实际生产中得到应用，一些焊接设备采用了微机控制等先进技术。

选用电子束焊设备时，应综合考虑被焊材料、板厚、形状、产品批量等因素。一般来说，焊接化学性能活泼的金属（如 W、Ta、Mo、Nb、Ti 等）及其合金应选用高真空焊机；焊接易蒸发的金属及其合金应选用低真空焊机；厚大工件选用高压型焊机，中等厚度工件选用中压型焊机；成批生产时选用专用焊机，品种多、批量小或单件生产则选用通用型焊机。部分国产电子束焊机的主要技术参数见表 3.5。

表 3.5 部分国产电子束焊机的主要技术参数

焊机型号	加速电压/kV	电子束流/mA	真空工作室	
			尺寸/mm	真空度/Pa
ZD 7.5	30	250	860×530×740	5×10^{-2}
ZD 08	40	20	350×300×300	4×10^{-1}
ZD-5040	50	40	300×200×200	—
ZD-6070	60	70	600×400×600	—
ZD-18	80	100	∅1000×1800	—
GDH-15	150	100	2100×1300×1100	—
EBW-25-30	30	250	600×800×1000	—
EBW-4G	50	80	260×170×390	—
EBW-7G-2	55	125	230×290×140	—
EBW-7.5	60	125	600×700×1000	—
SD-12'50	50	120	600×700×1000	—
E01	60	100	1800×3400×2400	2×10^{-2}
HDZ-2	30	40	200×200×180	2×10^{-2}
HDZ-6	50	120	700×700×700	5×10^{-1}
HDZ 6A	60	120	700×700×700	5
HDZ-7.5	60	125	700×700×700	2×10^{-2}
HDZ-10	60	167	700×700×700	2×10^{-2}
HDZ-15A	60	250	1500×1500×1200	5
EZ-60/40	60	40	600×700×900	—
EZ 60/100	60	100	600×700×900	—
EZ-60/200	60	200	1000×600×600	5×10^{-2}
EZ-150/75	150	75	2100×1200×2300	5×10^{-2}

3.3 电子束焊的焊接工艺

3.3.1 电子束焊工艺特点

(1) 薄板的焊接

薄板导热性差，电子束焊接时局部加热强烈。为防止过热，应采用夹具，并且对极薄工件可考虑使用脉冲电子束流。电子束功率密度高，易于实现厚度相差很大的接头的焊接。焊接时薄板与厚板紧贴，适当调节电子束焦点位置，使接头两侧均匀熔化。

(2) 厚板的焊接

目前，电子束可以一次焊透 300mm 的钢板。焊道的深宽比可以高达 50:1。当被焊钢板厚度在 60mm 以上时，应将电子枪水平放置进行横焊，以利于焊缝成形。电子束焦点位置对于熔深影响很大，在给定的电子束功率下，将电子束焦点调节在工件表面以下，熔深的 0.5~0.75mm 处电子束的穿透能力最好。根据实践经验，焊前将电子束焦点调节在板材表面以下，板厚的 1/3 处，可以发挥电子束的熔透效力并使焊缝成形良好。表 3.6 列出不同焊接条件对电子束焊熔深的影响。

表 3.6 电子束焊不同焊接条件对钢板熔深的影响

真空度, Pa	焊接条件				熔深/mm
	电子束工作距离/mm	电子束电流, mA	加速电压, kV	焊接速度/cm·s ⁻¹	
<10 ⁻²	500	50	130	1.50	25
10 ⁻²	200	30	150	1.50	16
10 ⁰	13	43	175	1.50	4

(3) 添加填充金属

只有在对接头有特殊要求或者接头准备和焊接条件的限制不能得到足够的熔化金属时，才添加填充金属，其主要作用是：

- a. 在接头装配间隙过大时可防止焊缝凹陷；
- b. 在焊接裂纹敏感材料或异种金属接头时可防止裂纹的产生；
- c. 在焊接沸腾钢时加入少量的脱氧剂（铝、锰、硅等）的焊丝，或在焊接铜时加入镍均有助于消除气孔。

添加填充金属的方法是在接头处放置填充金属，箔状填充金属可夹在接缝的间隙处，丝状填充金属可用送丝机构送入或用定位焊固定。

(4) 定位焊

用电子束进行定位焊是装夹工件的有效措施。其优点是节约装夹时间和费用。可以采用焊接束流或弱束流进行定位焊，对于搭接接头可用熔透法定位，有时先用弱束流定位，再用焊接束流完成焊接。

(5) 焊接可达性差的接头

因为电子束很细，工作距离长，易于控制，所以电子束可以焊接狭窄间隙的底部接头。这不仅可以用于生产过程，而且在修复报废零件时也非常有效。复杂形状的昂贵铸件常用电子束来修复。对可达性差的接头只有满足以下条件才能进行电子束焊：

- a. 焊缝必须在电子枪允许的工作距离上；
- b. 必须有足够宽的间隙允许电子束通过，以免焊接时误伤工件；
- c. 在束流通过的路径上应无干扰磁场。

(6) 电子束扫描和偏转

在焊接过程中采用电子束扫描可以加宽焊缝，降低熔池冷却速度，消除熔透不均等缺陷，降低对接头准备的要求。

在焊接大厚度工件时为了防止焊接所产生的大量金属蒸气和离子直接侵入电子枪，可设

置电子束偏转装置，使电子枪轴线与工件表面的垂直方向成 $5^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 夹角。这对于大量生产中保证电子枪工作稳定是十分有利的。

(7) 焊接缺陷及其防止

电子束焊和其他熔化焊一样，接头也会出现未熔合、咬边、焊缝下陷、气孔、裂纹等缺陷。此外电子束焊焊缝特有的缺陷有熔深不均、长空洞、中部裂纹和由于剩磁或干扰造成的焊道偏离接缝等。

熔深不均出现在不穿透焊缝中，这种缺陷是高能束流焊接所特有的。它与电子束焊接熔池的形成和金属的流动有密切的关系。加大小孔直径可消除这种缺陷。改变电子束焦点在工件内的位置也会影响到熔深的大小和均匀程度。适当的散焦可以加宽焊缝，有利于消除和减小熔深不均的缺陷。

3.3.2 焊前准备及接头设计

(1) 焊前准备

1) 接合面的加工与清理

电子束焊接头属紧密配合无坡口对接形式，一般不加填充金属，仅在焊接异种金属或合金，又确有必要时才使用填充金属。要求接合面经机械加工，表面粗糙度一般为 $1.5 \sim 25 \mu\text{m}$ 。宽焊缝比窄焊缝对接合面的要求可放宽，搭接接头也不必过严。

真空电子束焊前必须对焊件表面进行严格清理，否则导致焊缝缺陷，力学性能变坏，还影响抽气时间和焊枪运行的稳定性。对非真空电子束焊的焊件清理，不必像真空焊那样严格，因为它只对焊缝质量有影响。清理方法可用丙酮，若为了强力去油而使用含有氯化烃类溶剂，随后必须将工件放在丙酮内彻底清洗。清理完毕后不能再用手或工具触及接头区，以免污染。

2) 接头装配

电子束焊接头要紧密接合，不留间隙，并尽量使接合面平行，以便窄小的电子束能均匀熔化接头两边的母材。装配公差取决于焊件厚度、接头设计和焊接工艺，装配间隙宜小不宜大。焊薄工件时装配间隙要小于 0.13mm 。

随板厚增加，可用稍大一些的间隙。焊铝合金可用间隙比钢大一些。若采用偏转或摆动电子束使熔化区变宽时，可以用较大的间隙。非真空电子束焊有时用到 0.75mm 的间隙。深熔焊时，装配不良或间隙过大，会导致过量收缩、咬边、漏焊等缺陷，大多数间隙不应大于 0.25mm 。

3) 夹紧

所有电子束焊都是机械或自动操作的，如果零件不是设计成自紧式的，必须利用夹具进行定位与夹紧，然后移动工作台或电子枪体完成焊接。

要使用无磁性的金属制造所有的夹具和工具，以免电子束发生磁偏转。对夹具的强度和刚度要求不必像电弧焊那样高，但要求制造精确，因为电子束焊要求装配和对中极为严格。非真空电子束焊可用一般焊接变位机械，其定位、夹紧都较为简便。

4) 退磁

所有的磁性金属材料在电子束焊之前应加以退磁。剩磁可能因磁粉探伤、电磁卡盘或电化加工等造成，即使剩磁不大，也足以引起电子束偏转。焊件退磁可放在工频感应磁场中，靠慢慢移出进行退磁，也可用磁粉探伤设备进行退磁。

对于极窄焊缝，剩磁感应强度为 $0.5 \times 10^{-4} \text{T}$ ；对于较宽焊缝，剩磁感应强度为 $(2 \sim 4) \times$

$10^{-4}T$ 。

(2) 接头设计

电子束焊接的接头形式有对接、角接、T形接头、搭接、端接等，而且均可进行无坡口全熔透或给定熔深的单道焊。这些接头原则上都可以用于电子束焊接的一次穿透完成。如果电子束的功率不足以穿透接头的全厚度，也可采取正反两面焊的方法来完成。

电子束焊不同接头有各自特有的接合面设计、接缝准备和施焊的方位。设计原则是便于接头的准备、装配和对中，减少收缩应力，保证获得所需熔透度。

1) 对接接头

电子束焊的对接接头形式如图 3.3 所示。对接接头的准备最简便，适于部分或全熔透焊，只需装妥夹紧即可。不等厚度板对接或平齐接比台阶接为好〔见图 3.3 中(b)、(c)〕。焊台阶焊缝时，需采用较宽的电子束施焊，且焊接角度须精确控制，否则极易焊偏造成脱焊。图 3.3 中的自定位接头，在环境、周边焊和其他特定焊缝中可以自行紧固。当采用部分母材作填充金属时，焊缝成形可得到改善。斜对接头可增大焊缝金属面积，但装夹定位比较困难，只用于受结构条件或其他原因限制的情况。

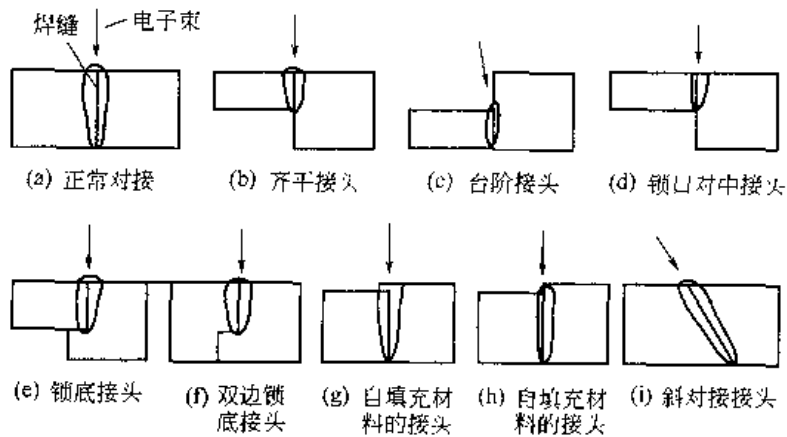


图 3.3 电子束焊的对接接头

2) 角接头

电子束焊最常用的角接头形式如图 3.4 所示。图 (a) 接头留有未焊合的接缝，承载能

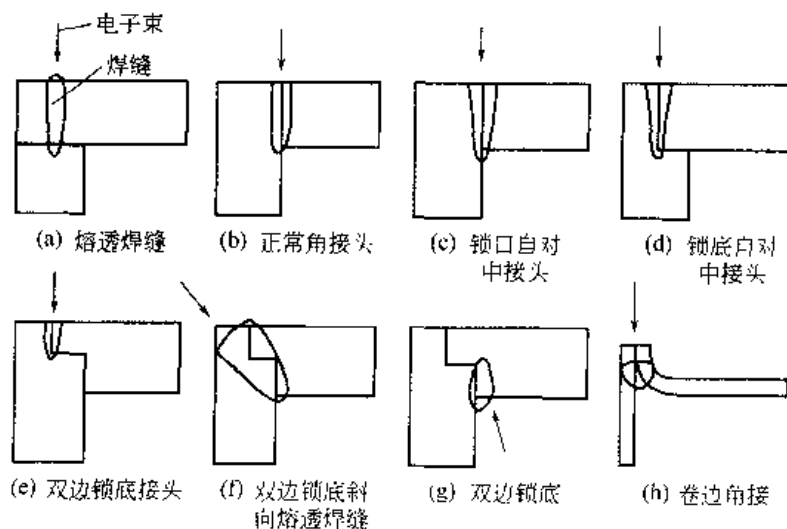


图 3.4 电子束焊角接头

力差。图 (h) 主要用于薄件，其中一个焊件须精确预先弯边 90° 。其他几种接头都易于装配与对齐。

3) T形接头

电子束焊最常用的 T 形接头形式如图 3.5 所示。图 (a) 接头有未焊合的缝隙，接头强度差，且有缺口和腐蚀敏感性。图 (b) 为较好的接头，焊接时焊缝易于收缩，拘束应力小。图 (c) 为双面焊的 T 形接头，用于板厚超过 25mm 的场合，焊接第二面时，先焊的第一面焊缝起拘束作用，有开裂倾向。

4) 搭接接头

常用于焊接厚度小于 1.6mm 的焊件，图 3.6 所示为其中常用的三种接头形式。图 (a) 和 (b) 均有剩余未焊透的缝隙。其中熔透型接头主要用于板厚为 0.2mm 以下的场合，有时需采用散焦电子束或电子扫描以增加熔合区宽度。厚板搭接焊时，需填充焊丝以增加填角尺寸，有时也采用散焦电子束以加宽焊缝，并形成平滑的过渡。

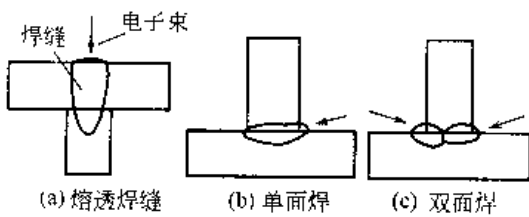


图 3.5 电子束焊的 T 形接头与焊缝

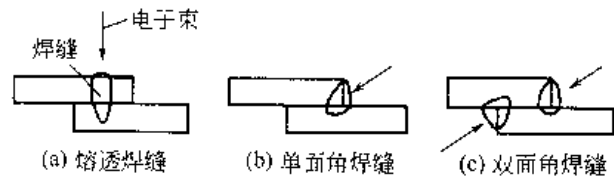


图 3.6 电子束焊的搭接接头与焊缝

5) 端接接头

三种典型的电子束焊端接接头如图 3.7 所示。厚板端接采用大功率深熔透焊，薄件或不等厚件常采用小功率或散焦电子束进行焊接。

3.3.3 电子束焊的工艺参数

电子束焊的主要焊接参数是加速电压 U_a 、电子束电流 I_b 、聚焦电流 I_f 、焊接速度 v 和工作距离。电子束焊的焊接工艺参数主要按板厚来选择。图 3.8 所示为电子束热量输入与板厚的关系。板厚越大，所要求的热输入越高。

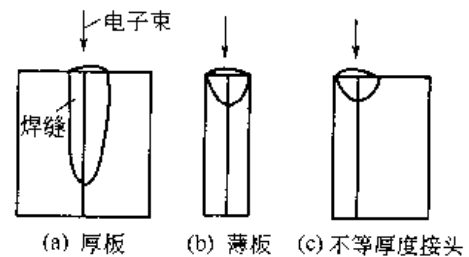


图 3.7 电子束焊的端接接头与焊缝

(1) 加速电压

在大多数电子束焊中，加速电压参数往往不变，根据电子枪的类型通常选取某一数值。在相同的功率、不同的加速电压下，所得焊缝深度和形状是不同的。提高加速电压可增加焊缝的熔深，在保持其他参数不变的条件下，焊缝横断面深宽比与加速电压成正比例。当焊接大厚件并要求得到窄而平的焊缝或电子枪与焊件的距离较大时可提高加速电压。

(2) 电子束电流

电子束电流与加速电压一起决定着电子束的功率。增加电子束电流，熔深和熔宽都会增加。在电子束焊中，由于加速电压基本不变，所以为满足不同的焊接工艺的需要，常常要调整电子束电流值。这些调整包括以下几方面：

- a. 在焊接环缝时，要控制电子束电流的递增、递减，以获得良好的起始、收尾搭接处质量；
- b. 在焊接各种不同厚度的材料时，要改变电子束电流，以得到不同的熔深；

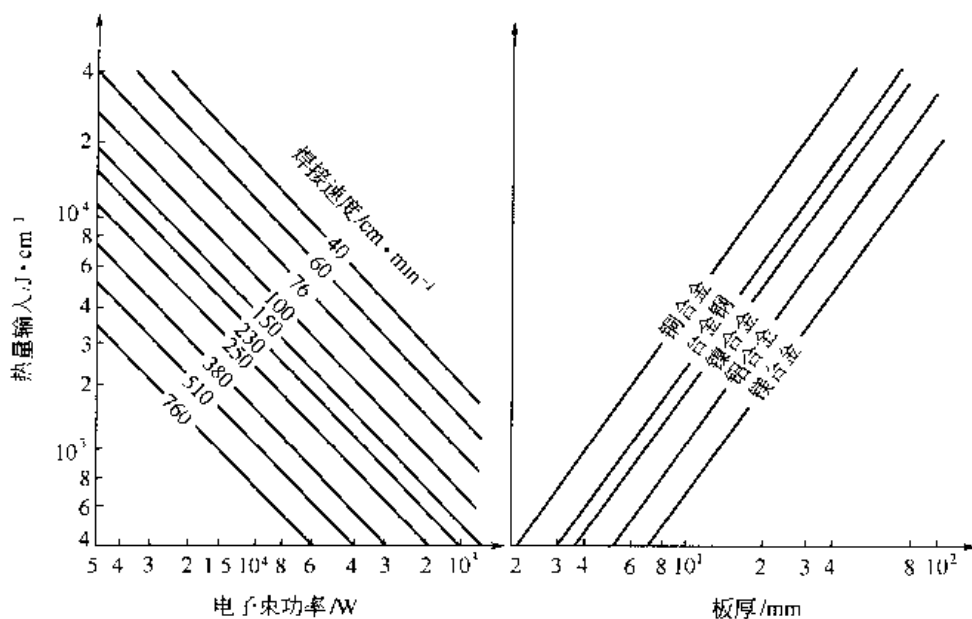


图 3.8 电子束功率、热量输入和焊接速度与板厚的关系

c. 在焊接大厚件时，由于焊接速度较低，随着焊件温度的增加，电子束电流需逐渐减小。

(3) 焊接速度

焊接速度和电子束功率一起决定着焊缝的熔深、焊缝宽度以及被焊材料熔池形状（冷却、凝固及焊缝熔合线形状）。增加焊接速度会使焊缝变窄，熔深减小。

(4) 聚焦电流

电子束焊时，相对于焊件表面而言，电子束的聚焦位置上有上焦点、下焦点和表面焦点三种，焦点的位置对焊缝形状影响很大。根据被焊材料的焊接速度、焊缝接头间隙等决定聚焦位置，进而确定电子束斑点大小。

当焊件被焊厚度大于 10mm 时，通常采用下焦点焊（即焦点处于焊件表面的下层），且焦点在焊缝熔深的 30% 处。当焊接厚度大于 50mm 时，焦点在焊缝熔深的 50%~70% 之间更合适。

(5) 工作距离

焊件表面与电子枪的工作距离影响到电子束的聚焦程度，工作距离变小时，电子束的压缩比增大，使电子束斑点直径变小，增加了电子束功率密度。但工作距离太小，会使过多的金属蒸气进入枪体造成放电，因而在不影响电子枪稳定工作的前提下，可以采用尽可能短的工作距离。表 3.7 列出常用材料的电子束焊接的工艺参数。

3.3.4 获得深熔焊的工艺方法

电子束焊的最大优点是具有深穿透效应。为了保证获得深穿透效果，除了选择合适的电子束焊工艺参数外，还可以采取如下的一些工艺措施。

(1) 电子束水平入射焊

当焊接熔深超过 100mm 时，可以采用电子束水平入射，侧向焊接方法进行焊接。因为水平入射侧向焊接时，液态金属在重力作用下，流向偏离电子束轰击路径的方向，其对小孔通道的封堵作用降低，此时的焊接方向可以是自下而上或是横向水平。

(2) 脉冲电子束焊

表 3.7 常用材料的电子束焊接的工艺参数

材 质	板厚/mm	加速电压 U_a /kV	电子束电流 I_b /mA	焊接速度 v /cm·s ⁻¹
低合金钢、低碳钢	3	28	120	1.67
		50	130	2.67
	12	50	80	0.50
	15	30	350	0.50
不锈钢	1.3	25	28	0.86
	2.0	55	17	2.83
	5.5	50	140	4.17
	8.7	50	125	1.67
奥氏体钢	15	30	140	0.56
		30	230	1.39
		30	330	2.22
纯钛	0.13	5.1	18	0.67
	3.2	18	80	0.33
钛合金 6Al4V	6.4	10	180	2.53
	12.7	45	270	2.12
	19.1	50	500	2.12
	25.4	50	330	1.90
	6.4	35	95	1.48
铝及铝合金	12.7	25.9	235	1.17
		40	150	1.70
	19.1	10	180	1.70
	25.4	29	250	0.33
		50	270	2.53
纯铜	10	50	190	1.67
	18	55	240	0.37
钨	1.52	23	250	0.58
	2.54	150	16	0.83
钼	0.13	30	260	1.67
	1.0	21	130	0.67
钼 0.5 钛	0.76	25	57	0.75
	2	90	60	2.57
	2.54	135	12	1.13
	3	90	60	2.57
铌	2.5	28.2	170	0.92
钽 0.1 钨	3.2	30	250	0.50

在同样功率下，采用脉冲电子束焊，可有效地增加熔深。因为脉冲电子束的峰值功率比直流电子束高得多，使焊缝获得高得多的峰值温度，金属蒸发速率会以高出一个数量级的比例提高。脉冲焊可产生更多的金属蒸气，蒸气反作用力增大，小孔效应增加。

(3) 变焦电子束焊

极高的功率密度是获得深熔焊的基本条件。电子束功率密度最高的区域在其焦点上。在焊接大厚度焊件时，可使焦点位置随着焊件的熔化速度变化而改变，始终以最大功率密度的电子束来轰击待焊金属。但由于变焦的频率、波形、幅值等参数是与电子束功率密度、焊件厚度、母材金属和焊接速度有关的，所以手工操作起来比较复杂，宜采用计算机自动控制。

(4) 焊前预热或预置坡口

焊件在焊前被预热，可减少焊接时热量沿焊缝横向的热传导损失，有利于增加熔深。有些高强度钢焊前预热，还可以减少焊后裂纹倾向。在深熔焊时，往往有一定量的金属堆积在

焊缝表面，如果预开坡口，则这些金属会填充坡口，相当于增加了熔深。另外，如果结构允许，尽量采用穿透焊，因为液态金属的一部分可以在焊件的下表面流出，以减少熔化金属在接头表面的堆积，减少液态金属的封口效应，增加熔深，减少焊根缺陷。

3.4 金属材料的电子束焊

3.4.1 钢铁材料的电子束焊

(1) 低碳钢

低碳钢易于焊接。电子束焊与电弧焊相比，焊缝和热影响区晶粒细小。焊接沸腾钢时，应在接头间隙处夹一厚度为 0.2~0.3mm 的铝箔，以消除气孔。半镇静钢焊接有时也会产生气孔，降低焊速，加宽熔池也有利于消除气孔。

(2) 低合金钢

低合金钢电子束焊接的焊接性与电弧焊类似。非热处理钢易于用电子束焊进行焊接，接头性能接近退火基体。经热处理强化的钢材，在焊接热影响区的硬度会下降，采用焊后回火处理可以使其硬度回升。焊接刚性大的工件时，特别是基本金属已处于热处理强化状态时，焊缝易出现裂纹。合理设计接头使焊缝能够自由收缩，采用焊前预热、焊后缓冷以及合理选择焊接条件等方法可以减轻淬硬钢的裂纹倾向。

对于需进行表面渗碳、渗氮处理的零件，一般应在表面处理前进行焊接。如果必须在表面处理后进行焊接，则应先将焊缝区的表面处理层除去。

(3) 不锈钢

奥氏体不锈钢、沉淀硬化不锈钢、马氏体不锈钢都可以电子束焊。电子束焊极高的冷却速度有助于抑制奥氏体中碳化物析出，奥氏体、半奥氏体类不锈钢的电子束焊接都能获得性能良好的接头，具有较高的抗晶间腐蚀的能力。马氏体不锈钢可以在任何热处理状态下进行焊接，但焊后接头区会产生淬硬的马氏体组织，增加了裂纹敏感性。而且随着含碳量的增加和焊接速度的加快，马氏体的硬度将提高，开裂敏感性也较强。必要时可用散焦电子束预热的方法来加以预防。

3.4.2 有色金属的电子束焊

(1) 铝及铝合金的焊接

真空电子束焊焊接纯铝及非热处理强化铝合金是一种理想的方法，单道焊接工件厚度可达到 475mm。热影响区小，变形小，不填焊丝，焊缝纯度高，接头的力学性能与母材退火状态接近。

非热处理强化铝合金容易进行电子束焊，接头性能接近于母材。热处理强化铝合金电子束焊时可能产生裂纹或气孔，有的接头性能低于其基体。可用填加适当成分的填充金属、降低焊速、焊后固溶时效处理等方法来加以改善。对于热处理强化铝合金、铸造铝合金只要焊接工艺参数选择合适，可以明显减少热裂纹和气孔等缺陷。

采用电子束焊接铝及铝合金常用的焊接接头形式有对接、搭接、T形接头，接头装配间隙小于 0.1mm。铝及铝合金真空电子束焊接的工艺参数见表 3.8。

焊前应对接缝两侧宽度不小于 10mm 的表面应用机械和化学方法进行除油和清除氧化膜处理，为了防止气孔和改善焊缝成形，对厚度小于 40mm 的铝板，焊速应在 60~120cm/min；对于 40mm 以上的厚铝板，焊速应在 60 cm/min 以下。

不同厚度铝合金电子束焊工艺参数示例见表 3.9。

表 3.8 铝及铝合金真空电子束焊接的工艺参数

板厚 mm	坡口 形式	加速电 压 kV	电子束 电流/mA	焊接速度 cm·s ⁻¹	板厚 mm	坡口 形式	加速电 压 kV	电子束 电流 mA	焊接速度 cm·s ⁻¹
1.3	I	22	22	0.31	25.1	I	29 50	250 270	0.33 2.53
3.2	I	25	25	0.33	50.0	I	30	500	0.16
6.4	I	35	95	1.17	60.0	I	30	1000	0.18
12.7	I	26 40	240 150	1.67 1.69	152.0	I	30	1025	0.03
19.1	I	40	180	1.60	—	—	—	—	—

表 3.9 不同厚度铝合金电子束焊的工艺参数示例

铝合金牌号	厚度 mm	电子束功率/kW	焊接速度 cm·s ⁻¹	焊接位置
5A06(LF6)	0.6	0.4	1.7	平焊、电子枪垂直
	5	1.7	2.0	平焊、电子枪垂直
	100	21	0.1	横焊、电子枪平放
	300	30	0.4	横焊、电子枪平放
7A01(LC4)	10	4.0	2.5	平焊、电子枪垂直
4047A(LD8)	18	8.7	1.7	平焊、电子枪垂直

(2) 铜及铜合金的焊接

电子束的能量密度和穿透能力比等离子弧还强，利用电子束对铜及铜合金作穿透性焊接有很大的优越性。电子束焊接时一般不加填充焊丝，冷却速度快，晶粒细，热影响区小，在真空下焊接可以完全避免接头的氧化，还能对接头除气。铜及铜合金真空电子束焊缝的气体含量远远低于母材。焊缝的力学性能与热物理性能可达到与母材相等的程度。

电子束焊接含 Zn、Sn、P 等低熔点元素的黄铜和青铜时，这些元素的蒸发会造成焊缝合金元素的损失。此时应采用避免电子束直接长时间聚焦在焊缝处的焊接工艺，如使电子束聚焦在高于工件表面的位置，或采用摆动电子束的方法。

电子束焊接厚大铜件时，会出现因电子束冲击发生熔化金属的飞溅问题，导致焊缝成形变坏。此时可采用散射电子束修饰焊缝的办法加以改善。表 3.10 列出铜及铜合金电子束焊的工艺参数。表 3.11 列出电子束焦点位置与熔深的关系。

表 3.10 铜及铜合金电子束焊的工艺参数

板厚/mm	焊接电流 /A	焊接电压 /V	焊接速度 cm·s ⁻¹	板厚/mm	焊接电流 /A	焊接电压 /V	焊接速度 cm·s ⁻¹
1	70	14	0.56	6	250	20	0.50
2	120	16	0.56	10	190	50	0.30
4	200	18	0.50	18	240	55	0.11

表 3.11 电子束焦点位置与熔深的关系

金属中的杂 质总含量/%	电子束功率/kW	熔化深度/mm			平均熔深/mm
		焦点低于工件表面	焦点在工件表面	焦点高于工件表面	
0.035	6.9	7.0	7.5	8.0	5.5
	5.7	5.0	5.75	6.25	5.5
	4.0	2.5	3.25	3.5	5.3
0.0048 (无氧铜)	6.9	6.75	7.5	8.5	6.0
	5.7	5.5	6.0	6.5	6.0
	4.0	4.5	4.25	3.75	6.0

电子束焊接一般采用不开坡口、不留间隙的对接接头。可用穿透式，也可用锁边式（或称镶嵌式）。对一些非受力件接头也可直接采用塞焊接头。

(3) 钛及钛合金的焊接

钛在高温时会迅速吸收 O_2 和 N_2 ，从而降低韧性，采用真空电子束焊可获得优质焊缝。与其他熔焊方法相比，真空电子束焊焊接钛及钛合金具有独特的优势。首先是真空度通常为 10^{-3} Pa，污染程度仅为 0.000066%，比含量为 99.99% 的高纯度氩的纯度高出 3 个数量级，对液态和高温的固态金属不可能导致污染，焊接接头的氢、氧、氮含量比钨极氩弧焊时低得多。

其次，由于真空电子束焊的能量密度比等离子弧焊高，焊缝和热影响区很窄，过热倾向相当微弱，晶粒不致显著粗化（见表 3.12），因而抑制了焊接接头区域的脆化倾向，能够保证良好的力学性能。

表 3.12 Ti-6Al-6V-2Sn 钛合金电子束焊接头的热影响区宽度和晶粒尺寸

焊接方法	板厚/mm	焊缝宽度/mm	热影响区宽度/mm	热影响区晶粒尺寸/mm
钨极氩弧焊	1.65	7.9~9.5	2.54	0.89
	2.36	9.5~11.1	3.56~4.57	0.89
高压电子束焊	1.27	2.18	0.05	0.25~0.51
高压电子束焊	2.41	1.52	0.05	0.25~0.64
低压电子束焊	3.18	3.56	1.27	0.25~0.64

由 TC4 钛合金电子束焊接头的力学性能（见表 3.13）可见，采用同质焊丝钨极氩弧焊的 TC4 钛合金接头，其强度和塑性都比母材低，尤其塑性的下降更为显著，由于焊接冶金和热作用的结果，断裂发生在焊缝或热影响区。而电子束焊接头的断裂发生在母材上，因此真空电子束焊的焊接接头力学性能不逊于母材。

表 3.13 TC4 钛合金电子束焊接头的力学性能

焊接方法	抗拉强度 σ_b /MPa	屈服强度 σ_s /MPa	伸长率 δ_5 /%	强度系数/%	断裂位置
电子束焊	1117.2	1046.6	12.5	96.8	母材
钨极氩弧焊 (TC4 焊丝)	964.4	909.4	4.4	84.0	焊缝或 热影响区
TC4 母材	1150.5	1102.5	11.8	—	

真空电子束焊比钨极氩弧焊能量密度高，焊缝的深宽比大，几百毫米厚的钛及钛合金板材不开坡口可一次焊成，而且焊缝窄、热影响区小、晶粒细、接头性能好。

电子束焊对钛和钛合金薄壁工件的装配要求高，不然焊接中易产生塌陷。为了预防焊缝中的气孔，焊前要认真清理焊件坡口两侧的油锈，尽量降低母材中的气体含量。对焊缝进行重熔，一次重熔可使直径 0.3~0.6mm 的气孔完全消失，二次重熔可使更小的气孔大为减少。

防止钛及钛合金电子束焊表面缺陷的措施有：选择合适的焊接工艺参数，使电子束沿焊缝作频率为 20~50Hz 的纵向摆动，加焊一道修饰焊缝。钛及钛合金电子束焊的工艺参数见表 3.14。Ti-5Al-2.5Sn 钛合金电子束焊接头的力学性能见表 3.15。

表 3.14 钛及钛合金电子束焊的工艺参数

板厚/mm	加速电压/kV	电子束电流/mA	焊接速度/cm·s ⁻¹	板厚/mm	加速电压/kV	电子束电流/mA	焊接速度/cm·s ⁻¹
0.7	90	4	2.52	20	40	150	2.02
1.3	100	5	5.32	55	60	390~480	1.67~1.94
3	60	28	1.12	75	60	480	0.67
5	60	16	0.56	80	55	400	0.46
10	60	50~70	1.57~1.91	150	60	800	0.42
13	40	100	1.71	-	-	-	-

表 3.15 Ti-5Al-2.5Sn 钛合金电子束焊接头的力学性能

部 位	抗拉强度/MPa	伸长率/%	断面收缩率/%	冲击韧性/J·cm ⁻²
母材(板厚 10mm)	829.9	10.1	31.2	82.4
焊缝	833.9	14.8	36.2	54.2

3.4.3 难焊金属的电子束焊

TiAl 金属间化合物也是一种室温塑性差的材料, 但通过 Cr、Mn、V、Mo 等元素的合金化和控制组织, 使其形成一定比例和形态的 ($\gamma + \alpha_2$) 两相组织, 可使其室温伸长率提高到 2%~4%。因此, 一些 TiAl 合金都设计成室温具有 ($\gamma + \alpha_2$) 的层片状组织, α_2 呈薄片状, 穿越 γ 晶粒。这种双相组织是在冷却过程中通过 $\alpha \rightarrow (\alpha_2 + \gamma)$ 的共析反应获得的。

在 Ti-Al48 合金中, 约在 1130~1375℃ 的高温温度范围内 γ 相转变为 α 相, 但冷却过程中 α 相转变为 γ 相非常快。将 Ti-Al48-Cr2-Nb2 合金由 1400℃ 的 α 相区淬火, 导致向 γ 相的块状转变, 只有在缓冷时才能获得层片状组织。因此, 焊接时较快的冷却速度将使 TiAl 合金的理想组织状态受到破坏, 使其恢复原来的脆性, 甚至引起固态裂纹。

采用电子束焊焊接厚度 10mm 的 Ti-Al48-Cr2-Nb2 合金时, 预热 750℃ 可使焊缝转变为层片状组织, 但没有预热的快速冷却时, 焊缝主要以块状转变。在这种高冷却速度的条件下, 焊缝极易开裂, 因此必须严格控制焊接热过程。TiAl 合金同样存在氢脆问题, 由于目前所用的焊接方法都是低氢的, 因此氢并没有成为一个主要问题。

采用电子束焊对 TiAl 合金的焊接裂纹敏感性进行了研究, 所用材料为 TiB₂ 颗粒强化的 Ti-Al48 合金, 所含强化相 TiB₂ 的体积分数为 6.5%, 组织为层片状 $\alpha_2 + \gamma$ 的晶团、等轴 α_2 和 γ 晶粒以及短而粗的 TiB₂ 颗粒。电子束焊所用的工艺参数和相应的热影响区冷却速度见表 3.16。

表 3.16 电子束焊的工艺参数及热影响区冷却速度

焊接速度/cm·s ⁻¹	加速电压/kV	电子束电流/mA	预热温度/℃	冷却速度/℃·s ⁻¹
0.2	150	2.2	27	90
0.6	150	2.5	27	650
1.2	150	4.0	27	1015
2.4	150	6.0	27	1800
0.2	150	2.2	300	35
0.6	150	2.5	335	200
0.6	150	2.5	170	400
1.2	150	4.0	335	310
0.6	100	2.0	470	325
1.2	150	3.5	27	1320

冷却速度对裂纹倾向的影响如图 3.9 所示, 当热影响区冷却速度低于 300℃/s 时裂纹不

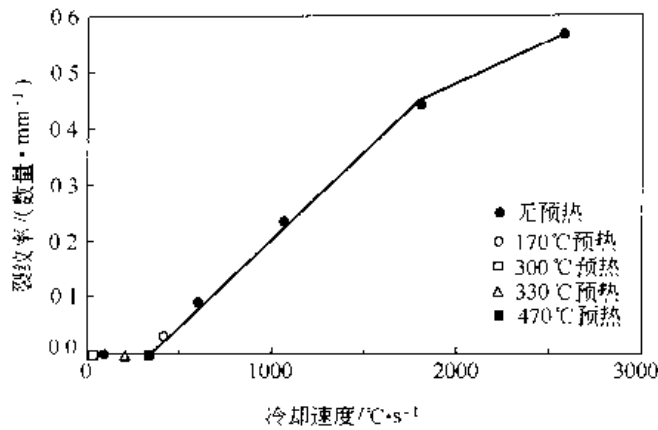


图 3.9 裂纹率与热影响区平均计算冷却速度的关系
(由 1400°C 冷却至 800°C)

敏感；冷却速度超过 300°C/s 后，裂纹敏感性随冷却速度的增加呈直线增加。冷却速度超过 400°C/s 时产生横向大裂纹，并可能扩展到两侧母材中。从这类裂纹的断口形貌看，没有热裂纹的迹象，属于固态裂纹。

因此，用电子束焊焊接 TiAl 合金时，冷却速度是影响焊接裂纹的主要因素。有关研究表明，当焊接速度为 6mm/s 时，防止裂纹产生所必需的预热温度为 250°C (见图 3.10)。

采用高能量输入的电子束焊焊接 Fe₃Al

合金，试验结果表明，焊后放置 6 个月的 Fe₃Al 合金薄板试样，经过 X 射线无损探伤检测确认无任何裂纹和缺陷，实际探测精度为 0.034mm。在焊接过程中不产生热裂，又因为焊接在真空中进行，H 和 O 原子的浓度很低，抑制了氢的作用，焊后不产生延迟裂纹 (见表 3.17)。

电子束焊 Fe-28Al-5Cr-0.5Nb-0.1C 合金熔合区组织细化，焊缝组织为典型的柱状晶组织，宽度窄小，沿热传导方向生长，热影响区窄，局部温度梯度较大，晶粒组织较钨极氩弧焊焊缝细化，控制焊接速度在 2cm/s 以下，FA-124B、FA-127B 和 FA-129B 合金均无裂纹出现。

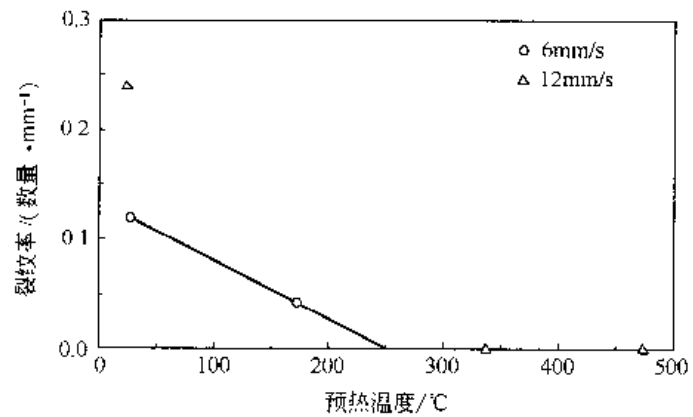


图 3.10 预热温度与裂纹出现率之间的关系
(焊接速度为 6mm/s 和 12mm/s)

表 3.17 真空电子束焊接速度对焊接裂纹的影响

合金	焊接速度 / cm·s			合金	焊接速度 / cm·s		
	0.42	0.85	1.69		0.42	0.85	1.69
FA-122B	无裂纹	无裂纹	有裂纹	FA-127B	无裂纹	无裂纹	无裂纹
FA-124B	无裂纹	无裂纹	无裂纹	FA-129B	无裂纹	无裂纹	无裂纹

采用图 3.11 所示的电子束焊热循环，焊接速度 0.42cm/s 时，显微硬度从焊缝、熔合区过渡到焊接热影响区无明显变化，也没有明显的脆硬相生成 (见图 3.12)。其拉伸、弯曲性能结果表明，室温拉伸和弯曲时断裂均发生在母材部位，抗拉强度和抗弯强度较大，焊缝没有明显弱化焊接构件的力学性能。

3.4.4 异种材料的电子束焊

各种金属组合采用电子束焊的可能性见表 3.18。在某些情况下，用电子束焊焊接异种金属时还需要加入中间过渡金属 (通常采用箔片) 或加入填充金属，见表 3.19。

用真空电子束焊焊接异种材料时，通常有以下两种情况：

a. 两种材料的熔点接近，这种情况对焊接无特殊要求，可将电子束指向接头中间；如

果要求焊缝金属的熔合比不同，以改善组织性能时，可把电子束倾斜一角度而偏于要求熔合比多的母材一边。

b. 两种材料的熔点相差较大，这种情况下，为了防止低熔点母材熔化流失，可将电子束集中在熔点较高的母材一侧。焊接时不让低熔点母材熔化过多而影响焊缝质量，可利用铜护板传递热量，以保证两种母材受热均匀。为了防止焊缝根部未焊透缺陷，应改变电子束对焊件表面的倾斜角，在大多数情况下，电子束倾向熔点较低的母材。

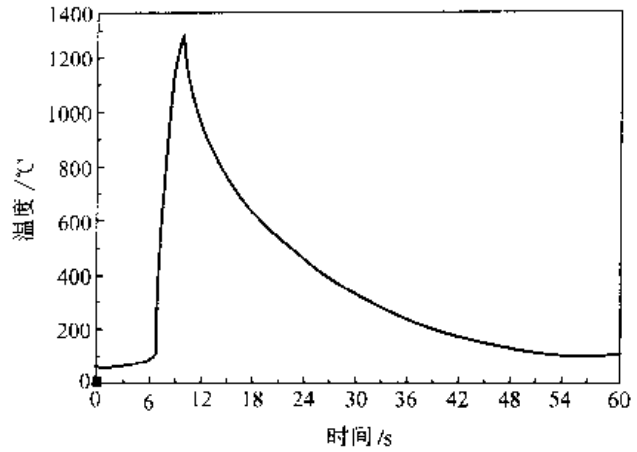


图 3.11 Fe₃Al 电子束焊接过程采用焊接热循环

(1) 钢与有色金属的电子束焊

1) 钢与铝、铜的电子束焊

为了提高钢与铝焊接接头的性能，选用 Ag 作为中间过渡层的电子束焊，焊接接头的强度可提高到 117.6 ~ 156.8MPa，因为 Ag 不会与 Fe 生成金属间化合物，焊接接头试样断裂在铝一侧的母材上。

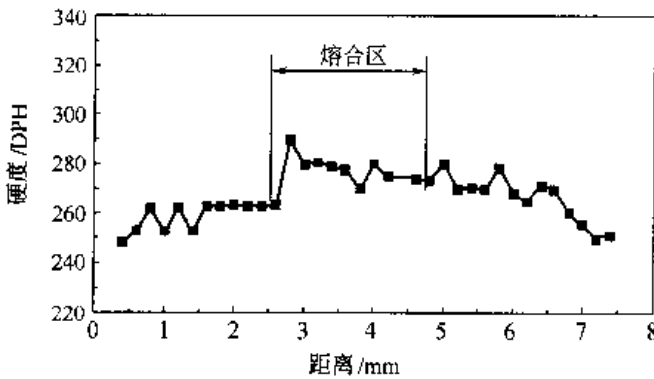


图 3.12 Fe₃Al 电子束焊接接头显微硬度分布

为了避免产生裂纹，焊缝金属中铝含量超过 65% 时，能获得充分的共晶合金，而不产生裂纹。在焊接工艺上可调整熔合比，使焊缝金属大部分进入共晶区，这可以大大减少焊接裂纹。应指出，在焊接过程中，电子束电流会使铝熔化量增多，可在 Fe 与 Ag 的边界处产生 Al 浓度较高的区域，出现 FeAl₂、FeAl 等化合物，使焊缝变脆，接头强度下降，甚至产生裂纹。

浓度较高的区域，出现 FeAl₂、FeAl 等化合物，使焊缝变脆，接头强度下降，甚至产生裂纹。

表 3.18 各种金属组合采用电子束焊的可能性

材料	Al	Be	Cu	Au	Fe	Mg	Mo	Ni	Pt	Si	Ag	Ti	W	Zr	V
Al	✓✓	✓	✓		✓		✓	✓				✓		✓	✓
Be	✓	✓✓	✓	✓	✓										
Cu	✓	✓	✓✓	✓	✓		✓	✓			✓	✓	✓		
Au		✓	✓	✓✓				✓	✓	✓					
Fe	✓	✓	✓		✓✓		✓	✓		✓		✓	✓	✓	✓
Mg						✓✓									
Mo	✓		✓		✓		✓✓		✓						
Ni	✓		✓	✓	✓			✓✓	✓	✓	✓	✓			✓
Pt				✓			✓	✓	✓✓						
Si			✓	✓				✓							
Ag			✓					✓		✓	✓✓				
Ti	✓		✓		✓			✓				✓✓	✓		✓
W			✓		✓							✓	✓✓		
Zr	✓				✓									✓✓	✓
V	✓				✓			✓				✓		✓	✓✓

注：✓为焊接性良好（✓✓为同种金属焊接）；空白为焊接性差或无报道数据。

表 3.19 电子束焊异种金属时所采用的中间过渡金属

被焊异种金属	过渡层金属	被焊异种金属	过渡层金属
Ni+Ta	Pr	钢-硬质合金	Co、Ni
Mo+钢	Ni	Al+Cu	Zn、Ag
Cr-Ni 不锈钢+Ti	V	黄铜·Pb	Sn
Cr-Ni 不锈钢-Zr	V	低合金钢+碳钢	10MnSi8

Q235 碳钢与铜可直接进行电子束焊接，但最好采用中间过渡层（Ni 及 Al 或 Ni-Cu 等）的焊接方法。

2) 钢与钛的电子束焊

在钢与钛及钛合金的焊接生产中，应用电子束焊较多。钢与钛及钛合金的真空电子束焊的最大特点是获得窄而深的焊缝，而且热影响区也很窄。由于是在真空中焊接，避免了钛在高温中吸收氮、氧、氮而使焊缝金属脆化。在电子束焊的焊缝中有可能生成金属间化合物（TiFe、TiFe₂），使接头塑性降低，但由于焊缝比较窄（焊缝宽度和熔深之比为 1:3 或 1:20），在工艺上加以控制能够减少生成或不生成 TiFe 和 TiFe₂。因此，钢与钛的电子束焊可以获得良好质量的焊接接头。

钢与钛及钛合金的真空电子束焊之前，必须对钛的表面进行清理，即用不锈钢丝刷或用机械加工端面之后再行酸洗，用水冲洗干净。钢与钛及钛合金的真空电子束焊接工艺参数，可参考钛及钛合金的电子束焊工艺参数。

12Cr18Ni10Ti 不锈钢与钛及钛合金真空电子束焊接时，一般选用 Nb 和青铜作为填充材料，这些填充材料可使焊缝不出现金属间化合物，焊缝不出现裂纹和其他缺陷，接头强度高且具有一定的塑性。如果不用中间层焊接时，将获得塑性低的接头，甚至出现裂纹。这些中间层的合金有：V+Cu、Cu+Ni、Ag、V+Cu+Ni、Nb 和 Ta 等，用中间层的焊接工艺比较复杂，一般应用的较少。

3) 不锈钢与钼的电子束焊

不锈钢与钼的焊接可以采用电子束焊，焊接时使电子束焦点偏离钼的一侧，以调节和控制钼的加热温度。只要焊接表面加工合适和工艺参数选择适当，熔化的不锈钢就能很好地浸润固态钼的表面，形成具有一定力学性能的接头。

不锈钢与钼焊接接头的强度与塑性取决于接头形式和焊接工艺参数。不锈钢与钼电子束焊的工艺参数及接头性能见表 3.20，试验温度为 20℃，电子束偏向 1Cr18Ni9Ti 不锈钢一侧。以最佳工艺参数焊接的接头，在拉伸试验和弯曲试验时，试样断裂位置在钼与焊缝金属之间的边界上。

表 3.20 不锈钢与钼电子束焊的工艺参数及接头性能

焊接方法	焊接工艺参数					接头性能		
	金属厚度/mm		焊接电压 /V	焊接电流 /A	焊接速度 /m·h ⁻¹	抗拉强度 /MPa	弯曲角 /°	接头形式
	Mo	1Cr18Ni9Ti						
电子束焊	0.5	0.8	16.0	15	30	250~530 (390)	13~73 (43)	对接
	0.3	0.4	16.3	20	40	460~720 (580)	40~70 (55)	搭接
	0.3	0.4	16.5	9	40	230~550 (420)	40~140 (93)	角对接

注：括号中的数据为试验平均值。

4) 不锈钢与钨的电子束焊

不锈钢与钨焊接时，为了获得满意的焊接接头，必须采取特殊的焊接工艺和有效的焊接措施。不锈钢与钨电子束焊的工艺步骤如下。

a. 焊前对不锈钢和金属钨进行认真地清理和酸洗。酸洗溶液的成分为：54% H_2SO_4 + 45% HNO_3 + 1.0% HF ，酸洗温度为 60℃，酸洗时间为 30s。酸洗后的母材金属需在水中冲洗并烘干，烘干温度为 150℃。

b. 为了防止焊接接头氧化，焊前再将被焊接头用酒精或丙酮进行除油和脱水。将清理好的被焊接头装配、定位，然后放入真空室内，并调整好焊机参数和电子束焊枪。

c. 焊接过程中应注意真空室中的真空度，要求真空度在 $1.33 \times 10^{-5} Pa$ 以上。

d. 不锈钢与钨真空电子束焊的工艺参数：电压为 17.5 kV，焊接电流为 70mA，焊接速度为 30m/h。

e. 焊后取出焊件并缓冷。待焊件冷至常温时，进行焊接接头检验，发现焊接缺陷及时返修。

(2) 异种有色金属的电子束焊

1) 铜与铝的电子束焊

铜与铝焊接并带有中间合金层时，采用正确的电子束焊工艺，可获得优良的焊接接头。中间金属层可采用 0.7mm 厚度的银。

一些冶金上不相容的金属可通过填充另一种与两者皆相容的金属薄片来实现电子束焊，例如填夹镍片可以使韧性铜与钢或两种不同的韧性铜焊在一起，填夹铝片可以使沸腾钢焊在一起，填夹镍基合金可使不锈钢与结构钢焊在一起等。

2) 锆与铌的电子束焊

锆 (Zr) 主要用于原子能发电厂、核潜艇及核动力舰船的原子反应堆，也可用于制造反应塔、热交换器等。铌 (Nb) 是重要的合金钢添加剂，广泛用于冶金、化工、电子和航空航天等尖端技术。

锆与铌的热物理性能不同，锆的热导率比铌的热导率小，焊后产生的变形大，在应力作用下易形成裂纹。锆与铌的焊接性差，要获得满意的焊接接头，必须采取合适的焊接方法和工艺措施。

采用真空电子束焊焊接锆与铌的核潜艇产品部件，获得良好的结果。推荐的焊接工艺参数为：电子束焊机型号为 EZ-6-/100，加速电压为 60kV，电子束电流为 20~75mA，焊接速度为 18~20m/h，电子束偏向熔点高的铌一侧约 1~2mm，真空度应达到 $1.33 \times 10^{-4} Pa$ 。采用上述工艺可获得性能良好的锆与铌的核潜艇电子束焊接头。

(3) 陶瓷与金属的电子束焊

20 世纪 60 年代以来，国外已开始将电子束焊应用到金属-陶瓷封接工艺中，这种方法扩大了选用材料的范围，也提高了封接件的气密性和力学性能，满足了多方面的需要。

1) 陶瓷与金属电子束焊的特点

陶瓷与金属的真空电子束焊是一种很有效的焊接方法，它有许多优点，由于是在真空条件下，能防止空气中的氧、氮等污染，有利于陶瓷与活性金属的焊接，焊后的气密性良好。电子束经聚焦能形成很细小的直径，可小到 0.1~1.0mm 范围，其功率密度可提高到 $10^7 \sim 10^9 W/cm^2$ 的程度。因而电子束穿透力很强，加热面积很小，焊缝熔宽小、熔深很大，熔宽与熔深之比可达到 1:10~1:50。这样不仅焊接热影响区小，而且应力变形也是极其微小

的。这对于精加工件可作为最后一道工序，可以保证焊后结构的精度。

这种方法最大的缺点是设备复杂，对焊件工艺要求较严，生产成本较高，在应用上受到一定的限制。陶瓷与金属的真空电子束焊接时，焊件的接头形状有多种形式，比较合适的接头形式以平焊为最好。也可以采用搭接或套接，工件之间的装配间隙应控制在 $0.02 \sim 0.05\text{mm}$ ，不能过大，否则可能产生未焊透等缺陷，达不到焊接的目的。

陶瓷与金属真空电子束焊机，由电子光学系统（包括电子枪和磁聚焦、偏转系统）、真空系统（包括真空室、扩散泵、机械泵）、工作台及传动机构、电源及控制系统四部分组成。电子束焊机的主要部件是电子光学系统，它是获得高能量密度电子束的关键，在配以稳定、调节方便的电源系统后，能保证电子束焊接的工艺稳定性。电子束焊枪的加速电压有高压型（ 1100kV 以上）、中压型（ $40 \sim 60\text{kV}$ ）和低压型（ $15 \sim 30\text{kV}$ ），对于陶瓷与金属的焊接，最合适的是采用高真空度低压型。

2) 陶瓷与金属电子束焊的工艺流程

- a. 把焊件表面处理干净，将工件放在预热炉内进行预热；
- b. 当真空室的真空度达到 10^{-2}Pa 之后，开始用 W 丝热阻炉对工件进行预热，在 30min 内可由室温上升到 $1600 \sim 1800^\circ\text{C}$ ；
- c. 在预热恒温下，让电子束扫描被焊工件的金属一侧，开始焊接；
- d. 焊后降温退火，预热炉要在 10min 之内使电压降到零值，然后使焊件在真空炉内自然冷却 1h ，以后才能出炉。

电子束焊的焊接参数主要有：加速电压、电子束电流、工作距离（被焊工件至聚焦筒底的距离）、聚焦电流和焊接速度。陶瓷与金属真空电子束焊的工艺参数对接头质量影响很大，尤其对焊缝熔深和熔宽的影响更加敏感，这也是衡量电子束焊接的重要指标。选择合适的焊接参数可以使焊缝形状、强度、气密性等达到设计要求。

氧化铝陶瓷（ 85% 、 $95\%\text{Al}_2\text{O}_3$ ）、高纯度 Al_2O_3 、半透明的 Al_2O_3 陶瓷之间的电子束焊接时，可选择如下工艺参数：功率 3kW ，加速电压 150kV ，最大的电子束电流 20mA ，用电子束聚焦直径 $0.25 \sim 0.27\text{mm}$ 的高压电子束焊机进行直接焊接，可获得良好的焊接质量。

高纯度 Al_2O_3 陶瓷与难熔金属（W、Mo、Nb、Fe-Co-Ni 合金）电子束焊接时，也可采用上述工艺参数用高压电子束焊机进行焊接。同时还可用厚度 0.5mm 的 Nb 片作为中间过渡层，进行两个半透明的 Al_2O_3 陶瓷对接接头的电子束焊接。还可以用直径 $\phi 1.0\text{mm}$ 的金属钼针与氧化铝陶瓷实行电子束焊接。

陶瓷与金属目前应用真空电子束焊接，多用于难熔金属（W、Mo、Ta、Nb 等）与陶瓷的焊接，而且要使陶瓷的线胀系数与金属的线胀系数相近，达到匹配性的焊接连接。由于电子束的加热斑点很小，可以集中在一个非常小的面积上加热，这时只要采取焊前预热，焊后缓慢冷却以及接头形式合理设计等措施，可以获得合格的焊接接头。

3) 陶瓷与金属电子束焊应用实例

在石油化工等部门使用的一些传感器需要在强烈浸蚀性的介质中工作。这些传感器常常选用氧化铝系列的陶瓷作为绝缘材料，而导体就选用 18-8 不锈钢。不锈钢与陶瓷之间应有可靠的连接，焊缝必须耐热、耐蚀、牢固可靠和致密不漏。

陶瓷是一根长 15mm ，外径 10mm ，壁厚 3mm 的管子。陶瓷管套在不锈钢管之中，陶瓷与不锈钢管之间采用动配合。陶瓷管两端各留有一个 $0.3 \sim 1.0\text{mm}$ 的加热膨胀间隙，防止加热时产生很大的切应力。采用真空电子束焊方法焊接 18-8 不锈钢管与陶瓷管，接头为

搭接焊缝，工艺参数见表 3.21。

表 3.21 18-8 不锈钢与陶瓷真空电子束焊的工艺参数

材 料	母材厚度/mm	工 艺 参 数				
		电子束电流 mA	加速电压 kV	焊接速度 cm·s ⁻¹	预热温度 /°C	冷却速度 /°C·min
18-8 钢 陶瓷	4+4	8	10	10.3	1230	20
18-8 钢 + 陶瓷	5 5	8	11	10.3	1200	22
18-8 钢 - 陶瓷	6 + 6	8	12	10.0	1200	22
18-8 钢 · 陶瓷	8-8	10	13	9.67	1200	23
18-8 钢 陶瓷	10+10	12	11	9.17	1200	25

18-8 不锈钢与陶瓷电子束焊的工艺步骤如下。

a. 焊前将 18-8 不锈钢和陶瓷分别进行仔细清理和酸洗，去除油污及氧化杂质，然后以 40~50°C/min 的加热速度将工件加热到 1200°C，保温 4~5min，然后关掉预热电源，以便陶瓷预热均匀。

b. 对工件的其中一端进行焊接，焊接速度均匀。因陶瓷的熔点比 18-8 不锈钢高，所以焊接时电子束应偏离接头中心线（偏向陶瓷一侧）一定距离。距离大小根据陶瓷的熔点高低确定，两种母材熔点相差越大，偏离距离越大。

c. 第一条焊缝焊好后，要重新将工件加热到 1200°C，以防止产生裂纹。然后才能进行第二条焊缝的焊接。

d. 接头全部焊完后，以 20~25°C/min 的冷却速度随炉缓冷。冷却过程中由于收缩力的作用，陶瓷中首先产生轴向挤压力。所以工件要缓慢冷却到 300°C 时才可以从加热炉中取出在空气中缓冷，以防挤压力过大，挤裂陶瓷。

e. 对焊后接头进行质量检验，如发现焊接缺陷，应重新焊接，直至质量合格。

(4) 高速钢与弹簧钢的电子束焊

高速钢中含有 W、Mo、V、Co 等合金元素，这些合金元素的总含量超过 10%。用高速钢制成的刀具和钻头，在切削和钻削过程中比一般低合金工具钢的刀具和钻头更加锋利（俗称“锋钢”）。弹簧钢具有较高的屈服强度和良好的疲劳强度，在冲击、振动或长期均匀的周期性交变应力条件下工作。生产中应用的双金属机用锯条，就是高速钢与弹簧钢采用真空电子束焊接而成的产品。

双金属锯条刃部一般采用的高速钢牌号为 W18Cr4V、W6Mo5Cr1V2 等；锯条背部采用的弹簧钢牌号为 65Mn、60Si2CrA、60Si2MnA 等。

高速钢与弹簧钢电子束焊的工艺步骤如下。

① 焊前准备 焊前认真清理两种母材金属表面的氧化物、铁锈及油污等。

② 合理确定锯条毛坯尺寸 双金属机用锯条的毛坯尺寸见表 3.22。

表 3.22 双金属机用锯条的毛坯尺寸

钢的牌号	工作部位	锯条厚度/mm	锯条长度/mm	锯条宽度/mm	备 注
高速钢 (W18Cr4V)	锯条刃部	1.8±0.1	488±0.5	7±0.2	焊接时以背部为定位基准
弹簧钢 (60Si2CrA)	锯条背部	1.8±0.1	488±0.5	31±0.05	

③ 真空电子束焊接设备 一般选择电子束焊机的最高加速电压为 150kV，最大束流为

200mA，焊接真空室的真空度为 $1.33 \times 10^{-4} \text{Pa}$ 。

④ 技术要求及焊接工艺参数 焊接时要求焊接速度为 $4 \sim 5 \text{m/s}$ ，焊缝正面宽度小于 1.0mm ，异质焊缝背面宽度大于 0.3mm ，锯条焊后的变形量不大于 1.0mm 。另外，要保证焊缝中无气孔、裂纹、未焊透等缺陷，要求焊接废品率不得超过 3% 。推荐的高速钢与弹簧钢双金属机用锯条电子束焊的工艺参数见表 3.23。

表 3.23 高速钢与弹簧钢机用锯条电子束焊的工艺参数

母材厚度/mm	加速电压/kV	电子束电流/mA	焊接速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	焊缝正面宽度/mm	焊缝背面宽度/mm	热输入/ $\text{J} \cdot \text{cm}^{-1}$	真空度/Pa
1.8+1.8	60	36	3	1.0~1.2	≥ 0.3	432	1.33×10^{-4}
	80	26	4	0.8~1.0	≥ 0.3	312	
	100	18	5	0.5~0.8	≥ 0.3	216	
	120	8	5	0.3~0.5	≥ 0.3	115	

(5) 复合材料的电子束焊

电子束焊具有加热及冷却速度快、熔池小且存在时间短等特点。这对金属基复合材料的焊接特别有利，但是由于熔池的温度很高，焊接 SiC_p/Al 或 SiC_w/Al 复合材料时很难避免 SiC 与 Al 基体间的反应。

电子束焊与激光焊的加热机制不同，电子束可对基体金属及增强相均匀加热，因此适当控制焊接参数可将界面反应控制在很小的程度上，由于电子束的冲击作用以及熔池的快速冷却作用，焊缝中的颗粒非常均匀。利用这种方法焊接 SiC 颗粒增强的 Al-Si 基复合材料时效果较好，由于基体中的含 Si 量高，界面反应更容易抑制。利用电子束焊接 Al_2O_3 颗粒增强的 Al-Mg 基或 Al-Mg-Si 基复合材料也可获得较好的效果。

3.4.5 高温合金的电子束焊

(1) 焊接特点

采用电子束焊不仅可以成功地焊接固溶强化型高温合金，也可以焊接电弧焊难焊的沉淀强化型高温合金。焊前状态最好是固溶状态或退火状态。对某些液化裂纹敏感的合金应采用较小的焊接热输入，而且应调整焦距，减小焊缝弯曲部位的过热。

(2) 接头形式

电子束焊接头可以采用对接、角接、端接、卷边接，也可以采用丁字接和搭接形式。推荐采用平对接、锁底对接和带垫板对接形式。接头的对接端面不允许有裂纹、压伤等缺陷，边缘应去毛刺，保持棱角。端面加工的粗糙度为 $R_a \leq 3.2 \text{mm}$ 。锁底对接的清根形式及尺寸见图 3.13。

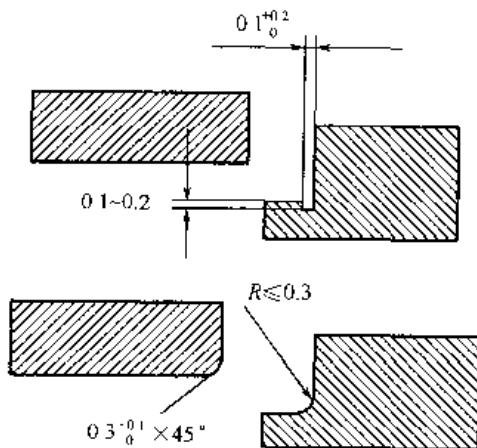


图 3.13 锁底对接接头清根形状及尺寸

(3) 焊接工艺

焊前对有磁性的工作台及装配夹具均应退磁，其磁通量密度不大于 $2 \times 10^1 \text{T}$ 。焊接件应仔细清理，表面不应有油污、油漆、氧化物等夹杂物。经存放或运输的零件，焊前还需要用绸布蘸丙酮擦拭焊接处，零件装配应使接头紧密配合和对齐。局部间隙不超过 0.08mm 或材料厚度的 0.05 倍。位错不大于 0.75mm 。当采用压配合的锁底对接时，过盈量一般为 $0.02 \sim 0.06 \text{mm}$ 。

装配好的焊接件首先应进行定位焊。定位焊点位置应布置合理，保证装配间隙不变。定位焊点应无焊接缺陷，且不影响电子束焊接。对冲压的薄板焊接件，定位焊更为重要，应布置紧密、对称、均匀。

焊接工艺参数根据母材牌号、厚度、接头形式和技术要求确定。推荐采用低热输入和小焊接速度的工艺。表 3.24 列出了典型高温合金电子束焊的工艺参数。

表 3.24 典型高温合金电子束焊的工艺参数

合金牌号	厚度/mm	接头形式	焊机功率/kW	电子枪形式	工作距离/mm	电子束电流/mA	加速电压/kV	焊接速度/cm·s ⁻¹	焊道数
GH4169	6.25	对接	60kV, 300mA	固定枪	10 ⁰	65	50	2.53	1
	32.0				82.3	350		2.00	
GH188	0.76	锁底对接	150kV, 40mA		152	22	100	1.67	

(4) 焊接缺陷及防止

高温合金电子束焊的焊接缺陷主要是热影响区的液化裂纹及焊缝中的气孔、未熔合等。热影响区的裂纹多分布在焊缝钉头转角处，并沿熔合线延伸。形成裂纹的概率与母材裂纹敏感性、焊接工艺参数和焊接件的刚度有关。

防止焊接裂纹的措施有：采用含杂质低的优质母材，减少晶界的低熔点相；采用较低的焊接热输入，防止热影响区晶粒长大和晶界局部液化；控制焊缝形状，减少应力集中；必要时添加抗裂性好的焊丝。

焊缝中的气孔形成与母材纯净度、表面粗糙度、焊前清理有关，并且在非穿透焊接时容易在根部形成长气孔。防止气孔的措施有：加强铸件和锻件的焊前检验，在焊接端面附近不应有气孔、缩孔、夹杂等缺陷；提高焊接端面的加工精度；适当限制焊接速度；在允许的条件下，采用重复焊接的方法。

电子束焊的焊缝偏移容易导致未熔合和咬边缺陷。其防治措施有：保证零件表面与电子束轴线垂直；对夹具进行完全退磁，防止残余磁性使电子束产生横向偏移，形成偏焊现象；调整电子束的聚焦位置。电子束焊的固有焊缝下凹缺陷，可以采用双凸肩接头形式和添加焊丝的方法弥补。

(5) 焊接接头性能

表 3.25 几种高温合金电子束焊接头的力学性能

母材牌号	焊前状态	焊后状态	室温拉伸			600℃拉伸		
			σ_s /MPa	σ_b /MPa	δ /%	σ_s /MPa	σ_b /MPa	δ /%
GH4169	固溶	焊态	325 (95%)	815 (98%)	38.3 (77%)	453 (84%)	656 (91%)	34.3 (69%)
		双时效	1215 (96%)	1348 (99%)	18.9 (81%)	965 (95%)	1016 (97%)	23.6 (81%)
GH4169+GH907	固溶	焊态	544	801	29.7	362	593	33.9
		按 GH4169 规范时效	1033	1083	9.98	757	847	9.75
	固溶+ 时效	按 GH4169 规范时效	960	1008	12.88	740	789	13.8
		按 GH907 规范时效	918	994	13.2	661	782	14.8
GH4033	固溶	焊态	475	800	20.6	—	—	—

注：括号内的百分数表示焊缝的强度系数或塑性系数。

电子束焊接高温合金的接头力学性能较高,焊态下接头强度系数可达95%左右,焊后经时效处理或重新固溶时效处理接头强度可与母材相当。接头塑性不理想,仅为母材的60%~80%,表3.25列出几种高温合金电子束焊接头的强度和塑性。

难熔金属中的铌、钽、铈、锆容易用电子束焊进行焊接,钨和钨则很难用电子束焊进行焊接,特别是在有拘束的条件下很容易出现裂缝。难熔金属与其他合金的电子束焊也非常困难,能否有效地焊接在一起取决于它们的熔点、热导率、热膨胀率等物理性能差异及能否生成金属间化合物,后者往往是很脆的。

3.5 电子束焊的应用实例

3.5.1 在电子和仪表工业中的应用

在电子和仪表工业中,有许多零件要求用精密焊接方法制造。这些零件除材料特殊、结构复杂且紧凑外,有时还有特殊的技术要求,如需焊后形成真空腔,不能破坏温敏元件等。真空电子束焊在解决这一焊接难题时,起到了独特的作用。电子束焊在电子和仪表工业中应用的一些实例见表3.26。

表 3.26 电子束焊在电子和仪表工业中应用的一些实例

名称	母材金属	对焊缝的要求	焊接质量
电子管钨钨阴极 [见图 3.14(a)]	钨钼(钨)	母材金属熔点高,要求焊缝变形小、无污染、焊缝光滑	电子束焊得到满意焊缝
管式应变计传感器 [见图 3.14(b)]	不锈钢	管内装有应变丝和 MgO 绝缘粉。要求焊缝半穿透、变形小	严格的电子束焊工艺与合适的工装配合,得到满意的焊接质量
陶瓷与金属焊接 [见图 3.15(a)]	陶瓷+铌	要求焊缝不加第三种材料,且保证气密	电子束焊工艺严格,要经过预热及焊后退火
光电器件管壳封口焊 [见图 3.15(b)]	高铬钢+可伐合金	金属管壳与玻璃管壳已封接完毕,要求最后封口焊对纤维屏与玻璃焊料不能产生热冲击且保证气密性	电子束焊输入热量小,功率集中,严格控制操作,可得到满意的焊缝
振动筒传感器[见图 3.16(a)]	弹性合金 3J53	要求焊缝将内外筒组成一个真空腔体	真空电子束焊提高材料利用率,焊缝质量好,且满足焊后得到一个真空腔体的要求
遥测压力传感器 [见图 3.16(b)]	1Cr18Ni9Ti+可伐合金 4J29	组件结构紧凑,要求焊后壳体内部是真空状态。焊缝 A 不损伤内部元器件,焊缝 B 不能使芯柱上的玻璃炸裂,焊孔 C 起排气作用后熔封	合适的工装及恰当的真空电子束焊工艺保证了焊缝的气密性等要求

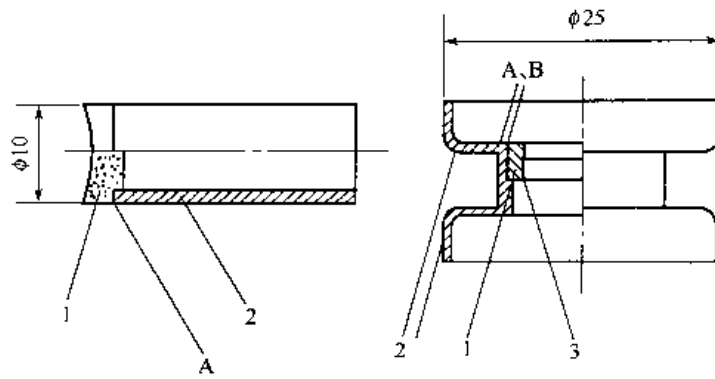
3.5.2 在汽车零件生产中的应用

早在 20 世纪 60 年代,美国就将非真空电子束焊引入了批量汽车零件的生产中。采用电子束焊焊接厚大件时,比其他焊接方法具有明显的优势。为了克服大型真空电子束焊机造价高、设备复杂、抽真空时间长的缺点,非真空电子束焊的研究及应用受到人们的关注。

近几年欧洲汽车制造也采用了电子束焊,因为非真空电子束焊成本低、效率高,可在汽车生产线上连续进行焊接。此外,为了减小结构质量,节省燃料及减少废气的排放,汽车上采用了一些铝合金零件,非真空电子束焊焊接汽车用铝合金可得到质量良好的接头。

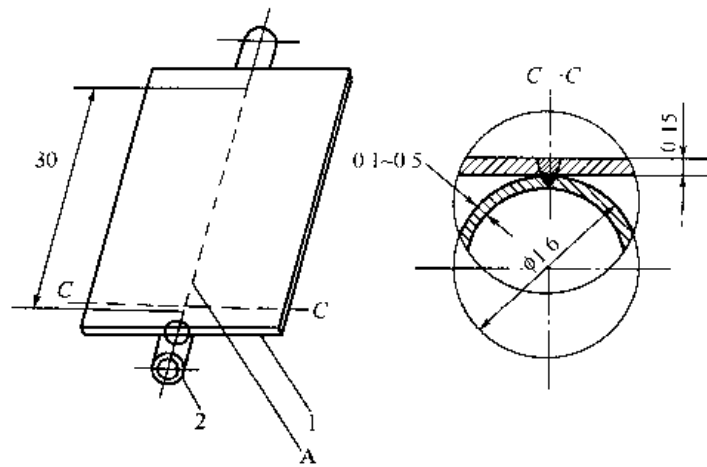
几种非真空电子束焊焊接的典型汽车组件如下。

① 汽车扭矩转换器 该组件上部与下部壳体采用搭接形式,采用填丝的非真空电子束焊接工艺。电子束焊机是多工位的,目前在世界范围内每天焊接的汽车转换器达 25000 个



(a) 电子管钨钨阴极结构

1—多孔钨块; 2—支持筒或盘; 3—压环; A、B—焊缝



(b) 管式应变计传感器示意

1—底板; 2—细管; A—焊缝

图 3.14 电子束焊在电子和仪表工业中的焊接实例

以上。

② 汽车变速箱齿轮组件 一些汽车的变速箱齿轮及一些载重汽车、越野汽车、公共汽车等的离合器组件采用非真空电子束焊。通常焊接这些齿轮组件采用对接接头，材料是中碳钢和合金钢。

③ 铝合金仪表板的焊接 汽车上的仪表板等采用铝合金焊接结构制造，接头形式一般是卷边的，多采用非真空电子束焊。

3.5.3 电子束焊应用前景

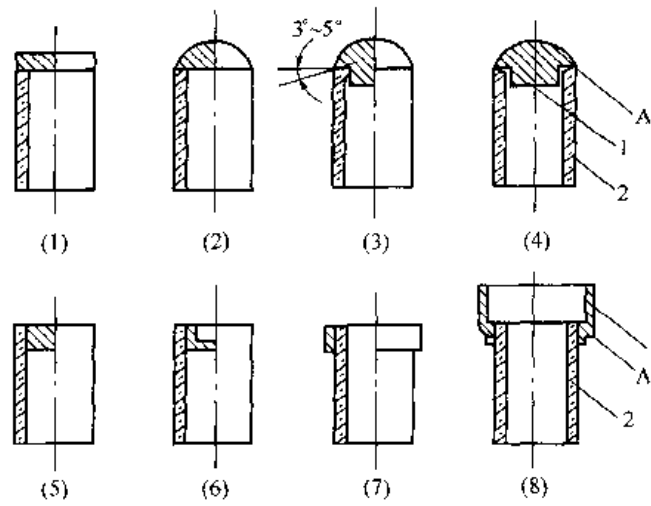
a. 电子束焊在复杂零件的大批量生产中将有较大的发展。例如在汽车工业中，采用电子束焊技术焊接汽车的齿轮和后桥，可以提高工作效率、降低成本、提高零件的质量。

b. 在航空航天工业中，电子束焊技术将继续扩大其应用，并发展电子束焊的在线检测技术。

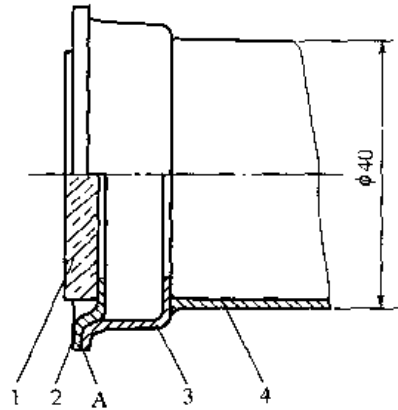
c. 由于电子束焊在厚大件焊接中有独特的优势，所以在能源、重工业中大有用武之地。

d. 在修复领域，电子束焊技术将是有价值的工艺方法之一。

e. 电子束焊的焊接设备将趋向于多功能及柔性化。电子束焊已属成熟技术，随着应用领域的扩大，出于经济方面的考虑，多功能电子束焊的焊接设备和集成工艺以及电子束焊机

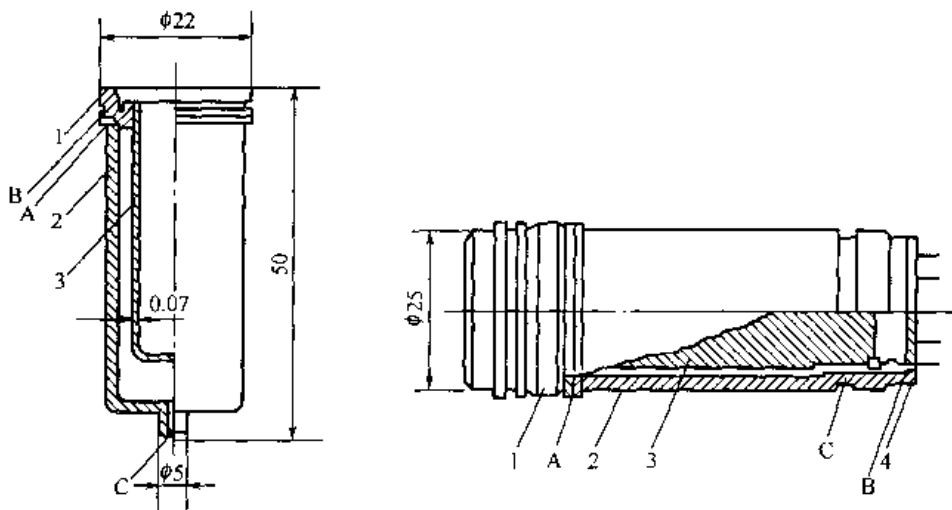


(a) 陶瓷与金属焊接试件结构
1—金属；2—陶瓷；A—焊缝



(b) 光电器件管壳封口
1—纤维屏玻璃，2—窗架盘；3—金属管壳；4—玻璃管壳，A—焊缝

图 3.15 陶瓷-金属以及光电器件管壳封口的电子束焊



(a) 振动筒传感器示意
1—上盘；2—外筒；3—内筒，A、B、C—焊缝

(b) 遥测压力传感器示意
1—本体，2—外壳；3—敏感元器件；
4—芯柱，A、B、C—焊缝

图 3.16 振动筒传感器和遥测压力传感器的电子束焊

的柔性化将越来越显得重要。

f. 电子束焊接将是实现空间结构焊接的强有力工具。

宇航技术中所用的各类火箭、卫星、飞船、空间站、太阳能电站等的结构件、发动机以及各种仪器均需用焊接技术，而电子束焊是满足其需求的强有力的工具。

宇航零部件所用电子束焊的焊接设备可分为两类：一类是常规的电子束焊机，用来焊接可以在地面进行装配的零部件；另一类是在太空条件下所用的电子束焊机，需要宇航员到太空进行焊接操作，因此要适应太空的特殊环境。

3.6 电子束焊的操作与安全防护

3.6.1 真空系统的操作及注意事项

a. 真空系统必须在接通冷却水后才能启动。

b. 机械泵启动时，必须先打开机械泵抽气口的阀门，使其与大气相通，待其运转正常后迅速与大气切断而转向需要抽气的部件。

c. 扩散泵必须在机械泵预抽真空达到一定的真空度时才能加热。停止加热后，必须待扩散泵完全冷却下来才能关闭机械泵，否则扩散泵的油易被氧化。

d. 停止机械泵前，必须先关闭机械泵抽气口的阀门，使其与真空系统断开，再与大气接通，以免机械泵油进入真空系统。

e. 真空系统及工作室内部应保持有良好的真空卫生，停止工作时必须保持其内部有一定的真空度。

3.6.2 焊接操作

(1) 启动

在真空室内的工件安装就绪后，关闭真空室门，然后接通冷却水，闭合总电源开关。按真空系统的操作顺序启动机械泵和扩散泵，待真空室内的真空度达到预定值时，便可进入施焊阶段。

(2) 焊接

将电子枪的供电电源接通，并逐渐升高加速电压使之达到所需的数值。然后相应地调节灯丝电流和轰击电压，使有适当小的电子束流射出，在工件上能看出电子束焦点，再调节聚焦电流，使电子束的焦点达到最佳状态。假如焦点偏离接缝，可调节偏转线圈电流或电子枪作横向移动使其对中。此时调节轰击电源使电子束电流达到预定数值。按下启动按钮，工件即按预定速度移动，进入正常焊接过程。

(3) 停止

焊接结束时，必须先逐渐减小偏转电压使电子束焦点离开焊缝，然后把加速电压降低到零，并把灯丝电源及传动装置的电源降到零值，此后切断高压电源、聚焦偏转电源和传动装置电源，这样就完成了一次焊接。待工件冷却后，按真空操作程序从真空室中取出工件。

3.6.3 安全防护

(1) 防止高压电击的措施

高压电子束焊机的加速电压可达 150kV，触电危险性很大，必须采取尽可能完善的绝缘防护措施：

a. 保证高压电源和电子枪有足够的绝缘，耐压试验应为额定电压的 1.5 倍；

b. 设备外壳应接地良好，采用专用地线，设备外壳用截面积大于 12mm² 的粗铜线接

地，接地电阻应小于 3Ω ；

c. 更换阴极组件或维修时，应切断高压电源，并用接地良好的放电棒接触准备更换的零件或需要维修的地方，放完电后才可以操作；

d. 电子束焊机应安装电压报警或其他电子联动装置，以便在出现故障时自动断电；

e. 焊工操作时应戴耐高压的绝缘手套、穿绝缘鞋。

(2) X射线的防护

电子束焊接时，约有 1% 以下的射线能量转变为 X 射线辐射。我国规定，对无监护的工作人员允许的 X 射线剂量不应大于 0.25mR/h 。因此必须加强对 X 射线的防护措施；

a. 加速电压低于 60kV 的焊机，一般靠焊机外壳的钢板厚度来防护；

b. 加速电压高于 60kV 的焊机，外壳应附加足够厚度加铅板加强防护；

c. 电子束焊机在高电压下运行，观察窗应选用铅玻璃，铅玻璃的厚度可按相应的铅当量选择（见表 3.27）；

表 3.27 国产铅玻璃牌号和相应的铅当量

牌 号	ZF1	ZF2	ZF3	ZF4	ZF5	ZF6
密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	3.84	4.09	4.46	4.52	4.65	4.77
铅当量	0.174	0.198	0.238	0.243	0.258	0.277

注：铅当量指 1 个单位厚度的铅玻璃相当于表中示出厚度的铅板。

d. 工作场所的面积一般不应小于 40m^2 ，室高不小于 3.5m ，对于高压大功率电子束设备，可将高压电源设备和抽气装置与工作人员的操作室分开；

e. 焊接过程中不准用肉眼观察熔池，必须要时应佩戴铅玻璃防护眼镜。

此外，设备周围应通风良好，工作场所应安装抽气装置，以便将真空室排出的油气、烟尘等及时排出。

第 4 章 等离子弧焊接与切割

等离子弧焊 (Plasma Arc Welding) 是在钨极氩弧焊的基础上发展起来的一种焊接方法。等离子弧是一种压缩的钨极氩弧, 具有能量集中 (能量密度可达 $10^5 \sim 10^6 \text{ W/cm}^2$)、温度高 (弧柱中心可达 $18000 \sim 24000 \text{ K}$ 以上)、焰流速度大 (可达 300 m/s 以上)、刚直性好等特点, 这种电弧既可以用于焊接, 又可以用于切割。等离子弧焊是一种先进实用的焊接和切割方法, 在工业中得到了广泛应用。

4.1 等离子弧的类型及应用特点

4.1.1 等离子弧的类型

等离子弧焊用的热源是将自由钨弧压缩强化之后获得电离度更高的电弧等离子体, 称为等离子弧, 又称压缩电弧。等离子弧与钨极氩弧焊的自由电弧在物理本质上没有区别, 仅是弧柱中电离程度上的不同。经压缩的电弧其能量密度更为集中, 温度更高。

等离子弧是一种被压缩的钨极氩弧, 具有很高的能量密度及温度。等离子弧的压缩是依靠水冷铜喷嘴的拘束作用实现的, 等离子弧通过水冷铜喷嘴时受到下列三种压缩作用。

① 机械压缩 水冷铜喷嘴孔径限制了弧柱截面积的自由扩大, 这种拘束作用就是机械压缩。

② 热压缩 喷嘴中的冷却水使喷嘴内壁附近形成一层冷气膜, 进一步减小了弧柱的有效导电面积, 从而进一步提高了电弧弧柱的能量密度及温度, 这种依靠水冷使弧柱温度及能量密度进一步提高的作用就是热压缩。

③ 电磁压缩 由于以上两种压缩效应, 使得电弧电流密度增大, 电弧电流自身磁场产生的电磁收缩力增大, 使电弧又受到进一步压缩, 这就是电磁压缩。

根据电源的连接方式, 等离子弧分为非转移型电弧、转移型电弧及联合型电弧三种。产生这三种形态等离子弧的共同点是: 等离子枪的结构是一样的, 钨极都接电源的负极。不同点在于电弧正极接的位置不同。

① 非转移型电弧 正极接在焊枪的喷嘴, 电弧燃烧在钨极与喷嘴之间, 焊接时电源正极接水冷铜喷嘴, 负极接钨极, 工件不接到焊接回路上, 见图 4.1 (a)。依靠高速喷出的等离子气将电弧带出, 这种电弧适用于焊接或切割较薄的金属及非金属。

② 转移型电弧 正极接在工件上, 电弧直接燃烧在钨极与工件之间, 焊接时首先引燃钨极与喷嘴间的非转移弧, 然后将电弧转移到钨极与工件之间。在工作状态下, 喷嘴不接到焊接回路中, 见图 4.1 (b)。转移型电弧的产生要经过两步走: 先在钨极与喷嘴之间产生非转移弧, 使其电弧焰流从喷嘴喷出并接触工件; 然后进行电路转换, 将电源的正极从喷嘴电路转移到工件电路, 转移弧便瞬即产生 (非转移弧同时熄灭)。这种电弧用于焊接较厚的金属。

③ 联合型电弧 转移弧及非转移弧同时并存的电弧称为联合型电弧, 见图 4.1 (c)。联合型电弧在很小的电流下就能保持稳定, 微束等离子弧采用了联合弧的形态, 因此特别适合于薄板及超薄板的焊接。联合弧的获得方法是: 先获得非转移弧, 然后产生转移弧, 但是在

转移弧产生的同时，不要切断非转移弧（不切断喷嘴的正极电路），这样就可得到非转移弧（也称为维持电弧，简称维弧）和转移弧（也称为工作电弧或焊接电弧）同时存在的联合弧。

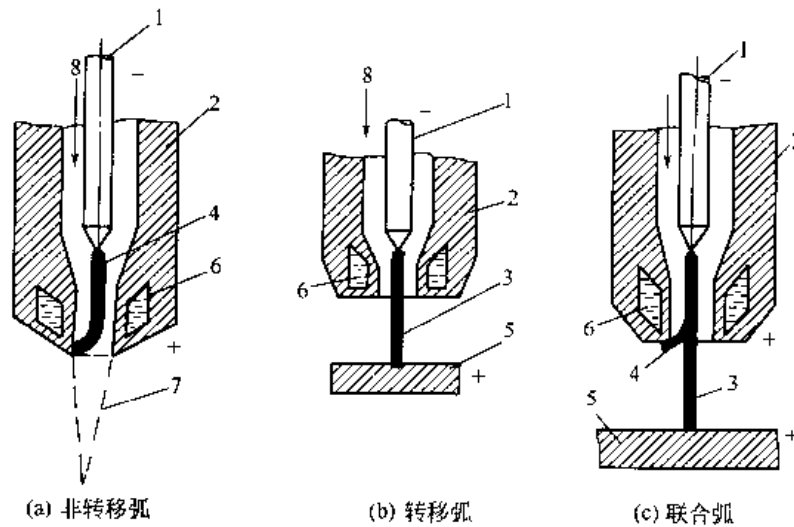


图 4.1 等离子弧的类型

1—钨极；2—喷嘴；3—转移弧；4—非转移弧；5—工件；6—冷却水；
7—弧焰；8—离子气

4.1.2 等离子弧的应用特点

(1) 等离子弧焊接

由于等离子电弧具有较高的能量密度、温度及刚直性，因此与一般电弧焊相比，等离子电弧具有下列优点。

a. 能量密度大、电弧方向性强、熔透能力强，在不开坡口、不加填充焊丝的情况下可一次焊透 8~10mm 厚的不锈钢板。与钨极氩弧焊相比，在相同的焊缝熔深情况下，等离子弧焊接速度要快得多。

b. 焊缝质量对弧长的变化不敏感，这是由于等离子弧的形态接近圆柱形，发散角很小，约 5°，且挺直度好，弧长变化时对加热斑点的面积影响很小，易获得均匀的焊缝形状。工件上受热区域小，热影响区窄，因而薄板焊接时变形小。

c. 钨极缩在水冷铜喷嘴内部，不可能与工件接触，因此可避免焊缝金属产生夹钨现象。电弧搅动性好，熔池温度高，有利于熔池内气体的释放。

d. 等离子电弧由于压缩效应及热电离度较高，电流较小时仍很稳定。配用新型的电子电源，焊接电流可以小到 0.1A，这样小的电流也能达到电弧稳定燃烧，特别适合于焊接微型精密零件。

e. 可产生稳定的小孔效应，通过小孔效应，正面施焊时可获得良好的单面焊双面成形。

等离子弧焊的缺点是：

a. 可焊厚度有限，一般在 25mm 以下；

b. 焊枪及控制线路较复杂，喷嘴的使用寿命很低；

c. 焊接参数较多，对焊接操作人员的技术水平要求较高。

等离子弧焊由于下述原因，其应用可能受到限制。

a. 电弧作用区域的观察性差。等离子弧枪结构复杂，不仅比较重，手工焊时操作人员还较难观察焊接区域。

b. 双弧弊端。使用转移弧时，当工艺参数选择不当，或喷嘴结构设计不合理，或喷嘴多次使用后有损伤，就会在钨极-喷嘴-工件之间产生串接电弧，这种旁弧与转移弧同时存在，称为双弧。双弧产生，说明弧柱与喷嘴之间的冷气膜遭到了破坏，转移弧电流减小，这样就导致焊接过程不正常，甚至很快就烧坏喷嘴。

c. 电弧可达性差。由于枪体比较大，钨极内缩在喷嘴里面，因此对某些接头形式是无能为力的。

d. 一次投资大。等离子弧焊接与切割设备比较昂贵。但是其焊接或切割速度快，焊缝与切割质量好，若将这些因素考虑进去，其使用成本还不是太高。

采用等离子弧焊可以焊接的金属有不锈钢、铝及铝合金、钛及钛合金、镍、铜、蒙耐尔合金等，可用钨极氩弧焊焊接的金属均可用等离子弧焊进行焊接。等离子弧焊这种方法可用于航天航空、核能、电子、造船、机械及其他工业部门中。

(2) 等离子弧堆焊和喷涂

堆焊和喷涂是两种相似的加工方法，堆焊是指在一种金属表面堆上另一种金属，堆焊层厚度一般都比较大（毫米至厘米数量级）；喷涂则是指在一种金属或非金属表面涂上另一种金属或非金属，涂层厚度一般较薄（微米级）。目的都是为了使材料或零件获得耐磨、耐腐蚀、耐热、抗氧化、导电、绝缘等特殊使用性能。

气体火焰和普通电弧都可以用来进行堆焊和喷涂，等离子弧堆焊的主要优点是生产效率和质量好，尤其是涂层的结合强度和致密性均高于火焰喷涂和一般电弧喷涂。此外，采用非转移弧的等离子弧喷涂时，工件不必接电源，因此特别适合喷涂不导电的非金属材料，这是等离子弧喷涂获得广泛应用的一个重要原因。

不同应用条件下对等离子弧的性能有不同的要求，可以通过喷嘴结构、离子气种类和流量的选择以及电能的输入条件加以控制。

(3) 等离子弧切割

结构钢目前普遍采用氧-乙炔火焰切割方法，但是对于不锈钢、铝、铜等，氧-乙炔切割方法却难以获得满意的效果。等离子弧作为切割热源，不仅利用它的温度高和能量密度大的特点，而且可利用高速等离子弧带电质点的冲刷作用，把熔化金属从切口中排出，因此切割厚度大、切割速度很快、切口较窄、切口质量很高（切口平直、变形小、热影响区小）。

目前，等离子弧切割已成为切割不锈钢、耐热钢、铝、铜、钛、铸铁以及钨、锆等难熔金属的主要方法。随着空气等离子弧切割新工艺的研究成功和推广应用，在普通结构钢中应用等离子弧切割的技术经济合理性已显示出来。此外，采用非转移型等离子弧还可以用来切割非金属材料，如花岗岩、碳化硅、耐火砖、混凝土等。

4.2 等离子弧焊的分类及设备组成

4.2.1 等离子弧焊的分类

根据操作方式，等离子弧焊设备可分为手工及自动两种。根据所适用的焊接工艺可分为小孔型等离子弧焊、熔透型等离子弧焊、微束等离子弧焊、熔化极等离子弧焊、热丝等离子弧焊及脉冲等离子弧焊等几种。

(1) 穿孔型等离子弧焊

穿孔型等离子弧焊又称为小孔型、锁孔型、穿透型等离子弧焊。它是利用等离子弧能量密度大、挺直性好、离子流冲力大的特点，将工件完全熔透，并将工件穿一小孔，离子流从

背面小孔穿出。熔化金属在电弧吹力、液体金属重力、表面张力互相作用下保持平衡。当小孔随焊接速度向前移动时，在电弧的后方锁闭，形成完全焊透的焊缝。

表 4.1 列出等离子弧焊接一次焊透的板材厚度。能否实现一次穿透工件，实现穿孔型焊接，这与等离子弧能量密度有关。随着工件厚度增加，所需能量密度增大，等离子弧的能量密度是有限的，所以这种方法适用的板厚受到限制。

表 4.1 等离子弧焊接一次焊透的板材厚度

材 料	不锈钢	钛及钛合金	镍及镍合金	低合金钢	低碳钢
焊接厚度 mm	≤8~10	≤12	≤6	≤7	≤8~10

(2) 熔透型等离子弧焊

熔透型等离子弧焊又称为熔入型、熔融型等离子弧焊。它是离子气流量较小，弧柱压缩程度较弱的一种等离子弧焊。在焊接过程中，只熔化工件，不产生小孔效应。焊缝成形过程与钨极氩弧焊相类似，随着焊枪向前移动，熔池金属凝固形成焊缝。它适用于单面焊双面成形和厚板多层焊。

(3) 微束等离子弧焊

微束等离子弧焊又称为针状等离子弧焊，是指 30A 以下的熔透型等离子弧焊。为了提高等离子弧的稳定性，采用小孔径压缩喷嘴（直径 0.6~1.2mm），联合型等离子弧。采取相应措施后，焊接电流小于 1A 仍能获得稳定的焊接电弧和焊接过程。微束等离子弧特别适合于薄板和细丝的焊接。焊接不锈钢时，最小厚度可以小到 0.025mm。熔点和沸点低的金属和合金，如铅、锌等不适合于等离子弧焊。

(4) 熔化极等离子弧焊

熔化极等离子弧焊是等离子弧与熔化极电弧焊相组合的一种焊接方法。与等离子弧焊比较，其优点是：焊丝受等离子弧预热，熔化功率大，焊接速度高。熔化功率和工件上的输入热量可以单独调节。熔化极直流电源，采用直流反接时有去除氧化膜的阴极破碎作用，所以这种方法适用于焊接铝、镁及其合金。

熔化极等离子弧焊有两种基本形式。图 4.2 所示为水冷喷嘴式熔化极等离子弧焊。水冷喷嘴在强烈的直接水冷条件下，可以承担较大的等离子弧电流。在焊枪体中间送入一熔化极，熔化极与工件间接一直流电源。熔化极电弧在等离子弧中间燃烧。等离子弧起到预热熔

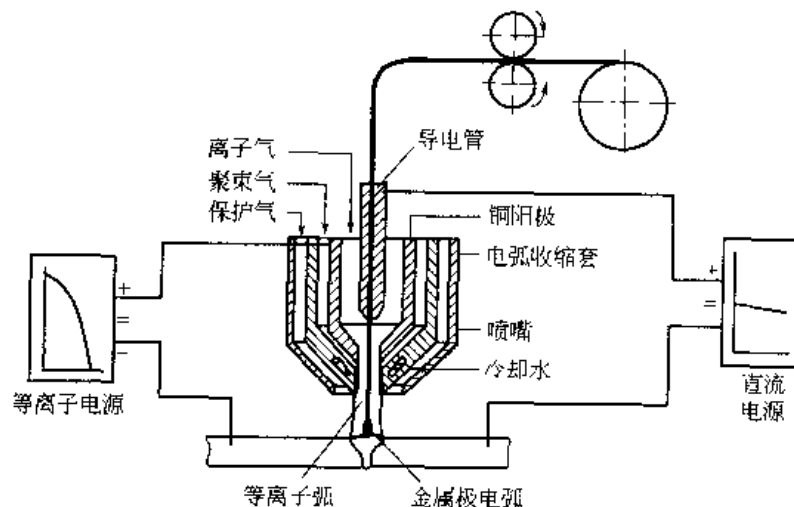


图 4.2 水冷喷嘴式熔化极等离子弧焊

化焊丝的作用，因此熔敷率很高，适用于堆焊。

图 4.3 所示为钨极式熔化极等离子弧焊。在钨极与工件之间接有直流电源和高频引弧器，等离子弧在钨极与工件之间燃烧。熔化极与工件之间接直流电源，熔化极电弧在等离子弧中燃烧。在焊接导热性强的金属材料时，还可以在工件和喷嘴之间加一降压特性直流电源加热工件。

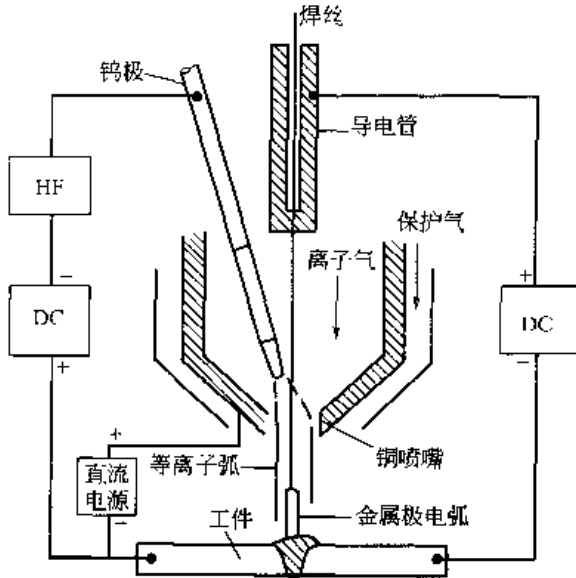


图 4.3 钨极式熔化极等离子弧焊

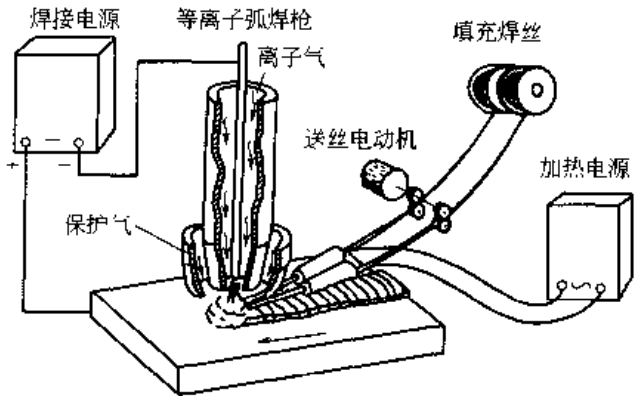


图 4.4 热丝等离子弧焊的示意

(5) 热丝等离子弧焊

为了提高熔敷速度，用一单独的平特性交流电源加热填充焊丝，交流电源可以减弱磁偏吹，对稳定电弧有利。为了提高生产率可以采用双丝和多丝输送。图 4.4 所示为双丝热丝等离子弧焊的示意，这种方法适用于堆焊。

(6) 脉冲等离子弧焊

将焊接电流调制成基值电流和脉冲电流。基值电流起维弧和预热工件的作用，脉冲电流起熔化工件作用。因此拓宽了焊接工艺参数的调节范围，也拓宽了等离子弧焊接的适用范围。

4.2.2 等离子弧焊设备的组成

等离子弧焊接系统由焊接电源、等离子弧发生器（焊枪）、控制电路、供气回路及供水回路等组成。自动等离子弧焊接系统还包括焊接小车、转动夹具的行走机构和控制电路等。图 4.5 所示为典型手工等离子弧焊接系统（大电流等离子弧、微束等离子弧）的示意。

(1) 弧焊电源

等离子弧焊接设备一般采用具有垂直外特性或陡降外特性的电源，以防止焊接电流因弧长的变化而变化，获得均匀稳定的熔深及焊缝外形尺寸。一般不采用交流电源，只采用直流电源，并采用正极性接法。与钨极氩弧焊相比，等离子弧焊所需的电源空载电压较高。

采用氩气作等离子气时，电源空载电压应为 60~85V；当采用 Ar+H₂ 或氩与其他双原子的混合气体作等离子气时，电源的空载电压应为 110~120V。采用联合型电弧焊接时，由于转移弧与非转移弧同时存在，因此，需要两套独立的电源供电。利用转移型电弧焊接时，可以采用一套电源，也可以采用两套电源。

一般采用高频振荡器引弧，当使用混合气体作等离子气时，应先利用纯氩引弧，然后再

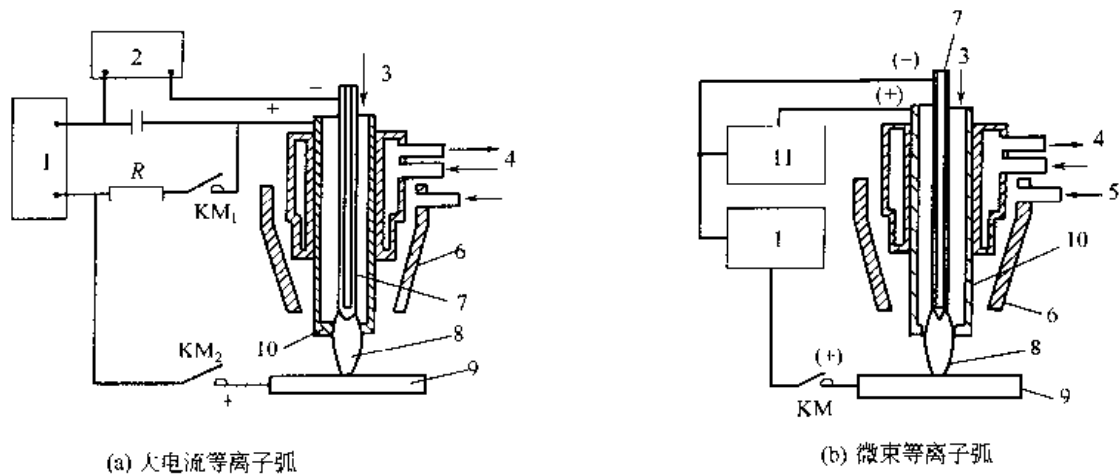


图 4.5 典型等离子弧焊接系统的示意

1—焊接电源；2—高频振荡器；3—离子气；4—冷却水；5—保护气；6—保护气罩；
7—钨极；8—等离子弧；9—工件；10—喷嘴；11—维弧电源；KM、KM₁、KM₂—接触器触头

将等离子气转变为混合气体，这样可降低对电源的空载电压要求。

(2) 控制系统

控制系统的作用是控制焊接设备的各个部分按照预定的程序进入、退出工作状态。整个设备的控制电路通常由高频发生器控制电路、送丝电机拖动电路、焊接小车或专用工装控制电路以及程控电路等组成。程控电路控制等离子气预通时间、等离子气流递增时间、保护气预通时间、高频引弧及电弧转移、焊件预热时间、电流衰减熄弧、延迟停气等。

(3) 供气系统

等离子弧焊接设备的气路系统较复杂。由等离子气路、正面保护气路及反面保护气路等组成，而等离子气路还必须能够进行衰减控制。为此，等离子气路一般采用两路供给，其中一路可经气阀放空，以实现等离子气的衰减控制。采用氩气与氢气的混合气体作等离子气时，气路中最好设有专门的引弧气路，以降低对电源空载电压的要求。

表 4.2 列出了大电流等离子弧焊常用等离子气及保护气体。表 4.3 列出了小电流等离子弧焊常用保护气体。

表 4.2 大电流等离子弧焊常用等离子气及保护气体

金属	厚度/mm	焊接工艺	
		穿孔法	熔透法
碳钢(铝镇静钢)	<3.2	Ar	Ar
	>3.2	Ar	25%Ar+75%He
低合金钢	<3.2	Ar	Ar
	>3.2	Ar	25%Ar+75%He
不锈钢	<3.2	Ar 或 92.5%Ar+7.5%H ₂	Ar
	>3.2	Ar 或 95%Ar+5%H ₂	25%Ar+75%He
铜	<2.1	Ar	He 或 25%Ar+75%He
	>2.4	不推荐 ^①	He
镍合金	<3.2	Ar 或 92.5%Ar+7.5%H ₂	Ar
	>3.2	Ar 或 95%Ar+5%H ₂	25%Ar+75%He
活性金属	<6.4	Ar	Ar
	>6.4	Ar + (50%~70%)He	25%Ar+75%He

① 由于底部焊道成形不良，这种技术只能用于铜锌合金的焊接。

表 4.3 小电流等离子弧焊常用保护气体

金属	厚度/mm	焊接工艺	
		穿孔法	熔透法
铝	<1.6	不推荐	Ar 或 He
	>1.6	He	He
碳钢(铝镇静钢)	<1.6	不推荐	Ar 或 75%Ar+25%He
	>1.6	Ar 或 25%Ar+75%He	Ar 或 25%Ar+75%He
低合金钢	<1.6	不推荐	Ar, He 或 Ar+(1%~5%)H ₂
	>1.6	25%Ar+75%He 或 Ar+(1%~5%)H ₂	Ar, He 或 Ar+(1%~5%)H ₂
不锈钢	所有厚度	Ar, 25%Ar+75%He 或 Ar+(1%~5%)H ₂	Ar, He 或 Ar+(1%~5%)H ₂
铜	<1.6	不推荐	75%Ar+25%He 或 He 或 75%He+25%Ar
	>1.6	He 或 25%Ar+75%He	He
镍合金	所有厚度	Ar, 25%Ar+75%He 或 Ar+(1%~5%)H ₂	Ar, He 或 Ar+(1%~5%)H ₂
活性金属	<1.6	Ar, He 或 25%Ar+75%He	Ar
	>1.6	Ar, He 或 25%Ar+75%He	Ar 或 25%Ar+75%He

注：气体选择仅指保护气体，在所有情况下等离子气均为氩气。

(4) 水路系统

由于等离子弧的温度在 10000℃ 以上，为了防止烧坏喷嘴并增加对电弧的压缩作用，必须对电极及喷嘴进行有效的水冷却。冷却水的流量不得小于 3L/min，水压不小于 0.15~0.2MPa。水路中应设有水压开关，在水压达不到要求时，切断供电回路。

(5) 焊枪

等离子弧焊枪是等离子弧发生器，对等离子弧的性能及焊接过程的稳定性起着决定性作用。焊枪主要由电极、电极夹头、压缩喷嘴、中间绝缘体、上枪体、下枪体及冷却套等组成。最关键的部件为喷嘴及电极。

1) 喷嘴

等离子弧焊设备的典型喷嘴结构如图 4.6 所示。根据喷嘴孔道的数量，等离子弧焊喷嘴可分为单孔型[见图 4.6(a)、(c)]和三孔型[见图 4.6(b)、(d)、(e)]两种。根据孔道的形状，喷嘴可分为圆柱型[见图 4.6(a)、(b)]及收敛扩散型[见图 4.6(c)、(d)、(e)]两种。大部分焊枪采用圆柱形压缩孔道，而收敛扩散型压缩孔道有利于电弧的稳定。

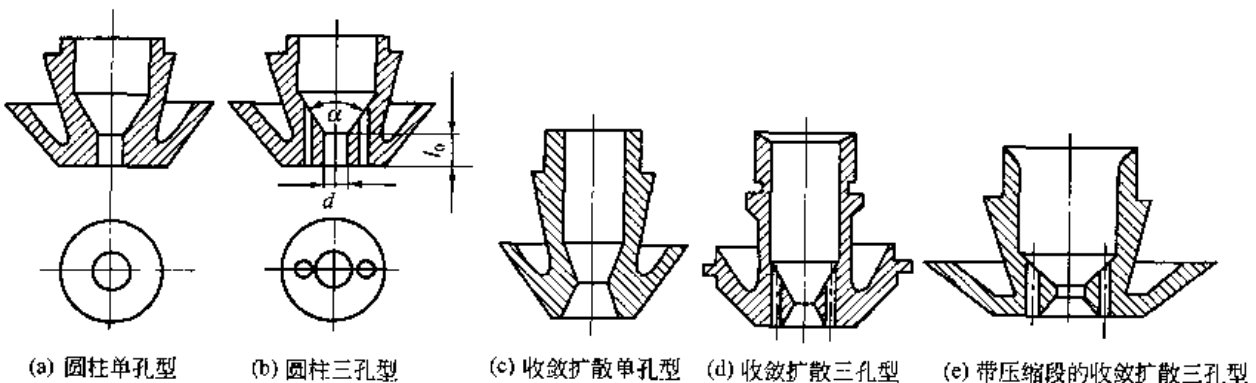


图 4.6 等离子弧焊接喷嘴的结构

三孔型喷嘴除了中心主孔外，主孔左右还有两个小孔。从这两个小孔中喷出的等离子气对等离子弧有一附加压缩作用，使等离子弧的截面变为椭圆形。当椭圆的长轴平行于焊接方向时，可显著提高焊接速度，减小焊接热影响区的宽度。最重要的喷嘴形状参数为压缩孔径

及压缩孔道长度。

① 喷嘴孔径 d 决定了等离子弧的直径及能量密度，应根据焊接电流大小及等离子气种类、流量来选择。对于给定的电流和离子气流量，直径越小，对电弧的压缩作用越大，但太小时，等离子弧的稳定性下降，甚至导致双弧现象，烧坏喷嘴。对于一定的喷嘴孔径，有一个合理的电流范围，表 4.4 列出了各种直径的喷嘴孔径与许用电流。

表 4.4 各种直径的喷嘴孔径与许用电流

喷嘴孔径/mm	许用电流/A		喷嘴孔径/mm	许用电流/A	
	焊接	切割		焊接	切割
0.6	≤ 5		2.8	180	210
0.8	1~25	14	3.0	210	280
1.2	20~60	80	3.5	300	380
1.4	30~70	100	4.0	—	400
2.0	40~100	140	4.5	—	450
2.5	140	180	5.0	—	—

对于相同的喷嘴孔径，切割时电流可以用得更大一些，这是切割离子气流量远大于焊接的缘故。

② 喷嘴孔道长度 l_0 。在一定的压缩孔径下，孔道长度 l_0 越长，对等离子弧的压缩作用越强，但 l_0 太大时，等离子弧不稳定。常以 l_0/d 表示喷嘴孔道压缩特征，称为孔道比。通常要求孔道比 l_0/d 在一定的范围之内，见表 4.5。

表 4.5 喷嘴的孔道比及压缩角

喷嘴用途	喷嘴孔径 d /mm	孔道比 l_0/d	压缩角 $\alpha/^\circ$	等离子弧类型
焊接	0.6~1.2	2.0~6.0	25~45	联合型电弧
	1.6~3.5	1.0~1.2	60~90	转移型电弧
切割	0.8~2.0	2.0~2.5	—	转移型电弧
	2.5~5.0	1.5~1.8	—	转移型电弧
堆焊	—	0.6~0.98	60~75	转移型电弧

③ 锥角 α 又称为压缩角，实际上对等离子弧的压缩影响不大，特别是当离子气流量较小， l_0/d 较小时， $30^\circ \sim 180^\circ$ 范围内均可以用。但最好与钨极的端部形状配合来选择，保证将阳极斑点稳定在电极的顶端，以免等离子弧不是在钨极顶端引燃而是缩在喷嘴内。

2) 电极

等离子弧焊接一般采用钍钨极或铈钨极，有时也采用锆钨极或锆电极。钨极一般需要进行水冷，小电流时采用间接水冷方式，钨极为棒状电极；大电流时，采用直接水冷，钨极为镶嵌式结构。

棒状电极端头一般磨成尖锥形或尖锥平台形，电流较大时还可磨成球形，以减少烧损。表 4.6 列出了棒状电极的许用电流。镶嵌式电极的端部一般磨成平面形。为了保证焊接电弧稳定，不产生双弧，钨极应与喷嘴保持同心，而且钨极的内缩长度 l_s 要合适 ($l_s = l_0 \pm 0.2\text{mm}$)。

表 4.6 不同直径棒状电极的许用电流

电极直径/mm	电流范围/A	电极直径/mm	电流范围/A	电极直径/mm	电流范围/A	电极直径/mm	电流范围/A
0.25	< 15	2.4	150~250	1.0	15~80	4.0	400~500
0.50	5~20	3.2	250~400	1.6	70~150	5.0~9.0	500~1000

4.3 等离子弧焊工艺

4.3.1 等离子弧焊的工艺参数

(1) 焊接电流

焊接电流是根据板厚或熔透要求来选定。焊接电流过小，难于形成小孔效应；焊接电流增大，等离子弧穿透能力增大，但电流过大会造成熔池金属因小孔直径过大而坠落，难以形成合格焊缝，甚至引起双弧，损伤喷嘴并破坏焊接过程的稳定性。因此，在喷嘴结构确定后，为了获得稳定的小孔焊接过程，焊接电流只能在某一个合适的范围内选择，而且这个范围与离子气的流量有关。

(2) 焊接速度

焊接速度应根据等离子气流量及焊接电流来选择。其他条件一定时，如果焊接速度增大，焊接热输入减小，小孔直径随之减小，直至消失，失去小孔效应。如果焊接速度太低，母材过热，小孔扩大，熔池金属容易坠落，甚至造成焊缝凹陷、熔池泄漏现象。因此，焊接速度、离子气流量及焊接电流等这三个工艺参数应相互匹配。

(3) 喷嘴离工件的距离

喷嘴离工件的距离过大，熔透能力降低；距离过小，易造成喷嘴被飞溅物堵塞，破坏喷嘴正常工作。喷嘴离工件的距离一般取 3~8mm。与钨极氩弧焊相比，喷嘴距离变化对焊接质量的影响不太敏感。

(4) 等离子气及流量

等离子气及保护气体通常根据被焊金属及电流大小来选择。大电流等离子弧焊接时，等离子气及保护气体通常采取相同的气体，否则电弧的稳定性将变差。小电流等离子弧焊接通常采用纯氩气作等离子气。这是因为氩气的电离电压较低，可保证电弧引燃容易。

离子气流量决定了等离子流力和熔透能力。等离子气的流量越大，熔透能力越大。但等离子气流量过大会使小孔直径过大而不能保证焊缝成形。因此，应根据喷嘴直径、等离子气的种类、焊接电流及焊接速度选择适当的离子气流量。利用熔入法焊接时，应适当降低等离子气流量，以减小等离子流力。

保护气体流量应根据焊接电流及等离子气流量来选择。在一定的离子气流量下，保护气体流量太大，会导致气流的紊乱，影响电弧稳定性和保护效果。而保护气体流量太小，保护效果也不好，因此，保护气体流量应与等离子气流量保持适当的比例。

小孔型焊接保护气体流量一般在 15~30L/min 范围内。采用较小的等离子气流量焊接时，电弧的等离子流力减小，电弧的穿透能力降低，只能熔化工件，形不成小孔，焊缝成形过程与 TIG 焊相似。这种方法称为熔入型等离子弧焊接，适用于薄板、多层焊的盖面焊及角焊缝的焊接。

(5) 引弧及收弧

板厚小于 3mm 时，可直接在工件上引弧和收弧。利用穿孔法焊接厚板时，引弧及熄弧处容易产生气孔、下凹等缺陷。对于直缝，可采用引弧板及熄弧板来解决这个问题。先在引弧板上形成小孔，然后再过渡到工件上去，最后将小孔闭合在熄弧板上。

大厚度的环缝，不便加引弧板和收弧板时，应采取焊接电流和离子气递增和递减的办法在工件上起弧，完成引弧建立小孔并利用电流和离子气流量衰减法来收弧闭合小孔。

(6) 接头形式和装配要求

工件厚度大于 1.6mm 时, 小于表 4.1 列举的厚度时, 采用 I 形坡口, 用穿孔法单面焊双面成形一次焊透。工件厚度大于表 4.1 列举的数值时, 根据厚度不同, 可开 V 形、U 形或双 V 形、双 U 形坡口。

工件厚度小于 1.6mm, 采用微束等离子弧焊时, 接头形式有对接、卷边对接、卷边角接、端面接头。当厚度小于 0.8mm 时, 接头装配要求见表 4.7。

表 4.7 厚度 $\delta < 0.8\text{mm}$ 的接头装配要求

接头形式	对接间隙/mm	错边/mm	压板间距离/mm	衬垫槽宽/mm
平对接	$\leq 0.2\delta$	$\leq 0.4\delta$	$(10\sim 20)\delta$	$(4\sim 16)\delta$
卷边对接	$\leq 0.5\delta$	$\leq \delta$	$(15\sim 30)\delta$	$(10\sim 24)\delta$
端接	$\leq \delta$	$\leq 3\delta$	--	--

注: 1. 衬垫槽中通氩或氦。

2. 板厚小于 0.25mm 时推荐用卷边接头。

4.3.2 强流(大电流)等离子弧焊工艺

(1) 强流等离子弧焊的工艺特点

强流等离子弧焊机通常采用穿孔法焊接工艺进行焊接。通过选择较大的焊接电流及等离子流, 使等离子弧具有较大的能量密度及等离子流力, 将焊接工件完全熔透并在等离子流力的作用下形成一个贯穿工件的小孔, 熔化金属被排挤在小孔周围。随着等离子弧在焊接方向移动, 熔化金属沿电弧周围熔池壁向熔池后方移动并结晶成焊缝, 而小孔随着等离子弧向前移动。

这种小孔焊接工艺特别适用于单面焊双面成形; 焊接较薄的工件时, 如厚度 1~8mm 的不锈钢、厚度 1~7mm 的碳钢以及厚度 1~10mm 的钛合金时, 可不开坡口、不加垫板、不加填充金属, 一次实现双面成形。

强流等离子焊机也可采用熔入法焊接工艺进行焊接, 这种焊接工艺与钨极氩弧焊(TIG)相似。

(2) 穿孔型等离子弧焊工艺

小孔的产生依赖于等离子弧的能量密度, 板厚越大, 要求的能量密度越大, 由于等离子弧的能量密度是有限的, 因此, 穿孔型等离子弧焊的焊接厚度是有限的。对于厚度更大的板材, 穿孔型等离子弧焊只能进行第一道焊缝的焊接。

当板厚大于 1.6 mm 时, 通常不开坡口, 利用穿孔型等离子弧焊进行焊接。当板厚大于表 4.1 中的限值时, 需要开 V 形或 U 形坡口, 进行多层焊。与 TIG 焊相比, 可采用较大的坡口角度及钝边。钝边的最大允许值等于穿孔法的最大焊接厚度。第一层用穿孔法进行焊接, 其他各层用熔入法或其他焊接方法焊接。

穿孔型等离子弧焊接的工艺参数主要有等离子气种类及流量、保护气种类及流量、焊接电流、电弧电压、焊接速度等。焊接时总是根据板厚或熔透要求首先选定焊接电流。为了形成稳定的穿孔效应, 等离子气应有足够的流量, 并且要与焊接电流、焊接速度适当匹配。

穿孔型等离子弧焊的工艺参数见表 4.8。穿孔型等离子弧焊各工艺参数之间有着密切的联系, 互相制约。选择调试各工艺参数时, 应注意它们之间的匹配关系, 才能获得最佳效果。

表 4.8 穿孔型等离子弧焊的工艺参数

焊件材料	板厚/mm	焊接速度 /cm·s ⁻¹	电流/A	电压/V	气体流量 /L·h ⁻¹			坡口形式
					气体种类	离子气	保护气	
低碳钢	3.2	0.51	185	28	Ar	364	1680	I
低合金钢	4.2	0.42	200	29	Ar	336	1680	I
	6.4	0.59	275	33	Ar	120	1680	I
不锈钢	2.5	1.01	115	30	Ar+5% H ₂	168	980	I
	3.2	1.19	145	32	Ar+5% H ₂	280	980	I
	4.2	0.60	165	36	Ar-5% H ₂	364	1260	I
	6.4	0.59	240	38	Ar-5% H ₂	504	1400	I
	12.7	0.45	320	26	Ar	—	—	I
钛合金	3.2	1.01	185	21	Ar	224	1680	I
	4.2	0.55	175	25	Ar	504	1680	I
	10.0	0.42	225	38	75% He+ Ar	896	1680	I
	12.7	0.42	270	36	50% He+ Ar	756	1680	I
	14.2	0.30	250	39	50% He+ Ar	840	1680	V
铜	2.5	0.42	180	28	Ar	280	1680	I
黄铜	2.0	0.85	140	25	Ar	224	1680	I
	3.2	0.60	200	27	Ar	280	1680	I
镍	3.2	—	200	30	Ar-5% H ₂	280	1200	I
	6.4	—	250	30	Ar-5% H ₂	280	1200	I
铝	6.4	0.42	195	30	Ar	228	1320	I

(3) 熔透型等离子弧焊工艺

熔透型等离子弧焊工艺参数与穿孔型相类似，对于中、小电流熔透型等离子弧焊宜采用联合型弧。联合型等离子弧，由于维弧-非转移弧的存在，使转移弧易于稳定。甚至焊接电流 1A 以下仍能稳定燃烧。非转移弧（维弧）的焊接电流不宜过大，以免损坏喷嘴，一般 2~5A 为宜。熔透型等离子弧焊接的工艺参数见表 4.9。

表 4.9 熔透型等离子弧焊接的工艺参数

材料	板厚/mm	焊接电流/A	焊接电压/V	焊接速度/cm·s ⁻¹	离子气 Ar /L·min ⁻¹	保护气体 /L·min ⁻¹	喷嘴孔径/mm	备注
不锈钢	0.025	0.3	—	0.212	0.20	8 (Ar+1% H ₂)	0.75	卷边焊
	0.075	1.6	—	0.253	0.20	8 (Ar+1% H ₂)	0.75	
	0.125	1.6	—	0.625	0.28	7 (Ar+0.5% H ₂)	0.75	
	0.175	3.2	—	1.292	0.28	9.5 (Ar+4% H ₂)	0.75	
	0.250	5.0	30	0.533	0.50	7Ar	0.60	
	0.2	4.3	25	—	0.40	5Ar	0.80	对接焊(背面有铜垫)
	0.2	4.0	26	—	0.40	6Ar	0.80	
	0.1	3.3	24	0.617	0.15	4Ar	0.60	
	0.25	6.5	24	0.450	0.80	6Ar	0.80	
	1.0	8.7	25	0.450	0.60	11Ar	1.20	
	0.25	6.0	—	0.333	0.28	9.5 (1% H ₂ + Ar)	0.75	
	0.75	10	—	0.208	0.28	9.5 (1% H ₂ - Ar)	0.75	
	1.2	13	—	0.250	0.42	7(Ar+8% H ₂)	0.80	
	1.6	46	—	0.432	0.47	12 (Ar-5% H ₂)	1.3	
	2.4	90	—	0.333	0.70	12 (Ar+5% H ₂)	2.2	
3.2	100	—	0.432	0.70	12 (Ar-5% H ₂)	2.2		

续表

材 料	板厚 mm	焊接 电流 /A	焊接 电压/V	焊接速度 $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	离子气 /Ar /L · min ⁻¹	保护气体 /L · min ⁻¹	喷嘴孔 径/mm	备 注
镍合金	0.15	5	22	0.50	0.40	5Ar	0.6	对接焊
	0.56	4~6	-	0.25~0.333	0.28	7(Ar+8% H_2)	0.8	
	0.71	5~7	-	0.25~0.333	0.28	7(Ar+8% H_2)	0.8	
	0.91	6~8	-	0.208~0.292	0.33	7(Ar+8% H_2)	0.8	
	1.20	10~12	-	0.208~0.25	0.38	7(Ar+8% H_2)	0.8	
钛	0.75	3	-	0.25	0.2	8Ar	0.75	手工对接
	0.20	5	-	0.25	0.2	8Ar	0.75	
	0.37	8	-	0.208	0.2	8Ar	0.75	
	0.55	12	-	0.117	0.2	4.2Ar	0.90	
不锈钢丝	$\phi 0.75$	1.7	-	-	0.28	7(Ar+15% H_2)	0.75	搭接时间 1s
	$\phi 0.75$	0.9	-	-	0.28	7(Ar+15% H_2)	0.75	端接时间 0.6s
镍丝	$\phi 0.12$	0.1	-	-	0.28	7Ar	0.75	搭接热电偶
	$\phi 0.37$	1.1	-	-	0.28	7Ar	0.75	
	$\phi 0.37$	1.0	-	-	0.28	7(Ar+2% H_2)	0.75	
钼丝与镍丝	$\phi 0.5$	2.5	-	焊一点为 0.2s	0.20	9.5Ar	0.75	点焊
紫铜	0.025	0.3	-	0.208	0.28	9.5(Ar+0.5% H_2)	0.75	卷边对接
	0.075	0.10	-	0.25	0.28	9.5(Ar+75%He)	0.75	

4.3.3 微束等离子弧焊工艺

人们通常将焊接电流在 30A 以下的等离子弧焊接，称为微束等离子弧焊接。由于是在小电流条件下，无论是等离子弧的形态、稳定性及其对电源、设备的要求，还是焊接工艺过程及其操作方法，都有一系列的特殊性。

(1) 微束等离子弧焊的特点

微束等离子弧焊是一种小电流（通常小于 30A）熔入型焊接工艺。为了保持小电流时电弧的稳定，一般采用小孔径压缩喷嘴（0.6~1.2mm）及联合型电弧。即焊接时存在两个电弧，一个是燃烧于电极与喷嘴之间的非转移弧，另一个为燃烧于电极与焊件之间的转移弧。前者起着引弧和维弧作用，使转移弧在电流小至 0.5A 时仍非常稳定；后者用于熔化工件。

微束等离子弧是等离子弧的一种。在产生普通等离子弧的基础上采取提高电弧稳定性措施，进一步加强电弧的压缩作用，减小电流和气流，缩小电弧室的尺寸。这样，就使微小的等离子焊枪喷嘴喷射出小的等离子弧焰流，如同缝纫机针一般细小。与钨极氩弧焊相比，微束等离子弧焊接的优点是：

- a. 可焊更薄的金属，最小可焊厚度为 0.01mm；
- b. 弧长在很大的范围内变化时，也不会断弧，并能保持柱状特征；
- c. 焊接速度快、焊缝窄、热影响区小、焊接变形小。

(2) 获得微束等离子弧的三要素

获得微束等离子弧，必须满足以下三个基本条件。

① 微束等离子弧发生器 是产生微束等离子弧的器件，也称为等离子枪，它是以等离子电弧室为主体组成的。产生微束等离子弧的第一要素是要有一个良好的等离子枪，要求不漏气、不漏水、不漏电，电极对中且调整更换方便，喷嘴耐用又便于更换。

电弧室由上下两体构成，中间加以绝缘。上枪体的主要功能是：夹持钨极并使之接入电源负极，以使钨极尖端能产生电弧放电的阴极斑点；将电弧放电产生在钨极区的热量及时排

出；钨极应能始终保持对准下枪体的喷嘴孔径中心，且应能调整极尖的高度和更换新钨极；导入惰性压缩气体。这样，上枪体应有电、气、水三个导入孔道和一个水的出口。下枪体上安装经常更换的喷嘴，要接电源的正极，要有进出冷却水的散热系统。有的微束等离子弧焊枪上设有保护气系统，也设置在下枪体上。

② 直流电源 作为微束等离子弧的电源，除了普通等离子弧的直流电源、下降的伏安特性、电流可以细微调节等要求外，还有一个重要的特殊要求，即高空载电压。一般直流电源的空载电压是80~100V，微束等离子弧的电源空载电压应是120~160V，有时还要高达200V。因为微束等离子弧的电流小(<30A)，电弧气体介质质点的电离、发射作用弱，为便于引弧和稳弧，就需要提高空载电压来加强场致发射作用，所以微束等离子弧焊的电源需要特制专用。

微束等离子弧焊电源使用时是采用正极性接法，即将焊枪钨极接电源负端，电源的另一端(正极)通过接触器开关接焊枪的喷嘴。同时，电源的正极端还要并联一个电路，即通过接触器并联到工件上。

就微束等离子弧的直流电源的供电连续性来说，可有两种电源：一种是连续直流供电，得到的焊接电流是连续的直流电，这就是通常所说的直流电源；另一种是可以有规律的进行断续供电，即脉冲电源。脉冲电流的主要优越性在于，它除了能像连续直流那样能调节电流的大小以外，它的通电时间 t_1 和间隙时间 t_2 可以调节。因此，脉冲电源优于普通直流电源。

③ 惰性气体源 在等离子枪的电弧室里，电弧柱是在三个压缩效应(机械压缩效应、热收缩效应和磁压缩效应)的作用下形成等离子弧的。三个效应中有两个是惰性气体所为。微束等离子弧所使用的惰性气体，一般都是氩气，使用工业用瓶装压缩氩气即可。使用时要接装减压表和流量计，以便能精细地调节压力和流量这两个参数。

(3) 微束等离子弧焊的工艺参数

微束等离子弧焊的工艺参数，主要是焊接电流、焊接速度、工作气体流量、保护气体流量、电弧长度、喷嘴直径、喷嘴通道比和钨极的内缩量等，它们对焊缝的形状和焊接质量都有影响。

常用的微束等离子弧焊的工艺参数见表4.10。

表 4.10 常用的微束等离子弧焊的工艺参数

焊件材料	板厚/mm	焊接速度/cm·s ⁻¹	焊接电流/A	焊接电压/V	等离子气流量(Ar)/L·min ⁻¹	保护气流量/L·min ⁻¹		喷嘴孔径/mm	备注	
						种类	流量			
不锈钢	0.025	0.21	0.3	—	0.2	Ar+1% H_2	8	卷边焊		
	0.075	0.26	1.6	—	0.2	Ar+1% H_2	8			
	0.125	0.63	1.6	—	0.28	Ar+0.5% H_2	7			
	0.175	1.29	3.2	—	0.25	Ar+4% H_2	9.5			
	0.25	0.53	5	30	0.5	Ar	7			
	0.2	—	4	26	0.4	Ar	6	对接焊(铜衬垫)		
	0.2	—	4.3	25	0.4	Ar	5			
	0.1	0.62	3.3	24	0.15	Ar	4			
	0.25	0.45	6.5	24	0.6	Ar	6			
	1.0	0.46	2.7	25	0.6	Ar	11			
	0.25	0.33	6	—	0.28	Ar+1% H_2	9.5	0.75	手工对接	
	0.75	0.21	10	—	0.28	Ar+1% H_2	9.5	0.75		
	1.2	0.25	13	—	0.42	Ar+8% H_2	7	0.8		
	1.6	0.42	46	—	0.47	Ar+5% H_2	12	1.3		
	2.4	0.33	90	—	0.7	Ar+5% H_2	12	2.2		
3.2	0.42	100	—	0.7	Ar+5% H_2	12	2.2			

续表

焊件材料	板厚 /mm	焊接速度 /cm·s ⁻¹	焊接 电流/A	焊接电 压/V	等离子气流量 (Ar)/L·min ⁻¹	保护气流量/L·min ⁻¹		喷嘴孔 径/mm	备注
						种类	流量		
镍合金	0.15	0.50	5	22	0.4	Ar	5	0.6	对接焊
	0.56	0.25~0.33	4~6	—	0.28	Ar+8% H ₂	7	0.8	
	0.71	0.25~0.33	5~7	—	0.28				
	0.91	0.21~0.29	6~8	—	0.33				
	1.2	0.21~0.25	10~12	—	0.38				
钛	0.15	0.25	3	—	0.2	Ar	8	0.75	手工对接
	0.2	0.25	5	—					
	0.37	0.21	8	—		He+25% Ar	2		
	0.55	0.42	12	—					
哈 斯 特 洛 依 合 金	0.125	0.42	4.8	—	0.28	Ar	8	0.75	对接焊
	0.25	0.33	5.8	—					
	0.5	0.42	10	—					
	0.4	0.83	13	—		4.2	0.9		
康铜丝	φ0.05	—	0.5	—	—	Ar	3	0.6	端头对接
	φ0.1	—		—					
不锈钢丝	φ0.75	—	1.7	—	0.28	Ar+15% H ₂	7	0.75	搭接时间 1s; 并接时间 0.1s
	φ0.75	—	0.9	—	0.28	Ar+15% H ₂	7	0.75	
镍丝	φ0.12	—	0.1	—	0.28	Ar	7	0.75	搭接热电偶 点焊时间 0.2s
	φ0.37	—	1.1	—	0.28	Ar			
	φ0.37	—	1.0	—	0.28	Ar+3% H ₂			
钼丝与 镍丝	φ0.5	0.2s/焊点	2.5	—	0.2	Ar	9.5	0.75	点焊
紫铜	0.025	0.21	0.3	—	0.28	Ar+0.5% H ₂	9.5	0.75	卷边对接
	0.075	0.25	10	—	0.28	Ar+15% H ₂	9.5	0.75	

(4) 微束等离子弧焊的技术要点

1) 接头形式

接头形式根据板厚来选择,厚度在 0.05~1.6mm 之间时,通常采用微束等离子弧进行焊接。微束等离子弧焊主要用于焊接薄件或薄件与厚件的连接件,所以微束等离子弧的接头形式和尺寸有其独特之处。微束等离子弧的接头不开坡口,对于板厚 0.2mm 的对接接头,通常都采用卷边的接头形式。板厚小于 0.8mm 的微束等离子弧焊的常用接头形式如图 4.7 所示。

2) 夹具和金属垫板

微束等离子弧焊接为了保证精确的装配和获得高质量的焊缝,必须使用装配夹具或装配-焊接联合夹具。夹具的尺寸要求精密,装卸要求方便,焊缝周围的夹具零件要用非磁性材料(黄铜、不锈钢)制造,防止焊接时电弧产生偏吹。

为了保证焊缝背面的良好成形,焊道背面要放上金属垫板。一般的金属垫板上均有成形槽,形状可以是倒三角形、矩形或半椭圆形,成形槽宽度可为 2~3mm,槽深 0.2~0.5mm。当焊件板厚小于 0.3mm 时,可以使用无槽的光垫板。金属垫板的材料大多选用紫铜。一般情况下,金属垫板常和装配-焊接夹具结合在一起。

3) 增强保护效果

一般的微束等离子弧焊枪都带有保护气罩装置(喷嘴)。但在有些情况下,如受焊缝的形式和位置所限,或焊件的结构和尺寸所限,焊枪的保护气罩对焊缝的保护并不完全有效,

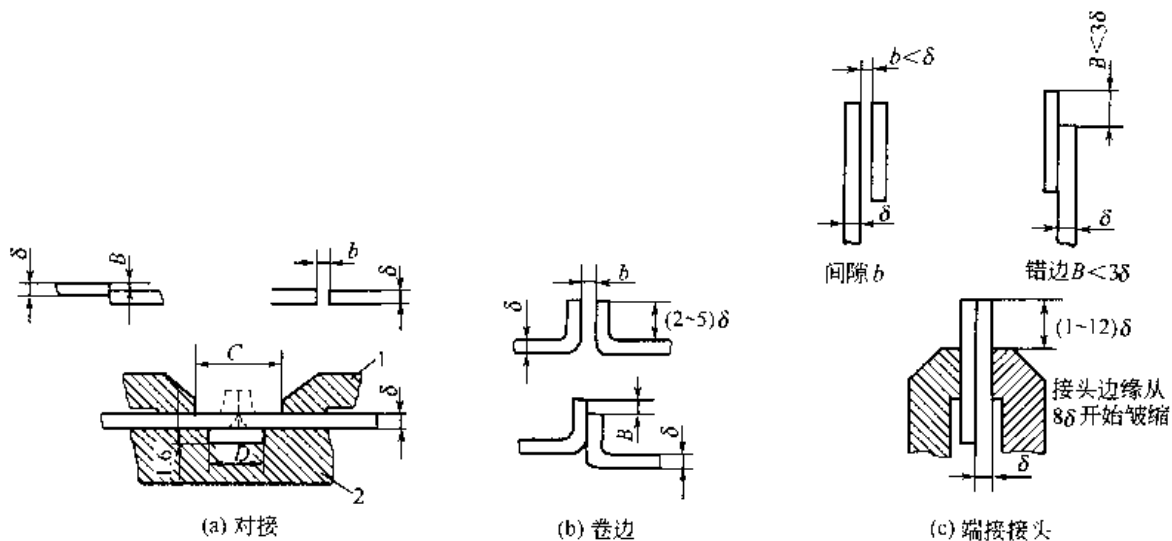


图 4.7 板厚小于 0.8mm 的微束等离子弧焊的常用接头形式

1—压板；2—垫板

这时焊接夹具应加设特殊的保护装置，增强保护效果。

保护装置的结构和方式因焊件而异，是多种多样的。如装在正面焊缝两侧附近的反射屏（保护气挡板），可将散失的保护气折回，改善保护条件。再如，焊接管状结构件（或小型容器）时，可向管（或容器）内部充保护气，保护背面焊道。对某些焊件也可以设计专用保护喷嘴，如保护卷边对接焊缝的专用喷嘴。

通常增强保护的装置都是与焊接夹具制造在一起，使夹具具有多种功能。

4) 点固焊

不使用焊接夹具的焊件，焊缝较长时，要每隔 3~5mm 设置一个定位焊点，使其点固，否则焊接时要发生变形。点固焊使用的工艺参数可与焊接时相同或略小一些。使用夹具的焊件焊接，焊前不用点固焊。

5) 焊件焊前清理

工件焊接接头待焊处及端边焊前均要净化处理，除去油污、锈等，其方法（化学的或机械的）与一般焊接的焊前处理相似，只不过是因薄件对污物敏感而应更严一些。

6) 焊机准备

焊接前要将待用的微束等离子弧焊机准备好，并应做以下检查。

a. 检查微束等离子弧焊枪，内容包括：焊枪的气、水路要密封并畅通，钨极、喷嘴的调整和更换要方便；能保证电极的同心度和内缩量并可调，焊枪的控制按钮应好用，焊枪的手柄可靠地绝缘。

b. 检查微束等离子弧焊机的电源，即包括电源的空载电压能满足要求，极性的接法正确，焊接电流又能均匀地调节，则电源合格。

c. 检查微束等离子弧焊机的控制系统，其内容包括：检查气路（分工作气和保护气）应密封和畅通，流量应能精细调节，气阀电路的控制应可靠。水路要保证畅通和密封，有水流开关的设备要检查水流开关的灵敏度。控制系统的电路主要检查高频引弧电路的点火（引弧）可靠性，提前送气和滞后断气的控制可靠性。电流衰减电路应工作可靠和速度可调，完整的焊接过程程序控制的可靠性等。有自动行走焊车的微束等离子弧焊机，还应检查焊接小

车的调速系统和其控制程序。

d. 焊枪电极最好选购钨钨电极，其直径应按工艺参数中的电流选择。电流较大时选直径 1.2mm 的电极。电流较小时可选用直径 0.8mm 的电极。电极尖端磨成 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 的圆锥角。电极的磨尖最好是使用专用的电极磨尖机磨制，这样可以保证度数和偏心。

e. 调整钨极对中时为了便于观察，可以在焊机电源不接通的情况下只打高频火花，从喷嘴观察火花。若火花在孔内圆周分布达到 $1/2\sim 2/3$ 时，就认为对中正确。长时间地使用高频火花对中，也会使钨极少量烧损，可以放少量氩气保护。

f. 检查焊机循环水的冷却效果。焊机在额定状态下正常运行，冷却水的出口水温以 $40\sim 50^{\circ}\text{C}$ 为宜或以手感比体温稍高些即可。焊机不通冷却水不可使用。

g. 附有工件放大镜的焊机，焊前要将放大镜焦距调好，这对细小零件焊接时十分必要。若焊机不附放大镜，则可以自选 5~10 倍的放大镜临时固定在距焊缝的适当位置处，以供使用。

h. 按工艺技术文件规定的焊接工艺参数调节好焊机，经试焊确实无误后予以固定，等待使用。

7) 焊接操作

a. 微束等离子弧焊使用的电弧形态是联合弧，即维弧、工作弧同时存在。

b. 当焊缝间隙稍大，出现焊缝余高不够或呈现下陷时，说明焊缝金属填充不够，应该使用填充焊丝。填充焊丝要选用与母材金属同成分的专用焊丝，也可以使用从母材上剪下来的边条。

c. 焊接时，转移弧产生后不要立即移动焊枪，要在原地维持一段时间使母材熔化，形成熔池后开始填丝并移动焊枪。另外，焊枪在运行中要保持前倾，手工焊时前倾角保持在 $60^{\circ}\sim 80^{\circ}$ ，自动焊时前倾角应为 $80^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 。

d. 微束等离子弧的焊接是采用熔池无小孔效应的熔透型焊接法，即用微弧将工件焊接处熔化到一定深度或熔透成双面成形的焊缝。

e. 焊接时喷嘴中心孔与待焊焊缝的对中要求高，偏差应尽可能小，否则会焊偏或产生咬边。

f. 焊接过程中的电弧熄灭或焊接结束时的熄弧，焊枪均要在原处停留几秒，使保护气继续保护高温的焊缝，以免氧化。

此外，微束等离子弧焊电源空载电压高，易使操作者触电，应注意防止。由于微束等离子弧焊枪体积小，在换喷嘴、换电极或电极对中时，都极易发生电极与喷嘴的接触，这时若误触动焊枪手把上的微动按钮，便会发生电极与喷嘴的电短路（打弧），损坏喷嘴和电极。因此在更换电极、喷嘴或电极对中时，应将电源切断才能保证安全进行。

4.3.4 脉冲等离子弧焊工艺

(1) 脉冲等离子弧焊的特点

脉冲等离子焊机一般采用频率为 50Hz 以下的脉冲弧焊电源，脉冲电源的形式主要为晶闸管式、晶体管式及逆变式。与一般等离子焊相比，脉冲等离子焊的优点是：

- a. 焊接过程更加稳定；
- b. 焊接线能量易于控制，能够更好地控制熔池，保证良好的焊缝成形；
- c. 焊接热影响区较小、焊接变形小；
- d. 脉冲电弧对熔池具有搅拌作用，有利于细化晶粒，降低裂纹的敏感性；

e. 可进行全位置焊接。

脉冲等离子弧焊的工艺参数有：脉冲电流 (I_p)、基值电流 (I_b)、脉冲频率 (f)、脉宽比 $t_p/(t_p+t_b)$ 。脉冲等离子焊接适用于管道的全位置焊接，薄壁构件以及热敏感性强的材料的焊接。

(2) 脉冲等离子弧焊的工艺参数

脉冲等离子弧焊的工艺参数见表 4.11。

表 4.11 脉冲等离子弧焊的工艺参数

材料种类	试板厚度/mm	I_b/A	I_p/A	f/Hz	$t_p(t_p+t_b)$	离子气流量 [L·min ⁻¹]	焊接速度 [cm·s ⁻¹]
不锈钢	3	70	100	2.4	12:21	5.5	0.67
	4	50	120	1.4	21:35	6.0	0.42
钛	6	90	170	2.9	10:17	6.5	0.34
	3	40	90	3	10:16	6.0	0.67
不锈钢波纹管膜片	0.05-0.05(内圆)	0.12	0.5	10	2:5	0.6	0.75
	0.05+0.15(内圆)	0.12	1.2	10	2:5	0.6	0.75
	0.05+0.05(外圆)	0.12	0.55	10	2:5	0.6	0.56

4.3.5 等离子弧焊的缺陷

等离子弧焊的常见焊接缺陷及预防措施见表 4.12。

表 4.12 常见焊接缺陷及预防措施

缺陷类型	产生原因	预防措施
单侧咬边	(1) 焊炬偏向焊缝一侧 (2) 电极与喷嘴不同心 (3) 两辅助孔偏斜 (4) 接头错边量太大 (5) 磁偏吹	(1) 改正焊炬对中位置 (2) 调整同心度 (3) 调整辅助孔位置 (4) 加填充丝 (5) 改变地线位置
两侧咬边	(1) 焊接速度太快 (2) 焊接电流太小	(1) 降低焊接速度 (2) 加大焊接电流
气孔	(1) 焊前清理不当 (2) 焊丝不干净 (3) 焊接电流太小 (4) 填充丝送进太快 (5) 焊接速度太快	(1) 除净焊接区的油锈及污物 (2) 清洗焊丝 (3) 加大焊接电流 (4) 降低送丝速度 (5) 降低焊接速度
热裂纹	(1) 焊材或母材含硫量太高 (2) 焊缝熔深、熔宽较大、熔池太长 (3) 工件刚度太大	(1) 选用含硫低的焊丝 (2) 调整焊接工艺参数 (3) 预热、缓冷

4.4 材料的等离子弧焊接

穿孔型等离子弧焊接最适于焊接厚度 3~8mm 不锈钢、厚度 12mm 以下钛合金、板厚 2~6mm 低碳或低合金结构钢以及铜、黄铜、镍及镍合金的对接焊缝。这一厚度范围内可不开坡口，不加填充金属，不用衬垫的条件下实现单面焊双面成形。厚度大于上述范围时可采用 V 形坡口多层焊。

4.4.1 高温合金的等离子弧焊接

用等离子弧焊焊接固溶强化和 Al、Ti 含量较低的时效强化高温合金时，可以填充焊丝也可以不加焊丝，均可以获得良好质量的焊缝。一般厚板采用小孔型等离子弧焊，薄板采用

熔透型等离子弧焊，箔材用微束等离子弧焊。焊接电源采用陡降外特性的直流正极性，高频引弧，焊枪的加工和装配要求精度较高，并有很高的同心度。等离子气流和焊接电流均要求能递增和衰减控制。

焊接时，采用氩和氦中加适量氢气作为保护气体和等离子气体，加入氢气可以使电弧功率增加，提高焊接速度。氢气加入量一般在5%左右，要求不大于15%。焊接时是否采用填充焊丝根据需要确定。选用填充焊丝的牌号与钨极惰性气体保护焊的选用原则相同。

高温合金等离子弧焊的工艺参数与焊接奥氏体不锈钢的基本相同，应注意控制焊接热输入。镍基高温合金小孔法自动等离子弧焊的工艺参数见表4.13。在焊接过程中应控制焊接速度，速度过快会产生气孔，还应注意电极与压缩喷嘴的同心度。高温合金等离子弧焊接接头力学性能较高，接头强度系数一般大于90%。

表 4.13 镍基高温合金小孔法自动等离子弧焊的工艺参数

合金牌号	厚度/mm	等离子气流量 L·min ⁻¹	焊接电流/A	焊接电压/V	焊接速度 cm·s ⁻¹
76Ni-16Cr-8Fe	5.0	6.0	155	31	0.72
	6.6	6.0	210	31	0.72
46Fe-33Ni-1Cr	3.2	4.7	115	30	0.77
	4.8	4.7	185	27	0.68
	5.8	6.0	185	32	0.72

4.4.2 铝及铝合金的等离子弧焊接

等离子弧是以钨极作为电极，等离子弧为热源的熔焊方法。焊接铝合金时，采用直流反接或交流。铝及铝合金交流等离子弧焊接多采用矩形波交流焊接电源，用氩气作为等离子气和保护气体。对于纯铝、防锈铝，采用等离子弧焊，焊接性良好；硬铝的等离子弧焊接性尚可。

为了获得高质量的焊缝应注意以下几点。

a. 焊前要加强焊件、焊丝的清理，防止氢溶入产生气孔，还应加强对焊缝和焊丝的保护。

b. 交流等离子弧焊的许用等离子气流量较小，流量稍大，等离子弧的吹力过大，铝的液态金属被向上吹起，形成凸凹不平或不连续的凸峰状焊缝。为了加强钨极的冷却效果，可以适当加大喷嘴孔径或选用多孔型喷嘴。

c. 当板厚大于6mm时，要求焊前预热100~200℃。板厚较大时用氦作等离子气或保护气，可增加熔深或提高效率。

d. 需用的垫板和压板最好用导热性不好的材料制造（如不锈钢）。垫板上加工出深度1mm、宽度20~40mm的凹槽，以使待焊铝板坡口近处不与垫板接触，防止散热过快。

e. 板厚不大于10mm时，在对接的坡口上每间隔150mm点固焊一点；板厚大于10mm时，每间隔300mm点固焊一点。点固焊采用与正常焊接相同的电流。

f. 进行多道焊时，焊完前一道焊道后应用钢丝或铜丝刷清理焊道表面至露出纯净的铝表面为止。

表4.14列出纯铝自动交流等离子弧焊接的工艺参数。表4.15列出铝合金直流等离子弧焊接的工艺参数。

表 4.14 纯铝自动交流等离子弧焊接的工艺参数

板厚/mm	钨极为负极		钨极为正极		气体流量/L·h ⁻¹		焊接速度/cm·s ⁻¹
	电流/A	时间/ms	电流/A	时间/ms	等离子气	保护气	
0.3	10~12	20	8~10	40	9~12	120~180	0.70~0.83
0.5	20~25	30	15~20	30	12~15	120~180	0.70~0.83
1.0	40~50	40	18~20	40	15~18	180~240	0.56~0.70
1.5	70~80	60	25~30	60	18~21	180~240	0.56~0.70
2.0	110~130	80	30~40	80	21~24	240~300	0.42~0.56

表 4.15 铝合金直流等离子弧焊接的工艺参数

板厚/mm	接头形式	非转移弧电流/A	喷嘴与工作间电流/A	离子气流量Ar/L·min ⁻¹	保护气流量He/L·min ⁻¹	喷嘴孔径/mm	电极直径/mm	填充金属	点固焊
0.1	卷边	4	6	0.4	0	0.8	1.0	无	无
0.5	平对接	1	10	0.5	0	1.0	1.0	无	无
0.8	平对接	1	10	0.5	0	1.0	1.0	有	有
1.6	平对接	4	20	0.7	0	1.2	1.0	有	有
2	平对接	4	25	0.7	12	1.2	1.0	有	有
3	平对接	20	30	1.2	15	1.6	1.6	有	有
2	外角接	4	20	1.0	12	1.2	1.0	有	有
2	内角接	4	25	1.6	12	1.2	1.0	有	有
5	内角接	20	80	25	15	1.6	1.6	有	有

4.4.3 钛及钛合金的等离子弧焊接

等离子弧焊能量密度高、线能量大、效率高。厚度 2.5~15mm 的钛及钛合金板材采用“小孔型”方法可一次焊透，并可有效地防止产生气孔。“熔透型”方法适于各种板厚，但一次焊透的厚度较小，3mm 以上一般需开坡口。

钛的弹性模量仅相当于铁的 1/2，因此在应力相同的条件下，钛及钛合金焊接接头将发生比较显著的变形。等离子弧的能量密度介于钨极氩弧和电子束之间，用等离子弧焊接钛及钛合金时，热影响区较窄，焊接变形也较易控制。目前微束等离子弧焊已经成功地应用于薄板的焊接。采用 3~10A 的焊接电流可以焊接厚度为 0.08~0.6mm 的板材。

由于液态钛的密度较小，表面张力较大，利用等离子弧的小孔效应可以单道焊接厚度较大的钛和钛合金，保证不致发生熔池坍塌，焊缝成形良好。通常单道钨极氩弧焊时工件的最大厚度不超过 3mm，并且因为钨极距离熔池较近，可能发生钨极熔蚀，使焊缝渗入钨夹杂物。等离子弧焊接时，不开坡口就可焊透厚度达 15mm 的接头，不可能出现焊缝渗钨现象。

钛板等离子弧焊接的工艺参数见表 4.16。TC4 钛合金等离子弧焊和 TIG 焊接接头的力学性能见表 4.17。

表 4.16 钛板等离子弧焊的焊接工艺参数

板厚/mm	喷嘴孔径/mm	焊接电流/A	焊接电压/V	焊接速度/cm·s ⁻¹	送丝速度/m·min ⁻¹	焊丝直径/mm	氩气流量/L·min ⁻¹			
							离子气	保护气	拖罩	背面
0.2	0.8	5	—	1.3	—	—	0.25	10	—	2
0.4	0.8	6	—	1.3	—	—	0.25	10	—	2
1	1.5	35	18	2.0	—	—	0.5	12	15	2
3	3.5	150	24	3.8	60	1.5	4	15	20	6
6	3.5	160	30	3.0	68	1.5	7	20	25	15
8	3.5	172	30	3.0	72	1.5	7	20	25	15
10	3.5	250	25	1.5	46	1.5	7	20	25	15

注：电源极性为直流正接。

表 4.17 钛合金等离子弧焊和 TIG 焊接接头的力学性能

材 料	抗拉强度, MPa	屈服强度, MPa	伸长率, %	断面收缩率, %	冷弯角 (°)
TC4 钛合金	1072	983	11.2	27.3	16.9
等离子弧焊接头	1005	954	6.9	21.8	53.2
氩弧焊接头	1006	957	5.9	14.6	6.5

注：氩弧焊的填充金属为 TC3，等离子弧焊不填丝，拉伸试样均断在热影响区过热区。

焊接航天工程中应用的 TC4 钛合金高压气瓶的研究结果表明，等离子弧焊接头强度与氩弧焊相当，强度系数均为 90%，但塑性指标比氩弧焊接头高，可达到母材的 75%。根据 30 万吨合成氨成套设备的生产经验，用等离子弧焊接厚度 10mm 的 TA1 工业纯钛板材，生产率可比钨极氩弧焊提高 5~6 倍，对操作的熟练程度要求也较低。

纯钛等离子弧焊的气体保护方式与钨极氩弧焊相似，可采用氩弧焊拖罩，但随着板厚的增加、焊速的提高，拖罩要加长，使处于 350℃ 以上的金属得到良好保护。背面垫板上的沟槽尺寸一般宽度和深度各为 2.0~3.0mm，同时背面保护气体的流量也要增加。厚度 15mm 以上的钛板焊接时，开 6~8mm 钝边的 V 形或 U 形坡口，用“小孔型”等离子弧焊封底，然后用“熔透型”等离子弧填满坡口。用等离子弧封底可以减少焊道层数，减少填丝量和焊接角变形，提高生产率。“熔透型”多用于厚度 3mm 以下薄件的焊接，比钨极氩弧焊容易保证焊接质量。

4.4.4 银与铂的微束等离子弧焊接

银与铂都属于贵金属，价格昂贵。银与铂可制成板材、带材、线材等，常用于微电子、仪器仪表、医药等特殊产品或军工产品。

银与铂电子器件的微束等离子弧接的工艺要点如下：

- a. 焊前将银与铂的接头处清理干净；
- b. 将两种金属预热到 400~500℃；
- c. 采用微束脉冲等离子弧，维弧电流为 24A；
- d. 保护气体流量为 6L/min，离子气流量为 0.5L/min。

银与铂电子器件微束等离子弧焊接的工艺参数见表 4.18。

表 4.18 银与铂电子器件微束等离子弧焊接的工艺参数

母材 (Ag, Pt) 厚度/mm	接头 形式	工 艺 参 数				脉冲时间 's	间歇时间 's
		焊接电流/A	焊接电压/V	焊接速度 /m·h ⁻¹	钨极直径/mm		
0.05 + 0.05	卷边 接头	2~2.5	22~24	0.02	1.0	0.02	0.02
0.1 + 0.1		3~5	24~25	0.33~0.67	1.0	0.03	0.02
0.5~0.5	—	6~8	25~26	0.50~0.61	1.2	0.05	0.03
1.0+1.0		9~10	26~27	0.55~0.61	1.2	0.08	0.05
1.2+1.2	卷边 接头	12~14	27~28	0.50~0.55	1.2	0.10	0.08
1.5~1.5		14~15	28~29	0.44~0.50	1.6	0.12	0.10
2.0 + 2.0	—	16~20	29~30	0.42~0.44	1.6	0.15	0.12

4.5 等离子弧焊接的应用实例

4.5.1 超薄壁管子的微束等离子弧焊接

超薄壁管在许多工业部门中有着广泛的应用，可用来制造金属软管、波纹管、扭力管、热交换器的换热管、仪器仪表的谐振筒等，还有时是在高温高压、复杂振动和交变载荷下用

来输送各种腐蚀性介质。用焊接工艺制造超薄壁有缝管是把带材卷成圆管，然后焊接起来。这种方法工艺简单生产率高、成本低（为无缝管的50%左右），受到国内外生产厂家的极大重视。

微束等离子电弧是一种能量高度集中的热源。电弧经过压缩，其稳定性比自由电弧（例如氩弧）好得多，并且工作弧长可以比自由电弧长。因此，观察焊接过程比较方便，超薄壁管子常用微束等离子弧焊接。

超薄壁管子微束等离子弧焊接具有以下优点。

- a. 焊接的带材厚度比氩弧焊小，通常厚度为0.1~0.5mm，不需卷边就能焊接，焊接质量好。
- b. 在管子连续自动焊接时，等离子弧长的变化对焊接质量影响不大，这点与氩弧焊不同，氩弧焊弧长变化对焊接质量影响很大。
- c. 在焊接电流很小时（小于3A），微束等离子弧稳定性好，而氩弧有时游动，稳定较差。
- d. 微束等离子弧由于热量集中，焊接速度高于氩弧焊，生产率高。
- e. 能焊接多种金属，包括不锈钢、有色金属和难熔金属等。

超薄壁管子连续自动微束等离子弧焊接，类似于封闭压缩弧焊过程。在焊接模套和焊枪之间安装绝缘套，使等离子焊枪与金属零件可靠绝缘，同时把保护氩气封闭在一个小室中，相当于建立了近似可控气氛中的焊接条件，提高了保护效果。

超薄壁管子微束等离子弧焊工艺参数较氩弧焊多，除了焊接电流、焊接速度、保护气体流量外，还有工作气体的流量、保护气体的成分、保护气体流量与工作气体流量之比等，这些参数均影响焊接质量。

工作气体流量大，电弧挺度好，电弧很容易引出喷嘴，转移弧建立容易；工作气体流量小，电弧挺度差，转移弧建立较困难。但工作气体流量不能过大，太大会形成切割，焊缝成形不良。保护气体用氢氩混合气体保护效果好，一般用5%的氢气，其余为氩气。有时也加氮气，但氮气价格昂贵，只有对某些有色金属焊接时才用。经验表明，保护气体流量与工作气体流量有一个最佳比值，这要通过试验确定。

表4.19列出12Cr18Ni10Ti不锈钢超薄壁管子自动微束等离子弧焊的工艺参数。

表 4.19 12Cr18Ni10Ti 不锈钢超薄壁管子自动微束等离子弧焊的工艺参数

管子直径 /mm	管子壁厚 /mm	焊接电流 /A	焊接速度 /m·h ⁻¹	管子直径 mm	管子壁厚 mm	焊接电流 /A	焊接速度 /m·h ⁻¹
8.8	0.15	5~6	60~65	10.8	0.20	8~9	70~75
8.8	0.20	8~9	70~75	13.0	0.20	8~9	70~75

经验表明，影响超薄壁管子生产率的最主要的工艺参数是焊接电流、工作气体的流量和喷嘴小孔直径等。

铜及其合金超薄壁管子的焊接工艺与不锈钢管子的焊接工艺有许多共同点。但是，由于彼此的物理性能特点不同，如线胀系数和导热性高、焊缝形成气孔倾向大、合金元素锌（黄铜）、铍（铍青铜）容易烧损等，焊接时必须采取以下附加措施（其他工艺措施同不锈钢）。

- a. 在焊接处必须建立起封闭小室，用氮气作为保护气体，以避免熔池氧化，提高保护效果。

b. 用钼喷嘴代替铜喷嘴。由于钼喷嘴的热导率相当低（比铜小 2.7 倍），加热到高温时呈炽热的桃红色，妨碍锌和铍的蒸发和沉积作用，可以减少锌和铍的烧损。

c. 必须利用软态带材制造超薄壁管子。

在封闭小室中用氦气作保护气体也能够用微束等离子弧焊接钛和锆的超薄壁管子。表 4.20 列出铜及其合金、钛和锆超薄壁管子的微束等离子弧焊接的工艺参数。

表 4.20 铜及其合金、钛和锆超薄壁管子的微束等离子弧焊接的工艺参数

材料	管子尺寸, mm		气体流量 /L·min ⁻¹			焊接电流 A	焊接速度 m·h ⁻¹
	直径	壁度	工作气体(Ar)	保护气体(He)	焊缝背面保护气体(He)		
H63	8.8	0.3	0.4	1.7	0.2	26	140
H68	8.8	0.3	0.4	1.5	0.2	28	135
H90	8.8	0.3	0.4	1.4	0.3	29	110
M1	6.0	0.5	0.5	1.5	0.4	29	60
QBe2	8.8	0.3	0.2	1.5	0.3	26	90
Ti	6.8	0.2	0.2	1.0	0.2	7~8	70~75
Zr100	6.0	0.5	0.2	1.5	0.4	26~27	45~50

4.5.2 保温瓶不锈钢外壳纵缝的焊接

随着人民生活水平的提高，铁壳保温瓶已逐渐被不锈钢壳保温瓶取代。保温瓶的不锈钢外壳是由厚度 0.3~0.4mm 的 1Cr18Ni9Ti 超薄板卷制焊接而成。对接焊缝长度 270mm，正面焊缝熔宽小于 2mm，焊缝余高在 0.2mm 以下。焊缝不得有塌陷、烧穿等缺陷，焊缝的首尾端 4mm 以内允许有部分未焊透存在。

采用脉冲微束等离子弧焊接工艺，用胎夹具装配获得优良的焊接接头，焊缝成形美观，有较高的焊接生产率，每 45s 可焊接一个 5lb (2.268kg) 的不锈钢保温瓶外壳，产品成品率可达 95%。

(1) 焊前准备

首先按工艺要求进行下料和卷筒，卷筒时注意将边缘有毛刺的面向外。然后将保温瓶外壳待焊处（两侧各 10mm）除去油、锈，用丙酮擦干净。由于不锈钢材料导热性能差，保温瓶外壳厚度又极薄，焊接时极易产生烧穿和变形。焊接必须在胎夹具上进行，即将焊件紧紧地压在铜垫板上进行焊接。

焊接接头形式为不留间隙的对接焊。工件安装在胎夹具上时，两侧压板间距要调整到 5~6mm。芯壁上的铜块正面中间开有成形槽，槽宽 2.5mm，槽深 0.5mm。

两套胎夹具配合一台焊机。当第一台夹具焊接时，第二台夹具在安装待焊工件。而第二台夹具进入焊接工序时，第一台夹具处于卸下焊完的工件和安装新的待焊件，如此反复循环，可提高生产率。

(2) 焊接工艺

采用脉冲微束等离子弧自动焊接工艺。焊枪喷嘴的结构尺寸为：压缩角 90°，喷嘴孔径 $\phi 1.0\text{mm}$ ，喷嘴孔道长度 1.0~1.2mm。钨极选用 2% 的铈钨电极，直径 $\phi 1.5\text{mm}$ ，端部呈锥状，钨极的内缩量为 0.8~1.0mm。喷嘴距工件距离 0.8~1.2mm。

基本电流值为 5A，脉冲占空比为 60% 左右，脉冲频率为 12~15Hz。焊缝的焊点重叠率为 50%。经试验后推荐的不锈钢保温瓶外壳脉冲微束等离子弧焊接的工艺参数如表 4.21。

表 4.21 不锈钢保温瓶外壳脉冲微束等离子弧焊接的工艺参数

瓶壳厚度 /mm	平均焊接电流 /A	焊接速度 /m·min ⁻¹	工作气体流量(Ar) L·h ⁻¹	保护气体流量(Ar) L·h ⁻¹	钨极直径 /mm	脉冲频率 /Hz
0.3	9	0.48	14	100	1.5	12
0.4	15	0.55	17	100	1.5	15

4.5.3 焊接波纹管的微束等离子弧焊接

金属波纹管分为三大类：液压波纹管、焊接波纹管和电成形波纹管。把带有波纹的金属膜片，在内径和外径上交替焊接而成的波纹管称为焊接波纹管。随着科学技术的发展，焊接波纹管的应用领域正在日趋扩大。焊接波纹管的主要用途是：作为控制机构、变送器或调节器的检测元件，也可用作温度、压力和液位的测量元件，还可作各种密封以及能量传递元件等。

采用焊接工艺制造的焊接波纹管，可以根据使用需要设计出各种波形膜片，选择较大的内外直径差，为采用新型弹性材料制造波纹管开辟了一条新途径。

(1) 波纹膜片的制造

波纹膜片是组成焊接波纹管的主体。波纹膜片的形状可以分为正弦波形、圆弧波形、平板波形和U形波形几种。波纹膜片的加工质量直接影响焊接质量和波纹管的使用性能。因此，保证波纹膜片的加工质量是制造优质焊接波纹管的前提。

焊接波纹管膜片材料通常是1Cr18Ni9Ti不锈钢、因康乃尔、蒙乃尔、高弹性合金等，厚度一般为0.05~0.3mm。为了保证获得优质焊缝，对波纹膜片有以下要求：

- a. 波纹膜片被焊边缘必须平整、不翘曲、无皱纹和坑凹不平，波纹饱满、均匀；
- b. 波纹膜片内外直径上无毛刺；
- c. 波纹膜片的内径和外径的圆度以及波形与内外径的同心度应符合技术要求，一般不超过波纹膜片厚度的10%~20%；
- d. 两种焊在一起的波纹膜片的内径和外径应一致，这是保证焊接波纹管焊缝均匀、光滑的重要条件；要求波纹膜片的内径和外径的允许误差不超过其厚度的20%，以保证组装焊接时波纹膜片的错边量不超过允许值。

厚度0.1mm以下的波纹膜片的制造，通常采用无间隙冲裁工艺，即用一个带波形的钢模作上模或是下模（取决于结构），另一个是用橡皮或聚氨酯制作的软模。采用软模制造波纹膜片的优点是降低了模具加工配合的精度，方便实用；缺点是波形随橡皮的成形力而变，波形精度较硬模低。如果上下模都采用钢模，要求加工精度很高，一般是采用双柱式复合模座，上下模之间间隙很小。

(2) 波纹膜片的微束等离子弧焊接

波纹膜片通常采用微束等离子弧焊接，只有被焊的波纹膜片厚度大于0.2mm时才用小功率钨极氩弧焊。

1) 内圆焊接

内圆焊接之前，要求将波纹膜片仔细清洗，去除油污和氧化膜。清洗好的波纹膜片要用无水乙醇浸泡，取出后立即吹干或烘干。清洗好的波纹膜片不能再用手接触，必须用金属镊子夹取，操作者应戴好白纱手套。

对两种相同波形的波纹膜片用内圆焊接夹具组装固定，如图4.8所示。先将两个待焊波纹膜片和压环装在定位轴上，以保证待焊波纹膜片彼此同心，然后把定位轴放入转轴中，使

待焊波纹膜片与转轴同心。

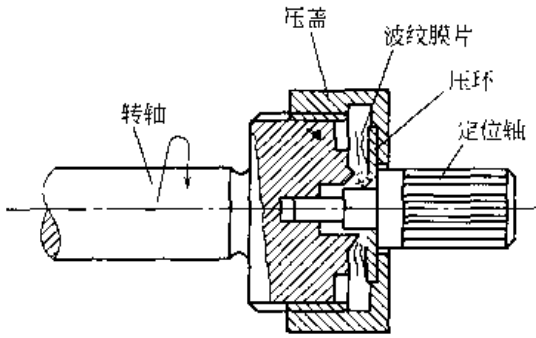


图 4.8 内圆焊接夹具

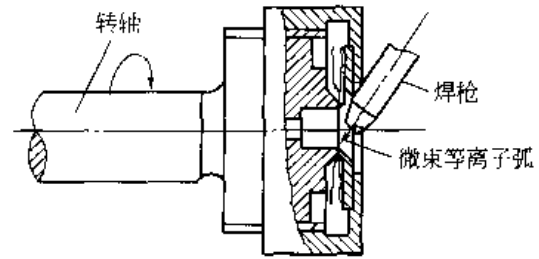


图 4.9 内圆焊接过程示意

启动微束等离子弧焊机，调整等离子焊枪的空间位置，然后引弧，待等离子弧稳定后，将维弧打出喷嘴并对准波纹膜片的内径（见图 4.9），开动焊机使转轴旋转。观察维弧是否稳定和被焊波纹膜片是否偏心。待一切正常后，可以施加焊接电流，调整焊接速度。在焊接工艺参数、焊缝质量稳定后，就可以进行微束等离子弧的自动焊接。

1Cr18Ni9Ti 不锈钢波纹膜片内圆微束等离子弧焊接的工艺参数见表 4.22。钨极直径为 1mm。

表 4.22 波纹膜片内圆微束等离子弧焊接的工艺参数

波纹膜片厚度, mm	焊接电流 / A	维弧电流 / A	工作气体 Ar, L · min ⁻¹	保护气体		焊接速度 'cm · s ⁻¹
				Ar, L · min ⁻¹	H ₂ , L · min ⁻¹	
0.1	1~1.2	1.3	0.5	3.1	0.2	0.20
0.2	2~3	1.3	0.8	3.1	0.2	0.20
0.3	6~7	0.5	0.5	3.5	-	0.27

波纹膜片内圆焊好后要逐个进行检漏，不允许有泄露现象。否则，待焊成波纹管整体后再发现内圆焊缝泄露就无法修补，只好报废。

2) 外圆焊接

把焊好内圆的波纹膜片在专用夹具上组装，进行波纹膜片的外圆焊接。图 4.10 所示为波纹膜片外圆焊接的夹具组装。

芯轴 1 与微束等离子弧焊机机头连接，焊接时芯轴 1 带动被焊波纹膜片对 6 旋转，微束等离子焊枪不动。焊前先将已焊好内圆的波纹膜片对 6 分别装上卡环 3（卡环由两半环组成）。卡环 3 的作用是使波纹膜片彼此贴紧并保证被焊接处散热。卡环通常用黄铜材料制造，卡环的外径要比波纹膜片的外径小 0.8~1.5mm。

装夹好的已焊完内圆的波纹膜片按图 4.11 所示进行外圆微束等离子弧焊。调整好焊枪的位置，启动焊机。观察被焊波纹膜片是否偏心和彼此贴紧状况是否良好，若不符合要求可重新调整。特别是波纹管比较

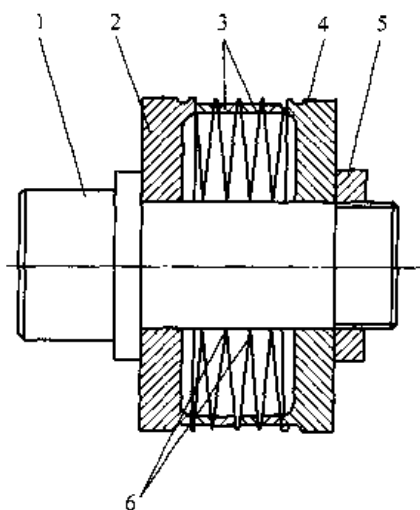


图 4.10 波纹膜片外圆焊接夹具组装图

- 1- 芯轴；2- 左压块；3- 卡环（由半环组成）；4- 右压块；5- 螺母；6- 焊好内圆的波纹膜片对

长时，要仔细调整已焊好内圆的波纹膜片彼此的同心度，这一点非常重要。同心度不好，如果错边量大于波纹膜片厚度的20%，焊缝将出现锯齿状，外形不美观，密封达不到要求。

焊接工艺参数的调整与波纹膜片的内圆焊接相同，先通过试焊来调整工艺参数，待焊缝质量稳定后，可进行微束等离子弧自动焊接，一般由左至右逐条焊缝施焊。1Cr18Ni9Ti不锈钢波纹膜片外圆的微束等离子弧焊的工艺参数见表4.23。

不锈钢材料经过冷加工和焊接热循环后会产生内应力，存在由于变形不均匀造成的不稳定状态。为了消除应力，有时进行焊后加热稳定处理。对于1Cr18Ni9Ti奥氏体不锈钢，热稳定处理温度为350~400℃，保温时间为8~10h。

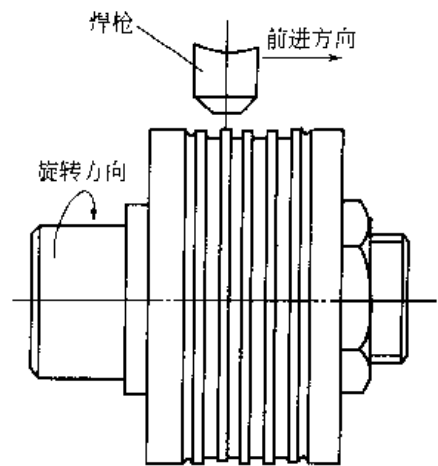


图 4.11 外圆微束等离子弧焊示意

表 4.23 波纹膜片外圆微束等离子弧焊的工艺参数

波纹膜片厚度/mm	焊接电流/A	维弧电流/A	工作气体 Ar L·min ⁻¹	保护气体		焊接速度 cm·s ⁻¹
				Ar L·min ⁻¹	H ₂ L·min	
0.1	0.7~1.0	1.3	0.55	3.9	0.2	0.33
0.2	1.6~2.0	1.3~1.5	0.55	3.4	0.2	0.20
0.3	6~6.5	0.5	0.4	3.5	—	0.25

焊接完成的波纹膜片外圆，必须进行整体气密性检验。气密性检验有两种方法：水检和真空检漏。

波纹膜片在进行微束等离子弧焊接时，要注意以下问题。

① 钨极对中要好 钨极是发射电子的阴极，对中不好容易引起双弧（燃烧在钨极与喷嘴、喷嘴端面与被焊波纹膜片之间的电弧），严重地破坏等离子弧的稳定性，影响焊接质量。要尽量使钨极中心与喷嘴中心相重合，偏差越小越好。选用稍粗一点的钨极，平直性好，对中较好；但是粗钨极降低了电流密度，对引弧稳弧不利，为此将钨极的端头磨制成锥状。使用细钨极一定要有对中环。

② 经常清理喷嘴 喷嘴是等离子弧的通道，经过一段工作后它的内壁会留下一些杂质，不及时清除就无法正常进行焊接。严重时堵塞喷嘴，使等离子弧无法转移到被焊波纹膜片上。

经常清理喷嘴是保证等离子弧正常工作所必须的。清理方法如下：用细铁丝卷上脱脂棉，在无水乙醇中浸一下，然后在喷嘴内孔中擦洗，直至喷嘴内孔中无脏物为止。

③ 经常修磨钨极 钨极经过一段工作后，它的尖端形状会改变，影响电子的发射，等离子弧就会失去稳定性。当焊接过程中等离子弧忽大忽小不稳定或等离子弧建立不起来时，应检查钨极是否有问题。如果钨极尖端形状不符合要求应立即修磨，使钨极尖端保持30°锥体形状。修磨钨极可用电极磨光机，也可用砂轮或油石手工磨修。

4.6 等离子弧堆焊工艺

等离子堆焊是一种较新的堆焊工艺，具有熔深浅、熔敷率高、稀释率低等优点。根据堆焊时所使用的填充材料，等离子弧堆焊机可分为四种：热丝堆焊机、冷丝堆焊机、粉末堆焊

机以及熔化极等离子堆焊机。

4.6.1 冷丝和热丝等离子弧堆焊

(1) 冷丝等离子弧堆焊

冷丝堆焊与填充焊丝的熔入型等离子弧焊接相同，其设备也与填充焊丝的强流等离子焊设备相似。由于这种方法的效率很低，目前已很少使用。

(2) 热丝等离子弧堆焊

热丝等离子堆焊综合了热丝钨极氩弧焊 (TIG) 及等离子焊的特点。焊机由一台直流电源、一台交流电源、送丝机、控制箱、焊枪以及机架等组成。直流电源用作焊接电源，用于产生等离子电弧，加热并熔化母材和填充焊丝。交流电源作为预热电源，在自动送入的焊丝中通以一定的加热电流，以产生电阻热，从而提高熔敷效率并降低对熔敷金属的稀释程度。

对于单丝堆焊焊机，预热电源的两极分别接焊丝和工件；对于双丝堆焊焊机，电源的两个电极分别接两根焊丝，堆焊时应选择合适的预热电流，使焊丝在恰好送进到熔池时被电阻热所熔化，同时两根焊丝间又不产生电弧。这样可减小焊接电流，从而降低熔敷金属的稀释率。此外，热丝堆焊还有利于消除堆焊层中的气孔。

热丝等离子堆焊主要用于在表面积较大的工件上堆焊不锈钢、镍合金、铜及铜合金等。

4.6.2 熔化极等离子弧堆焊

熔化极等离子堆焊机是通过一种特殊的等离子弧焊枪将等离子弧焊和熔化极气体保护焊组合起来。焊接过程中产生两个电弧，一个为等离子弧，另一个为熔化极电弧。根据等离子弧的产生方法，可分为水冷铜喷嘴式及钨极式两种。前者的等离子弧产生在水冷铜喷嘴与工件之间，如图 4.12 (a) 所示；后者的等离子弧产生在钨极与工件之间，如图 4.12 (b) 所示。

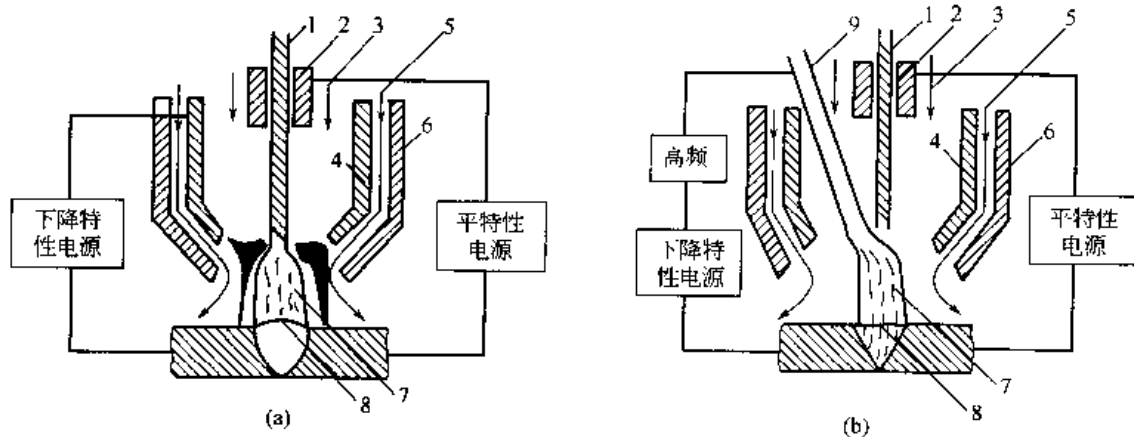


图 4.12 熔化极等离子堆焊的示意

1—焊丝；2—导电嘴；3—等离子气；4—铜喷嘴；5—保护气体；
6—保护罩；7—等离子气；8—过渡金属；9—钨极

熔化极电弧产生在焊丝与工件之间，并在等离子弧中间燃烧。整个焊机需要两台电源。其中，一台为陡降特性的电源，其负极接钨极或水冷铜喷嘴，正极接工件；另一台为平特性电源，其正极接焊丝，负极接工件。

熔化极堆焊机既可用于焊接，也可用于堆焊。焊接时，选用较小的焊接电流，此时熔滴过渡为大滴过渡；堆焊时，选用较大的焊接电流，熔滴过渡为旋转射流过渡。

与一般等离子弧焊及熔化极气体保护焊相比，熔化极等离子弧堆焊具有下列优点：

- a. 焊丝受到等离子弧的预热，熔化功率大；
- b. 由于等离子流力的作用，在进行大滴过渡及旋转射流过渡时，均不会产生飞溅；
- c. 熔化功率和工件上的热输入可单独调节；
- d. 可焊接铝及铝合金；
- e. 焊接速度快。

4.6.3 粉末等离子弧堆焊

粉末堆焊机与一般等离子焊机大体相同，只不过利用粉末堆焊焊枪代替等离子焊机中的焊枪。粉末堆焊焊枪一般采用直接水冷并带有送粉通道，所用喷嘴的压缩孔道比一般不超过1。等离子堆焊时，一般采用转移弧或联合型弧。除了等离子气及保护气外，还需要送粉气。送粉气一般采用氩气。

粉末堆焊具有生产率高，堆焊层稀释率低、质量高，便于自动化等特点，是目前应用最广泛的一种等离子堆焊方法。特别适合于轴承、轴颈、阀门板和座、蜗轮叶片等零部件的堆焊。

4.7 等离子弧切割

等离子弧切割是利用高能量密度的等离子弧和高速的等离子流，将熔化金属从割口吹走，形成连续割口。等离子弧切割速度快，没有氧-乙炔切割时对工件产生的燃烧，因此工件获得的热量相对较小，工件变形也小，适合于切割各种金属材料。但由于等离子流速高，噪声、烟气和烟尘严重，工作卫生条件较差。

4.7.1 等离子弧切割的特点

等离子弧切割是用非常热的高速射流来进行的。将电弧和惰性气体强行穿过小直径孔以产生这种高速射流。电弧能量集中在一个小区内，使板材熔化，高温膨胀的气体射流迫使熔化金属穿过切口。切割碳钢或铸铁时，在气流中加入氧气，还可以提供额外的切割能量。

等离子弧切割方法具有很大的灵活性，能切割几乎所有的金属，而且切割碳钢的速度比氧气切割快。但是由于割口较宽，所以被熔化掉的金属较多，而且板材较厚时切口也不像氧-乙炔切割的那样光滑平整。为了保证切口的侧面平行，需要用专门的割嘴。为了获得一定的坡口成形，还需要专门的切割技术。

等离子弧切割要求很高的电弧电压，因而需要有很高空载电压的专用电源。根据被切割的材料及厚度，所需的功率在25~200kW之间。通常使用氩或氮与氢的混合气体，割炬必须用水冷却。

对于手工等离子弧切割的技术要求与手工氧-乙炔切割时相似，但为了能调节更多的参数，需要较多的训练。切割薄板时，因为移动速度不需那样仔细的控制，故切割质量较好。

等离子弧切割用得更多的是机械式的自动化设备，割炬和其他附件与手工等离子弧切割所用的相同，行走系统是自动化的。割炬的移动机构与氧-乙炔切割时所用的相似，但要求有较高的移动速度。多割炬设备需要为每个割炬附加电源和控制箱。此外，为了吸收噪声和烟尘，可以使用水套或水箱。

4.7.2 等离子弧切割方法

等离子弧切割一般分为双气流等离子弧切割、水压缩等离子弧切割和空气等离子弧切割三种。

(1) 双气流等离子弧切割

图 4.13 所示为双气流等离子弧切割方法的原理示意。在等离子弧周围通有第二路气，中间的离子气通常为氮气。外围的第二路气根据切割工件材料选用，可以是 CO_2 、空气、氩气或氢气。第二路气可以使等离子弧进一步压缩，提高能量密度。切割碳钢时，第二路气可选用压缩空气以提高切割速度。

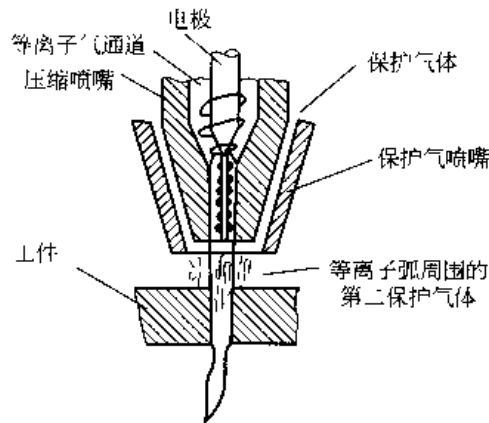


图 4.13 双气流等离子弧切割原理

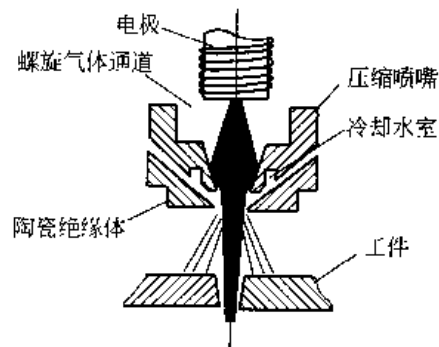


图 4.11 水压缩等离子弧切割原理

(2) 水压缩等离子弧切割

水压缩等离子弧是利用水代替冷气流来压缩等离子弧的，这种特殊的喷嘴，设计专用的压缩水通路形成环状对称地射向从喷嘴喷出的等离子流。也有用附加外喷嘴的办法，压缩水从内外喷嘴间的环状间隙里射出。

水压缩等离子弧较一般等离子弧可提高切口质量和切割速度并降低成本。它还有有效的防止切割时产生的金属蒸气和粉尘等有害物，改善劳动保护条件。

图 4.14 所示为水压缩等离子弧切割方法的原理示意。高压水从枪体径向通入，由喷嘴孔道喷出，与等离子弧直接接触。一方面强烈压缩等离子弧，使其能量密度提高；另一方面由于等离子弧的高温而分解成氢和氧，构成切割气体的一部分。分解成的氧气对切割碳钢更有利，加强了碳钢的燃烧。高速水流冲刷切割处，对工件有强烈冷却作用。割口倾斜角度小，割口质量好。这种方法应用于水中切割工件，可以大大降低切割噪声、烟尘和烟气。枪体下部可用陶瓷加工，减少双弧危险。

(3) 空气等离子弧切割

利用压缩空气作为等离子弧切割气体的研究成功，为在普通结构钢切割中应用等离子弧切割技术开创了广阔的道路。不少厂家已定型生产空气等离子弧切割机。

图 4.15 所示为空气等离子弧切割的原理示意。这种方法将空气压缩后直接通入喷嘴，经电弧加热分解出氧，未分解的空气以高速冲刷割口。分解出的氧与切割金属产生强烈化学放热反应，加快了切割速度。充分电离了的空气等离子弧的热焓值高，因而电弧的能量大。其切割速度快，切割质量好，特别适宜于切割厚 30mm 以下的碳钢，也可以切割铜、不锈钢、铝及其他材料。

额定电流为 200A 的空气等离子弧切割机，可以切割厚度 4~60mm 的碳素结构钢，对厚度 10mm 的低碳钢切割速度可达 3m/min。电源空载电压为 300V，功率为 45kW，电流为 50~200A，切割电压为 140~200V。

空气等离子弧切割存在的问题是：作为阴极的钨棒氧化烧损严重。这种切割方法的电极

受到强烈的氧化腐蚀，因为空气对高温状态的钨会产生氧化反应，为此一般采用镶嵌式钨、钨或其合金作为电极，不能采用纯钨电极或氧化物钨电极。如果把钨换成钍，则它在空气中工作时表面将形成一层钍的氧化物和氟化物，两者均易发射电子，可作为阴极，且有利于电弧的稳定。

为了提高电极工作寿命，电极一般做成直接水冷的镶嵌式形状，小电流切割时，也可不用水冷。采用铜、钨镶嵌电极时，阴面端面的直径应大于阴极镶嵌件直径的2~5倍，而镶嵌件的直径应小于喷嘴孔径，镶嵌件的长度可为其直径的0.8~4倍。但是，即使采用钍、钨电极，它的工作寿命一般也只有5~10h。

表 4.24 列出按工作气体对等离子弧切割的分类及其用途。

表 4.24 按工作气体对等离子弧切割的分类及其用途

切割方法	工作气体	主要用途	切割厚度/mm
氩等离子弧	Ar, Ar+H ₂ Ar+N ₂ Ar+N ₂ +H ₂	切割不锈钢、有色金属及其合金	4~150
氮等离子弧	N ₂ , N ₂ +H ₂		0.5~100
空气等离子弧	压缩空气	切割碳钢和低合金钢；也适用于切割不锈钢和铝	0.1~40 (碳钢和低合金钢)
氧等离子弧	O ₂ 或非纯氧		0.5~40
双重气体等离子弧	N ₂ (工作气体) CO ₂ (保护气)	切割不锈钢、铝和碳钢，不常用	≤25
水再压缩等离子弧	N ₂ (工作气体) H ₂ O(压缩电弧用)	切割碳钢和低合金钢、不锈钢以及铝合金等有色金属	0.5~100

4.7.3 等离子弧切割设备

(1) 切割电源

大多数切割都采用转移弧。电源都选用陡降或垂降外特性。与等离子弧焊电源相比，切割电源的空载电压更高。国产切割电源的空载电压都在200V以上，水压缩等离子弧切割电源的空载电压为400V。

(2) 割枪

割枪的喷嘴孔道比等离子弧焊枪的大，孔道直径更小，有利于压缩等离子弧。进气方式最好径向通入，有利于提高割枪喷嘴的使用寿命。由于孔道直径小，割枪要求电极和割嘴同心度高。

(3) 电极

空气等离子切割时，空气对电极氧化作用大，因此不能选用钨作电极，只能选用钍或钨及其合金作电极。电极形式为镶嵌式，表 4.25 列出电极材料与适用气体的选配。

表 4.25 电极材料与适用气体的选配

电极材料	适用气体	电极材料	适用气体
钍钨	氩、氦、氩、氩、氩	纯钨	氩、氩
钨	氩、氦、氩、氩、氩	钍及其合金	氩、压缩空气
钨	氩、氦、氩、氩、氩	石墨	空气、氩、氩或压缩空气
钍及其合金	氩、压缩空气		

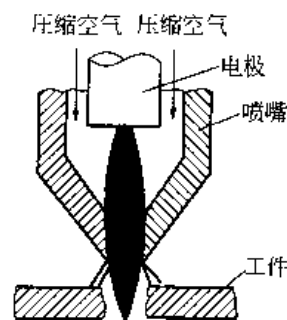


图 4.15 空气等离子弧切割的原理

4.7.4 等离子弧切割工艺

等离子弧切割适合于所有金属材料及部分非金属材料，是切割不锈钢、铝及铝合金、铜及铜合金等有色金属的有效方法。最大切割厚度可达到180~200mm。目前已用来切割厚度35mm以下的低碳钢和低合金结构钢。

厚度25mm以下的碳钢板切割时，采用等离子弧切割比氧-乙炔切割快5倍左右；而对于大于25mm的板切割时，氧-乙炔切割速度快些。

(1) 气体选择

等离子弧切割在生产中通常采用的气体有 N_2 、 $N_2 + H_2$ 、 $N_2 + Ar$ 。也有用压缩空气、水蒸气或水作为产生等离子弧的介质。

氮气的热压缩效应比较强，携带性好，动能大，价廉易得，是一种被广泛应用的切割气体。但氮气的引弧性和稳弧性较差，需要有较高的空载电压，一般在165V以上。氢气的携热性、导热性都很好，所需分子分解热较大，故要求更高的空载电压（350V以上）才能产生稳定的等离子弧。

由于氢气等离子弧的喷嘴很易烧损，因此氢常作为一种辅助气体而被加入，特别是大厚度工件切割时加入一点氢对提高切割能力和改善切口质量有显著成效。用工业纯氩作为切割气体，只要用较低的空载电压（70~90V），但切割厚度不大（30mm以下），且由于氩气费用较高，不经济，所以一般不采用。 N_2 、 H_2 、 Ar 任意两种气体混合使用，比任何一种单纯气体使用时效果好，因它们可以互相取长补短，各自发挥其特长。

表4.26列出等离子弧切割常用气体的选择。

表 4.26 等离子弧切割常用气体的选择

工件厚度 /mm	气体种类及含量	空载电压 /V	切割电压 /V	工件厚度 /mm	气体种类及含量	空载电压 /V	切割电压 /V
≤120	N_2	250~350	150~200	≤200	$N_2 + H_2$ (N_2 50%~80%)	300~500	180~300
≤150	$N_2 + Ar$ (N_2 60%~80%)	200~350	120~200	≤200	$Ar + H_2$ (H_2 35%)	250~500	150~300

氩氮混合气体切割效果最好，氩氮混合气体次之。切割较大厚度时，用氢氮混合气体。我国实际生产上由于氮气价廉，所以大多用氮气作为切割气体。

采用上述气体时应注意的事项如下。

a. 氮气中常含有氧气等杂质，随气体纯度的降低，钨极的烧损增加，会引起工艺参数的变化，使切割质量降低。钨极与工件之间的距离增大，容易产生双弧，烧坏喷嘴，致使切割过程中断。氮气的纯度应在99.5%以上。

b. 用氢气作为切割气体时，一般是使非转移弧在纯 N_2 或纯 Ar 中激发，等到转移型弧激发产生后3~6s再开始供应 H_2 为好，否则非转移型弧将不易引燃，影响切割的顺利进行。

c. H_2 是一种易燃气体，与空气混合后很易爆炸，所以储存 H_2 的钢瓶应专用，严禁用装氧的气瓶来改装。另外，通氢气的管路、接头、阀门等一定不能漏气。切割结束时，应先关闭氢气。

(2) 切割工艺参数

各种不同厚度材料的等离子弧切割工艺参数见表4.27。

表 4.27 各种不同厚度材料的等离子弧切割工艺参数

材料	厚度/mm	喷嘴孔径/mm	空载电压/V	切割电流/A	切割电压/V	气体流量 N ₂ /L·h ⁻¹	切割速度/m·h ⁻¹
不锈钢	8	3	160	185	120	2100~2300	45~50
	20	3	160	220	120~125	1900~2200	32~40
	30	3	230	280	135~140	2700	35~40
	45	3.5	240	310	115	2500	20~25
铝及铝合金	12	2.8	215	250	125	4100	784
	21	3.0	230	300	130	4400	75~80
	31	3.2	210	350	140	4400	35
	80	3.5	245	350	150	4400	10
紫铜	5	—	—	310	70	1420	91
	18	3.2	180	340	84	1660	30
	38	3.2	252	304	106	1570	11.3
低碳钢	50	10	252	300	110	1230	10
	80	7	252	300	110	1050	5
铸铁	5	—	—	300	70	1450	60
	18	—	—	360	73	1510	25
	35	—	—	370	100	1500	8.4

1) 切割电流

电流和电压决定了等离子弧的功率。随着等离子弧功率的提高，切割速度和切割厚度均可相应增加。但切割电流过大，易烧损电极和喷嘴，且易产生双弧，因此对一定的电极和喷嘴有一合适的电流。切割电流也影响切割速度和割口宽度，切割电流增大会使弧柱变粗，致使切口变宽，易形成 V 形割口。表 4.28 列出切割电流与割口宽度的关系。

表 4.28 切割电流与割口宽度的关系

切割电流/A	20	60	120	250	500
割口宽度/mm	1.0	2.0	3.0	4.5	9.0

2) 空载电压

切割大厚度工件时，以提高切割电压的效果为好。空载电压高，易于引弧。切割电压可以通过增加气体流量和改变气体成分来达到，但一般切割电压超过空载电压的 2/3 后，电弧就不稳定。因此，为了提高切割电压，必须选用空载电压较高的电源。所以等离子弧切割电源的空载电压不得低于 150V。

切割大厚度板材和采用双原子气体时，空载电压相应要高。空载电压还与割枪结构、喷嘴至工件距离、气体流量等有关。

3) 切割速度

切割速度是切割生产率高低的主要指标，它对切割质量有较大影响，合适的切割速度是切口表面平直的重要条件。在功率不变的情况下，提高切割速度能使切口变窄，热影响区变小，但速度太快时不能割穿工件。切割速度太慢，生产率降低，并造成切口表面粗糙不平直，使切口底部熔瘤增多，清理较困难，同时热影响区及切口宽度增加。

切割速度决定于材质板厚、切割电流、切割气体、气体种类及流量、喷嘴结构和合适的后拖量等。在同样的功率下，增加切割速度将导致切口变斜。切割时割炬应垂直工件表面，但有时为了有利于排除熔渣，也可稍带一定的后倾角。一般情况下后倾角不大于 3°是允许

的，所以为提高生产率，应在保证切透的情况下尽可能选用大的切割速度。

4) 气体流量

气体流量要与喷嘴孔径相适应。气体流量大，利于压缩电弧，使等离子弧的能量更为集中，提高了工作电压，有利于提高切割速度和及时吹除熔化金属。但当气体流量过大时，会因冷却气流带走大量热量，反而使切割能力下降，电弧燃烧不稳定，甚至使切割过程无法正常进行。

适当地增大气体流量，可加强电弧的热压缩效应，使等离子弧更加集中，同时由于气体流量的增加，切割电压也会随之增加，这对提高切割能力和切割质量是有利的。

5) 喷嘴距工件高度

喷嘴到工件表面间的距离增加时，电弧电压升高，即电弧的有效功率提高，等离子弧柱显露在空间的长度将增加，弧柱散失在空间的能量增加。结果导致有效热量减少，对熔融金属的吹力减弱引起切口下部熔瘤增多，切割质量明显变坏，同时还增加了出现双弧的可能性。

当距离过小时，喷嘴与工件间易短路而烧坏喷嘴，破坏切割过程的正常进行。在电极内缩量一定（通常为2~4mm）时，喷嘴距离工件的高度一般在6~8mm，空气等离子切割和水压缩等离子弧切割的喷嘴距离工件高度可略小于6~8mm。

氩-氢和氮等离子弧切割不锈钢、铝、铜的工艺参数分别见表4.29、表4.30、表4.31。LG8-25型小电流和大电流空气等离子弧切割工艺参数见表4.32和表4.33。小电流、大电流氧等离子弧切割的工艺参数分别见表4.34和表4.35。水压缩等离子弧切割有色金属的工艺参数见表4.36，切割碳钢的工艺参数见表4.37。

表 4.29 氩-氢和氮等离子弧切割不锈钢的工艺参数

厚度/mm	喷嘴孔径/mm	电弧电压/V	切割电流/A	切割速度/(m·h ⁻¹)	气体流量和种类 m ³ ·h ⁻¹		
					氮	氢	氩
12	2.4	110~140	150~160	100~130	2.4	—	—
16	2.8	130~140	200~210	85~95	2.4~3.0	—	—
20	2.8	130~140	200~210	70~80	3.0	—	—
25	3.0	130~140	240~250	45~55	3.0	—	—
30	3.2	140~150	270~280	30~35	3.0	—	—
40	3.5	140~150	320~340	25~30	3.0	—	—
60	4.5	140~150	370~380	13~15	3.0	—	—
70	4.5	140~150	390~400	10~12	2.4	—	0.6
80	5.5	145~150	400~420	8~9	2.4	—	0.6
100	5.5	150~160	500~600	9~12	—	2.0	3.0
125	5.5	150~170	500~600	7~10	—	2.0	3.6
150	6~7	160~180	600~800	4.5~8	—	2.2	4.0
200	7~9	180~200	700~1000	3~7.6	—	2.8	5.7

表 4.30 氩-氢和氮等离子弧切割铝的工艺参数

厚度/mm	喷嘴孔径/mm	工作电压/V	切割电流/A	切割速度/(m·h ⁻¹)	气体流量和种类, m ³ ·h ⁻¹		
					氮	氢	氩
6	2.4	100~140	180~200	200~400	—	0.9	1.7
10	2.4~3.2	100~150	200~280	200~300	—	0.9	1.8
20	2.8~3.5	120~150	280~320	100~130	—	1.0	2.1
30	2.8~3.5	120~150	280~320	30~80	—	1.0	2.0

续表

厚度/mm	喷嘴孔径/mm	工作电压/V	切割电流/A	切割速度/m·h ⁻¹	气体流量和种类/m ³ ·h ⁻¹		
					氮	氧	氢
10	3.5~4	120~150	300~350	30~50	-	1.0	2.0
50	3.5~4	130~150	300~350	20~30	-	1.0	2.0
60	4~4.5	130~150	300~350	15~25	-	1.0	2.0
70	4~4.5	140~160	310~380	15~20	-	1.0	2.0
80	4.5~5.5	160~180	350~400	15~20	2.5	1.4	-
100	5~5.5	160~180	400~420	15~17	2.8	1.4	-
120	5~5.5	160~180	400~450	15	2.9	1.5	-
150	5.5~6	180~200	500~600	8~10	3	1.6	-

表 4.31 氮-氢等离子弧切割铜的工艺参数

厚度/mm	喷嘴孔径/mm	工作电压/V	切割电流/A	切割速度/m·h ⁻¹	气体流量和种类/m ³ ·h	
					氮	氢
10	2.8~3.5	120~140	200~300	60~100	1.6	0.5
20	3.5~4.0	120~140	300~350	20~30	2	0.8
30	3.5~4.0	120~140	300~350	12~14	2	0.8
40	3.5~4.5	120~140	320~380	8~14	2	1
50	4~4.5	130~150	350~400	6~8	2.5	1
80	4.5~5.0	150~160	400~450	5~7	2.5	1
100	5~5.5	150~160	450~500	4~6	2.5	1
120	5~5.5	160~170	480~550	3~5	2.5	1
150	5.5~6.0	160~180	500~600	2~4	2.5	1

表 4.32 LG8-25 型小电流空气等离子弧切割工艺参数

材料	厚度/mm	切割电流/A	空气压力/kPa	空气流量/L·min ⁻¹	喷嘴孔径/mm	切割速度/cm·min ⁻¹
碳钢	2	25	343	8	1.0	>100
	4					70
	6					40
	8					22
不锈钢	2	25	343	8	1.0	100
	4					61
	6					40
	8					20
铝	2	25	343	8	1.0	102
	4					35

表 4.33 LG8-25 型大电流空气等离子弧切割工艺参数

低碳钢	板厚/mm	切割速度/cm·min ⁻¹	喷嘴孔径/mm	气体流量/L·min ⁻¹	割缝宽度/mm		切割面斜度/(°)		备注
					上口	下口	左	右	
切割电流 150A 时	4.5	580	1.8	35	3.4	2.0	10.0	6.3	喷嘴高度 6mm, 后两种工艺难以获得无粘渣切口
	6	430	1.8	35	3.5	2.0	9.1	4.5	
	9	240	1.8	35	3.6	2.1	6.2	3.2	
	12	200	1.8	35	3.7	2.1	4.1	2.7	
	16	140	1.8	35	3.7	2.2	2.8	2.1	
	19	90	2.3	40	4.0	2.3	2.2	1.7	

续表

低碳钢	板厚 mm	切割速度 $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$	喷嘴孔径 mm	气体流量 $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$	割缝宽度 mm		切割面斜度 ($^{\circ}$)		备注
					上口	下口	左	右	
切割电流 250A 时	6	500	2.5	10	4.3	2.1	5.3	4.3	喷嘴高度 6mm, 后两种工艺难以获得无粘渣切口
	9	380			1.4	2.3	4.8	3.6	
	12	310			4.4	2.1	4.3	3.1	
	16	230			4.5	2.6	3.5	2.6	
	19	160			4.6	2.8	3.2	2.2	
	25	110			4.7	3.1	2.8	1.6	

表 4.34 小电流氧等离子弧切割的工艺参数

材料	板厚 mm	切割电 流/A	喷嘴孔径 mm	工作气体流 量/ $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$	切割速度/ $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$		割缝宽度 mm		备注
					正常切割	无粘渣切割	上口	下口	
不锈钢	0.6	83	1.4	15	>600	355	2.1	1.6	喷嘴高度 5mm, 氧 气压力 392kPa
	1.2				>600	300	2.3	1.4	
	2.6				310	190	2.6	1.2	
	3.2				480	160	2.6	1.1	
	5.0				320	110	2.8	1.0	
	10.0				125	60	2.9	1.0	
	15.0	70	50	3.1	1.6				
碳钢	0.5	80	1.4	15	>600	600	2.4	1.5	喷嘴高度 5mm, 氧 气压力 392kPa
	1.0				>600	500	2.4	1.5	
	1.6				>600	580	2.5	1.4	
	2.3				450	430	2.6	1.3	
	3.2				380	285	2.6	1.2	
	4.5				280	205	2.8	1.1	
	6.0				200	145	3.0	1.2	
	9.0				100	75	3.3	1.6	
	12.0	70	50	3.6	2.1				

注: H 产 KPC-80A 切割机。

表 4.35 大电流 (150A) 氧等离子弧切割的工艺参数

板厚/mm	切割速度/ $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$	喷嘴孔径/mm	气体流量/ $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$	割缝宽度/mm		切割面斜度 ($^{\circ}$)		备注
				上口	下口	左	右	
4.5	600	1.8	35	3.6	1.1	13.0	6.7	切割材料为碳钢, 喷嘴高度为 6mm, 后两种工艺略有熔渣黏附, 切割过程不稳定
6.0	450	1.8	35	3.8	1.3	10.0	5.0	
9.0	270	1.8	35	4.2	1.7	7.3	3.7	
12.0	220	1.8	35	4.6	1.9	6.0	3.0	
16.0	170	2.3	40	4.9	2.2	5.3	2.7	
19.0	110	2.3	40	5.2	2.4	4.7	2.3	

表 4.36 水压缩等离子弧切割有色金属的工艺参数

材料	板厚 mm	空载电 压/V	工作电 压/V	切割电 流/A	氮气流量 $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$	压缩水流量 $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$	切割速度 $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$	喷嘴孔径/mm		割缝宽度/mm
								内喷嘴	外喷嘴	
铝合金	17	480	180	260	1800	0.75	54	4	6	3.5
	26	480	180	260	1800	1.00	45	4	6	4.0
	38	490	190	290	2100	0.75	30	4	6	5.0
	80	490	200	290	1350	1.00	15	4.3	6	10.0

续表

材料	板厚 mm	空载电 压·V	工作电 压·V	切割电 流·A	氮气流量 $L \cdot \min^{-1}$	压缩水流量 $L \cdot \min^{-1}$	切割速度 $cm \cdot \min^{-1}$	喷嘴孔径/mm		割缝宽度/mm
								内喷嘴	外喷嘴	
不锈钢	11	180	170	200	1650	1.25	54	4	6	4.0
	18	480	180	300	1650	1.25	54	4	6	4.0
紫铜	15	490	200	300	1350	1.00	54	4	6	4.0
工具钢	10	490	200	290	2100	0.75	30	4	6	5.0

表 4.37 水压缩等离子弧切割碳钢的工艺参数

板厚·mm	切割电流/A	喷嘴孔径/mm	氮气流量 $L \cdot \min^{-1}$	压缩水流量 $L \cdot \min^{-1}$	切割速度 $cm \cdot \min^{-1}$	备注
3.2	300	4.2	78	1.4	4.5	大功率水压缩等离子弧能切割厚 70mm 的钢板
6.3	350	4.2			3.8	
12.5	400	4.2			2.5	
19.0	400	4.2			1.25	
25.0	550	4.8			1.5	
38.1	600	4.8			0.7	

4.7.5 提高切割质量的途径

切口质量主要以切口宽度、切口垂直度、切口表面粗糙度、切纹深度、切口底部熔瘤及切口热影响区硬度和宽度来评定。等离子弧切口的表面质量介于氧-乙炔切割和带锯切割之间。当板厚在 100mm 以上时，因较低的切割速度下熔化较多的金属，往往形成粗糙的切口。

良好切口的标准是：其宽度要窄，切口横断面呈矩形，切口表面光洁，无熔渣或挂渣，切口表面硬度应不妨碍切割后的机加工。

(1) 切口宽度和平直度

等离子弧往往自切口的上部较下部切去较多的金属，使切口端面稍微倾斜，上部边缘一般呈方形，但有时稍呈圆形。等离子弧切割的切口宽度比氧-乙炔切割宽 1.5~2 倍，随板厚增加，切口宽度也增加。对板厚在 25mm 以下的不锈钢或铝，可用小电流等离子弧切割，切口的平直度是很高的，特别是切割厚度 8mm 以下的板材，可以切出小的棱角，甚至不需加工就可直接进行焊接，这是大电流等离子弧切割难以得到的。这对薄板不规则曲线下料和切割非规则孔提供了方便。

等离子弧切口表面存在约 0.25~3.80mm 后的熔化层，但切口表面化学成分没有改变。如切割含 5% Mg 的铝合金时，虽有 0.25mm 厚的熔化层，但成分未变，也未出现有氧化物。若用切割表面直接进行焊接也可以得到致密的焊缝。切割不锈钢时，由于受热区很快通过 649℃ 的临界温度，使碳化铬不会沿晶界析出。因此，用等离子弧切割不锈钢是不会影响它的耐腐蚀性的。

(2) 切口熔瘤消除方法

以不锈钢为例，由于不锈钢熔化金属流动性差，在切割过程中不容易把熔化金属全部从切口内吹掉。不锈钢导热性差，切口底部容易过热，这样切口内残留有未被吹掉的熔化金属，就和切口下部熔合成一体，冷却凝固后形成所谓的熔瘤或毛刺。不锈钢的韧性好，这些熔瘤十分坚韧，不容易去除，给机械加工带来很大困难。因此，去除不锈钢等离子弧切割的熔瘤是一个比较关键的问题。

在切割铜、铝及其合金时，由于其导热性好，切口底部不易和熔化金属重新熔合。这些熔瘤虽“挂”在切口下面，但很容易去除。

采用等离子弧切割工艺时，去除熔瘤的具体措施如下。

a. 保证钨极与喷嘴的同心度。钨极与喷嘴的对中不好，会导致气体和电弧的对称性被破坏，使等离子弧不能很好地压缩或产生弧偏吹，切割能力下降，切口不对称，引起熔瘤增多，严重时引起双弧，使切割过程不能顺利进行。

b. 保证等离子弧有足够功率。等离子弧功率提高，即等离子弧能量增加，弧柱拉长，使切割过程中熔化金属的温度提高和流动性好，这时在高速气流吹力的作用下，熔化金属很容易被吹掉。增加弧柱功率可提高切割速度和切割过程的稳定性，使得有可能采用更大的气流来增强气流的吹力，这对消除切口熔瘤十分有利。

c. 选择合适的气体流量和切割速度。气体流量过小吹力不够，容易产生熔瘤。当其他条件不变时，随着气体流量增加，切口质量得到提高，可获得无熔瘤的切口。但过大的气体流量却导致等离子弧变短，使等离子弧对工件下部的熔化能力变差，割缝后拖量增大，切口呈V字形，反而又容易形成熔瘤。

(3) 避免双弧的产生

转移型等离子弧的双弧现象的产生与具体的工艺条件有关。等离子弧切割中，双弧的存在必然导致喷嘴的迅速烧损，轻者改变喷嘴孔道的几何形状，破坏电弧的稳定条件，影响切割质量；重者使喷嘴被烧损而漏水，迫使切割过程中断。为此，等离子弧切割与等离子弧焊接一样，必须从影响双弧形成的因素着手避免双弧的出现。

(4) 大厚度切割质量

生产中已能用等离子弧切割厚度 100~200mm 的不锈钢，为了保证大厚度板的切割质量，应注意以下工艺特点。

a. 随切割厚度的增加，需熔化的金属量也增加，因此所要求的等离子弧功率比较大。切割厚度 80mm 以上的板材，一般在 50~100kW 左右。为了减少喷嘴与钨极的烧损，在相同功率时，以提高等离子弧的切割电压为宜。为此，要求切割电源的空载电压在 220V 以上。

b. 要求等离子弧呈细长形，挺度好，弧柱维持高温度的距离要长。即轴向温度梯度要小，弧柱上温度分布均匀。这样，切口底部能得到足够的热量保证割透。如果再采用热焓值较大、热导率高的氮、氢混合气体就更好了。

c. 转弧时，由于有大的电流突变，往往会引起转弧过程中电弧中断、喷嘴烧坏等现象，因此要求设备采用电流递增转弧或分极转弧的办法。一般可在切割回路中串入限流电阻（约 0.4Ω），以降低转弧时的电流值，然后再把电阻短路掉。

d. 切割开始时要预热，预热时间根据被切割材料的性能和厚度确定。对于不锈钢，当工件厚度为 200mm 时，要预热 8~20s；当工件厚度为 50mm 时，要预热 2.5~3.5s。大厚度工件切割开始后，要等到沿工件厚度方向都割透后再移动割炬，实现连续切割，否则工件将切割不透。收尾时要待完全割开后才断弧。

大厚度工件切割的工艺参数见表 4.38。

上述切口质量评定因素都与切割工艺参数有关。假若采用的切割参数合适而切口质量不理想时，则要着重检查电极与喷嘴的同心度以及喷嘴结构是否合适。喷嘴的烧损会严重影响切口质量。利用等离子切割开坡口时，要特别注意切口底部不能残留熔渣，不然会增加焊接

装配的困难。

表 4.38 大厚度工件切割的工艺参数

材料	厚度 mm	空载电压 V	切割电流 A	切割电压 V	功率 kW	切割速度 m·h ⁻¹	气体流量·L·h ⁻¹		气体混合比, %		喷嘴直径 /mm
							氮	氢	氮	氢	
铸铁	100	240	400	160	61	13.2	3170	960	77	23	5
	120	320	500	170	83	10.9	3170	960	77	23	5.5
	140	320	500	180	90	8.6	3170	960	77	23	5.5
不锈钢	110	320	500	165	82.5	12.5	3170	960	77	23	5.5
	130	320	550	175	87.5	9.8	3170	960	77	23	5.5
	150	320	440~480	190	91	6.6	3170	960	77	23	5.5

4.7.6 特种等离子弧切割方法

(1) 脉冲等离子弧切割

用脉冲频率在 5~100Hz 周期性改变电流大小的等离子弧进行切割, 已成功地用于板厚为 40mm 的不锈钢。脉冲等离子弧切割的最大优点是, 在相同条件下与一般等离子弧切割相比较所用的等离子弧功率小, 电极和喷嘴的寿命长, 在降低喷嘴孔道电流密度时可得到无熔瘤(毛刺)近似垂直的高质量切口。

例如, 在一般等离子弧切割时要想得到无熔瘤的切口, 当其喷嘴孔径取 $\phi(3\sim5)$ mm 时, 喷嘴孔道内的电流密度不能小于 50~60A/mm², 电流密度过大会烧坏喷嘴和电极, 而采用脉冲等离子弧切割时可降到 36~40A/mm²。

(2) 双弧切割

国外研究了一种用交流的切割割炬, 它除了用 21kW 的直流非转移型弧外, 在喷嘴与工件间再叠加一个交流电弧, 使用 350Hz 的交流发电机。当只用非转移型弧时可切割板厚 30mm 以下的材料, 切口很窄。如用孔径为 $\phi 4$ mm 的喷嘴, 切口宽度约为 5mm, 也可作为穿孔、刨槽等用。当切割板厚再增加时, 才叠加交流电弧, 使切割处于双弧状态。

(3) 漩涡水稳定电弧等离子切割

用漩涡水来稳定电弧等离子切割, 国外做了大量工作, 可以得到很高的切割质量, 这是一种纯粹用水工作的等离子弧割炬。形成等离子喷射所需气体是在喷嘴室内由电弧辐射热使水蒸气分解得到的。电极是使用直径为 $\phi 13$ mm×50mm 的碳棒(碳棒的最大烧损速度为 7mm/min), 切割时碳棒自动送向工件, 以补偿烧损维持电弧特性不变, 这种割枪的切割成本较一般等离子切割可降低 50%~70%, 而且易维护, 喷嘴寿命长。

用切割电流为 250~260A, 切割速度为 10~400mm/min 时, 可切割厚度为 100mm 的铝及其合金, 厚度 80mm 以内的不锈钢和镍基合金, 以及厚度 50mm 以内的铜。

(4) 微束等离子弧切割

微束等离子弧能量密度高, 功效消耗低, 气流量消耗少, 切缝窄, 热变形翘曲小, 适用于成材薄板的曲线切割。一般的微束等离子弧切割材料厚度为 5~30mm, 功率用到 16kW 左右。最小的微束等离子弧切割材料厚度为 0.1mm, 其喷嘴孔径用到 0.1~0.4mm, 切缝宽度为 0.15~0.3mm, 最小功率为 500W。当用 1.45kW 功率时, 非转移电弧切割厚度 0.35mm 的薄钢板, 最快速度可达 10.5m/min。

(5) 静止气体保护电极氧气等离子切割

静止气体保护电极氧气等离子切割的喷嘴有内、中、外三层铜套。内套称为阴极套, 其

中通纯氩气，在起弧后停止通气，而形成静止气体。中间套称为阳极套或称为保护套，也通纯氩气作为电极保护气体（占气体总流量的5%）。最外层通氧气，作为等离子气（占总流量的95%）。

这种切割方法的特点是，在起弧后，阴极套内为静止气体，排除了普通流动氩气中杂质带来的危害，从而使电极尖端的烧损和变形大大减小。同时阳极斑点稳定，弧柱也稳定，保护套内通少量的氩气，对防止氧气侵入内套，保证稳定切割起很重要的作用。外套通氧气作为切割气体，可以提高电弧的能量密度，使电弧稳定，可以得到整洁的切口，在切口下部渣也容易清除掉。

（6）水下等离子弧切割

水下等离子弧切割用于船舶、水底设施及其他水下工程工作。国内外都在5~10m深的淡水或海水中进行等离子弧切割，已能成功地切割板厚为100mm以下的不锈钢或其他金属。水下等离子弧切割与空气等离子弧切割相比有以下特点。

a. 由于水压产生的阻力，使等离子弧机械吹力减弱，弧长变短，有效热能降低，切割速度减小。解决的办法是增大功率，如切割10~100mm不锈钢时，切割电流450~950A，切割电压250V，空载电压高达500~1000V。

b. 引燃非转移电弧之前，应先通较大的气流把割炬中的水冲出割炬，在比较大的气流情况下引燃电弧有困难，必须增加引弧功率。一般可使辅助电流增大到70~100A，再把一般用的高频振荡器的次级线圈由3圈改为12圈，并使其两台初级并联，次级串联，以增加高频击穿能力。

c. 在进行切割时，为克服水的阻力，必须增加气体压力及流量，以增加电弧的冲击力。这样，由于气流增大和电弧受水的影响致使电弧不稳定。因而要求设计专用的割炬，增设水屏通道，使弧柱处于高速旋转的水屏保护下免受较大的压力，这时弧柱稳定。同时，在喷嘴出口处水屏对弧柱还有一定的压缩作用，增加了等离子弧的速度，从而提高了切割能力。

在海水与淡水中切割最大不同点是由于海水导电，所以割炬外部需用绝缘材料包起来，使负极不与海水接触，防止漏电和产生电腐蚀。

第5章 真空扩散焊

一些特殊高性能构件的制造，经常要求把特殊合金或性能差别很大的异种材料，如金属与陶瓷、铝与钢、钛与钢、金属与玻璃等连接在一起，这用传统的熔焊方法难以实现。为了适应这种要求，作为固相连接方法之一的真空扩散焊技术引起了人们的重视，成为连接领域新的热点。近年来，真空扩散焊技术发展很快，已经被应用于航空航天、仪表及电子、核工业等部门，并逐步扩展到机械、化工及汽车制造等领域。

5.1 扩散焊的分类及特点

扩散焊是指在一定的温度和压力下，被连接表面相互靠近、相互接触，通过使局部发生微观塑性变形，或通过被连接表面产生的微观液相而扩大被连接表面的物理接触，然后结合层原子间经过一定时间的相互扩散，形成整体可靠连接的过程。

5.1.1 扩散焊的分类

(1) 同种材料扩散焊

同种材料扩散焊通常指不加中间层的两种同种金属直接接触的扩散连接。这种类型的扩散焊，一般要求待焊表面制备质量较高，焊接时要求施加较大的压力，焊后接头的成分、组织与母材基本一致。Ti、Cu、Zr、Ta等最易焊接；铝及其合金，含Al、Cr、Ti的铁基及钴基合金则因氧化物不易去除而难于焊接。

(2) 异种材料扩散焊

异种材料扩散焊是指两种不同的金属、合金或金属与陶瓷、石墨等非金属材料的扩散连接。异种金属的化学成分、物理性能等有显著差异。两种材料的熔点、线胀系数、电磁性、氧化性等差异越大，扩散焊接难度越大。因两种材料扩散系数不同，可能导致扩散接头中形成显微孔洞；在扩散结合面上由于冶金反应产生低熔点共晶或者形成脆性金属间化合物，容易使界面处产生裂纹，甚至断裂。

(3) 共晶反应扩散焊

共晶反应扩散焊是利用在某一温度下待焊异种金属之间会形成低熔点共晶的特点加速扩散焊过程的方法。在被焊材料之间加入一层金属或合金（称为中间层），这样就可以焊接很多难焊的或冶金上不兼容的异种材料，可以焊接熔点很高的同种材料。

(4) 瞬间液相扩散焊

瞬间液相扩散焊是指在扩散焊过程中接缝区短时出现微量液相的扩散焊方法。在扩散焊过程中，中间层与母材发生共晶反应，形成一层极薄的液相薄膜，此液膜填充整个接头间隙后，再使之等温凝固并进行均匀化扩散处理，从而获得均匀的扩散焊接头。

(5) 超塑性成形扩散焊

超塑性成形扩散焊工艺的特点是：扩散焊压力较低，与成形压力相匹配，扩散焊时间较长，可长达数小时。在高温下具有超塑性的金属材料，可以在高温下用较低的压力实现成形和连接。采用此方法的条件之一是材料的超塑性成形温度与扩散焊温度接近，该方法在低真空下完成。在超塑性状态下进行扩散焊有助于焊接质量的提高，这种方法在航空航天工业中

得到应用。

扩散焊是正在不断发展的一种焊接技术，有关其分类、机理、设备和工艺都在不断完善和向前发展。根据被焊材料的组合和加压方式的不同，对扩散焊的分类见表 5.1。

表 5.1 根据被焊材料的组合和加压的方式对扩散焊的分类

类 型	工 艺 特 点
同种材料扩散焊	是指不加中间层的两种金属直接接触的一种扩散焊。对待焊表面制备质量要求高，焊时要求施加较大的压力。焊后接头组织与母材基本一致 对氧溶解度大的金属（如 Ti、Cu、Fe、Zr、Ta 等）最易焊，而对容易氧化的铝及其合金，含 Al、Cr、Ti 的铁基及钴基合金则难焊
异种材料扩散焊	是指异种金属或金属与陶瓷、石墨等非金属之间直接接触的扩散焊。由于两种材质上存在物理和化学等性能差异，焊接时可能出现： (1) 因膨胀系数不同，导致结合面上出现热应力 (2) 由于冶金反应，在结合面上产生低熔点共晶或形成脆性金属间化合物 (3) 因扩散系数不同，导致接头中形成扩散孔洞 (4) 因电化学性能不同，接头可能产生电化学腐蚀
加中间层的扩散焊	是指在待焊界面之间加入中间层材料的扩散焊。该中间层材料通常以箔、电镀层、喷涂或气相沉积层等形式使用，其厚度小于 0.25mm。中间层的作用是：降低扩散焊的温度和压力，提高扩散系数，缩短保持时间，防止金属间化合物的形成等。中间层经过充分扩散后，其成分逐渐接近于母材。冷却后，在金相照片中不存在单独的一层。此法可以焊接很多难焊的或在冶金上不相溶的异种材料
过渡液相扩散焊(TLP法)	是一种具有钎焊过程特点的扩散焊。在焊件待焊面之间放置熔点低于母材的中间层金属，在较小压力下加热，使中间层金属熔化，润湿并填充整个接头间隙成为过渡液相，通过扩散和等温凝固，然后再经一定时间扩散均匀化处理，从而形成焊接接头的方法，又称为扩散钎焊
热等压扩散焊(HIP)	是利用热等静压技术完成焊接的一种扩散焊。焊接时将待焊件安放在密封的真空盒内，将此盒放入通有高压惰性气体的加热釜中，通过电热元件加热，利用高压气体与真空盒中的压力差对工件施以各向均衡的等静压力，在高温与高压共同作用下完成焊接过程。此法因加压均匀，不易损坏构件，很适合于脆性材料的扩散焊。可以精确地控制焊接构件的尺寸
超塑性成形扩散焊(PF-DB)	是一种将超塑性成形与扩散焊接组合起来的工艺，适用于具有超塑性的材料，如钛、铝及其合金等的焊接。薄壁零件可先超塑性成形然后焊接，也可相反进行，次序取决于零件的设计。如果先成形，则使接头的两个配合面对在一起，以便焊接；如果两个配合面原来已经贴合，则先焊接，然后用惰性气体充压使零件在模其中成形

5.1.2 扩散焊的特点

一些新材料（如陶瓷、金属间化合物、非晶态材料及单晶等）采用传统的熔焊方法很难实现可靠的连接。一些特殊的高性能构件的制造，往往要求把性能差别较大的异种材料（如金属与陶瓷、有色金属与钢、金属与玻璃等）连接在一起，这用传统的熔焊方法也难以实现。为了满足上述种种要求，作为固相连接方法之一的扩散焊日益引起人们的重视。

扩散连接与熔焊、钎焊方法相比，在某些方面具有明显的优点，主要表现在以下几个方面。

a. 扩散焊接头的显微组织和性能与母材接近或相同，不存在各种熔化焊缺陷，也不存

在具有过热组织的热影响区。工艺参数易于控制，在批量生产时接头质量稳定。

b. 可以进行内部及多点、大面积构件的连接，以及电弧可达性不好或用熔焊方法不能实现的连接。可焊接其他焊接方法难于焊接的材料。

c. 是一种高精密的连接方法，用这种方法连接后，工件不变形，可以实现机械加工后的精密装配连接，可获得较大的经济效益。

d. 对于塑性差或熔点高的同种材料，或对于不互溶或在熔焊时会产生脆性金属间化合物的异种材料，扩散焊是一种可靠的方法。扩散焊适合于耐热材料（耐热合金、钨、钼、铌、钛等）、陶瓷、磁性材料及活性金属的连接，在扩散焊技术研究与实际应用中，有 70% 涉及异种材料的连接。

扩散焊的缺点：

- a. 零件被连接表面的制备和装配质量要求较高；
- b. 接过程中，加热时间长，在某些情况下会产生一些晶粒过度长大等副作用；
- c. 设备一次性投资较大，且被连接工件的尺寸受到设备的限制。

5.2 扩散焊原理及扩散机制

5.2.1 扩散焊原理

扩散焊是在一定的温度和压力下，经过一定的时间，工件接触界面原子间相互扩散而实现的可靠连接。扩散焊是压焊的一种，与常用压焊方法（冷压焊、摩擦焊、爆炸焊及超声波焊）相同的是在连接过程中要施加一定的压力。扩散焊与其他焊接方法加热温度、压力及过程持续时间等工艺条件的对比见表 5.2。

表 5.2 扩散焊与其他焊接方法的比较

工艺条件	扩散焊	熔焊	钎焊
加热	局部、整体	局部	局部、整体
温度	0.5~0.8 倍母材熔点	母材熔点	高于钎料熔点
表面准备	注意	不严格	注意
装配	精确	不严格	不严格
焊接材料	金属、合金、非金属	金属合金	金属、合金、非金属
异种材料连接	无限制	受限制	无限制
裂纹倾向	无	强	弱
气孔	无	有	有
变形	无	强	轻
接头施工可达性	无限制	有限制	有限制
接头强度	接近母材	接近母材	取决于钎料的强度
接头抗腐蚀性	好	敏感	差

扩散焊过程可以分为三个阶段。

第一阶段为物理接触阶段，高温下微观不平的表面，在外加压力的作用下，通过屈服和蠕变机理使一些点首先达到塑性变形，在持续压力的作用下，接触面积逐渐扩大，最终达到整个面的可靠接触。在这一阶段之末，界面之间还有空隙，但其接触部分则基本上已是晶粒间的连接。

第二阶段是接触界面原子间的相互扩散，形成牢固的结合层。这一阶段，由于晶界处原子持续扩散而使许多空隙消失。同时，界面处的晶界迁移离开了接头的原始界面，达到了平衡状态，但仍有许多小空隙遗留在晶粒内。

第三阶段是在接触部分形成的结合层，逐渐向体积方向发展，形成可靠的连接接头。在此阶段，遗留下的空隙完全消失了。这三个过程是相互交叉进行的。最终在接头连接区域由于扩散、再结晶等过程而形成固态冶金结合，它可以生成固溶体及共晶体，有时生成金属间化合物，形成可靠连接。

扩散焊的工艺参数主要有表面状态、中间层的选择、加热速度、温度、压力、保温时间和气体介质等，其中最主要的参数为温度、压力、保温时间和真空度，这些参数是相互影响的。

5.2.2 扩散焊机制

扩散焊通过界面原子间的相互作用形成接头，原子间的相互扩散是实现连接的基础。对于具体材料和合金，要具体分析原子扩散的路径及材料界面元素间的相互物理化学作用。异种材料扩散焊可能生成金属间化合物，而非金属材料的扩散界面可能进行化学反应，界面生成物的形态及其生成规律，对材料扩散焊接头性能有很大的影响。

固态中的扩散有以下几种机制：空位机制、间隙机制、轮转机制、双原子机制和挤列机制。空位机制、轮转机制、双原子机制的扩散可以形成置换式固溶体，间隙机制可以形成间隙式固溶体，只有原子体积小的元素，如氢、硼、碳、氮等才有这种扩散形式。

(1) 材料界面的吸附与活化

在外界压力的作用下，被连接界面靠近到距离为 $2\sim 4\text{nm}$ ，形成物理吸附。经过仔细加工的表面，微观有一定的不平度，在外力作用下，被连接表面微观凸起部位形成微区塑性变形（如果是异种材料则较软的金属先变形），被连接表面的局部区域达到物理吸附，这一阶段被称为物理接触形成阶段。

随着扩散焊时间延长，被连接表面微观凸起变形量增加，物理接触面积进一步增大，在接触界面的某些点形成活化中心，在这个区域可以进行局部化学反应。此时被连接表面局部区域形成原子间相互作用，当原子间距达到 $0.1\sim 0.3\text{nm}$ 时，则形成原子间相互作用的反应区域达到局部化学结合。对于晶体材料，位错在表面上的出口处及晶界可以作为反应源的发生地。在界面上完成由物理吸附到化学结合的过渡。在金属材料扩散焊时，形成金属键，而当金属与非金属连接时，此过程形成离子键与共价键。

随着时间的延长，局部的活化区域沿整个界面扩展，局部表面形成局部黏合与结合，最终导致整个结合面出现原子间的结合。仅结合面的黏合还不能称为固态连接过程的最终阶段，还必须向结合面两侧扩散或在结合区域内完成组织变化和物理化学反应。

连接材料界面结合区中再结晶形成共同的晶粒，接头区由于应变产生的内应力得到松弛，使结合金属的性能得到改善。异种金属扩散焊界面附近可以生成无限固溶体、有限固溶体、金属间化合物或共析组织的过渡区。当金属与非金属扩散焊时，可以在连接界面区形成尖晶石、硅酸盐、铝酸盐及其他热力学反应新相。如果结合材料在焊接区可能形成脆性层，必须用改变扩散焊参数的方法加以控制与限制。

(2) 固体中的扩散

1) 扩散的基本规律

扩散是指相互接触的物质，由于热运动而发生的相互渗透，扩散向着物质浓度减小的方向进行，使粒子在其占有的空间均匀分布，它可以是自身原子的扩散，也可以是外来物质形成的异质扩散。

扩散系数 D 是扩散的基本参数，它定义为单位时间内经过一定平面的平均粒子数。扩散系数对加热时晶体中的缺陷、应力及变形特别敏感。当晶体中的缺陷，特别是空穴增加

时,使原子在固体中的扩散加速,扩散系数 D 与温度呈指数关系变化,即

$$D = D_0 \exp(E/RT) \quad (5.1)$$

式中 D ——扩散系数, cm^2/s ;

E ——扩散过程的激活能, kJ/mol ;

R ——气体常数;

D_0 ——指数前系数;

T ——绝对温度, K 。

由上式可以看出,扩散系数随着温度的提高而显著增加。

原子一般从高浓度区向低浓度区扩散。对于两个理想接触面的柱体(半无限体),原子的平均扩散距离有如下计算公式,即

$$x = (2Dt)^{0.5} \quad (5.2)$$

式中 x ——扩散原子的平均扩散距离;

D ——扩散系数;

t ——扩散时间。

由上式可以看出,扩散焊时,原子的扩散距离与时间的平方根成正比。在扩散焊时,可以根据不同的要求选择不同的扩散时间,为了焊接接头成分和性能的统一化,要用较长的扩散时间,如果连接界面间生成脆性的金属间化合物,则要缩短扩散时间。

2) Kirkendall 效应

在异种金属或不同成分的合金进行扩散焊时,由于不同元素的扩散系数不一样,造成穿过界面的物质流不一样,使某物质向一个方向运动,最终会形成边界的移动。造成这种现象的原因是由于不同元素扩散速度不一样引起的。在所有的情况下,若两种不同金属相互接触,则结合界面移向熔点低的金属一侧。当非均匀扩散时,边界也非均匀地运动,从而出现空洞。扩散焊时施加一定的压力,使所加的压强超过低熔点金属在扩散焊温度下的屈服强度,则有利于扩散空洞的消除。

3) 扩散与组织缺陷的关系

实际工程中应用的材料,都存在着大量的缺陷,很多材料甚至处于非平衡状态,组织缺陷对扩散的影响十分显著,实际上在许多情况下,组织缺陷决定了扩散的机制和速度。材料的晶粒越细,即材料一定体积中的边界长度越大,则沿晶界扩散的现象越明显。沿晶界的扩散与晶体的扩散不一样。英国物理学家费舍尔(Fisher)提出的沿晶扩散模型认为,扩散沿晶界进行得很快,沿边界进入的原子数量远超过从表面直接进入晶粒的原子。原子首先沿边界快速运动,而后再从边界进入晶粒内部,在晶界上的扩散路径与一般扩散不一样,晶界扩散原子的平均扩散距离与时间的四次方根成正比。

沿金属表面的扩散与该表面的结构有关。实际晶体表面是不均匀的,表面存在着不平和微观凸起,有时表面形成机械加工硬化,这使表面层位错密度很高,再加上异种金属连接时,不同种材料原子间的吸附与化学作用,使表面原子有很大的活性。对表面、边界和体积扩散试验研究表明,表面扩散的激活能在三种形式的扩散中是最小的,即 $E_{\text{表面}} < E_{\text{边界}} < E_{\text{体积}}$, 在同样的温度下,扩散系数 $D_{\text{表面}} > D_{\text{边界}} > D_{\text{体积}}$, 即在表面扩散要快得多。

4) 扩散焊时的化学反应

异种材料(特别是金属与非金属或非金属材料间连接时),界面将进行化学反应。首先在局部形成反应源,而后向整个连接界面上扩展,当整个界面都形成反应时,能形成良好的

扩散连接、产生局部化学反应的萌生源与工艺参数，如温度、压力和时间有密切关系。扩散焊时压力对化学反应源有决定性的影响，压力越大，反应源的扩展程度越大；温度和时间主要影响反应源的扩散程度，对反应数量的影响不大。固态物质之间的反应只能在界面上进行。向活性区输送原始反应物，其局部化学反应继续进行是反应区扩大的条件之一。

界面进行化学反应主要有化合反应和置换反应。化合反应的特性是形成单物质。反应剂和反应产物的晶体结构比较简单，通常这些物质的物理和化学性能是已知的。如金属经过氧化层与陶瓷或玻璃的连接（形成各种尖晶石、硅酸盐及铝酸盐等氧化物）即属于这种类型，这类反应很普遍。

置换反应是以活泼元素置换非活泼元素的情况，在 Al-Mg 合金与玻璃或陶瓷的连接中得到了典型应用。铝与氧化硅在界面上发生置换反应，二氧化硅中的硅被铝置换，还原为硅原子溶解于铝中。当达到饱和浓度后，由固溶体中析出含硅的新相。使用活泼金属 Al、Ti、Zr 等焊接 SiC 和 Si₃N₄ 陶瓷时也有类似反应。

扩散焊时化合反应与置换反应的差别在于，化合反应是在人工生成的金属表面氧化物与玻璃或陶瓷中的氧化物之间进行的，化合反应由开始局部接触，而后逐渐扩展到整个表面，形成一定的化合物层，在这个过程中反应速度一直是增加的。由于反应物的溶解度较小，在界面上可能形成一个很宽的难熔化合物层。由于在非金属化合物中扩散过程进行得很慢，所以反应速度急剧下降，化合物的形成过程就此结束。此时继续增加扩散焊的时间，对接头的强度没有显著的影响。

异种金属的扩散系数要比同种金属的扩散系数大，用扩散焊来焊接脆性金属比焊接塑性金属更合适。当金属结合率要求达到 100% 时，就需要加入形成液相的金属中间层或夹层。如果没有中间层，就要求加大压力，以便获得良好的界面接触。原子扩散过程是比较慢的，但是如果提高加热温度，则可加快扩散速度。

5.3 真空扩散焊设备

5.3.1 扩散焊设备的组成

在进行扩散焊时，必须保证连接面及被连接金属不受空气的影响，必须在真空或惰性气体介质中进行。现在采用最多的方法是真空扩散焊。真空扩散焊可以采用高频、辐射、接触电阻、电子束及辉光放电等方法，对工件进行局部或整体加热。工业生产中普遍应用的扩散焊设备，主要采用感应和辐射加热的方法。

扩散焊设备主要是由带有真空系统的真空室、对零件的加热源、对工件的加压系统、对温度和真空度的检测系统以及控制装置组成。无论何种加热方式的真空扩散焊设备都主要由以下几部分组成。

① 真空室 真空室越大，要达到和保持一定的真空度，对所需真空系统要求越高。真空室中应有由耐高温材料围成的均匀加热区，以保持设定的温度；真空室外壳需要冷却。

② 真空系统 一般由扩散泵和机械泵组成。机械泵只能达到 1.33×10^{-2} Pa 的真空度，加扩散泵后可以达到 $1.33 \times 10^{-4} \sim 1.33 \times 10^{-5}$ Pa 的真空度，可以满足所有材料的扩散焊要求。真空度越高，越有利于被焊材料表面杂质和氧化物的分解与蒸发，促进扩散焊顺利进行。但真空度越高，抽真空的时间越长。按真空度可分为低真空、中真空、高真空等。

③ 加热系统 一般由感应线圈和高频电源组成。根据不同的加热要求，辐射加热可选用钨、钼或石墨作加热体，经过高温辐射对工件进行加热。按加热方式分为感应加热、辐射

加热、接触加热等。

④ 加压系统 扩散焊过程一般要施加一定的压力。在高温下材料的屈服强度较低，为避免构件的整体变形，加压只是使接触面产生微观的局部变形。扩散焊所施加的压力较小，压强可在1~100MPa范围内变化。只有当材料的高温变形阻力较大，或加工表面较粗糙，或扩散焊温度较低时，才采用较高的压力。分为液压系统、气压系统、机械系统、热膨胀加压等。目前主要采用液压和机械加压系统。

⑤ 测量与控制系统 现在应用的扩散焊机都具有对温度、压力、真空度及时间的控制系统。根据选用的热电偶不同，可实现对温度从20~2300℃的测量与控制，温度控制的精度可在上(5~10)℃。压力的测量与控制一般是通过压力传感器进行的。

5.3.2 扩散焊设备的技术参数

扩散焊设备种类繁多，目前采用较多的是感应加热方式。表5.3列举了三种真空扩散焊设备的主要技术参数。

表 5.3 真空扩散焊设备主要技术参数

设备型号或类型	ZKL 1	ZKL-2	高真空扩散焊机	HKZ-10	DZL-1
加热区尺寸/mm	φ600×800	φ300×400	φ300×350	300×300×300	—
真空度/Pa	冷态	3×10^{-3}	1.33×10^{-6}	1.33×10^{-3}	7.62×10^{-4}
	热态	5×10^{-4}	5×10^{-3}	1.33×10^{-5}	—
加压能力/kN	215(最大)	58.8(最大)	50	80	300
最高炉温/℃	1200	1200	1350	1300	1200
炉温均匀性/℃	1000±10	1000+5	—	1300±10	1200±5

美国真空工业公司生产的 Workhorse II 型真空扩散焊接设备，其主要性能指标见表5.4。该扩散焊设备的组成示意如图5.1所示。这套真空扩散焊接设备主要由真空室、真空泵系统、液压系统、循环水系统、保护气体系统、控制仪表等几部分组成。真空泵系统由机械泵和扩散泵两个构成，可以提供 1.33×10^{-5} Pa 以上的高真空度。扩散焊时压力的施加和保持由液压系统完成。控制仪表主要由数字控制处理器、程序逻辑控制器、过程控制单元、计算机以及加热温度、压力、真空度的测量和记录仪器等组成。

表 5.4 Workhorse II 型真空扩散焊接设备主要性能指标

型号	主要性能指标					
	真空室尺寸/mm	最高加热温度/℃	最大压力/tf	真空度/Pa	加热功率/kW	保护气体
3033-1305-30T	304×304×457	1350	30	6.65×10^{-6}	45	N ₂ 、Ar

注：1tf=9.81kN。

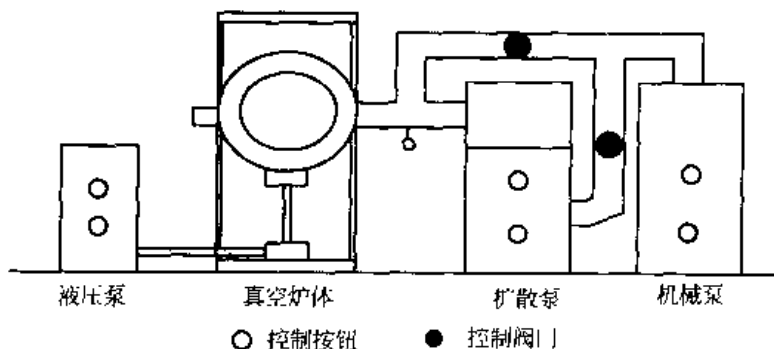


图 5.1 Workhorse II 型真空扩散焊设备组成示意

由于整套设备采用了计算机控制，真空扩散焊过程实现了全部自动运行，并可对各工艺参数获得相当高的控制精度。真空扩散焊的加热温度、焊接压力、保温时间、真空度等参数可以通过预先编制的程序控制整个焊接过程，提高了焊接过程的精度和可靠性。

5.4 真空扩散焊工艺

真空扩散焊的工艺流程一般包括以下阶段：工件表面处理、工件装配、装炉、扩散焊接（包括抽真空、加热、加压等）、炉冷。

5.4.1 接头形式与表面清理

(1) 工件表面处理及装配

为了使工件得到满意的扩散焊结合，焊接件必须满足以下两个必要条件：

- a. 使焊件表面金属与金属间达到紧密接触；
- b. 必须对有妨碍的材料表面污染物加以破坏和分解，以便形成金属间结合。

金属表面一般不平整，附着有氧化物或其他固态或液态产物（如油脂、灰尘等），吸附有气体或潮气。待焊件组装前必须对工件表面进行仔细处理。表面处理不仅包括清洗，去除化学结合的表面膜层（氧化物），清除气、水、或有机物表面膜层；还有对金属表面粗糙度的要求。

为了保证在扩散焊时能有均匀接触，对表面的最小平直度和最小粗糙度有一定的要求。常用的金属切割和研磨抛光的方法通常能够加工出所要求的表面平直度和粗糙度。机械加工或磨削的附带效果是引起表面的冷作硬化，冷作硬化表面的再结晶有增加界面附近扩散速度的倾向。

(2) 焊前清理

对工件进行焊前处理的化学腐蚀有两个作用：

- a. 去除非金属表面膜（通常是氧化物）；
- b. 部分或全部去除在机械加工时形成的冷作加工层。

除油是任何表面清理工序的必要部分。可使用乙醇、三氯乙烯、丙酮、洗涤剂以及任何其他清洁剂，也可采用在真空中加热的方法来获取清洁的表面。在真空中加热的方法的可用性很大程度上取决于金属种类和其表面膜的性质。有机物或水、气的吸附层通过在真空中进行高温热处理很容易去除，但大多数氧化物在真空热处理时不分解。真空清洁处理后的零件要求随即在真空或控制气体中保存，以免重新形成吸附层或化学吸附层。

选择表面处理方法时还需考虑具体的焊接条件。如果在很高的温度或压力下扩散连接，获得特别清洁的表面就不十分重要了。原子活性、表面凸凹变形以及对杂质元素溶解度的增加，有助于使表面污染物分解。在较低温度和较低压力下焊接时有必要进行较严格的表面处理和保存。

工件表面处理后须对清洁的表面进行保护，有效的方法是在扩散焊过程中采用保护性气氛，真空环境能够长时间防止污染。纯氢气氛能减小形成的氧化物数量，并能在高温下使许多金属的表面氧化物层减薄。但氢能够与锆、铌和钽形成氢化物。氩、氦也可用于在高温下保护清洁的表面，但使用这些气体时纯度必须很高，以防止造成重新污染。

工件装配是扩散焊最终得到质量良好的扩散焊接头的关键步骤之一。待焊表面紧密接触可以使被连接面在较低的温度或压力下实现完整、可靠的结合与连接。

5.4.2 中间层的选择

在工件之间增加中间层是异种材料扩散焊的有效手段之一，特别是对于原子结构差别很大的材料。中间层的作用主要是改善材料表面的接触，降低对待焊表面制备的要求，降低所需的压力；改善扩散条件（加速扩散过程、降低扩散焊温度、缩短扩散焊时间）；改善冶金反应，避免或减少形成脆性金属间化合物的倾向；避免或减少因被焊材料之间的物理化学性能差异过大而引起的其他冶金问题。

(1) 所选择的中间层材料应具有的特点

- a. 容易发生塑性变形；含有加速扩散的元素，如硼、铍、硅等；
- b. 物理化学性能与母材的差异较被焊材料之间的差异小；不与母材发生不良冶金反应，如产生脆性相或不希望的共晶相；
- c. 不会在接头上引起电化学腐蚀问题。

通常，中间层是熔点较低（但不低于扩散焊接温度），塑性较好的纯金属，如铜、镍、铝、银等，或者与母材成分接近的含有少量易扩散的低熔点元素的合金。

中间层厚度一般为几十微米，以利于缩短均匀化扩散处理的时间。厚度在 $30\sim 100\mu\text{m}$ 时，可以以箔片的形式夹在待焊表面间。不能轧制成箔片的中间层材料，可以采用电镀、真空蒸镀、等离子喷涂的方法直接将中间层材料涂覆在待焊表面。镀层厚度可以仅有几微米。中间层厚度可以根据最终成分来计算、初选，通过试验修正确定。

(2) 阻焊剂

扩散焊时为了防止压头与工件或工件之间某些区域被扩散焊粘接在一起，需加阻焊剂（片状或粉状）。阻焊剂应具有以下性能：

- a. 有高于焊接温度的熔点或软化点；
- b. 具有较好的高温化学稳定性，在高温下不与工件、夹具或压头发生化学反应；
- c. 不释放出有害气体污染附近的待焊表面，不破坏保护气氛或真空度。

例如钢与钢扩散焊时，可以用人造云母片隔离压头；钛与钛扩散焊时，可以涂一层氮化硼或氧化钽粉。

5.4.3 扩散焊的主要工艺参数

(1) 加热温度

加热温度是扩散焊最重要的工艺参数，加热温度的微小变化会使扩散速度产生较大的变化。在一定的温度范围内，温度越高扩散系数越大，扩散过程越快，所获得的接头结合强度越高。但当温度高于某一定值后，温度再提高时，扩散焊接头质量提高不多，有时反而有所下降。

受材料的物理性能、工件表面状态、设备等因素的限制，对于许多金属和合金，扩散焊合适的加热温度一般为 $0.6\sim 0.8T_m$ ($^{\circ}\text{C}$) (T_m 为母材熔点)。表 5.5 给出一些金属材料的扩散焊温度与熔化温度的关系。对于出现液相的扩散焊，加热温度应比中间层材料熔点或共晶反应温度稍高一点。液相填充间隙后的等温凝固和均匀化扩散温度可略微降低一些。

(2) 压力

施加压力的主要作用是使接合面微观凸起的部分产生塑性变形，达到紧密接触，同时促进界面区的扩散，加速再结晶过程。一般增加压力能提高接头强度，但过大的压力会导致工件变形。同时高压需要成本较高的设备和更精确的控制。从经济角度考虑，应选择较低的压力。

表 5.5 一些金属材料的扩散焊温度与熔化温度的关系

金属材料	扩散焊温度 $T/^\circ\text{C}$	熔化温度 $T_m/^\circ\text{C}$	T/T_m	金属材料	扩散焊温度 $T/^\circ\text{C}$	熔化温度 $T_m/^\circ\text{C}$	T/T_m
银(Ag)	149	960	0.34	铍(Be)	950	1280	0.78
铜(Cu)	160	1083	0.32	2%铍铜	802	1071	0.80
70-30 黄铜	271	916	0.46	317 不锈钢	999	1454	0.74
20 钢	438	1510	0.40	317 不锈钢	1199	1454	0.85
钛(Ti)	538	1815	0.39	铌(Nb)	1149	2415	0.53
45 钢	800	1490	0.61	钽(Ta)	1316	2996	0.49
45 钢	1100	1490	0.78	钼(Mo)	1260	2625	0.53

在其他参数固定的情况下，采用较高的压力能产生结合强度较好的接头，如图 5.2 所示。对于异种金属扩散焊，采用较大的压力对减少或防止扩散孔洞有良好作用。通常扩散焊采用的压力在 0.5~30MPa 之间。由于压力对扩散的第二、第三阶段影响较小，在固态扩散焊时可在后期将压力减小，以便减小工件变形。

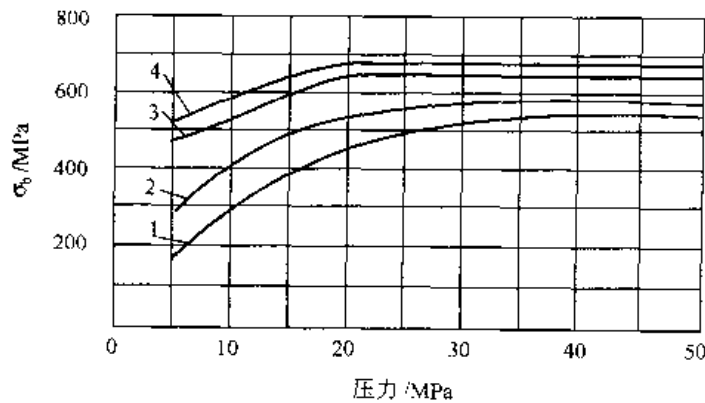


图 5.2 焊接接头强度与压力的关系 (保温时间 5min)

1— $T=800^\circ\text{C}$; 2— $T=900^\circ\text{C}$; 3— $T=1000^\circ\text{C}$; 4— $T=1100^\circ\text{C}$

(3) 保温时间

保温时间是指被焊工件在焊接温度下保持的时间。在该保温时间内必须保证扩散过程全部完成，达到所需的结合强度（见图 5.3）。保温时间太短，扩散焊接头达不到稳定的与母材相等的强度。但高温、高压持续时间太长，对扩散接头质量起不到进一步提高的作用，反而会使母材的晶粒长大。对可能形成脆性金属间化合物的接头，应控制保温时间以控制脆性层的厚度，使之不影响接头性能。

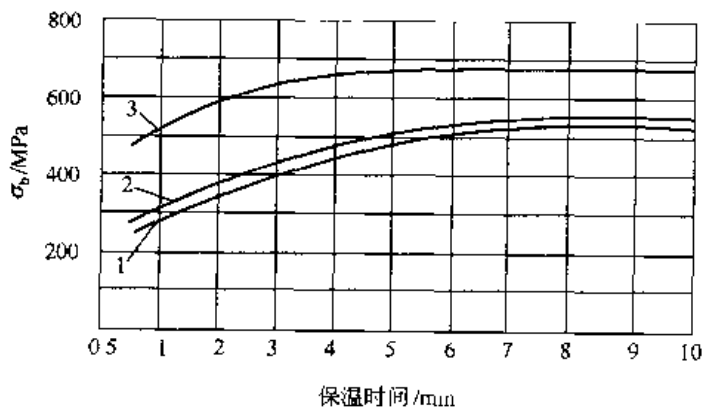


图 5.3 扩散焊接头强度与保温时间的关系 (结构钢, 压力 20MPa)

1— $T=800^\circ\text{C}$; 2— $T=900^\circ\text{C}$; 3— $T=1000^\circ\text{C}$

保温时间与温度、压力是密切相关的，大多数由扩散控制的反应都是随时间变化的。温度较高或压力较大时，时间可以缩短。在一定的温度和压力条件下，初始阶段接头强度随时间延长增加，但当接头强度提高到一定值后，便不再随时间而继续增加。在实际焊接中，焊接时间可以在一个较宽的范围内变化，但从提高生产率考虑，在保证强度条件下，保温时间越短越好。

图 5.4 表示了钛合金扩散焊时压力与最小连接时间的关系。对于加中间层的扩散焊，保温时间还取决于中间层厚度和对接头化学成分、组织均匀度的要求（包括脆性相的允许量）。

(4) 保护气氛

焊接保护气氛的纯度、流量、压力或真空度、漏气率都会影响扩散焊接头的质量。常用的保护气体是氩气，真空度通常为 $(1 \sim 20) \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 。对于有些材料也可以采用高纯度氮、氢或氦气。在超塑性成形和扩散焊组合工艺中常用氩气氛负压（低真空）保护钛板表面。

另外，对于在冷却过程中有相变的材料以及陶瓷类脆性材料，在扩散焊时，加热和冷却速度应加以控制。共晶反应扩散时，加热速度太慢，会因扩散而使接触面上的化学成分发生变化，影响熔融共晶的生成。

(5) 表面准备

扩散焊组装之前必须对工件表面进行认真准备，其表面准备包括：加工符合要求的表面粗糙度、平直度、去除表面的氧化物，消除表面的气、水或有机物膜层。

表面的平直度和粗糙度是通过机械加工、磨削、研磨或抛光得到的，经过抛光的表面微观凹凸不平，可达到 50nm。表面氧化物和加工硬化层通常采用化学腐蚀方法，应注意的是化学腐蚀后要用酒精和水清洗。

表面去油一般用乙醇、三氯乙烯、丙酮等清洗剂，可以在多种溶液中反复清洗。这类清洗剂有毒，使用时应注意安全。真空加热可以有效地清除有机物、水和气体吸附层，烘烤温度一般不超过 300℃。

扩散焊接头质量与保护方法、保护气体、母材与中间扩散层的冶金物理性能等因素有关。表面准备之后，必须随即对清洁的表面加以保护，保护措施可以在真空环境中或加氢、氩、氮等保护气氛。但氢能与 Zr、Ti、Nb 和 Ta 形成不利的氢化物，应注意避免。

5.4.4 瞬态液相扩散焊 (TLP)

瞬态液相扩散焊是用一种特殊成分、熔化温度较低的薄层中间层合金作为连接合金，放置在焊接面之间，施加小的压力或不施加压力，并在真空条件下加热到中间层合金熔化，液态的中间层合金润湿母材，在焊接面间形成均匀的液态薄膜，经过一定的保温时间，中间层合金与母材之间发生扩散，合金元素趋向于平衡，熔点升高达到扩散焊加热温度而进一步扩散，形成牢固的连接。由此可见它是与钎焊不同的连接方法。这种方法尤其适用于焊接性较差的铸造高温合金。

瞬态液相扩散焊所用的中间层合金是关系到焊接成败的重要因素。中间层合金的成分应保证瞬态液相扩散焊工艺过程顺利进行，即应有合适的熔化温度（大约为母材熔点 T_m 的

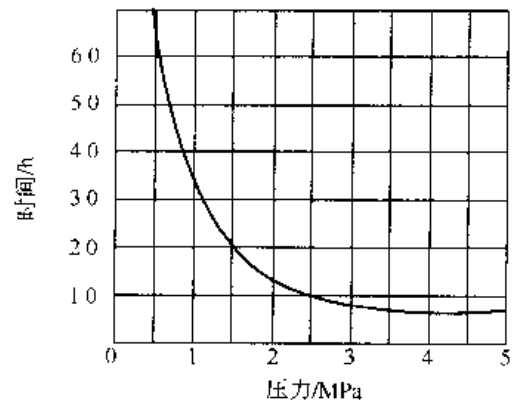


图 5.4 压力与最小连接时间的关系
(926℃时 Ti-6Al-4V 板的低压扩散焊)

0.8~0.9倍), 应能使接头区在连接温度下达到等温凝固; 接头的组织与母材相近, 不产生新的有害相。中间层合金成分还应保证接头性能与母材相近, 达到使用要求。

一般中间层合金以 Ni-Cr-Mo 或 Ni-Cr-Co W (Mo) 为基, 加入适量 B 元素 (或 Si) 而构成。如 DZ22 定向凝固高温合金的中间层合金 Z2P 和 Z2F; DD3 单晶合金的 D1F 均是这样设计和生产的。有时中间层合金中也适当加入或调整固溶强化元素 Co、Mo、W 的比例, 如 Ni₃Al 基高温合金的中间层合金 I6F、I7F、D1F。

中间层合金的品种有粉状和非晶态箔料。非晶态箔料的厚度为 0.02~0.01mm。

瞬态液相扩散焊的工艺参数有压力、温度、保温时间和中间层合金的厚度、真空度等。压力参数仅仅是以焊件结合面能良好接触为目的, 因此可以不加压力或施加较小的压力, 往往是加静压力。温度和保温时间参数对接头质量影响很大, 它取决于母材性能、中间层合金成分和熔化温度。对要求质量高、强度高的接头, 应选择较高的焊接温度和较长的保温时间, 使中间层合金与母材充分扩散, 消除焊缝中硼、硅的共晶组织。中间层合金的厚度以能形成均匀液态薄膜为原则, 一般选用 0.02~0.05mm 为宜。表 5.6 列出几种高温合金瞬态液相扩散焊的工艺参数。

表 5.6 高温合金瞬态液相扩散焊的工艺参数

合金牌号	中间层合金及厚度, mm	焊接温度, °C	焊接压力, MPa	保温时间, h
GH22	Ni 0.01	1158	0.7~3.5	4.0
DZ22	Z2F 0.04×2	1210	无	24
	Z2P 0.1	1210	无	24
DD3	D1F 0.01	1250	无	24

瞬态液相扩散焊的接头组织主要有 Ni-Cr 固溶体、残余奥氏体 γ' 强化相组成, 可能有硅或硼的化合物相, 有时有少量共晶组织。由于组织与母材基本一致, 使接头力学性能较为理想, 高温持久强度也较高 (见表 5.7)。

表 5.7 高温合金瞬态液相扩散焊的接头性能

母材	中间层合金	接头间隙/mm	工艺参数	持久性能			断裂位置
				试验温度, °C	应力, MPa	持久寿命, h	
DZ22	Z2P	0.1	1210°C×36h	980	166	77.4	接头
						51.2	
	Z2F	0.08	1210°C×24h	980	166	129.2	接头
						203.0	
				185	80.3	接头	
				980	166	166.0	接头
DD3	D1F	0.08	1250°C×24h	980	181	198.0	母材
			+870°C			379.5	
			1250°C×36h			203	137.0
+870°C×32h	124.0						

瞬态液相扩散焊主要用于焊接沉淀强化高温合金, 单晶和定向的铸造高温合金以及镍-铝化合物基高温合金, 如单晶和定向凝固的涡轮叶片、涡轮导向叶片等受力高温部件。

5.4.5 扩散焊接头的质量检验

扩散焊接头的主要缺陷为未焊透、裂纹、变形等, 产生的影响因素也较多。扩散焊接头的质量检验方法有:

- a. 采用着色、荧光或磁粉探伤来检验表面缺陷；
- b. 采用真空、压缩空气以及煤油实验等来检查气密性；
- c. 采用超声波、X射线探伤等检查接头的内部缺陷。

由于焊接接头结构、工件材料、技术要求不同，每一种方法的检验灵敏度波动范围较大，要根据具体情况选用。总起来说超声波探伤是较常用的内部缺陷检验方法。

表 5.8 列出常见的扩散焊缺陷及产生的原因

表 5.8 扩散焊接头常见缺陷及产生的原因

缺陷	缺陷产生的原因
出现裂纹	升温 and 冷却速度太快, 压力太大, 加热温度过高, 加热时间太长; 焊接表面加工精度低
未焊透	加热温度不够, 压力不足, 焊接保温时间短, 真空度低; 焊接夹具结构不正确或在焊接真空室里零件安装位置不正确; 工件表面加工精度低
贴合	和未焊透的原因相似
残余变形	加热温度过高, 压力太大, 焊接保温时间过长
局部熔化	加热温度过高, 焊接保温时间过长; 加热装置结构不合理或加热装置与焊件的相应位置不对
错位	焊接夹具结构不合适或在焊接真空室里工件安放位置不对, 焊件错位

5.5 材料扩散焊的应用

由于扩散焊的接头质量好且稳定，几乎适合各种材料的焊接，特别是适合于特种材料、特殊结构的焊接。虽然扩散焊的生产成本稍高一些，但在航空航天、电子和核工业等需要质量更为重要的场合下，得到相当成功的应用。许多零部件的使用环境恶劣，加之产品结构要求特殊，设计者不得不采用特种材料（如为减小质量而采用空心结构），而且要求焊接接头与母材成分、性能上接近。在这种情况下，扩散焊就成为最优先考虑的焊接方法。

5.5.1 同种材料的扩散焊

固相扩散焊几乎可以焊接各类高温合金，如机械化型高温合金、含高 Al、Ti 的铸造高温合金等。高温合金中含有 Cr、Al 等元素，表面氧化膜很稳定，难以去除，焊前必须严格加工和清理，甚至要求表面镀层后才能进行固相扩散焊接。

在大多数情况下，碳钢较易于用熔焊方法焊接，所以通常不采用扩散焊。但要在在大平面形成高质量接头的产品时，则可采用扩散焊。各种高碳钢、高合金钢也能顺利进行扩散焊。同种材料扩散焊的压力在 0.5~50MPa 之间选择。在正常扩散焊温度下，从限制工件变形量考虑，压力可在表 5.9 给出的范围内选取。

表 5.9 同种金属扩散焊常用的压力

材料	碳 钢	不 锈 钢	铝 合 金	钛 合 金
普通扩散压力 / MPa	5~10	7~12	3~7	
热等静压扩散压力 / MPa	100	—	75	50

实际生产中，所有工艺参数的确定均应根据试焊所得接头性能选出一个最佳值（或最佳范围）。表 5.10 列出了一些常用同种金属材料真空扩散焊的工艺参数。

钛是一种强度高、质量小、耐腐蚀、耐高温的高性能材料，目前广泛地被应用在航空、航天工业中。多数钛结构要求减小质量，接头质量比制造成本更重要。因此，较多地应用扩散焊方法。

钛合金不需要特殊的表面准备和特殊的控制就可容易地进行扩散焊接。常用焊接工艺参数为：加热温度 855~957℃，保温时间 1~4h，焊接压力 2~5MPa，真空度 $1.33 \times$

表 5.10 一些常用同种金属材料真空扩散焊的工艺参数

焊接材料	中间层合金	焊接温度 / °C	保温时间 / min	焊接压力 / MPa	真空度 / Pa
20 钢		950	6	16	1.33×10^{-6}
30CrMnSiA		1150~1180	12	10	1.33×10^{-6}
W18Cr4V		1100	5	10	1.33×10^{-6}
12Cr18Ni10Ti		1000	10	20	2.67×10^{-6}
12Cr13		1050	20	15	1.33×10^{-6}
高速钢 P18 ^①	—	1100	5	10	1×10^{-1}
耐热合金 3H602 ^②		1150~1075	6	25~30	1×10^{-2}
不锈钢 2X13 ^②	—	940~960	10	15	1×10^{-1}
可伐合金 H29K18A ^②	—	1000~1100	20	15~20	—
可伐合金	—	1100	25	20	1.33×10^{-5}
铝合金 AMr5 ^②		500	10	10	1×10^{-5}
铝合金 2Al ^②	—	340	180	1	—
钛合金 BT5 1 ^②	—	1000	5	5	1×10^{-2}
钛合金 TC ^②		900~930	60~90	1~2	1.33×10^{-3}
Ti ₂ Al 合金	—	960~980	60	3~10	1.33×10^{-3}
铜 ^①		1000~1010	5	57	1×10^{-2}
Cu		800	20	6.9	还原性气氛
H72 黄铜	—	750	5	8	—
铍 ^②	—	1000	15~20	3	1×10^{-2}
钨 ^②	—	1700	5	10	—
Mo		1050	5	16~40	1×10^{-2}
Nb		1200	180	70~100	1×10^{-3}
Nb	Zr	598	—	—	—
Ta	Zr	598	—	—	—
Zr2	Cu	767	30~120	6.21	—
Nimonic90	Ni	831	20	28	—
AISI410	Ni—Be9%~10%	931	5	0.007	—
钨 ^②	—	2000	20	23	—
铸铁	—	800	20	30	6.6×10^{-2}

① 原苏联牌号的材料。

10^{-2} Pa 以上。应注意，钛能大量吸收 O_2 、 H_2 和 N_2 等气体，因此不宜在 H_2 、 N_2 气氛中焊接。

镍合金主要用于耐高温、耐腐蚀及高强度的条件下，其熔焊的焊接性差，熔化焊时接头强度远低于母材，因此较多地应用扩散焊。由于镍合金的高温强度高，须将这些合金在接近其熔化温度和相当高的压力下进行焊接，必须仔细地进行焊接表面准备，还必须在焊接过程中，严格控制周围气氛，防止表面污染，通常还需要纯镍或镍合金作中间层。

镍合金扩散焊的工艺参数：加热温度 $1093 \sim 1204^\circ\text{C}$ ，保温时间 $0.5 \sim 4\text{h}$ ，焊接压力 $2.5 \sim 10.7\text{MPa}$ ，真空度 $1.33 \times 10^{-2}\text{Pa}$ 以上。实际焊接参数还与零件的几何形状有关，要获得满意的焊接质量需进行多次实验。

铝及其合金的扩散焊有一定的困难，主要是清洗好的工件会在空气中很快生成一层氧化膜。铝与氧的亲合力很大，还原性很强，甚至在常温下铝也容易与空气中的氧化合，生成密度比铝本身高的氧化铝，这使铝的焊接发生困难。

铝与铝直接扩散焊，需要较高的加热温度（不得超过铝的软化温度）、较大的压力和高真空度。还可采用加中间扩散层的方法，中间层的材料可用 Cu、Ni 和 Mg 等，这时压力和加热温度都可降低。

高温合金的热强性高，变形困难，同时又对过热敏感，因此必须严格控制焊接参数，才能获得与母材等强的焊接接头。扩散焊的主要工艺参数是焊接温度、焊接压力和保温时间，以及扩散处理时的温度和时间等。高温合金扩散焊时，需要较高的焊接温度和压力，焊接温度约为 $0.8 \sim 0.85 T_m$ (T_m 合金的熔化温度)。

焊接压力通常为略低于相应温度下合金的屈服应力。其他参数不变时，焊接压力越大，界面变形越大，粗糙度降低，有效接触面积增大，接头性能越好，但焊接压力过高，会使设备结构复杂、造价昂贵。焊接温度较高时，接头性能提高，但过高会引起晶粒长大，塑性降低。几种高温合金真空扩散焊的工艺参数见表 5.11。

表 5.11 高温合金扩散焊的工艺参数

合金牌号	焊接温度/°C	保温时间/min	焊接压力/MPa	真空度/Pa
GH3039	1175	6~10	29.4~19.6	1.33×10^{-2}
GH3014	1000	10	19.6	
GH99	1150~1175	10	39.2~29.4	
K403	1000	10	19.6	

固态扩散焊含铝、钛高的沉淀强化高温合金时，由于结合面上会形成 $Ti(CN)$ 、 $NiTiO_2$ 沉淀物，造成接头性能降低，若加入较薄的 Ni-35%Co 中间层合金，则可以获得组织均匀的接头，同时可以降低工艺参数变化对接头质量的影响。焊接压力和温度对扩散焊接头力学性能的影响如图 5.5 所示。

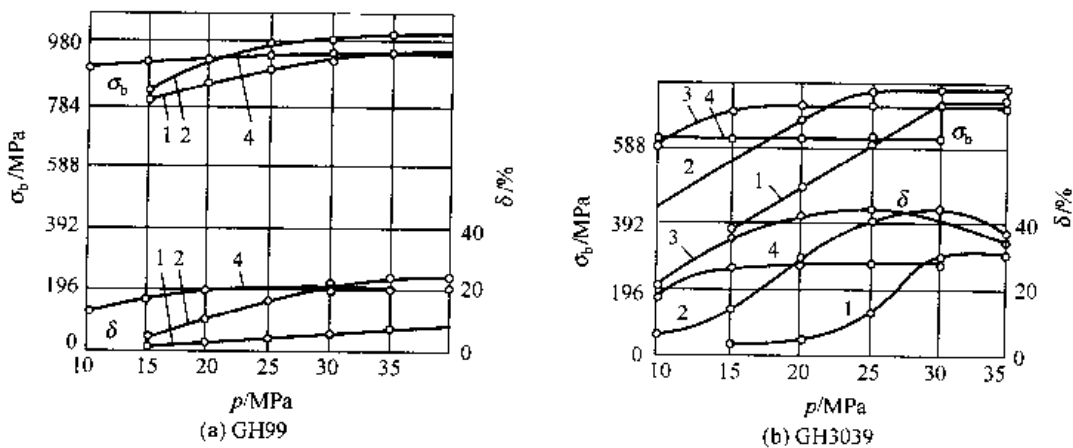


图 5.5 焊接压力和温度对接头力学性能的影响

1—1000°C；2—1150°C；3—1175°C；4—1200°C

同种材料加中间层扩散焊的工艺参数见表 5.12。

5.5.2 异种材料的扩散焊

当两种材料的冶金性能相差很大时，熔焊方法很难进行焊接，这时扩散焊就特别适用，它可以获得满意的接头。在确定某个异种金属组合的扩散焊条件时，应考虑到两种材料之间相互扩散造成的问题。

a. 界面形成中间相或脆性金属间化合物。可通过选择合适的中间层来防止这种问题。

表 5.12 同种材料加中间层扩散焊的工艺参数

被焊材料	中间层	焊接温度 (°C)	保温时间 min	焊接压力 (MPa)	保护气氛 (Pa)
5A06 铝合金	5Au2	500	60	3	50×10^{-3}
Al	Si	580	1	9.8	—
Hb2 黄铜	Ag·Au	400~500	20~30	0.5	—
1Cr18Ni9Ti	Ni	1000	60~90	17.3	1.33×10^{-2}
K18Ni 基高温合金	Ni-Cr-B-Mo	1100	120	—	真空
GH141	Ni-Fe	1178	120	10.3	—
GH22	Ni	1158	240	0.7~3.5	—
GH188 钴基合金	97Ni-3Be	1100	30	10	—
Al ₂ O ₃	Pt	1550	100	0.03	空气
95 陶瓷	Cu	1020	10	14~16	5×10^{-3}
SC	Nb	1123~1790	600	7.26	真空
Mo	Ti	900	15~20	68~86	—
Mo	Ta	915	20	68.6	—
W	Nb	915	20	70	—

b. 由于扩散而产生的金属迁移速度不同，而在紧邻扩散界面处造成接头的多孔性。选择合适的焊接条件或适宜的中间层，可以解决问题。

c. 两种金属的热膨胀系数差异大，在加热和冷却过程中产生较大的应力，而产生工件变形或内应力过大，甚至开裂。解决措施要根据具体零件的技术要求、材料、焊接条件等设计。

各种材料组合采用扩散焊的可能性见表 5.13。

表 5.13 各种材料组合采用扩散焊的可能性

材料	Al	石墨	灰口铸铁	硬质合金	陶瓷	康铜	可伐合金	Cu	Mo	Ni	Nb	Ag	碳钢	高合金钢	Ti	W	锡青铜	Zr
Al	✓✓						✓	✓		✓			✓	✓				
石墨														✓	✓			
灰口铸铁			✓✓										✓					
硬质合金													✓					
陶瓷								✓							✓			
康铜								✓										
可伐合金	✓						✓✓	✓	✓	✓								✓
Cu	✓				✓	✓	✓	✓✓	✓	✓			✓		✓			✓
Mo							✓	✓	✓				✓	✓				
Ni	✓						✓	✓		✓✓					✓	✓		
Nb											✓✓							
Ag												✓✓						
碳钢	✓		✓	✓				✓	✓				✓✓					
高合金钢	✓	✓							✓					✓✓	✓			
Ti		✓			✓			✓		✓				✓				
W										✓						✓✓		
锡青铜							✓											
Zr							✓											✓✓

注：✓为焊接性良好（✓✓为同种金属焊接）；空白为焊接性差或无报道数据。

一些异种材料扩散焊的缺陷、产生的主要原因及防止措施见表 5.14。一些常用材料异种组合的扩散焊工艺参数见表 5.15。

表 5.14 异种材料扩散焊的缺陷、产生的主要原因及防止措施

异种材料	焊接缺陷	缺陷产生的原因	防止措施
青铜+铸铁	青铜一侧产生裂纹, 铸铁侧变形严重	扩散焊时加热温度、压力不合适	选择合适的焊接工艺参数, 焊接室中的真空度要合适
钢+铜	铜母材一侧结合强度差	加热温度不够, 压力不足, 焊接时间短, 接头装配位置不正确	提高加热温度、压力, 延长焊接时间, 接头装配合理
铜-铝	接头严重变形	加热温度过高, 压力过大, 焊接保温时间过长	加热温度、压力及保温时间应合理
金属+玻璃	接头贴合, 强度低	加热温度不够, 压力不足, 焊接保温时间短, 真空度低	提高焊接温度, 增加压力, 延长焊接保温时间, 提高真空度
金属-陶瓷	产生裂纹或剥离	线胀系数相差太大, 升温过快, 冷却太快, 压力过大, 加热时间过长	选择线胀系数相近的两种材料, 升温、冷却应均匀, 压力适当, 加热温度和保温时间适当
金属+半导体材料	错位、尺寸不合要求	夹具结构不正确, 接头安放位置不对, 工件震动	夹具结构合理, 接头安放位置正确, 周围无震动

表 5.15 一些常用材料异种组合的扩散焊工艺参数

焊接材料	中间层合金	焊接温度/℃	保温时间, min	焊接压力, MPa	保护气氛, Pa
Al+Cu		500	10	9.8	6.67×10^{-2}
LF6(Al)-不锈钢	-	550	15	13.7	1.33×10^{-2}
Al-钢	-	460	1.5	1.9	1.33×10^{-2}
Al-Ni	-	450	4	15.4~36.2	-
Al+Zr	-	490	15	15.435	-
Mo+0.5Ti	Ti	915	20	70	-
Mo+Cu	-	900	10	72	-
Ti+Cu	-	860	15	4.9	-
Ti+不锈钢	-	770	10	-	-
Cu+低碳钢	-	850	10	4.9	-
可伐合金-青铜	-	950	10	6.8	1.33×10^{-1}
可伐合金+铜	-	850	10	4.9	-
硬质合金+钢	-	1100	6	9.8	1.33×10^{-2}
不锈钢-铜	-	970	20	13.7	-
TAl(钛)+95瓷	Al	900	20~30	9.8	$< 1.33 \times 10^{-2}$
TC4 钛合金+1Cr18Ni9Ti	V+Cu	900~950	20~30	5~10	1.33×10^{-2}
95 陶瓷+Cu	-	950~970	15~20	7.8~11.8	6.67×10^{-1}
Al ₂ O ₃ 陶瓷+Cu	Al	580	10	19.6	-
Al ₂ O ₃ +ZrO ₂	Pt	1459	240	1	-
Al ₂ O ₃ -不锈钢	Al	550	30	50~100	-
Si ₃ N ₄ +钢	Al-Si	550	30	60	-
Cu+316 不锈钢	Cu	982	2	①	-
Cu-(Nb-1%Zr)	Nb-1%Zr	982	210	①	-
434 钢+Inconel 718	-	943	240	200	-
Ni200+ Inconel 600	-	927	180	6.9	-
PyrometX-15+Ti61 钛合金	Au-Cu	533	240	207	-
(Nb-1%Zr)+316 不锈钢	Nb 1%Zr	982	240	①	-
Zr2+304 不锈钢	-	1021~1038	30	①	-
ZrO ₂ +不锈钢	Pt	1130	240	1	-
QCr0.8+高 Cr-Ni 合金	-	900	10	1	-
QSn10 10+低碳钢	-	720	10	4.9	-

① 焊接压力借助差动热膨胀夹具施加。

(1) 钢与其他金属的扩散焊

1) 钢与铝的扩散焊

钢与铝及铝合金进行真空扩散焊时，在扩散焊界面附近容易形成 Fe-Al 金属间化合物，将会使接头强度下降。为了获得良好的扩散焊接头性能，可采用增加中间过渡层的方法获得牢固的接头。中间过渡层可采用电镀等方法镀上很薄的一层金属，材料一般选用铜和镍。这是因为铜和镍能形成无限固溶体，镍与铁、镍与铝均能形成连续固溶体。这样就能有效地防止界面处出现 Fe-Al 金属间化合物，显著提高接头的性能。中间层的成分可根据合金状态图和界面接触区可能形成的新相进行选择。

低碳钢与防锈铝 LF21 进行真空扩散焊接时，可在低碳钢的表面上先镀一层铜，之后再镀一层镍。铜、镍中间层可用电镀法获得，焊接时采用氩气保护。低碳钢与防锈铝扩散焊的工艺参数为：加热温度 550℃，保温时间 5~20min，焊接压力 13.7 MPa，真空度 1.33×10^{-1} Pa，可获得令人满意的焊接接头性能。

Q235 低碳钢与纯铝 L4 扩散焊时，可在 Q235 低碳钢上镀上铜、镍复合镀层，采用如下工艺可获得良好的接头：加热温度 550℃，焊接压力 12.3MPa，焊接时间 2min，真空度 1.33×10^{-1} Pa。

焊接直径为 25~32mm 的 L2 纯铝与 1Cr18Ni9Ti 不锈钢棒的扩散焊工艺参数为：加热温度 500℃，保温时间 30min，焊接压力 7.4 MPa，真空度为 $1.33 \times 10^{-1} \sim 6.65 \times 10^{-3}$ Pa，焊后接头抗拉强度 $\sigma_b \geq 88.2$ MPa。在接头处形成了宽度 4~6 μ m 的过渡层，其显微硬度为 490~1372MH。

合金元素 Mg、Si 及 Cu 对铝与钢扩散焊接头的强度影响很大。Mg 会增加接头中形成金属间化合物的倾向，对焊接性不利。随着铝合金中 Mg 含量的增加，焊接接头强度明显降低。当铝合金含有 0.5% 的 Cu，Si 含量小于 3% 时，对铝合金与 1Cr18Ni9Ti 钢之间的扩散焊非常有利。由于铝合金中 Si 含量较高，能提高抗蠕变能力。所以扩散焊时必须延长保温时间，才能获得最大的接头强度。

碳钢、不锈钢与铝及铝合金真空扩散焊的工艺参数见表 5.16。

表 5.16 碳钢、不锈钢与铝及铝合金真空扩散焊的工艺参数

异种金属	中间层	工 艺 参 数			
		焊接温度/℃	保温时间/min	焊接压力/MPa	真空度/Pa
LF21+镀镍 Q235 钢	Ni	550	2	13.72	1.33×10^{-2}
L4+Q235 钢	Ni	550	2	12.25	1.33×10^{-2}
L1+Q235 钢	Ni	350	5	2.19	1.33×10^{-2}
L1+Q235 钢	Ni	350	5	2.45	1.33×10^{-2}
L1+Q235 钢	Ni	400	10	4.9	1.33×10^{-2}
L1+Q235 钢	Ni	450	15	9.8	1.33×10^{-2}
L1+Q235 钢	Cu	450	15	19.5	1.33×10^{-2}
L1+Q235 钢	Cu	500	20	29.4	1.33×10^{-2}
L4+1Cr18Ni9Ti	—	500	30	37.95	6.66×10^{-3}
L6+1Cr18Ni9Ti	—	500	30	38.22	6.66×10^{-3}
W18Cr4V+45 钢	Ni	800	20	10	6.65×10^{-2}
12Cr18Ni10Ti+12Cr13	—	1050	20	10	$1.33 \times 10^{-2} \sim 6.65 \times 10^{-3}$

当铝合金中含有 3%Cu 时，可以明显提高接头的强度性能，这时在接头区域没有任何脆性相。1Cr18Ni9Ti 不锈钢与 Al-Cu 系合金扩散焊时，焊接加热温度不应超过 525℃。对

1Cr18Ni9Ti 不锈钢与 LF3 防锈铝扩散焊接头进行金相分析时发现，在扩散过渡区有两种显微硬度明显不同的相，其中比较硬的明亮相（600HB）为金属间化合物，相当于 Fe-Al 平衡状态图的中间部分，即 $FeAl_2$ 或 Fe_2Al_5 。接头抗拉强度约为 70MPa。电子探针分析表明，界面处发生了 Fe、Al、Ni、Cr 及 Mg 元素的扩散。

2) 钢与铝的扩散焊

不锈钢 1Cr18Ni9Ti 和 1Cr13 与铝进行真空扩散焊时，能获得质量稳定的焊接接头。1Cr18Ni9Ti 不锈钢与铝扩散焊的工艺参数为：焊接温度 1000~1200℃，保温时间 5~30min，压力 5~20MPa，真空度 10^{-3} Pa。

1Cr13 不锈钢与铝真空扩散焊的工艺参数为：焊接温度 900~1000℃，保温时间 15~20min，压力 10~15MPa，真空度 10^{-3} ~ 10^{-4} Pa。1Cr13 与铝的真空扩散焊接头强度可达 382.2~450.8MPa。

不锈钢与铝真空扩散焊时，为了提高接头性能，可以采用中间扩散层，中间扩散层材料一般为镍或铜。采用镍或铜作为中间层的接头金属不产生金属间化合物，接头塑性好、强度高。1Cr13、1Cr18Ni9Ti 与 Mo 真空扩散焊的工艺参数见表 5.17。

表 5.17 1Cr13、1Cr18Ni9Ti 与 Mo 真空扩散焊的工艺参数

异种金属	中间层材料	工 艺 参 数			
		焊接温度/℃	保温时间/min	焊接压力/MPa	真空度/Pa
1Cr13+Mo	—	900	5	4.6	1.33×10^{-8}
1Cr13+Mo	—	900	5	4.6	1.33×10^{-8}
1Cr13+Mo	—	950	10	9.8	1.33×10^{-8}
1Cr13+Mo	—	950	10	9.8	1.33×10^{-8}
1Cr13+Mo	Ni	1000	15	11.7	1.33×10^{-8}
1Cr13+Mo	Ni	1050	20	19.6	1.33×10^{-8}
1Cr13+Mo	Ni	1100	25	24.5	1.33×10^{-8}
1Cr13+Mo	Ni	1200	14	4.6	1.33×10^{-8}
1Cr13+Mo	Cu	1200	5	4.6	1.33×10^{-8}
1Cr18Ni9Ti+Mo	—	900	5	4.6	1.33×10^{-8}
1Cr18Ni9Ti+Mo	—	950	5	4.6	1.33×10^{-8}
1Cr18Ni9Ti+Mo	Ni	1000	5	4.6	1.33×10^{-8}
1Cr18Ni9Ti+Mo	Ni	1100	10	7.8	1.33×10^{-8}
1Cr18Ni9Ti+Mo	Ni	1200	10	9.8	1.33×10^{-8}
1Cr18Ni9Ti+Mo	Ni	1200	30	14.7	1.33×10^{-8}
1Cr18Ni9Ti+Mo	Cu	1200	30	19.6	1.33×10^{-8}

3) 钢与钛的扩散焊

采用真空扩散焊方法焊接钢与钛及钛合金时，一般多是采用中间扩散层或复合填充材料。中间扩散层材料一般是 V、Nb、Ta、Mo、Cu 等，复合层材料有 V+Cu、Cu+Ni、V+Cu+Ni 以及 Ta 和青铜等。

纯铁与纯钛 TA7 真空扩散焊的工艺参数见表 5.18。几种不锈钢与纯钛 TA7 真空扩散焊的工艺参数见表 5.19。

表 5.18 纯铁与纯钛 TA7 真空扩散焊的工艺参数

中间扩散层材料	工 艺 参 数				备 注
	焊接温度/℃	保温时间/min	焊接压力/MPa	真空度/Pa	
Mo	800	10	10.39	1.33×10^{-5}	铁铜熔合线开裂
Mo	1000	20	17.25	1.33×10^{-5}	铁铝熔合线开裂
无	700	10	17.25	1.33×10^{-5}	接触面上硬度增高
无	1000	10	10.39	1.33×10^{-5}	纯铁侧硬度增高

表 5.19 几种不锈钢与纯钛 TA7 真空扩散焊的工艺参数

异种金属	中间扩散层材料	工 艺 参 数				备 注
		焊接温度 C	保温时间 min	焊接压力 MPa	真空度 Pa	
Cr25Ni15+TA7		500	10	6.96	1.33×10^{-2}	接头有裂纹
Cr25Ni15+TA7	--	500	20	17.61	1.33×10^{-2}	接头有裂纹
Cr25Ni15+TA7	--	700	10	6.86	1.33×10^{-2}	钢与钛有 α 相
Cr25Ni15+TA7		700	20	17.61	1.33×10^{-2}	
Cr25Ni15-TA7	Ta	900	10	8.82	1.33×10^{-2}	接头强度 $\sigma_b = 292.4\text{MPa}$
Cr25Ni15-TA7	Ta	1100	10	11.77	1.33×10^{-2}	有 $\text{TaFe}_2, \text{NiTa}$
12Cr18Ni10Ti+TA7		900	15	0.98	1.33×10^{-3}	$\sigma_b = 274 \sim 323\text{MPa}$
12Cr18Ni10Ti+TA7	V	900	15	0.98	1.33×10^{-3}	$\sigma_b = 274 \sim 323\text{MPa}$
12Cr18Ni10Ti+TA7	V+Cu	900	15	0.98	1.33×10^{-3}	有金属间化合物
12Cr18Ni10Ti+TA7	V+Cu+Ni	1000	15	4.9	1.33×10^{-3}	有金属间化合物
12Cr18Ni10Ti+TA7	V+Cu+Ni	1000	10	4.9	1.33×10^{-3}	有金属间化合物
12Cr18Ni10Ti+TA7	Cu+Ni	1000	15	4.9	1.33×10^{-3}	有金属间化合物
12Cr18Ni10Ti+TA7	Cu+Ni	1000	10	4.9	1.33×10^{-3}	有金属间化合物

4) 钢与铜的扩散焊

钢与铜及铜合金的扩散焊可以获得高质量的接头。焊接时，由 Cu 溶于 Fe 中的 α 固溶体及 Fe 溶于 Cu 固溶体的混合物（共晶体）结晶而形成接头。焊接温度 750℃，保温时间 20~30min 的扩散焊条件下，通过金相分析可观察到共晶体。因此，钢与铜采用真空扩散焊时要严格控制温度、时间等工艺参数，使界面处形成的共晶体脆性相的厚度不超过 2~3 μm ，否则整个焊接界面将变脆。

钢与铜真空扩散焊的工艺参数为：焊接温度 900℃，保温时间 20min，焊接压力 5MPa，真空度 $1.33 \times 10^{-2} \sim 1.33 \times 10^{-3}\text{Pa}$ 。

为了提高钢与铜及铜合金扩散焊接头的强度，可采用 Ni 作过渡层。Ni 与 Fe、Cu 都能形成无限连续固溶体。根据 Fe-Ni-Cu 平衡状态图，Ni 能大大提高 Fe 在 Cu 中或 Cu 在 Fe 中的溶解度，随后在低于 910℃时在 α 铁中形成有限溶解度的固溶体。当温度超过 910℃时，形成 Cu 在 γ 铁中的连续固溶体。在 750~850℃温度区间内，在 Fe 与 Ni 的接触面上形成共晶体膜，共晶体的组成为：Cu 在铁中和 Ni 与 Fe 在铜中固溶体的混合物。当温度为 900~950℃时，扩散过渡区形成无限连续的固溶体。当焊接温度大于 900℃，焊接时间大于 15min 时，形成与铜等强度的扩散焊接头。

5) 钢与铸铁的扩散焊

钢与铸铁的连接问题经常遇到，但至今用熔焊方法也未获得满意的解决。铸铁与钢、紫铜、黄铜、钛、陶瓷等的连接采用真空扩散焊效果较好。由于焊接温度较低，一般金属组织不会发生很大变化。焊接时还可以通过调整工艺参数来改善接头区域的显微组织和力学性能。钢与铸铁真空扩散焊的工艺参数见表 5.20。

表 5.20 钢与铸铁真空扩散焊的工艺参数

被焊材料	焊接温度 C	焊接时间 min	焊接压力 MPa	真空度 Pa
HT15-32 + 45 钢	850	5~10	1.5	$1.33 \times 10^{-2} \sim 1.33 \times 10^{-3}$
HT21-40 - 50 钢	900	6~10	1.5	$1.33 \times 10^{-2} \sim 1.33 \times 10^{-3}$
HT15-32 + 1Cr18Ni9Ti	900	10	1.5	1.33×10^{-2}
KT30-6 - 1Cr18Ni9Ti	900	7~10	3.0	1.33×10^{-2}

(2) 铜与铝的扩散焊

铜和铝扩散焊时，影响接头质量和焊接过程稳定性的主要因素有加热温度、压力、焊接时间、真空度和焊前焊件的表面状态等。扩散焊前焊件表面必须进行精细加工、磨平和清洗去油，使其表面尽可能光洁和无任何杂质。焊前须先去除铝材表面的氧化膜，真空度达到 5×10^{-2} Pa。

受铝熔点的限制，加热温度不能太高，否则母材晶粒长大，使接头强韧性降低。在 540°C 以下 Cu/Al 扩散焊接头强度随加热温度的提高而增加，继续提高温度则使接头强韧性降低，因为在 565°C 时形成 Al 与 Cu 的共晶体。

受铝的热物理性能的影响，压力不能太大。Cu/Al 扩散焊压力为 11.5MPa 可避免界面扩散空洞的产生。在温度和压力不变的情况下，延长保温时间到 25~30min 时，接头强度有显著的提高。

保温时间太短，铜、铝原子来不及进行充分扩散，无法形成牢固结合的扩散焊接头。但时间过长使 Cu/Al 界面过渡层区晶粒长大，金属间化合物增厚，致使接头强韧性下降。在 $510\sim 530^\circ\text{C}$ 的焊接温度下，扩散时间为 60min 时，接头界面结合较好。Cu/Al 真空扩散焊工艺参数为：加热温度 $510\sim 530^\circ\text{C}$ ，压力 11.5MPa，保温时间 60min。

用电子探针 (EPMA) 对 Cu/Al 扩散焊接头区的主要元素进行成分分析，结果表明，Al 和 Cu 在加热温度 $510\sim 530^\circ\text{C}$ 的扩散焊温度范围内互扩散运动较为顺利，扩散过渡区宽度约为 $40\mu\text{m}$ ，其中铜侧扩散区较厚 (约为 $28.8\mu\text{m}$)，铝侧扩散区约 $11.8\mu\text{m}$ 。这是因为 Al 原子活动性比 Cu 强，Al 向铜侧扩散进行较充分。

铜与铝扩散焊接头的显微硬度测定的结果见图 5.6。由图可见，铜侧过渡区中可能产生了金属间化合物。在高温下 Al 和 Cu 形成多种脆性的金属间化合物，在温度为 150°C 时，在反应扩散的起始就形成 CuAl_2 ；在 350°C 时出现化合物 Cu_9Al_4 的附加层；在 400°C 时，在 CuAl_2 与 Cu_9Al_4 之间出现 CuAl 层。当金属间化合物层的厚度达到 $3\sim 5\mu\text{m}$ 时，扩散接头的抗拉强度明显降低。

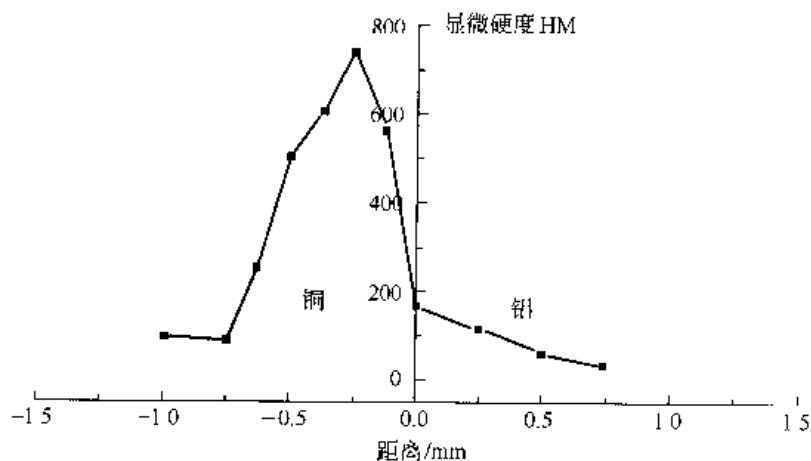


图 5.6 铜与铝扩散焊接头的显微硬度

熔化焊时，在 Cu/Al 接头的靠铜一侧易形成一层厚度约 $3\sim 10\mu\text{m}$ 的金属间化合物 (CuAl)，存在这样一个区域会使接头强韧性降低。只有在金属间化合物层的厚度小于 $1\mu\text{m}$ 的情况下，才不会影响接头的强韧性。但是，Cu 与 Al 扩散焊时，由于 Cu 与 Al 的相互扩散，在界面处形成不太厚的扩散层。扩散层具有细化的晶粒组织并夹带有金属间化合物层，

因此显微硬度明显增高，但只要控制脆性区宽度不超过某一限度，接头过渡区强韧性的降低是可以避免的，仍然可以满足扩散焊接头的使用要求。

铜和铝真空扩散焊的工艺参数应根据实际情况确定。对于电真空器件的零件，其工艺参数为：加热温度 500~520℃，压力 6.8~9.8MPa，焊接时间 10~15min，真空度 6.66×10^{-5} Pa。当焊接压力为 9.8MPa 时，扩散焊接头的合格率可达到 100%。

(3) 铜与钛、镍、钼的扩散焊

铜与钛的扩散焊接有直接扩散焊接和加入中间过渡层的扩散焊接，前者接头强度低，后者接头强度高，并有一定塑性。钛与铜之间不加中间金属直接扩散焊时，为了避免和减少金属间化合物的生成，焊接过程应在短时间内完成。TA2 纯钛与铜的直接扩散焊的工艺参数为：焊接温度 850℃，焊接时间 10min，压力 4.9MPa，真空度 1.33×10^{-5} Pa。此温度虽低于产生共晶体的温度，但这种接头的强度并不高，低于铜的强度。

表面清洁度对真空扩散焊的质量影响较大。焊前对铜件用三氯乙烯进行清洗，清除油脂，然后在 10% 的 H_2SO_4 溶液中浸蚀 1min，再用蒸馏水洗涤。随后进行退火处理，退火温度为 820~830℃，时间为 10min。钛母材用三氯乙烯清洗后，在 2% HF + 50% HNO_3 的水溶液中，用超声波振动浸蚀 4min，以便清除氧化膜，然后再用水和酒精清洗干净。

在铜 (T2) 与钛 (TC2) 之间加入过渡金属层钼和铌，阻止被焊金属间的作用，使被焊金属间既不产生低熔点共晶，也不产生脆性的金属间化合物，焊接接头的性能会得到很大提高。对铜和钛以焊接温度 $810^\circ C \pm 10^\circ C$ ，焊接时间 10min，真空度 $1.33 \times 10^{-1} \sim 5 \times 1.33 \times 10^{-6}$ Pa，压力为 3.4~4.9MPa，进行过渡层扩散焊，接头力学性能见表 5.21。

采用真空扩散焊方法焊接铜与镍的零件，是真空器件制造中应用较为广泛的一种焊接工艺。铜与镍及镍合金的真空扩散焊工艺参数见表 5.22。

表 5.21 TC2 与 T2 扩散焊工艺参数及接头力学性能

中间材料	工 艺 参 数			抗拉强度 /MPa	加热方式
	加热温度 /℃	保温时间 /min	压力 /MPa		
不加中间层	800	30	4.9	62.72	高频感应加热
	800	300	3.43	144.1~156.8	电炉加热
钼(喷涂)	950	30	4.9	78.4~112.7	高频感应加热
	980	300	3.43	186.2~215.6	电炉加热
铌(喷涂)	950	30	4.9	70.6~102.9	高频感应加热
	980	300	3.43	186.2~215.6	电炉加热
铌(0.1mm 箔片)	950	30	4.9	94.2	高频感应加热
	980	300	3.43	215.6~266.6	电炉加热

表 5.22 铜与镍及镍合金的真空扩散焊工艺参数

异种金属	接头形式	工 艺 参 数			
		加热温度 /℃	保温时间 /min	压力 /MPa	真空度 /Pa
铜+镍	对接	400	20	9.80	1.33×10^{-4}
铜+镍	对接	900	20~30	12.7~14.7	6.67×10^{-5}
铜+镍合金	对接	900	20	11.76	1.33×10^{-6}
铜+镍合金	对接	900	15	11.76	1.33×10^{-6}
铜+可伐合金	对接	950	10	1.90	1.33×10^{-1}
铜+可伐合金	对接	950	10	6.86	6.67×10^{-3}

铜与钼之间不能互溶，铜-钼难以进行熔化焊。铜与钼的线胀系数相差悬殊，在焊接加

热和冷却过程中会产生较大的热应力，焊接时容易产生裂纹。如果加入中间层金属镍，便可缓解热应力，同时镍与铜互溶，可获得质量良好的扩散焊接头。

以镍为中间层的铜与铝真空扩散焊的工艺参数见表 5.23。

表 5.23 以镍为中间层的铜与铝真空扩散焊的工艺参数

加热温度/℃	保温时间/min	压力/MPa	真空度/Pa	加热温度/℃	保温时间/min	压力/MPa	真空度/Pa
800	10	11.7	1.33×10^{-4}	900	15	19.6	1.33×10^{-4}
850	15	19.6	1.33×10^{-5}	950	10	22.7	1.33×10^{-5}

铜与铝扩散焊还可以采用镀层的方法。在铝表面镀上一层厚度为 $7 \sim 14 \mu\text{m}$ 的镍层，然后再进行正常的真空扩散焊，能获得强度较高的扩散焊接头。

(4) 钛与铝的扩散焊

为了消除 Ti 和 Al 表面的油脂和氧化膜，焊前先用 HF 去除氧化膜，用丙酮进行清洗，保持钛铝表面的紧密接触。钛与铝直接进行扩散焊，接头塑性和强度很低。可采用三种工艺进行 Ti-Al 扩散焊：

- a. Ti-Al 直接扩散焊（非常困难）；
- b. 先在 Ti 表面渗铝，然后与 Al 扩散焊；
- c. Ti 和 Al 之间夹厚度为 0.4mm 的铝箔中间层。

钛与铝的扩散焊工艺参数为：加热温度 $600 \sim 620^\circ\text{C}$ ，保温时间 60min，压力 $7 \sim 12 \text{ MPa}$ ，真空度 $5 \times 10^{-1} \text{ Pa}$ 。TA7 纯钛与 LF3 防锈铝扩散焊的工艺参数和接头抗拉强度见表 5.24。

表 5.24 TA7 钛与 LF3 防锈铝扩散焊的工艺参数及接头性能

镀铝工艺参数		中间层		工艺参数		抗拉强度/MPa	破断部位
温度/℃	时间/s	厚度/mm	材料	温度/℃	时间/s		
780~820	35~70	—	—	520~540	30	202~224(214)	镀层上, LF3 上
—	—	0.4	L4	520~550	60	182~191(185)	L4 中间层上
—	—	0.2	L4	520~550	60	216~233(225)	L4 中间层上, LF3 上

注：括号中的数据为平均值。

钛表面渗铝后的 Ti/Al 扩散焊界面随着 Ti、Al 原子的相互渗入，钛表面渗铝层的相结构发生了变化，生成了 Ti/Al 固溶体和 Ti-Al 金属间化合物。渗铝层中虽然还有形如链粒状的共晶组织，但由于 Ti 原子的渗入，相结构与 Al 基体或 Ti 基体不同。

钛侧过渡区、渗铝结合界面和 Al 侧过渡区共同组成了 Ti/Al 扩散焊接头的扩散过渡区。扩散过渡区中从钛侧到铝侧 Ti 含量的浓度逐渐降低，形成的产物也不同。扩散过渡区中 Al 含量为 36% 时，形成 γ 相的 TiAl 型金属间化合物；Al 含量为 60%~64% 时，生成 TiAl_3 型金属间化合物。

钛侧过渡区是白亮的 TiAl_3 、TiAl 金属间化合物和 Ti 溶入铝中形成的 $\alpha\text{-Al(Ti)}$ 固溶体，是在渗铝和扩散焊时 Ti、Al 原子相互扩散的结果。 $\alpha\text{-Al(Ti)}$ 固溶体是呈等轴状分布的 α 相， TiAl_3 和 TiAl 是脆硬的金属间化合物，它们的出现使扩散过渡区的显微硬度提高。

钛与铝镁合金直接进行扩散焊时，接头的强度和塑性都很低，必须用工业纯铝作中间层。有两种方法：一是采用厚度不同的 L4 铝箔；二是把钛表面浸入铝液熔池中镀铝或渗铝。表 5.25 给出了钛 (TA7) 与铝 (LF3) 真空扩散焊的工艺参数及接头性能。

表 5.25 钛 (TA7) 与铝 (LF3) 真空扩散焊的工艺参数及接头性能

镀铝工艺参数		中间层		工艺参数		抗拉强度 MPa	破断部位
温度 /°C	时间 /s	厚度 /mm	材料	温度 /°C	时间 /s		
780~820	35~70	-	-	520~510	30	202~221	镀层上、LF3 上
		0.1	L1	520~550	60	182~191	L1 中间层上
		0.2	L1	520~550	60	216~233	L1 中间层上、LF3 上

5.5.3 金属间化合物的扩散焊

金属间化合物这类材料较脆，熔焊时易产生裂纹，可采用扩散焊。如 Ti_3Al 、 Fe_3Al 合金可用真空扩散焊方法焊接，可获得满意的接头性能。而 Ni_3Al 合金可用液相扩散焊方法焊接。

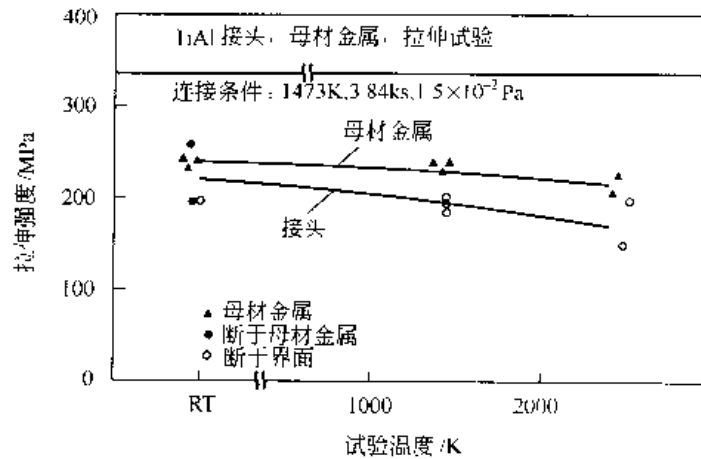


图 5.7 不同温度下 TiAl 接头和母材的抗拉强度
(连接条件: 1473K, 3.84ks, 1.5×10^{-2} Pa 和 2.6×10^{-2} Pa 真空度)

用扩散焊连接 Ti-Al48-Cr2-Nb2 合金也获得成功。在 1473K、3.81ks、 1.5×10^{-2} Pa 和

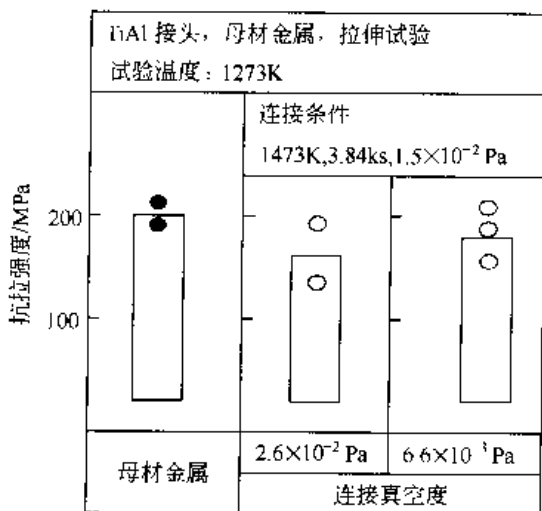


图 5.8 真空度对 TiAl 接头抗拉强度的影响

26×10^{-2} Pa 真空条件下，用扩散焊连接 Ti-Al38 合金可以获得无缺陷的接头。扩散接头的室温抗拉强度约为 225MPa，断于母材。但在 1073K 和 1273K 温度下拉伸接头断于连接界面，接头抗拉强度比母材低约 40MPa（见图 5.7）。分析原因认为界面处元素的扩散迁移较少，形成平坦的断裂表面。为了促进界面扩散，达到改善 1273K 时的接头抗拉强度，可对扩散接头进行再结晶热处理。经过再结晶热处理后，1273K 时的接头抗拉强度增加到 210MPa，断裂在母材区。

1273K 时真空度对 TiAl 接头抗拉强度的影响见图 5.8。显见，提高真空度有利于改善扩散焊接头的高温强度。

用 Al 箔作为填充金属可以用扩散焊成功地连接 TiAl 合金。试验母材为具有 $(\gamma + \alpha_2)$ 层片状组织的 Ti-Al34 铸造合金，连接温度为 1173K。在此温度下 Al 填充材料熔化后与母材反应形成 $TiAl_3$ 和 $TiAl_2$ ，接着在 1573K 进行均匀化处理，使填充金属转变为单相 γ 。所

得接头具有几乎与母材相同的室温和 873K 时的抗拉强度 (220MPa)。

采用扩散焊连接 Fe_3Al 合金时, 由于 Fe、Al 在扩散焊接加热过程中会产生一系列物理的、化学的、力学的和冶金方面的变化, 而这些变化都要直接或间接地影响到扩散焊接过程及接头质量, 因而温度是这一工艺的关键因素。当温度越高时, 金属原子扩散所需要的能量越高, 从而界面间原子相互扩散越充分, 接头结合强度越高。但是由于 Fe、Al 冶金物理特性方面的限制, 加热温度太高, 母材晶粒长大、中间金属间化合物不断加厚使接头强度降低。

压力越大、温度越高, 界面处紧密接触的面积也越大; 压力小, 容易产生界面孔洞, 阻碍晶粒生长和原子穿越界面的扩散迁移。由于铁、铝原子具有不同的扩散速度, 造成了通过界面向其两侧扩散迁移的原子数量不等, 产生 Kirkendall 效应即扩散空洞。同时受两种材料物理性能的影响压力不能太大。

保温时间决定着 Fe_3Al 合金中 Al、Fe 原子扩散的均匀化程度, 保温时间越长, 原子可以进行均匀充分扩散, 而使接头强度增加, 时间太短, 原子来不及进行充分扩散, 无法形成高强度的接头。但是, 保温时间过长会使过渡区晶粒长大, 金属间化合物增厚, 致使接头强度下降。

Fe_3Al 合金与异种金属焊接应用最为广泛的焊接方法也是通过扩散焊实现的。试验表明, 采用真空扩散焊工艺, 经过图 5.9 所示的焊接工艺参数可以获得良好的 Fe_3Al 合金与 Q235 低碳钢的扩散焊接头, 以发挥各自的性能优势。

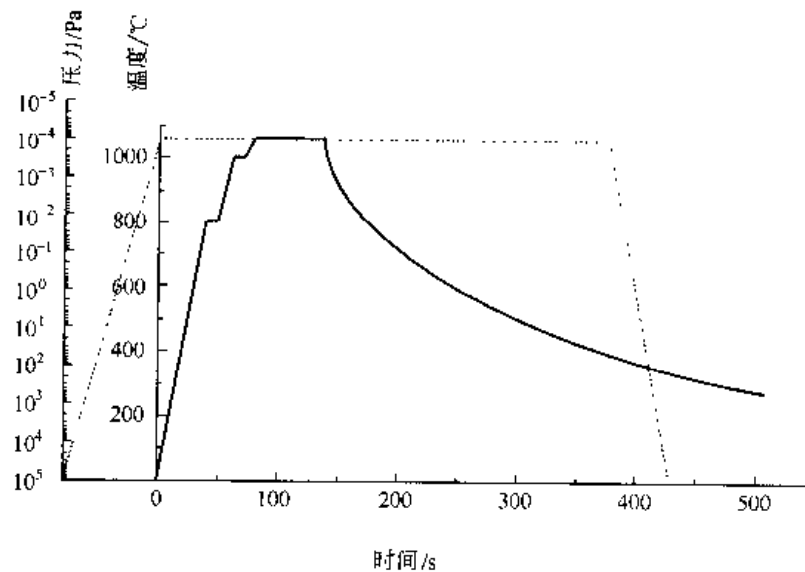


图 5.9 Fe_3Al 与 Q235 真空扩散焊的工艺参数

整个接头主要包括基体部分、扩散过渡区和过渡区近基体处三部分。 Fe_3Al 一侧的显微组织越过扩散过渡区向 Q235 一侧连续地延展, 扩散过渡界面呈镶嵌状互相交错。在过渡区靠 Fe_3Al 一侧, 柱状晶粒较粗大, 显微组织大多为等轴晶。在 Q235 钢一侧, 由于 Al 元素的扩散过渡, 使过渡区靠 Q235 一侧的铁素体晶粒也较粗大, 并且由于 Al 为铁素体化元素, 过渡区附近几乎全部为铁素体。

扫描电镜 (SEM) 观察表明, 在靠近 Fe_3Al 侧的过渡区中有第二相析出, 析出物的分布形态各异, 大多沿晶界呈不连续状分布。根据 Al 含量的不同, 可以形成一系列的 Fe-Al 金属间化合物。Al 含量 13.9%~20% 时形成超点阵结构的 Fe_3Al , Al 含量 20%~36% 时形成 FeAl 。Fe-Al 系合金可能形成的金属间化合物的显微硬度见表 5.26。

表 5.26 Fe-Al 系金属间化合物的显微硬度和铝含量

化合物	铝含量/%		显微硬度 HM	化合物	铝含量/%		显微硬度 HM
	相图中数据	化学分析数据			相图中数据	化学分析数据	
Fe ₃ Al	13.87	14.04	350	Fe ₂ Al ₅	54.71	54.92	820
FeAl	32.57	33.64	640	FeAl ₇	59.18	59.40	990
FeAl ₂	49.13	49.32	1030	Fe ₂ Al ₇	62.93	63.32	1080

Fe₃Al 基体、过渡区及 Q235 基体扩散焊接头不同区域显微硬度测定结果 (见图 5.10) 表明, 过渡区界面靠 Q235 钢一侧的显微硬度较低 (300~380HM), 而界面靠 Fe₃Al 一侧扩散过渡区的显微硬度明显增高 (470~530HM), 但与 Fe₃Al 基体显微硬度 (≥500HM) 相比仍偏低。显见, Fe₃Al/Q235 界面过渡区中未出现明显的高硬度脆性相 (如 FeAl₂、Fe₂Al₇、FeAl₃、Fe₂Al₇ 等), 并且通过对过渡区进行电子探针分析也得到了证实 (见表 5.27)。这种显微硬度特性决定了 Fe₃Al/Q235 扩散接头具有良好的室温拉伸性能, 可以有效提高结合界面的韧性, 防止焊接裂纹的产生, 改善 Fe₃Al/Q235 的焊接性。

表 5.27 Fe₃Al/Q235 扩散过渡区电子探针成分分析/%

位置	编号	Fe	Al	C	Cr	Mn	Si	位置	编号	Fe	Al	C	Cr	Mn	Si
Fe ₃ Al 基体	1	82.6	16.6	0.14	1.02	0.15	0.18	第二相析出物	5	74.66	14.31	0.65	1.18	0.21	0.07
	2	82.7	16.3	0.13	0.99	0.15	0.22		6	77.90	15.90	0.61	1.18	0.23	0.10
	3	81.9	17.2	0.13	1.01	0.13	0.20		7	77.04	15.45	0.50	1.32	0.23	0.10
	4	82.0	16.9	0.13	0.94	0.18	0.20		8	78.77	13.10	0.22	1.26	0.20	0.06

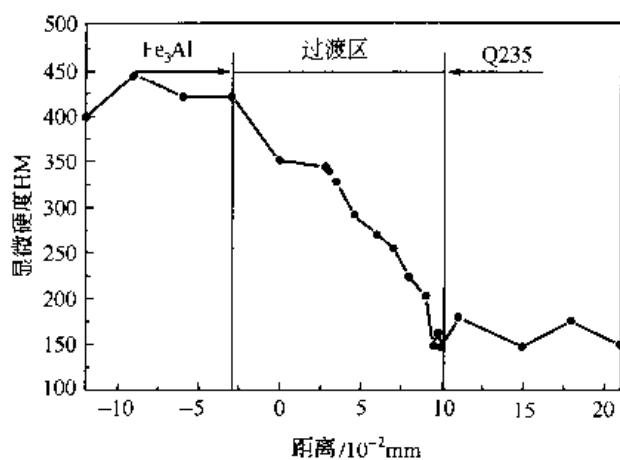


图 5.10 Fe₃Al/Q235 异种材料扩散结合界面附近的显微硬度

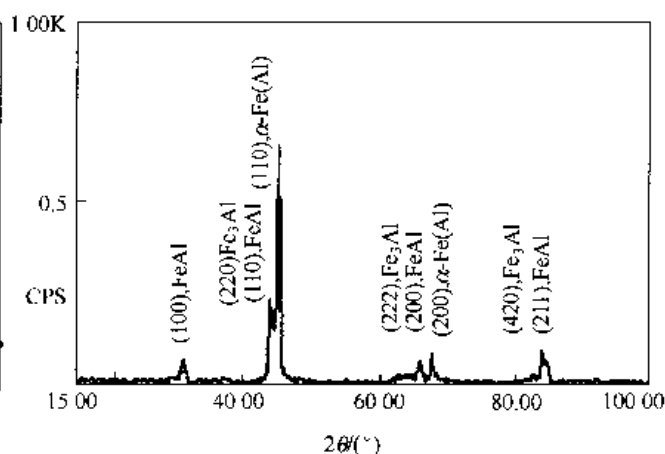


图 5.11 Fe₃Al/Q235 扩散界面靠 Fe₃Al 侧的 X 射线衍射

将 X 射线衍射仪分析 Fe₃Al/Q235 扩散过渡区的相组成结果 (见图 5.11 和图 5.12) 与粉末衍射标准联合委员会 (JCPDS) 公布的标准粉末衍射卡进行对比 (见表 5.28) 得知, Fe₃Al/Q235 扩散过渡区主要由 Fe₃Al 相和 α-Fe(Al) 固熔体构成, 存在少量的 FeAl 相, 但不存在含铝更高的 FeAl 脆性相, 这种相组成对提高 Fe₃Al/Q235 扩散界面的韧性和抗裂纹能力是有利的。

Fe₃Al 合金与 Q235 钢的扩散焊接中主要存在着铝原子和铁原子的过渡扩散。Fe₃Al/Q235 扩散焊接头中 Fe、Al 原子浓度分布图 (见图 5.13) 表明, 从 Fe₃Al 基体经过 Fe₃Al/Q235 扩散界面然后过渡到 Q235 碳钢, 铝元素原子含量从 27% 下降到 1%, 而铁元素原子含量从 13% 增加到 96%。

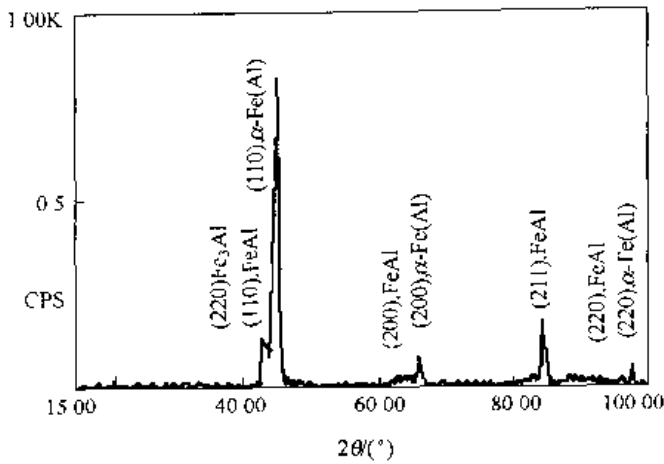


图 5.12 Fe₃Al/Q235 扩散界面靠 Q235 侧的 X 射线衍射

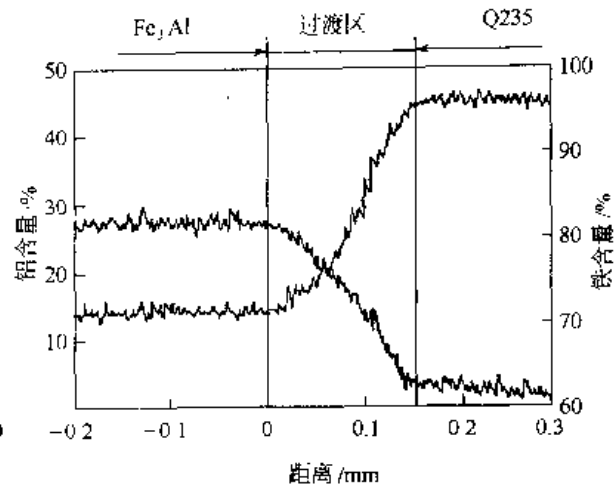


图 5.13 Fe₃Al/Q235 扩散接头中 Fe、Al 元素过渡曲线

表 5.28 Fe₃Al/Q235 扩散过渡区 X 射线衍射分析结果

实测数据	粉末衍射卡中的数据								
	Fe ₃ Al			α-Fe(Al)			FeAl		
d/nm	d/nm	hkl	I/I ₀	d/nm	hkl	I/I ₀	d/nm	hkl	I/I ₀
0.2881	—	—	—	—	—	—	0.2890	100	12
0.2063	0.2040	220	100	—	—	—	0.2040	110	100
0.2024	—	—	—	0.2027	110	100	—	—	—
0.1567	0.1670	222	10	—	—	—	—	—	—
0.1454	—	—	—	—	—	—	0.1450	200	8
0.1433	—	—	—	0.1433	200	20	—	—	—
0.1331	0.1330	331	10	—	—	—	—	—	—
0.1271	0.1290	420	10	—	—	—	—	—	—
0.1169	—	—	—	—	—	—	0.1180	211	20
0.1013	—	—	—	0.1013	220	10	0.1030	220	2

沿[110]取向拍摄的 Fe₃Al/Q235 过渡区靠 Fe₃Al 侧物相的 TEM 形貌、选区电子衍射图及指数标定结果表明，在扩散过渡区近 Fe₃Al 一侧存在的 Fe₃Al 和 FeAl 物相之间的位向关系是 (110)_{Fe₃Al}//(011)_{FeAl}。靠近 Q235 钢一侧的扩散过渡区中存在的体心立方结构的 α-Fe(Al) 固熔体，晶格常数为 0.287nm；在 α-Fe(Al) 板条之间分布有 [010] 晶向的渗碳体 (Fe₃C)。在 FeAl 相和 α-Fe(Al) 固熔体之间分别存在着 (110)_{α-Fe(Al)}//(011)_{FeAl} 和 [001]_{α-Fe(Al)}//[100]_{FeAl} 的晶体学取向关系。这些相是由亚晶粒结构组成，没有发现空洞、裂纹等微观缺陷。这表明 Fe₃Al/Q235 异种材料扩散过渡区的结合比较紧密，有利于提高 Fe₃Al/Q235 扩散焊过渡区的韧性和抗裂性能。

铝含量大于 40% 的 FeAl 合金室温下由于有序合金交滑移困难导致的内部应力集中以及杂质在晶界的偏聚，使得晶界弱化，晶内键结合性差，造成较低的解理强度。与 Fe₃Al 合金相比，FeAl 合金表现为沿晶断裂和穿晶解理断裂，表现出很差的室温塑韧性，在焊接性方面也远不如 Fe₃Al 合金。

5.6 陶瓷与金属的扩散焊接

陶瓷与金属可以采用扩散焊的方法实现连接，其中以陶瓷与铜的扩散焊接研究得比较多，应用也比较广泛。陶瓷材料扩散焊的方法有：同种陶瓷材料直接连接；用一薄层另一种

材料连接同种陶瓷材料；异种陶瓷材料直接连接；用一薄层第三种材料连接异种陶瓷材料。

陶瓷材料扩散焊的主要优点是连接强度高，尺寸容易控制，适合于连接异种材料；主要不足是扩散温度高、时间长且在真空中连接，设备昂贵，成本高，试件尺寸和形状受到限制。

5.6.1 主要工艺参数

陶瓷与金属的扩散焊既可在真空中，也可在氢气氛中进行。通常金属表面有氧化膜时更易产生相互间的化学作用。因此在焊接真空室中充以还原性的活性介质（使金属表面仍保持一层薄的氧化膜）会使扩散焊接头具有更高的强度。

氧化铝陶瓷与无氧铜之间的扩散焊接温度只要达到 900℃ 就可得到合格的接头强度。更高的强度指标要在 1030~1050℃ 焊接温度下才能获得，因为此时铜具有很大的塑性，易在压力下产生变形，使实际接触面增大。影响扩散焊接头强度的主要因素是加热温度、保温时间、施加的压力、环境介质、被连接面的表面状态以及被连接材料之间的化学反应和物理性能（如线胀系数）的匹配。

(1) 加热温度

加热温度对扩散过程的影响最显著，连接金属与陶瓷时温度一般达到金属熔点的 90% 以上。固相扩散焊时，元素之间相互扩散引起的化学反应，可以形成足够的界面结合。反应层的厚度（ X ）可以通过下式估算，即

$$X = K_0 t^n \exp(-Q/RT) \quad (5.3)$$

式中 K_0 常数；

t ——连接时间；

n ——时间指数；

Q ——扩散激活能，取决于扩散机制；

T 热力学温度；

R ——气体常数。

加热温度对接头强度的影响也有同样的趋势，根据拉伸试验得到的温度对接头抗拉强度（ σ_b ）的影响可以用下式表示，即

$$\sigma_b = B_0 \exp(-Q_{app}/RT) \quad (5.4)$$

式中 B_0 ——常数；

Q_{app} ——表观激活能，可以是各种激活能的总和。

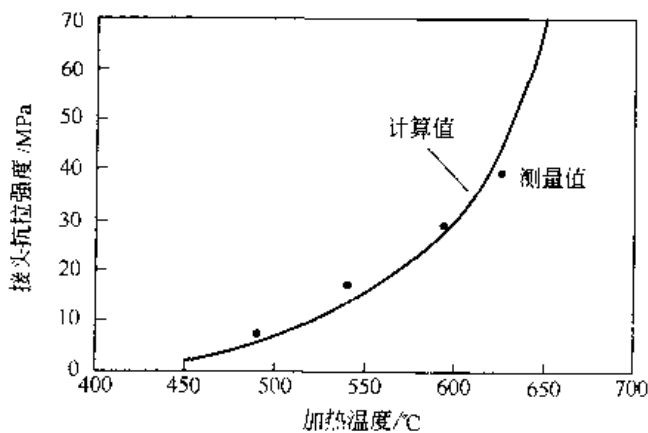


图 5.14 接头抗拉强度与加热温度之间的关系

加热温度提高使接头强度提高，用 0.5mm 厚度的铝作中间层连接钢与氧化铝时，接头抗拉强度与加热温度之间的关系如图 5.14 所示。但是，温度提高可能使陶瓷的性能发生变化，或出现脆性相而使接头性能降低。

陶瓷与金属接头的抗拉强度与金属的熔点有关，在氧化铝与金属的接头中，金属熔点提高，接头抗拉强度增大。

(2) 保温时间

SiC-Nb 接头中反应层厚度与保温时间的关系如图 5.15 所示。

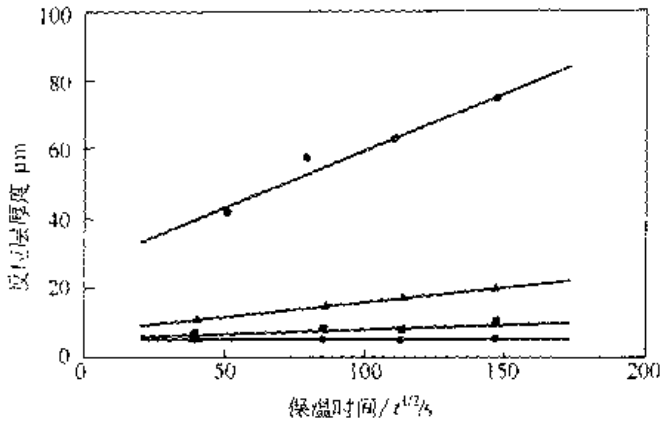


图 5.15 SiC-Nb 接头中反应层厚度与保温时间的关系

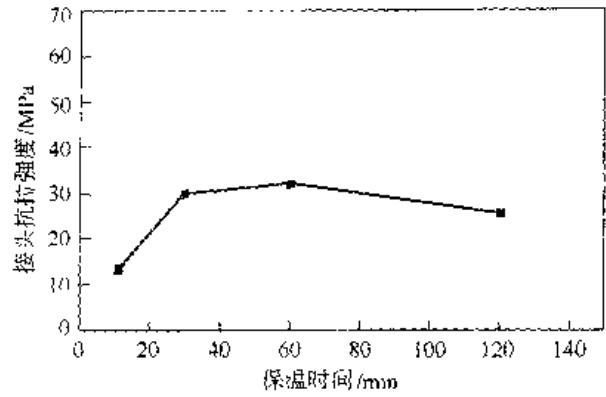


图 5.16 保温时间对接头抗拉强度的影响

保温时间对扩散焊接头强度的影响也有同样的趋势。抗拉强度 (σ_b) 与保温时间 (t) 的关系为 $\sigma_b = B_0 t^{1/2}$, 其中 B_0 为常数。但是, 在一定试验温度下, 保温时间存在一个最佳值。Al₂O₃-Al 接头中, 保温时间对接头抗拉强度的影响如图 5.16 所示。用 Nb 作中间层扩散连接 SiC-SUS304 时, 时间过长后出现了强度降低、线胀系数与 SiC 相差很大的 NbSi₂ 相, 而使接头抗剪强度降低 (见图 5.17)。用 V 作中间层连接 AlN 时, 保温时间过长后也由于 V₃Al₅ 脆性相的出现而使接头抗剪强度降低。

(3) 压力

扩散焊过程中施加压力是为了使接触面处产生塑性变形, 减小表面不平整和破坏表面氧化膜, 增加表面接触, 为原子扩散提供条件。为了防止构件发生大的变形, 扩散焊时所加的压力一般较小, 约为 0~100MPa, 这一压力范围通常是足以减小表面不平整和破坏表面氧化膜, 增加表面接触。

压力较小时, 增大压力可以使接头强度提高, 如用 Cu 或 Ag 连接 Al₂O₃ 陶瓷、用 Al 连接 SiC 时, 施加的压力对接头抗剪强度的影响如图 5.18 所示。与加热温度和时间的影响一样, 压力再提高后也存在最佳压力以获得最佳强度, 如用 Al 连接 Si₃N₄ 陶瓷、用 Ni 连接 Al₂O₃ 陶瓷时, 最佳压力分别为 4MPa 和 15~20MPa。

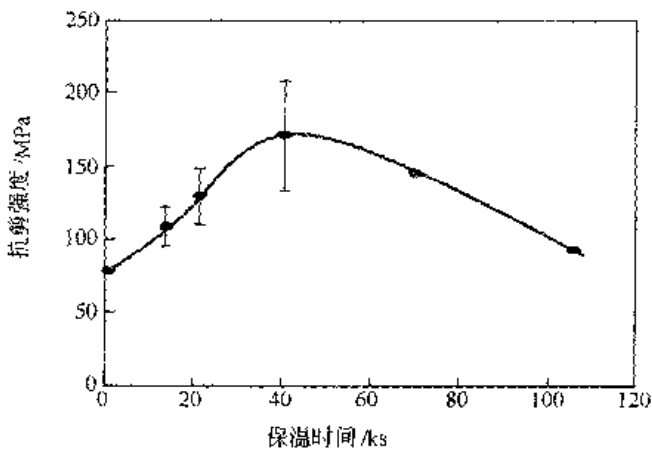


图 5.17 保温时间对 SiC/Nb/SiC 接头抗剪强度的影响

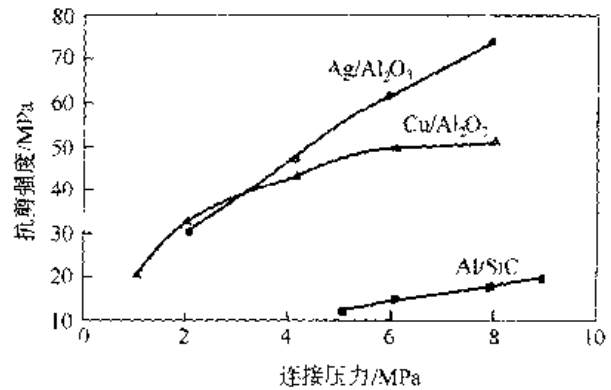


图 5.18 压力对接头抗剪强度的影响

压力的影响还与材料的类型、厚度以及表面氧化状态有关。用贵金属 (如金、铂) 连接

氧化铝陶瓷时，金属表面的氧化膜非常薄，随着压力的提高，接头强度提高直到一个稳定值。 Al_2O_3 -Pt 扩散连接时压力对接头抗弯强度的影响如图 5.19 所示。

5.6.2 界面结合状态

表面粗糙度对扩散焊接头强度的影响十分显著，表面粗糙会在陶瓷中产生局部应力集中而容易引起脆性破坏。 Si_3N_4 -Al 接头表面粗糙度对接头抗弯强度的影响如图 5.20 所示，表面粗糙度由 $0.1\mu\text{m}$ 变为 $0.3\mu\text{m}$ 时，接头抗弯强度从 470MPa 降低到 270MPa。

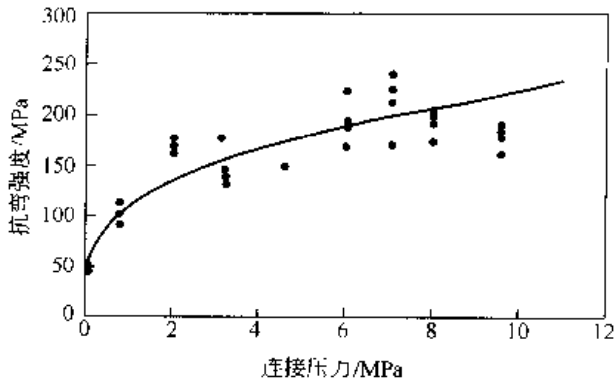


图 5.19 Al_2O_3 -Pt 扩散连接时压力对接头抗弯强度的影响

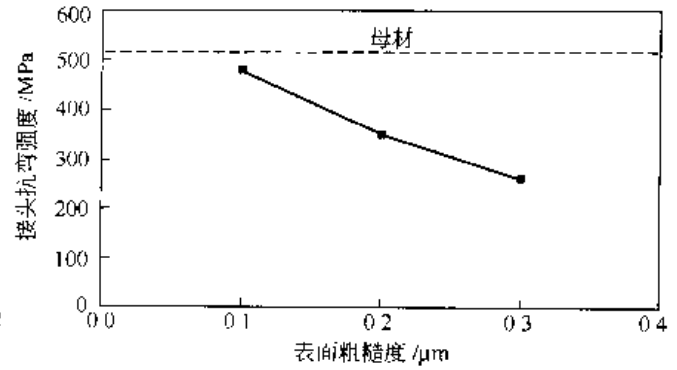


图 5.20 Si_3N_4 -Al 接头表面粗糙度对接头抗弯强度的影响

固相扩散连接陶瓷与金属时，陶瓷与金属界面会发生反应形成化合物，所形成的化合物种类与连接条件（如温度、表面状态、杂质类型与含量等）有关。这种接头中可能出现的化合物见表 5.29。

表 5.29 各种接头中可能出现的化合物

接头组合	界面反应产物	接头组合	界面反应产物
Al_2O_3 -Cu	$\text{CuAlO}_2, \text{CuAl}_2\text{O}_4$	Si_3N_4 -Al	AlN
Al_2O_3 -Ti	$\text{NiO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3, \text{NiO} \cdot \text{SiAl}_2\text{O}_3$	Si_3N_4 -Ni	$\text{Ni}_3\text{Si}_2, \text{Ni}(\text{Si})$
SiC-Nb	$\text{Nb}_3\text{Si}_2, \text{NbSi}_2, \text{Nb}_2\text{C}, \text{Nb}_3\text{Si}_3\text{C}_2, \text{NbC}$	Si_3N_4 -Fe-Cr 合金	$\text{Fe}_3\text{Si}, \text{Fe}_3\text{N}, \text{Cr}_2\text{N}, \text{CrN}, \text{Fe}_7\text{N}$
SiC-Ni	Ni_2Si	AlN-V	$\text{V}(\text{Al}), \text{V}_2\text{N}, \text{V}_3\text{Al}_6, \text{V}_3\text{Al}$
SiC-Ti	$\text{Ti}_3\text{Si}_3, \text{Ti}_3\text{SiC}_2, \text{TiC}$	ZrO_2 -Ni, ZrO_2 -Cu	未发现新相出现

扩散条件不同，反应产物不同，接头性能有很大差别。一般情况下，在真空扩散焊的接头强度高于在氩气和空气中连接的接头强度。用 Al 作中间层连接 Si_3N_4 时，环境条件对其接头强度的影响如图 5.21 所示。真空连接接头的强度最高，抗弯强度超过 500MPa。而在大气中连接是强度低，接头沿 Al/ Si_3N_4 界面脆性断裂，可能是由于氧化产生 Al_2O_3 的缘故，虽然加压能够破坏氧化膜，但当氧分压较高时会形成新的金属氧化物层，而使接头强度降低。

在高温（1500℃）下直接扩散连接 Si_3N_4 陶瓷时，由于高温下 Si_3N_4 陶瓷容易分解形成孔洞，在 N_2 中连接可以限制陶瓷的分解， N_2 压力高时接头抗弯强度较高。在 1MPa 氮气中连接的接头抗弯强度（380MPa）比在 0.1MPa 氮气中连接的接头抗弯强度（220MPa）高 30% 左右。

扩散焊时采用中间层是为了降低扩散温度，减小压力和减少保温时间，以促进扩散和去除杂质元素，同时也为了降低界面产生的残余应力。铁素体不锈钢与氧化铝陶瓷扩散焊时，

中间层降低残余应力的作用如图 5.22 所示。中间层厚度增大，残余应力降低，Nb 与氧化铝陶瓷的线胀系数最接近，作用最明显。但是，中间层的影响有时比较复杂，如果界面有反应产生，中间层的作用会因反应物类型与厚度的不同而有所不同。

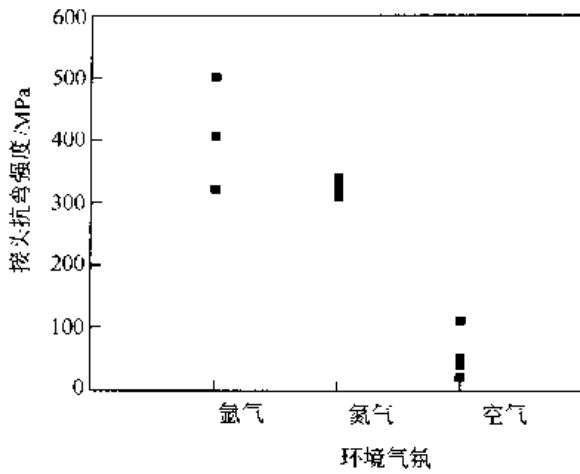


图 5.21 环境条件对 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Al}/\text{Si}_3\text{N}_4$ 接头抗弯强度的影响

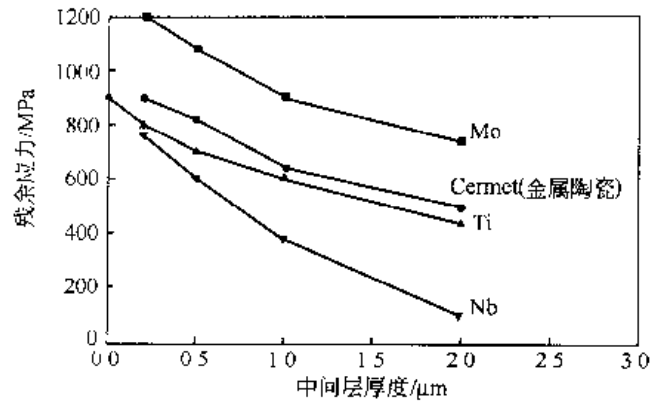


图 5.22 中间层厚度对 Al_2O_3 -AISI405 接头残余应力的影响
(1300°C, 100MPa, 30min)

中间层的选择很关键，选择不当会引起接头性能的恶化。如由于化学反应激烈形成脆性反应物而使接头抗弯强度降低，或由于线胀系数的不匹配而增大残余应力，或使接头耐腐蚀性能降低。中间层可以以不同的形式加入，通常以粉末、箔状或通过金属化加入。各种陶瓷材料组合扩散焊的工艺参数及其性能见表 5.30。

表 5.30 各种陶瓷材料组合扩散焊的工艺参数及其性能

连接材料	温度/°C	时间/min	压力/MPa	中间层及厚度	环境气氛	强度/MPa
Al_2O_3 -Ni	1350	20	100	—	H_2	200 ^b (A)
Al_2O_3 -Pt	1550	1.7~20	0.03~10	—	H_2	200~250(A)
Al_2O_3 -Al	600	1.7~5	7.5~15	—	H_2	95(A)
Al_2O_3 -Cu	1025~1050	155	1.5~5	—	H_2	153 ^b (A)
Al_2O_3 - Cu_4Ti	800	20	50	—	真空	45 ^b (T)
Al_2O_3 -Fe	1375	1.7~6	0.7~10	—	H_2	220~231(A)
Al_2O_3 -低碳钢	1450	120	<1	Co	真空	3~4(S)
	1450	240	<1	Ni	真空	0(S)
Al_2O_3 -高合金钢	625	30	50	0.5mm Al	真空	41.5 ^b (T)
Al_2O_3 -Cr	1100	15	120	—	真空	57~90 ^b (S)
Al_2O_3 -Pt- Al_2O_3	1650	240	0.8	—	空气	220(A)
Al_2O_3 -Cu- Al_2O_3	1025	15	50	—	真空	177(B)
	1000	120	6	—	真空	50(S)
Al_2O_3 -Ni- Al_2O_3	1350	30	50	—	真空	149(B)
	1250	60	15~20	—	真空	75~80(T)
Al_2O_3 -Fe- Al_2O_3	1375	2	50	—	真空	50(B)
Al_2O_3 -Ag- Al_2O_3	900	120	6	—	真空	68(S)
Si_3N_4 -Invar	727~877	7	0~0.15	0.5mm Al	空气	110~200(A)
Si_3N_4 -Nimonic80A	1100	6~60	0~50	—	真空	—
	1200	—	—	Cu, Ni, Kovar	—	—

续表

连接材料	温度 °C	时间 min	压力 MPa	中间层及厚度	环境气氛	强度 MPa
Si ₃ N ₄ -Si ₃ N ₄	770~986	1 ^a	0~0.15	10~20μm Al	空气	320~190(B)
	1550	40~60	0~1.5	ZrO ₂	真空	175(B)
	1500	60	21	无	1MPa 氮气	380(A)室温~ 230(A)1000°C
	1500	60	21	无	0.1MPa 氮气	220(A)室温~ 135(A)1000°C
Si ₃ N ₄ -WC-Co	610	30	5	Al	真空	208 ^b (A)
	610	30	5	Al-Si	真空	50 ^b (A)
	1050~1100	180~360	3~5	Fe-Ni-Cr	真空	>90(A)
Si ₃ N ₄ -Al-Si ₃ N ₄	630	300	4	—	真空	100(S)
Si ₃ N ₄ -Ni-Si ₃ N ₄	1150	0~300	6~10	—	真空	20(S)
Si ₃ N ₄ -Invar-AISI316	1000~1100	90~1440	7~20	—	真空	95(S)
SiC-Nb	1400	30	1.96	—	真空	87(S)
SiC-Nb-SiC	1400	600	—	—	真空	187 室温, >100(800°C)
SiC-Nb-SUS304	1400	60	—	—	真空	125
SiC-SUS304	800~1517	30~180	—	—	真空	0~40
AlN-AlN	1300	90	—	25μm V	真空	120(S)
ZrO ₂ -Si ₃ N ₄	1000~1100	90	>14	>0.2mm Ni	真空	57(S)
ZrO ₂ -Cu-ZrO ₂	1000	120	6	—	真空	97(T)
ZrO ₂ -ZrO ₂	1100	60	10	0.1mm Ni	真空	150(A)
	900	60	10	0.1mm Cu	真空	240(A)
94%Al ₂ O ₃ -Cu	1050	50~60	10~12	—	真空	230(B)
Al ₂ O ₃ -Nb	1600	60	8.8	—	真空	120(B)
BeO-Cu	250~450	10	10~15	Ag 25μm	真空	—
Si ₃ N ₄ -钢	610	30	10	Al-Si-Al Al-Si	真空	200(B)

注：强度值后面括号中的字母代表各种性能试验方法，A代表四点弯曲试验，B代表一点弯曲试验，T代表拉伸试验，S代表剪切试验；上标b代表最大值。

5.6.3 陶瓷扩散焊应用实例

Al₂O₃、SiC、Si₃N₄及WC等陶瓷研究和开发较早，发展比较成熟。而AlN、ZrO₂陶瓷发展得相对较晚，它们的焊接研究目前正处于研究之中。有关陶瓷接头的性能试验，以往主要以四点或三点弯曲及剪切或拉伸试验来检验，但陶瓷属于脆性材料，只有强度指标不够完全，测量接头的断裂韧性是有必要的。

陶瓷的硬度与强度较高，不易发生变形，所以陶瓷与金属的扩散连接除了要求被连接的表面非常平整和清洁外，扩散连接时还必须压力大（压力高达0.1~15MPa）、温度高（通常为金属熔点T_m的0.5~0.9），焊接时间也比其他焊接方法长得多。陶瓷与金属的扩散连接中，最常用的陶瓷材料为氧化铝陶瓷和氧化锆陶瓷。与此类陶瓷焊接的金属有铜（无氧铜）、钛（TA1）、钛钽合金（Ti-5Ta）等。

氧化铝陶瓷材料具有硬度高塑性低的特性，在扩散焊时仍将保持这种特性。即使氧化铝陶瓷内存在玻璃相（多半是散布在刚玉晶粒的周围），陶瓷也要加热到1100~1300°C以上才会出现蠕性，陶瓷与大多数金属扩散焊时的实际接触首先是在金属的塑性变形过程中形成的。表5.31列出了各种Al₂O₃陶瓷与不同金属相匹配的组合、扩散焊接条件及接头抗弯强度。

表 5.31 各种 Al₂O₃ 陶瓷与不同金属扩散焊焊接条件及接头强度

陶瓷-金属组合		气氛	加热温度 / °C	抗弯强度 / MPa
93%氧化铝瓷 (含 MnO)	Fe-Ni-Co	H ₂	1200	100
	Fe-Ni-Co	真空	1200	120
	不锈钢	H ₂	1200	100
	不锈钢	真空	1200	200
	Ti	真空	1100	140
	Ti-Mo	真空	1100	100
72%氧化铝瓷	Fe-Ni-Co	H ₂	1200	100
	不锈钢	干 H ₂	1200	115
	不锈钢	真空	1200	115
	Ti	真空	1100	125
	Ni	真空	1200	130
99.7%氧化铝瓷	不锈钢	真空	1250~1300	180~200
	Ni	真空	1250~1300	150~180
	Ti	真空	1250~1300	160
	Fe-Ni-Co	真空	1250~1300	110~130
	Fe-Ni 合金	真空	1250~1300	50~80
	Nb	真空	1250~1300	70
	Ni-Cr	H ₂	1250~1300	100
	Ni-Cr	真空	1250~1300	100
	Pd	H ₂	1250~1300	160
	Pd	真空	1250~1300	160
	3号钢	H ₂	1250~1300	50
3号钢	真空	1250~1300	50	
94%氧化铝瓷	不锈钢	H ₂	1250~1300	30

注：真空度均为 10⁻²~10⁻³Pa；保温时间 15~20min。

陶瓷与金属直接用扩散焊连接有困难时，可以采用中间层的方法，而且金属中间层的塑性变形可以降低对陶瓷表面的加工精度。例如在陶瓷与 Fe-Ni-Co 合金之间，加入 20μm 厚的 Cu 箔作为过渡层，采用压力 15MPa，时间为 10min，在温度 1050℃ 工艺下可得到抗拉强度 72MPa 的扩散焊接头。

这种中间过渡层可以直接使用金属箔片，也可以采用真空蒸发、离子溅射、化学气相沉积 (CVD)、喷涂、电镀等。还可以采用前面介绍的烧结金属粉末法、活性金属活化法，金属粉末或钎料等均可实行扩散焊接。扩散焊工艺不仅用于金属与陶瓷的焊接，也可用于微晶玻璃、半导体陶瓷、石英、石墨等与金属的焊接。

表 5.32 列出各种介质与金属扩散焊的工艺参数。表 5.33 列出无氧铜与 Al₂O₃ 陶瓷在 H₂ 气氛中的扩散焊工艺，表 5.34 列出 Fe-Ni 合金与 α-Al₂O₃ 蓝宝石扩散焊焊接工艺参数，表 5.35 列出铜与硫化锌陶瓷扩散焊工艺参数。

表 5.32 各种介质与金属扩散焊的工艺参数

材料组合	过渡层	焊接温度 / °C	压力 / MPa	保温时间 / min	真空度 / Pa	备注
硅硼玻璃-可伐	Cu 箔 0.05mm	590	5	20	5×10 ⁻²	抗拉 10MPa
硅铝玻璃-Nb		840	50~100	15	(2~5)×10 ⁻²	抗拉 18MPa, 耐 C ₆₀ , 650℃, 800h
石英玻璃-Cu	蒸 Cu 5~10μm	950	10	30	10 ⁻¹ ~5×10 ⁻²	抗拉 29MPa, 耐 700℃ 热冲击
微晶玻璃-Cu		850~900	5~8	15~20	10 ⁻¹ ~10 ⁻³	抗拉 139MPa, 600℃ 热冲击 16 次
微晶玻璃-Al	—	620	8	60	10 ⁻²	

续表

材料组合	过渡层	焊接温度/°C	压力/MPa	保温时间/min	真空度/Pa	备注
微晶玻璃-Cu	Al箔	420	5	15	10^{-2}	
91%Al ₂ O ₃ 瓷-Cu		1050	10~12	50~60	—	H ₂ 中, 抗弯230MPa
91%Al ₂ O ₃ 瓷-Ni、Mo、 可伐	Cu箔	1050	18	15	—	H ₂ 中
95%Al ₂ O ₃ 瓷-Cu	—	1000~1020	20~22	20~25	—	H ₂ 中, φ135mm瓷件
95%Al ₂ O ₃ 瓷-1J42		1150~1250	15~18	8~10	10^{-1}	—
蓝宝石-(Fe-Ni合金)		1000~1100	2	10	5×10^{-2}	合金中含Ni 46%
BaO瓷-Cu	Ag箔 25μm	250~450	10~15	10	—	—
ZnS光学陶瓷-Cu、 可伐		850	8~10	40	—	Ar中
(ZnO-TiO)瓷-Ti	CVD沉积Ni	750	15	15	10^{-2}	
(Al ₂ O ₃ -SiC-Si)瓷-(Ni- Cr)	沉积Ni	650	15	15	10^{-2}	(Ni-Cr)合金中 Ni80%,Cr 20%
ZrO ₂ 瓷-Pt	Ni箔	1150~1300	2~3	5~20	10^{-2}	
硅晶体-Cu	镀Au、(Ni)	370	20	60	10^{-1}	
硅晶体-Mo	镀Ag 6~8μm, 夹Ag箔 10~30μm	400	5~300	50~60		300~-196°C 热循环5次
硅晶体-W	—	1100~1150	17	30	10^{-1}	—
	Al箔 0.1mm	500	23	60	10^{-1}	
(钇-钆)石榴石铁氧 体-Cu	Cu箔 0.6mm	1000~1050	16~20	15~20	10^{-1}	抗拉68MPa
Mn(Ni)-Zn铁氧体 磁头	Al-Mg玻璃 1~10μm	550~750	10~50	15~90	10^{-1}	焊后不影响铁 氧体电磁性能
石墨-Ti	化学镀Ni 10~30μm	850	3	35	10^{-1}	—
	Ni箔 1μm	850 1100	1 7	35 45	10^{-1}	—
石墨-不锈钢	—	1250~1300	1~2	5	5×10^{-4}	—
石墨-Mo、Nb	Cr、Ni粉	1650~1750	1	5		惰性气体, Cr粉 80%, Ni粉 20%

表 5.33 无氧铜与 Al₂O₃ 陶瓷在 H₂ 气氛中扩散焊的工艺参数

陶瓷与金属	厚度/mm	工 艺 参 数						
		焊接温度/°C	保温时间/min	压力/MPa	加热速度/°C·min ⁻¹	冷却速度/°C·min ⁻¹	总加热时间/min	总冷却时间/min
Al ₂ O ₃ +无氧Cu	7+0.4	1000	20	19.6	10	3	60~70	120
Al ₂ O ₃ +无氧Cu	7+0.4	1000	20	21.56	15	10	70	120
Al ₂ O ₃ +Cu	7+0.5	1000	20	21.56	10	3	70	120
Al ₂ O ₃ +Cu	7+0.5	1000	20	19.6	10	10	60	120

表 5.34 Fe-Ni 合金与 α-Al₂O₃ 蓝宝石扩散焊的工艺参数

金属+陶瓷	气体	工 艺 参 数				
		焊接温度/°C	保温时间/min	压力/MPa	加热速度/°C·min ⁻¹	冷却速度/°C·min ⁻¹
Fe-Ni 合金+蓝宝石	H ₂	1000	10	0.98	20	5
		1000	10	1.98		5
		1050	15	17.61		5
		1100	10	4.9		5
		1200	10	1.96		6
		1250	15	4.9		7
		1300	10	4.9		7
		1300	15	7.24		7

表 5.35 铜与硫化锌陶瓷扩散焊的工艺参数

异种材料	介质	工 艺 参 数			真空度, Pa
		焊接温度, °C	保温时间, min	压力, MPa	
铜 + 硫化锌陶瓷	氩气	950	35	7.81	1.33×10^{-1}
		800	10	7.81	
		850	35	9.8	
		800	10	7.81	
		850	40	9.8	
		850	40	9.8	

5.7 复合材料的扩散焊

5.7.1 连续纤维增强金属基复合材料

扩散焊过程中工件处于固态，避免了熔化金属对纤维的侵蚀作用，因此扩散焊被认为是纤维增强金属基复合材料的最佳焊接方法之一。但纤维增强金属基复合材料扩散焊时仍存在一些问題，主要问題如下：

a. 如果扩散焊加热时间长，纤维与基体之间仍可能会发生相互作用；

b. 焊接面上的高强度和高刚度纤维相互接触时阻碍了焊接面的变形和紧密接触，使扩散结合难以实现；

c. 复合材料与其基体金属扩散焊时，基体金属一侧的变形过大；

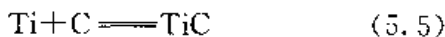
d. 纤维增强金属基复合材料扩散焊接头的强度主要取决于结合面上金属基复合材料基体之间的结合强度，因此基体金属在整个接头的焊接界面上所占的百分比越大，接头的强度就越高；反之，纤维所占百分比越大，接头的强度就越低。也就是说，复合材料中纤维体积分数越大，其焊接性越差。

(1) 加热温度及保温时间的选择

所选择的扩散焊加热温度及保温时间应确保不会发生明显的界面反应。下面以 SiC (SCS-6)_f/Ti-6Al-4V 复合材料的扩散焊为例，讨论焊接参数的选择原则。SCS-6 是一种专门用于增强钛基复合材料的 SiC 纤维，直径约 140 μm，表面有一层 3 μm 厚的富 C 层。

图 5.23 所示为不同温度下 SiC (SCS-6)_f/Ti-6Al-4V 复合材料界面反应层厚度与加热时间之间的关系。可以看出，加热温度越高，反应层的增大速度越快，但加热到一定时间以后，反应层厚度增大速度变慢。由此可见，SCS-6 碳化硅纤维与钛合金基体之间的反应分两个阶段。

根据热力学分析，高温下 SCS-6 碳化硅纤维与钛合金基体之间最容易发生的反应为



这是第一阶段发生的反应，该反应依赖于 Ti 或 C 的扩散。由于 C 在 TiC 中的扩散比 Ti 要快得多，因此 C 不断地穿过生成的 TiC 层向外扩散，并与钛基体进一步发生反应，直至表面的富 C 层完全耗尽。然后进行自由能变化较小的两个反应，即

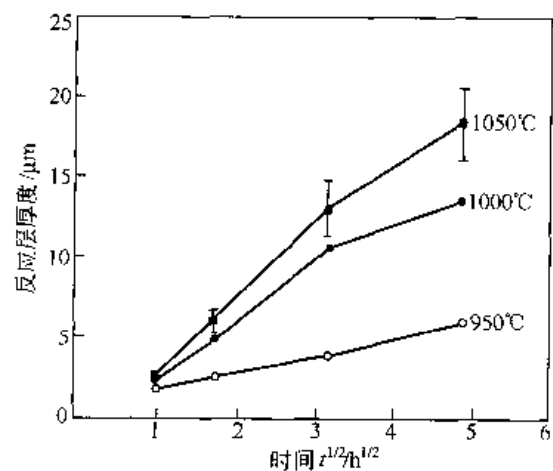


图 5.23 SiC (SCS-6)_f/Ti-6Al-4V 复合材料界面反应层厚度与加热时间的关系

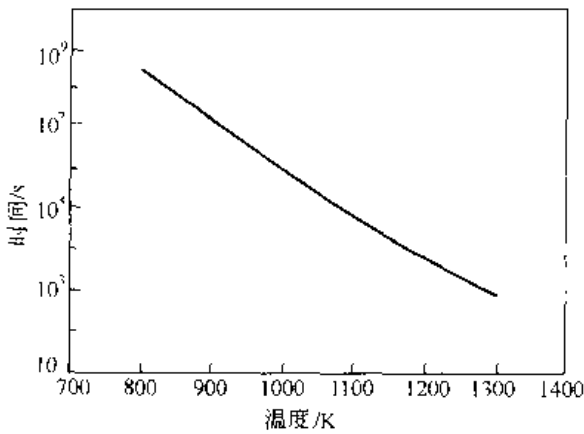


图 5.24 不同温度下反应层达到 1.0 μm 时所需的时间

这是第二阶段的反应。其反应物为两种硅化物和 TiC。进行这两个反应时，Ti 必须首先穿过一定厚度的反应层才能与 SiC 发生反应，由于反应层已较厚，而且 Ti 的扩散速度较慢，因此，这两个反应的反应速度比较慢。

当反应层的厚度超过 1.0 μm 时，SiC/Ti-6Al-4V 复合材料的抗拉强度将显著下降。图 5.24 给出了不同温度下反应层达到 1.0 μm 时所需的时间。对 SiC/Ti-6Al-4V 复合材料进行扩散焊时，焊接温度和保温时间所构成的点应位于图 5.24 所示的曲线下面。

(2) 中间层及焊接压力

焊接 SiC/Ti-6Al-4V 与钛合金 Ti-6Al-4V 之间的异种材料接头时，两个对接界面上不存在纤维的直接接触，易于发生塑性流变，因此利用直接扩散焊及瞬时液相扩散焊均能较容易地实现扩散焊。但是利用直接扩散焊时所需的压力仍较大，Ti 合金一侧的变形过大；而采用瞬时液相扩散焊时，所需的焊接压力较低，钛合金一侧的变形也较小。

例如，为使接头强度达到 850MPa，直接扩散焊所需的焊接压力为 7MPa，焊接时间为 10.8ks；而采用 Ti-Cu-Zr 作中间层进行瞬时液相扩散焊时，所需的焊接压力仅为 1MPa，焊接时间为 1.8ks。同时钛合金一侧的变形量也由固态直接扩散焊时的 5% 降到瞬时液相扩散焊时的 2%。

纤维增强金属基复合材料的直接扩散焊是非常困难的，这是因为焊接界面上的高强度、高刚度纤维相互接触，阻碍了焊接面的紧密接触，并阻碍了焊接面上的塑性变形。为了克服这些问题，应在被焊接的复合材料中间插入一中间层，使焊接面上避免出现纤维与纤维的直接接触。

采用瞬时液相扩散焊方法焊接纤维增强金属基复合材料的接头效果也不好。瞬时液相通常只能使基体金属之间获得良好的结合，而纤维与基体之间的结合仍然很差，因此接头的整体强度仍很低。一般在利用瞬时液相层的同时，还要在结合界面上加入厚度适当的基体金属作中间过渡层。

图 5.25 所示为用 Ti-6Al-4V 中间层、用 Ti-Cu-Zr 作瞬时液相层时 SiC_f/Ti-6Al-4V 复合材料的瞬时液相扩散焊示意。图 5.26 所示为 Ti-6Al-4V 钛合金中间层厚度与 SiC_f-30%/Ti-6Al-4V 复合材料接头强度之间的关系。

由图 5.26 可见，当中间层厚度超过 80 μm 时所得复合材料接头的抗拉强度达到了 850MPa，等于 SiC_f-30%/Ti-6Al-4V 复合材料与 Ti-6Al-4V 钛合金之间的接头强度。事实上，Ti-6Al-4V 中间层达到一定厚度时，复合材料的焊接变成了 SiC_f/Ti-6Al-4V 复合材料与 Ti-6Al-4V 钛合金的焊接，不同的是要同

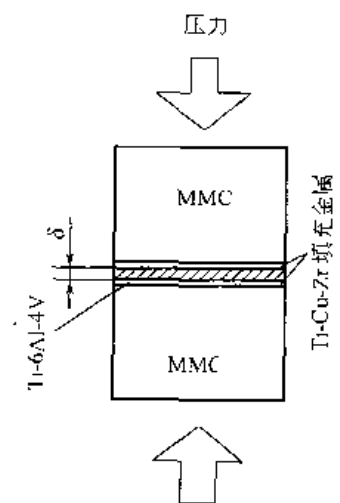


图 5.25 同时利用中间层及瞬时液相层的焊接方法

时焊接两个异种材料接头。

当中间层厚度达到 $80\mu\text{m}$ 后，再增加中间层的厚度， $\text{SiC}/\text{Ti-6Al-4V}$ 复合材料接头的强度不再增大。这是由于接头的强度由基体金属间的结合强度控制，当中间层厚度达到 $80\mu\text{m}$ 后，基体金属间的结合已达到最佳状态，再增加厚度时基体金属的结合情况不再发生变化，整个接头的强度也就不再变化。

(3) 接头的优化设计

焊接接头形式对接头强度具有重要的影响。为了提高纤维增强金属基复合材料的接头强度，可将接头形式设计成斜口接头。图 5.27 所示为加中间层的复合材料固态扩散焊斜口接头示意。接头强度系数大约为 80% 时，断裂起始于接头表面上 SiC 纤维不连续的位置

(图 5.28 中的 A 点)，起裂后裂纹沿垂直于拉伸方向向前扩展，穿过整个复合材料断面。接头强度未达到复合材料基体强度的原因是由于接头表层纤维的不连续性，表层纤维的增强作用大大降低，在较低的应力下就萌生裂纹。

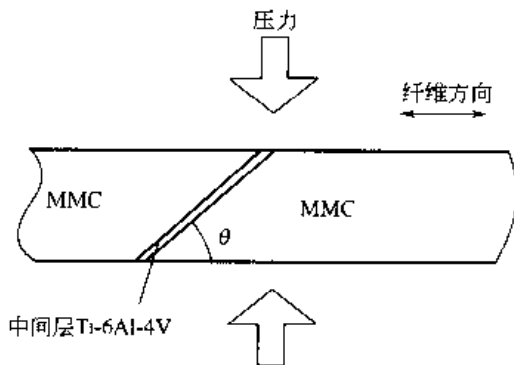


图 5.27 加中间层的 $\text{SiC}_f-30\%/\text{Ti-6Al-4V}$ 扩散焊斜口接头示意

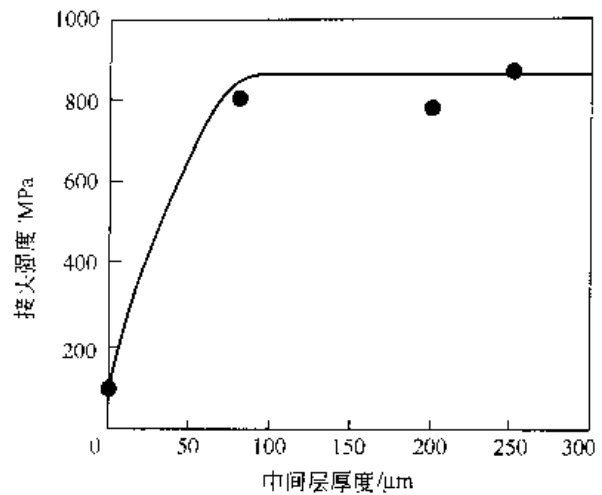


图 5.26 Ti-6Al-4V 钛合金中间层厚度与 $\text{SiC}_f-30\%/\text{Ti-6Al-4V}$ 复合材料瞬时液相扩散焊接头强度的关系

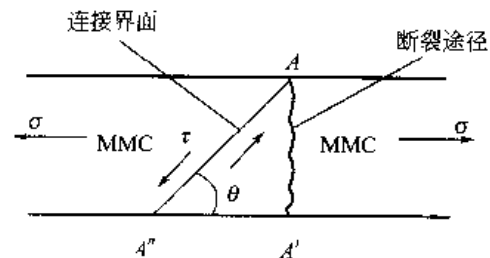


图 5.28 $\text{SiC}_f-30\%/\text{Ti-6Al-4V}$ 扩散焊斜口接头断裂过程示意

5.7.2 非连续纤维增强金属基复合材料

由于在 Al 表面上存在一层非常稳定而牢固的氧化膜，严重地阻碍了两焊接表面之间的扩散结合。Al 基复合材料的直接扩散焊是很困难的，需要较高的温度、压力及真空度，因此多采用加中间层的方法。加中间层后，不但可在较低的温度和较小的压力下实现扩散焊接，而且可将原来结合界面上的增强相-增强相 (P-P) 接触改变为增强相-基体 (P-M) 接触，如图 5.29 所示，从而提高了接头强度。

这是由于 P-P 几乎无法结合，而 P-M 间可形成良好的结合，使接头强度大大提高。根据所选用的中间层，扩散焊方法有两种：采用中间层的固态扩散焊及瞬时液相扩散焊接。

(1) 采用中间层的固态扩散焊接

采用中间层的固态扩散焊接的关键是选择中间层，选择中间层的原则是，中间层能够在较小的变形下去除氧化膜，易于发生塑性流变，且与基体金属及增强相不会发生不利的相互

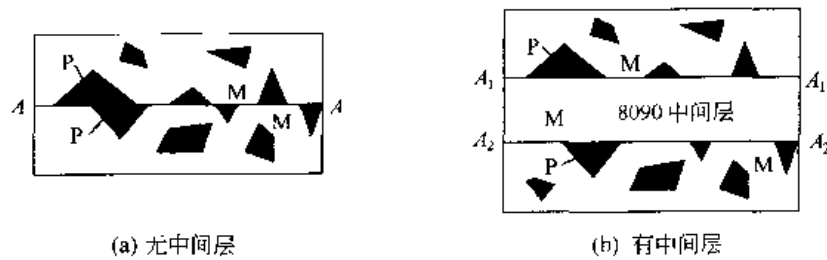


图 5.29 加中间层前后的界面结合情况

作用。可用作中间扩散层的金属及合金有 Al-Li 合金、Al-Cu 合金、Al-Mg、Al-Cu-Mg 及纯 Ag 等。

Li 具有较高的活性，与 Al_2O_3 能反应生成一些比 Al_2O_3 容易破碎或较容易溶解的氧化物 Li_2O 、 $LiAlO_2$ 、 $LiAl_3O_5$ 等，因此，Al-Li 合金具有通过化学机制破碎氧化膜的作用。所以，利用 Li 焊接 $SiC_w/2124Al$ 时，在较低的变形量 ($<20\%$) 下就能得到强度较高 (70.7MPa) 的接头。

Al-Cu 合金对基体 Al 的润湿性较差，接头只有在较大的变形量 ($>40\%$) 下才能取得较高的强度。这是因为，利用这种材料作中间层时，结合界面上氧化膜的破坏完全是靠塑性流变的机械作用。在中等变形 ($20\% \sim 30\%$) 的焊接条件下，氧化膜很难有效去除，所得接头的抗剪强度是很低的。

Ag 作中间扩散层时，焊缝与母材间的界面上会形成一层稳定的金属间化合物 δ 相， δ 相的形成有利于破碎氧化膜，促进焊接界面的结合。但 δ 相含量较大时，特别是当形成连续的 δ 层时，接头将大大脆化，且强度降低。当中间扩散层足够薄时 ($2 \sim 3\mu m$)，可防止焊缝中形成连续的 δ 化合物，接头的强度仍较高。例如，将焊接表面镀上 $3\mu m$ 的一层 Ag 时进行扩散焊 ($470 \sim 530^\circ C$ ， $1.5 \sim 6MPa$ ， $60min$)，得到的接头抗剪切强度为 30MPa。

破坏界面氧化膜实现焊接的机制有两种：一种是机械的机制，另一种是化学的机制。仅靠机械的机制，如采用超塑性 Al-Cu 合金作中间层时，工件的结合界面上的变形很大，难以用于实际制品的焊接中。化学机制太强时，可能会产生对接头性能不利的脆性相，例如，利用 Ag 作中间层时，如果厚度超过 $3\mu m$ ，将形成连续分布的脆性金属间化合物，使接头强度降低。因此，最理想的破除氧化膜方式是这两种机制相结合的方式。

(2) 瞬时液相扩散焊接

由于粒子增强型金属基复合材料中存在大量的位错、亚晶界、晶界及相界面，中间扩散层沿这些区域扩散时可大大缩短扩散时间，因此这种材料的瞬时液相扩散焊要比基体金属更容易。例如，用 Ga 作中间扩散层焊接 SiC_p/Al 时，在 423K 的温度下进行焊接时所需的焊接时间小于时效时间，因此焊接可以与时效同时进行。

1) 中间层的选择

瞬时液相扩散焊的中间层材料选择原则是，应能与复合材料中的基体金属生成低熔点共晶体或者熔点低于基体金属的合金，易于扩散到基体中并均匀化，且不能生成对接头性能不利的产物。

Al 基复合材料的瞬时液相扩散焊时可用作中间层的金属有 Ag、Cu、Mg、Ge、Zn 及 Ga 等，可用作中间层的合金有 $BAISi$ 、Al-Cu、Al-Mg 及 Al-Cu-Mg 等。利用 Ag、Cu 等金属作中间层时，共晶反应时焊接界面处的基体金属要发生熔化，重新凝固时增强相被凝固界

面所推移，增强相聚在结合面上，降低了接头强度。因此，应严格控制焊接时间及中间层的厚度。而利用合金作中间层时，只要加热到合金的熔点以上就可形成瞬时液相，不需要在焊接过程中通过中间层和母材之间的相互扩散来形成瞬时液相，基体金属熔化较轻，因此可避免颗粒的偏聚问题。

表 5.36 列出利用不同中间层焊接的 $(Al_2O_3)_p-15\%/6061Al$ 复合材料接头的强度及其焊接参数。利用 Ag 与 BAISi-4 作中间层时始终能获得较高的接头强度。用 Cu 作中间层时对焊接温度敏感，接头强度不稳定。这与焊接界面上 Al_2O_3 偏聚严重及存在一些孔洞有关。

表 5.36 利用不同中间层焊接的 $(Al_2O_3)_p-15\%/6061Al$ 复合材料接头的强度及其焊接参数

中间层		工艺参数			强度/MPa		
材质	厚度/ μm	温度/ $^{\circ}C$	压力/MPa	时间/s	剪切强度	屈服强度	抗拉强度
$Al_2O_3_p-15\%$, 6061Al(母材)		-	-	-	-	317	358
Ag	25	580	-	130	193	323	341
Cu	25	565	-	130	186	85	93
BaSi-4	125	585	-	20	193	321	326
Sn-5Ag	125	575	-	70	100	-	-

中间层厚度太薄时，瞬时液相不能去除焊接界面上的氧化膜，不能充分润湿焊接界面上的基体金属，甚至无法避免 P-P 接触界面，因此接头强度不会很高。中间层太厚时，焊接过程中难以完全消除，也限制了接头强度的提高，有时中间层太厚时还可能会形成对接头性能不利的金属间化合物。

表 5.37 列出利用不同中间层焊接的 $(Al_2O_3)_s-15\%/6063Al$ 复合材料接头的强度及其焊接参数。不加中间层时，尽管也能得到强度较高的接头，但工艺参数的选择范围非常窄。而利用 Cu、2027Al 或 Ag 中间扩散层时，在宽广的焊接工艺参数范围内均能取得接近母材性能的接头。

表 5.37 利用不同中间层焊接的 $(Al_2O_3)_s-15\%/6063Al$ 复合材料接头的强度及其焊接参数

中间层		工艺参数			抗拉强度/MPa	断裂位置
材质	厚度/ μm	温度/ $^{\circ}C$	压力/MPa	时间/s		
无	-	873	2	-	98 97	
Ag	16	873	2	1800 1800	188 145	焊接界面
Cu	5	883	1	1800	125	焊接界面
		873	2	1800	179	母材
			1	1800	181	焊接界面
		1	1800	162	焊接界面	
Al-Cu-Mg(A2017)	75	823	1	1800	119	焊接界面
		883	1	1800	161	焊接界面
		873	2	1800	164	母材
1	1800		181			
Al-Cu-Mg(A2017)	30	883	1	1800	173	焊接界面
		873	2	1800	177	焊接界面
		873	2	1800	187	焊接界面

2) 加热温度和保温时间

Ag、Cu、Mg、Ge、Zn 及 Ga 与 Al 形成共晶的温度分别为 839K、820K、711K、697K、655K 及 420K。利用这些金属作中间层时，瞬时液相扩散焊的焊接温度应超过其共晶温度，否则就不是瞬时液相焊，而是加中间层的固态扩散焊。同样，利用 BAlSi、Al-Cu、Al-Mg 及 Al-Cu-Mg 合金作中间层时，焊接温度应超过这些合金的熔点。焊接时温度不宜太高，在保证出现焊接所需液相的条件下，尽量采用较低的温度，以防止高温对增强相的不利作用。从表 5.37 可以看出，在同样的条件下，温度过高时，强度反而下降。

保温时间是影响接头性能的重要参数。时间过短时，中间层来不及扩散，结合面上残留较厚的中间层，限制了接头抗拉强度的提高。随着保温时间的增大，残余中间层逐渐减少，强度就逐渐增加。当焊接保温时间增大到一定程度时，中间层基本消失，接头强度达到最大。继续增加保温时间时，接头强度不但不再提高，反而降低，这是因为保温时间过长时，热循环对复合材料的性能具有不利的影晌。

例如，用 0.1mm 厚的 Ag 作中间层，在 580℃ 的焊接温度、0.5MPa 的压力下焊接 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-30\%/Al}$ 复合材料。当焊接保温时间为 20s 时，接头中间残留较多的中间层，接头的抗拉强度的平均值约为 56MPa。当保温时间为 100s 时，抗拉强度达到最高值，约 95MPa。当保温时间为 240s 时，接头的抗拉强度降到 72MPa 左右。

3) 焊接压力

瞬时液相扩散焊时，压力对接头性能也有很大的影响。压力太小时塑性变形小，焊接界面与中间层不能达到紧密接触，接头中会产生未焊合的孔洞，降低接头强度。压力过高时可将液态金属自结合界面处挤出，造成增强相偏聚，液相不能充分润湿增强相，因此也会形成孔洞。例如，用 0.1mm 厚的 Ag 作中间层，在 580℃ 的焊接温度下焊接 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-30\%/Al}$ 时，压力小于 0.5MPa 及压力达到 1MPa 时，结合界面上均存在明显的孔洞，接头强度较低。在 1MPa、120s 条件下焊接的接头强度小于 60MPa，而在 0.5MPa、120s 条件下焊接的接头抗拉强度约为 90MPa。

4) 焊接表面的处理方式

焊接表面的处理方式对接头性能具有很大的影响，比较电解抛光、机械切削以及用钢丝刷刷等三种处理方式对 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{/Al}$ 接头性能的影响，发现利用电解抛光处理时接头强度最高，利用钢丝刷刷时接头强度最低。这是因为利用后两种方法处理时，被焊接面上堆积了一些细小的 Al_2O_3 碎屑，这些碎屑阻碍了基体表面的紧密接触，降低了接头的强度。

电解抛光时，被焊接表面上不存在 Al_2O_3 碎屑，但纤维会露出基体表面。电解抛光时间对接头的强度影响很大，电解抛光时间太长时，纤维露头变长，焊接时在压力的作用下断裂，阻碍基体金属接触，降低接头的性能。

扩散焊的工件必须专门设计，并且精心加工，这样才能得到合格的接头。扩散焊的加压技术大多是机械化的，需要适当的设备和压头。把经过处理的工件组装并密封在真空室中，大多数扩散焊都要由具有很高的技术水平的操作者来操作，只有全自动操作才可以使用半熟练人员。

扩散焊时，接头总是紧密接触的表面，普通的熔化焊焊接接头术语和概念不适用于扩散焊。在涉及精密的尺寸公差、昂贵材料或特殊材料性能时，采用扩散焊技术是经济的。虽然扩散焊大多用于制造各种复杂的、单件的组件，但是这种方法还是更适用于中等批量工件的焊接。

第 6 章 惰性气体保护焊

惰性气体保护焊中最常用的一种熔化焊方法是用氩气作为保护气体的电弧焊。根据所用的电极,分为钨极氩弧焊(TIG)和熔化极氩弧焊(MIG)。当利用基值电流维持主电弧的电离通道,并周期地加一同极性高峰值的脉冲电流,产生脉冲电弧,以熔化金属并控制熔滴过渡,即称为脉冲氩弧焊。脉冲氩弧焊特别适用于焊接薄板,且飞溅小。氩弧焊可用于几乎所有钢种、各种厚度和各种位置焊件的焊接,可进行手工和自动焊接并可获得高质量的焊缝。这种方法可广泛应用于对焊缝质量要求较高的高强钢、高合金钢和有色金属的焊接。

6.1 惰性气体保护焊的分类及特点

6.1.1 惰性气体保护焊的分类

惰性气体保护焊是利用惰性气体(大多是氩气)作为保护介质,以高熔点钨极或燃烧于焊丝与工件间的电弧作为热源的电弧焊。惰性气体保护焊可以分为钨极氩弧焊、熔化极氩弧焊和脉冲氩弧焊几种类型,统称为氩弧焊(Argon Arc Welding)。

(1) 钨极氩弧焊(TIG)

钨极氩弧焊(或称非熔化极惰性气体保护焊)是利用高熔点钨棒作为一个电极,以工件作为另一个电极,并利用氩气(Ar)、氦气(He)或氩、氦混合气体(Ar+He)作为保护介质的一种焊接方法。我国通常只采用氩气作为保护气体,因此又称为钨极氩弧焊,简称TIG(Tungsten Iner-gas Arc Welding)或GTAW(Gas Tungsten Arc Welding)。

(2) 熔化极氩弧焊(MIG)

熔化极氩弧焊是利用氩气或富氩气体作为保护介质,以燃烧于焊丝与工件间的电弧作为热源的电弧焊。利用Ar或Ar+He作为保护气体时,称为熔化极惰性气体保护焊,简称MIG(Metal Inert-gas Arc Welding)。利用Ar+O₂、Ar+CO₂或Ar+CO₂+O₂等作为保护气体的金属极气体保护电弧焊方法,称为混合气体保护焊。此外,利用活性气体CO₂等作为保护气体的金属极气体保护电弧焊称为活性气体保护焊,简称MAG(Metal Active Gas Arc Welding)。MIG和MAG统称为GMAW(Gas Metal Arc Welding)。

(3) 脉冲氩弧焊

脉冲氩弧焊的焊接电流是脉冲直流或脉冲交流。脉冲氩弧焊由基本电流维持电弧稳定燃烧,用可控的脉冲电流加热熔化焊件。每一个脉冲形成一个点状熔池,脉冲停歇时间熔池凝固形成一个焊点,通过焊速和脉冲间隙的调节,得到相互搭接的焊点,便可获得连续气密性焊缝。脉冲氩弧焊与一般氩弧焊的主要区别是采用可控的脉冲电流来熔化工件,而不是利用稳定的直流或交流。

脉冲氩弧焊又可分为使用钨极的脉冲氩弧焊和使用熔化极的脉冲氩弧焊。脉冲钨极氩弧焊(Pulsed-TIG)特别适合于焊接薄板。

6.1.2 惰性气体保护焊的工艺特点

(1) 钨极氩弧焊(TIG)的工艺特点

钨极氩弧焊(TIG)具有以下优点。

① 焊接过程稳定、电弧能量参数可精确控制 氩气是单原子分子，稳定性好，在高温下不分解、不吸热、热导率很小。因此，电弧的热量损失少，电弧一旦引燃，就能够稳定燃烧；另一方面，钨棒本身不会产生熔滴过渡，弧长变化干扰因素相对较少，也有助于电弧的稳定燃烧。

② 焊接质量好 氩气是一种惰性气体，它既不溶于液态金属，又不与金属起任何化学反应；而且氩的相对原子质量较大，有利于形成良好的气流隔离层，有效地阻止氧、氮等侵入焊缝金属。

③ 适于薄板焊接、全位置焊接以及不加衬垫的单面焊双面成形工艺 即使是用几安培的小电流，钨极氩弧仍能稳定燃烧，而且热量相对较集中，因此可以焊接厚度 0.3mm 的薄板；采用脉冲 TIG 焊电源，还可进行全位置焊接及不加衬垫的单面焊双面成形焊接。

④ 焊接过程易于实现自动化 TIG 焊的电弧是明弧，焊接过程参数稳定，易于检测及控制，是理想的自动化乃至机器人化的焊接方法。

⑤ 焊缝区无熔渣 焊工可清除地看到熔池和焊缝成形过程。

钨极氩弧焊（TIG）具有以下缺点。

① 抗风能力差 TIG 焊利用气体进行保护，抗侧向风的能力较差。侧向风较小时，可降低喷嘴至工件的距离，同时增大保护气体的流量；侧向风较大时，必须采取防风措施。

② 对工件清理要求较高 由于采用惰性气体进行保护，无冶金脱氧或去氢作用，为了避免气孔、裂纹等缺陷，焊前必须严格去除工件上的油污、铁锈等。

③ 生产率低 由于钨极的载流能力有限，尤其是交流焊时钨极的许用电流更低，致使 TIG 焊的熔透能力较低，焊接速度小，焊接生产率低。

（2）熔化极氩弧焊（MIG）的工艺特点

熔化极氩弧焊（MIG）具有以下优点。

① 适用范围广 熔化极氩弧焊几乎可焊接所有的金属，特别适用于铝及铝合金、钛及钛合金、铜及铜合金以及不锈钢的焊接，既可焊接薄板又可焊接中等厚度和大厚度的板材，而且可适用于任何位置的焊接。

② 生产率较高、焊接变形小 由于使用焊丝作电极，允许使用的电流密度较高，因此母材的熔深大，填充金属熔敷速度快，用于焊接厚度较大的铝、铜等金属及其合金时生产率比 TIG 焊高，焊件变形比 TIG 焊小。

③ 焊接过程易于实现自动化 熔化极氩弧焊的电弧是明弧，焊接过程参数稳定，易于检测及控制，因此容易实现自动化。目前，世界上绝大多数的弧焊机器人及机器人都采用这种焊接方法。

④ 对氧化膜不敏感 熔化极氩弧焊一般采用直流反接，焊接铝及铝合金时具有很强的阴极雾化作用，因此焊前几乎无需去除氧化膜。

熔化极氩弧焊具有以下缺点：

- a. 对焊丝及工件的油锈很敏感，焊前必须严格去除；
- b. 惰性气体价格高，焊接成本高；
- c. 与埋弧焊及 CO₂ 气体保护焊相比，熔透能力低，效率低。

（3）脉冲钨极氩弧焊的工艺特点

a. 便于控制线能量和熔池的大小，易于实现全位置焊接和单面焊双面成形，对于薄板焊接尤为适宜。我国已采用脉冲钨极氩弧焊工艺实现了厚度 0.05mm 的不锈钢波纹管的

焊接。

b. 适用于热敏感材料的焊接。因为熔池冷凝快，高温停留时间短，可以减少热敏感材料焊接时的热裂纹倾向。

c. 每个焊点加热时间短，冷却迅速，适合于厚度差别较大和导热性能差别大的焊件的焊接。

6.1.3 惰性气体保护焊的应用

(1) 钨极氩弧焊的应用

氩气的保护效果好，不溶于液态金属，也不与金属发生任何反应。因此，钨极氩弧焊可用于几乎所有金属和合金的焊接，但由于其成本较高，通常用于焊接易氧化的有色金属及其合金（Al、Mg、Ti等），以及不锈钢、高温合金、难熔的活性金属（如Mo、Nb、Zr）等。对于低熔点和易蒸发的金属（如Pd、Sn、Zn），焊接较困难。

钨极氩弧焊所焊接的板材厚度范围，从生产率考虑以厚度3mm以下为宜。钨极氩弧焊TIG可焊接材料的厚度和应用范围见表6.1。

表 6.1 钨极氩弧焊（TIG）的应用范围

被焊材料	厚度/mm	保护气体纯度要求/%	电 流 种 类	操作方式
钛及钛合金	0.5 以上 2 以上	99.98	直流正接(DCSP)	手工 自动
镁及镁合金	0.5~1.5 0.5 以上	99.9	交流(CA)或直流反接(DCRP)	手工 自动
铝及铝合金	0.5~2 0.5 以上	99.9	交流(CA)或直流反接(DCRP)	手工 自动
铜及铜合金	0.5 以上 3 以上	99.7	直流正接(DCSP)或交流(CA)	手工 自动
不锈钢、耐热钢	0.1 以上 0.5 以上	99.7	直流正接(DCSP)或交流(CA)	手工 自动

对于某些厚壁重要构件（如压力容器及管道），在底层熔透焊道焊接，全位置焊接和窄间隙焊接时，为了保证底层焊接质量，往往采用氩弧焊打底。钨极氩弧焊特别适用于对焊接接头质量要求较高的场合。

(2) 熔化极氩弧焊的应用

熔化极氩弧焊可广泛用于焊接碳钢、低合金钢、不锈钢、耐热合金、铝及铝合金、镁及镁合金、铜及铜合金、钛及钛合金等。可用于平焊、横焊、立焊及全位置焊接，焊接厚度最薄为1mm，最大厚度不受限制。

钨极氩弧焊和熔化极氩弧焊目前已广泛用于航空航天、原子能、石油化工、电力、机械制造、仪表、电子等工业部门中。

6.2 钨极氩弧焊（TIG）

6.2.1 钨极氩弧焊设备的分类及型号编制

(1) 钨极氩弧焊设备的分类

钨极氩弧焊（TIG）焊机的分类方法有多种。按操作方式分类，可分为手工TIG焊机

和自动 TIG 焊机两种；按所用电源类型分类，可分为直流 TIG 焊机、交流 TIG 焊机及脉冲 TIG 焊机三种，此外还有交、直流两用 TIG 焊机；按引弧方式分类，可分为接触引弧式和非接触引弧式 TIG 焊机。

(2) TIG 焊机的型号编制方法

国标 GB 10248—1988《电焊机型号编制方法》规定的钨极氩弧焊机的型号编制方法如下：

1 2 3 4 — 5 6 7

型号中的第 1、2、3、6 字位用汉语拼音字母表示；第 4、5、7 字位用阿拉伯数字表示。第 6、7 字位分别表示派生代号及改进序号，其他各字位所代表的意义见表 6.2。

表 6.2 钨极氩弧焊 (TIG) 焊机型号代码

第一字位		第二字位		第三字位		第四字位		第五字位	
大类名称	代表字母	小类名称	代表字母	附注特征	代表字母	系列序号	数字序号	基本规格	单位
TIG 焊机	W	自动焊	Z	直流	省略	焊车式	省略	额定焊接 电流	A
						全位置焊车式	1		
		手工焊	S	交流	J	横臂式	2		
						机床式	3		
		点焊	D	交直流	E	旋转焊头式	4		
						台式	5		
		其他	Q	脉冲	M	机械手式	6		
						变位式	7		
真空充气式	8								

6.2.2 钨极氩弧焊设备的组成

钨极氩弧焊 (TIG) 焊机通常由焊接电源、控制箱、焊炬、水冷系统及供气系统组成。自动钨极氩弧焊焊机还配有行走小车、焊丝送进机构等。

(1) 焊接电源

TIG 焊机要求使用具有陡降外特性或垂直外特性的弧焊电源，主要是为了得到稳定的焊接电流。TIG 焊机的电源有直流、交流和脉冲电源三种。直流电源有旋转式弧焊发电机、磁放大器式弧焊整流器、可控硅弧焊整流器、晶体管电源、逆变电源等几种。交流电源有正弦波交流电源及方波交流电源。TIG 焊机所用电源的空载电压一般要比手工电弧焊电源的空载电压高，部标 JB 2837—1988《钨极氩弧焊机技术条件》规定的 TIG 焊机的空载电压要求见表 6.3。

表 6.3 钨极氩弧焊 (TIG) 焊机的空载电压

焊机及电流种类		手工钨极氩弧焊		自动钨极氩弧焊	
		交流 (有效值)	直流 (平均值)	交流 (有效值)	直流 (平均值)
空载电压 V	最小	70	65	70	65
	最大	90	80	100	100

(2) 控制箱及引弧装置

1) 控制箱

控制箱中主要安装焊接时序控制电路，主要任务是控制提前送气、滞后停气、引弧、电流通断、电流衰减、冷却水流通断等。对于自动 TIG 焊机，还要控制小车行走机构行走以

及送丝机构送丝。

2) 引弧装置

钨极氩弧焊电弧引燃的方式有接触引弧及非接触引弧两种。

① 接触引弧 接触引弧是通过接触-回抽过程实现的。引弧时首先使钨极与工件接触，此时，短路电流被控制在较低的水平上（通常小于5A）；钨极回抽后，在很短的时间内（几微秒）将电流切换为所需要的大电流，将电弧引燃。这种方法仅适用于直流正接的直流氩弧焊机，最大的优点是避开了高频电流及高压脉冲的干扰，可用于计算机控制的焊接设备或焊接机器人中。

② 非接触引弧 大电流 TIG 焊机一般不采用接触引弧。因为接触引弧时，强大的短路电流不但使钨极因发生熔化而烧损，而且还易使液态钨进入熔池中，造成焊缝夹钨，影响焊缝力学性能。

常用的非接触引弧方式有以下两种。

a. 高频振荡器引弧。通常将高频振荡器串接在焊接回路中。当高频振荡器接通时，输出端可输出频率为150~260kHz、电压为3000V左右的高频电压，该电压施加在钨极和工件之间，击穿两极间的气隙，引燃电弧。在以前的交流 TIG 焊机中，曾经用高频振荡器作稳弧装置，但由于其相位控制不可靠，因此目前已很少使用。

b. 高压脉冲引弧。在焊接回路中串接一高压脉冲发生器。在引弧时，该发生器将2000~3000V的高压脉冲施加到钨极和工件之间，击穿气隙引燃电弧。对于直流 TIG 焊机来说，高压脉冲发生器与焊接回路的连接比较简单，只需通过一隔离变压器串接至焊接回路即可。对于交流 TIG 焊机来说，应通过一定的方式控制高压脉冲，使之叠加在反极性半波空载电压最大的相位处，以有利于电弧的引燃。高压脉冲引弧装置也广泛用作交流 TIG 焊的稳弧装置，不过稳弧时，高压脉冲应施加在正半波向负半波转变的相位处。

(3) 焊炬、行走小车及送丝机

钨极氩弧焊（TIG）焊炬又称 TIG 焊枪，其主要作用是：

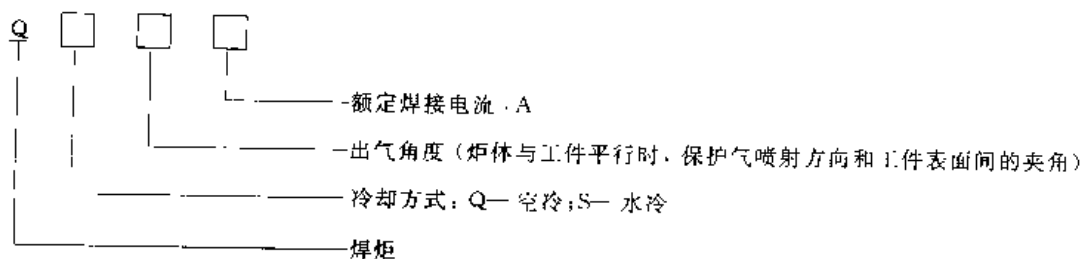
- a. 夹持钨极；
- b. 传导焊接电流；
- c. 向焊接区输出保护气体。

自动钨极氩弧焊焊机还配有行走小车及送丝机，以实现焊接电弧的自动移动及焊丝的自动送进。

依据冷却方式的不同，焊炬可分为水冷和空冷两种。水冷焊炬用水对焊接电缆及喷嘴进行冷却，因此能够承受较大的焊接电流。空冷焊炬结构简单、质量小、便于操作，但允许通过的焊接电流较小。一般来说，焊接电流在160A以上的设备必须采用水冷焊炬。

按照焊炬的外部形状及特征，TIG 焊炬又可分为笔式及手把式两种。

钨极氩弧焊焊炬型号的编制方法如下。



选用手工钨极氩弧焊 (TIG) 焊炬时应考虑的因素有被焊工件材质、工件厚度、焊道层数、焊接电流的种类及极性、钨极直径、坡口形式、焊接速度、焊接接头的空间位置、经济性等。

(4) 气路和水路

① 气路系统 由氩气瓶、减压阀、流量计、软管及气阀等组成。气瓶用于盛放氩气或氦气。减压阀用于将瓶中的高压气体压力降低至焊接所需要的压力。流量计用于控制保护气体的流量。电磁气阀用于控制气流的关断,其电源电压通常为 24V 或 36V。

② 水路系统 通以冷却水,用于冷却焊炬及电缆。通常水路中设有水压开关,当水压太低或断水时,水压开关将断开控制系统电源,使氩弧焊焊机停止工作,以保护焊炬不被损坏。

6.2.3 钨极氩弧焊设备的特点

(1) 直流手工 TIG 焊机及电源极性

直流 TIG 焊机采用直流电源。日前较常用的国产直流手工钨极氩弧焊 (TIG) 焊机一般配用品闸管整流电源、独立的控制箱、焊炬等。近年来,还开发了新型 IGBT 逆变式 TIG 焊机。新型逆变式焊机的特点是体积小、质量小,且电源与控制箱一体化,结构稳定,已经获得广泛应用。

TIG 直流焊接时有两种接线方法:直流反接 (DCRP) 及直流正接 (DCSP)。

① 直流正接 (DCSP) 工件接正极,钨棒接负极。由于钨极 (通常为钨钨极或钍钨极) 的电子逸出功较小,电子发射能力强,而且耐高温,因此,较小直径的钨棒就可承载较大的电流。与直流反接相比,在同样的焊接电流下,直流正接可采用较小直径的钨棒,这样就使电流密度增大,提高了电弧稳定性,并在工件上形成窄而深的熔池。实际生产中采用直流正接可广泛用于除铝、镁及其合金以外的其他金属的焊接。

② 直流反接 (DCRP) 工件接负极,电子从工件的熔池表面发射,经过电弧加速撞向电极,使钨极易过热而烧损。因此,钨极的载流能力较小,电弧也不够稳定。但直流反接时,电弧具有“阴极清理作用”,能去除工件表面的氧化膜。实际生产中,这种接法仅用于焊接铝、镁及其合金的薄板。

(2) 交流 TIG 焊机

交流 TIG 焊机采用具有陡降特性的交流电源。交流 TIG 焊机分为正弦波交流及方波交流两种。用交流 TIG 焊机焊接时,焊接电弧的极性发生周期性变化,因此,工艺上兼有直流正接及直流反接的特点。交流 TIG 焊机广泛用于铝、镁及其合金的焊接,在交流负半波 (工件为负极) 时,氩弧对工件产生阴极雾化作用;在交流正半波时,电弧的热量主要集中在工件上,不但使钨极得以冷却,还使焊缝获得足够的熔深。但交流 TIG 焊机存在电弧不稳定及直流分量等问题,因此在焊接设备上应采取专门的措施予以解决。

① 直流分量的消除 由于钨极与工件的电、热物理性能以及几何尺寸相差很大,使交流 TIG 焊正、负半波的电导率、电弧电压、再引燃电压存在很大的差别。因此,正、负半波电流不对称,从而导致直流分量。直流分量既影响焊缝成形,又恶化设备的工作条件,因此设备中通常配置消除直流分量的装置。

正弦波交流 TIG 焊机通常通过在焊接主回路串接大容量无极性电容器的方法来消除直流分量,这种方法既可完全消除直流分量,又不额外损耗能量。

② 稳弧装置 交流 TIG 焊机焊接时,极性的交替变化使电弧周期性地熄灭和引燃,而

电弧的重新引燃要求外加电压大于再引燃电压。正弦波交流电弧的电流、电压过零时速度较慢，电源电压达到再引燃电压所需要的时间较长，存在较长的熄弧时间，电弧不稳定；特别是从正半波向负半波转变时，由于母材发射电子的能力弱，电弧的重新引燃特别困难，所以正弦波交流 TIG 焊机必须采取稳弧措施。一般是通过在焊接回路中串接一高压脉冲发生器或高频振荡器来实现稳弧。稳弧脉冲一般施加在电流极性发生变化的瞬间。

方波交流电弧的电压和电流过零时，电流和电压的变化在瞬间内完成，因此在较低的焊接电压下（20~40V）就可使电弧再引燃，基本上无熄弧时间，电弧稳定性很好。所以，方波交流 TIG 焊机不需采取任何稳弧措施。交流方波 TIG 焊机特别适于焊接铝合金、镁合金、铝基复合材料以及热敏感性强的材料。

交流 TIG 焊机有正弦波及方波两类。除了直流 TIG 焊机及交流 TIG 焊机以外，国内外还生产了大量的交、直流两用的氩弧焊设备，以提高设备的利用率。

(3) 自动 TIG 焊机

与手工 TIG 焊相比，自动 TIG 焊机具有下列特点：

a. 送丝和电弧的移动通过机械方式自动进行，焊接过程稳定，劳动条件好，对操作人员的技术要求较低；

b. 焊接设备较复杂，设备价格较高；

c. 自动 TIG 焊只能焊接一些形状简单的焊缝或接头，如直缝、环缝、管子对接接头、管子相贯线、管板接头等。自动 TIG 焊机按用途分类，可分为通用自动焊机及专用自动焊机两大类。

1) 通用的自动 TIG 焊机

通用的自动 TIG 焊机有悬臂式、焊车式、机床式等几种。

① 悬臂式自动 TIG 焊机 由悬挂式机头、焊丝盘、立柱、横梁、控制箱、弧焊电源以及气路、水路等组成，焊丝盘与机头悬挂在横梁上。

② 机床式及焊车式自动 TIG 焊机 焊车式自动 TIG 焊机由焊接小车、控制盘、弧焊电源以及气路、水路等组成。焊接机头、焊丝盘、控制盘等均安装在小车上，随小车一起行走；而机床式 TIG 焊机由机床机架、控制箱、电源以及气路、水路等组成，机头、行走机构及焊丝盘均安装在固定的机床上。

2) 专用的自动 TIG 焊机

专用的自动 TIG 焊机的类型较多，常见的有管子对接焊机、管板焊机、薄板焊机等。

① 管子对接 TIG 焊机及管板对接 TIG 焊机 在锅炉及压力容器、化工、电力、原子能等工业部门的管线及换热器的生产及安装过程中，经常遇到固定管子对接以及管板对接问题，TIG 焊是解决这些问题的最佳方法。目前，国内外已生产了多种形式的专用管子对接、管板对接的自动 TIG 焊机。

管子对接 TIG 焊机由管子对接机头、控制箱、弧焊电源等组成，可对处于固定状态的、任意长度的管子进行焊接。焊接过程中机头绕管子轴线旋转，在计算机程序控制下分段进行焊接。管子安装时要求焊缝两侧的管子平直部分应具有一定长度，管子离开墙面一定距离。机头有敞开式及封闭式两种。前者焊接时电弧是明弧，后者焊接时电弧被机头遮闭住。封闭式机头通常需要水冷。管板对接 TIG 焊机由管板焊接机头、控制箱及电源组成。

② 薄板 TIG 焊机 薄板焊接最大的难点在于，焊接过程中薄板变形较大，容易烧穿。因此必须选用控制精度高的电源及焊接工装。采用的弧焊电源一般为脉冲 TIG 焊机，以利

于控制热输入。焊接工装需要有很高的制造精度，通常采用气动琴键式压板结构，配用可调的衬垫，以保证在整个焊缝方向上均匀压紧工件及良好的散热。

常见的薄板 TIG 焊机有两种：一种为纵缝焊机，另一种为环缝焊机。

目前，薄板 TIG 焊机的供货方式有两种，一种为整套供货；另一种为以焊接工装（焊接机床）为主，用户根据需要自行选择弧焊电源及附件。

6.2.4 钨极氩弧焊的焊接材料

钨极氩弧焊的焊接材料主要有电极材料、保护气体和填充金属等。

(1) 电极材料

钨极氩弧焊使用的电极材料有纯钨极、铈钨极及钍钨极，熔点均在 3400℃ 以上，且逸出功较低，因此具有较强的电子发射能力。表 6.4 列出了国产钨极材料的种类、牌号及成分。

表 6.4 国产钨极材料的种类、牌号及成分

种类和牌号		化 学 成 分/%						W
		ThO ₂	CeO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃ - Al ₂ O ₃	CaO	Mo	
钨	W	—	—	—	—	—	—	—
钍钨	WTh-7	0.7~0.99	—	0.06	0.02	0.01	0.01	余量
	WTh-10	1.0~1.49	—					
	WTh-15	1.5~2.0	—					
	WTh-30	3.0~3.5	—					
铈钨	WCe-5	—	0.5	<0.1				余量
	WCe-13	—	1.3					
	WCe-20	—	2.0					

钨极氩弧焊 (TIG) 电极的作用是导通电流、引燃电弧并维持电弧稳定燃烧。由于焊接过程中要求电极不熔化，因此电极必须具有高的熔点。此外，为了保证引弧性能好、焊接过程稳定，还要求电极具有较低的逸出功、较大的许用电流、较小的引燃电压。

钨极的规格有 0.5mm、1.0mm、1.6mm、2.0mm、2.5mm、3.2mm、4.0mm、5.0mm、6.3mm、8.0mm、10.0mm 等几种，供货长度通常为 76~610mm。

(2) 保护气体

钨极氩弧焊 (TIG) 一般采用氩气 (Ar)、氦气 (He)、氩氦混合气体 (Ar+He) 或氩氢混合气体 (Ar+H₂) 作为保护气体。一些常用气体的性能参数见表 6.5。

表 6.5 一些常用气体的性能参数

气体	相对分子质量 (或 相对原子质量)	密度 (273K, 0.1 MPa) / kg · m ⁻³	电离电位 /V	比热容 (273K) / J · g ⁻¹ · K ⁻¹	热导率 (273K) / W · m ⁻¹ · K ⁻¹	5000K 时 离解程度
Ar	39.944	1.782	15.7	0.523	0.0158	不离解
He	4.003	0.178	24.5	5.230	0.1390	不离解
H ₂	2.016	0.089	13.5	14.232	0.1976	0.96
N ₂	28.016	1.250	14.5	1.038	0.0243	0.038
空气	29	1.293	—	1.005	0.0238	—

1) 氩气 (Ar)

氩气是一种无色无味的单原子惰性气体，密度为空气的 1.4 倍，能够很好地覆盖在熔池及电弧的上方，形成良好的保护。同时，氩气电离后产生的正离子质量大，动能也大，对阴

极斑点的冲击力大，具有很强的阴极雾化作用，特别适合于焊接活泼金属。氩气具有较低的热导率，对电弧的冷却作用较小，因此电弧稳定性好，电弧电压较低。

焊接过程中通常使用瓶装氩气。氩气瓶的容积为 40L，外面涂成灰色，用绿色漆标以“氩气”二字。满瓶时的压力为 15MPa。氩气的纯度要求与被焊材料有关。我国生产的焊接用氩气有 99.99% 及 99.999% 两种纯度，均能满足各种材料的焊接要求，其成分要求见表 6.6。

表 6.6 焊接用氩气的成分要求 %

氩气纯度	N ₂	O ₂	H ₂	CnHm	H ₂ O
≥99.99	≤0.01	≤0.015	≤1.0005	≤0.001	30mg/m ³
≥99.999	≤10 ⁻⁴	≤10 ⁻⁵	≤5×10 ⁻⁶	10 ⁻¹	≤2×10 ⁻⁶

2) 氦气 (He)

氦气也是一种无色无味的单原子惰性气体，其密度较低，大约只有空气的 1/7，因此焊接时所用的流量通常比氩气高 1~2 倍。

氦气的热导率较高，对电弧的冷却作用大，因此，电弧的产热功率大且集中，适合于焊接厚板、高热导率或高熔点金属、热敏感材料及高速焊。在同样的条件下，钨极氦弧焊的焊接速度比钨极氩弧焊的焊接速度高 30%~40%。氦气的缺点是阴极雾化作用小，价格比氩气高得多。

焊接过程中通常使用瓶装氦气。氦气瓶的容积为 40L，外面涂成灰色，并用绿色漆标以“氦气”二字。满瓶时压力为 14.7MPa。焊接用氦气的纯度一般要求在 99.8% 以上。我国生产的焊接用氦气的纯度可达 99.999%，能满足各种材料的焊接要求。

3) 氩氦混合气体 (Ar+He)

氩弧具有电弧稳定、柔和、阴极雾化作用强、价格低廉等优点，而氦弧具有电弧温度高、熔透能力强等优点。采用氩、氦混合气体时，电弧兼具氩弧及氦弧的优点，特别适合于焊缝质量要求很高的场合。采用的混合比一般为：(75%~80%)He + (25%~20%)Ar。

4) 氩氢混合气体 (Ar+H₂)

氢气是双原子分子，且具有较高的热导率。采用氩、氢混合气体时，可提高电弧的温度，增大熔透能力，提高焊接速度，防止咬边。此外，氢气具有还原作用，可防止焊缝中 CO 气孔的形成。氩、氢混合气体主要用于镍基合金、镍-铜合金、不锈钢等材料的焊接。一般应将混合气体中氢的含量控制在 15% 以下。

(3) 填充金属

采用钨极氩弧焊 (TIG) 焊接厚板时，需要开 V 形坡口，并添加必要的填充金属。填充金属的主要作用是填满坡口，并调整焊缝成分，改善焊缝性能。

目前我国尚无专用 TIG 焊丝标准，一般选用熔化极气体保护焊用焊丝或焊接用钢丝。焊接低碳钢及低合金高强度钢时一般按照“等强匹配”原则选择焊丝；焊接铜、铝、不锈钢时一般按照“等成分匹配”原则选择焊丝。焊接异种金属时，如果两种金属的组织性能不同，则选用焊丝时应考虑抗裂性及碳的扩散问题；如果两种金属的组织相同，而力学性能不同，则最好选用成分介于两者之间的焊丝。

铝焊丝可按照 GB/10858—1989《铝及铝合金焊丝》选择合适的焊丝。铜焊丝可按照 GB/9460—1988《铜及铜合金焊丝》选择合适的焊丝。

6.2.5 钨极氩弧焊 (TIG) 工艺

(1) 焊前准备

1) 接头及坡口形式

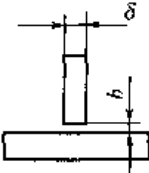
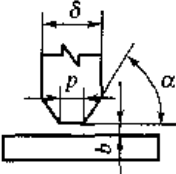
钨极氩弧焊 (TIG) 常用的接头形式有对接、搭接、角接、T形接头、卷边对接、端接及夹条对接等, 后面三种适用于薄板焊接。

坡口形式及尺寸根据材料类型、板厚等来选择。一般情况下, 板厚小于 3mm 时, 可开 I 形坡口; 板厚 3~12mm 时, 可开 V 或 Y 形坡口。表 6.7 列出了铝及铝合金焊接接头的坡口形状及尺寸。关于各种钢的具体坡口形状及详细尺寸, 可参照 GB 985—1988《气焊、手工电弧焊及气体保护焊缝坡口的基本形式与尺寸》。

表 6.7 铝及铝合金焊接接头的坡口形状及尺寸

接头及坡口形式	示意图	板厚 δ /mm	坡口尺寸		
			间隙 b /mm	钝边 p /mm	坡口角度 α /°
卷边		≤ 2	< 0.5	< 2	
对接接头	I形坡口	1~5	0.5~2		
	V形坡口	3~5 5~12	1.5~2.5 2~3	1.5~2 2~3	60°~70° 60°~70°
	X形坡口	> 10	1.5~3	2~4	60°~70°
搭接		< 1.3	0~0.5	$L \geq 2\delta$	-
		1.5~3	0.5~1	$L \geq 2\delta$	-
角接头	I形坡口	< 12	< 1	-	-
	V形坡口	3~5 > 5	0.8~1.5 1~2	1~1.5 1~2	60°~70° 60°~70°

续表

接头及坡口形式	示意图	板厚 δ /mm	坡口尺寸		
			间隙 b /mm	钝边 p /mm	坡口角度 α /(°)
T形接头		3~5	<1	—	—
		6~10	<1.5	—	—
		10~16	<1.5	1~2	60°

2) 焊前清理

氩气、氮气均是惰性气体，焊接过程中不与液态金属发生任何化学反应，因此 TIG 焊无去氢、脱氧作用。为了保证焊接质量，必须去除焊接接头附近的氧化膜、油脂及水分。清理方法主要有机械清理、化学清理及化学机械清理三种。

① 机械清理 采用钢丝刷、刮刀、砂布、喷砂或喷丸等机械方法去除工件表面上的氧化膜、油污等。对于铝及铝合金，通常采用刮刀或钢丝刷进行清理。对于大型钢质工件，可采用喷砂或喷丸法进行清理。而较小的不锈钢工件通常采用砂布打磨。

② 化学清理 依靠化学反应去除工件及焊丝表面的氧化膜及油污。特别适合于铝合金、钛合金、镁合金母材及焊丝的焊前处理。表 6.8 列出铝及铝合金氧化膜的化学清理配方及工艺条件。

表 6.8 铝及铝合金氧化膜的化学清理配方及工艺条件

材 料	碱 液			冲 洗	中 和 光 化			冲 洗	干 燥
	溶 液	温 度/°C	时 间/min		溶 液	温 度/°C	时 间/min		
纯铝	NaOH 6%~10%	40~50	≤20	清水	HNO ₃	室温	1~3	清水	100~110℃ 烘 干,再置于低温干 燥箱中
铝合金	NaOH 6%~10%	40~50	≤7	清水	HNO ₃	室温	1~3	清水	

(2) 工艺参数的选择原则

钨极氩弧焊的工艺参数主要有电流的种类及极性、焊接电流、焊接速度、钨极直径及形状、保护气体流量等。

1) 电流的种类及极性

不同的电流种类及极性具有不同的工艺特点，适用于不同材料的焊接。因此应首先根据工件的材料选择电流的种类及极性。不同电流类型及极性接法的特点和适用范围见表 6.9。

2) 焊接电流

焊接电流的大小决定熔深，因此，在选定了电流的种类及极性后，要根据板厚来选择电流的大小，此外还要适当考虑接头的形式、焊接位置等影响。

表 6.9 不同电流类型及极性接法的特点和适用范围

种 类		直 流			交 流	
		正极性	反极性	脉冲(正极性)	正弦波	方 波
清除氧化膜作用		无	强	无	有	有
电弧热分布	工件端	70%	30%	70%	50%	取决于极性 宽度比
	电极端	30%	70%	30%	50%	
引弧方式		非接触式 或接触式	非接触式	非接触式 或接触式	非接触式	非接触式
稳弧装置		不需要	不需要	不需要	需要	不需要
消除直流分量装置		不需要	不需要	不需要	需要	不需要
钨极载流能力		大	小	大	中等	中等
熔深		深而窄	浅而宽	深而窄	中等	中等
适用范围		用于除铝、镁及其合金以外的所有金属及合金的焊接	仅用于焊接厚度小于 3mm 的铝、镁及其合金	用于除铝、镁及其合金以外的所有金属及合金的焊接	常用于焊接铝、镁及其合金;也可焊接其他金属及合金,但效果不如直流正接	

3) 焊接速度

焊接速度影响焊接线能量,因此影响熔深及熔宽。通常根据板厚来选择焊接速度,而且为了保证获得良好的焊缝成形,焊接速度应与焊接电流、预热温度及保护气流量适当匹配。焊接速度太快时,易出现未焊透、咬边等缺陷;而焊接速度太慢时会出现焊缝太宽、烧穿等缺陷。

4) 钨极直径及端部形状

钨极的直径及形状是重要的 TIG 焊接参数之一。通常根据电流的种类、极性及大小来选择。钨极直径的选择原则是在保证钨极许用电流大于所用焊接电流的前提下,尽量选用直径较小的钨极。

钨极的许用电流决定于钨极直径、电流的种类及极性。钨极直径越大,其许用电流越大。直流正接时,钨极载流能力最大,直流反接时载流能力最小,交流时载流能力居于直流正接与直流反接之间。交流焊时,电流的波形对载流能力具有重要影响。表 6.10 列出不同条件下各种直径钨极的许用电流。

表 6.10 各种直径钨极的许用电流

电极直径 /mm	直 流/A		交 流 A					
	正极性	反极性	非对称波形			对称波形		
0.26	≥15	—	≥15	≥15	—	≥15	≥15	—
0.51	5~20	—	5~15	5~20	—	10~20	5~20	10~20
1.02	15~80	—	10~60	15~80	10~80	20~30	20~60	20~60
1.59	70~150	10~20	50~100	70~150	50~150	30~80	60~120	30~120
2.38	150~250	15~30	100~160	140~235	100~235	60~130	100~180	60~180
3.18	250~400	25~40	150~210	225~325	170~325	100~180	160~250	100~250
3.97	400~500	40~55	200~275	300~400	200~400	160~240	200~320	160~320
4.76	500~750	55~80	250~350	400~500	250~500	190~300	290~390	190~390
6.35	750~1000	80~125	325~450	500~630	325~630	250~400	340~525	250~525

注:所有数据均为纯氩气作保护气体时的数据。

电极的端部形状对焊接过程稳定性及焊缝成形具有重要影响，通常应根据电流的种类、极性、大小来选择。脉冲 TIG 焊时，由于在基值电流期间钨极受到冷却，所以直径相同的钨极的许用电流值明显提高。脉冲 TIG 焊推荐用的钨极端部形状尺寸及许用电流见表 6.11。

表 6.11 脉冲 TIG 焊推荐用的钨极端部形状尺寸及许用电流

钨极直径 mm	锥角 (°)	平顶直径 mm	恒定电流许用范围	脉冲电流许用范围
			A	A
1.0	12	0.12	2~15	2~25
	20	0.25	5~30	5~60
1.6	25	0.50	8~50	8~100
	30	0.75	10~70	10~140
2.4	35	0.75	12~90	12~180
	45	1.10	15~150	15~250
3.6	60	1.10	20~200	20~300
	90	1.50	25~250	25~350

5) 喷嘴孔径及氩气流量

喷嘴孔径越大，保护区越大，但太大时，熔池及电弧的可观察性变差。对于一定的喷嘴孔径，保护气流量有一个合适的范围，流量太小时，气体挺度差，保护效果不好；流量太大时，气流层中出现紊流，空气易卷入，保护效果也不好。喷嘴孔径及氩气流量通常根据电流的种类和大小、极性来选择，见表 6.12。

表 6.12 喷嘴孔径及氩气流量的选择

焊接电流 A	直流正接 (DCSP)		直流反接 (DCRP)	
	喷嘴孔径/mm	氩气流量/L·min ⁻¹	喷嘴孔径/mm	氩气流量/L·min ⁻¹
10~100	4~9.5	4~5	8~9.5	6~8
101~150	4~9.5	4~7	9.5~11	7~10
152~200	6~13	6~8	11~13	7~10
201~300	8~13	8~9	13~16	8~15
301~500	13~16	9~12	16~19	8~15

6) 钨极伸出长度

通常将露在喷嘴外面的钨极长度称为钨极的伸出长度。伸出长度太大时，钨极易过热，且保护效果差；而伸出长度太小时，喷嘴易过热。因此钨极伸出长度必须保持一适当的值。对接焊时，钨极的伸出长度一般保持在 5~6mm；焊接 T 形焊缝时，钨极的伸出长度最好为 7~8mm。

7) 喷嘴离工件的距离

喷嘴离工件的距离要与钨极伸出长度相匹配。一般应控制在 8~14mm 之间。距离过小时，影响工人的视线，且易导致钨极与熔池的接触，使焊缝夹钨并降低钨极寿命；距离过大时，保护效果差，电弧不稳定。

(3) 钨极氩弧焊的工艺参数

焊接铝及铝合金和不锈钢时，手工钨极氩弧焊 (TIG) 和自动钨极氩弧焊 (TIG) 的工艺参数分别见表 6.13 和表 6.14。

表 6.13 手工钨极氩弧焊 (TIG) 的工艺参数

材 料	板厚/mm	坡口形式	焊接层数 (正/反面)	钨极直径 /mm	焊丝直径 /mm	预热温度 /°C	焊接电流 /A	氩气流量 /L·min ⁻¹	喷嘴孔径 /mm
铝及铝合金	1	卷边	正 1	2	1.6	—	45~60	7~9	8
	1.5	卷边 或 I 形	正 1	2	1.6~2.0	—	50~80	7~9	8
	2	I 形	正 1	2~3	2~2.5	—	90~120	8~12	8~12
	3	Y 形 坡口	正 1	3	2~3	—	150~180	8~12	8~12
	4		1~2/1	4	3	—	180~200	10~15	8~12
	5		1~2/1	4	3~4	—	180~240	10~15	10~12
	6		1~2/1	5	4	—	240~280	16~20	14~16
	8		2/1	5	4~5	100	260~320	16~20	14~16
	10		3~4/1~2	5	4~5	100~150	280~340	16~20	14~16
	12		3~4/1~2	5~6	4~5	150~200	300~360	18~22	16~20
	14		3~4/1~2	5~6	5~6	180~200	340~380	20~24	16~20
	16		4~5/1~2	6	5~6	200~220	340~380	20~24	16~20
	18		4~5/1~2	6	5~6	200~240	360~400	25~30	16~20
	20	4~5/1~2	6	5~6	200~260	360~400	25~30	20~22	
	16~20	X 形 坡口	2~3/2~3	6	5~6	200~260	300~380	25~30	16~20
22~25	3~4/3~4		6~7	5~6	200~260	360~400	30~35	20~22	
不锈钢	1.0	对接	1	2	1.6	—	7~28	3~4	12~17
	1.2	对接	1	2	1.6	—	15	3~4	25
	1.5	对接	1	2	1.6	—	5~19	3~4	18~32

表 6.14 自动钨极氩弧焊 (TIG) 的工艺参数

材 料	板厚 /mm	焊接层数	钨极直径 /mm	焊丝直径 /mm	焊接电流 /A	氩气流量 /L·min ⁻¹	喷嘴孔径 /mm	送丝速度 /cm·min ⁻¹
铝及铝合金	1	1	1.5~2	1.6	120~160	5~6	8~10	—
	2	1	3	1.6~2	180~220	12~14	8~10	108~117
	3	1~2	4	2	220~240	14~18	10~14	108~117
	4	1~2	5	2~3	240~280	14~18	10~14	117~125
	5	2	5	2~3	280~320	16~20	12~16	117~125
	6~8	2~3	5~6	3	280~320	18~24	14~18	125~133
	8~12	2~3	6	3~4	300~340	18~21	14~18	133~142
不锈钢	1.0	1	2	1.6	120~126	8~10	—	260
	1.5	1	2	1.6	125~130	8~10	—	260
	2.0	1	3	1.6	138~142	6~8	—	260

(4) 钨极氩弧焊操作技术

1) 一般操作

焊接时, 焊枪、焊丝和工件之间必须保持正确的相对位置, 如图 6.1 所示。焊直缝时通常采用左向焊法。焊丝与工件间的角度不宜过大, 否则会扰乱电弧和气流。手工钨极氩弧焊时, 送丝可以采用断续送进和连续送进两种方法。

要绝对防止焊丝与高温的钨极接触, 以免钨极被污染、烧损, 电弧稳定性被损坏。断续送丝时要防止焊丝端部移出气体保护区而氧化。环缝自动钨极氩弧焊时, 焊枪应逆转方向偏离工件中心线一定距离, 以便于送丝和保证焊缝的良好成形。

2) 钨极氩弧点焊

钨极氩弧点焊设备与一般 TIG 焊设备不同之处是具有特殊控制装置和点焊焊枪。控制

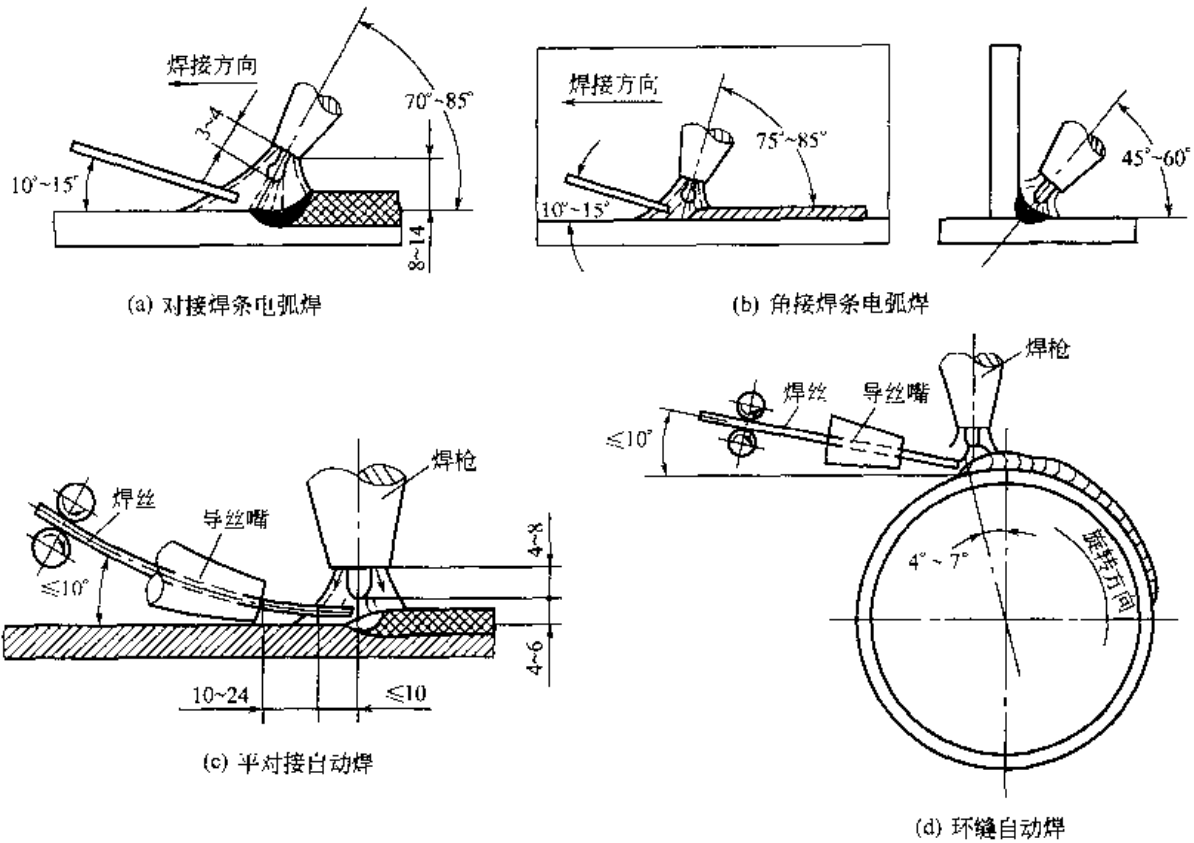


图 6.1 焊枪、焊丝和工件之间的相对位置

装置除能自动确保提前输送氩气、通气、起弧外，还有焊接时间控制、电流自动衰减以及滞后关断氩气等功能。普通的手工钨极氩弧焊设备中增加一个焊接时间控制器及更换喷嘴，也可以充当钨极氩弧点焊设备。

氩弧点焊焊枪端部的喷嘴将被焊的两块母材压紧，保证连接面密合，然后靠钨极和母材之间的电弧使钨极下方金属局部熔化形成焊点。其适用于焊接各种薄板结构以及薄板与较厚材料的连接，所焊材料主要为不锈钢、低合金钢等。

钨极氩弧点焊的焊前清理要求和一般的氩弧焊一样。焊接时既可采用直流正接，也可用交流电源辅加稳弧装置。通常都用直流正接，因为它比交流可以获得更大的熔深，可以采用较小的焊接电流（或者较短的时间），从而减小热变形和其他的热影响。

钨极氩弧点焊的引弧有两种方法。

① 高频引弧 依靠高频高压击穿钨极和工件之间的间隙而引弧；通常常用的是高频引弧。

② 诱导电弧引弧 先在钨极和喷嘴之间引起一小电流（约 5A）的诱导电弧，然后再接通焊接电源。诱导电弧由一个小的辅助电源供电。

通过调节电流值和电流持续时间控制焊点尺寸。增大电流或电流持续时间都会增加熔深和焊点直径，减小这些焊接参数则产生相反的效果。所以除了焊接电流外，焊接持续时间也必须采用精确的定时控制。电弧过长，熔池会过热并可能产生咬边，电弧太短，母材膨胀后会接触钨极，造成污染。

为了防止焊点表面过度凹陷和产生弧坑裂纹，点焊结束前使电流自动衰减或者进行二次脉冲电流加热。当焊点强度高要求严格时，可往熔池输送适量的填充焊丝。表 6.15 列出了

1Cr18Ni9Ti 钨极氩弧点焊的焊接工艺参数。

表 6.15 1Cr18Ni9Ti 钨极氩弧点焊的工艺参数

材料厚度 mm	焊接电流 A	焊接时间 s	二次脉冲电流 A	二次脉冲时间 s	保护气体流量 L·min ⁻¹	焊点直径 mm
0.5+0.5	80	1.03	80	0.57	7.5	4.5
0.5+0.5	100	1.03	100	0.57	7.5	5.5
2+2	160	9	300	0.47	7.5	8
2+2	190	7.5	180	0.57	7.5	9
3+3	180	18	280	0.69	7.5	10
3+3	160	18	280	0.69	7.5	11

注：1. 加入二次脉冲电流前电弧熄灭一段时间。
2. 电弧长度约 0.5~1.0mm。

3) 热丝钨极氩弧焊

热丝钨极氩弧焊示意如图 6.2 所示。填充焊丝在进入熔池之前约 100mm 处开始，由加热电源通过导电块对其通电，依靠电阻热将焊丝加热至预定温度，与钨极成 40°~60°角，从电弧后面送入熔池，这样熔敷速度可比通常所用的冷丝提高 2 倍。钢钨极氩弧焊时冷丝和热丝可允许的熔敷速度如图 6.3 所示。

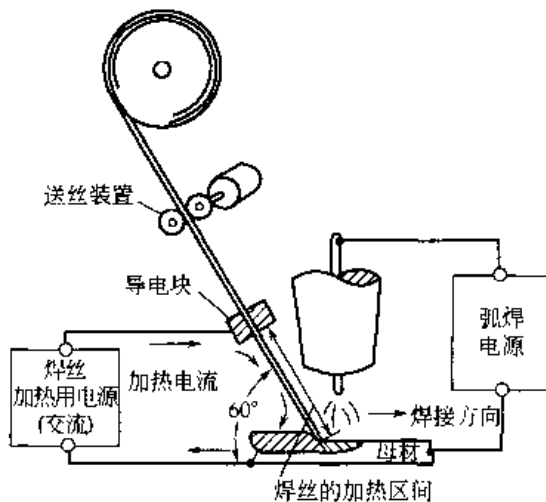


图 6.2 热丝钨极氩弧焊示意

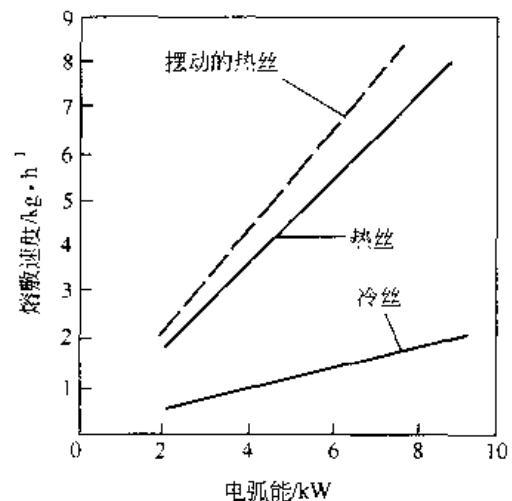


图 6.3 钢钨极氩弧焊时冷丝和热丝可允许的熔敷速度

热丝钨极氩弧焊时，由于流过焊丝的电流所产生磁场的影响，电弧产生磁偏吹而沿焊缝作纵向偏摆。为此，用交流电源加热填充焊丝，以减少磁偏吹。在这种情况下，当加热电流不超过焊接电流的 60% 时，电弧摆动的幅度被限制在 30° 左右。为了使焊丝加热电流不超过焊接电流的 60%，通常焊丝最大直径限制为 1.2mm。如果焊丝过粗，由于电阻小，需增加加热电流，这对防止磁偏吹是不利的。

热丝焊接已成功用于碳钢、低合金钢、不锈钢、镍和钛合金等。对于铝和铜，由于电阻率小，要求很大的加热电流，从而造成过大的电弧磁偏吹和熔化不均匀，所以不推荐热丝焊接。

热丝氩弧焊机由直流氩弧焊电源、预热焊丝的附加电源（通常用交流）、送丝机构以及控制、协调这三部分的控制电路组成。为了获得稳定的焊接过程，主电源还可采用低频脉冲

电源。在基值电流期间，填充焊丝通入预热电流，脉冲电流期间焊丝熔化。这种方法可以减小磁偏吹。脉冲电流频率可以提高到 100Hz 左右。

6.3 熔化极氩弧焊 (MIG)

熔化极氩弧焊是采用连续等速送进可熔化的焊丝与被焊工件之间的电弧作为热源来熔化焊丝和母材金属，形成熔池和焊缝的焊接方法。熔化极气体保护焊的电弧示意图 6.4。为了得到良好的焊缝应利用外加气体作为电弧介质并保护熔滴、熔池金属及焊接区高温金属免受周围空气的有害作用。

6.3.1 熔化极氩弧焊的熔滴过渡特点

根据所用焊丝及焊接规范的不同，熔化极氩弧焊的熔滴过渡方式有短路过渡、大滴过渡、喷射过渡等。

① 短路过渡 通过熔滴与熔池间的短路实现过渡。在采用细丝，并配以小电流及小电压进行焊接时，过渡形式为短路过渡。这种过渡工艺通常产生一体积小、凝固速度快的熔池，因此适合于薄板、全位置焊接。

② 大滴过渡 尺寸较大的熔滴（直径大于焊丝直径）以重力加速度从焊丝端部向熔池过渡。这种过渡形式一般出现在电弧电压较高、焊接电流较小的情况下。由于利用这种过渡工艺所形成的焊缝易出现熔合不良、未焊透、余高过大等缺陷，因此在实际焊接中一般不用。

③ 喷射过渡 尺寸细小的熔滴（直径小于焊丝直径）以远大于重力加速度的加速度沿焊丝轴线向熔池过渡。这种过渡形式出现在电弧电压较高、焊接电流较大的情况下。焊接不同的材料时，喷射过渡的形态是不同的；低碳钢、低合金钢及不锈钢焊接时的喷射过渡呈束流状，这种喷射过渡又称为射流过渡；铝及铝合金焊接时的喷射过渡呈滴状过渡，这种过渡称为射滴过渡。

由大滴过渡向喷射过渡转变的最小电流称为喷射过渡的临界电流。临界电流取决于电弧气氛、焊丝种类、焊丝直径等。表 6.16 列出了各种焊丝的大滴-喷射过渡转变的临界电流。大滴过渡形式主要用于平焊及横焊位置的焊接。但这种过渡易于导致指状熔深。为了避免指状熔深，生产中通常通过采用混合气体进行焊接。

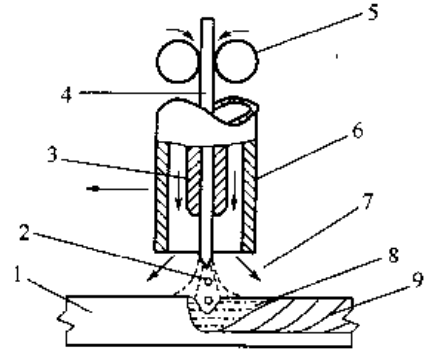


图 6.4 熔化极气体保护焊的电弧示意

1—母材；2—电弧；3—导电嘴；
4—焊丝；5—送丝轮；6—喷嘴；
7—保护气体；8—熔池；9—焊缝金属

表 6.16 各种焊丝的大滴-喷射过渡转变的临界电流

焊丝种类	焊丝直径 /mm	保护气体	临界电流 /A	焊丝种类	焊丝直径 /mm	保护气体	临界电流 /A
低碳钢	0.8	98% Ar+2% O ₂	150	脱氧铜	0.9	Ar	180
	0.9		165		1.2		210
	1.2		220		1.6		310
	1.6		275				
不锈钢	0.9	99% Ar+1% O ₂	170	硅青铜	0.9	Ar	165
	1.2		225		1.2		205
	1.6		285		1.6		270
铝及铝合金	0.8	Ar	90	钛及钛合金	0.8	Ar	120
	1.2		135		1.6		225
	1.6		180		2.4		320

除了上述三种熔滴过渡形式之外，亚射流过渡是介于短路过渡与喷射过渡之间的一种过渡形式，是铝及铝合金焊接中特有的一种熔滴过渡方式，产生于弧长较短，电弧电压较小时。由于弧长较短，尺寸细小的熔滴在即将以射滴形式过渡到熔池中时，发生短路，然后在电磁收缩力的作用下完成过渡。利用亚射流过渡工艺进行焊接时，电弧具有很强的固有自调节作用，采用等速送丝机配恒流特性的电源即可保持弧长稳定。

亚射流过渡形式主要用于平焊及横焊位置的铝及铝合金焊接，其优点是焊接过程稳定、焊缝外形及熔深非常均匀，且可避免指状熔深。

6.3.2 熔化极氩弧焊设备的分类及组成

(1) 熔化极氩弧焊设备的分类

① 按操作方式分类 熔化极氩弧焊设备分为半自动和自动两种。半自动熔化极氩弧焊设备是指焊丝自动送进、焊炬由人工操纵的熔化极氩弧焊设备。自动熔化极氩弧焊设备是指焊丝送进、焊炬行走均能够自动进行的熔化极氩弧焊设备。

② 按所用的电源分类 熔化极氩弧焊设备分为直流和脉冲两种。

③ 按送丝方式分类 熔化极氩弧焊设备分为等速送丝式和均匀送丝式两种。

④ 按用途分类 熔化极氩弧焊设备分为通用设备和专用设备两种。

⑤ 按照焊接工艺参数的调节方式分类 根据焊接电流的调节方式的不同，熔化极氩弧焊设备可分为以下三类。

a. 抽头式调节。这类设备一般设有粗调、细调两个转换开关，用于调节焊接电源的外特性，通过调节送丝机构的送丝速度调节电弧的稳定工作点。这种设备的优点是设备简单、价格便宜；缺点是只能有级调节，调节精度差，调节过程繁琐。

b. 两元化调节。这类设备一般设有两个旋钮，分别用于调节焊接电流及电弧电压。调节精度比抽头式高，但焊接工艺参数的调节仍较麻烦，焊接电流与电弧电压需要合理匹配。

c. 一元化调节。这类设备又称单旋钮式设备，仅设有一个电流调节按钮，调节焊接电流后，控制系统自动选定与该电流相匹配的电弧电压，通常能满足焊接要求。操作者只需根据焊缝形状、熔合情况或飞溅大小修正一下电弧电压就能获得满意的效果。

(2) 熔化极氩弧焊设备的组成

熔化极氩弧焊设备通常由弧焊电源、控制箱、水冷系统及供气系统、焊炬、送丝机构组成。自动熔化极氩弧焊设备还配有行走小车或悬臂梁等，送丝机构及焊炬一般安装在小车上或悬臂梁的机头上。

1) 熔化极氩弧焊电源

熔化极氩弧焊设备使用的电源有直流和脉冲两种，一般不使用交流电源。通常采用的直流电源有磁放大器式弧焊整流器、晶闸管式弧焊整流器、晶体管式弧焊整流器、逆变式弧焊整流器等几种。

利用细焊丝(直径小于1.2mm)焊接低碳钢、低合金钢及不锈钢时，一般采用平特性或缓降特性的电源，配以等速送丝式送丝机构。这种匹配的优点是，弧长发生变化时引起较大的电流变化，电弧自动调节功能强，能够保证弧长的稳定。同时，参数调节方便，通过改变送丝速度可调节电流，改变电源的外特性可调节电压。实际应用的平特性电源的外特性有一定的倾斜率，但一般不大于5V/100A。这种匹配方式的熔化极氩弧焊设备适用于薄板及中厚板的焊接。

利用亚射流过渡工艺焊接铝及铝合金时，一般采用恒流特性的电源，配以等速送丝式送丝机构，依靠电弧的固有自调节作用保证弧长的稳定。这类设备焊接时的最大优点是焊缝成

形及熔深非常均匀。

采用粗焊丝（直径大于 1.6mm）进行熔化极氩弧焊焊接时，电弧的自调节作用很弱。为了保证弧长自动调节的精度及灵敏度，一般采用均匀送丝（弧压反馈）式送丝机构，配以陡降特性或垂直特性的电源，依靠弧压反馈调节作用保证弧长的稳定。均匀送丝熔化极氩弧焊设备的优点是焊接速度快、效率高、焊接成本低、焊缝质量高，通常用于中厚度板及大厚度板的焊接。

2) 控制箱

控制箱中装有焊接时序控制电路，主要是控制焊丝的自动送进、提前送气、滞后停气、引弧、电流通断、电流衰减、冷却水流的通断及焊丝的送进等。对于自动焊机，还要控制小车的行走机构。

3) 气路和水路

熔化极氩弧焊设备的气路系统由气瓶、减压阀、流量计、软管及气阀等组成。

利用混合气体进行焊接时，要求将两种或三种气体按照一定的配比混合好，然后再输送至软管中。这要求利用一配比器，利用配比器可方便地调整混合气体的配比。采用双层保护气体焊接钛、镁等活泼金属时，如果两层保护气体具有不同的成分，应采用两套供气系统。

水路系统通以冷却水，用于冷却焊炬及电缆，通常水路中设有水压开关。当水压太低或断水时，水压开关将断开控制系统电源，使焊机停止工作，保护焊接设备不被损坏。

4) 焊枪

焊枪是半自动熔化极氩弧焊设备的关键组成部件之一，主要由导电嘴、喷嘴、焊枪体及冷却水套等组成。其作用是送丝、导通电流、向焊接区输送保护气体等。焊枪包括用于大电流、高生产率的重型焊枪和适用于小电流、全位置的轻型焊枪。

按照送丝方式的不同，半自动焊枪分为推丝式和拉丝式两种。拉丝式焊枪的送丝机构、送丝电机均安装在焊枪上，故焊枪比较笨重，但可在远离焊机的位置作业。推丝式焊枪结构简单、质量小、操作灵活，应用较广泛。

按照冷却方式的不同，半自动熔化极氩弧焊焊枪可分为气冷式和水冷式两种，额定电流在 200A 以下的焊枪通常为气冷式焊枪，超过上述电流时应该采用水冷式焊枪。半自动焊枪按照外形通常分为鹅颈式及手枪式两种，鹅颈式焊枪应用最广泛，它适合于细丝焊，使用灵活方便。典型鹅颈式气冷焊枪的示意图见图 6.5。

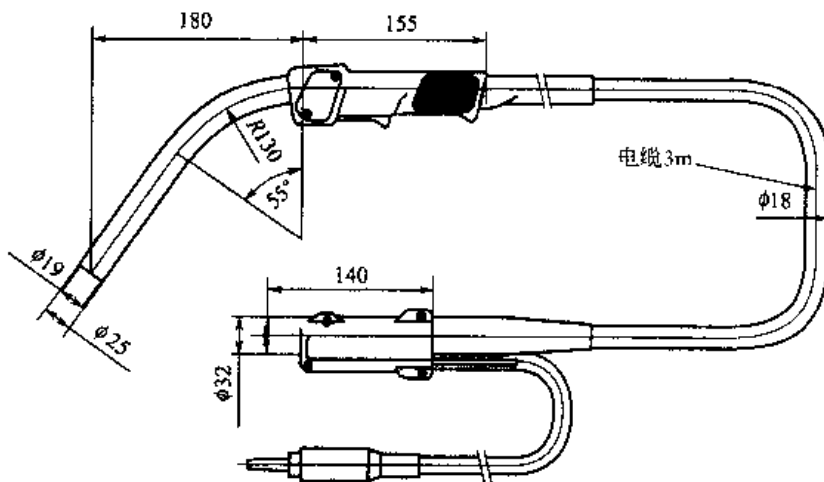


图 6.5 典型鹅颈式气冷焊枪的示意

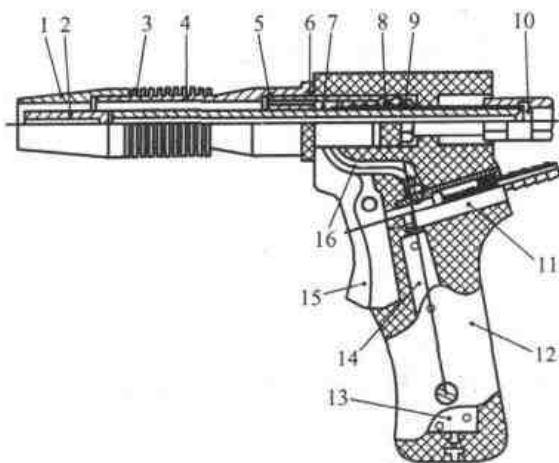


图 6.6 典型的手枪式焊枪的结构示意
 1—喷嘴；2—导电嘴；3—套筒；4—导电杆；
 5—分流环；6—挡圈；7—气室；8—绝缘圈；
 9—紧固螺母；10—锁母；11—球型气阀；
 12—枪把；13—退丝开关；14—送丝开关；
 15—扳机；16—气管

手枪式焊枪适合于较粗的焊丝，它一般采用水冷，典型的手枪式焊枪的结构示意图 6.6。几种手枪式熔化极气体保护焊枪的技术参数见表 6.17。自动焊焊枪的结构与半自动焊枪相似，但其载流容量较大，工作时间较长，一般都采用水冷。

除了上述两种推丝焊枪外，还有两种拉丝焊枪。其中有一种焊枪上不但装有小型送丝机构，而且还装有质量约 5kg 的小型焊丝盘（见图 6.7）。这种焊枪主要用于细焊丝和软焊丝（如铝焊丝）。

5) 送丝机构及软管

MIG、MAG 以及 CO₂ 焊所使用的送丝机构是相同的，一般由焊丝盘、送丝电机、减速装置、送丝滚轮、压紧装置以及送丝软管等组成

表 6.17 几种手枪式熔化极气体保护焊枪的技术参数

型 号	Q-1	Q-3	Q-11	Q-17	Q-19
送丝方式	推丝式	推丝式	推拉丝式	推丝式	推丝式
额定焊接电流/A	500	200	160	385	250
负载持续率/%	60	100	60	100	60
焊丝种类	铝焊丝	钢焊丝/铝焊丝	钢焊丝	钢焊丝/铝焊丝	钢焊丝
焊丝直径/mm	2~3	0.8~1.2	0.6、0.8、1.0	2.4、2.8、3.2	1.0~1.2
电缆长度/m	3	3	3	3	10
质量/kg	0.6	1.2	3(包括焊丝盘)	0.66	0.6

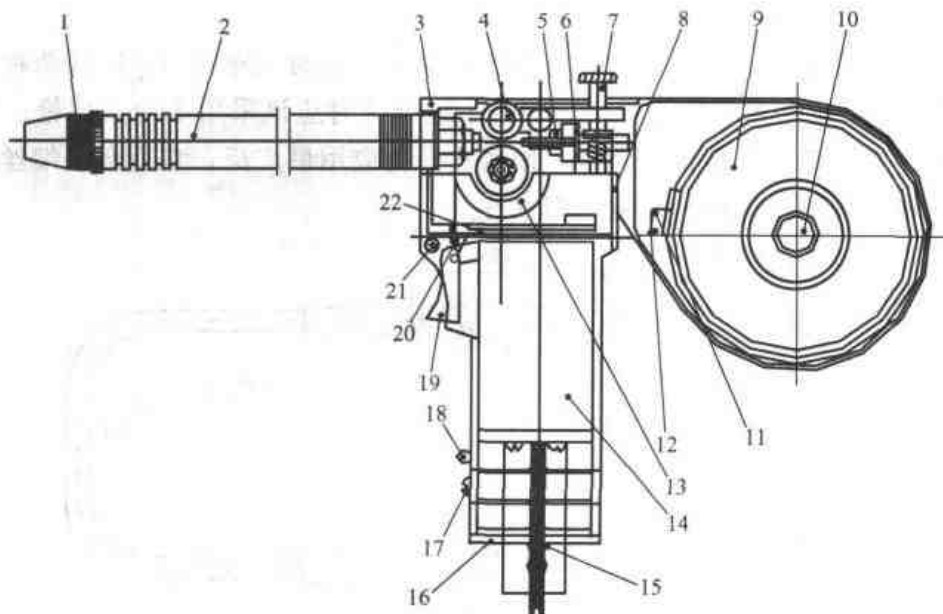


图 6.7 带有焊丝盘的拉丝式焊枪

1—喷嘴；2—外套；3—绝缘外壳；4—送丝滚轮；5—螺母；6—导丝杆；
 7—调节螺杆；8—绝缘外壳；9—焊丝盘；10—压栓；11—螺钉；12—压片；
 13—减速箱；14—电动机；15—螺钉；16—底板；17—螺钉；
 18—退丝按钮；19—扳机；20—触点；21、22—螺钉

成。此外，有些送丝机构还配有焊丝校直装置。送丝机构的主要作用是将焊丝输送到焊接区，并通过一定的控制方式（等速送丝及弧压反馈）保证弧长的稳定。

根据速度调节方式，送丝机构分为等速送丝和均匀（弧压反馈）送丝两种。根据送丝滚轮与送丝软管的相对位置，送丝机构可分为推丝式、拉丝式及推拉丝式三种。

① 推丝式 推丝式送丝机构的送丝滚轮位于送丝软管之后，是一种应用最广泛的送丝机构，其特点是结构简单、焊枪轻便。但焊丝进入焊枪前要经过一段较长的软管，阻力较大，因此主要适用于送丝距离小于 3m 的场合。

② 拉丝式 拉丝式送丝机构的送丝滚轮和送丝电机均安装在焊枪上，特点是送丝稳定、可靠，但增加了焊枪的质量，加重了焊工的劳动强度。

③ 推拉丝式 推拉丝式送丝机构同时采用推丝电机及拉丝电机，推丝电机提供主要动力，保证焊丝的稳定送进，拉丝电机的作用是将送丝软管内的焊丝拉直，并克服焊丝通过送丝软管时的摩擦阻力。这种送丝机构的送丝距离可达 15m 左右，但机构较复杂，目前应用较少。

送丝软管一般用弹簧钢丝绕制，或用四氟乙烯或尼龙等制成。前者适用于不锈钢、碳钢、低合金钢等的焊接，后者适用于铝及铝合金等的焊接。应合理选用送丝软管内径，以减小送丝阻力。表 6.18 列出不同直径的焊丝应选配的送丝软管直径。

表 6.18 不同直径的焊丝应选配的送丝软管直径

焊丝直径/mm	0.8~1.0	1.0~1.4	1.4~2.0	2.0~3.5
软管直径/mm	1.5	2.5	3.2	4.7

6.3.3 熔化极氩弧焊工艺参数的选择

熔化极氩弧焊（MIG）的工艺参数主要有焊丝直径、焊接电流、焊接电压、焊接速度、焊丝伸出长度、保护气体的种类及流量、电源极性、焊枪倾角、焊接方向以及喷嘴高度等。

(1) 焊丝的种类及直径

熔化极氩弧焊一般采用与母材成分相近的焊丝。有时为了改善焊接性，提高接头强度，采用与母材成分不同的焊丝。表 6.19 列出各种铝及其合金通常选用的焊丝。表 6.20 列出常用铝及其合金焊丝的化学成分。表 6.21 列出熔化极氩弧焊焊接不锈钢时通常选用的焊丝。

表 6.19 铝及其合金焊丝的选择

母 材	焊 丝	母 材	焊 丝
纯 Al; L ₁ 、L ₂ 、L ₃ 、L ₄ 、L ₅ 、L ₆	同母材或丝 301、丝 311	LF ₆	同母材或 LF ₆ + (0.15%~0.24%)Ti
LF ₂₁	同母材或丝 321、丝 311	LY ₁₁	(6%~7%)Cu、(2%~3%)Mg、
LF ₂	同母材或 LF ₃ 、丝 311	LY ₁₂	0.2%Ti、其余为 Al
LF ₃	同母材或 LF ₅ 、丝 311	LY ₃	(6%~7%)Cu、(2%~2.5%)Ni、
LF ₅	同母材或 LF ₆ 、丝 311		(1.6%~7%)Mg、(0.4%~0.6%)Mn、
			(0.2%~0.3%)Ti、其余为 Al

表 6.20 常用铝及其合金焊丝的化学成分

牌 号	名 称	化 学 成 分/%					
		Mg	Mn	Si	Fe	Ti	Al
丝 301	纯铝焊丝		—	≤0.3	≤0.3		99.6
丝 311	铝硅焊丝			4.5~6	≤0.6	—	余量
丝 321	铝锰焊丝	—	1.0~1.6	—	≤0.7	—	余量
丝 331	铝镁焊丝	4.7~5.7	0.2~0.6	≤0.4	≤0.4	0.05~0.2	余量

表 6.21 焊接不锈钢时通常选用的焊丝

母 材	焊 丝 牌 号	焊丝主要成分
00Cr18Ni11 (低碳,且焊后不进行热处理)	H00Cr19Ni9	20%Cr,10%Ni,<0.03%C
0Cr18Ni10	H0Cr19Ni9	20%Cr,10%Ni
1Cr18Ni9Ti	H0Cr19Ni9Ti	19%Cr,9%Ni,Ti
1Cr18Ni9Ti,用于耐热环境	H1Cr19Ni10Nb	19%Cr,10%Ni,Nb
1Cr18Ni12Mo3Ti	H0Cr19Ni11Mo3	19%Cr,11%Ni,2.5%Mo
1Cr18Ni8	H1Cr25Ni13	25%Cr,13%Ni
2Cr25Ni20Si2,2Cr23Ni18	H1Cr25Ni20	25%Cr,20%Ni

焊丝直径根据工件的厚度、施焊位置来选择。薄板焊接及空间位置的焊接通常采用细丝(直径小于或等于 1.2mm),平焊位置的中等厚度板及大厚度板焊接通常采用粗丝。表 6.22 列出直径 0.8~2.0mm 焊丝的适用范围。

表 6.22 直径 0.8~2.0mm 焊丝的适用范围

焊丝直径/mm	工件厚度/mm	施焊位置	熔滴过渡形式
0.8	1~3	全位置	短路过渡
1.0	1~6	全位置、单面焊双面成形	短路过渡
1.2	2~12		
	中等厚度、大厚度	打底	
1.6	6~25	平焊、横焊或立焊	射流过渡
	中等厚度、大厚度		
2.0	中等厚度、大厚度		

在平焊位置焊接大厚度板时,可采用直径 3.2~5.6mm 的焊丝,这时焊接电流可调节到 500~1000A。这种粗丝大电流焊的优点是熔透能力强、焊道层数少、焊接生产率高、焊接变形小。

薄板(厚度 2mm 以下铝材、3mm 以下的不锈钢)或全位置焊接通常选用脉冲喷射过渡或短路过渡进行焊接,厚板通常选用喷射过渡或亚射流过渡(后者仅适用于铝及铝合金)进行焊接。

(2) 焊接电流

焊接电流是最重要的焊接工艺参数。熔化极氩弧焊通常采用直流反接(DCRP),这种接法的优点是,过渡稳定,熔透能力大且阴极雾化效应大。

实际焊接中根据工件厚度、焊丝直径、焊接位置来选择焊接电流。采用等速送丝式焊机焊接时,焊接电流的是通过送丝速度来调节的。表 6.23 列出低碳钢熔化极氩弧焊所用的焊接电流范围。

表 6.23 低碳钢熔化极氩弧焊的焊接电流范围

焊丝直径/mm	焊接电流/A	熔滴过渡方式	焊丝直径/mm	焊接电流/A	熔滴过渡方式
1.0	40~150	短路过渡	1.6	270~500	射流过渡
1.2	80~180		1.2	80~220	脉冲射流过渡
1.2	220~350	射流过渡	1.6	100~270	

当所有其他参数保持恒定时,焊接电流与送丝速度或熔化速度以非线性关系变化。当送丝速度增加时,焊接电流也随之增大。碳钢焊丝和铝合金焊丝的焊接电流与送丝速度之间的关系如图 6.8 所示。对每一种直径的焊丝,在低电流时曲线接近于线性;可是在高电流时,

特别是细焊丝时，曲线变为非线性。而且随着焊接电流的增大，熔化速度以更高的速度增加。

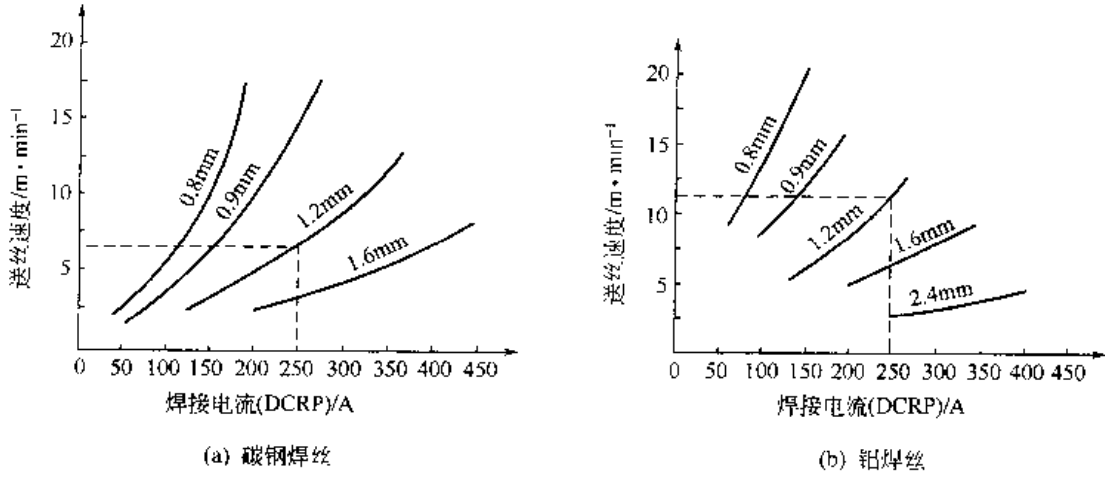


图 6.8 焊丝焊接电流与送丝速度的关系曲线

图 6.9 所示为不锈钢焊丝和铜焊丝的焊接电流与送丝速度的关系曲线。当焊丝直径增加时（保持相同的送丝速度），要求更高的焊接电流。送丝速度与焊接电流的关系还受焊丝化学成分的影响。这一影响关系通过比较图 6.8 和图 6.9 可以看出来。图中曲线的不同位置的斜率是由于金属熔点和电阻的不同引起的，此外还与焊丝伸出长度有关。

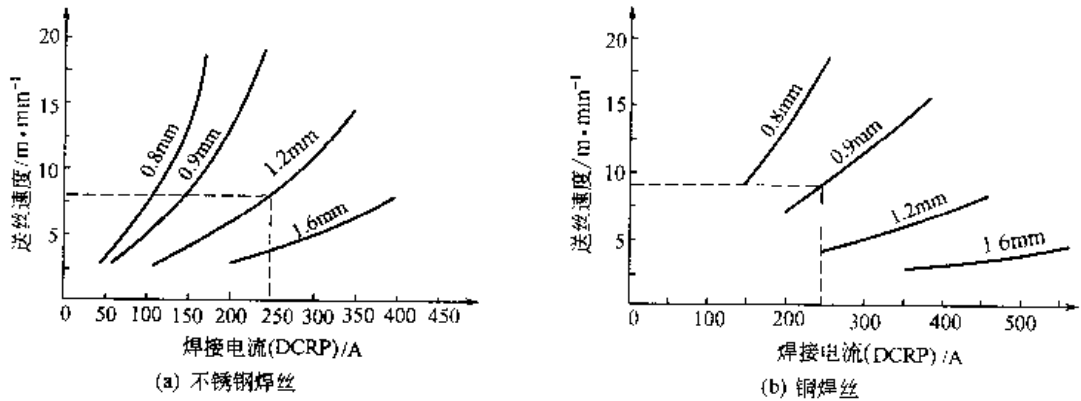


图 6.9 焊丝焊接电流与送丝速度的关系曲线

(3) 焊接电压

焊接电压主要影响熔宽，对熔深的影响很小。焊接电压应根据焊接电流的大小、保护气体的成分、被焊材料的种类、熔滴过渡方式等进行选择。表 6.24 列出熔化极氩弧焊不同保护气体焊接时的焊接电压。

(4) 焊接速度

焊接速度是重要焊接工艺参数之一。焊接速度与焊接电流适当配合才能获得良好的焊缝成形。在焊接热输入不变的条件下，如果焊接速度过大，那么熔宽、熔深减小，甚至产生咬边、未熔合、未焊透等缺陷。如果焊接速度过慢，不但直接影响生产率，还可能导致烧穿、焊接变形过大等缺陷。

自动熔化极氩弧焊的焊接速度一般为 25~150m/h；半自动熔化极氩弧焊的焊接速度一般为 5~60m/h。

表 6.24 熔化极氩弧焊不同保护气体焊接时的焊接电压/V

金属	喷射或细颗粒过渡					短路过渡			
	Ar	He	Ar+ 75%He	Ar+ (1%~5%)O ₂	CO ₂	Ar	Ar+ (1%~5%)O ₂	Ar+ 25%O ₂	CO ₂
铝	25	30	29		--	19		--	--
镁	26	--	28		-	16		-	-
碳钢		--	--	28	30	17	18	19	20
低合金钢	--	--		28	30	17	18	19	20
不锈钢	24	--	--	26		18	19	21	--
镍	26	30	28	-	-	22		-	--
镍-铜合金	26	30	28		-	22	--	-	--
镍-铬-铁合金	26	30	28	--	-	22		-	--
铜	30	36	33		-	24	22	-	--
铜-镍合金	28	32	30	--	-	23	--	-	--
硅青铜	28	32	30	28	-	23		--	--
铝青铜	28	32	30	--	-	23	--	-	--
磷青铜	28	32	30	23	-	23	--	-	--

注：焊丝直径为 1.6mm。

(5) 焊丝伸出长度

焊丝伸出长度影响焊丝的预热，对焊接过程及焊缝质量有显著影响。其他条件不变而焊丝伸出长度过长时，焊接电流减小，易导致未焊透、未熔合等缺陷；焊丝伸出长度过短时，易导致喷嘴堵塞及烧损。

焊丝伸出长度一般根据焊接电流的大小、焊丝直径及焊丝电阻率来选择，表 6.25 列出几种焊丝伸出长度的推荐值。

表 6.25 焊丝伸出长度的推荐值

焊丝直径/mm	焊丝伸出长度/mm		焊丝直径/mm	焊丝伸出长度/mm	
	H08Mn2SiA 焊丝	H06Cr19Ni9Ti 焊丝		H08Mn2SiA 焊丝	H06Cr19Ni9Ti 焊丝
0.8	6~12	5~9	1.2	8~15	7~12
1.0	7~13	6~11			

(6) 保护气体的种类及流量

熔化极气体保护焊采用的气体以氩气为主，但采用纯氩气时会产生以下问题：

- a. 易导致指状熔深；
- b. 焊接低碳钢及低合金钢时，液态金属的黏度高、表面张力大，易导致气孔、咬边等缺陷；
- c. 焊接低碳钢及低合金钢时，电弧不稳定，易导致熔深及焊缝成形不均匀。

熔化极氩弧焊一般不使用纯氩气体进行焊接，通常根据所焊接的材料采用适当比例的混合气体。表 6.26 列出焊接时常用的几种混合气体的工艺特点及应用范围。

保护气体的流量一般根据电流的大小、喷嘴孔径及接头形式来选择。对于一定直径的喷嘴，有一最佳的保护气体流量范围。流量过大，易产生紊流；流量过小，气流的挺度差，保护效果不好。气体流量最佳范围通常需要利用实验来确定，保护效果可通过焊缝表面的颜色来判断，见表 6.27。

表 6.26 常用富氩混合气体的工艺特点及应用范围

被焊材料	保护气体	化学性质	焊接方法	工艺特点及应用范围
铝及其合金	Ar+(20%~90%)He Ar+(10%~75%)He	惰性	熔化极 非熔化极	射流及脉冲射流过渡;电弧稳定,温度高,飞溅小,熔透能力大,焊缝成形好,气孔敏感性小;随着氩含量的增大,飞溅增大。适用于焊接厚铝板
	Ar+2%CO ₂	弱氧化性	熔化极	可简化焊前清理工作,电弧稳定,飞溅小,抗气孔能力强,焊缝力学性能好
不锈钢及高强度钢	Ar+(1%~2%)CO ₂	弱氧化性	熔化极	提高熔池的氧化性,降低焊缝金属的含氢量,克服指状熔深问题及阴极飘移现象,改善焊缝成形,可有效防止气孔、咬边等缺陷。用于射流电弧、脉冲射流电弧
	Ar+5%CO ₂ +2%O ₂	弱氧化性	熔化极	提高了氧化性,熔透能力大,焊缝成形较好,但焊缝可能会增碳。用于射流电弧、脉冲射流电弧及短路电弧
碳钢及低合金钢	Ar+(1%~5%)O ₂ 或 Ar+20%O ₂	氧化性	熔化极	降低射流过渡临界电流值,提高熔池的氧化性,克服阴极飘移及指状熔深现象,改善焊缝成形;可有效防止氮气孔及氧气孔,提高焊缝的塑性及抗冷裂能力,用于对焊缝性能要求较高的场合。宜采用射流过渡
	Ar+(20%~30%)CO ₂	氧化性	熔化极	可采用各种过渡形式,飞溅小,电弧燃烧稳定,焊缝成形较好,有一定的氧化性,克服了纯氩保护时阴极飘移及金属黏稠现象,防止指状熔深;焊缝力学性能优于纯氩作保护气体时的焊缝
	Ar+15%CO ₂ +5%O ₂	氧化性	熔化极	可采用各种过渡形式,飞溅小,电弧燃烧稳定,焊缝成形好,有良好的焊接质量,焊缝断面形状及熔深较理想。该成分的气体是焊接低碳钢及低合金钢的最佳混合气体
铜及其合金	Ar+20%N ₂	惰性	熔化极	可形成稳定的射流过渡;电弧温度比纯氩电弧的温度高,热功率提高,可降低预热温度,但飞溅较大,焊缝表面较粗糙
	Ar+(50%~70%)He	惰性	熔化极	采用射流过渡及短路过渡;热功率提高,可降低预热温度
镍基合金	Ar+(15%~20%)He	惰性	熔化极 非熔化极	提高热功率,改善熔池金属的润湿性,改善焊缝成形
	Ar+60%He	惰性	非熔化极	提高热功率,改善金属的流动性,抑制或消除焊缝中的CO气孔;焊缝美观,钨极损耗小、寿命长
钛锆及其合金	Ar+25%He	惰性	熔化极 非熔化极	可采用射流过渡、脉冲射流过渡及短路过渡,提高热功率,改善熔池金属的润湿性

注: 1. 表中的气体混合比为参考数据,焊接时可视具体的工艺要求进行调整。

2. 焊接低碳钢、低合金钢及不锈钢时,不必采用高纯 Ar,可用粗 Ar(一般含有 2%O₂+0.2%N₂)与 O₂或 CO₂配合即可。

3. 焊接钛、锆及镍时,应采用高纯 Ar。

表 6.27 保护效果与焊缝表面颜色之间的关系

母材	最好	良好	较好	不良	最差
不锈钢	金黄色或银色	蓝色	红灰色	灰色	黑色
钛及钛合金	亮银白色	橙黄色	蓝紫色	青灰色	白色(氧化钛)
铝及铝合金	银白色有光亮	白色(无光)	灰白色	灰色	黑色
紫铜	金黄色	黄色		灰黄色	灰黑色
低碳钢	灰白色有光亮	灰色	—	—	灰黑色

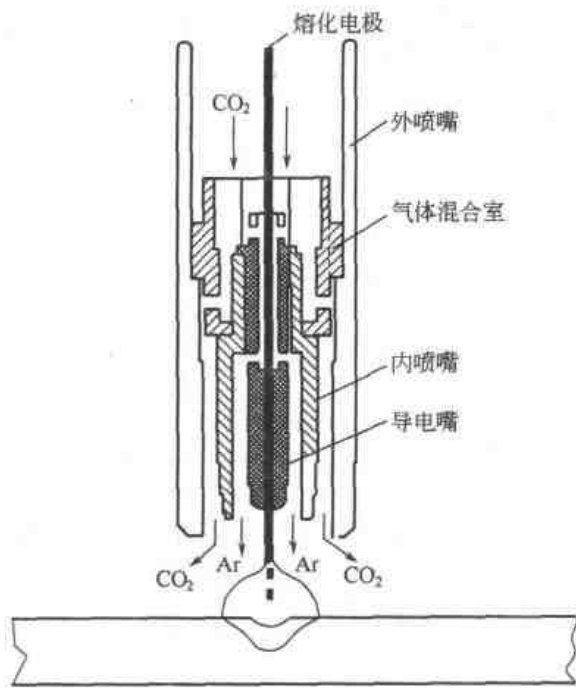


图 6.10 双层气体保护焊枪的喷嘴示意

熔化极气体保护焊有时采用双层气流保护可以得到更好的效果。此时喷嘴采用两个同心喷嘴组成，即内喷嘴和外喷嘴。气流分别从内、外喷嘴流出，如图 6.10 所示。某些情况下，例如利用大电流、粗焊丝焊接铝及铝合金时，需要采用双层保护气流。两层保护气流可采用不同成分的保护气体，内外层气体的流量最好控制在 1:1~1:2。

(7) 喷嘴至工件的距离

喷嘴高度应根据电流的大小选择，见表 6.28。该距离过大时，保护效果变差；过小时，飞溅颗粒易堵塞喷嘴，且阻挡操作者的视线。

(8) 焊丝位置

焊丝与工件间的夹角角度影响焊接热输入，从而影响熔深及熔宽。焊丝与工件的夹角有如下几个：

表 6.28 喷嘴高度推荐值

电流大小/A	<200	200~250	350~500
喷嘴高度/mm	10~15	15~20	20~25

a. 行走角，即在焊丝轴线与焊缝轴线所确定的平面内，焊丝轴线与焊缝轴线之垂线之间的夹角。

b. 工作角，即焊丝轴线与工件法线之间的夹角。

根据焊枪的移动方向，熔化极气体保护焊可分为左焊法和右焊法两种。焊枪从右向左移动，电弧指向待焊部分的操作方法称为左焊法。焊枪从左向右移动，电弧指向已焊部分的操作方法称为右焊法。左焊法时熔深较浅、熔宽较大、余高较小，焊缝成形好；右焊法的焊缝深而窄，焊缝成形不良。一般情况下采用左焊法。用左焊法进行平焊位置的焊接时，行走角一般保持在 5°~20°。

6.3.4 不同材料的熔化极氩弧焊工艺

熔化极氩弧焊已经广泛应用在各种金属结构中。不同材料熔化极氩弧焊工艺参数的选择不是孤立的，而是相互影响的。焊接工艺参数要通过大量的实验进行确定。如果改变某一参数，其他参数也需加以修正。

(1) 铝及其合金的熔化极氩弧焊

铝及其合金短路过渡熔化极氩弧焊的工艺参数见表 6.29。对接接头铝合金熔化极氩弧焊的工艺参数见表 6.30。T 形接头铝合金熔化极氩弧焊的工艺参数见表 6.31。铝合金大电流熔化极氩弧焊的工艺参数见表 6.32。

(2) 不锈钢的熔化极氩弧焊工艺

碳钢和低合金钢一般不采用熔化极氩弧焊，而是采用 CO₂ 气体保护焊，以提高焊接效率。重要的低合金钢结构可采用熔化极氩弧焊，大多是采用 Ar+CO₂ 混合气体保护焊。不

表 6.29 铝及其合金短路过渡熔化极氩弧焊的工艺参数

板厚/mm	接头及坡口形式	坡口间隙/mm	焊接位置	焊接电流/A	焊接电压/V	焊接速度/cm·min ⁻¹	焊丝直径/mm	送丝速度/m·min ⁻¹	保护气流量/L·min ⁻¹
2	对接、I形坡口	0~0.5	全位置	70~85	14~15	40~60	0.8	—	15
			平焊	110~120	17~18	120~140	1.2	5.9~6.2	15~18
1	T形接头、I形坡口	0~0.2	全位置	40	14~15	50	0.8	—	14
2			全位置	70 80~90	14~15 17~18	30~40 80~90	0.8	— 9.5~10.5	10 14

表 6.30 对接接头铝合金熔化极氩弧焊的工艺参数

板厚/mm	坡口形式及尺寸				层数	焊丝直径/mm	焊接电流/A	焊接电压/V	焊接速度/cm·min ⁻¹	保护气流量/L·min ⁻¹
	坡口形式	间隙/mm	坡口角度/(°)	钝边/mm						
4	I	0~2	—	—	1	1.6	170~210	22~24	5.5~7.5	16~20
		0~2	—	—	2	1.6	160~190	22~25	6~9	16~20
6	I	0~2	—	—	1	1.6	230~270	24~27	4~5.5	20~24
	V	0~2	60°	0~2	2	1.6	170~190	23~26	6~7	20~24
8	V	0~2	60°	0~2	2	1.6	240~290	25~28	4.5~6	20~24
	双V	1~2	60°	1~3	2	1.6	250~290	24~27	4.5~5.5	20~24
10	V	0~2	60°	0~2	3	1.6	240~260	25~28	4~6	20~24
	双V	0~2	60°	1~3	2	1.6	290~330	25~29	4.5~6.5	24~30
12	V	2~3	60°	1~2	4	1.6或 2.4	230~260	25~28	3.5~6	20~24
	双V	1~3	60°	2~3	2	2.4	320~350	26~30	3.5~4.5	20~24
16	双V	1~3	90°	2~3	4	2.4	310~350	26~30	3~4	24~30

表 6.31 T形接头铝合金熔化极氩弧焊的工艺参数

板厚/mm	坡口形式及尺寸		焊道层数	焊丝直径/mm	焊接电流/A	焊接电压/V	焊接速度/cm·min ⁻¹	保护气流量/L·min ⁻¹
	坡口形式	间隙/mm						
3	I	5~7 ^①	1	1.2	120~140	21~23	7~8	16
4	I	5~8 ^①	1	1.2或1.6	160~180	22~24	3.5~5	16~18
6	I	6~8 ^①	1	1.6或2.4	220~250	24~26	5~6	16~24
8	I	8~9 ^①	1	2.4	250~280	25~27	4~5.5	20~28
8	K	—	2~4	2.4	240~270	24~26	5.5~6	20~28
10	K	—	4~6	2.4	250~280	25~27	5~6	20~28
12	K	—	4~6	2.4	270~300	25~27	4.5~6	20~28

① 焊脚尺寸。

表 6.32 铝合金大电流熔化极氩弧焊的工艺参数

板厚/mm	接头形式	焊道层数	焊丝直径/mm	焊接电流/A	焊接电压/V	焊接速度/cm·min ⁻¹	保护气体	保护气流量/L·min ⁻¹
15	对接接头 (不开坡口)	2	2.4	400~430	28~29	4	Ar	80
20		2	3.2	440~460	29~30	4	Ar	80
25		2	3.2	500~550	29~30	3	Ar	100
25	对接接头 (双面V形坡口)	2	3.2	480~530	29~30	3	Ar	100
25		2	4.0	560~610	35~36	3	Ar+He	100
35		2	4.0	630~660	30~31	2.5	Ar	100
45		2	4.8	780~800	37~38	2.5	Ar+He	150
50		2	4.0	700~730	32~33	1.5	Ar	150
60		2	4.8	820~850	38~40	2	Ar+He	180
50	对接接头 (双面V形坡口)	2	4.8	760~780	37~38	2	Ar+He	150
75		2	5.6	940~960	41~42	1.8	Ar+He	180

锈钢件经常采用熔化极氩弧焊进行焊接。

不锈钢短路过渡熔化极氩弧焊的工艺参数见表 6.33。对接接头和 T 形接头不锈钢射流过渡熔化极氩弧焊的工艺参数分别见表 6.34、表 6.35。

表 6.33 不锈钢短路过渡熔化极氩弧焊的工艺参数

板厚 /mm	接头形式	坡口形式	焊丝直径 /mm	焊接电流 /A	焊接电压 /V	焊接速度 /cm·min ⁻¹	送丝速度 /m·min ⁻¹	保护气流量 /L·min ⁻¹
1.6	T 形接头	I 形坡口	0.8	85	15	4.25~4.75	460	7.5~10
2.0			0.8	90	15	3.25~3.75	480	7.5~10
1.6	对接	I 形坡口	0.8	85	15	4.75~5.25	460	7.5~10
2.0			0.8	90	15	2.85~3.15	480	7.5~10

表 6.34 对接接头不锈钢射流过渡熔化极氩弧焊的工艺参数

板厚 /mm	坡口形式及尺寸				焊道层数	焊丝直径 /mm	焊接电流 /A	焊接电压 /V	焊接速度 /cm·min ⁻¹	保护气流量 /L·min ⁻¹
	坡口形式	间隙 /mm	坡口角度 /°	钝边 /mm						
3.2	I	0~1.2	—	—	1	1.2	150~170	18~19	3.0~4.0	15
					1	1.2	200~220	22~23	5.0~6.0	15
4.5	I	0~1.2	—	—	1	1.2	160~180	20~21	3.0~3.5	20
					1	1.2	220~240	23~24	5.0~6.0	20
6	I	0~1	—	—	1	1.6	280~300	28~30	4.0~5.0	20
	V	0	60	3	2	1.6	260~280	25~27	3.5~4.0	20
8	I	0~1	—	0	2	1.6	300~350	30~34	4.0~4.5	20
10	I	0~1	—	—	2	1.6	350~400	34~38	3.5~4.0	20
12	V	0~1	60	5~7	2	1.6	300~350	30~34	3.0~3.5	20
12	双 V	0~1	60	6	2	1.6	330~350	33~35	3.0~3.5	20

表 6.35 T 形接头不锈钢射流过渡熔化极氩弧焊的工艺参数

板厚 /mm	坡口形式及尺寸				焊道层数	焊丝直径 /mm	焊接电流 /A	焊接电压 /V	焊接速度 /cm·min ⁻¹	保护气流量 /L·min ⁻¹
	坡口形式	间隙 /mm	坡口角度 /°	钝边 /mm						
1.6	I 形	0	—	3~4 ^①	1	0.9	90~110	15~16	4.0~5.0	15
2.3		0~0.8		3~4 ^①	1	0.9	110~130	15~16	4.0~5.0	15
3.2		0~1.2		4~5 ^①	1	1.2	220~240	22~24	3.5~4.0	15
4.5		0~1.2		4~5 ^①	1	1.2	220~240	22~24	3.5~4.0	15
6		0~1.2		5~6 ^①	1	1.6	250~300	25~30	3.5~4.0	20
8		0~1.6		6~7 ^①	1	1.6	280~330	27~33	3.5~4.0	20
10	V 形	0~1.2	45	—	2~3	1.6	250~300	25~30	3.0~4.0	20
12										

① 焊脚尺寸。

(3) 铜及其合金的熔化极氩弧焊

紫铜对接接头的喷射过渡熔化极氩弧焊的工艺参数见表 6.36。铜的大电流熔化极惰性

气体保护焊的工艺参数见表 6.37。

表 6.36 紫铜对接接头的喷射过渡熔化极氩弧焊的工艺参数

板厚 /mm	坡口 形式	坡口尺寸			层数	焊丝直径 /mm	送丝速度 /cm·min ⁻¹	预热温 度/°C	焊接电流 /A	焊接速度 /cm· min ⁻¹
		间隙 /mm	坡口角 度/(°)	钝边 /mm						
<4.8 ^①	I	0~0.8	---	—	1~2	1.2	45~78.7	38~93	180~250	3.5~5.0
6.4	V	0	80~90	1.6~2.4	1~2	1.6	37.5~52.5	93	250~325	2.4~4.5
12.5	双V	2.4~3.2	80~90	2.4~3.2	2~4	1.6	52.5~67.5	316	330~400	2.0~3.5
>16	双U	0	30	3.2	3~6	1.6	52.5~67.5	472	330~400	1.5~3.0
					3~6	2.4	37.5~47.5	472	500~600	2.0~3.5

① 保护气体为 Ar，其余为 Ar+75%He。

表 6.37 铜的大电流熔化极惰性气体保护焊的工艺参数

板厚/mm	接头形式	层数	焊丝直径 /mm	焊接电流/A	焊接电压/V	焊接速度 /cm·min ⁻¹
15	对接,60°V 形坡口	1	4.0	850	36	24
19	对接,60°V 形坡口	1	4.8	900	33	30
		2	4.8	900	37	30
25	对接,60°V 形坡口	1	4.8	1000	33	20
		2	4.8	1000	37	20

注：1. 保护气体为内侧 75%He+25%Ar，外侧 100%Ar；

2. 焊丝为脱氧铜。

6.4 脉冲惰性气体保护焊

6.4.1 脉冲钨极氩弧焊

(1) 脉冲钨极氩弧焊的工艺特点

① 电弧稳定、挺度好 当电流较小时，一般 TIG 焊易飘弧，而脉冲 TIG 焊的电弧挺度好，稳定性好，因此这种焊接方法特别适于焊接薄板。

② 焊接线能量低 脉冲电弧对工件的加热集中，热效率高。因此焊透同样厚度的工件所需的平均电流比一般 TIG 焊低 20%左右，从而减小了线能量，这有利于减小热影响区及焊接变形。

③ 易于控制焊缝成形 焊接熔池凝固速度快，高温停留时间短，所以既能保证一定熔深，又不易产生过热、流淌或烧穿现象，有利于实现不加衬垫的单面焊双面成形及全位置焊接。

④ 焊缝质量好 脉冲 TIG 焊缝由焊点相互重叠而成，后续焊点的热循环对前一焊点具有正火处理作用；由于脉冲电流对点状熔池具有强烈的搅拌作用，且熔池的冷却速度快，高温停留时间短，因此焊缝金属组织细密，树枝状晶不明显。这些都使得脉冲焊缝的性能得以改善。

脉冲 TIG 焊特别适合于薄板（薄至 0.1mm）、热敏感材料焊接以及难焊材料的焊接，还特别适合于全位置焊接、单面焊双面成形及打底焊。

(2) 脉冲钨极氩弧焊的分类

根据电流的种类，脉冲 TIG 焊可分为直流 TIG 焊及交流 TIG 焊两种。前者用于焊接不锈钢，后者主要用于焊接铝、镁及其合金。根据脉冲频率范围，脉冲 TIG 焊分为低频脉冲 TIG 焊、中频脉冲 TIG 焊及高频脉冲 TIG 焊三种。

1) 低频脉冲 TIG 焊

电流的频率范围为 0.1~15Hz。这是目前应用最广泛的一种脉冲 TIG 焊方法。在脉冲电流持续期间，焊件上形成点状熔池；脉冲电流停歇期间，利用基值电流维持电弧的稳定燃烧，降低了焊接线能量，并使熔池金属凝固，因此焊缝事实上是由一系列焊点组成。为了获得连续、气密的焊缝，两个脉冲焊点之间必须有一定的相互重叠，这要求脉冲频率 f 与焊接速度 v 之间必须满足下式，即

$$f = \frac{v}{60L_d} \quad (6.1)$$

式中 L_d ——相邻两焊点的最大允许间距，mm；

f ——脉冲频率，Hz；

v ——焊接速度，mm/min。

2) 中频脉冲 TIG 焊

电流的频率范围为 10~500Hz，特点是小电流下电弧非常稳定，且电弧力不像高频 TIG 焊那样高，因此是手工焊接 0.5mm 以下薄板的理想设备。

3) 高频脉冲 TIG 焊

电流的频率范围为 10~20kHz，特别适用于薄板的高速自动焊。高频脉冲 TIG 焊的工艺特点是：

a. 电磁收缩效应增加，电弧刚性增大，高速焊时可避免因阳极斑点的黏着作用而造成的焊道弯曲或不连续现象；

b. 电弧压力大，电弧熔透能力增大；

c. 熔池受到超声波振动，流动性增加，焊缝的物理冶金性能得以改善，有利于焊缝质量的提高；

d. 在较大的焊接速度下，能够保证焊道连续、不产生咬边和背面成形良好。

高频脉冲 TIG 焊工艺性能与一般 TIG 焊及等离子弧焊工艺性能的比较见表 6.38。

表 6.38 高频脉冲 TIG 焊工艺性能与一般 TIG 焊及等离子弧焊工艺性能的比较

电弧参数	焊接方法			电弧参数	焊接方法		
	高频 TIG	一般 TIG	等离子弧焊		高频 TIG	一般 TIG	等离子弧焊
电弧刚性	好	不好	好	电弧电流密度	中	小	大
电弧压力	中	低	高	焊炬尺寸	小	小	大

(3) 脉冲钨极氩弧焊工艺参数的选择

脉冲钨极氩弧焊的主要工艺参数有基值电流 I_b 、脉冲电流 I_p 、脉冲持续时间 t_p 、脉冲间歇时间 t_b 、脉冲周期 $T (=t_p + t_b)$ 、脉冲频率 $f (=1/T)$ 、脉冲幅比 $F (=I_p/I_b)$ 、脉冲宽比 $K [=t_p/(t_b + t_p)]$ 及焊接速度 v 。

1) 脉冲电流及脉冲持续时间

脉冲电流与脉冲持续时间之积被称为通电量，通电量决定了焊缝的形状尺寸，特别是熔深。因此，应首先根据被焊材料及板厚选择合适的脉冲电流及脉冲电流持续时间。焊接厚度

低于 0.25mm 的板时, 应适当降低脉冲电流值并相应地延长脉冲持续时间。焊接厚度大于 4mm 的板时, 应适当增大脉冲电流值并相应地缩短脉冲持续时间。

2) 基值电流

基值电流的主要作用是维持电弧的稳定燃烧, 因此在保证电弧稳定的条件下, 尽量选择较低的基值电流, 以突出脉冲 TIG 焊的特点。但在焊接冷裂倾向较大的材料时, 应将基值电流选得稍高一些, 以防止火口裂纹。基值电流一般为脉冲电流的 10%~20%。

3) 脉冲间歇时间

脉冲间歇时间对焊缝的形状尺寸影响较小。但过长时会显著降低热输入, 形成不连续焊道。

4) 脉冲幅比及脉冲宽比

脉冲宽比越小, 脉冲焊特征越明显。但太小时熔透能力降低, 电弧稳定性差, 且易产生咬边。因此, 脉冲宽比一般取 20%~80%。空间位置焊接时或焊接热裂倾向较大的材料时应选得小一些, 平焊时应选得大一些。

脉冲幅比越大, 脉冲焊特征越明显。但过大时, 焊缝两侧易出现咬边。因此脉冲幅比一般取 5~10。空间位置焊接时或焊接热裂倾向较大的材料时, 脉冲幅比应选得大一些, 平焊时选得小一些。

5) 焊接速度

低频脉冲 TIG 焊时, 焊接速度与脉冲频率之间要满足式 (6.1), 以保证形成连续致密的焊缝。低频直流脉冲 TIG 焊常用的脉冲频率范围见表 6.39。

表 6.39 低频直流脉冲 TIG 焊常用的脉冲频率范围

焊接方法	手工焊 TIG	自动焊接速度/cm·min ⁻¹			
		20	28	36	50
频率/Hz	1~2	≥3	≥4	≥5	≥6

(4) 不同材料的脉冲钨极氩弧焊

不锈钢直流脉冲 TIG 焊的工艺参数 (直流正接) 见表 6.40。铝合金交流脉冲 TIG 焊的工艺参数见表 6.41。

表 6.40 不锈钢直流脉冲 TIG 焊的工艺参数 (直流正接)

板厚/mm	脉冲电流/A	基值电流/A	脉冲持续时间/s	脉冲间歇时间/s	脉冲频率/Hz	焊接速度/cm·min ⁻¹	弧长/mm
0.3	20~22	5~8	0.06~0.08	0.08	8	50~60	0.6~0.8
0.5	55~60	10	0.08	0.06	7	55~60	0.8~1.0
0.8	85	10	0.12	0.08	5	80~100	0.8~1.2

表 6.41 铝合金交流脉冲 TIG 焊的工艺参数

材料	板厚/mm	焊丝直径/mm	脉冲电流/A	基值电流/A	脉宽比/%	脉冲频率/Hz	电弧电压/V	气体流量/L·min ⁻¹
LF ₃	2.5	2.5	95	50	33	2	15	5
	1.5	2.5	80	45	33	1.7	14	5
LF ₆	2.0	2.0	83	44	33	2.5	10	5
LY ₁₂	2.5	2.0	140	52	36	2.6	13	8
LD ₁₀	18	2.5	380~420	260~300	49	2	—	15

6.4.2 脉冲熔化极氩弧焊

(1) 脉冲熔化极氩弧焊的工艺特点

熔化极脉冲氩弧焊的焊接电流为脉冲电流，它与一般熔化极氩弧焊的主要区别是，利用脉冲弧焊电源代替一般弧焊电源。熔化极脉冲氩弧焊具有如下的工艺特点。

① 焊接参数的调节范围增大 熔化极脉冲氩弧焊可在平均电流小于临界电流的条件下获得射流过渡，能在高至几百安培、低至几十安培的范围内获得稳定的射流过渡。这一范围覆盖了一般熔化极氩弧焊的短路过渡及射流过渡的电流范围。因此，利用射流过渡工艺，熔化极脉冲氩弧焊既可焊薄板，又可焊厚板。

② 可有效地控制焊接线能量 熔化极脉冲氩弧焊的可控参数较多，电流参数 I 由原来的一个变为四个：基值电流 I_b ，脉冲电流 I_p ，脉冲维持时间 t_p ，脉冲间歇时间 t_b 。通过调节这四个参数可在保证焊透的条件下，将焊接线能量控制在较低的水平，从而减小了焊接热影响区及工件的变形。这对于热敏感材料的焊接是十分有利的。

③ 有利于实现全位置焊接 利用熔化极脉冲氩弧焊可在较小的线能量下实现喷射过渡，熔池的体积小，冷却速度快，因此，熔池易于保持，不易流淌。而且焊接过程稳定，飞溅小，焊缝成形好。

④ 焊缝质量好 脉冲电弧对熔池具有强烈的搅拌作用，可改善熔池的结晶条件及冶金性能，有助于消除焊接缺陷，提高焊缝质量。

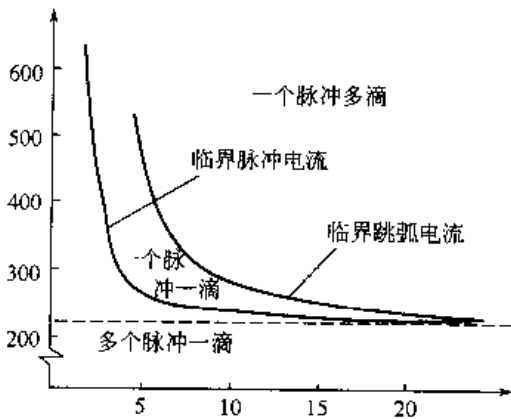


图 6.11 熔滴过渡方式与脉冲电流及脉冲持续时间的关系

(2) 脉冲熔化极氩弧焊的熔滴过渡

脉冲熔化极氩弧焊有三种过渡形式：一个脉冲过渡一滴（简称一脉一滴）、一个脉冲过渡多滴（简称一脉多滴）及多个脉冲过渡一滴（多脉一滴）。熔滴过渡方式主要决定于脉冲电流及脉冲持续时间，如图 6.11 所示。

三种过渡方式中，一脉一滴的工艺性能最好，多脉一滴是工艺性能最差。然而，一脉一滴的工艺范围很窄，焊接过程中难以保证。目前主要采用的是一脉多滴及一脉一滴的混合方式。

脉冲射流过渡仅产生在熔化极脉冲氩弧焊中。

熔滴以与脉冲电流频率一致的频率有节奏地向熔池中过渡。它是射流过渡的一个变种，可在较小的平均电流下实现。

目前，脉冲熔化极氩弧焊采用的脉冲电源主要有：单相整流式脉冲弧焊电源、磁放大器式脉冲弧焊电源、晶闸管式脉冲弧焊电源及 IGBT 逆变式脉冲弧焊电源等。利用 IGBT 逆变电源时，基值电流及脉冲电流由一个电源提供。而利用前几种电源时，基值电流及脉冲电流分别由不同的电源提供。提供基值电流的电源被称为维弧电源，提供脉冲电流的电源被称为脉冲电源。

根据操作方式，脉冲熔化极氩弧焊设备可分为半自动脉冲熔化极氩弧焊设备及自动脉冲熔化极氩弧焊设备两类。脉冲熔化极氩弧焊可用于焊接薄板、热敏感材料及全位置焊接。

(3) 脉冲熔化极氩弧焊的工艺参数

脉冲熔化极氩弧焊的主要工艺参数有基值电流 I_b 、脉冲电流 I_p 、脉冲持续时间 t_p 、脉冲间歇时间 t_b 、脉冲周期 $T (=t_p + t_b)$ 、脉冲频率 $f (=1/T)$ 、脉冲幅比 $F (=I_p/I_b)$ 、脉

冲宽比 $K [=t_p / (t_b + t_p)]$ 及焊接速度 v 。

1) 脉冲电流及脉冲持续时间

脉冲电流与脉冲持续时间决定了熔滴过渡方式，这两个参数要适当配合，使 (I_p, t_p) 点位于图 6.11 中的一脉一滴临界曲线之上。

脉冲电流还影响熔深，在平均电流一定的条件下，脉冲电流越大，熔深越大。选择脉冲熔化极氩弧焊工艺参数时，应综合考虑母材类型、板厚、焊接位置及熔滴过渡要求，首先选择平均电流、脉冲电流及脉冲持续时间。

2) 基值电流

基值电流的主要作用是维持电弧的稳定燃烧，同时预热焊丝及工件。在保证电弧稳定的条件下，尽量选择较低的基值电流，以突出脉冲熔化极氩弧焊的特点。

3) 脉冲频率及脉冲宽比

脉冲熔化极氩弧焊采用的脉冲频率一般在几十至几百赫兹的范围内。频率过低，焊丝易插入熔池，焊接过程不稳定；而频率过高则失去了脉冲氩弧焊的特点。脉冲频率通常根据焊接电流的大小来选择，电流较大时，脉冲频率应选得较大一些；焊接电流较小时，频率应选得较小一些。送丝速度一定时，脉冲频率越大，熔深越大。因此，焊接厚板时应选择较大的频率，焊接薄板时应选择较小的频率。

脉宽比越小，脉冲氩弧焊的特征越明显，而脉宽比过小则易导致电弧不稳定。因此，脉宽比一般取 25%~50%。全位置焊接、薄板及热敏感材料的焊接均要求脉宽比小一些。

(4) 不同材料的脉冲熔化极氩弧焊

铝合金脉冲熔化极氩弧焊的工艺参数见表 6.42。不锈钢脉冲熔化极氩弧焊的工艺参数见表 6.43。

表 6.42 铝合金脉冲熔化极氩弧焊的工艺参数

板厚/mm	接头形式	焊接位置	焊丝直径/mm	焊接电流/A	焊接电压/V	焊接速度/cm·min ⁻¹	气体流量/L·min ⁻¹
3	对接	水平	1.4~1.6	70~100	18~20	21~24	8~9
		横	1.4~1.6	70~100	18~20	21~24	13~15
		立向下	1.4~1.6	60~80	17~18	21~24	8~9
		仰	1.2~1.6	60~80	17~18	18~21	8~10
4~6	角接	水平	1.6~2.0	180~200	22~23	14~20	10~12
		立向上	1.6~2.0	150~180	21~22	12~18	10~12
		仰	1.6~2.0	120~180	20~22	12~18	8~12
14~25	角接	立向上	2.0~2.5	220~230	21~24	6~15	12~25
		仰	2.0~2.5	240~300	23~24	6~12	14~26

表 6.43 不锈钢脉冲熔化极氩弧焊的工艺参数

板厚/mm	坡口形式	焊接位置	焊丝直径/mm	脉冲电流/A	平均电流/A	焊接电压/V	焊接速度/cm·min ⁻¹	气体流量/L·min ⁻¹
1.6	I [⊙]	水平	1.2	120	65	22	60	20
1.6	I	横	1.2	120	65	22	60	20
1.6	90°V	立	0.8	80	30	20	60	20
1.6	I	仰	1.2	120	65	22	70	20
3.0	I	水平	1.2	200	70	25	60	20
3.0	I	横	1.2	200	70	24	60	20

续表

板厚/mm	坡口形式	焊接位置	焊丝直径 /mm	脉冲电流 /A	平均电流 /A	焊接电压 /V	焊接速度 /cm·min ⁻¹	气体流量 /L·min ⁻¹
3.0	90°V	立	1.2	120	50	21	60	20
3.0	I	仰	1.6	200	70	21	65	20
	60°V	水平	1.6	200	70	21	36	20
	60°V	横	1.6	200	70	23	15	20
				180	70	21	45	20
6.0	60°V	立	1.2	180	70	23	6	20
				30	50	19	1.5	20
	60°V	仰	1.2	180	70	23	8	20
				120	60	20	2	20

① 不开坡口的对接焊缝。

第7章 冷压焊和热压焊

冷压焊和热压焊都是变形焊的一种形式。冷压焊的整个过程是在室温下进行的，但冷压焊的变形程度大、施焊压力比较大。焊接件在强大的外界压力下，工件表面的氧化膜破裂并被塑性流动的金属挤向焊接件外部，使纯金属紧密接触，达到原子间结合，最后形成牢固的焊接接头。热压焊的焊接本质与冷压焊相同，但在工件加热条件下施加压力，使被焊界面金属产生塑性变形，形成界面金属原子间的结合。

7.1 冷压焊的工艺特点

在几十种焊接方法中，冷压焊是焊接温度最低的焊接方法。试验证明，冷压焊过程中可行的变形速度不会引起焊接接头的升温，也不存在界面原子的扩散。因此，冷压焊不会产生焊接接头常见的软化区、热影响区和脆性中间相，特别适用于热敏感材料、高温下易氧化的材料以及异种金属的焊接。

7.1.1 冷压焊分类及应用

(1) 冷压焊分类

根据焊接接头的形式，冷压焊主要包括搭接冷压焊和对接冷压焊两种。搭接冷压焊过程见图 7.1，对接冷压焊过程见图 7.2。

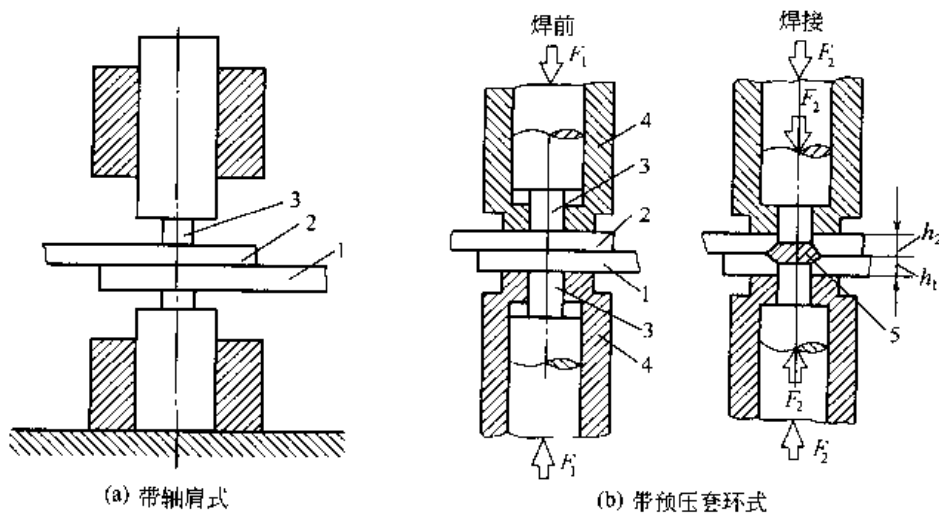


图 7.1 搭接冷压焊过程

1、2—焊接件；3—压头；4—预压套环；5—焊接接头；

h_1 、 h_2 —焊接件厚度； F_1 —预压力； F_2 —焊接压力

搭接冷压焊时，将焊接件摆放好后，用钢制压头加压，当压头压入必要深度后，焊接完成。搭接冷压焊包括搭接点焊和搭接缝焊。用柱状压头形成焊点，称为冷压搭接点焊；用滚轮式压头形成焊缝，称为冷压搭接缝焊。搭接缝焊又包括滚压焊、套压焊和挤压焊。搭接冷压焊主要用于箔材和板材的连接。

对接冷压焊时，将焊接件分别夹紧在左右钳口，并伸出一定长度，施加足够的顶锻压

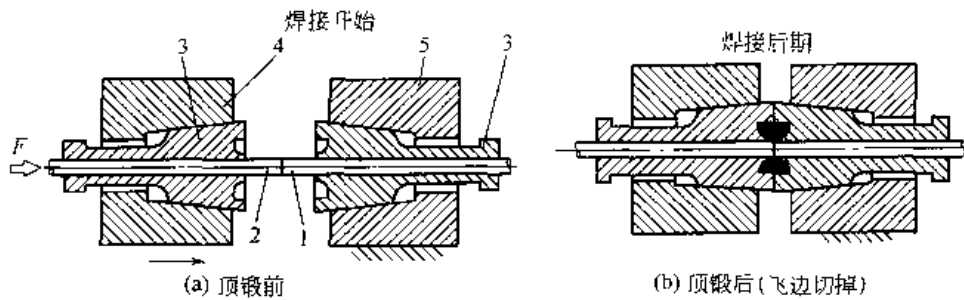


图 7.2 对接冷压焊过程

1、2—焊接件；3—钳口；4—活动夹具；5—固定夹具

力，使伸出部分产生径向塑性变形，将被焊表面的杂质挤出，形成金属飞边，紧密接触的纯金属形成焊缝，完成焊接过程。对接冷压焊主要用于制造同种或异种金属线材、棒材或管材的对接接头。

(2) 冷压焊的应用

冷压焊接过程中由于不需要加热，可以大大节省能源，简化焊接设备；又可以避免由于熔化或强烈加热造成的不利影响。

在冷压焊过程中，由于焊接接头的形变硬化可以使接头强化。在正常情况下，同种金属的冷压焊接头强度不低于母材；异种金属的冷压焊接头不低于被焊较软金属的强度。由于结合界面较大，又无中间相生成，所以接头具有优良的导电性和抗腐蚀性能。

冷压焊焊接件的形状和尺寸主要决定于模具的结构，对于硬度较高的材料冷压焊时需要多次加压，因此冷压焊的工艺较为复杂。

冷压焊接件的搭接厚度或对接焊断面受焊机吨位的限制而不能过大；焊接件的硬度受冷压焊模具材质的限制而不能过高。因此，冷压焊主要适用于硬度不高、塑性较好的金属薄板、线材、棒材和管材的焊接。

1) 搭接冷压焊的应用

搭接冷压焊可焊厚度为 0.01~20mm 的箔材、带材和板材。此外，管材的封端及棒材的搭接都可以通过搭接冷压焊实现。

搭接点焊常用于导线和母线的连接。

搭接缝焊可用于焊接气密性较高的接头。其中滚压焊适于焊接大长度焊缝，例如制造有色金属管、铝制容器等较大容器的产品；套压焊用于容器元件封帽的封装焊及日用品铝制件的焊接。

2) 对接冷压焊的应用

对接冷压焊接头的最小断面积为 0.5mm^2 （用手焊钳），最大焊接断面可达 500mm^2 （用液压焊机）。

对接冷压焊主要用于对接简单或异型断面的线材、棒材、板材、管材等；可在生产中进行同种材料的接长，制造双金属过渡接头或异种金属的焊接；在电气工程中铝、铜导线、母线的焊接应用最为广泛。

3) 适于焊接热敏感性强的材料

冷压焊特别适用于在焊接中要求必须避免母材软化、退火和不允许烧坏绝缘的一些材料或产品的焊接。例如 HLJ 型高强度变形时效铝合金导体，当温度超过 150°C 时，其强度成倍下降；某些铝合金通信电缆或铝壳电力电缆，在焊接铝管之前就已经装入电绝缘材料。其

焊接时温度升高不允许超过 120℃。石英谐振子及铝质电容器的封盖工序、Nb-Ti 超导线的连接也可以采用冷压焊。

4) 特别适用于异种材料的焊接

异种材料在热焊时往往会产生脆性金属间化合物，而由于冷压焊是在室温下实现异种金属的连接，原子之间难以实现化学反应生成脆性金属间化合物，冷压焊是焊接异种材料最适合的方法。

冷压焊在各工业部门的应用实例见表 7.1 和图 7.3。

表 7.1 冷压焊在各工业部门的应用实例

应用部门	应用实例
电子工业	圆形、方形电容器外壳的封装,绝缘箱外壳的封装,大功率二极管散热片,电解电容阳极板与屏蔽引出线
电气工程	通信、电力电缆铝外导体管、护套管的连续生产;各种规格铝-铜过渡接头;电缆、电缆厂、电机厂、变压器厂、开关厂铝线及铝合金导线的拉长及引出线;铜排、铝排、整流片、汇流圈的安装焊;输配电站引出线;架空电线、通讯电线、地下电缆的接线和引出线;电缆屏蔽带接地;铜式铝箔绕组引出线;石英谐振子盒封装、集成块封装、铌钛合金超导线的连接
制冷工程	热交换器
汽车制造业	小轿车暖气片、汽车水箱、散热器片、脚踏板
交通运输	地下铁路、矿山运输、无轨电车断面滑接对焊
日用品工业	铝壶、电热铝茶壶制造、铝容器、铝壶手把螺钉支撑
其他部门	铝管、钢管、铝锰合金管、铝镁合金管、钛管的对接、封头等

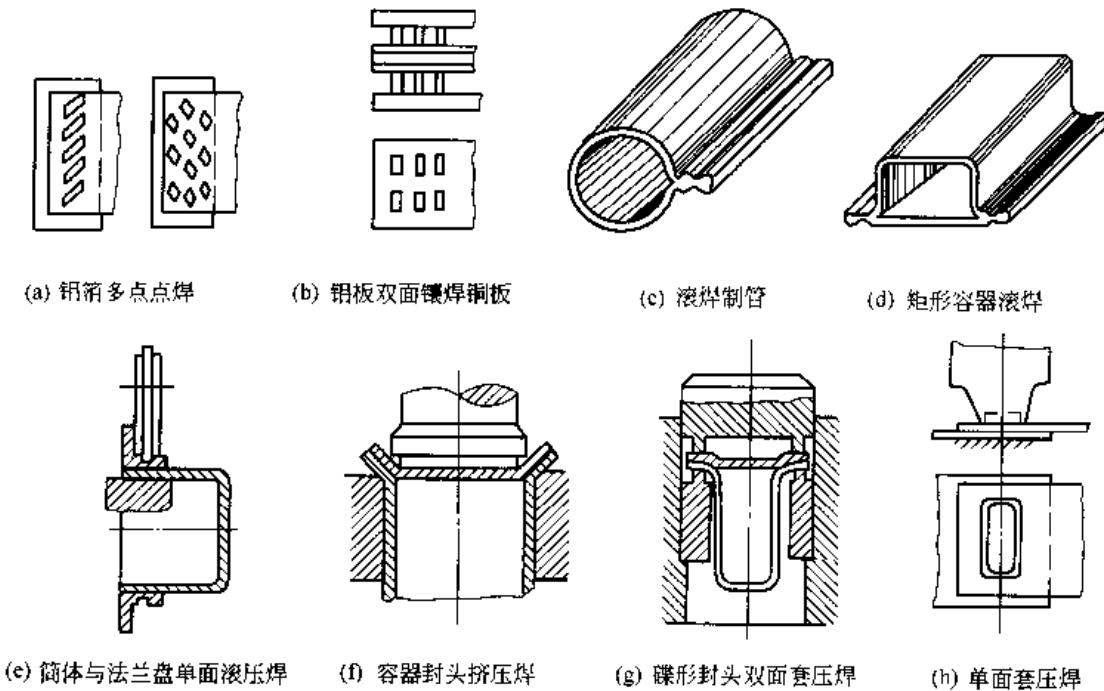


图 7.3 冷压焊的应用实例

7.1.2 冷压焊质量的影响因素

冷压焊由于是在室温下既不需要加热，又不需要添加焊剂的焊接方法，其焊接质量主要取决于焊接件的清洁程度和焊接件被焊部位塑性变形的大小，而焊接压力则是冷压焊过程中产生塑性变形的必要条件。

(1) 焊接件的表面状态

冷压焊工艺要求焊接件待焊表面具有良好的状态，包括表面清洁度和粗糙度。

1) 待焊表面的清洁度

油膜、水膜及其他有机杂质是影响冷压焊质量的关键因素。在冷压焊挤压过程中，这些杂质会延展成微小的薄膜，不论焊接件产生多大的塑性变形量都无法将其挤压出焊接结合面，因此必须在焊接前清除，保证焊接件待焊表面的清洁。

焊接件待焊表面金属氧化膜的存在也会影响冷压焊接头的质量。除了厚度较薄、脆性较大的氧化膜（如铝焊接件表面的 Al_2O_3 ）在塑性变形量大于 65% 的条件下允许不作清理即可进行施焊外，都应在焊前进行表面清理。

表面金属氧化膜的清理，可以采用化学溶剂或超声波净化法，但采用钢丝刷或钢丝轮进行清理效果会更好。钢丝轮（丝径为 0.2~0.3mm，材料一般选用不锈钢）的旋转线速度以 1000m/min 为宜。有机物的清除通常采用化学溶剂清洗或超声波净化法。

为保证获得质量稳定的冷压焊接头，清理后的焊接件表面不允许遗留残渣或金属氧化膜粉屑。特别是用钢丝轮清理时，通常要辅加负压吸取装置，以去除氧化膜尘屑。清理后的表面也不准用手摸，以免造成焊接件表面再污染。焊接件表面一经清理后，应立即进行施焊。

2) 待焊表面的粗糙度

通常条件下，冷压焊对接焊接件待焊表面的粗糙度没有严格要求，经过轧制、剪切或车削的表面都可以进行冷压焊。带有微小沟槽不平的待焊表面，在挤压过程中有利于整个结合面切向位移，有助于冷压焊过程的实施。但当焊接塑性变形量小于 20% 和精密真空冷压焊时，要求焊接件待焊表面具有较低的粗糙度。

(2) 塑性变形程度

变形程度是指实现冷压焊所需要的最小塑性变形量，它是判断材料冷压焊接性和控制焊接质量的关键参数。材料的塑性变形程度越小，冷压焊接性就越好。但是对于不同的金属材料，最小塑性变形量是不一样的。例如纯铝的变形程度最小，说明其冷压焊接性最好，钛次之。

在实际的冷压焊接过程中，焊接件的塑性变形量要大于该金属的标称“变形程度”值，但不宜过大。因为过大的塑性变形量会增加焊接接头的冷作硬化现象，使韧性下降。如对于铝及多数铝合金搭接冷压焊时，压缩率较多控制在 65%~70%。

根据冷压焊接头的形式，表示变形程度的方法也不一样。其中搭接冷压焊的塑性变形程度用压缩率 (ϵ) 表示。它是焊接件被压缩的厚度与总厚度的百分比，即压缩率的表达式为

$$\epsilon = \frac{(h_1 + h_2) - h}{h_1 + h_2} \times 100\% \quad (7.1)$$

式中 h_1 、 h_2 ——分别为每一焊接件的厚度，mm；

h ——压缩后的剩余厚度，mm。

各种金属材料的最小压缩率见表 7.2。表中的压缩率是在材料相同、厚度相等、冷压点焊条件下得到的。生产中为保证满意的焊合率，并考虑到各种误差的存在，选用的压缩率一般比表中数据大 5%~15%。

表 7.2 各种金属材料的最小压缩率

材 料	纯铝	工业纯铝	铝合金	钛	硬铝	铝	镉	铜与铝	铜与铝
压缩率 / %	60	63	70	75	80	84	84	84	85
材 料	铜与银	铜	铝与钛	锡	镍	铁	锌	银	铁与镍
压缩率 / %	85	86	88	88	89	92	92	94	94

对接冷压焊的塑性变形程度用总压缩量 (L) 表示, 它等于焊接件伸出长度与顶锻次数的乘积。即总压缩量的表达式为

$$L = n(l_1 - l_2) \quad (7.2)$$

式中 l_1 ——固定钳口一侧焊接件的每次伸出长度, mm;
 l_2 ——活动钳口一侧焊接件的每次伸出长度, mm;
 n ——挤压次数。

对接冷压焊时, 足够的总压缩量是保证获得合格焊接接头的关键因素。对于塑韧性较好、变形硬化不强烈的金属, 焊接件的伸出长度通常小于或等于其直径或厚度, 可一次顶锻焊成。对于硬度较大、形变硬化较强的金属, 其伸出长度通常等于或大于焊接件的直径或厚度, 需要多次顶锻才能焊成。对于大多数材料, 顶锻次数一般不超过 3 次。

各种材料对接冷压焊的最小总压缩量见表 7.3。

表 7.3 各种材料对接冷压焊的最小总压缩量

材 料	每一焊接件的最小总压缩量		顶锻次数
	圆形件(直径 d)	矩形件(厚度 h_1)	
铝与铝	$(1.6 \sim 2.0)d$	$(1.6 \sim 2.0)h_1$	2
铝与铜	铝 $(2 \sim 3)d$	铝 $(2 \sim 3)h_1$	3
	铜 $(3 \sim 4)d$	铜 $(2 \sim 3)h_1$	
铜与铜	$(3 \sim 4)d$	$(3 \sim 4)h_1$	3
铝与银	铝 $(2 \sim 3)d$	铝 $(2 \sim 3)h_1$	3~4
	银 $(3 \sim 4)d$	银 $(3 \sim 4)h_1$	
铜与镍	铜 $(3 \sim 4)d$	铜 $(3 \sim 1)h_1$	3~4
	镍 $(3 \sim 4)d$	镍 $(3 \sim 4)h_1$	

在对接冷压焊过程中, 为了减少顶锻次数, 希望焊接件伸出长度尽可能稍大。但不宜过大, 因为焊接件伸出长度过大, 顶锻时会使焊接件发生弯曲。特别是对于直径 d (或厚度 h_1) 越小的焊接件发生顶锻弯曲的倾向越大。同种材料进行冷压焊时, 通常伸出长度取 $(0.8 \sim 1.3)d$ 或 $(0.8 \sim 1.3)h_1$ 。其中断面较小的焊接件取下限值, 断面较大的焊接件取上限值。异种材料进行冷压焊时, 各自的伸出长度以弹性模量之比选取, 硬度较小焊接件的伸出长度相应减小。

(3) 焊接压力

焊接压力是冷压焊过程中唯一的外加能量, 通过模具传递到待焊部位, 使被焊金属产生塑性变形。焊接总压力既与被焊材料的强度以及焊接件的截面积有关, 也与冷压焊模具的结构和尺寸有关。焊接压力的理论公式为

$$F = pS \quad (7.3)$$

式中 F ——焊接压力, N;

p ——单位压力, MPa;

S ——焊接件的横截面积, mm^2 ; 对接冷压焊, S 是指焊接件的断面积; 搭接冷压焊, S 是指压头的端面积。

在冷压焊过程中, 由于塑性变形产生硬化和模具对金属的拘束力, 会使单位焊接压力增大。冷压焊的单位压力通常要比被焊材料的大许多倍; 对接冷压焊时, 焊接件随变形的进行而被墩粗, 使焊接件的名义断面积不断增大。因此, 冷压焊后期所需的焊接压力比焊接初始时的焊接压力大得多。

金属材料单位面积冷压焊所需要的焊接压力见表 7.4。

表 7.4 金属材料单位面积冷压焊所需要的焊接压力: MPa

材 料	搭 接 焊	对 接 焊	材 料	搭 接 焊	对 接 焊
铝与铝	750~1000	1800~2000	铜与镍	2000~2500	2500
铝与铜	1500~2000	>2000	HLJ 型铝合金	1500~2000	>2000
铜与铜	2000~2500	2500			

冷压焊模具的结构尺寸对焊接压力的影响很大, 这对冷压焊机的设计者是至关重要的; 但是对冷压焊机的使用者来说, 只要冷压焊设备定型生产, 其模具结构尺寸也就定型, 可根据焊机的技术参数选取焊接压力。各类冷压焊机(钳)的吨位、可焊断面积及其他技术参数见表 7.5。

表 7.5 各类冷压焊机(钳)的吨位、可焊断面积及其他技术参数

冷压焊设备	压力 /kgf	可焊断面积, mm ²			设备参考质量 /kg
		铝	铝与铜	铜	
携带式手焊钳	(1000)	0.5~20	0.5~10	0.5~10	1.4~2.5
台式对焊手钳	(1000~3000)	0.5~30	0.5~20	0.5~20	4.6~8
小车式对焊手钳	(1000~5000)	3~35	3~30	3~20	170
气动对接焊	5000	2.0~200	2.0~20	2.0~20	62
	800	0.5~7	0.5~4	0.5~4	35
油压对接焊机	20000	20~200	20~120	20~120	700
	40000	20~400	20~250	20~250	1500
	80	50~800	50~600	50~600	2700
	120	100~1500	100~1000	100~1000	2700
携带式搭接手焊钳	(800)	厚度 1mm 以下			1.0~2
气动搭接焊机	50000	厚度 3.5mm 以下			230
油压搭接焊机	40000	厚度 3mm 以下			200

注: 1. 括号内的压力值为计算值。

2. 1kgf=9.8N。

在冷压焊生产中, 由于形成冷压焊接头所必需的变形程度是由模具决定的, 只要焊接压力充分, 焊接件表面清洁度和粗糙度满足冷压焊要求, 焊接质量就可以保证, 而与焊接施工人员的技巧无很大关系。

生产中冷压焊接头的质量检查主要采取抽查的办法。对于搭接冷压焊接头应进行抗剥离试验。质量合格的冷压焊接头的被撕裂部位应在紧邻焊缝的母材上。对于对接冷压焊接头, 因其接头对弯曲最敏感, 只需要进行抗弯试验来鉴别焊接质量。即将焊接接头夹在虎钳上, 焊缝在钳口上侧约 1~2mm, 用手弯曲 90°角, 再反向弯曲 180°角, 接头不在焊接结合面上开裂, 则验证焊接接头质量为合格。

7.1.3 冷压焊模具

冷压焊是通过模具对焊接件加压, 使待焊部位产生塑性变形完成的。模具的结构和尺寸决定了接头的尺寸和质量。因此, 冷压焊模具的合理设计和加工是保证冷压焊接头质量的关键。

根据压出的凹槽形状, 搭接冷压焊分为搭接冷压点焊和搭接冷压缝焊两类。按照加压方式, 搭接冷压焊分为滚压焊和套焊等形式。搭接点焊模具为压头, 搭接滚压焊模具为压轮, 对接冷压焊模具为钳口。

(1) 搭接冷压点焊压头

搭接冷压点焊的压头形式较多，根据压头的形状，压头（或焊点）可分为圆形（实心或空心）、矩形、菱形、环形等，见图 7.4。按照压头数目，可分为单点点焊和多点焊；单点点焊又分为双面点焊和单面点焊。

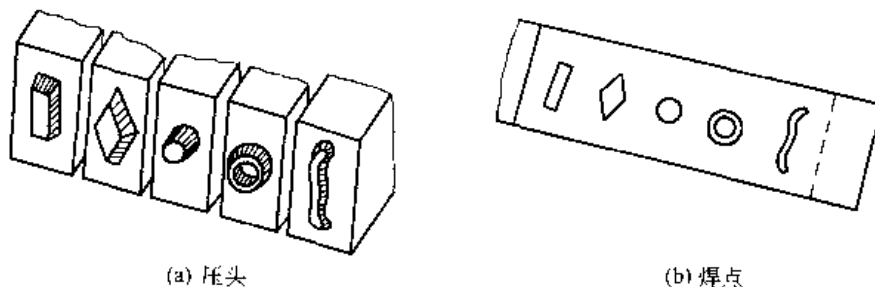


图 7.4 搭接冷压点焊的压头形式

压头尺寸根据焊接件厚度 (h_1) 确定。圆形压头直径 (d) 和矩形压头的宽度 (b) 不能过大，也不能过小。过大时，变形阻力增加，在焊点中心将产生焊接裂纹，可能将引起焊点四周金属较大的延展变形。过小时，压头将因局部切应力过大而切割母材。典型的压头尺寸为 $d=(1.0\sim 1.5)h_1$ 或 $b=(1.0\sim 1.5)h_1$ ；矩形压头的长边取 $(5\sim 6)b$ ；不等厚焊接件冷压点焊时，压头尺寸以较薄焊接件厚度 (h_1) 确定 $d=2h_1$ 或 $b=2h_1$ 。

冷压点焊时，材料的压缩率由压头压入深度来控制。可以通过设计带轴肩的压头来实现 [见图 7.1 (a)]，从压头端头至轴肩的长度即压入深度，以此控制准确的压缩率，同时，能够起到防止焊接件翘起的作用。通过在轴肩外围加设套环装置 [见图 7.1 (b)]，也可以实现压缩率的控制，套环采用弹簧或橡胶圈对焊接件施加预压力，该单位预压力控制在 $20\sim 40\text{MPa}$ 。

(2) 冷压缝焊模具

冷压焊可以焊接直长焊缝或环状焊缝，气密性能够达到很高的要求，而不会出现采用熔化焊方法常见的气孔和未焊透等焊接缺陷。具体的冷压缝焊形式包括冷滚压焊、冷套压焊和冷挤压焊，其工作原理见图 7.5。

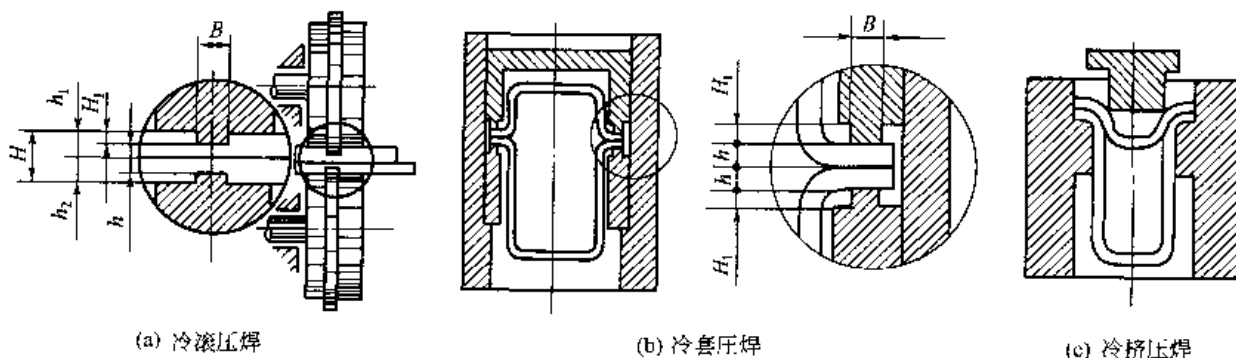


图 7.5 冷压缝焊的形式及工作原理

1) 冷滚压焊压轮

冷滚压焊时，使被焊搭接件在一对滚动的压轮间通过，并同时向焊接件加压，即形成一条密闭性的焊缝。滚压焊的压轮是实施焊接压力、实现冷压焊的关键部位，它的结构和尺寸

将决定着冷压焊机的功率、焊接压力、焊接质量以及焊接操作能否进行等。

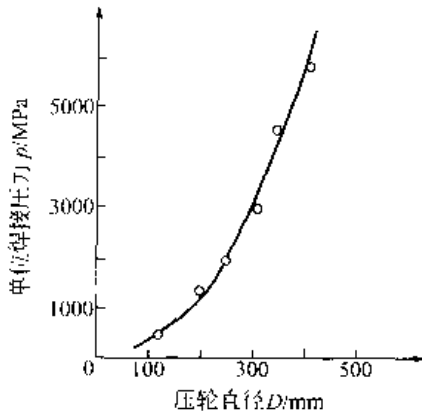


图 7.6 压轮直径与单位焊接压力的关系
屈服强度 $\sigma_s = 50 \text{ MPa}$, $\epsilon = 70\%$,
 $H = 1.8 \text{ mm}$, 摩擦因数 $\mu = 0.25$

① 压轮直径 压轮直径对焊接压力有较大的影响。压轮直径与单位焊接压力的关系见图 7.6。

压轮直径 (D) 越大, 所需要的焊接压力急剧增加。从减小焊接压力考虑, 压轮直径越小越好。但是压轮直径同时也是决定焊接件能否自然入机、使滚压焊得以进行的重要因素。焊接件能够自然入机的条件是: $D \geq 175\Delta h$ ($\Delta h = h_i - h_f$)。因此选用压轮直径时, 首先在满足焊接件能够自然入机的条件下, 尽可能选用直径较小的压轮。

确定压轮直径时, 不但要考虑设备能够提供的最大输出焊接压力, 还要考虑焊接件的总厚度 (H)。当焊机功率确定之后 (即最大输出焊接压力确定), 焊接件总厚度越小, 选用的压轮直径可相应减小。焊接件总厚度、压轮直径与焊接压力的关系见图 7.7。

② 压轮工作凸台 (参见图 7.5) 宽度 (B) 和高度 (H_1) 压轮工作台的宽度和高度与冷压点焊的压头相似。工作凸台两侧也设有轴肩, 起到控制压缩率和防止焊接件边缘翘起的作用。

合理的凸台宽度按下式确定, 即

$$\frac{1}{2}h < B < 1.25H \quad (7.4)$$

合理的凸台高度为

$$H_1 = \frac{1}{2}(\epsilon H + C) \quad (7.5)$$

式中 C ——主轴间弹性模量, 通常 $C = 0.1 \sim 0.2 \text{ mm}$ 。

2) 冷套压焊及冷挤压焊模具

冷套压焊和冷挤压焊都是生产密闭性小型容器的高效焊接方法。

① 套压焊模具 根据焊接件的尺寸 (圆形或矩形) 设计相应结构与尺寸的上模和下模。下模由模座承托, 上模与压力机上夹头相连接, 作为活动模。二者的工作凸台设计与滚压冷焊压轮的工作凸台相当, 同样也设置了轴肩。套压焊的模具体积和质量较大, 由于所焊面积较大, 所需要的焊接压力相应地比冷滚压焊大得多。因此, 套压焊模具只适用于较小焊接件的封焊。

② 挤压焊模具 根据焊接件的形状和尺寸设置相应的阴模 (固定模) 和阳模 (动模)。阳模与压力机上的上夹头相连接。阴模的内径与阳模的外径之差与焊接件总厚度 (H) 和变形程度 (ϵ) 的关系为

$$D_{\text{阴}} - D_{\text{阳}} = H(1 - \epsilon) \quad (7.6)$$

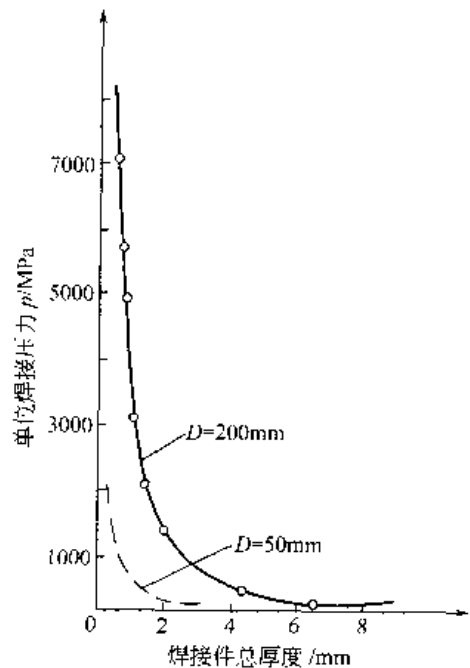


图 7.7 焊接件总厚度、压轮直径与焊接压力的关系
屈服强度 $\sigma_s = 50 \text{ MPa}$, $\epsilon = 70\%$,
摩擦因数 $\mu = 0.25$

阴模与阳模的工作周缘需制成圆角，以免冷压焊过程中损伤焊接件。

与套压焊相比较，挤压焊所需的焊接压力小，常用于铝质电容器封头的冷压焊接。

(3) 对接冷压焊钳口

在对接冷压焊过程中，需要施加较大的夹紧力和顶锻力，要求钳口材料必须用模具钢制造，钳口的制造精度要求较高。

冷压焊钳口由固定和可动两部分组成。各部分由相互对称的半模组成，焊接时，各部分夹持一个焊接件。对接冷压焊钳口的作用除夹紧焊接件外，主要是传递焊接压力，控制焊接件塑性变形的大小和切掉飞边。

根据端头的结构形式，对接冷压焊钳口可分为槽形钳口、尖形钳口、平型钳口和复合型钳口 4 种。其中尖形钳口有利于金属的流动，能挤掉飞边，所需的焊接压力小；平型钳口与尖形钳口则相反，目前平型钳口已经很少应用。

为了克服尖形钳口在冷压焊过程中易崩刃的缺点，在刃口外设置了护刃环和溢流槽（容纳飞边），成为应用广泛的复合型钳口。复合型钳口的结构见图 7.8。

为避免顶锻过程中焊接件在钳口中打滑，除给予足够的夹紧力外，还要增加钳口内腔与焊接件间的摩擦因数，具体措施是对钳口内腔表面进行喷丸处理或加工出深度不大的螺纹状沟槽。

钳口内腔的形状根据被焊焊接件的断面形状设计，可以是简单断面，也可以是复杂断面。对于断面积相差不大的不等厚焊接件可采用两组不同内腔尺寸的钳口。焊接扁线用组合钳口的结构见图 7.9。对接冷压焊接管材时，管件内应装置相应的心轴。

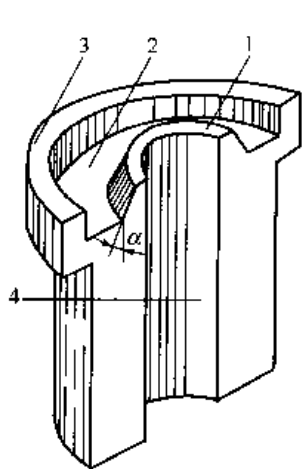


图 7.8 复合型钳口的结构
1 刃口；2—飞边溢流槽；3—护刃环；
4 内腔； α —刃口倒角 ($\alpha \leq 30^\circ$)

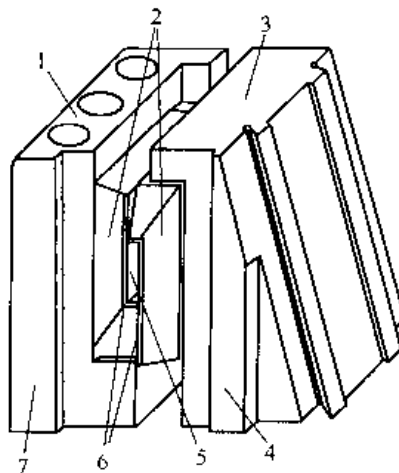


图 7.9 焊接扁线用组合钳口的结构（动模）
1 固定模座；2—钳；3—滑动模座；4 护刃面；
5 型腔；6—刃口；7 扩刀面

对接冷压焊钳口的关键部位是刃口。刃口厚度通常为 2mm 左右，楔角为 $50^\circ \sim 60^\circ$ 。此部位须进行磨削加工，以减小冷压焊顶锻时变形金属的流动阻力，避免卡住飞边。钳口在选用材料时，要求工作部位的硬度控制在 45~55HRC。硬度太大，韧性差，易崩刃；硬度太小，刃口会变成喇叭状，使冷压焊接头粗糙。

冷压焊的模具经合理设计和加工完成后，焊接接头的尺寸和可能达到的质量即被确定。当焊接接头的规格尺寸发生变化时，则需要更换模具。

除了专用的冷滚压焊设备其压力由压轮主轴承担而不需要另给压力源外，其余的冷压焊设备都可以利用常规的压力机改装而成。冷压焊的生产率比较高。例如滚压焊制铝管，焊接

速度可达 28cm/s 以上，而且在短时间停机的条件下，可以任意调节焊接速度，而焊接质量不受影响，这是其他焊接方法无法实现的。

7.2 冷压焊的应用

7.2.1 异种材料的冷压焊

(1) 异种材料的冷压焊特点

异种材料冷压焊的主要优点如下：

- a. 冷压焊时不需要加热，接头不出现熔化状态，因此可节约大量的电能，并节省由于焊接需要加热的辅助时间；
- b. 由于冷压焊不进行加热，因此冷压焊接头不会出现因为激烈加热而造成的有害影响；
- c. 冷压焊接头不产生脆性的中间相结构和低熔点共晶体，因此异种材料冷压焊接头不容易产生裂纹；
- d. 用冷压焊焊接异种材料时，操作方便，容易实现机械化和自动化，生产率高。

异种材料进行冷压焊必须具备的条件包括：

- a. 金属的塑性变形大；
- b. 金属的氧化膜薄而脆，在塑性变形时容易被压碎；
- c. 在塑性变形过程中，接触面部位金属储藏的弹性能小。

异种材料冷压焊可以获得强度不低于被焊较软金属强度的焊接接头。铝与钢直接采用冷压焊，接头的抗拉强度和铝合金强度近似。1Cr18Ni9Ti 与 LF3 冷压焊接头的抗拉强度可以达到 21.5~22.5MPa，断裂发生在 LF3 合金上。1Cr18Ni9Ti 与 LF5 冷压焊接头的抗拉强度可达 29.9~30.2MPa。

钛合金与钢的冷压焊也可以获得与钛等强度的焊接接头。直径为 3mm 的 TA3 钛与 1Cr18Ni9Ti 不锈钢棒直接进行冷压焊，焊接时的冷作硬化使接头的强度提高，塑性下降。试验结果表明 TA3 钛与 1Cr18Ni9Ti 冷压焊接头的抗拉强度 (σ_b) 可达 50~60MPa，伸长率 (δ) 为 8%~15% (TA3: $\sigma_b = 40\text{MPa}$, $\delta = 27\% \sim 30\%$ 。1Cr18Ni9Ti: $\sigma_b = 74 \sim 75\text{MPa}$, $\delta = 27\% \sim 29\%$)。冷压焊接头的力学性能与形成的中间扩散层的厚度有关。TA3 钛与 1Cr18Ni9Ti 冷压焊接头的力学性能与中间扩散层厚度的关系见图 7.10。

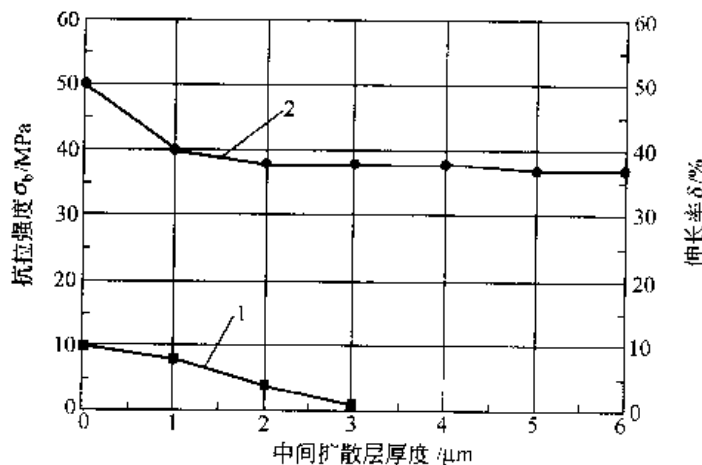


图 7.10 TA3 钛与 1Cr18Ni9Ti 冷压焊接头的力学性能与中间扩散层厚度的关系

1—伸长率 δ ; 2—抗拉强度 σ_b

冷压焊是连接铜与钛的最佳方法。焊接时，在铜焊接件的表面上加工出凸台，在钛焊接件表面上加工出相应的凹槽，在相互接触时，使铜、钛焊接件表面与加力方向有一个夹角。试验表明，采用冷压焊焊接 65mm×100mm 的铜、钛板材以及直径为 16mm 的棒材，冷压焊接头都表现出良好的抗拉强度。试件拉伸断口形貌发现，在钛的表面残留薄薄的一层铜。

对于异种材料焊接接头的使用温度要分别予以限制。如 1Cr18Ni9Ti 与 LF5 冷压焊接头加热到 350℃ 保温 1~2h，接头的抗拉强度降低到母材的 1/15~1/20，甚至会发生开裂现象，在接触界面处出现二次相。此外，由于温度的升高，在 LF5 铝合金一侧，离结合界面 0.5~2.5mm 的冷作层上可能产生应力集中，影响冷压焊接头的质量。

对于铝-铜的冷压焊接头，要求使用的短期温升（1h 内）应限制在 300℃ 以下；长期的允许使用温升不超过 200℃。

各种金属组合采用冷压焊的焊接性见表 7.6。

表 7.6 各种金属组合采用冷压焊的焊接性

材料	Ti	Cd	Pt	Sn	Pb	W	Zn	Fe	Ni	Au	Ag	Cu	Al
Ti	√√							√				√	√
Cd		√√		√	√								
Pt			√√	√	√		√		√	√	√	√	√
Sn		√	√	√√	√								
Pd		√	√	√	√√		√		√	√	√	√	√
W												√	
Zn			√		√			√	√	√	√	√	√
Fe	√						√	√√	√			√	√
Ni			√		√		√	√	√√	√	√	√	√
Au			√		√		√		√	√√	√	√	√
Ag			√		√		√		√	√	√√	√	√
Cu	√		√		√	√	√	√	√	√	√	√√	√
Al	√		√		√		√	√	√	√	√	√	√√

注：√为焊接性良好（√√为同种金属焊接）；空白为焊接性差或无报道数据。

(2) 铜与铝的冷压焊工艺

铜与铝的冷压焊是在室温下，靠顶锻塑性变形（80%）实现连接，所以不会产生铜与铝的中间化合物。由于两种材料自身的固体表面局部流动变形，而使原子间达到有效地结合程度，最后成为一个整体，提高铜铝焊接接头的接触导热和导电性能。

铜与铝冷压焊时，在压力的作用下，铜与铝发生塑性变形，接触面积随着压力的增加而变大，接触面上的铜铝向四周位移，不断造成新的纯金属间的相互紧密接触，铜铝原子之间的距离逐渐接近，互相渗入，形成原子的混合过渡，直到铜铝内部结合的程度为止。同时，铜铝的塑性变形使其金属晶格发生了滑移和变形，从而产生局部高热，助长了金属中不均匀质点的相互渗入，推动原子互换与扩散。

铜与铝的冷压焊接头，较多采用对接和搭接接头。

1) 对接冷压焊

铜与铝的棒材较多采用对接接头。对接冷压焊时铜铝的表面准备，是决定冷压焊质量的重要工艺之一。焊前首先清除铜铝表面上的油垢和其他杂质等；其次将铜铝的接触端面加工成具有规整、平直的几何尺寸，尤其是铜铝焊件的对准轴线不可有弯曲现象。端面的加工，可采用简单的机械方法。另外，焊前对铜及铝件进行退火处理使之软化，增加焊件的塑性变

形能力，也是提高冷压焊接头质量的一项重要工艺。

对接冷压焊是在室温下进行的，铝与铜对接冷压焊时的变形程度 (ΔL) 一般均取为 $\Delta L_{Al} : \Delta L_{Cu} = 0.7 : 1$ 。铜与铝对接冷压焊的工艺参数见表 7.7。

表 7.7 铜与铝对接冷压焊的工艺参数

焊件直径 mm	每次伸出长度 mm		顶锻次数	顶锻力 MPa
	L_{Cu}	L_{Al}		
6	6	6	2~3	≥ 1960
8	8	8	3	3038
10	10	10	3	3332
5/25	6	1	1	≥ 1960

2) 搭接冷压焊

对于铜与铝的板与板、线与线、线与板、箔与板、箔与线等形式的冷压焊，较多采用搭接接头。首先将待焊部位的表面清理干净，不可有任何污点与杂质。然后，将工件上下装配于夹具之间，并对上下压头施加压力，使铜、铝件各自都产生足够大的塑性变形而形成焊点。这种冷压焊的形式有单面的，也有双面的。焊点的形状有圆形的，也有矩形或方形的。圆形的较多，矩形的较少。圆形焊点的直径 $d = (1 \sim 1.5)\delta$ (δ 为工件厚度)。矩形焊点尺寸为宽度 $b = (1.0 \sim 1.5)\delta$ ，长度 $L = (5 \sim 6)b$ 。

如果铜、铝两焊件的厚度相差较大，可采用单面变形方法进行焊接。此时圆焊点的直径 $d = 2\delta$ 。矩形焊点尺寸为：宽度 $b = 2\delta$ ，长度 $L = 5b$ 。如果多点时，应交错分布，其焊点中心距应大于 $2D$ (D 为压头直径)，对于矩形焊点应倾斜分布。

铜铝搭接冷压点焊的工艺参数见表 7.8。

表 7.8 铜-铝搭接冷压点焊的工艺参数

焊件尺寸 mm	搭接长度 /mm	焊点数 个	压点直径 mm		压头总长 mm		压点中心距离 mm	点与边距 mm	压力 kN
			Al	Cu	Al	Cu			
40×4	70	6	7	8	30	55	10	10	235.2
60×6	100	8	9	10	30	55	15	15	382.2
80×8	120	8	12	13	30	55	20	15	431.2

7.2.2 高真空金属壳的冷压焊

玻璃壳高精密石英谐振器(晶体)体积大、怕振动，实现晶体振荡器小型化比较困难，而金属壳高精密晶体则可以减小振荡器的体积，其中金属壳晶体的封装是在能够加热烘烤的真空排气台内进行，当排气台的真空度达到 1.33×10^{-6} Pa 以上时，压力机通过模具把金属壳与壳座封焊在一起，实现金属壳晶体的冷压焊。

(1) 金属壳与壳座的表面处理

金属壳与壳座所用材料为无氧铜 TU1。经过除油-酸洗-脱水-烘干工艺去除金属壳与壳座表面的油膜、水膜、氧化膜、空气尘埃等杂质。

具体处理措施包括：首先使用汽油、丙酮等有机溶液去油，然后使用洗净剂去油，合成洗净剂与水的比例为 1:9；然后将金属壳与壳座放入沸腾的溶液中煮沸 10~15min；将金属壳与壳座浸入温度为 60~70℃ 的发酸洗液 (H_2SO_4 50mL + $FeSO_4$ 饱和溶液 950mL) 中，来回摇晃 3~5min，进行酸洗，去除表面氧化膜，获得洁净的金属面；取出用自来水冲洗；最

后用无水乙醇脱水，在 70~80℃ 的烘箱内烘干。处理后工件表面不允许再接触污染物。然后在超净工作台上进行金属壳与壳座的装配，将装配好的金属壳与壳座放入玻璃器皿内。

(2) 冷压焊模具

冷压焊模具材料为 Cr12 或 Cr12MoV，模具硬度为 60~62HRC，其中上模和下模都设计带有凸肩，以控制压缩变形量。

(3) 工艺参数

焊接压力与被焊金属的屈服极限、焊接面积及模具结构有关。高真空金属壳晶体冷压焊焊接压力为 1~2.5MPa，使板厚压缩率达到 80%~90%，试验证明可以保证缝焊后金属壳的漏气率为 1.33Pa·L/s，封焊合格率达 95% 以上。

冷压焊焊缝宽度的选取应保证焊缝的可靠性，减少漏气率，可以选用较大的焊缝宽度。但是由于焊缝宽度的增加，焊缝的断面积增大，势必增大焊接压力，造成畸变应力转换，从而影响其密封性。更为不利的是机械力转换到金属壳晶体上，因机械负载的变化可能引起频率漂移。所以综合考虑，冷压焊焊缝宽度一般取 0.2~0.5mm，保证金属壳的漏气率小于 1.33Pa·L/s。

7.3 热压焊的工艺特点

热压焊的焊接本质与冷压焊完全相同，即在加热条件下对工件施加压力，使被焊界面金属产生足够的塑性变形，形成界面金属原子间的结合。

7.3.1 热压焊的分类和特点

热压焊是气压焊、锻焊和滚焊的统称。热压焊按加热方式可分为工作台加热、压头加热、工作台和压头同时加热三种形式。不同加热方式的优缺点见表 7.9。按照压头形状，热压焊又可以分为楔形压头、空心压头、带槽压头及带凸缘压头的热压焊，如图 7.11 所示。

表 7.9 不同加热方式的热压焊的优缺点

加热方法	优点	缺点
工作台加热	由于加热件的热容量大，加热温度可精确调节，故温度稳定	整个装焊过程中需对工件加热
压头加热	可采用较紧凑的加热器简化设备结构	很难测量加热焊接区内的温度
工作台和压头同时加热	温度调节比较容易，能在较适宜的压头温度实现焊接，获得牢固焊点所需的时间最短	设备和压头的结构复杂，整个装配过程中均需对工件、压头加热

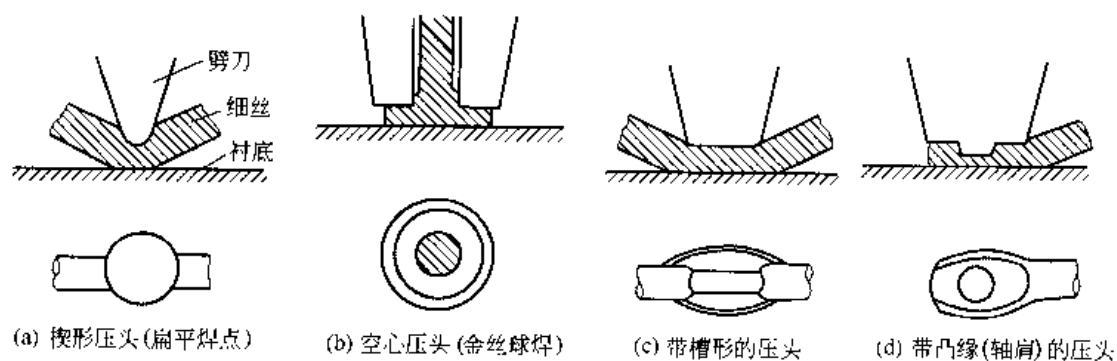


图 7.11 热压焊压头形式及焊点形状

图 7.11 中 (a)、(c)、(d) 三种压头都是将金属引线直接搭接在基板导体或芯片的平

面上。而图 7.11 (b) 则是一种金丝球焊法，即金属丝导线从空心爪头的直孔中送出或拉出引线，在引线端头用切割火焰将端头熔化，借助液态金属的表面张力，在引线端头形成球状。压焊时利用压头的周壁对球施加压力，形成圆环状焊缝。在半导体器件的引线连接中，广泛应用了热压焊。

7.3.2 气压焊

气压焊是用氧-燃料气体火焰将待焊工件端面整体加热到塑性或熔化状态，同时施加一定压力和顶锻力，不用加填充金属，使工件焊接在一起的一种焊接方法。气压焊分为塑性气压焊（即闭式气压焊）和熔化气压焊（即开式气压焊）。这两种方法都易于实现机械化操作。

气压焊可用于焊接碳素钢、低合金钢、高合金钢以及一些有色金属（如 Ni-Cu、Ni-Cr 和 Cu-Si 合金等），也可焊接异种金属。气压焊不能焊接铝和镁合金。

(1) 塑性气压焊

将被焊工件端面对接在一起，为保证紧密接触需维持一定的初始压力。然后使用多点燃

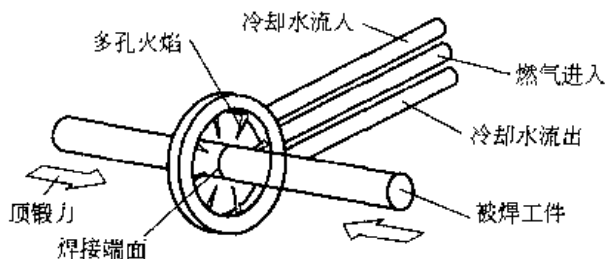


图 7.12 塑性气压焊方法示意

烧焊炬（或加热器）对端部及附近金属加热，到达塑性状态后（低碳钢约为 1200℃）立即加压，在高温和顶锻力促进下，被焊界面的金属相互扩散、晶粒融合和生长，从而完成焊接，如图 7.12 所示。

采用塑性气压焊时，以适当的压力将零件需连接的清洁表面对顶到一起，并用气体火焰加热直到接头处达到预定的顶锻量。塑

性气压焊由于整个界面的金属并不达到熔点，所以其焊接类型不同于熔化焊。一般说来，焊接是在高温（对低碳钢约为 1200℃）以及顶锻压力的作用下，通过晶粒生长、扩散，以及晶粒穿过界面而结合等过程实现的。焊缝的特征是光滑的隆起表面或墩粗，而且在焊缝中心线上通常没有铸态组织。

1) 焊接表面处理

焊前必须对工件端部进行表面处理，包括两个方面：一是对待焊工件端部及附近进行清理，清除油污、锈、砂粒和其他异物；二是对待焊工件端面进行机械切削或打磨等，使待焊端部达到焊接所要求的垂直度、平面度和粗糙度。对待焊工件处理的质量要求取决于钢的类型以及对焊接质量的要求。工件表面处理的质量对焊接质量影响很大。

2) 加热

塑性气压焊的加热特点是金属没有达到熔点。一般而言，是将工件对接端部及附近金属加热到塑性状态，顶锻后的焊接接头表面形成光滑的焊瘤（凸起），在焊接线处（焊缝）没有铸态金相组织。

加热通常采用氧-乙炔火焰，多点燃烧，焊炬有的需要强制水冷。焊炬可产生足够的热量，通过摆动使热量均匀地传播到整个被焊部位。实心或空心圆柱体（如轴或管）的对接焊，通常使用可拆卸的环形焊炬，这样便于焊接前后装卸工件。精密的加热焊炬形状往往十分复杂，以便对工件均匀加热。加热燃料也可以是丙烷气体（液化石油气）。

3) 顶锻（加压）

工件加热到一定温度后，即进行顶锻。顶锻的作用是：

- a. 使工件端部产生塑性变形，增大紧密接触面积，促进再结晶；

b. 破碎工件端面上的氧化膜；

c. 将接触面周边的焊接缺陷迁移到焊瘤处，使缺陷排除。

加压和顶锻方式与被焊金属有关，可以大致分为两类。一是恒压顶锻法（主要用于高碳钢的焊接），从开始到焊接完成，压力基本保持不变，达到一定的顶锻量就完成焊接。二是非恒压顶锻法（例如焊接高铬钢或非铁素体钢），初始采用较高压力，这样可以使工件端面闭合紧密，防止氧化，然后减小压力，而在接头最终顶锻时压力再增加，这种顶锻方式压力的变化范围在 40~70MPa 之间。

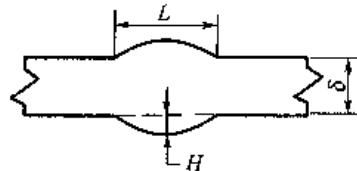
表 7.10 列出了顶锻时几种典型的压力变化。表 7.11 列出了不同板厚与塑性气压焊接头平均尺寸及顶锻量的变化。焊接过程中的顶锻量与接头质量有密切关系，顶锻量大，则焊接热影响区缩小，焊瘤厚度增加。推荐的顶锻量也列于表 7.11 中。

表 7.10 典型气压焊顶锻方式

钢种类型	焊接方法	压力、顶锻力/MPa		
		初始	中间	最终
低碳钢	塑性气压焊	3~10	-	28
高碳钢	塑性气压焊	19	-	19
不锈钢	塑性气压焊	69	34	69
镍合金	塑性气压焊	45	-	45
碳钢及合金钢	熔化气压焊	-	-	28~34

表 7.11 塑性气压焊接头尺寸及顶锻量

板厚 δ /mm	焊瘤长度 L /mm	焊瘤高度 H /mm	顶锻量 /mm	板厚 δ /mm	焊瘤长度 L /mm	焊瘤高度 H /mm	顶锻量 /mm
3	5~6	2	3	13	19~22	5	10
6	8~13	2	6	19	27~30	6	13
10	14~16	3	8	25	32~38	10	16



(2) 熔化气压焊

通常熔化气压焊的焊接过程是将工件平行放置，两个端面之间留有适当的空间（如图 7.13 所示），以便焊炬在焊接过程中可以撤出。

在焊接开始时，火焰直接加热工件端面，当端面完全熔化时，迅速撤出焊炬，然后立即顶锻，完成焊接。对工件施加的压力保持在 28~34MPa。

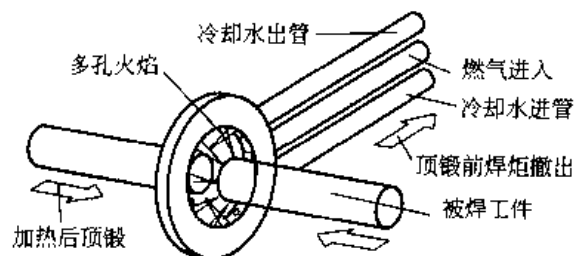


图 7.13 熔化气压焊示意

熔化气压焊机必须具有更精确的对中性能，并且结构坚固以保证快速顶锻。理想的加热焊炬

大多数形状比较窄，并且是多火孔燃烧（见图 7.13），火焰在工件横截面上均匀分布。加热焊炬对中良好，对减少被焊端面的氧化，获得均匀的加热以及均匀的顶锻量是十分重要的。

由于焊接时工件端部要加热至熔化状态，因此，用机械方法切成的端面其焊接效果较为

理想。工件端面上有较薄的氧化层对焊接质量的影响不大，但如有大量的锈和油污等时，应当在焊前清除。

采用熔化气压焊时，先用气体火焰将待焊表面分别加热到熔点，随后使之接触以便顶锻。这种方法接头界面熔化，但液态金属在接头顶锻时被挤出界面而形成毛刺。这类焊缝在外观上与闪光焊焊缝相似。

(3) 气压焊设备

气压焊的设备包括：

- a. 顶锻设备，一般为液压或气动式；
- b. 加热焊炬（或加热器），为待焊工件端部区域提供均匀并可控制的热量；
- c. 气压、气流量、液压显示、测量和控制装置。

气压焊设备的复杂程度取决于被焊工件的形状、尺寸以及焊接的机械化程度。大多数情况下，采用专用加热焊炬和夹具。供气必须采用大流量设备，并且气体流量和压力的调节和显示装置可在焊接所需要的范围内进行稳定调节和显示。气体流量计和压力表要尽量接近焊炬，以便操作者迅速检查焊接时燃气的气压和流量。

为了冷却焊炬，有时也为了冷却夹持工件的钳口和加压部件，还需大容量的冷却水装置。为了对中和固定，夹具应具有足够的夹紧力。

7.3.3 锻焊和滚焊

(1) 锻焊工艺

锻焊是先将零件放在炉子中加热，然后将工件叠合在一起，施加足够的压力或锤击以使界面产生永久变形从而形成金属结合的一种方法。这是一种最早的焊接方法。采用现代化的加热和加压手段以达到工件连接的这种方法至今仍在应用。当前主要是用于生产管子和复合金属。

锻焊时首先把被焊材料加热到接近熔点的温度，然后加压形成连接。加热的目的仅是为了使金属容易产生塑性变形，因为绝大多数金属的屈服强度是随着温度的升高而迅速降低的。加热时间是影响锻焊质量的主要参数。加热不足就不能使工件表面具有很好的延展性，也就不可能焊接。金属过热会导致产生强度很低的脆性接头。必须使整个接头界面上的温度均匀，才能获得满意的接头。

对加热好的工件可用较轻的大锤以重复高速的锤击施加压力。现代自动及半自动锤击是用重型机动锤以低速进行锤击实现的。施加压力的锤子可用蒸汽、液压或压缩空气设备带动。

低碳钢是最常用的锻焊连接的金属。这种材料的薄板、棒材、管材和板材都容易进行锻焊。对焊缝和热影响区显微组织起主要影响作用的是锻压总量和进行锻焊的温度。要获得致密的焊缝一般需要较高的温度。锻焊后退火可以细化接头的组织并改善接头韧性。锻焊最常采用的接头形式是斜接接头，其他形式的接头也可以进行锻焊。有时所施加的压力可达2068MPa。钢的锻焊温度范围一般是1149~1288℃。

锻焊某些金属时必须使用焊剂以防止工件表面生成氧化皮。焊剂与存在的氧化物结合而在工件表面上形成保护性覆盖层。该覆盖层能阻止形成更多的氧化物，并能降低已有氧化物的熔点。用于钢的两种焊剂是石英砂和硼砂（四硼酸钠）。对于高碳钢锻焊，最常用的焊剂是硼砂。由于硼砂的熔点较低，所以可在金属加热过程中将它撒到工件上。石英砂常作为锻焊低碳钢时的焊剂。

采用自动设备对铝合金挤压型材进行锻焊，使边缘对边缘连接形成整体加筋面板。这种面板用于制作轻型汽车的车身。这种用途的铝锻焊被归类为热压焊，因为是将要连接的铝板材边缘加热到焊接温度然后予以加压顶锻。

(2) 滚焊工艺

滚焊是一种固态焊接方法，通过将金属加热到一定温度，然后用滚轮施加压力使接合表面变形而产生金属结合。这种方法最常用于生产复合钢板。采用滚焊工艺复合轧制形成的复合钢板，要求具有一定的拉伸、弯曲等力学性能。

在制造复合钢板时，将两张薄钢板表面彻底清洗并与两张清洁的覆层金属按次序夹在一起。用一种不熔合的隔层化合物使两张覆层板隔开。先将中间两张覆层板和外部两张钢板的边缘分别焊合，以隔绝空气并防止在滚焊过程中发生滑动。

将夹层材料在加热炉中均匀地加热到 $1149\sim 1288^{\circ}\text{C}$ 。然后将此组件通过滚焊进行滚压，直到覆层板与基层板焊到一起为止。除了将覆层板焊到基层板上之外，滚压还使复合材料的厚度减小。滚焊之后，将夹层组件再分开成为两张复合薄板。

7.4 热压焊的应用及质量控制

气压焊最早应用于钢轨焊接。在无缝线路建设初期，主要用在钢轨的厂内焊接，焊机为固定式，以后大部分被闪光焊代替。后来在日本和我国，气压焊多用在钢轨的现场联合接头的焊接上，并逐步朝着多功能轻型化方向发展。

目前现场钢轨焊接使用的气压焊机为小型移动式。我国现在广泛使用的气压焊机的质量为 140kg ，新型保压推凸钢轨气压焊机质量为 160kg 。气压焊还应用于钢筋焊接，该方法在日本应用的较广泛，但在我国则受到一定限制。原因在于气压焊为明火焊接，对施工现场防火要求较高。另外近年来钢筋焊接正逐步朝着螺纹连接、挤压连接、电渣压力焊方向发展。

7.4.1 钢轨焊接

气压焊用于焊接钢轨的优点是一次性投资小，焊机的质量小，无需大功率电源，焊接时间短，焊接质量可靠。缺点是焊前对预焊端面的处理要求十分严格，并且在焊接时需要钢轨沿纵向少量移动，因此在钢轨的线上焊接有时会有一定难度。

(1) 焊接设备

目前使用的移动式钢轨气压焊机多为夹轨腰式，夹紧位置在钢轨纵向“中和线”上，由于轨顶和轨底受力均匀，在加压和顶锻时不产生附加弯矩。图 7.14 所示为移动式钢轨气压焊设备示意，主要包括压接机、加热器、气体控制箱、高压油泵和水冷装置等。气压焊设备各项技术条件在铁道部标准 (TB/T 2622) 中已作了明确规定。

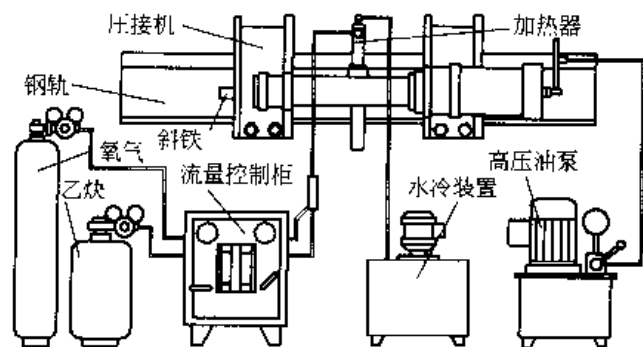


图 7.14 移动式钢轨气压焊设备示意

YJ-440T 型压接机的油缸额定推力为 385kN ，最大顶锻行程为 155mm ，加热器最大摆动距离为 60mm ，压接机的质量不大于 140kg ，可用于 $43\sim 75\text{kg}\cdot\text{m}$ 钢轨的焊接、焊瘤的推除和焊后热处理。待焊钢轨定位和夹紧是通过紧固轨顶螺栓、轨底螺栓和砸紧轨腰斜铁来实

现的。液压缸内的高压油推动活塞运动，使钢轨端部通过斜铁相互挤压实现顶锻或推瘤。加热器以导柱作为轨道沿钢轨轴线方向往复运动。

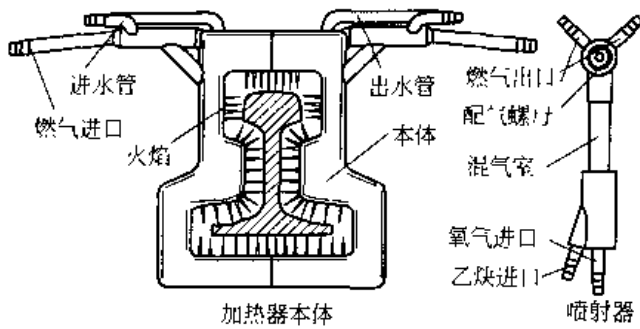


图 7.15 射吸式对开加热器（单喷射器）示意

加热器按混气方式分为射吸式、等压式和强混式，按结构可以分为对开单（或双）喷射器式和开启单喷射器式。目前，在我国应用较多的是射吸式对开加热器。图 7.15 所示为射吸式对开加热器（单喷射器）示意，它是由加热器本体和喷射器组成。加热器本体分成对称并可拆卸的两部分，每侧有燃气和水冷系统；混合器由喷射室、混气室和配气调节装置组成。

加热器工作时，氧气以高压、高速由氧气进口射入射吸室，在射吸室内的喷口附近产生低压区，将乙炔气吸入。氧气和乙炔在射吸室和混气室均匀混合、搅拌后，通过调节配气阀均匀地进入加热器本体两侧。在加热器本体，燃气通过本体内的喷火孔喷出并燃烧。喷火孔的大小及分布是根据钢轨断面的尺寸形状设计的，以确保钢轨加热均匀。加热器本体在加热时必须强制水冷。

(2) 焊接工艺

钢轨热压焊工艺包括焊前端面打磨、对轨、焊接加热、顶锻、去除焊瘤和焊后热处理等。钢轨热压焊的工艺步骤如下。

① 钢轨端面打磨 焊前的端面打磨分为两步：第一步使用端面打磨机将钢轨端面磨平，使端面的平面度及端面与钢轨纵向轴线的垂直度公差在 0.5mm 以内；第二步对磨平后的端面用清洁的锉刀精锉，清除机械磨平时表面产生的异物和氧化膜等。在精锉时应注意使轨底两端略微凸起，这样有利于防止轨底两端在加热时产生污染。

② 对轨及固定钢轨 将压接机骑放在钢轨上，穿上轨底螺栓并预拧紧。将钢轨端面对齐，然后拧紧轨顶螺栓，使钢轨紧靠轨底螺栓。将斜铁打紧，进一步拧紧轨底螺栓，确保钢轨在焊接顶锻过程中不出现打滑现象。

③ 焊接加热 预顶锻后即可进行加热。加热器点火通常采用“爆鸣点火”，燃烧采用微还原焰，即氧气与乙炔的燃烧比值为 0.8~1.1。加热器在加热时必须来回摆动，摆动量和摆动频率见表 7.12。摆动量过大，容易引起轨底角下塌，破坏接头成形；摆动量过小，局部热量集中，钢轨表面与芯部温差加大，造成表面过烧而芯部未焊透。

表 7.12 加热器摆动量和摆动频率

加热时间 /mm	摆动量 /mm		摆动频率 /次·min ⁻¹	加热时间 /mm	摆动量 /mm		摆动频率 /次·min ⁻¹
	50kg/m	60kg/m			50kg/m	60kg/m	
0~4.5	8~12	8~12	60	5~5.5	30	30	60
4.5~5	15~20	15~20	60				

④ 顶锻 在焊接过程中通常采用三段顶锻法。以 60kg/m 钢轨为例，第一段为预顶，压力控制在 16~18MPa，保持钢轨表面接触，当加热到一定温度时，产生微量的塑性变形使钢轨表面全面接触，并且在局部接触面之间开始扩散和再结晶；进入顶锻的第二段时，将压力降至 10~12MPa，使钢轨在塑性状态下接触面之间产生充分扩散和结晶，形成金属键

使钢轨焊合，随着时间的延长，局部表面金属开始熔化，而芯部已充分焊合；进入第三段，压力提升到 35~38MPa，将接触面边缘有缺陷的部分挤出，局部的氧化膜被破坏，焊接结束。

⑤ 去除焊瘤 焊接接头部位形成的焊瘤（凸起）可用两种方法去除：一是用焊机的推瘤装置在焊后立即进行清除；二是焊后热态下用火焰切割法将焊瘤切除。

⑥ 焊后热处理 钢轨焊后，接头的过热区晶粒粗大，需要进行正火处理，以细化晶粒，提高接头的强度和韧性。淬火轨在冷却时要对钢轨接头进行风冷或雾冷使硬度恢复。

⑦ 钢轨气压焊检验。

7.4.2 钢筋的焊接

采用气压焊方法焊接钢筋具有电源和设备轻巧、节约钢材等优点。在日本应用较多并且开发出了自动气压焊设备和工艺。我国在一段时期内，大量应用在钢筋混凝土建筑结构中的钢筋焊接。

(1) 设备

钢筋气压焊设备示意如图 7.16 所示。它由气压焊机、环形加热器、油泵（手动或脚踏式）以及气源设备等组成。图 7.17 所示为钢筋气压焊加热示意。

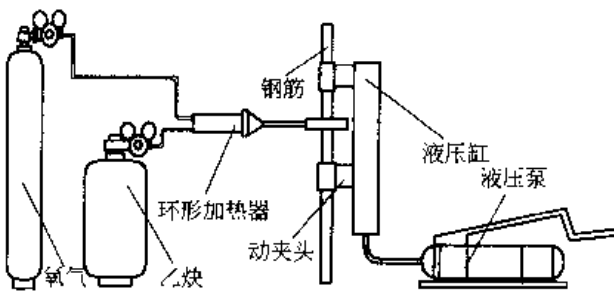


图 7.16 钢筋气压焊设备示意

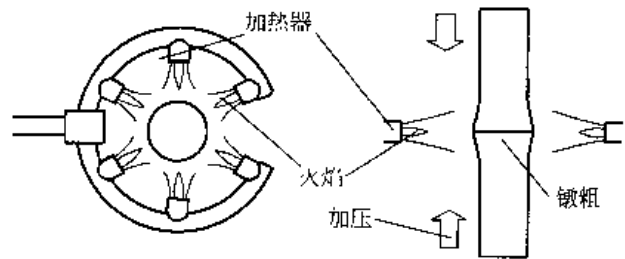


图 7.17 钢筋气压焊加热示意

气压焊用的油缸、夹具和加热器应根据建筑工程中钢筋粗细以及所需顶锻力来设计。由于焊接钢筋是小范围加热，并且需要热量集中，加热快，因此加热采用乙炔作为可燃气体。

(2) 焊接工艺

钢筋气压焊也属于固相焊接。工艺过程是先用电焊机的夹具将钢筋对正夹紧，然后用环形加热器加热钢筋端部，当钢筋端部呈塑性状态时，即由油缸活塞杆推动钢筋夹具的活动夹头，使两钢筋的端部互相挤压和墩粗，完成焊接。

1) 焊前准备

钢筋端部必须平整，且端面需与钢筋轴线成直角，以使工件装配后不留间隙。实际上，由于端面加工角度和不平整的误差等因素影响，两端面接触后，不会完全闭合，而形成一定的夹角，夹角两边的轴向最大距离称为装配间隙。夹角太大，就会在顶锻时造成钢筋接合面滑移。此外，也要将待焊钢筋端面的油、锈及水泥等污物清除干净，并磨平显现新的金属光泽，以免影响焊接质量。

2) 焊接火焰

低碳钢的气压焊，一般采用中性火焰。但是钢筋气压焊，最好用还原焰和中性焰两种。也就是当开始加压和焊接时，要使用还原焰。而当钢筋端面达到一定温度并发生一定塑性变

形，即顶锻消除了装配间隙从而使两钢筋端面完全接触闭合后，再将火焰调整为中性焰。因中性焰比还原焰温度高，可以加速“镦粗”的形成，但也有在全部过程中用还原焰一次焊成的。还原焰温度虽较中性焰低，但其具有容易使钢筋内外受热均匀的优点，且对焊缝有保护作用，防止压焊端面氧化。

3) 焊接温度

要形成良好的焊接接头，除了调整好合适的火焰外，还须将工件加热到足够高的温度，目的是使金属在固态下不但发生塑性变形，而且能发生原子相互扩散而结合在一起。加热温度太低就达不到金属端面的牢固接合；加热温度太高将造成过烧，焊接温度一般为1200~1250℃。

4) 顶锻方法

顶锻方法有3种：

① 恒压顶锻法 恒压顶锻时焊接端面附近的钢筋中心温度、时间和压力的关系如图7.18所示。从断口来看有的接头光斑较多。

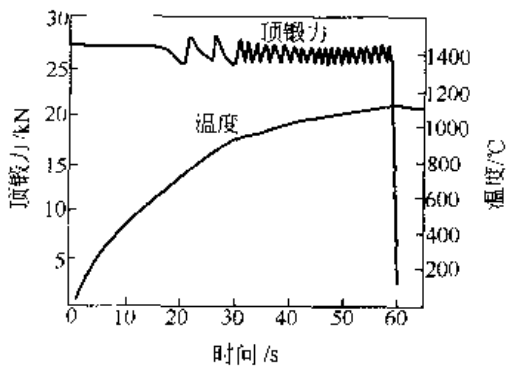


图 7.18 恒压顶锻法

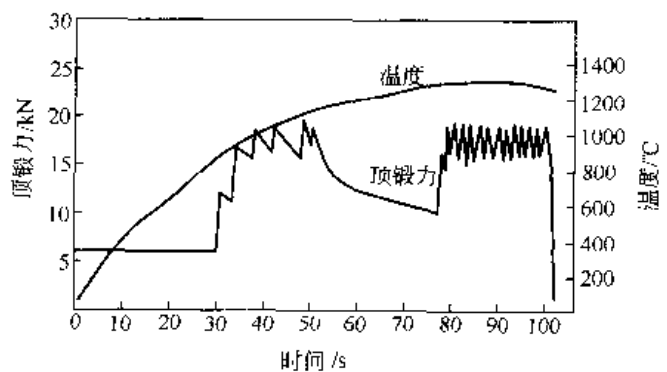


图 7.19 两段顶锻法

② 两段顶锻法 可使钢筋端面附近的温度逐渐上升（见图7.19），约可达1300℃，从而有效地消除光斑缺陷。

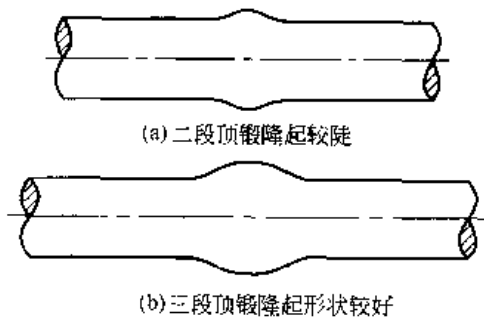


图 7.20 两段顶锻和三段顶锻后所形成的接头形状比较示意

③ 三段顶锻法 恒压和两段顶锻法主要适合于焊接高炉钢筋，至于电炉钢筋，因原料为废钢，以致钢筋中含合金元素很复杂，其中Si、Cr、Cu等含量超过一定数量后，热压焊的焊接性就会变差，焊接接头容易脆化，所以宜采用三段顶锻方法。图7.20所示为两段顶锻和三段顶锻后所形成的接头形状比较示意。

对于直径25~28mm以下的钢筋，利用两段顶锻法既可减少对夹头的损耗，也能减轻焊工的劳动强度。而较粗的钢筋，例如直径为32~40mm时，宜采用三段顶锻法。图7.21所示为三段顶锻法气压焊接钢筋的工艺实例。

(3) 影响因素

影响钢筋气压焊接头质量的因素，除了工艺参数外，还有能导致焊缝断口上出现光斑缺陷的因素。光斑实际是Si和Mn的复合氧化物，在焊接时这些复合氧化物因为受挤压而被铺展开。光斑面积与整个焊缝断口面积之比称为光斑率。光斑率高，可使焊接接头抗拉强度

数值的离散度加剧，使焊接质量的可靠性大大下降。

光斑率高的气压焊接头中，只有少数接头能与母材金属等强度，而更多的接头抗拉强度都小于甚至远远小于母材金属的强度。反之，光斑率低的气压焊接头中，几乎所有接头都可以达到与母材等强度。

影响光斑率的因素，一是钢筋焊前的装配间隙，在塑性状态下焊合的气压焊，最好是端面的装配间隙为零，这样就不易造成氧化。但实际装配中不可能一点间隙也没有，例如21MnV钢筋，间隙3mm和0时，气压焊接头的光斑率分别为35.15%和16.14%。当钢筋的直径为32mm时，在工程上要将钢筋焊前装配间隙控制到2mm以下是很困难的。因此，一般规定钢筋的装配间隙在3mm以下。

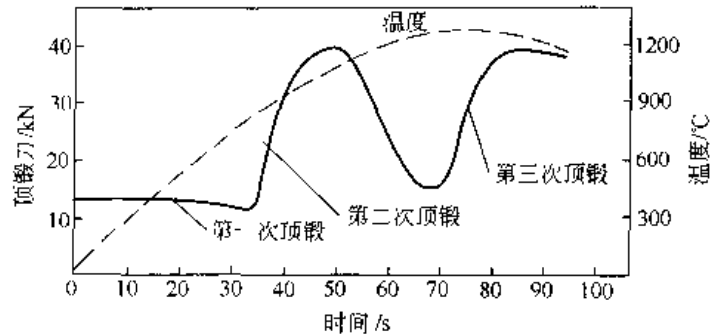


图 7.21 三段顶锻法气压焊接钢筋工艺实例

另一影响光斑率的因素是母材的化学成分，钢筋中的C、Cu、V、Cr和Al元素能降低光斑率。我国建筑钢筋的合金系是C-Mn-Si系，除了I级钢筋外，II~IV级钢筋光斑率较高。

另一影响光斑率的因素是母材的化学成分，钢筋中的C、Cu、V、Cr和Al元素能降低光斑率。我国建筑钢筋的合金系是C-Mn-Si系，除了I级钢筋外，II~IV级钢筋光斑率较高。

7.4.3 热压焊接头性能与质量控制

(1) 接头力学性能

一般说来，热压焊对基体金属力学性能和物理性能的影响极小。由于热压焊接头没有填充金属，接头的力学性能取决于基体金属的化学成分、冷却速度和焊接质量。由于焊接区加热金属范围相对较大，因此冷却速度通常比较慢。异种金属焊接时，接头的性能将更接近较弱的一边。

在塑性气压焊中，金属的最高温度低于晶粒发生迅速长大的温度。在熔化气压焊中，熔化金属层在顶锻中被挤出。这些特征对于那些容易受过热影响合金的焊接是有利的。

由于整个焊接区域都是基体金属，所以它相当于同样热循环的热处理。这种影响包括对不锈钢接头抗腐蚀性的影响。如果希望不损坏抗腐蚀性能，对于稳定化不锈钢，焊后对接头必须采用稳定化处理。

低碳钢在热压焊中很少需要焊后热处理或消除应力热处理，因为这种钢的热影响区通常（在焊接加热时）已经被正火，并且应力很低。对于使用应力较高的低碳钢和高碳钢进行焊接时，热压焊接头需要焊后热处理。热处理常常使用同一焊接加热器进行。

在钢轨焊接中，接头两边的退火区可能比较软，为了克服这个问题，可以用加热器将接头区域加热到钢的奥氏体化温度，然后快速冷却。在一些低合金钢（如石油钻井工具）的焊接中，用焊接火焰进行热处理可以改善接头的力学性能。这样的正火处理能够细化焊接热影响区的晶粒，提高接头区的塑性和韧性。对于高硬度钢，焊后的退火或缓慢冷却可以防止热影响区的硬化或表面脆化。为了改善热处理钢的性能，一般使用热处理炉。

(2) 质量控制及检测方法

1) 控制过程及方法

优良的塑性气压焊需要对影响接头质量的各种因素进行连续地控制。这些因素包括：

- a. 焊接端部的平面度、与纵轴的垂直度、粗糙度和工件表面的清洁程度；
- b. 气体流量、压力和压力循环；
- c. 焊接工作的对中性；
- d. 加热器的工作状态；
- e. 预定顶锻量或缩短量、总的顶锻距离；
- f. 顶锻后的冷却时间。

如果焊接过程与设定的相同，压力顶锻循环系统应能显示出来。热输入量一定时，可控制热影响区的宽度，同时压力顺序、加热和顶锻的整个周期的时间误差应小于10%。在这个基础上，如果焊接时间需要过度延长或缩短，现行的焊接质量应进行重新评估。

额定时间偏差过大可能导致：

- a. 一些非时间因素不能有效控制；
- b. 焊接质量出现问题，加压系统、加热器故障以及焊接件在夹具中的打滑有可能使接头质量下降。

2) 质量检验

先采用目测方法通过外观检验评估下列几个接头特征：

- a. 有无过量的熔化；
- b. 顶锻的轮廓形状和一致性；
- c. 顶锻区域中部焊接熔合线的位置。

如果完全按照标准的技术规程进行操作，该气压焊的接头质量一般是合格的。磁粉探伤可以用于钢轨气压焊接头的无损探伤。

在一些高强度钢的焊接中，增加焊接质量控制措施是必要的。例如采用随机或定期抽样方法进行各种力学性能试验，这种方法可用于检查焊接热循环和过程控制的可靠性以及焊接件的性能。

缺口冲击试验可以用于评定接头的质量，沿熔合线断裂的试样断口可以显示接头组织状态、晶粒尺寸和过热的程度，可以反映焊接热量输入对接头性能的影响。热压焊接头的抗拉强度应不低于母材金属的抗拉强度。

(3) 钢轨气压焊检验

按铁道部标准 TB/T 1632-91《钢轨焊接接头技术条件》有关规定，常用的50kg/m和60kg/m钢轨气压焊接头质量标准见表7.13。

静弯试件长度为1.2~1.3m，取5根试件为一组，其中轨头受压4根。试件放在跨度为1m的支座上，支座圆弧半径为(100±5)mm，试件焊缝居中，承受集中载荷。试件的破断载荷不得低于表7.13所列数值。

(4) 钢筋气压焊检验

质量检验有外观检验和破坏检验（拉伸试验）两种。

1) 外观检验

应在施焊过程中随时检查已经焊接的接头，发现不合格要求者，应立即割掉重焊。外观检验的具体要求是：

- a. 焊接部位钢筋轴线的偏心度应不大于钢筋直径的1/10；
- b. 焊接处隆起的直径不小于钢筋直径的1.3~1.5倍；
- c. 焊接接头隆起形状不应有显著的凸起和塌陷，不应有裂纹和过烧现象。

表 7.13 常用的 50kg/m 和 60kg/m 钢轨气压焊接头质量标准

项 目		轨 型		说 明
		50kg/m	60kg/m	
静弯破断载荷, kN	轨头受压	≥1078	≥1373	挠度 ≥20mm
	轨头受拉	≥980	≥1226	挠度 ≥15mm
落锤试验 锤重:1000kg	锤击	落锤高度/m		(1) 钢轨支座间隙为 1000±10mm (2) 试件应能承受所规定的锤击次数, 而不发生断裂
	1 次	4.2	5.2	
	2 次	2.5	3.1	
	断口检查	不得有裂纹、气孔、过烧、未焊透和肉眼可见的夹杂物		
疲劳试验(200 万次)		疲劳载荷, kN、载荷比 R 68/343 94/470		R=最小载荷/最大载荷=0.2 跨度 1m, 常温
硬度试验		在焊缝两侧 150mm 范围内, 利用布氏硬度计沿钢轨顶面纵轴, 每隔 10~20mm 测试, 其硬度大小应接近钢轨母材。允许有 4 个测点的硬度比钢轨母材低, 但不得低于 15%		
外观检查不平度, mm	轨顶面	-0.5, 0	+0.5, 0	—
	轨头内侧	0.5	0.5	
	轨底	—	—	

2) 破坏检验 (拉伸试验)

工程施焊中以 200 个接头为一批, 从每批中随机抽取 3 个试样 (1.5%) 进行取样检验。如果一次取样不合格, 可另取双倍试样复试, 如果复试结果仍有一个试件强度达不到要求, 则该批接头即为不合格品。

第 8 章 摩 擦 焊

摩擦焊 (Friction Welding) 是在外力作用下, 利用被焊工件接触面之间的相对摩擦和塑性流动所产生的热量, 使接触面及其附近区域金属达到黏塑性状态并产生宏观塑性变形, 通过两侧材料间的相互扩散和动态再结晶而完成焊接。多年来, 摩擦焊以其优质、高效、节能、无污染的技术特征, 深受制造业的关注并得到应用。特别是近年来不断开发出摩擦焊的新工艺, 如超塑性摩擦焊、线性摩擦焊、搅拌摩擦焊等, 使其在航空航天、电力、石油钻探、汽车制造、海洋工程、核能开发等高新技术领域和产业部门得到愈来愈广泛的应用。

8.1 摩擦焊的原理及特点

8.1.1 摩擦焊原理

将两个圆形截面工件进行对接焊时, 首先使一个工件以中心线为轴高速旋转, 然后将另一个工件向旋转工件施加轴向压力 F_1 , 接触端面开始摩擦加热, 达到给定的摩擦时间或规定的摩擦变形量时, 立即停止工件转动, 同时施加更大的轴向压力 F_2 , 进行顶锻完成焊接。焊接过程不加填充金属, 不需焊剂, 也不用保护气体, 焊接时间短。图 8.1 所示为普通摩擦焊接过程的原理示意。

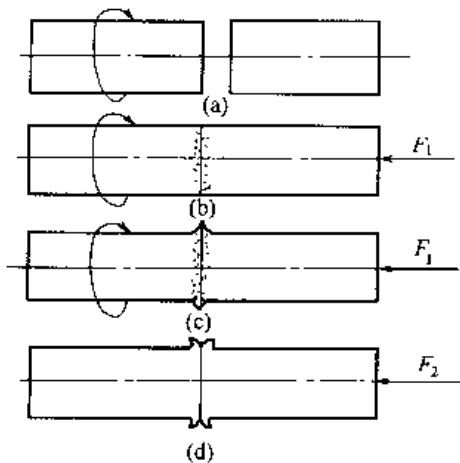


图 8.1 普通摩擦焊接过程示意

两被焊工件接合面之间在压力下高速相对摩擦便产生两个很重要的效果: 一是破坏了结合面上的氧化膜或其他污染层, 使纯金属暴露出来; 另一个是发热, 使接合面很快形成热塑性层。在随后的摩擦扭矩和轴向压力作用下这些破碎的氧化物和部分塑性层被挤出接合面外而形成飞边, 剩余的塑性变形金属就构成焊缝金属, 最后的顶锻使焊缝金属获得进一步锻造, 形成了质量良好的焊接接头。

8.1.2 摩擦焊的特点

摩擦焊有许多地方与闪光对焊和电阻对焊相似, 如焊接接头多为圆形截面对接。不同之处在于焊接热源, 闪光对焊和电阻对焊是利用电阻热, 而摩擦焊是

利用摩擦热。与闪光对焊和电阻对焊相比较, 摩擦焊有如下优点。

a. 接头质量高。摩擦焊属固态焊接。正常情况下接合面不发生熔化, 熔合区金属为锻造组织, 不产生与熔化和凝固相关的焊接缺陷; 压力与扭矩的力学冶金效应使得晶粒细化、组织致密、夹杂物弥散分布。不仅接头质量高, 而且再现性好。

b. 适合异种材料的连接。通常认为不可组合或很难焊的金属材料, 如铝-钢、铝-铜、钛-铜等, 都可以进行摩擦焊。一般来说, 凡是可以进行锻造的金属材料都可以进行摩擦焊接。

c. 生产效率高。汽车发动机排气门双头自动摩擦焊机的生产效率可达 800~1200 件/h。外径 $\phi 127\text{mm}$ 、内径 $\phi 95\text{mm}$ 的石油钻杆与接头的焊接, 连续驱动摩擦焊仅需十几秒, 如采

用惯性摩擦焊，所需时间还要短。

d. 尺寸精度高。用摩擦焊生产的柴油发动机预燃烧室，全长误差为 $\pm 0.1\text{mm}$ ；专用机可保证焊后的长度公差为 $\pm 0.2\text{mm}$ ，偏心度为 0.2mm 。

e. 易于实现机械化、自动化，操作简单。

f. 环境清洁。工作时不产生烟雾、弧光及有害气体等。

g. 节能省电。与闪光焊相比，电能节约 $5\sim 10$ 倍。

摩擦焊的缺点与局限性如下。

a. 对非圆形截面的工件焊接较困难，所需设备复杂；对盘状薄零件和管壁件，由于不易夹固，施焊也很困难。

b. 由于受摩擦焊机主轴电动机功率和压力不足的限制，目前最大焊接工作的截面仅为 200cm^2 。

c. 摩擦焊机的一次性投资大，只有大批量集中生产时，才能降低焊接生产成本。

8.2 摩擦焊的分类

随着工业技术的发展，摩擦焊的设备种类也不断增加。现在最广泛应用的是连续驱动摩擦焊和惯性摩擦焊，并已经用于大批量生产。为了满足特殊焊接结构的要求，也随之发展了一些新的摩擦焊方法。摩擦焊主要根据焊件的相对运动形式和工艺特点进行分类。

(1) 按焊件相对运动形式

a. 焊件绕线旋转可分为连续驱动摩擦焊、惯性摩擦焊、混合型旋转摩擦焊、相对空位摩擦焊等。

b. 焊件不运动可分为径向摩擦焊和搅拌摩擦焊。

c. 其他运动可分为摩擦堆焊、线性摩擦焊和轨道摩擦焊等。

(2) 按焊接工艺特点

a. 按界面温度可分为高温摩擦焊、低温摩擦焊和超塑性摩擦焊。

b. 按工艺措施可分为气体保护摩擦焊、感应加热摩擦焊、导电加热摩擦焊和封闭摩擦焊。

c. 按复合工艺可分为钎层摩擦焊、嵌入摩擦焊和第三体摩擦焊。

d. 按焊接环境可分为水下摩擦焊和普通摩擦焊。

8.2.1 普通摩擦焊

(1) 连续驱动摩擦焊

典型的连续驱动摩擦焊过程的转速、轴向压力、扭矩、轴向缩短量的变化见图 8.2。待焊工件两端分别固定在旋转夹具和移动夹具内，工件夹紧后，移动夹具随滑台向旋转端移动，移动至一定距离后，旋转端工件开始旋转，工件接触后开始摩擦加热。然后可进行时间控制或摩擦缩短量控制等。达到设定值时，旋转停止，顶锻开始并维持一段时间，然后旋转夹具松开滑台后退到原位，移动夹具松开，取出工件，焊接过程结束。

连续驱动摩擦焊是目前最常用的一种摩擦焊接方法。

(2) 惯性摩擦焊

惯性摩擦焊焊接过程的示意图见图 8.3。工件的旋转端夹持在飞轮里，焊接过程中，首先将飞轮和工件的旋转端加速到一定的转速，然后飞轮与主电动机脱开；同时工件的移动端向前移动，工件接触后，开始摩擦加热。惯性摩擦焊的主要参数有飞轮转动惯量 J 、转速 n 以及轴向压力 p 。飞轮储存的能量 A 与飞轮转动惯量 J 和飞轮角速度 ω 的关系为

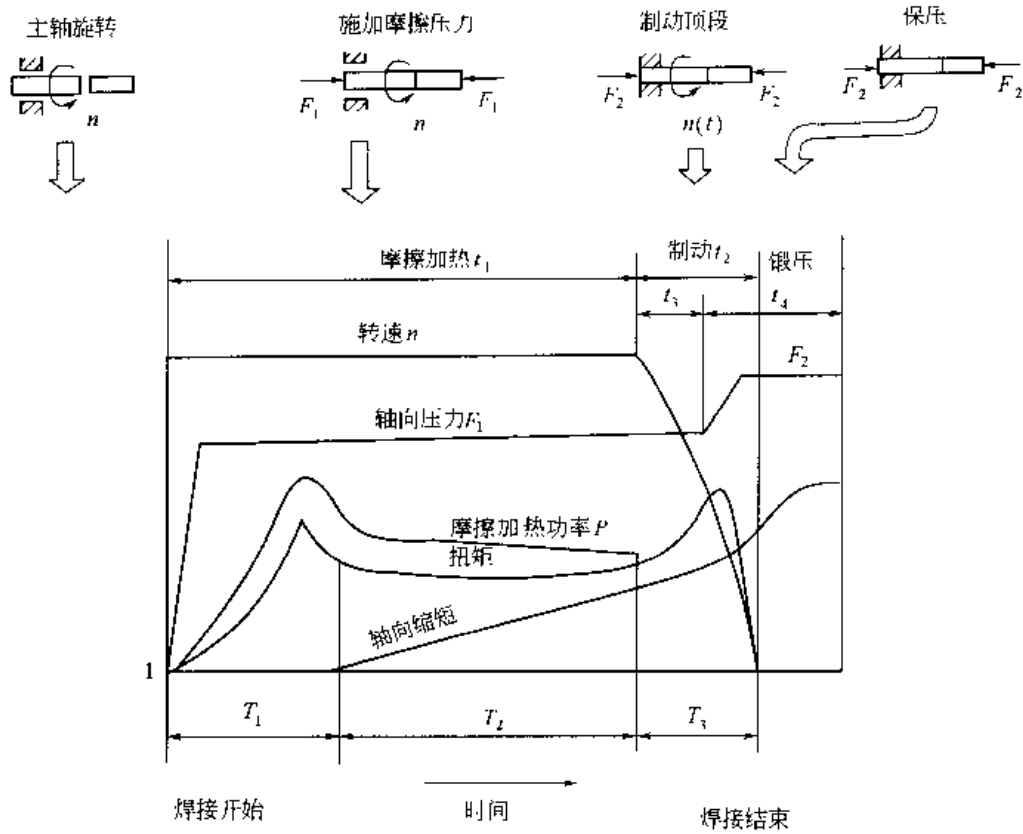


图 8.2 连续驱动摩擦焊过程中主要参数的变化规律

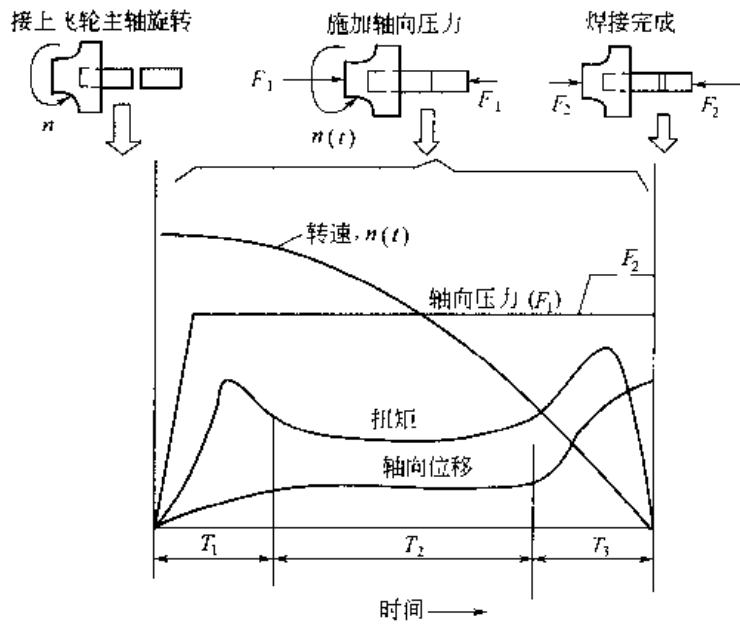


图 8.3 惯性摩擦焊焊接过程的示意图

$$A = \frac{J\omega^2}{2} \quad (8.1)$$

对实心飞轮

$$J = \frac{GR^2}{2g} \quad (8.2)$$

式中 G ——飞轮质量；

R ——飞轮半径；
 g ——重力加速度。

惯性摩擦焊的主要特点是恒压、变速，它将连续驱动摩擦焊的加热和顶锻工艺结合在一起。

(3) 搅拌摩擦焊

搅拌摩擦焊是一种新型的摩擦焊工艺，其原理见图 8.4。焊接主要由搅拌头完成，搅拌头由特型指棒、夹持器和圆柱体组成。焊接开始时，搅拌头高速旋转，特型指棒迅速钻入被焊板的焊缝，与特型指棒接触的金属摩擦生热形成了很薄的热塑性层。当特型指棒钻入工件表面以下时，有部分金属被挤出表面，由于正面轴肩和背面垫板的密封作用：一方面，轴肩与被焊板表面摩擦，产生辅助热；另一方面，搅拌头和工件相对运动时，在搅拌头前面不断形成的热塑性金属转移到搅拌头后面，填满后面的空腔。

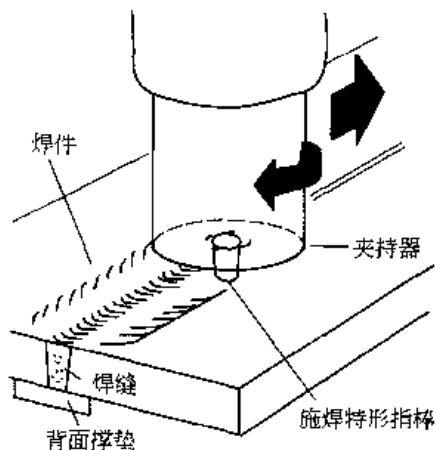


图 8.4 搅拌摩擦焊原理示意

搅拌摩擦焊已在欧、美等发达国家的航空航天工业中应用，并已成功应用于在低温下工作的铝合金薄壁压力容器焊接，完成了纵向焊缝的直线对接和环形焊缝沿圆周的对接。并且该技术及其工程应用开发已在新型运载工具的新结构设计中广泛采用。

8.2.2 新型摩擦焊

(1) 线性摩擦焊

旋转式摩擦焊只限于把圆柱截面或管截面的焊件焊到相同类型的截面或板上。线性摩擦焊机则可以焊接方形、圆形、多边形截面的金属或塑料焊件以及不规则构件。线性摩擦焊的工作原理示意图见图 8.5。

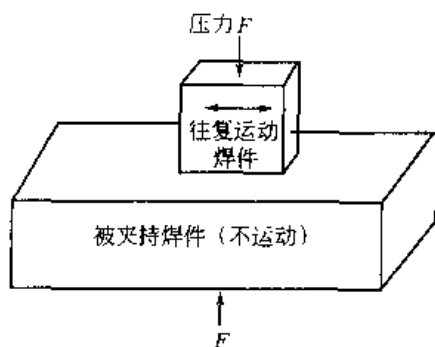


图 8.5 线性摩擦焊的工作原理示意

线性摩擦焊过程中，摩擦副中一个焊件被往复机构驱动，相对于另一侧被夹紧的表面作相对运动。在垂直于往复运动方向的压力作用下，随摩擦运动的进行，摩擦表面被清理并产生摩擦热，摩擦表面的金属逐渐达到黏塑性状态并产生变形。然后，停止往复运动并施加顶锻力，完成焊接。

(2) 嵌入摩擦焊

嵌入摩擦焊是利用摩擦焊原理把相对较硬的材料嵌入到较软的材料中。图 8.6 所示为嵌入摩擦焊的工作原理示意。工作时两个焊件之间相对运动所产生的摩擦热在软材料中产生局部塑性变形，高温塑性材料流入预先加工好的硬材料的凹区中。拘束肩迫使高温塑性材料紧紧包住硬材料的连接接头。当转动停止，焊件冷却后，即形成可靠接头，并且两侧焊件相互嵌套形成机械连接。

目前主要应用于电力、真空和低温应用行业非常重要的材料连接中，如铝-铜、铝-钢和钢-钢等。嵌入摩擦焊还可用于制造发动机阀座、连接端头、压盖和管板过渡接头，也可用于连接热固性材料和热塑性材料。

(3) 第三体摩擦焊

图 8.7 所示为第三体摩擦焊的工作原理示意。低熔点的第三种物质在轴向压力和扭矩的作用下，在被连接部件之间的间隙中摩擦生热和塑性变形。相对摩擦运动可以产生足够的清理效果，不需要焊剂和可控保护气氛。冷却后，第三体材料固化，从而把两个部件锁定形成可靠的接头。

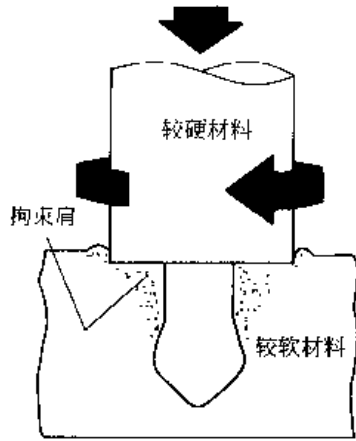


图 8.6 嵌入摩擦焊的工作原理示意

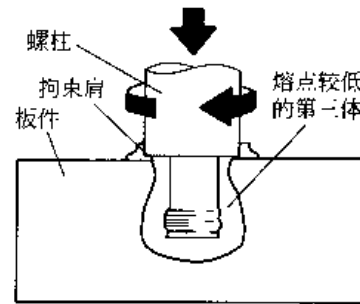


图 8.7 第三体摩擦焊的原理示意

第三体摩擦焊方法主要用于难以焊接的材料，如陶瓷-陶瓷、金属-陶瓷、热固性材料-热塑性复合材料等，可以利用该方法形成高强度接头。

(4) 相位控制摩擦焊

相位控制摩擦焊用于六方钢、八方钢、汽车操纵架等对相对位置有要求的工件的焊接。实际应用的相位控制摩擦焊主要有三种类型：机械同步摩擦焊、插销配合摩擦焊和同步驱动摩擦焊。图 8.8、图 8.9 和图 8.10 所示分别为机械同步摩擦焊机、插销配合摩擦焊机以及同步驱动摩擦焊机的结构示意。

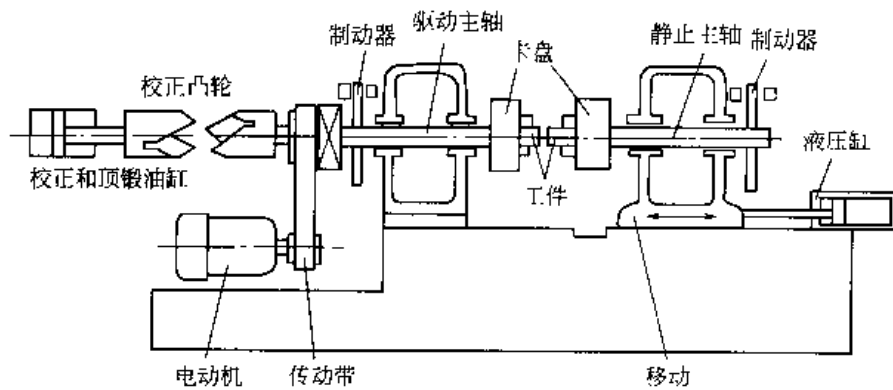


图 8.8 机械同步摩擦焊机结构示意

(5) 径向摩擦焊

径向摩擦焊的原理示意如图 8.11 所示。待焊的管子开有坡口，管内套有芯棒，然后装上带有斜面的圆环，焊接时圆环旋转并向其施加径向摩擦压力 p ，当摩擦加热过程结束时，圆环停止转动，并向圆环施加压力。径向摩擦焊接时，被焊管本身不转动，管子内部不产生飞边。在石油和天然气输送管道连接方面，径向摩擦焊具有广阔的应用前景。同时，在兵器行业中能实现薄壁纯铜与钢弹体的连接。

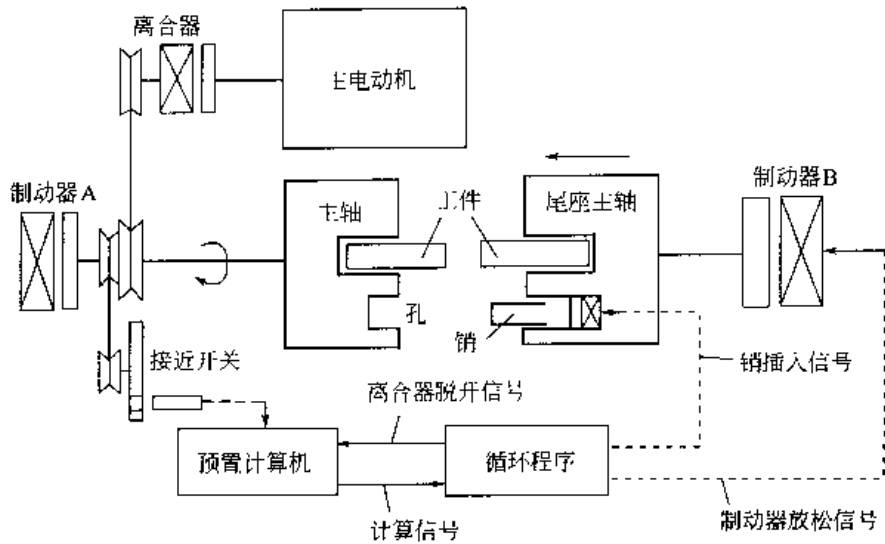


图 8.9 插销配合摩擦焊机结构示意图

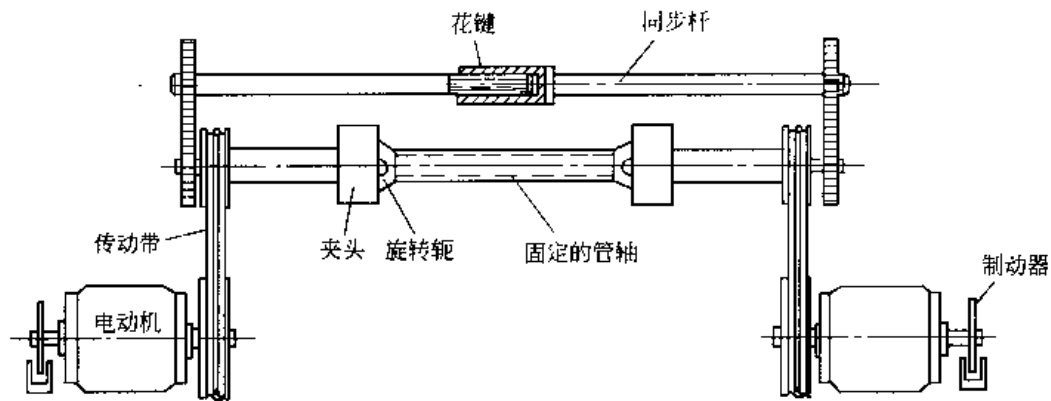


图 8.10 同步驱动摩擦焊机结构示意图

(6) 摩擦堆焊

摩擦堆焊的原理示意如图 8.12 所示。堆焊金属圆棒相对于焊件以 n_1 旋转，堆焊件（母材）也同时以转速 n_2 旋转，在压力 p_1 的作用下，圆棒和母材摩擦生热。由于母材体积大，冷却速度快，所以堆焊金属过渡到母材上形成堆焊焊缝。

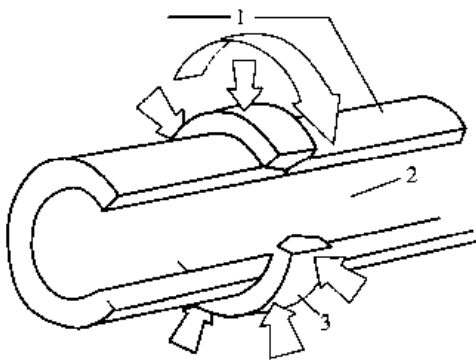


图 8.11 径向摩擦焊的原理示意

1--待焊圆管；2--芯棒；3--圆环

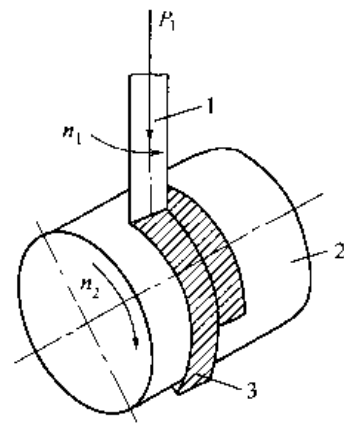


图 8.12 摩擦堆焊的原理示意

1 堆焊金属圆棒；2 堆焊件；3-- 堆焊焊缝

摩擦堆焊适用于异种材料的连接，特别是摩擦焊焊缝金属具有高的晶格畸变程度、晶粒细化、强韧性能好等优点，故适用于进行表面堆焊。

(7) 超塑性摩擦焊

超塑性摩擦焊是按焊接工艺特点进行分类的，是通过控制措施，使焊合区在焊接过程中处于超塑性状态的摩擦焊。优点是可避免高温下形成硬脆的金属间化合物以及保持被焊材质的热处理状态。适用于异种难焊金属的连接，也可用于特种金属的有效连接。

8.3 摩擦焊设备

8.3.1 摩擦焊设备的组成

摩擦焊是一个机械化的焊接方法，设备比较复杂。其中最常用的是普通型连续驱动摩擦焊机与惯性摩擦焊机。

(1) 连续驱动摩擦焊机

连续驱动摩擦焊是最典型的摩擦焊方法，普通型连续驱动摩擦焊机如图 8.13 所示。这种摩擦焊机主要由主轴系统、加压系统、机身、夹头、检测与控制系统以及辅助装置等六部分组成。

① 主轴系统 主要由主轴电动机、传动皮带、离合器、制动器、轴承和主轴等组成，主轴系统传送焊条所需的功率，并承受摩擦扭矩。

② 加压系统 主要包括加压机构和受力机构。加压机构的核心是液压系统，分为夹紧油路、滑台快进油路、滑台工进油路、顶锻保压油路以及滑台快退油路等部分。

夹紧油路主要通过对离合器的压紧与松开完成主轴的启动、制动以及工件的夹紧、松开等任务。当工件装夹完成后，滑台快进。为了避免两工件发生撞击，当接近到一定程度时，通过油路的切换，滑台由快进转为工进。工件摩擦时，提供摩擦压力。顶锻回路用以调节顶锻力和顶锻速度的大小。当顶锻保压结束后，又通过油路切换实现滑台快退，达到原位后停止运动，一个循环结束。

受力机构的作用是平衡轴向力（摩擦压力、顶锻压力）和摩擦扭矩以及防止焊机变形，保持主轴系统和加压系统的同心度。轴向力的平衡可采用单拉杆或双拉杆结构，即以工件为中心，在机身中心位置设置单拉杆或以工件为中心，对称设置双拉杆；扭矩的平衡常用装在机身上的导轨来实现。

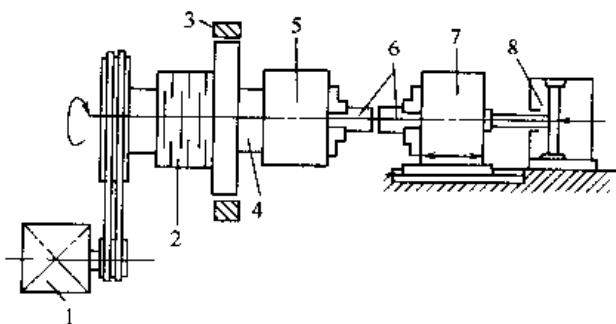


图 8.13 普通型连续驱动摩擦焊机示意

1—主轴电动机；2—离合器；3—制动器；4—主轴；
5—旋转夹头；6—工件；7—移动夹头；8—轴向加压油缸

③ 机身 一般为卧式，少数为立式。为防止变形和振动，机构应有足够的强度和刚度。主轴箱、导轨、拉杆、夹头都装在机身上。

④ 夹头 分为旋转和移动（固定）两种。旋转夹头又有自定心弹簧夹头和三爪夹头之分，如图 8.14 所示。弹簧夹头适用于直径变化不大的工件，三爪夹头适用于直径变化较大的工件。移动夹头大多为液压虎钳，如图 8.15 所示，其中简单型适用于直径变化不大的工件，自动定心型适用于

直径变化较大的工件。为了使夹持牢固，夹头与工件的接触部分硬度要高、耐磨性要好。

⑤ 检测与控制系统 参数检测主要涉及时间（摩擦时间、刹车时间、顶端上升时间、

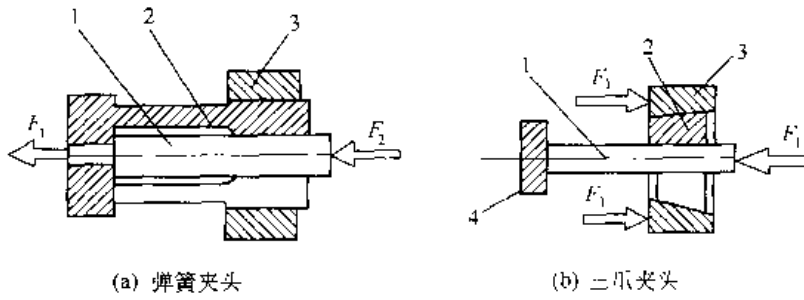


图 8.14 旋转夹头的结构

1—工件；2—夹爪；3—夹头体；4—挡铁； F_1 —预紧压力； F_2 —摩擦和顶锻时的轴向压力

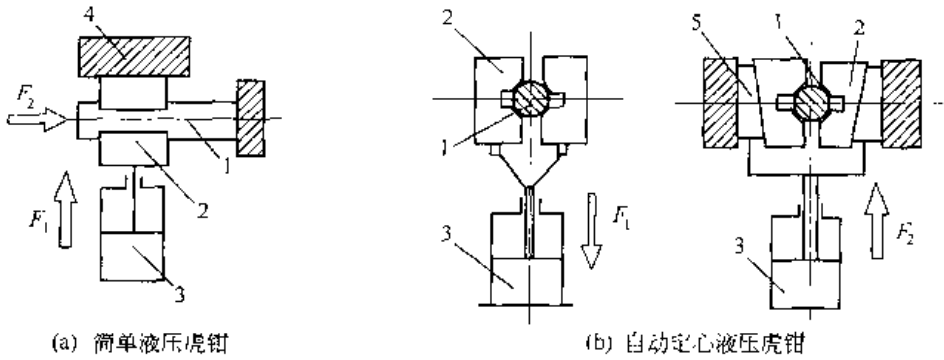


图 8.15 移动（固定）夹头的结构

1—工件；2—夹爪；3—油缸；4—支座；
5—挡铁； F_1 —夹紧力； F_2 —摩擦和顶锻压力

顶端维持时间)、加热功率压力(摩擦压力、顶锻压力)、变形量、扭矩、转速、温度、特征信号(如摩擦开始时刻、功率峰值及所对应的时刻)等。

控制系统包括程序控制和工艺参数控制,程序控制用来完成上料、夹紧、滑台快进、滑台工进、主轴旋转、摩擦加热、离合器松开、刹车、顶锻保证、车除飞边、滑台后退、工件退出等顺序动作及其联锁保护等,工艺参数控制根据方案进行相应的诸如时间控制、功率峰值控制、变形量控制、温度控制、变参数复合控制等。

⑥ 辅助装置 主要包括自动送料、卸料、自动切除飞边装置等。

(2) 惯性摩擦焊机

惯性摩擦焊机结构的示意如图 8.16 所示。惯性摩擦焊机主要由电动机、主轴、飞轮、夹盘、移动夹具、液压缸等组成。

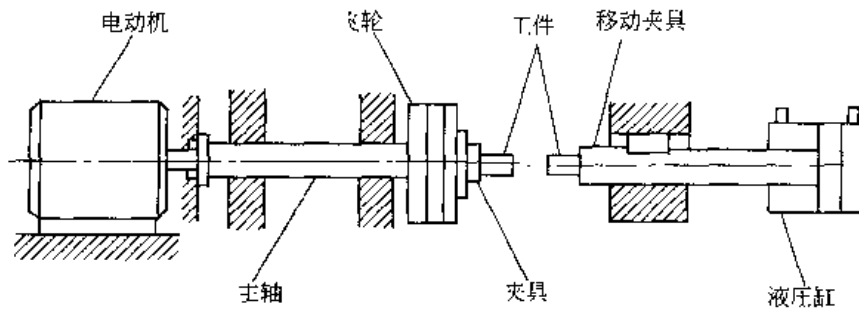


图 8.16 惯性摩擦焊机结构的示意

工作时，飞轮、主轴、夹盘和工件都被加速与给定能量相应的转速时，停止驱动，工件和飞轮自由旋转，然后使两工件接触并施加一定的轴向压力，通过摩擦使飞轮的动能转换为摩擦界面的热能，飞轮转速逐渐降低，当变为零时，焊接过程结束。其各部分的工作原理与连续驱动摩擦焊机基本相同。

8.3.2 摩擦焊机的技术参数

目前国内外主要应用两种类型的摩擦焊机，即连续驱动摩擦焊机和惯性摩擦焊机。前者应用最广，约占全部摩擦焊机的90%以上；后者主要用于大断面工件、异种金属或特殊部件的焊接。

部分国产的连续驱动摩擦焊机的技术参数见表8.1。长春焊机制造厂生产的C-25A-2型连续驱动摩擦焊机的技术参数见表8.2。

表 8.1 部分国产的连续驱动摩擦焊机的技术参数

型号	最大顶锻力 /kN	主轴转速 /r·min ⁻¹	焊棒料直径 /mm	整机质量 /t	型号	最大顶锻力 /kN	飞轴转速 /r·min ⁻¹	焊棒料直径 /mm	整机质量 /t
C-0.5A	5	6000	4~6.5	3	C63	630	950	35~60	8.5
C-1A	10	5000	4.5~8	3	C 80A	800	850	40~75	17
(C-2.5D)	25	3000	6.5~10	3	C-120C	1200	580	50~85	16
C-4D	40	2500	8~14	3	CT 25	250	5900	18~40	8
C-4C	40	2500	8~14	4	RS15	450	1500	20~70	8.5
C-20	200	2000	12~34	5.2	MCH-32	40	2500	4~16	5
C-20A-3	250	1350	18~40	6.8	MCH-2-6	60	2500	10~20	6
C-50A	500	1000	30~50	8					

表 8.2 长春焊机制造厂生产的 C-25A-2 型连续驱动摩擦焊机技术参数

项 目	数 据	项 目	数 据
主轴电机功率/kW	30	刹车时间/s	0.2
主轴转速/r·min ⁻¹	1350	加压级数	3级(1级,2级摩擦+顶锻)
焊件直径/mm	18~40, 25~40	摩擦时间/s	1级0.1~10;2级0~40
焊件截面积/mm ²	255~1256	工进速度/mm·min ⁻¹	2~5.5
工作台移动距离/mm	300(最大)	快进速度/mm·min ⁻¹	3.5
最大顶锻推力/kN	250	生产率/件·h ⁻¹	80~120
移动夹具夹紧力/kN	150(最大)	主机尺寸/mm	2350×2170×1330
旋转夹具夹紧力/kN	200(最大)	整机质量/t	6.5
摩擦顶锻力/kN	32~250	占地面积/mm	3280~3000

目前国际市场中提供摩擦焊机的主要有美国、德国、法国、英国和日本。美国 MIT 公司 (Manufacturing Technology, Inc) 生产系列惯性摩擦焊机，该公司制造的 800 型惯性摩擦焊机是世界上正在使用的最大的摩擦焊机，专门用于焊接航空发动机的各种合金部件。MTI 公司惯性摩擦焊机的型号和技术参数见表 8.3。

表 8.3 MTI 公司惯性摩擦焊机的型号和技术参数

型 号	最大转速/r·min ⁻¹	最大飞轮/kg·m ²	最大焊接力/kN	最大管形焊接面积/mm ²
40	45000/60000	0.0063	222	45.2
60	12000/24000	0.094	10.03	426
90	12000	0.21	57.82	645
120	8000	0.21	124.54	1097
150	8000	2.11	222.1	1677
180	8000	42	355.8	2968

型号	最大转速/ $r \cdot \text{min}^{-1}$	最大飞轮/ $\text{kg} \cdot \text{m}^2$	最大焊接力/kN	最大管形焊接面积/ mm^2
220	6000	25.3	578.2	4194
250	4000	100.4	859.6	6452
300	3000	210	1112.0	7742
320	2000	421	1556.8	11613
400	2000	1054	2668.8	19355
480	1000	10535	3780.8	27097
750	1000	21070	6672	48387
800	500	42110	2000	115160

8.4 摩擦焊工艺

8.4.1 接头设计与表面准备

(1) 接头设计

虽然摩擦焊的工艺有多种形式，但是在生产领域中应用最广泛的仍是旋转式摩擦焊。在摩擦焊过程中的轴向压力作用下，焊件会产生轴向缩短，而在焊合处产生飞边。因此在准备毛坯时轴向尺寸需留有余量。惯性摩擦焊时轴向缩短量可用下式估计，即

$$L = L_0 + KD \quad (8.3)$$

采用式(8.3)的计算误差约 $\pm 10\%$ ，公式中各参数见表8.4。

表 8.4 轴向缩短量估算参数

接头形式	棒-棒	棒-板	管-管	管-板	接头形式	棒-棒	棒-板	管-管	管-板
L_0/mm	1.3	0.9	3.8	2.5	D/mm	外径	棒件外径	壁厚	管子壁厚
K	0.1	0.067	0.2	0.133					

a. 旋转式摩擦焊至少有一个是圆形截面。为了夹持方便、牢固，保证焊接过程不失稳，应尽量避免设计薄管、薄板接头。一般倾斜接头应与中心线成 $30^\circ \sim 45^\circ$ 的斜面。采用中心部位突起的接头，可有效地避免中心未焊合，如图8.17所示。

b. 锻压温度或导热率相差较大的材料，为了使两个零件的锻压和顶锻相对平衡，应调整界面的相对尺寸。对于大截面的接头，为了降低摩擦加热时的扭矩和功率峰值，采用端面侧角可使焊接时接触面积逐渐增加。

c. 棒-棒和棒-板接头，中心部位材料被挤出形成飞边，要消耗更多的能量，而焊缝中心部位对扭矩和弯曲应力的承担又很少，所以，如果工作条件允许，可将一个或两个零件加工成具有中心孔洞，既可用较小功率焊机，又可提高生产率。

d. 摩擦焊应避免渗碳、渗氮等。为了防止由于轴向力引起的滑退，通常在工件后面设置挡块。工件伸出夹头外的尺寸要恰当，被焊工件应尽可能有相同的伸出长度。如要限制飞边流出（如不能切除飞边或不允许飞边暴露时），应预留飞边槽。

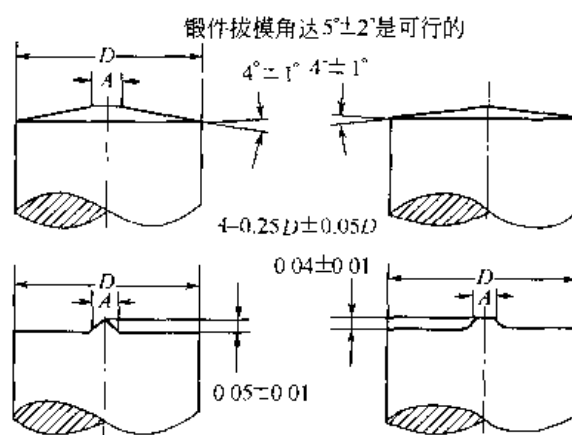


图 8.17 接头表面突起设计标准

(2) 接头表面准备

a. 焊件的摩擦端面应平整，中心部位不能有凹面或中心孔，以防止焊缝中包藏空气和氧化物。但切断刀留下的中心凸台则无害，有助于中心部位加热。

b. 端面不垂直度一般不超过直径的 1%，过大会产生影响不同轴度的径向力。

c. 当接合面上具有厚的氧化层、镀铬层、渗碳层或渗氮层时，常不易加热或被挤出，焊前应进行清除。

d. 摩擦焊对焊件接合面的粗糙度、清洁度要求并不严格，如果能加大焊接缩短量，则气割、冲剪、砂轮磨削、锯断的表面均可直接采用。

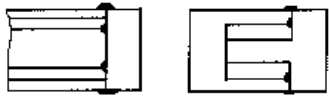
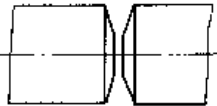


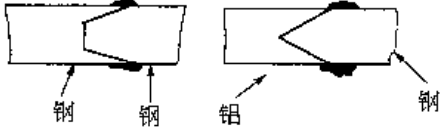
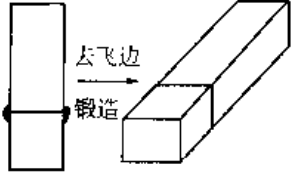
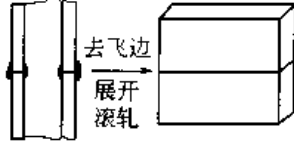
摩擦焊接头的基本形式和摩擦焊特殊接头设计形式见表 8.5 和表 8.6。

表 8.5 摩擦焊接头的基本形式

接头形式	简图	接头形式	简图
棒-棒		管-板	
管-管		管-管板	
棒-管		棒-管板	
棒-板		矩形多边形-棒或板	

表 8.6 摩擦焊特殊接头设计形式

接头形式	示意图	特点
等断面接头		将焊接接头置于远离应力集中的部位，也有利于热平衡，便于顶锻和清除飞边
带飞边槽接头		不允许露出又无法切除飞边的工件可用飞边槽，保持工件外观和使用性能

接头形式	示意图	特点
复式接头 (同心管-棒、板) (同心管、棒、板)		同时将两个接头焊成
端面倒角接头		用于大截面的棒、管件的摩擦焊,以减少工件外缘的摩擦热量 锥形部分长度不得超过缩短量的50%
棒-棒 管-管		
锥形接头 (管-管) (棒-板)		锥形面与中心线成 $30^\circ \sim 45^\circ$, 最小可为 8° 的斜面, 但角度选择须防止工件从孔中挤出
异种材料锥形接头 (棒-棒)		异种材料摩擦焊时, 其中一件较软, 可选用锥形接头和硬规范
焊后锻压成形 (棒-棒)		将棒材对接, 焊后用锻压方法再制成所需形状
焊后展开轧制成形 (管-管)		将管-管对接焊后, 去飞边, 展开滚轧成板材, 用于不适当转动的板件摩擦焊

8.4.2 摩擦焊的工艺参数

摩擦焊的工艺参数有两大类: 独立参数和非独立参数。

独立参数可以单独设定和控制, 主要有主轴转速、摩擦压力、摩擦时间、顶锻压力、顶锻维持时间等; 非独立参数由两个或两个以上独立参数以及材料性质所决定, 主要有摩擦扭矩、焊接温度、摩擦变形量、顶锻变形量等。

(1) 连续驱动摩擦焊的工艺参数

连续驱动摩擦焊机的工艺参数, 即可以控制的主要参数有转速、摩擦压力、摩擦时间、摩擦变形量、停车时间、顶锻延时、顶锻时间、顶锻压力、顶锻变形量, 其中摩擦变形量和顶锻变形量是其他参数的综合反映。

① 转速与摩擦压力 直接影响摩擦扭矩、摩擦加热功率、接头温度场、塑性层温度以及摩擦变形速度等。

当工件直径一定时，转速代表摩擦速度。实心圆截面工件摩擦界面上的平均摩擦速度是距圆心为 $2/3$ 半径处的摩擦线速度。稳定摩擦扭矩与平均摩擦速度、摩擦压力的关系如图 8.18 (a) 所示。摩擦变形速度与平均摩擦速度、摩擦压力的关系如图 8.18 (b) 所示。转速 n 对热影响区和飞边形状的影响如图 8.19 所示。转速和摩擦压力的选用范围很宽，常用的组合为强规范和弱规范。强规范时，转速较低，摩擦压力较大，摩擦时间短；弱规范时，转速较高，摩擦压力小，摩擦时间长。

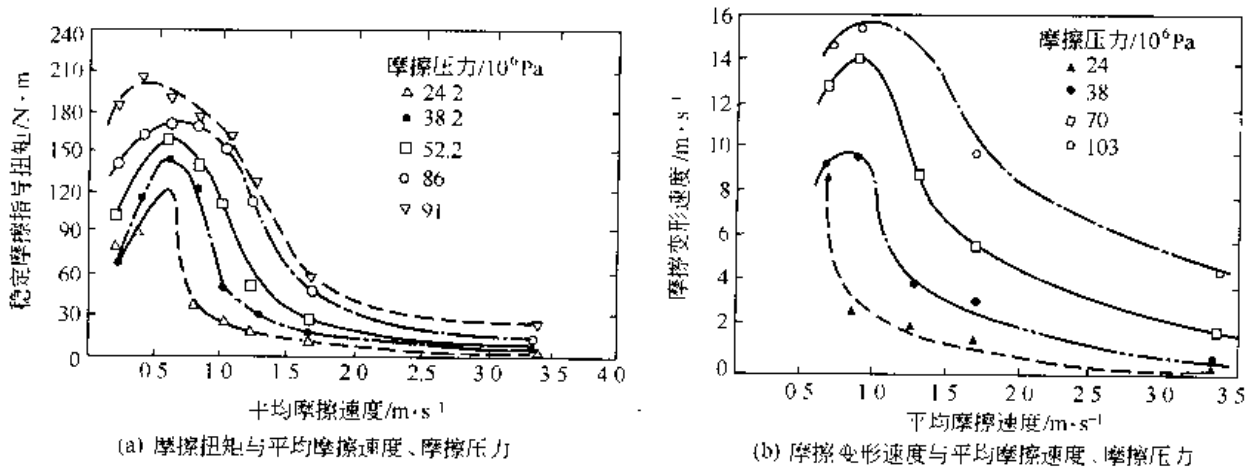


图 8.18 摩擦扭矩和摩擦变形速度与平均摩擦速度、摩擦压力的关系曲线

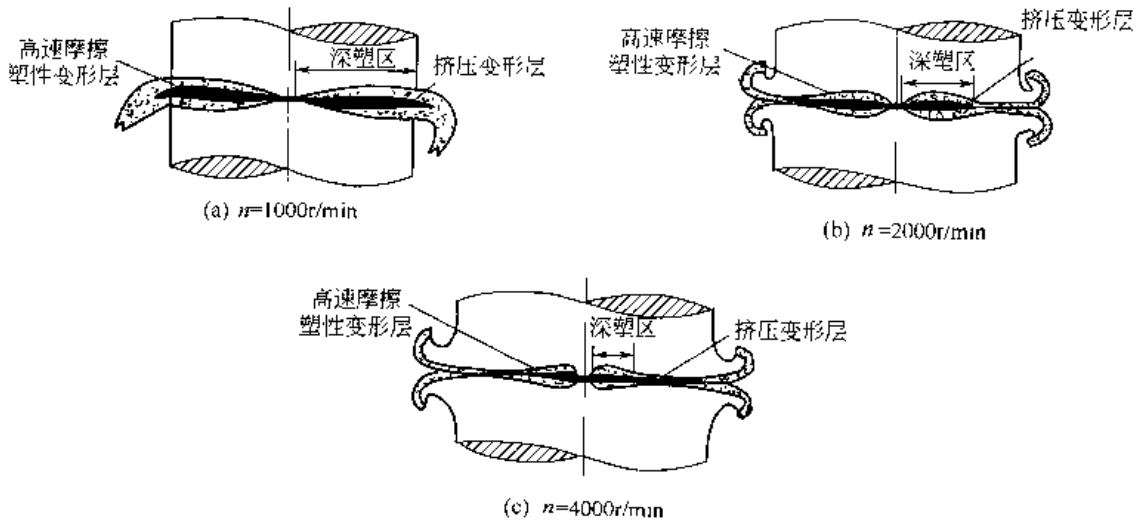


图 8.19 转速 n 对热影响区和飞边形状的影响
(低碳钢棒 $\phi 19\text{mm}$, 压力 86MPa)

对于大多数碳钢推荐的圆周表面速度为 $1.25 \sim 3.75\text{m/s}$ 。对低碳钢和低合金钢的摩擦压力一般为 $41 \sim 83\text{MPa}$ ；对中、高碳钢，摩擦压力一般为 $41 \sim 103\text{MPa}$ 。焊接大截面工件时，为了不使摩擦焊加热功率超过焊机容量，可采用二级、三级加压。

② 摩擦时间 影响接头的温度、温度场和质量。如果时间短，则界面加热不充分，接头温度和温度场不能满足焊接要求；如果时间长，则消耗能量多，热影响区大，高温区金属易过热，变形飞边大，消耗材料多。碳钢工件的摩擦时间一般在 $1 \sim 40\text{s}$ 范围内。

③ 摩擦变形量 与转速、摩擦压力、摩擦时间、材质的状态和变形抗力有关，要得到牢固的接头，必须有一定的摩擦变形量，通常选取的范围为 $1 \sim 10\text{mm}$ 。

④ 停车时间和顶锻延时 停车时间是转速由给定值下降到零所对应的时间，当从短到长变化时，摩擦扭矩后峰值从小到大。停车时间还影响接头的变形层厚度和焊接质量，当变形层较厚时，停车时间要短；当变形层较薄而且希望在停车阶段增加变形层厚度时，则可延长停车时间。通常选取 0.1~1s。顶锻延时是为了调整摩擦扭矩后峰值和变形层的厚度。

表 8.7 列出几种典型材料连续驱动摩擦焊的工艺参数。

表 8.7 几种典型材料连续驱动摩擦焊的工艺参数

焊 接 材 料	接头直径 mm	工 艺 参 数				备 注
		转速 $r \cdot \text{min}^{-1}$	摩擦压力 MPa	摩擦时间 s	顶锻压力 MPa	
45 钢+45 钢	16	2000	60	1.5	120	—
45 钢+45 钢	25	2000	60	4	120	—
45 钢+45 钢	60	1000	60	20	120	—
不锈钢+不锈钢	25	2000	80	10	200	—
高速钢+45 钢	25	2000	120	13	240	采用模子
铜+不锈钢	25	1750	34	40	240	采用模子
铝+不锈钢	25	1000	50	3	100	采用模子
铝+铜	25	208	280	6	400	采用模子
GH4169	20	2370	90	10	125	—
GH22	20	2370	65	16	95	—
TA01	20	1500	29	1	52	—
Ti17	20	2370	40	1	40	—
30CrMnSiNi2A	20	2370	30	6	55	—
40CrMnSiMoVA	20	2370	30	3	78	—
1Cr18Ni9Ti	25	2000	40	10	100	—
20CrMnTi+35	20	2000	34	4.5	130	—

⑤ 顶锻压力、顶锻变形量和顶锻变形速度 顶锻压力的作用是挤出摩擦变形层中的氧化物和其他有害杂质，并使焊缝得到锻压，结合牢固，晶粒细化。顶锻压力的选择与材质、接头温度、变形层厚度以及摩擦力有关。材料的温度强度高时，顶锻压力要大；温度高、变形层厚度小时，顶锻压力要小；摩擦压力大时，相应的顶锻压力要小。顶锻压力一般选取摩擦压力的 2~3 倍，对于低碳钢和低合金钢，可选用 80~170MPa；对于中、高碳钢，可选用 100~400MPa。顶锻变形量是顶锻压力作用结果的具体反映。顶锻变形量一般选取 1~6mm。顶端速度反映了“趁热顶锻”的响应品质，如顶锻速度慢，则达不到要求的顶锻变形量，顶锻速度一般选取 0.1~0.4mm/s。

(2) 惯性摩擦焊的工艺参数

惯性摩擦焊的工艺参数有三个：转动惯量、起始转速和轴向压力。前两个参数决定焊接可用的总能量，轴向力大小取决于被焊材质和接合面的面积。

飞轮的能量可由下式确定，即

$$E = 55 \times 10^{-4} I n^2 \quad (8.4)$$

式中 E 能量，J；

I ——飞轮系统转动惯量，kg； $I = mr^2$ ；

m ——飞轮系统质量，kg；

r ——回转半径，m；

n ——瞬时转速，r/min。

从上式看出改变飞轮的转动惯量或改变其转速都可改变焊接用的能量。焊接过程中，飞

轮因释放其所储能量而降低速度，待飞轮停止，飞轮的能量就全部传递给焊接接合面而转变为热能。在轴向压力共同作用下便在接合面上形成焊缝。

工艺参数（焊接能量、转速和轴向压力）对摩擦焊接合面加热状态和飞边形状的影响如图 8.20 所示。

① 转动惯量 飞轮转动惯量和起始转速均影响焊接能量。在能量相同情况下，大而转速慢的飞轮产生顶锻变形量较小，而转速快的飞轮产生的顶锻变形量较大。当能量增加时，结合处成塑性状态的金属量增加，顶锻和接合面挤出的金属也增加。这时加热状态十分均匀，但能量过大，使金属大量变成飞边，图 8.20 (a) 所示为低、中、高焊接能量的对接焊缝截面形状。

② 起始转速 对每一种材料组合，都有与之相应的获得最佳焊缝的起始转速。起始转速具体反映在工件的线速度上，对钢-钢焊件，推荐的速度范围为 2.5~7.6m/s。低速 (<1.5m/s) 时，中心加热偏低，飞边粗大不齐，焊缝成漏斗状，见图 8.20 (b)；中速 (1.5~4.6m/s) 焊接时焊缝深度逐渐增加，边界逐渐均匀；高速 (4.6~6.0m/s) 焊时，焊缝边界均匀；如果速度大于 6m/s 时，焊缝中心宽度大于其他部位。

③ 轴向压力 对焊缝深度和形貌的影响几乎与起始转速的影响相反。压力较低时，焊缝呈鼓形，中心处厚；压力过大时，接头中心处结合不良，且焊缝顶锻量大，焊缝呈细腰形，见图 8.20 (c)。典型材料惯性摩擦焊的工艺参数见表 8.8。

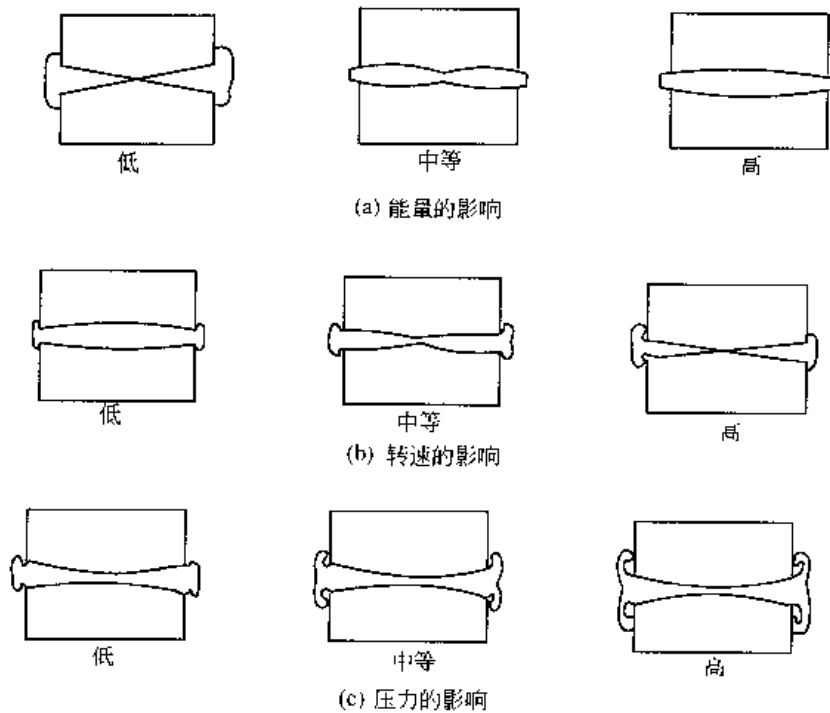


图 8.20 工艺参数对摩擦焊接合面加热状态和飞边形状的影响

表 8.8 典型材料惯性摩擦焊的工艺参数

材 料	转速 $r \cdot \text{min}^{-1}$	转动惯量 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$	轴向压力 $\cdot \text{kN}$
20 钢	5730	0.23	60
45 钢	5530	0.29	83
合金钢 20CrA	5530	0.27	76
不锈钢 ZG0Cr17Ni4Cu3Nb	3820	0.73	110

续表

材 料	转速 $r \cdot \text{min}^{-1}$	转动惯量 $\cdot \text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$	轴向压力 kN
超高强度 10CrNi2Si2MoVA	3820	0.73	138
纯钛	9550	0.06	18.6
钛合金 7A03	9550	0.07	20.7
铝合金 2A12	3060~7610	0.41~0.08	41
铝合金 7A04	3060~7610	0.41~0.08	89.7
镍基合金 GH600	4800	0.60	117
镍基合金 GH4169	2300	2.89	206.9
镍基合金 GH901	3060	1.63	206.9
镍基合金 GH738	3060	1.63	206.9
镍基合金 GH141	2300	2.89	206.9
镍基合金 GH536	2300	2.89	206.9
镁合金 MB7	3060~11500	0.41~0.03	51.7
镁合金 MB5	3060~11500	0.22~0.02	40

8.4.3 典型摩擦焊工艺参数实例

(1) 异种钢摩擦焊工艺参数

异种钢摩擦焊的工艺参数见表 8.9。

表 8.9 异种钢摩擦焊的工艺参数

被 焊 钢 号	焊接压力 $\cdot \text{MPa}$		顶锻量 $\cdot \text{mm}$		加热时间 $\cdot \text{s}$	转速 $r \cdot \text{min}^{-1}$	工件直径 $\cdot \text{mm}$	用于顶锻的伸出长度 $\cdot \text{mm}$
	加热	顶锻	加热	总计				
20 钢-30 钢	50	100	3.5	5.0~5.8	7	1000	20	
20 钢-45 钢	50	100	3.5	5	10	1000	20	—
15Mn+20 钢	50	100	3.5	6	6~7	1000	20	
25Mn+45 钢	50	150	3	5	7	1000	20	—
50Mn+20 钢	50	150	3.5	5	7	1000	20	—
50Mn+45 钢	50	150	3.5	4.5~5	7~8	1000	20	
20Cr+20 钢	50	120	3	5.5	8	1000	20	—
20Cr+45 钢	50	120	3	5	8	1000	20	
40Cr-20 钢	50	100	3.5	5~5.5	12	1000	25	
W9Cr4V2-15 钢	80	160		2.5	11	1000	20	2
W9Cr4V2+40Cr	100	200		2.2	8	1000	18	2
W18Cr4V+1CrWMn	100	200		3	30	1000	30	8
W18Cr4V+45 钢	100	200	—	2.5	12	1000	22	2
W18Cr4V+40Cr	100	200	—	2.2	9	1000	18	2
W18Cr4V-9SiCr	120	240	3	3	15	1000	30	2~2.5
4Cr9Si2+40Cr	40	80	3	3.5	3.6	1000	12	
GCr15+20 钢	50	140	2.5	6~6.5	8~9	1000	25	—
GCr15+45 钢	50	140	3	5~6	7~8	1000	22	—
20Cr3MoWVA+40Cr	60	210	3	5.5	4.8	1000	20	
20Cr3MoWVA-40Mn	60	210		5	4.8	1000	20	—
3Cr19Ni9MoNbTi+40Cr	60	210	—	2.3	9	1000	20	2
Cr18Ni9Ti+20 钢	60	210	—	3.2	9	1000	25	2
1Cr18Ni9Ti+45 钢	60	210	—	3.5	9	1000	25	2.5
1Cr18Ni9Ti+40Cr	60	210	—	4	9	1000	25	3~3.5
1Cr18Ni9Ti+2Cr13	60	210	—	4	9	1000	20	3~3.5
1Cr18Ni9Ti+1Cr17Ni2	60	210	—	4	9	1000	20	3
1Cr18Ni9Ti+12CrMoV	60	210	6	9	5	1000	20~25	6
1Cr17Ni2+Cr18Ni12Mo2Ti	60	210		4	9	1000	20	2~3

(2) 钢与铝的摩擦焊工艺参数

摩擦焊是焊接低碳钢与铝及铝合金的理想焊接工艺之一。Q235 低碳钢与 L4 纯铝摩擦焊的工艺参数见表 8.10。1Cr18Ni9Ti 不锈钢与 L1 纯铝摩擦焊的工艺参数见表 8.11。

表 8.10 Q235 低碳钢与 L4 纯铝摩擦焊的工艺参数

直径 mm	伸出长度 mm	顶锻压力 /MPa		加热时间 s	顶锻量 /mm		转速 r·min ⁻¹
		摩擦时	顶锻时		摩擦时	顶锻时	
20+20	12	49	117.6	3.5	10	12	1000
25+25	14	49	117.6	4	10	14	1000
30+30	15	49	117.6	4	10	15	1000
35+35	16	49	49	4.5	10	14	750
40+40	20	49	49	5	12	13	750
50+50	26	49	49	7	10	15	400

表 8.11 1Cr18Ni9Ti 不锈钢与 L1 纯铝摩擦焊的工艺参数

工件直径 /mm	转速 r·min ⁻¹	送丝速度 /mm·s ⁻¹	摩擦时间 /s	伸出长度 /mm		摩擦压力 /MPa	顶锻压力 /MPa
				钢	铝		
管子直径 φ60 壁厚 5	170	4	4~6	24	2	240	490

(3) 铜与铝的摩擦焊工艺

铜与铝异种材料摩擦焊有高温摩擦焊和低温摩擦焊两种。铜与铝高温摩擦焊的工艺参数见表 8.12。

表 8.12 铜与铝高温摩擦焊的工艺参数

焊件直径 /mm	转数 r·min ⁻¹	外圆线速度 /m·s ⁻¹	摩擦压力 /MPa	摩擦时间 /s	顶锻压力 /MPa	铜件轴角 (°)	接头断 裂特征
8	1360	0.58	19.6	10~15	147	90	
10	1360	0.71	19.6	5	147	60	
12	1360	0.75	24.5	5	147	70	
14	1500	1.07	24.5	5	156.8	80	
15	1500	1.07	24.5	5	166.6	80	
16	1800	1.47	31.36	5	166.6	90	
18	2000	1.51	34.3	5	176.4	90	
20	2400	1.95	44.1	5	176.4	95	
22	2500	2.52	49	4	205.8	100	
24	2800	2.61	54.2	4	243	100	
26	3000	3.11	60	3	350	120	

460~480℃ 温度是铜与铝异种材料低温摩擦焊接的最佳温度范围，在该温度范围能获得满意的铜-铝摩擦焊接头。不同直径焊件的铜与铝低温摩擦焊的工艺参数见表 8.13。

表 8.13 铜与铝低温摩擦焊的工艺参数

焊件直径 /mm	转速 r·min ⁻¹	摩擦时间 /s	顶锻压力 /MPa	维持时间 /s	铜出模量 /mm	铝出模量 /mm	顶锻速度 mm·s ⁻¹	焊前预压力 /N	摩擦压力 /MPa
6	1030	6	588	2	10	1	1.4		166.6~196
8	840	6	490	2	13	2	1.4	196~294	166.6~196
9	540	6	441	2	20	2	2.1	392~490	166.6~196
10	450	6	392	2	20	2	2.1	490~588	166.6~196
12	385	6	392	2	20	2	3.2	882~980	166.6~196

续表

焊件直径 mm	转速 $r \cdot \text{min}^{-1}$	摩擦时间 s	顶锻压力 MPa	维持时间 s	铜出模量 mm	铝出模量 mm	顶锻速度 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	焊前预压力 N	摩擦压力 MPa
14	320	6	392	2	20	2	3.2	1078~1176	166.6~196
16	300	6	392	2	20	2	3.2	1271~1372	166.6~196
18	270	6	392	2	20	2	3.2	1470~1568	166.6~196
20	245	6	392	2	20	2	3.2	1666~1764	166.6~196
22	220	6	392	2	20	2	3.2	1862~1960	166.6~196
24	208	6	392	2	24	2	3.7	2058~2156	166.6~196
26	205	6	392	2	24	2	3.7	2058~2156	166.6~196
30	180	6	392	2	24	2	3.7	2058~2156	166.6~196
36	170	6	392	2	26	2	3.7	2254~2352	166.6~196
40	160	6	392	2	28	2	3.7	2450~2548	166.6~196

(4) 典型机械零件摩擦焊的工艺参数

典型零件摩擦焊的工艺参数见表 8.14。

表 8.14 典型零件摩擦焊的工艺参数

零件名称	材料组合	工件直径 mm	工艺参数					
			主轴转速 $r \cdot \text{min}^{-1}$	摩擦压力 MPa	摩擦时间 s	顶锻压力 MPa	顶锻保压 s	刹车时间 s
汽车后桥管	45+45	外径 70 内径 50	99	55~60	14~18	110~130	6~8	0.2~0.3
液压千斤顶支承缸	20+45	内筒 外径 47 内径 45	1150	126	1~2	244	6	0.2
		外筒 外径 76 内径—	1150	87	1~1.5	130	4~6	0.2
汽车排气阀	5Cr21Ni4Mn9N+40Cr	10.5	2500	140	4	300	3	0.2~0.3
自行车铝合金轴壳	LD5+LD5	16.5	2500	45	3	90	4~5	0.15
柴油机增压器叶轮	731B 耐热合金+40Cr	27	1350	70(1)	3(1)	300	7	0~0.1
				100(2)	12(2)			
汽车后桥壳	16Mn+45Mn	152	585	30(1)	5(1)	100~120	10	
				50~60(2)	20~25(2)			
石油钻杆	40Cr、 42SiMn35CrMo	63~140	585	30(1)	6~8(1)	120	10~20	
				50~60(2)	24~30(2)			
铲车活塞杆	40Cr+10Cr	90	585	20~30(1)	15~20(1)	100~120	15~20	
				50~60(2)	35~40(2)			
刀具柄	高速钢+45	14	2000	120	10	210		
铝铜管	Al+Cu		1500	40	2.5	250	5	

注：括号内数字为摩擦级数。

8.4.4 焊接质量及其控制

(1) 摩擦焊接头缺陷及其产生的原因

当异种金属的焊接性已确定，摩擦焊接的质量就取决于焊接参数的合理选择以及焊接工艺过程的参数控制。同种钢和异种钢摩擦焊接头的主要缺陷及其产生原因见表 8.15。

(2) 摩擦焊工艺参数控制

当材质、接头形式和工艺参数确定后，摩擦焊质量主要取决于焊件毛坯的准备、装夹与对中、焊机的调整以及工艺参数的控制。连续驱动摩擦焊的工艺参数控制方法主要有以下 6 种。

表 8.15 摩擦焊接头的主要缺陷及其产生的原因

缺陷名称	缺陷产生的原因
接头偏心	焊机刚度低; 夹具偏心; 工件端面倾斜或在夹头外伸出量太长
飞边不封闭	转速高; 摩擦压力太大或太小; 摩擦时间太长或太短, 以致顶锻焊接前接头中变形层和高温区太窄; 停车慢
未焊透	焊前摩擦表面清理不良; 转速低; 摩擦压力太大或太小; 摩擦时间短; 顶锻压力小
接头组织扭曲	速度低; 压力大; 停车慢
接头过热	速度高; 压力小; 摩擦时间长
接头淬硬	焊接淬火钢时, 摩擦时间短, 冷却速度快
焊接裂纹	焊接淬火钢时, 摩擦时间短, 冷却速度快
氧化灰斑	焊前工件清理不良; 焊机振动; 压力小; 摩擦时间短; 顶锻焊接前, 接头中的变形层和高温区窄
脆性合金层	焊接产生脆性合金化合物的一种金属时, 加热温度高; 摩擦时间长; 压力小

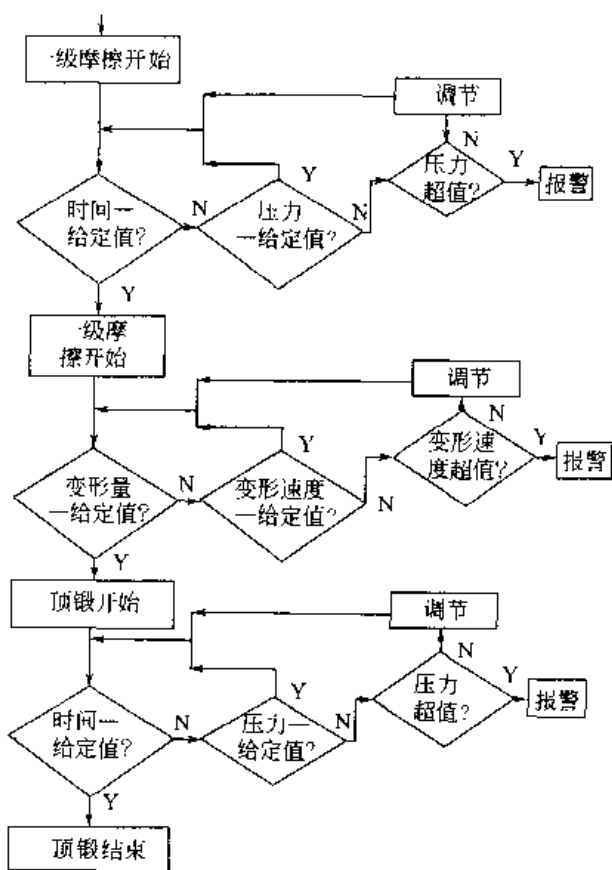


图 8.21 变参数复合控制流程框图

度控制（变形量和变形速度复合控制）；在顶锻阶段，进行压力控制和时间控制（时间和压力复合控制）。图 8.21 和图 8.22 所示分别为变参数复合控制流程框图和采用该方法时计算机记录的压力（ p ）、转速（ n ）、扭矩（ M ）和变形量（ s ）随时间的变化曲线。

⑥ Mt 控制 图 8.23 所示为 Mt 控制法示意。从功率达到最大值的 t_1 时刻起计算摩擦热量，当摩擦热量达到 Q_0 时的 t_0 时刻停止摩擦加热过程而进入顶锻过程，而摩擦热量的控制可通过摩擦扭矩 M 对摩擦时间 t 的积分运算来实现。该方法是在功率峰值控制的基础上发展来的，它本质上是能量控制法。

① 时间控制 通常是指摩擦时间控制。

② 功率峰值控制 是基于摩擦加热功率峰值到稳定值之间相应的时间基本不变。实际上，由于加热功率的多峰值现象以及工艺参数的变化和工件表面状态的差异，都会引起功率峰值到稳定值的时间不同，因而，这种控制方法的有效性有限，且主要应用于碳钢和低合金钢的强规范（即转速较低、摩擦压力较大、摩擦时间短等）焊接。

③ 变形量控制 通常是指摩擦变形量的控制，为了克服由于工件表面状态和其他工艺参数变化时对这种控制方法带来的不利影响，还可同时对摩擦时间进行监控。

④ 温度控制 主要通过通过对工件表面温度的非接触测量进行相应的控制。

⑤ 变参数复合控制 主要针对大截面工件的摩擦焊接，其核心是不同阶段采用不同的控制方案。在一级摩擦阶段，同时进行时间控制和压力控制（时间和压力复合控制）；在二级摩擦阶段，同时进行变形量和变形速度控制（变形量和变形速度复合控制）；

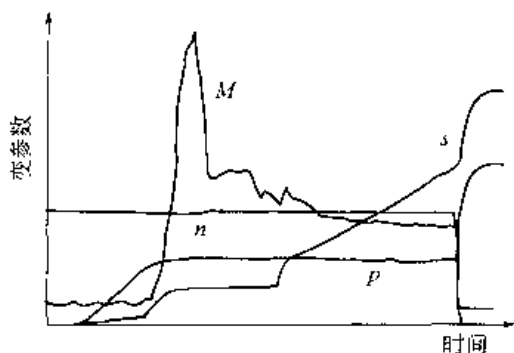


图 8.22 采用变参数复合控制计算机数据与变形量的关系曲线

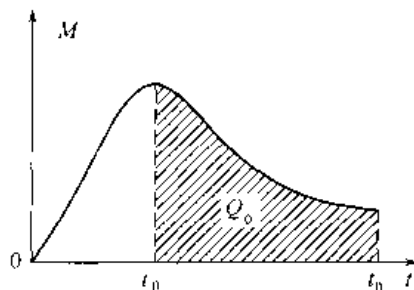


图 8.23 Mt 控制法示意

(3) 摩擦焊过程的计算机控制

采用微型计算机对摩擦焊过程进行控制，应解决的主要问题是液压系统的可控性；电液转换及执行机构；参数的传感变换；特征状态信号的转换、选取及接收；手动-自动切换等。

1) 液压系统的可控性

图 8.24 所示为一典型的具有可控性采用电液伺服压力阀的摩擦顶锻回路原理。

在该液压回路里，用电液伺服压力阀 DYSF-3P 和转接阀板替代了普通的三位四通阀。伺服阀的电流受控于微机，流经伺服阀电流的大小和方向改变时，油缸内前后腔压差的大小和方向亦发生改变。加工过程中，微机一方面随时检测压力的大小，另一方面由根据压力信号和预定的控制方案随时调整流经伺服阀的电流，达到控制压力的目的。

2) 电液转换及执行机构

为了将微机给出的毫安级的弱小电流信号变为大功率的液压输出，就必须进行电液转换。电液伺服压力阀是实现其转换的一种器件。图 8.25 所示为 DYSF-3P 阀的结构原理。

该阀由力矩电动机和液压伺服两部分组成。力矩电动机部分由磁钢、上下导磁体、衔铁、线圈及弹簧管组成；液压伺服部分由控制油嘴、挡板、反馈节流孔、固定节流孔、阀芯和油滤等组成。构成一个带有反馈的两级液压放大器：第一级是油嘴挡板式，即前置放大器；第二级是四边控制式滑阀，即功率放大器。

当加给伺服阀的电流通过线圈时，在衔铁挡板上就产生一个力矩，引起挡板以弹簧管为中心在两个喷嘴端面中间运动，使一个喷嘴的内腔压力下降，在两个控制喷嘴之间产生一个

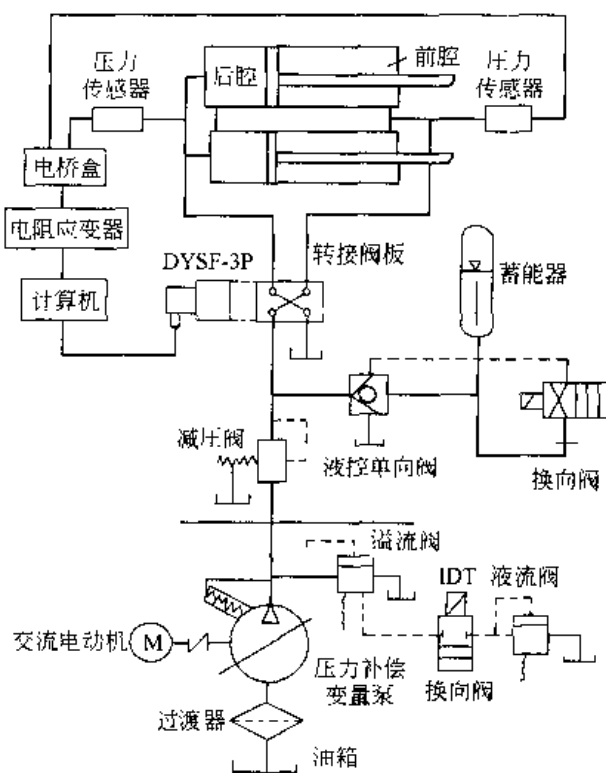


图 8.24 采用电液伺服压力阀的摩擦顶锻回路原理

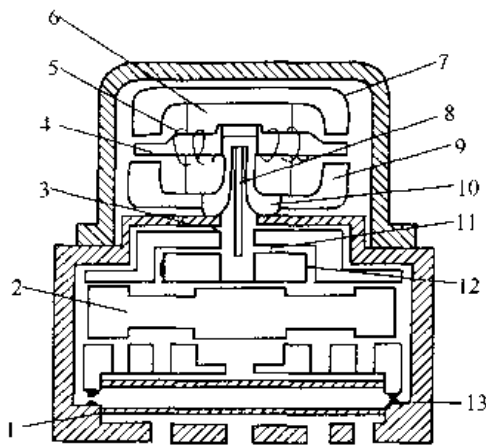


图 8.25 DYSF-3P 阀结构原理

- 1 油滤；2—阀芯；3 控制油嘴；
- 4—衔铁；5 线圈；6—磁钢；
- 7—上导磁体；8—挡板；9—下导磁体；
- 10—弹簧管；11—反馈油嘴；
- 12—反馈节流孔；13—固定节流孔

差动压力，推动阀芯移动，排出流量到负载，构成伺服阀的输出压力。负载压力通过反馈节流孔及反馈喷嘴反馈到挡板，当反馈力矩与电磁力矩平衡时，阀芯停止运动。由于力矩电动机、液压放大器和反馈喷嘴的比例作用，伺服阀的输出压力与输入电流之间保持着线性关系。

电液伺服阀的采用，可以方便地对摩擦顶锻回路进行控制。对伺服阀加正向电流时，滑台前进，加反向电流时，滑台后退；压力大小可根据需要进行变化。电液伺服阀还使油路简化，减小了系统惯性，提高了系统的动态质量。

3) 计算机控制实例

图 8.26 所示为微机控制的摩擦焊系统框图。图 8.27 所示为采用电流法确定一级摩擦开始点、变形量零点浮动检测、变参数复合控制，焊接大截面工件

时，计算机打印的压力 p 、转速 n 、主机电流 i 、变形量 s 随时间的变化曲线。

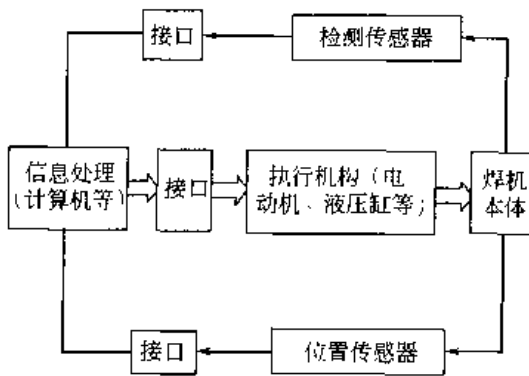


图 8.26 微机控制摩擦焊系统的组成及其关系图

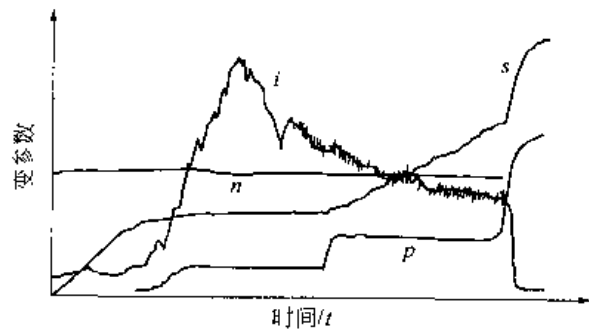


图 8.27 实焊工件时的一组曲线

8.5 摩擦焊的应用

多年来，摩擦焊以其优质、高效、节能、无污染的技术特色，在航空航天、核能开发、兵器、汽车、电力、海洋工程、机械制造等高新技术和传统产业部门的得到了越来越广泛的应用。图 8.28 所示为部分摩擦焊的典型应用实例。

8.5.1 不同行业中的应用

(1) 航空航天工业

随着现代高性能军用航空发动机的不断更新，其主要性能指标——推重比也不断提高。同时对发动机的结构设计、材料及制造工艺均提出更高的要求。

从 20 世纪 70 年代以美国 GE 公司为代表，在军用航空发动机转子部件制造中，率先成功采用了惯性摩擦焊技术。GE 公司生产的 TF39 航空发动机的 16 级压气机盘；CMF56 航空发动机的 1~2 级、4~9 级以及压气机轴；F101 航空发动机的 1~3 级盘与鼓及前轴颈

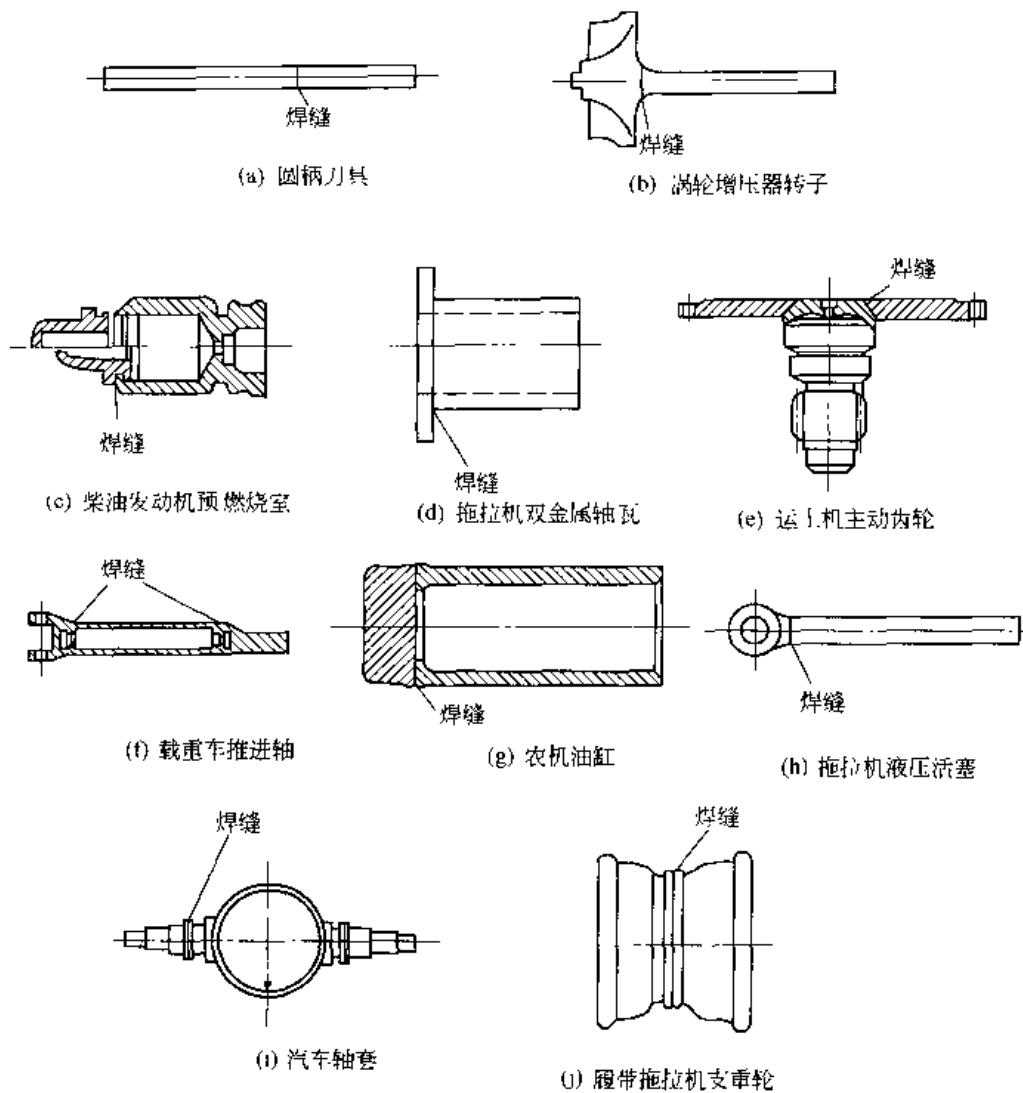


图 8.28 部分摩擦焊的典型应用实例

5~9级盘与鼓及后轴颈等均采用了摩擦焊工艺。API (Udimet700、Astroloy)、In100 和 Rene'95 及 In718 (均为美国牌号) 等粉末高温冶金盘已成功采用了惯性摩擦焊。

美国 Textron Lycoming 公司生产的新型大功率 T55 涡轮喷气发动机的前盘与前轴、后轴的连接都是采用盘+轴一体的摩擦焊结构。德国 MTU 公司正在开展高压压气机转子等大型部件的摩擦焊技术研究。法国海豚发动机也将摩擦焊推广应用于减速器锥形齿轮的焊接。国外一些先进的航空发动机制造公司已将摩擦焊作为焊接高推重比航空发动机转子部件的先导、典型和标准的工艺方法。

在飞机制造中,摩擦焊也展现了新的应用前景。美国的 AISI4340 超高强钢因其具有高的缺口敏感性和焊接脆化倾向,制造飞机起落架时,已成功进行了 4340 管与 4030 锻件起落架、拉杆的摩擦焊。直升机旋翼主传动轴的 NitalloyN 合金齿轮与 18%高镍合金钢管轴、双金属飞机铆钉、飞机钩头螺栓等的焊接均采用摩擦焊。

(2) 汽车工业

国外在汽车零配件规模化生产中,摩擦焊技术占有较重要的地位。美国、德国、日本等工业发达国家的一些汽车制造公司,已有百余种汽车零部件采用了摩擦焊技术。

国内外在发动机双金属排气阀生产中,广泛采用摩擦焊技术,将 NiCr20TiAl、5Cr21Mn9Ni4、4Cr14Ni14W2Mo 等高温合金或奥氏体耐热钢盘部与 4Cr9Si2、4Cr10Si2Mo 等马氏体型不锈钢耐热钢杆部连接起来形成整体排气阀。

另外,在汽车的自动变速器输出轴、无变形飞轮齿圈、发动机支座、启动机小齿轮组件、速度选择器、汽车液压千斤顶、万向节组件、凸轮轴、离合器鼓和毂组件、后桥壳管、连轴齿轮、传动轴、涡轮增压器、涡轮传动轴等的制造过程均可利用摩擦焊工艺简化制造工艺和降低生产成本。

(3) 石油天然气和化学工业

除航空航天及汽车工业外,摩擦焊在石油钻探以及化学工业电极等方面也被广泛的应用。在抽油泵生产中,用摩擦焊将普通碳钢与耐蚀合金钢焊接在一起;在化学工业中,特殊的电极需要将钛或钢质的柱头焊接在一起,实践证明摩擦焊是这种材料焊接的理想工艺。

以石油钻杆的工具接头与管体焊接为例。石油钻杆是石油勘探工程的重要工具,其工具接头与钻杆管体采用惯性摩擦焊焊接。钻杆的受力非常复杂,下部承受压力以钻进岩石,上部由于自身重力的影响受拉应力,同时还承受所需的扭力以及管内高压泥浆的径向张力等。 $\phi 127 \times 9.19$ IEU、NC50、E75 钻杆工具接头的材质为 36CrNiMo4 (DIN),管体材质为 42MnMo7 (DIN)。惯性摩擦焊工艺参数: $n=920\text{r}/\text{min}$, $p=11.5\text{MPa}$, $WK^2=1089\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 。焊后进行 600℃回火处理,焊缝冲击功平均值 23.8J。焊接是在 MIT 公司产的 320 型焊机上进行。

(4) 核电设备和输变电行业

由于摩擦焊特别适用于异种金属的连接,从而解决了核电设备及输变电行业的许多难题。核电设备的绝缘罩壳支撑用的异种金属紧固件就是通过摩擦焊完成的,由于输变电行业已越来越多的以铝芯电缆代替铜芯电缆,而铝制电缆连接件的力学强度无法保证,改用铜-铝过渡接头是解决这一问题的最好方法,但使用传统的焊接方法会因非导电氧化物、腐蚀以及内应力造成的蠕变而降低接头的导电性,采用摩擦焊则有效地解决了上述问题。

8.5.2 不同材料中的应用

国内外近年来对摩擦焊可焊材料的研究有了一些新的扩展,主要是难以熔焊的及新型材料的焊接。许多成果已经得到了工程应用。

(1) 钛合金的摩擦焊

钛合金与 18-8 不锈钢的焊接研究较多,采用的工艺措施主要是选中间过渡层或加大顶锻压力,过渡层的金属主要是铝和铜。选铜时,钛和铜之间还需要钒过渡。这种接头拉伸强度 150MPa,在 300℃/150h 处理后,不产生金属间化合物。钛和铝得摩擦焊接头强度高于铝母材,在结合面上产生不稳定的 Al_3Ti 薄层,经退火处理后也不长大。

纯钛与纯铜熔点相差 600℃,并生成 TiCu_2 、 Ti_2Cu_2 以及 TiCu 化合物,不能采用熔焊。对直径 20mm 的纯钛和纯铜棒采用摩擦焊并把摩擦压力提到 60~2575MPa,在短时间内加压就可以抑制金属间化合物的产生,并得到性能良好的接头。

(2) 轻金属的摩擦焊

Al-Li 合金焊接,对于这种新近开发的超轻合金,由于密度小、强度高优点,在航空航天工程结构中得到应用。这种合金采用熔焊时,接头易形成缺陷,难以得到优质接头,采用摩擦焊得到了与木材等强度的接头。

快速结晶技术促进了快速结晶粉末铝合金摩擦焊用于 375℃铝合金的发展,这种合金在

共晶 Al-Fe 成分的基础上增加少量的 V、Si，通过快速结晶可得到特殊的显微组织，与常规的高温合金相比，具有良好的延展性、断裂韧性和疲劳性能。在日本航空工业中，正在考虑采用 RsAl-Fe-Si 合金代替钛合金和常规高强铝合金材料，这种材料采用熔焊时存在铝粉末及氩气孔等问题，而用惯性摩擦焊则获得优良的接头。

(3) 高熔点及粉末合金的摩擦焊

Zr-2.5Nb 金属是高温合金，采用保护气体进行摩擦焊接，成功地焊接了直径为 128.8mm，壁厚为 2.75~4mm 的高温合金管子。空气中焊接 Nb、Ta、Mo 合金时会产生 300 μ m 左右的氧化层，而在氩气保护的气氛中，就会去除氧化层得到性能良好的接头。

随着汽车、飞机及电气制造等部门大量采用粉末合金材料，摩擦焊以成为可靠的焊接方法。现已成功地进行了 Cu+70%W 粉末合金材料与韧铜及 Cu+50%W 与无氧铜的摩擦焊，如 Cu+70%W 与韧铜的焊接，顶锻力为 270MPa 以上接头拉伸强度可达 280MPa，约为母材的 90%。

(4) 新兴材料的摩擦焊

国外 NiTi 形状记忆合金的摩擦焊已经取得了满意的效果，焊后的记忆合金特性与母材相同。陶瓷与金属的摩擦焊也取得了较大的发展，Si₃N₄、SiC、ZrO₂ 与铝焊接时，通过加大转速，已成功地焊接了各种接头，但强度有所降低；在钢与陶瓷的焊接时，若把铝铜复合材料作为中间嵌入层材料也可取得满意效果。对复合材料，摩擦焊是一种最好的焊接方法。日本对铝型金属基复合材料与同种复合材料通过的加大顶端压力，可使接头达到与母材同等强度。

第9章 超声波焊

超声波焊 (Ultrasonic Welding) 是利用超声频率 (超过 16Hz) 的机械振动能量和静压力的共同作用下, 连接同种或异种金属、半导体、塑料及金属-陶瓷等的特殊焊接方法。金属材料超声波焊接时, 既不向工件输送电流, 也不向工件引入高温热源, 只是在静压力作用下将弹性振动能量转变为工件间的摩擦功、形变能及随后有限的升温。接头间的冶金结合是在母材不发生熔化的情况下实现的, 因而是一种固态焊接。超声波焊在电子、电器、航空航天及核能工业得到广泛应用。

9.1 超声波焊原理、特点及分类

9.1.1 超声波焊的原理

典型的超声波焊的原理如图 9.1 所示。

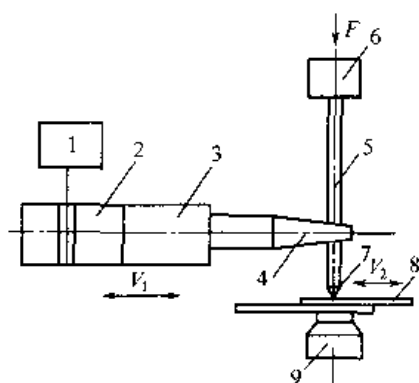


图 9.1 超声波焊原理

- 1—发生器; 2—换能器; 3—传振杆;
4—聚能器; 5—耦合杆; 6—静载;
7—上声极; 8—工件; 9—下声极;
 F —静压力; V_1 —纵向振
动方向; V_2 —弯曲振动方向

由上声极传输的弹性振动能量是经过一系列的能
量转换及传递环节产生的, 这些环节中, 超声波发生器是一个变频装置, 它将工件电流转变为超声波频率 (16~60kHz) 的振荡电流。换能器则利用逆压电效应转换成弹性机械能。

传动杆、聚能器用来放大振幅, 并通过耦合杆、上声极传递到工件。换能器、传动杆、聚能器、耦合杆及上声极构成一个整体, 称之为声学系统。声学系统中各个组元的自振动频率, 将按同一频率设计。当发生器的振荡电流频率与声学系统的自振动频率一致时, 系统即产生了谐振 (共振), 并向工件输出弹性振动能量。

9.1.2 超声波焊的特点

(1) 超声波焊接头的形成机理

由于超声波接头区呈现出错综复杂的和多样性的显微组织, 因此, 对接头的形成机理一般有以下特点。

a. 在金属材料之间的焊接中, 在结合面上发生犬牙交错的机械嵌合, 对接头连接强度起到非常有力的作用。

b. 在金属材料之间的焊接过程中, 由摩擦造成焊件间发热 (温度达到被焊材料熔点的 35%~50%) 和强烈塑性流动, 引起了物理冶金反应, 在结合面上有公共晶粒发生, 有再结晶、扩散、相变或金属化合物析出的现象, 是一种冶金结合。

c. 在摩擦功作用下, 强烈的塑性流动, 为纯净金属表面之间的接触创造条件, 当达到原子间距时, 即产生金属键合过程。

(2) 超声波焊的优点

a. 能实现同种金属、异种金属、金属与非金属以及塑料之间的焊接。图 9.2 所示为可以进行超声波焊接的各种金属材料的组合。

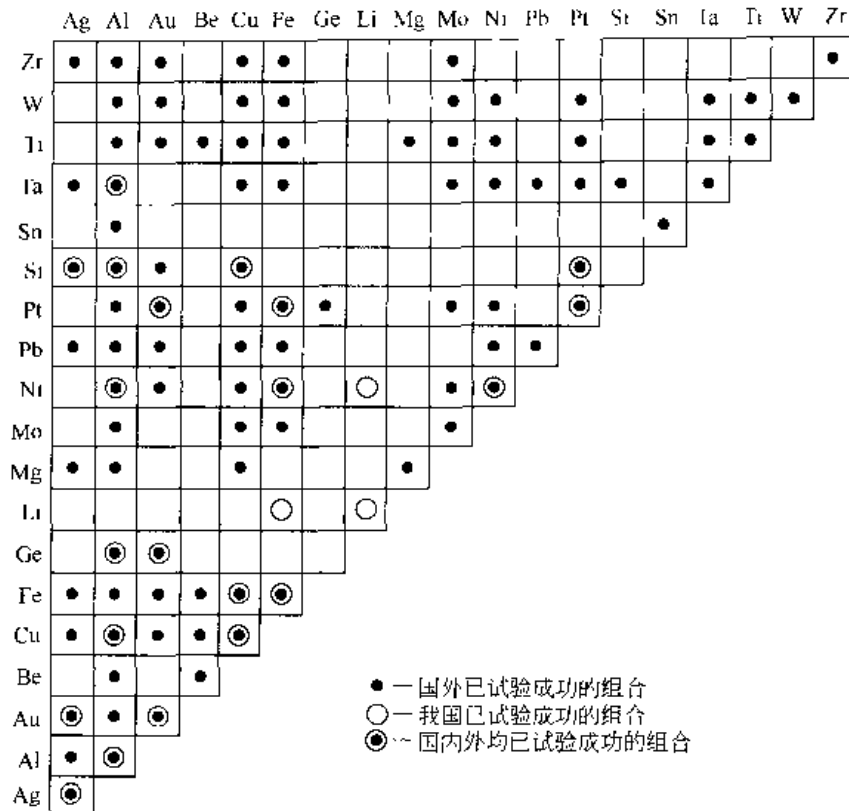


图 9.2 可以进行超声波焊接的各种金属材料的组合

b. 特别适用于金属箔片、细丝以及微型器件的焊接。可焊接厚度只有 0.002mm 的金箔及铝箔。由于是固态焊接，不会有高温氧化、污染和损伤微电子器件，所以半导体硅片与金属丝（Au、Ag、Al、Pt、Ta 等）的精密焊接最为适用。

c. 可以用于焊接厚薄相差悬殊以及多层箔片等特殊焊件。如热电偶丝焊接、电阻应变片引线以及电子管的灯丝的焊接，还可以焊接多层叠合的铝箔和银箔等。

d. 焊接时对焊件不加热、不通电。因此对高导热率和高导电率的材料如铝、铜、银等焊接很容易，而用电阻焊则很困难。

e. 与电阻焊相比，耗用电功率小，焊件变形小，接头强度高且稳定性好。主要是由于超声波焊点不存在熔化及受高温的影响。

f. 对焊件表面的清洁要求不高，允许少量氧化膜及油污存在。因为超声波焊接具有对焊件表面氧化膜破碎和清理作用，焊接表面状态对焊接质量影响较小，甚至可以焊接涂有油漆或塑料薄膜的金属。

(3) 超声波焊的缺点

a. 由于焊接所需的功率随工件厚度及硬度的提高而呈指数增加，而大功率的超声波焊机的制造困难且成本很高。因此目前仅限于焊接丝、箔、片等细薄件。

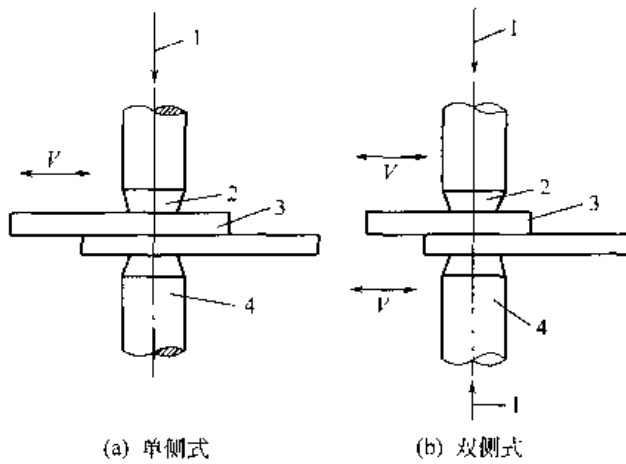
b. 接头形式目前只限于搭接接头。

c. 焊点表面容易因高频机械振动而引起边缘的疲劳破坏，对焊接硬而脆的材料不利。

d. 目前缺乏对焊接质量进行无损检测的方法和设备，因此大批量生产困难。

9.1.3 超声波焊的分类

超声波焊的接头必须是搭接接头，按接头形式的不同超声波焊可分为点焊、缝焊、环焊



(a) 单侧式

(b) 双侧式

图 9.3 超声波点焊的能量系统类型

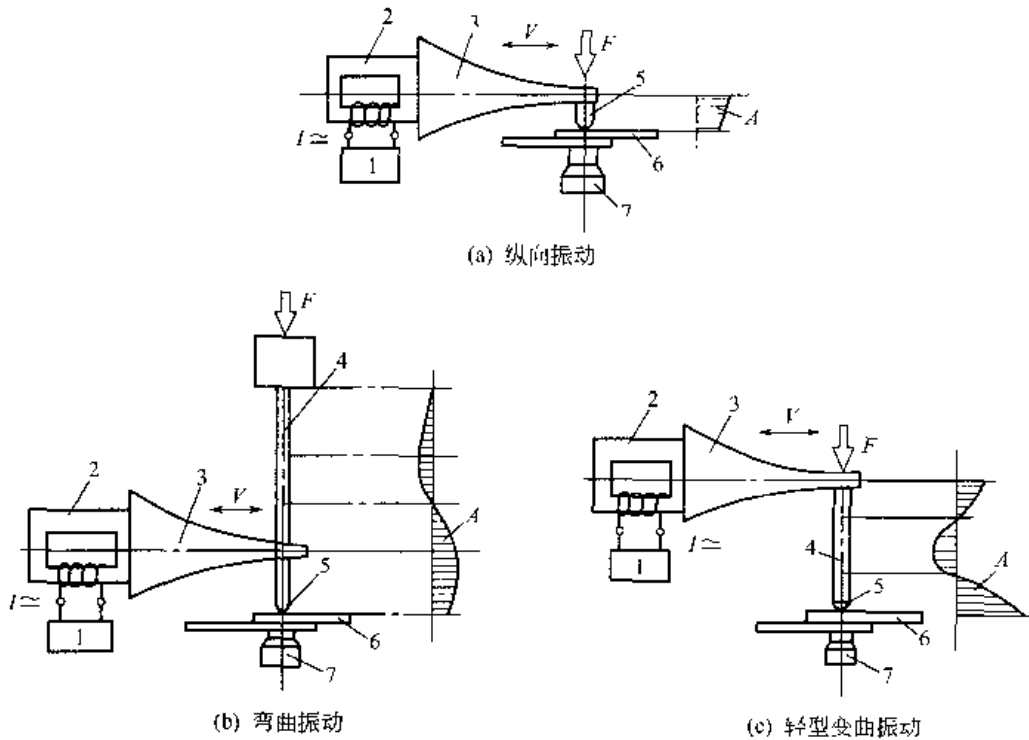
1 静压力；2 上声极；3 焊件；4 下声极；
V 振动方向

和线焊几种类型。

(1) 点焊

按能量传递方式点焊可分为单侧式和双侧式两类，如图 9.3 所示。当超声振动能量只通过上声极导入时为单侧式点焊；分别从上下声极导入时为双侧式点焊。目前应用最广泛的是单侧导入式点焊。

按振动系统分，点焊有纵向振动式、弯曲振动式以及轻型弯曲振动式等几种，如图 9.4 所示。纵向振动系统主要用于小功率电焊机，弯曲振动系统主要用于大功率电焊机，而轻型弯曲振动系统适用于中小功率焊机，兼有两种振动系统的诸多优点。



(a) 纵向振动

(b) 弯曲振动

(c) 轻型弯曲振动

图 9.4 超声波点焊的振动系统类型

1—发生器；2 换能器；3—聚能器；4—耦合杆；5 上声极；6—工件；7—下声极；
A—振幅；F—静压力；V 振动方向；I 超声波振荡电流

(2) 缝焊

超声波通过旋转运动的圆盘状声极传输给工件，并形成一条具有密封性的连续焊缝，见图 9.5。其振动系统按盘状声极的振动状态，可分为纵向振动、弯曲振动和扭转振动三种，见图 9.6。其中，前两种较为常用，其盘状声极的振动方向与焊接方向垂直。实际生产中以弯曲振动系统应用最广，因为有很好的工艺及技术性能。在特殊情况下，可以采用平板式下声极。

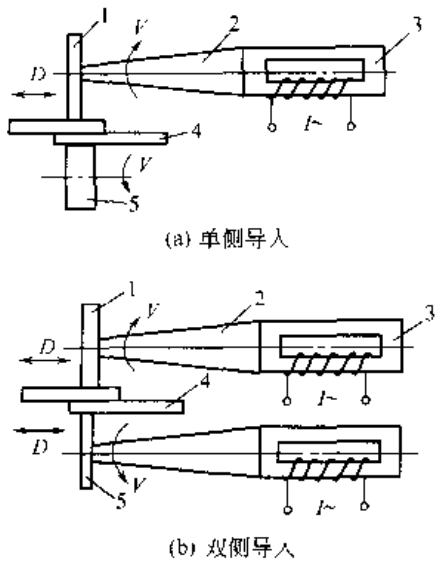


图 9.5 超声波缝焊的工作原理
 1—盘状上声极；2—聚能器；3—换能器；
 4—焊件；5—盘状下声极；
 D—振动方向；V—旋转方向；I—超声波振荡电流

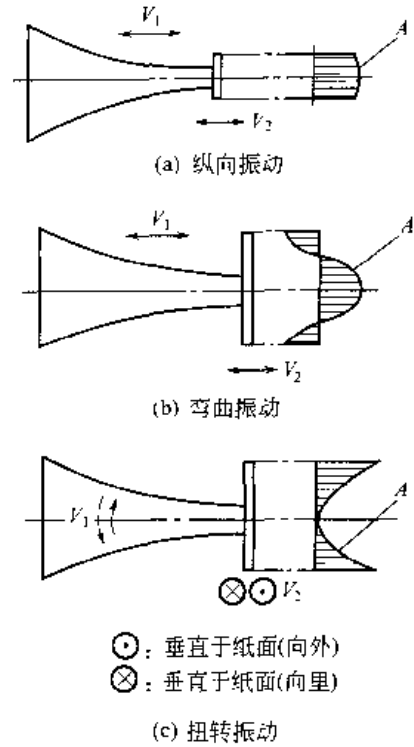


图 9.6 超声波缝焊的振动形式
 A—焊盘上振幅分布；V—聚能器上振动方向；
 V₂—焊点上的振动方向

(3) 环焊

用环焊方法可以一次形成封闭形焊缝，采用的是扭转振动系统，见图 9.7。由于环焊的一次性焊缝面积较大，需要有较大的功率输入，因此常常采用多个换能器的反向同步驱动方式。振动杆在两个切向输入的相位差为 180° 的振动驱动下，一推一拉从而产生扭转振动。上

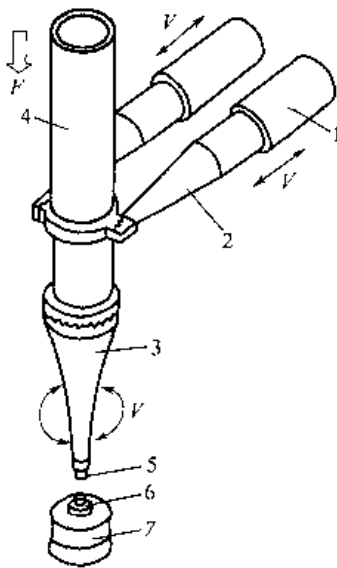


图 9.7 超声波环焊的工作原理
 1—换能器；2、3—聚能器；4—耦合杆；5—上声器；
 6—工件；7—下声器；F—静压力；V—振动方向

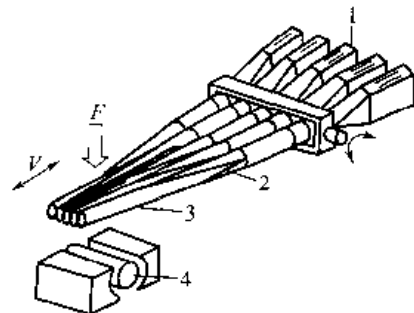


图 9.8 超声波线焊方法
 1—换能器；2—聚能器；3—125mm 长焊接声极头；
 4—心轴；V—振动方向；F—静压力

声极轴心区振幅为零，边缘振幅最大。所以此焊接方法很适用于微电子器件的封装。

(4) 线焊

线焊可以看成是点焊方法的一种延伸，是利用线状上声极或将多个点焊声极叠合在一起，在一个焊接循环内形成一条直线焊缝。现在已经可以通过线状上声极一次获得 150mm 长的线状焊缝，这种方法最适合用于金属箔的线状封口，见图 9.8。

除上述四种常见的金属超声波焊接方法以外，近年来还发展了异种塑料超声波焊接方法。其工作原理与金属超声波焊接方法不同，振动方向垂直于焊件表面，与静压力方向一致。由于焊接时，热量并不是通过工件表面传热，而是在工件接触表面将机械振动直接转化为热能使界面结合，属于一种熔化焊接方法。因此适用于热塑性塑料的焊接，而不能应用于热固性塑料的焊接。

9.2 超声波焊接设备

9.2.1 超声波焊接设备的组成

超声波焊机通常由图 9.9 所示的超声波发生器、声学系统、加压机构和程控装置等部分

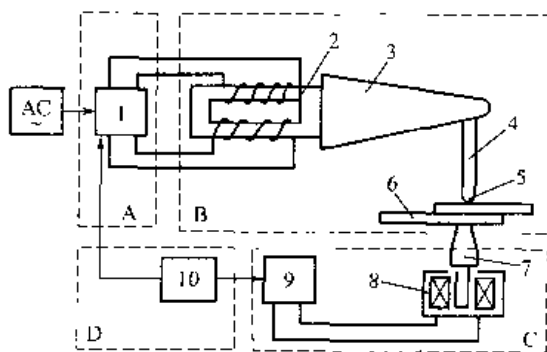


图 9.9 超声波点焊机的组成

- 1—超声波发生器；2—换能器；3—聚能器；
- 4—耦合杆；5—上声极；6—焊件；
- 7—下声极；8—电磁加压装置；9—控制加压电源；10—程控器

组成。按焊件的接头形式分有点焊机、缝焊机、环焊机和线焊机四种基本类型。此外还有用于塑料焊接的超声波焊机。

(1) 超声波发生器

超声波发生器用来将工频（50Hz）电流转换成 15~60kHz 的振荡电流，并通过输出变压器与换能器相耦合。现代采用最先进的逆变式超声波发生器，具有体积小、效率高、控制性能优良的优点。

超声波发生器的负载是焊机的机电耦合系统，即声学系统。焊接压力的改变以及工件几何尺寸和物理性能的不同，都会引起负载的变化和声学系统自振频率的偏高。为了确保焊接

质量的稳定，一般都在发生器的内部设置输出自动跟踪装置，使发生器与声学系统之间维持谐振状态以及恒定功率的输出。

(2) 声学系统

超声波声学系统由换能器、聚能器、耦合杆和上声极组成。主要是传输弹性振动能量给焊件，以实现焊接。

① 换能器 是用来将超声波发生器的电磁振荡转换成相同频率的机械振动。常用的换能器有磁致伸缩式和压电式两种。

磁致伸缩换能器是依靠磁致伸缩效应而工作。磁致伸缩效应是当铁磁材料置于交变磁场中时，将会在材料的长度方向上发生宏观的同步伸缩现象。常用的铁磁材料为镍片和铁铝合金，其磁致伸缩换能器工作稳定可靠，但换能效率只有 20%~40%。目前用于大功率超声波焊机。

压电换能器是利用某些非金属晶体的逆压电效应而工作。当压电晶体材料在一定的结晶面上受到压力或拉力时，就会出现电荷，称之压电效应。相反，当压电晶体在压电轴方向发

生同步的伸缩现象，即逆压电效应。压电换能器的缺点是比较脆弱，目前主要用于小功率超声波焊机。

② 聚能器 又称变幅杆，起放大换能器输出的振幅，耦合并传输到工件的作用。各种锥形杆都可以用作聚能器，常见的聚能器形式见图 9.10。其中以指数锥聚能器的放大系数高，工作稳定，结构强度高，因而常被优先选择。聚能器承受疲劳载荷，应选用抗疲劳强度和减少振动内耗的材料来制作，常用的是 45 钢、30CrMnSi 低合金钢、T8 工具钢和钛合金等。

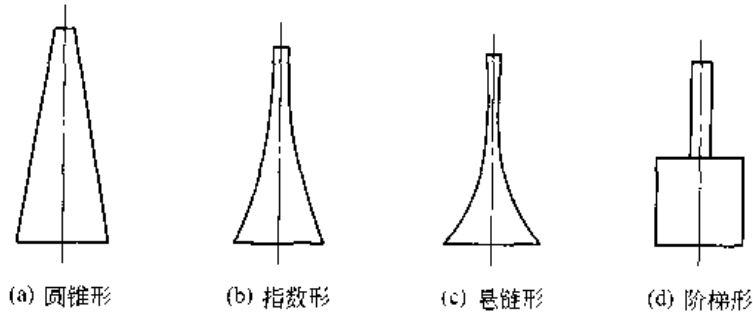


图 9.10 聚能器的结构形式

③ 耦合杆 又称传振杆，主要是用来改变振动形式，一般是将聚能器输出的纵向振动改变成弯曲振动。当声学系统中含有耦合杆时，它就起到振动能量的传输及耦合的作用。其结构简单，通常为圆柱杆，选用与聚能器相同的材料制作，两者用钎焊连接。

④ 声极 是超声波焊机直接与工件接触的声学部分，分上、下声极。通用点焊机的上声极可以用各种方法与聚能器或耦合杆连接，其端部制成球面。下声极用以支撑工件和承受所加压力的反作用力。在设计时应选择反谐振状态。从而使振动能在下声极表面反射以减少能量损失。

(3) 加压机构

向焊接部位施加静压力的机构主要有液压、气压、电磁加压和弹簧杠杆加压等。大功率焊机多采用液压，因无冲击力，小功率超声波焊机多采用电磁加压和弹簧加压。实际使用中加压机构还可能包括工件的夹持机构，见图 9.11。在超声波焊接时防止焊件滑动、更有效地传输振动能量往往十分重要。

(4) 程序控制器

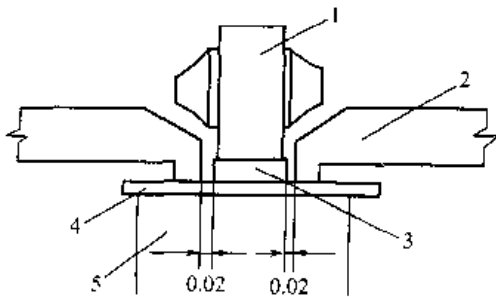


图 9.11 工件夹持机构
1—声学头；2—夹紧头；3—丝；
4—工件；5—下声极

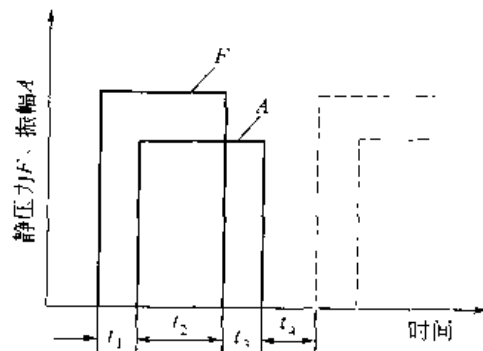


图 9.12 超声波点焊的典型程序
 t_1 —预压时间； t_2 —焊接时间；
 t_3 —消除粘连时间； t_4 —休止时间

超声波点焊的典型程序见图 9.12。向焊件输入超声波之前需有一个预压时间 t_1 ，用来施加静压力，这样既可防止因振动而引起工件切向错位，以保证焊点尺寸精度，又可以避免因加压过程中动压力与振动复合而引起工件疲劳破坏。在 t_1 内静压力 (F) 已被解除，但超声波振幅 (A) 继续存在，上声极与工件之间将发生相对运动，从而可以有效地清除上声极和工件之间可能发生的粘连现象。这种粘连现象在焊接 Al、Mg 及其合金时容易发生。

随着电子技术的发展以及程控器不断更新，焊机的声学反馈及自动控制的需要，微机控制已较普遍。

9.2.2 超声波焊接设备的技术参数

表 9.1 列出部分国产超声波焊机的技术参数。

表 9.1 国产超声波焊机的技术参数

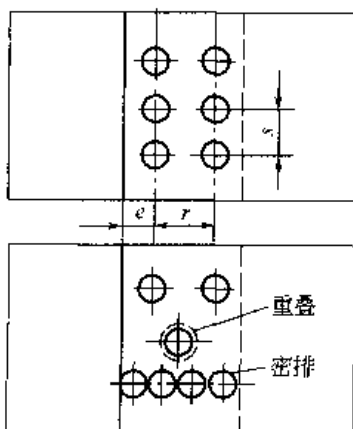
型号	发生器功率 /W	谐振频率 kHz	静压力 N	焊接时间 s	焊接速度 mm·min ⁻¹	工件厚度 mm
CHI-28 点焊机	0.5	15	15~120	0.1~0.3		30~120 μ m
SD-0.25 点焊机	250	19~21	13~180	0~1.5	—	0.15+0.15
SD-1 点焊机	1000	18~20	980	0.1~3.0		0.8+0.8
SF-2 点焊机	2000	17~18	1470	0.1~3.0	—	1.2+1.2
SD-5 点焊机	5000	17~18	2450	0.1~3.0		2.0+2.0
PI925 点焊机	250	19.5~22.5	20~195	0.1~1.0	—	0.25+0.25
CHD-1 点焊机	1000	18~20	600	0.1~3.0		0.5+0.5
FDS-80 缝焊机	80	20	20~200	0.05~6.0	7~23	0.06+0.06
SF-0.25 缝焊机	250	19~21	309	—	2.5~120	0.18+0.18
CHF-3 缝焊机	3000	18~20	600		10~120	0.6+0.6

9.3 超声波焊接工艺

9.3.1 接头设计与表面准备

(1) 接头设计

超声波焊接的接头目前只限于搭接一种形式。以点焊接头为例，考虑到焊接过程母材不发生熔化，焊点不受过大压力，也没有电流分流等问题，在设计焊点的点距 s 、边距 e 和行距 r 等参数时，要比电阻点焊自由得多，见图 9.13。



① 边距 e 电阻点焊时为了防止熔合溢出而要求 $e > 6\delta$ (δ 为板厚)。超声波点焊不受此限制，可以比它小，只要声极不压碎或冲破薄板的边缘，就采用最小的 e ，以节省母材，减轻质量。

② 点距 s 因不受电流分流的影响，可以根据接头强度要求，可疏可密， s 越小，接头承载能力越高，甚至可以重叠点焊。

③ 行距 r 也和点距一样，不受限制而任意选择。但是在超声波焊的接头设计中却有一个特殊问题，即如何控制工件的谐振问题。

当上声极向工件输入超声波时，如果工件沿振动方向的自振频率与输入的超声振动

频率相等或接近，就可能使焊件受超声焊接系统的激发而产生振动（共振），出现这种情况时，可能引起先焊好的焊缝断裂，或焊件开裂。解决上述问题的简单方法就是改变工件与声学系统的振动方向的相对位置或在工件上夹持质量块以改变工件的自振频率，见图 9.14。

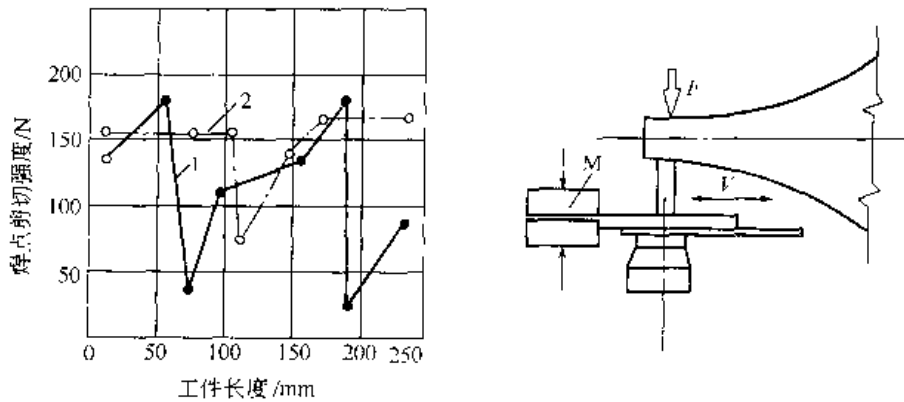


图 9.14 工件与声学系统相对位置试验
1—自由状态；2—夹固状态；M—夹固；F—静压力；V—振动方向

(2) 表面准备

良好的表面处理有助于超声波焊接。对于易焊金属，如铝、铜和黄铜等，若未经严重氧化，在轧制状态下就能焊接。带有薄的氧化膜并不影响焊接，因为焊接时这些氧化膜能被破碎和分开。若被严重氧化或表面已有锈皮，仍需清理。通常用机械磨削或化学腐蚀清除。透过这些表面保护膜或绝缘层可以进行超声波焊接，但需要稍高的超声波能量焊机，否则焊前仍需清理表面。

9.3.2 焊接工艺参数

超声波焊接的主要工艺参数是焊接功率、振动频率、振幅、静压力和焊接时间等。

(1) 焊接功率

焊接需要的功率 P (W) 取决于工件的厚度 δ (mm) 和材料的硬度 H (HV)。一般说来，所需的功率随工件的厚度和硬度而增加。并可按下式确定，即

$$P = kH^3 \delta^2 \quad (9.1)$$

式中 k ——系数，其函数关系见图 9.15 中的工件硬度与焊接功率的关系。

几种材料板厚与焊接所需功率的关系见图 9.16。

(2) 振动频率

超声波焊的谐振频率 f 在工艺上有两重意义，即谐振频率的选择以及焊接时的失谐率。谐振频率的选择以工件厚度及物理性能依据，进行薄件焊接时，宜选用高的谐振频率 (80kHz)。因为在维持声功率相等的前提下，提高振动频率就可以相应的降低需要的振幅，低振幅可以减轻薄件因交变应力而可能引起的疲劳破坏。一般小功率超声波焊机 (100W 以下) 多选用 25~80kHz 的谐振频率。功率越小，选用的频率越高。但随着频率提高，振动能量在声学系统中的损耗将增大。所以大功率超声波焊机一般选用 16~20kHz 较低的谐振频率。

由于超声波焊接过程中负载变化剧烈，随时可能出现失谐现象，从而导致接头强度的降低和不稳定。因此焊机的选择频率一旦被确定以后，从工艺角度讲就需要维持声学系统的谐

振，这是焊接质量及其稳定性的基本保证。

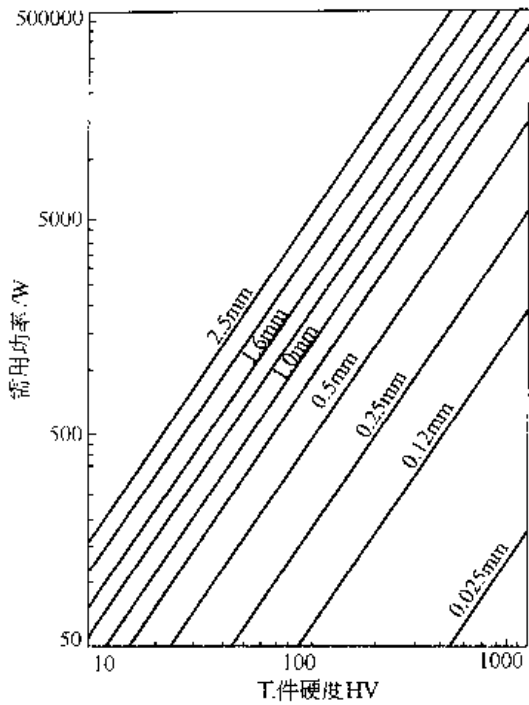


图 9.15 需要功率与工件硬度的关系

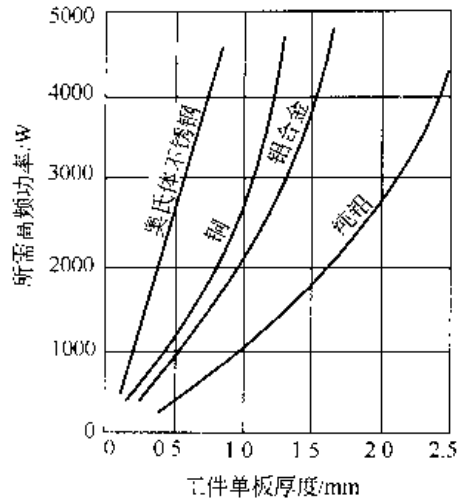


图 9.16 几种材料超声波焊所需功率

图 9.17 所示为焊点抗剪强度与振动频率的实验曲线，材料的硬度越高，厚度越大，偏离谐振频率（失谐）的影响也越显著。

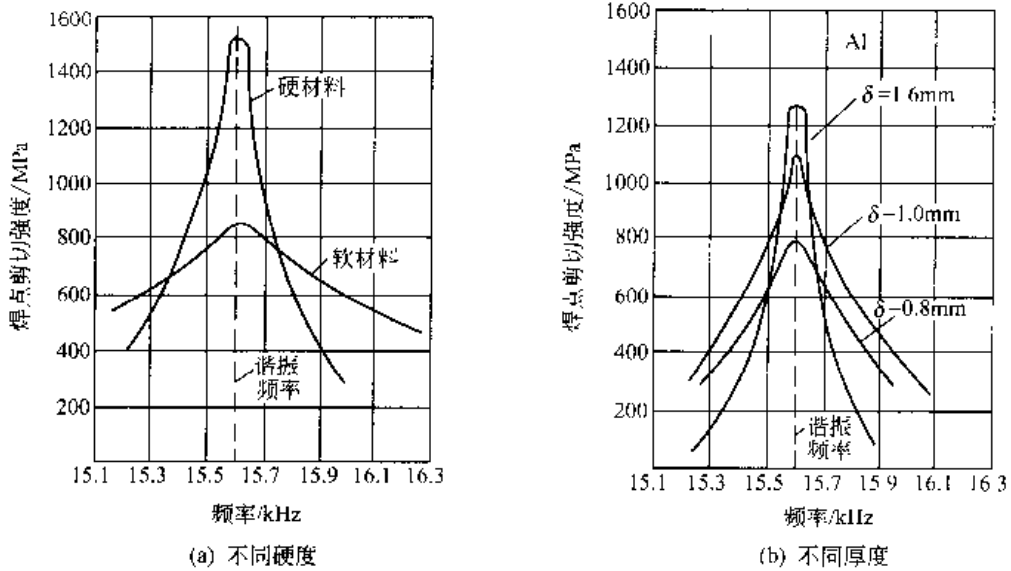


图 9.17 焊点抗剪强度与振动频率的关系

(3) 振幅

超声波焊接的振幅大小，将确定摩擦功的数值、材料表面氧化膜的清除条件，塑性流动的状态以及结合面的加热温度等。由于实际应用中超声功率的测量尚有困难，因此常常用振幅表示功率的大小。超声功率与振幅的关系可由下式确定，即

$$P = \mu SFv = \mu SF2A\omega, \pi = 4\mu SFAf \quad (9.2)$$

式中 P 超声功率;
 F 静压力;
 S 焊点面积;
 v ——相对速度;
 A 振幅;
 μ 摩擦因数;
 ω 角频率 ($\omega = 2\pi f$);
 f ——振动频率。

超声波焊机的振幅约在 $5 \sim 25 \mu\text{m}$ 的范围内, 由焊件厚度和材质决定。随着材料厚度及硬度的提高, 所需振动值亦相应增大。大的振幅可以缩短焊接时间。但振幅有上限, 当增加到某一数值后, 接头强度反而下降, 这与金属的内部及表面的疲劳破坏有关。

当换能材料及其结构按功率选定后, 振幅大小还与聚能器的放大系数有关。可以通过调节发生器的功率输出来调节振幅的大小。

(4) 静压力

静压力用来直接向工件传递超声振动能量, 是直接影响功率输出及工件变形条件的重要因素。其选择取决于材料的厚度、硬度、接头形式和使用的超声波功率。通常在确定上述各种焊接参数的相互影响时, 可以通过绘制临界曲线的方法来达到。图 9.18 所示为静压力与功率的临界曲线。

静压力选的过低时, 很多振动能量将损耗在上声极与工件之间的表面摩擦上。静压力过大时, 除了增加需用功率外, 还会因工件的压溃而降低焊点的强度。表面变形也较大。对某一待定产品, 静压力可以与超声波焊功率的要求联系起来加以确定。表 9.2 列出各种功率超声波焊接的静压力范围。

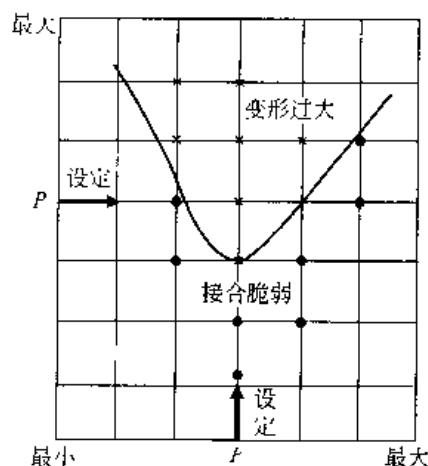


图 9.18 静压力功率的临界曲线
 P 功率; F —静压力

表 9.2 各种功率的超声波焊机的静压力范围

焊机功率/W	静压力范围/N	焊机功率 W	静压力范围·N
20	0.04~1.7	1200	270~2670
50~100	2.3~6.7	4000	1100~14200
300	22~800	8000	3560~17800
600	310~1780		

(5) 焊接时间

焊接时间是指超声波能量输入焊件的时间。每个焊点的形成有一个最小焊接时间, 小于该时间不足以破坏金属表面氧化膜而无法焊接。通常随时间增大, 其接头强度也增加, 然后逐渐趋于稳定值。焊接时间过长, 则因焊件受热加剧, 声极陷入焊件, 使焊点截面减弱, 从而降低接头强度, 甚至引起接头疲劳破坏。

焊接时间的选择随材料性质、厚度及其他工艺参数而定, 高功率和短时间的焊接效果通

常优于低功率和较长时间的焊接效果。当静压力、振幅增加及材料厚度减小时，超声波焊接时间可取较低数值。对于细丝或薄片，焊接时间约 0.01~0.1s，对于厚板一般也不会超过 1.5s。

9.3.3 其他工艺因素

影响超声波焊接的因素除了上述的主要工艺参数外，还有一些其他的工艺因素。

(1) 上声极

上声极具有传递超声波能量的最后一个环节，所用的材料、端面形状和表面状况等会影响到焊点的强度和稳定性。实际生产中，要求上声极的材料具有尽可能大的摩擦因数以及足够的硬度和耐磨性。而良好的高温强度和疲劳强度能够提高声极的使用寿命，保证焊点强度稳定。目前多用高速钢、滚珠轴承钢作为焊接铝、铜、银等较软金属的声极材料。沉淀硬化型镍基超级合金等作为上声极则适用于钛、锆、高强度钢及耐磨合金的焊接。

平板搭接点焊，上声极的端部应制成球面形，球面半径对焊点尺寸及抗剪强度有明显影响。一般声极球面半径取与其相接触焊件厚度的 50~100 倍，这个相对比值过大导致焊点中心附近出现大块脱焊区；半径过小，会引起过深的印痕。可见半径过大或过小都会使焊接质量和重复性发生波动。表 9.3 列出不同工件材料所用的上声极端部球面半径。

表 9.3 不同工件材料所用的上声极端部球面半径

材 料	工 件		上声极端部球面半径 mm
	状 态	厚度/mm	
2024 铝合金	T-3	1.0	76
TD 镍	退火	0.6	25
Co3V-5Mo-12V	再结晶	0.15	18
Ti6-Al4V	固溶处理	0.25	25
Ti5Al-2.5Sn	退火	0.3	25
Am355 不锈钢	CRT	0.25	25
Co10Mo-10Ti	冷轧及消除应力	0.1	12
Co10Mn-10Ti	冷轧及消除应力	0.25	25
Co10Mn-10Ti	冷轧及消除应力	0.4	25
Mo0.5Ti	冷轧及消除应力	0.1	12
Mo0.5Ti	冷轧及消除应力	0.25	18

(2) 焊机的机械精度

上声极与工件的垂直度对焊点质量会造成较大影响，随着上声极垂直偏离，接头强度将急剧下降。上声极横的弯曲和下声极或砧座的松动，会引起焊接畸变。

(3) 焊接气氛

一般情况下超声波焊无需对焊件进行气体保护，只有在特殊应用场合下，如钛的焊接，锂与钢的焊接等可用氩气保护。有些包装应用场合，则可能需在干燥箱内或无菌室内进行焊接。

表 9.4 列出了几种典型材料超声波焊接的工艺参数。

表 9.4 几种典型材料超声波焊接的工艺参数

材 料		厚度/mm	焊接工艺参数			上声极材料
名 称	牌 号		压力/N	时间/s	振幅/ μm	
铝及铝合金	1050A	0.3~0.7	200~300	0.5~1.0	11~16	45 钢
		0.8~1.2	350~500	1.0~1.5	11~16	
	5A03	0.6~0.8	600~800	0.5~1.0	22~24	
	5A06	0.3~0.5	300~500	1.0~1.5	17~19	
铝及铝合金	2A12	0.3~0.7	300~600	0.15~1.0	14~16	轴承钢 GCr15
		0.8~1.0	700~800	1.0~1.5	18~20	
纯铜	T2	0.3~0.6	300~700	1.5~2	16~20	45 钢
		0.7~1.0	800~1000	2~3	16~20	
钛及钛合金	TA3	0.2	400	0.3	16~18	上声极头部堆焊 硬质合金 60HRC
		0.25	400	0.25	16~18	
		0.65	800	0.25	22~24	
	TA4	0.25	400	0.25	16~18	
		0.5	650	1.0	18~20	
非金属	树脂 68	3.2	100	3	35	钢
	聚氯乙烯	5	500	2.0	35	橡皮

9.4 超声波焊的应用

超声波焊接属于固相焊接，目前主要用于小型薄件的焊接，并且焊接的多半是铝、铜、金等较软材料。超声波焊也可用于钢铁材料、钨、钛、钼、钽等的焊接，以及其他方法无法焊接的材料。超声波焊接质量可靠，并具有一定的经济性。

9.4.1 不同行业中的应用

(1) 电子工业

超声波焊接广泛应用于微电子器件的互接、晶体管芯的焊接、晶闸管控制极的焊接以及电子器件的封装等。其中最重要、最成功的应用是集成电路元件的互连。例如，在 1mm^2 的硅片上，将有数百条直径为 $25\sim 50\mu\text{m}$ 的 Al 或 Au 丝通过超声波焊将焊点部位互连起来。互连质量及成品率曾是集成电路制造工艺中的一项关键，早期应用的热键合方法（又称金丝球法），由于其高的热阻性及对芯片的热损伤，已逐步被淘汰，取而代之的是超声波焊接法和由超声波与热压相结合的热声键合法。

采用超声波焊接时，Al 丝与涂 Au 厚膜之间所形成的 Al-Au 扩散层由于存在“Kibendall 效应”容易引起“空穴裂纹”，这是引起点裂纹、加大接点电阻的主要原因，消除上述缺陷的有效措施是在厚膜 Au 层中添加元素 Pb，使焊接中形成的 Al Au Pb 二元合金层，填充由于 Au 扩散过快所形成的“空穴”，从而去除缺陷。

目前在装配线上应用的超声波点焊机的功率为 $0.02\sim 2\text{kW}$ ，频率 $60\sim 80\text{kHz}$ ，焊接时间 $10\sim 100\text{ms}$ ，焊接过程用微机控制及图像识别系统，位置控制精度每级 $2.5\sim 50\mu\text{m}$ ，识别容量 $200\sim 250$ 点，识别时间 $100\sim 150\text{s}$ ，成品率已高达 $90\%\sim 95\%$ 。

太阳能硅光电池的制造中，超声波焊接将取代精密电阻焊，涂膜硅片的厚度为 $0.15\sim 0.2\text{mm}$ ，铝导线的厚度为 0.2mm 。此外，可以将上述光电元件直接与热收集装置中的铜或铝管道焊接起来。

(2) 电器工业

超声波胶点焊方法也在中国制造的 $5 \times 10^5 \text{V}$ 超高电压变压器的屏蔽构件中获得成功应用。这项技术兼容了超声波固相连接的诸多优点和金属胶结的高强度的特点，这种以“先胶后焊”为特征的方法具备了高导电性、高可靠性及耐腐蚀性的优点，可有效地预防尖端放电的隐患，已在 $5 \times 10^5 \text{V}$ 超高压变压器的制造中取代了国际上通用的钎焊及铆焊工艺。

例如 ODFPS2-25000/500 型超高压变压器及其屏蔽构件的焊接结构，共采用了 500 个组件，50000 个焊点，焊接结构中选用的屏蔽铝箔厚度为 0.06mm，每个焊点接地电阻值小于 0.7Ω 。

电机制造尤其是微电机制造中，超声波点焊方法正在逐步代替原来的钎焊及电阻焊方法。微电机制造中几乎所有的连接工序都可用超声波焊来完成，包括通用电枢的铜导线连接，整流子与漆包导线的连接，铝励磁线圈与铝导线的焊接以及编织导线与电刷极之间的连接等。

汽车电器中各种热电偶的焊接是近年来所出现的重要应用成果。在钽或铝电解电容器生产中，采用超声波点焊方法焊接引出片。一种涤纶电容器采用超声波焊接工艺连接 CP 引线及铝箔，使电容器的损耗角降低到 0.006 以下，焊接成品率由原来的 75% 提高到接近 100%。

(3) 航天、航空及核能工业

宇宙飞船的核电转换装置中，用超声波焊接铝与不锈钢的组件、导弹的接地线以及卫星上的铍窗。直升飞机的检测孔道也是成功应用的例子，卫星用太阳能电池也使用了超声波焊接技术。

9.4.2 不同材料的应用

(1) 新材料工业

超声波焊可以在玻璃、陶瓷或硅片的热喷涂表面上连接金属箔及丝，这种应用已不只限于微电子器件工业。

利用这种焊接方法，可以焊接两种物理性能悬殊的材料并制成许多双金属焊接接头，表 9.5 列出超声波焊适用的一些双金属焊接接头。

表 9.5 超声波焊适用的一些双金属 (A+B) 焊接接头

材料 A	材料 B
铝及某些铝合金	铜、锗、金、科伐铁-镍-钴合金、钼、镍、铂、钽、钢、钨、镁、铍、铁、不锈钢、镍铬合金丝、康铜丝
铜	金、科伐铁-镍-钴合金、镍、铂、钢、钨
金	锗、科伐铁-镍-钴合金、镍、铂、钽
钢	钼、钨
镍	科伐铁-镍-钴合金、钼
钨	钼

超导材料之间以及超导材料与导电材料之间的焊接，在采用超声波焊及超声波浸润钎焊技术后，接头的电阻将明显低于传统的软钎焊及加锡铂电阻焊，并已用于超导磁体的制作。

进入 20 世纪 90 年代，管材工业出现了新的突破，可用于水管、煤气管及电业等的铝塑复合管得到广泛应用。超声波焊接作为复合管的主要焊接手段大量被生产所使用。

(2) 包装材料

超声波广泛用于焊接封装工业中的包装材料，从软箔小包装到密封管壳材料的焊接。用超声波环焊、缝焊和直线焊能焊接成气密性封装结构，如铝制罐及挤压管的密封包装，食品、药品和医疗器械等无污染包装，以及精密仪器部件和雷管的包装等。

(3) 塑料

随着塑料工业的发展，大量的工程塑料被广泛应用于机械电子工业中的仪表框架、面板、接插件、继电器、开关、塑料外壳等设计制造中。这些构件均可采用超声波塑料焊接工艺，此外超声波焊还应用于金属与塑料的连接及聚酯织物的“缝纫”等。

第 10 章 铝热剂焊

铝热剂焊是指利用金属氧化物和还原剂（铝）之间的氧化还原反应（铝热反应）所产生的热量，熔融金属母材并填充接头而实现接合的一种焊接方法。同时又利用反应金属生成物作为填充材料，填充金属来自过热的液态金属。这种方法是根据铝与氧产生剧烈的反应，由于是放热反应，所以反应一旦开始便能自行持续。

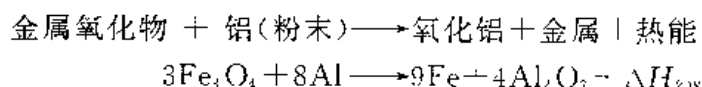
可以作为氧化剂的金属氧化物有 Fe_2O_3 、 CuO 、 MnO 等，可作为还原剂的有 Al 、 Mg 、 Ca 、 Si 、 B 、 C 等。工业上应用最多的氧化剂为 Fe_2O_3 、 CuO ，应用最广泛的还原剂为 Al 。

10.1 铝热剂焊的基本原理及特点

铝在足够高的温度下，与氧有很强的化学亲和力，可从多数的金属氧化物中夺取氧，将金属还原出来。 Fe 、 Cr 、 Mn 、 Ni 、 Cu 等都可被 Al 从相应的氧化物中还原出来，同时放出大量的热。由于 Al 价廉易得，是首选的还原剂，因此这种方法被称为铝热剂焊。

10.1.1 铝热剂焊的基本原理

很细的铝粉在化学反应中释放出大量的热量，使一些金属氧化物还原。以这种方式产生的熔融和过热的铁水被浇注到两工件的接头之间，形成焊缝。铝热剂焊的热化学反应是按下列方式进行的，即



只有当还原剂（铝）对氧亲和力比被还原金属对氧亲和力大时，反应才能开始并完成。由放热反应放出的热量就形成由金属和氧化铝所组成的液态产物。如果渣的密度比金属小，像钢和氧化铝那样，它们会立即分离开，渣浮上表面，而钢液就可用于焊接。

铝热剂焊的热化学反应式及反应热效应见表 10.1。

表 10.1 铝热剂焊的热化学反应式及反应热效应

铝热反应	反应焓 ΔH_{298} $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	反应自动进行程度
$3/2\text{MnO} + \text{Al} \longrightarrow 3/2\text{Mn} + 1/2\text{Al}_2\text{O}_3$	259.58	非自动反应
$1/2\text{Cr}_2\text{O}_3 + \text{Al} \longrightarrow \text{Cr} + 1/2\text{Al}_2\text{O}_3$	272.11	非自动反应
$3/8\text{Mn}_2\text{O}_3 + \text{Al} \longrightarrow 9/8\text{Mn} + 1/2\text{Al}_2\text{O}_3$	316.72	自动反应
$1/2\text{Mn}_2\text{O}_3 + \text{Al} \longrightarrow \text{Mn} + 1/2\text{Al}_2\text{O}_3$	337.13	自动反应
$3/8\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{Al} \longrightarrow 9/8\text{Fe} + 1/2\text{Al}_2\text{O}_3$	418.26	自动反应
$1/2\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al} \longrightarrow \text{Fe} + 1/2\text{Al}_2\text{O}_3$	426.22	自动反应
$3/2\text{FeO} + \text{Al} \longrightarrow 3/2\text{Fe} + 1/2\text{Al}_2\text{O}_3$	440.45	自动反应
$3/2\text{Cu}_2\text{O} + \text{Al} \longrightarrow 3\text{Cu} + 1/2\text{Al}_2\text{O}_3$	536	自动反应
$3/2\text{CuO} + \text{Al} \longrightarrow 3/2\text{Cu} + 1/2\text{Al}_2\text{O}_3$	605	自动反应

在表 10.1 各种反应中，铝是还原剂。从理论上说， Mg 、 Si 、 Ca 等元素也可以用作还原剂，但对于一般用途来说， Mg 和 Ca 的使用是有限的。 Si 常用于像热处理那样不需液态产物的热剂混合物中。此外，还使用等量的 Al 和 Si 的合金作为还原剂。

金属氧化物与铝粉的反应是最普遍应用的热剂焊混合物的基础。热剂化合物由很细的铝

粉和氧化铁粉末的混合物构成。这种混合物的比例通常按质量计大约为 3 份氧化铁对 1 份铝。这个反应所能达到的理论温度大约是 3093℃。无反应组分的添加剂以及向反应容器散热和辐射损失使这个温度大约降低到 2482℃。这大约也是可以允许的最高温度，因为 Al 在 2500℃ 时将会汽化。另一方面，最高温度不应低得过多，因为铝渣 (Al_2O_3) 在 2038℃ 时将会凝固。

进行反应的热剂数量对热损耗大小有很大影响。数量多比数量少时每千克热剂的热损耗明显减小，并且反应也更完全。热剂化合物中可以加入铁合金形式的合金元素，以便于与被焊零部件的化学成分相匹配，还可采用其他的添加剂来提高渣的流动性并降低其凝固温度。

铝热剂反应是非爆炸性的，在 1537℃ 时只需不到 1min 便能完成引燃，而与热剂数量多少无关。为了引起反应需要特制的引燃粉末（用镁粉引燃）或引燃棒，这两者都能用普通的火柴引燃。引燃棒或粉末能产生足够高的热量将贴近的热剂粉末加热到引燃温度，这一温度大约是 1204℃。反应产物是高纯铁和氧化铝渣，渣漂浮在顶部。

10.1.2 铝热剂焊的特点

铝热剂焊所用的型模和坩埚如图 10.1 所示。铝热剂焊时，将被焊件的两端放入特制的铸型腔内，并保持适当的间隙。这种方法类似于铸造方法，一个装填耐热砂的砂箱放置在工件周围。对待焊件、型腔预热到一定温度，点燃坩埚内的热剂粉，即进行化学反应。形成的高温液态金属注入型腔内，使焊件端部熔化并填满整个型腔。冷凝后，打开装夹具及熔模，完成焊接工作。

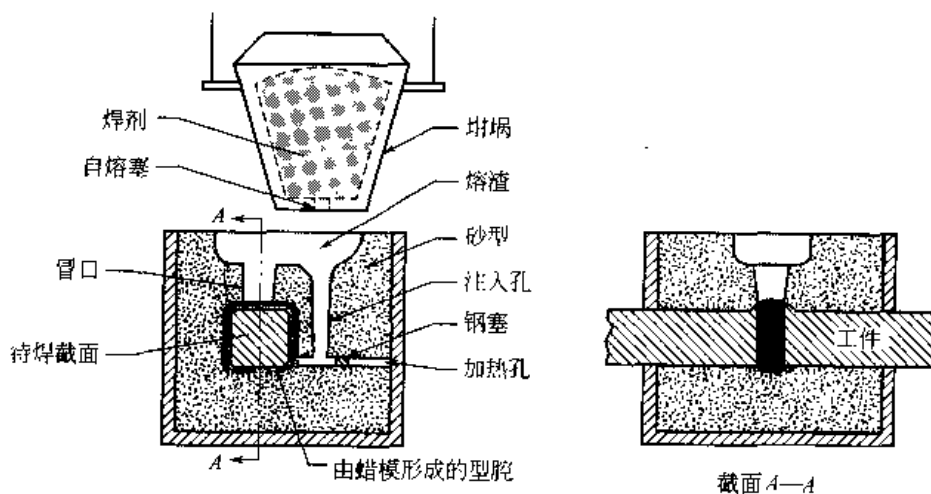


图 10.1 铝热剂焊所用型模和坩埚的示意

铝热剂焊主要有以下特点。

- a. 设备简单，投资小，焊接操作简便，无需电源，适于野外作业。
- b. 热容量大，焊接时大量的过热高温液态金属，在较短时间（10s 左右）注入型腔，使焊缝具有较高热容量，因而可使焊接区得到较小冷却速度。对含碳量较高的钢轨也不会造成淬火倾向。
- c. 接头平顺性好。铝热剂焊方法没有顶锻过程，焊接接头的平顺性仅取决于焊前焊件的调节精度。

铝热剂焊方法的缺点是焊缝金属为较粗大的铸态组织，焊缝韧性、塑性较差。如果对焊接接头区域进行焊后热处理，可使其组织性能有所改进，从而可以改善焊接接头的力学

性能。

铝热剂焊常用于焊接铁路钢轨、建筑和筑路构件用的钢筋，也用于焊接电缆和黑色金属及有色金属的棒材。铝热剂焊的焊缝和热影响区具有良好的冶金性能和工艺性能。焊接设备投资不大，焊接时间短。但是冷却时间长，制造砂型费时间。砂型里如果存在水分可能引起激烈爆炸。

10.2 铝热剂焊材料

10.2.1 铝热焊剂

焊接钢轨的铝热焊剂主要由氧化铁、铝粉、铁粉、合金组成。氧化铁与铝粉是铝热焊剂的基本组分，它们的反应在放出焊接所需热能的同时，产生填充焊缝所用的铝热钢水。反应所形成的 Al_2O_3 因为其密度小于钢水，浮在表面成为熔渣。

铁粉用于调节铝热钢水的温度。合金的作用是调整焊缝金属成分。Mn、Cr 等用于提高焊缝强度，Ti、V 等用于提高硬度以及细化奥氏体晶粒。

焊接铜导体以及铜与钢柱的铝热焊剂主要由氧化铜、铝粉、铜粉组成。

(1) 铝粉

① 对铝粉化学成分的要求 铝热焊剂一般要求铝粉有较高的纯度，有害杂质如 Fe、Si、Cu 总和要少。要求铝粉不被受潮和氧化，因为氧化铝不仅在反应中会延缓燃烧，而且降低还原能力，影响焊接质量。如果制成的铝粉潮湿，可能形成氢氧化铝，在高温反应下会产生水 (H_2O)，分解成氢和氧，以致引起气孔等缺陷。所以铝热焊剂除了要求铝粉化学成分合适外，应密封好。

② 对铝粉粒度的要求 粒度大小对反应速度影响很大，颗粒度太大，反应时间长，而且热量损失大，所以铝热焊剂对铝粉粒度有一定的要求范围：一般应采用粒度小于 0.6mm 的铝粉，并且要求不同粒度的铝粉按一定比例进行配制。

(2) 氧化物

氧化物一方面可以供给反应时需要的大量氧，产生热量；另一方面还原的金属还可以作为焊接的填充金属。氧化物主要有氧化铁、氧化铜，分别用来焊接钢铁和铜。

氧化铁是轧钢厂轧制钢材的氧化层。为了达到铝热焊剂要求的 FeO 和 Fe_2O_3 含量，氧化铁皮可以通过回转炉燃烧氧化法增加氧含量。氧化铁的氧化是从表面氧化逐渐深入到颗粒内部，所以氧化铁颗粒的表层由 Fe_2O_3 组成，而核心部分则由 FeO 组成。氧含量随着颗粒大小而变化。

氧化铁颗粒大小对铝热焊剂反应速度是直接相关的，其影响的规律与铝粉粒度相似。有的铝热焊剂中还有一些添加剂用于改善焊剂的工艺性能，如钢渣的黏度、流动性等。

10.2.2 铸型、坩埚及浇注孔和堵片

(1) 铸型

铸型包括用来形成焊缝、预热及浇注系统等部位的型腔。焊接时液态金属进入铸型焊缝部位的型腔中，冷却时形成一定形状的焊接接头。其他部位型腔通道（浇口、冒口）均为工艺所需要的。

铸型应具有足够的耐高温性，保证在预热时不坍塌；应有足够的强度，在浇注时铸型应不被冲垮、不变形，并且保持要求的尺寸；同时还应有足够的透气性，这样可以使金属中溶解的气体和铸型内的气体在浇注过程中及时排出，防止形成气孔等缺陷。

铸焊钢件时，铸型使用砂型。砂型一般用水玻璃石英砂强制成形，烘干而成。焊接铜导体时，铸型用石墨机械加工成半永久性铸型，每个铸型可用 50 次左右。

(2) 坩埚

坩埚主要供容纳焊剂进行铝热反应之用，是铝热剂焊的基本“设备”之一。铝热焊剂在坩埚内反应的温度很高，一般达到 2000℃ 以上，同时还伴随着强烈沸腾。因此，要求坩埚材料或内衬材料具有高的耐火度，并与熔渣的化学作用较小，以防止熔渣的浸蚀影响坩埚的使用寿命。

表 10.2 列出几种耐火材料的软化温度和熔点。由该表可见，石墨的熔点和软化温度较高，可作为铜导体焊接坩埚的材料。但是在铝热反应时，在高温作用下石墨坩埚会使铝热钢水有较多的增碳，使铝热焊缝的含碳量提高，不能保证铝热焊缝力学性能的要求，因此目前还不能直接使用石墨坩埚焊接钢轨。

表 10.2 几种坩埚耐火材料的软化温度和熔点

坩埚材料	在 120MPa 压力下的软化点, °C	熔点, °C	坩埚材料	在 120MPa 压力下的软化点, °C	熔点, °C
三氧化二铝(Al_2O_3)	1400~1600	2050	氧化镁(MgO)	1300~1500	2800
二氧化硅(SiO_2)	1600~1650	1710	石墨(C)	约 2000	不熔化而氧化

纯度高的 Al_2O_3 虽具有高的耐火度，但价格昂贵，不适于大量应用；使用氧化铝含量较低的耐火材料制成的坩埚（一般称为高铝坩埚），其耐火度也相应降低。其主要原材料是铝矾土，由于原材料供应充分，因此价格也较低廉。一般使用的是预制坩埚衬，成形后经高温烧结后再使用。

纯度高的 MgO 耐火度很高，但价格也较贵，工业上一般用的是以镁砂作原料，经高温烧结制成。采用电熔镁砂作原料，比一般镁砂具有更高的耐火度。这种材料不但有高的耐火度，而且由于正常铝热钢的熔渣为中性，因此对于镁砂坩埚衬的浸蚀也较小。镁砂坩埚应在成形后放入焙烧炉内焙烧，烧结温度一般要达到 1800℃。烧结良好的镁砂坩埚才可以提高其使用寿命。

石英砂的主要成分 SiO_2 也具有较好的耐火度，价格较低，在要求不高、一次性使用的坩埚中得到广泛应用。石英坩埚的缺点是耐腐蚀性差，焊缝中夹杂物含量也较多。

为了保证出钢口尺寸，坩埚应该采用厂内模具成形方式加工。当坩埚内壁已形成凹陷或已损缺时，应立即停止使用，进行修补或更换新的坩埚，以保障生产安全。

(3) 浇注孔和堵片

浇注孔与坩埚下口相通，孔的直径和高度由浇注金属量确定。孔高越大，金属流速越大，对工件表面的冲刷作用越强。自熔堵片的尺寸应与孔径相配，其作用是当铝热反应达到一定温度时，堵片熔化，实现自动浇注。堵片厚度决定着自动浇注的起始时间。

10.3 铝热剂焊工艺及应用

10.3.1 铝热剂焊工艺步骤

a. 铝热剂焊所用的“设备”只有反应坩埚和铸型。铸型可以是仅用一次的砂型，也可以是半永久性的金属模或者可重复使用的石墨模。

b. 在准备待焊工件时，工件表面必须彻底清理。待焊工件要牢固地、精确地夹紧就位。焊接批量大的小件时，如钢筋等，推荐使用由钢或石墨制作的永久模具。

c. 把石蜡浇注到接头中去，形成与焊缝的几何尺寸完全一样的形状。然后围绕接头区域制造砂型。这种砂型具有传统砂型结构的特点，有直浇口、冒口、通气孔、入型口和预热口。

d. 焊接前，用气体火焰预热铸型。待焊工件要预热到“红热”的温度，使石蜡熔化并从砂型里流出来。预热也把砂型和被焊金属烘干。较高的预热温度有助于形成熔合较好的接头，使杂质易于从熔化金属里浮出来。所有这些都改善接头的质量。

e. 加入铝粉和氧化铁（可以从轧钢氧化皮得到氧化铁）。铝热剂混合物约在 1300°C 引燃，因此常用 Mg 作为引燃剂。

f. 铝热剂焊的热能是从金属粉末和金属氧化物粉末化学反应所产生的过热液态金属里得到的。每个焊缝的焊接时间很短，一般小于 30s。可以加入些小片金属，以改善焊缝金属的力学性能。铝热剂混合物中的铝粉也可用作脱氧剂。

10.3.2 铝热剂焊的应用

铝热剂焊主要用于修复工作，应用有铁路钢轨、混凝土钢筋以及铜铝导体的现场焊接等。铝热剂焊在国内还被用于石油管道接地线的焊接，以及大断面铸锻件的焊接、修复等。热剂焊最独特的应用是在军事方面，这种方法能够用于破坏在战争中缴获并准备放弃的一些装备的活动部件。

热剂焊时必须先对正好待焊零件，使接头表面无锈、无污物、无油脂。还要使两表面之间有适当的间隙，其尺寸根据接头截面大小而定。然后将一个在零件上制出的模型或与零件外形相适应的预制模型放在待焊接头周围。

10.3.2.1 钢轨的焊接

热剂焊最常用的应用是焊接钢轨型材使之形成连续长度，这是减少铁道线上螺栓接头数量的一种有效方法。在煤矿也常常将主要运输轨道焊接起来以减少维护工作并降低由于钢轨不平整造成的煤炭过量洒落。起重机钢轨照例要焊起来以减少接头维护工作以及当载荷很大的轮子通过接头时造成的震动。

无缝线路铺设是提高铁路运输速度的关键，我国铁路主要采用在工厂内焊接（接触焊）和现场焊接（铝热剂焊、热压焊）结合的方式完成无缝线路的焊接。随着列车速度的提高，出现了跨区间无缝线路，道岔区内由于条件的限制，只能用铝热剂焊进行焊接。铁路钢轨铝热剂焊示意如图 10.2 所示。

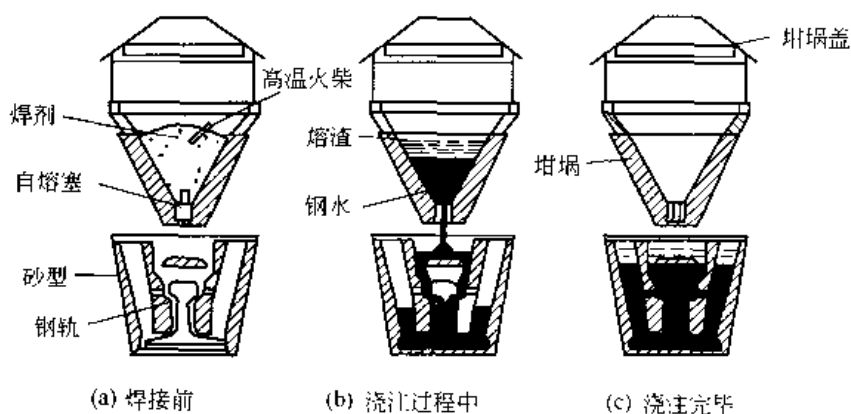


图 10.2 铝热剂焊接钢轨示意

为了完成对接焊缝，必须使零件端头充分预热以保证钢液与母材金属之间能完全熔合。

这种方法虽然也被称为焊接方法，实际上热剂焊很像金属铸造，要求有合适的浇口和冒口，以便补充凝固时的收缩，消除那些在熔铸中出现的典型缺陷，保持钢液能适当流动和防止金属流入接头时发生紊流。

(1) 钢轨焊接工艺

为了减少人为因素的影响，国内外已将小焊筋、小焊剂量、长时间预热的焊接工艺发展为大焊筋、大焊剂量、短时间预热的新工艺。特点是增加了焊剂总量（即增加了铝热钢水质量），预热主要靠铝热钢水对钢轨端面的冲刷。

1) 预热焊接

通常使用预制的可分开的型模来焊接标准尺寸的钢轨。应将型模对准，使其中心与两个钢轨端面之间间隙的中心重合。用气焊火焰指向型模内钢轨端面，使之预热到 $590\sim 980^{\circ}\text{C}$ 。预热后将装填了热剂的耐热衬里坩埚安放在两半型模的上方。随后引燃热剂，将钢液注入接头。有些生产工艺是将金属注入接头间隙中（顶浇法）；另一些工艺是将金属由钢轨底部外端注入型模底部，并使钢液由型模中部垂直上升（底浇法）。

在坩埚底部有自行熔化的钢制密封片。热剂反应完毕之后几秒，液态金属将密封片熔化并从坩埚底部流出而浇入两钢轨之间的间隙内。液态熔渣因密度较小，在坩埚内就与钢液分离开了。在全部钢液进入并填满两钢轨之间的空腔和型模本身的空腔之前，熔渣不会进入型腔。熔渣停留在焊缝顶部并凝固。金属凝固后，将型模拆下并丢掉，多余的金属用手砂轮、气动或手工剪切装置去除。

预热时间短的热剂焊需要装填的热剂要比预热时间长的多，因为焊接时散失到工件的热量必须由较多的钢液来提供。

2) 不预热焊接

为了简化焊接过程和省掉为了实现预热所需要的设备，设计了一种自行预热的热剂焊方法。钢轨端部是用热剂反应生成的液态金属的一部分预热的，坩埚和型模是连成一体的。此外，型模通常称为壳形模型，是用酚醛树脂黏结沙子预制的。这种型模很轻、不吸潮，无潮湿，储存期很长。热剂反应完成后，钢液自动由坩埚流入接头，而不是像单独坩埚那样要穿过大气。

钢轨焊接的工艺流程如图 10.3 所示。

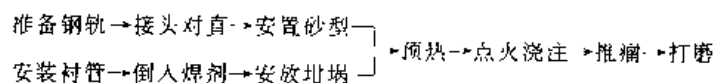


图 10.3 钢轨铝热焊接的工艺流程

在型模中焊接区域的下方有一空室，可以容纳最先熔化的金属以预热钢轨端头，这部分金属称为预热金属。填满空室之前要有足够的液态金属通过钢轨端部使之预热到能保证与母材金属完全熔合的温度。这种方法所用热剂量大约等于外部预热法的 2 倍。不预热焊接钢轨的热影响区要比外部预热法的热影响区小得多。

① 准备工作 焊接前首先将焊接工具、封箱砂、待焊钢轨准备好。待焊钢轨事先应仔细检查，有损伤、裂纹的部分必须锯去，扭曲的部分必须校直。端面应尽量平直，不平度应小于 2mm ，焊接前应对工件清刷除锈。

焊接前，两段钢轨必须用对轨器顺直。为了防止焊接变形，焊前接缝处应施以反变形。钢轨端部应稍加垫高，用 1m 平尺测量，平尺端部间隙在 $1\sim 3\text{mm}$ 时为合适。

② 焊接

a. 装卡砂型。砂型装卡前应在待焊钢轨上试合，如果结合面不能紧密贴合，可轻轻在待焊钢轨上研合，使之紧密贴合，最后将浮砂清除。卡好砂型，把预先配制好的封箱砂填封到砂型封箱沟槽内，注意用指尖把封箱砂塞严。

b. 坩埚装料及放置坩埚支架。焊接前要检查坩埚是否完好，内腔锥度是否足够，使用前应用预热器把坩埚烘干。在装卡砂型的同时可进行坩埚封口、装料。坩埚出钢口用自熔堵片封口，自熔堵片与出钢口的结合部放一层 10mm 的电熔镁砂。把焊剂倒入坩埚内。

c. 预热。铝热剂焊的预热一般采用专用的预热器，以保证足够的火焰强度。近年来，燃料已逐步采用液化石油气与氧气，只在隧道内仍使用乙炔气。预热温度一般在 600~800℃。

d. 点火、浇注。预热结束后，移开预热器，放好轨顶砂芯，立即借助预热火焰点燃高温火柴并将其迅速插入坩埚焊剂内。反应开始约 4~5s 后进行自动浇注。

③ 整修工件 浇注完毕后 4~5min 时开始用推瘤机推瘤。推瘤完毕后，用轨顶打磨机进行轨顶磨修，将焊接接头打磨平整。整个铝热剂焊接过程结束。

④ 焊接质量检验 根据铁道行业标准，钢轨铝热剂焊接头质量检验包括：静力弯曲、疲劳、断口检查以及抗拉强度、屈服强度、伸长率、硬度、冲击韧度等。

静力弯曲及疲劳试验性能应满足表 10.3 的要求；铝热剂焊接头的抗拉强度、屈服强度应不低于母材的 80%，伸长率不低于母材的 60%，硬度不低于母材的 90%，其中软点硬度平均值不低于母材硬度平均值的 80%，焊缝处的冲击韧度不低于母材的 60%。

表 10.3 钢轨铝热剂焊接头静力弯曲与疲劳性能的要求

种 类	50kg m		60kg m		种 类	50kg m		60kg m	
	静力弯曲	882kN	1176kN	疲劳试验		19kN	235kN	68kN	313kN
静力弯曲					疲劳试验				

除了上述要求外，焊接接头应进行探伤，不得有裂纹、过烧、未焊透、气孔、夹渣等缺陷。

(2) 钢轨焊剂的种类与性能

各种类型的钢轨都各有其适用的热剂混合物。大部分钢轨是 C-Mn 钢的，但国外制造了 Cr、Cr-Mo、Cr-V 及 Si 合金的钢轨。添加稀土金属或合金可以降低热剂反应产生的钢中的硫化物和磷化物，能提高接头的力学性能。

我国铁路现役钢轨有 U74 (800MPa 级)，U71Mn (900MPa 级)，PD3、BNbRe (1000MPa 级)，PD₁、PD₂ 淬火轨 (>1200MPa 级) 等几种，大多数有素轨（未热处理）与淬火轨之分。不同的线路条件，铺设不同强度的钢轨。根据硬度匹配原则，铝热剂焊接头硬度应与钢轨母材接近，以保证良好的线路状态。

适用于 U74、U71Mn 钢轨的铝热焊剂为铁Ⅲ型，主要含 Mn、Cr、Ni、Mo、V 等合金元素，焊缝布氏硬度为 280HB 左右。适用于 PD₂、PD₃ 钢轨的铝热焊剂为铁Ⅳ型，主要含 Cr、Mn 等合金元素，焊缝布氏硬度为 300HB 左右。

如果用于淬火钢轨，则铝热剂焊接头还应在焊后进行热处理，有时需辅以轨顶淬火，以达到与母材相匹配的硬度。近年来，我国铁路进口的铝热焊剂也有相应的型号，以适应不同的钢轨材质。

10.3.2.2 轧辊的铸接

铸造特大断面钢轧辊时，由于收缩量大，热导率低，凝固收缩时产生的内应力较大，凝

固过程中在轧辊的上辊颈热节边缘处产生环裂、内裂或疏松等缺陷而导致轧辊报废。用铝热剂产生的热量对先铸出的部分进行预热，重新铸出新的部分，不但可作为裂纹等缺陷产生后的一种补救措施，而且还可作为生产能力不足时的一种生产手段。

板材轧辊的断裂轴颈、齿轮及其断齿是用全新的零件更换的。要将该零件铸造或锻造得稍大一些以便于进行机械加工。然后将这些零件用铝热剂焊方法焊到主体上。对于钢轧辊端部严重磨损的轧辊头部，可以用类似方法以具有足够韧性的可以机械加工的热剂焊熔敷金属来修复。这种方法尤其适用于需要大量金属的修复工作，或者是用其他方法不能足够地或有效地产生为熔化被焊接头所需要热量的场合。

铸接前要对轧辊坯进行整体预热，铸接部位的预热温度要达到 250℃。预热出炉后将轧辊坯放置在扣好的型模内（见图 10.4），型腔内充煤气加热辊坯。随后将钢包吊至型模上方，将铝热焊剂均匀撒于铸接面上，并用高温火柴点燃，待铝热焊剂充分反应后，浇入钢水。

铸接主要利用铝热反应所生成的热量对轧辊端面进行预热，浇注后仍有少量铝热钢液残留于轧辊内。因此，铝热钢成分应符合或接近母材要求。

10.3.2.3 钢轨接续线的焊接

钢轨连接线是钢轨间通过牵引电流与信号电流的导线，以前大部分采用塞钉式或钩钉式，随着列车轴重的增加，牵引电流增大，这两种连接线已不能满足要求。采用铝热剂焊制备的钢轨连接线，焊接接头强度高，钢轨母材不产生淬火组织，对母材影响小，而且机具简单，无需电源。

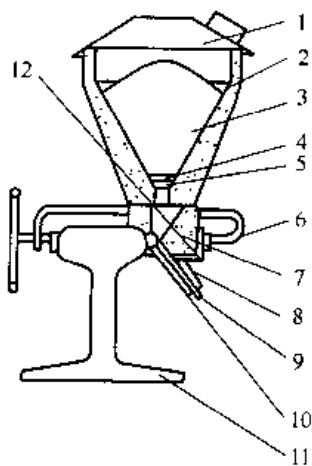


图 10.5 钢轨连接线铝热剂焊过程的示意

- 1-盖子；2-坩埚；3-焊剂；
- 4-石棉垫；5-自熔堵片；
- 6-夹具；7-左右型模；
- 8-导线保护管；9-铜绞线；10-托架；11-钢轨；12-密封垫

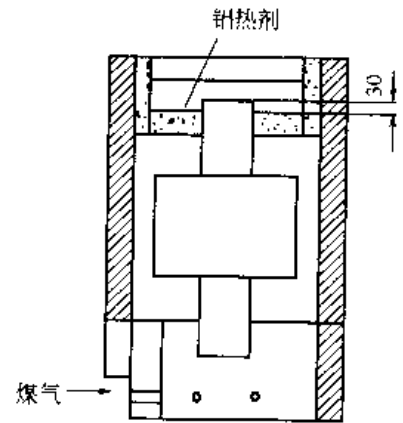


图 10.4 轧辊铸接示意

钢轨连接线铝热剂焊过程的示意如图 10.5 所示，将待焊钢轨面打磨好，把各种材料及工具按图装配好。用高温火柴引燃焊剂，反应完毕后，钢水熔化自熔堵片注入型模，进行焊接。焊后用喷灯对接头区域保温、缓冷，然后打碎型模，清理焊接接头。

国外已大量采用铝热剂焊方法进行输油管道、塔架等的接地线的焊接。

10.3.3 电气工程中的铝热剂焊

铝热剂焊在电气工程中主要用于焊接导体。用氧化铜和铝的热剂混合物焊接铜导线的接头。这两种材料之间的反应在 1~5s 之内产生过热的铜液和渣。可以加入碎屑或粉末状的其他金属以产生用于特定用途的合金。这种方法主要用于铜棒、铜缆、铜丝的焊接，以及铜导线与钢轨的接地焊接。后一种应用时要在钢轨接头处装上石墨型模。热剂反应刚一完成，铜液就会将圆片熔化而流入接头空腔，几秒之内就凝固并在母材金属与铜缆之间形成焊缝。随后拆掉型模，在去除反应室中的残渣之后型模还能再次使用。

电气工程中的热剂焊可大体分为间接加热式和直接加热式两种。用于焊接铝导体的铝热剂焊，是间接加热方式，即被还原出来的载热体金属不直接与母材金属相接触，也不作为填充金属，而是通过金属管的模具将热量传导给管内的铝导体，使

之熔化成形，在凝固期间还要施加一定的压力，以保证型腔内金属接头的紧实、丰满。

用于铜与铜、铜与钢的铝热剂焊，是直接加热方式，载热体金属直接与母材金属相融合，使母材表面熔化，载热体金属又作为填充金属，成为焊缝金属的一部分，在凝固期间不必施加压力。铝导体铝热剂焊通常是将热剂混合好后装入成形模具（管），外面用硬纸外壳封装好，形成预制的药包成品，以利于到现场施焊。铜导体热剂焊则是热剂与石墨模具各自分离，到现场装配，与传统的热剂浇注焊相同。

(1) 间接加热式导体铝热剂焊

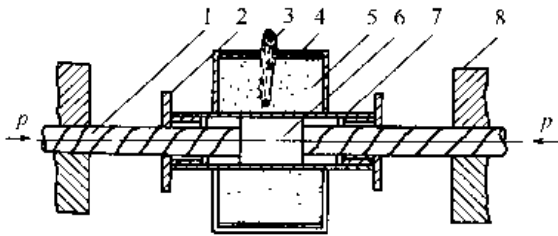


图 10.6 药包焊点燃前的装置情况

- 1—铝线；2—堵头；3—填块；4—高温火柴；
5—纸盒；6—药粉；7—铁管；8—焊钳

间接加热式导体铝热剂焊药包焊点燃前的装置情况见图 10.6。药包由纸盒、铁管、填块和药粉等部分构成。焊接前，先将清理好的铝线分别从堵头两端插入，顶紧填块，将铝线分别夹紧于左右钳口中，将高温火柴插入药包中，并剥去高温火柴尖端的高温层（外层），即可准备点燃焊接。

用普通火柴点燃高温火柴，药粉被点燃，放出热量，形成熔渣，将热量通过铁管传至铝

填块，并使之熔化，随后铝导线也被熔化。在焊钳送进的同时，铝线逐渐熔化。当热量停止供给后，熔化的铝液在堵头与铁管形成的型腔中结晶，将两铝线牢固焊合。在铝液冷凝过程中，应保持一定压力，使接头结合紧密、表面光滑丰满。去掉渣壳，取下堵头（下次再用），剥去铁管，再用钢丝刷打光接头表面，焊接工作完成。

(2) 直接加热式导体铝热剂焊

直接加热式导体铝热剂焊装置见图 10.7。该图是表示铜线电缆与钢地线柱的铝热剂焊示意图。

直接加热式导体铝热剂焊的焊接步骤如下。

1) 焊前清理及装配工件

将被焊铜电缆剥去绝缘护套，先用钢丝刷清理其表面，再装入石墨熔模的型腔中，同时将清除锈迹和油污的地线柱装入竖向型腔孔内。在装夹导体之间，应将熔模型腔清除油污，通常的方法是用丙烷火焰喷烧。

2) 装焊剂粉

将预先配制好、经过烘干的焊剂粉，按要求放入熔模上方的反应坩埚内，稍稍压实；并在其表面撒一层引燃粉（或插入高温火柴）。在装热剂粉之前，将铜圆盘堵片放在反应坩埚的下方，正好能堵住上浇注孔，以防止热剂粉漏入型腔内。

3) 点火引燃

① 用高温火柴引燃 将高温火柴头上的外层（高温层）剥去一部分，先用普通火柴点燃高温火柴，然后立即盖上上盖。上盖的侧面留有通口，以使反应的热气和烟尘冒出。

② 用引燃粉引燃 撒一层引燃粉后，即可盖上留有侧向通口的上盖，把电子打火枪伸入侧向通口内引燃引燃粉，操作人员随即离开侧向通口。

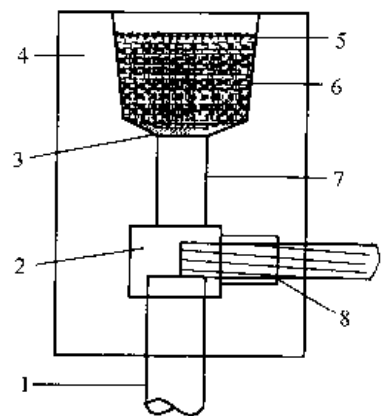


图 10.7 直接加热式导体铝热焊装置

- 1—地线柱；2—型腔；3—圆盘堵片；
4—石墨熔模；5—引燃粉；6—焊接药粉；7—浇注孔；8—铜电缆

4) 焊接过程的进行

当引燃粉将热剂粉引燃后，反应即迅速自动进行。反应还原出的高温铜液沉积于金属圆盘之上，并使圆盘熔化，铜液通过浇注孔进入型腔内，与铜电缆和地线柱充分接触，表面被熔化，并熔铸成为一个整体接头。接头的形状、尺寸与模具型腔一样。

5) 卸掉熔模，清理接头

松开夹具，使熔模分离并卸掉，下次再用。修整接头区，包扎绝缘，完成全部焊接工作。

10.3.4 铝热剂焊的修复补焊

修复补焊的铝热剂焊接头通常不是重复性的，所以不使用预制型模，但也必须对每个接头做一个简易型模以使之符合于零件形状。在船舶领域中常用热剂焊修复大截面的钢件，如断裂的尾架、舵、轴及塞柱等。

可采用热剂焊修复钢锭模，这比更换新件更节约。可以将钢锭模的底部切去，再用热剂金属完全重制，或将底部浸蚀成空穴的部分用热剂金属填满。前一种修复方法比较复杂并需要大量的热剂，但钢锭模寿命可以增长一倍以上。后一种修复方法则每浇铸二三次就需重修一回。

对于挖掘机铲刀，可用热剂焊将刀刃焊到中心环上。一次就浇铸几吨的金属。在这种情况下，热剂焊已是一种生产手段而不仅是一种修复方法。

(1) 接头准备

将待焊零件准确定位使之相互接触并对准以便焊接。要在型模覆盖区域以外的零件上做好牢固的记号。用这些记号将加工坡口后的零件重新定位。随后可用割炬沿断口切割金属使之形成两侧平行的间隙。间隙宽度由被焊截面尺寸大小而定，焊缝尺寸和型模要求见表10.4。必须清除安放型模处的所有污物、油脂以及气割造成的氧化物和残渣等。

表 10.4 热剂焊的焊缝尺寸和型模要求

截面尺寸 或直径 /mm	间隙宽度 /mm	加强环截 面/mm	冒 口		浇 口		加热孔		连续孔		所需热 剂量 /kg
			数量	直径 /mm	数量	直径 mm	数量	直径 /mm	数量	直径 /mm	
方 形 截 面											
51×51	11	38×11	1	19	1	19	1	32	—	—	2.7
51×102	14	38×14	1	19	1	25	1	32	—	—	3.4
102×102	17	67×17	1	25	1	25	1	32	—	—	11.3
102×203	22	87×22	1	25	1	25	2	32	—	—	22.7
203×203	29	117×29	1	44	1	32	2	32	—	—	56.7
203×305	32	140×32	1	41	1	32	1	32	1	32	79.4
305×305	37	159×37	1	64	1	38	2	38	1	38	136
305×457	43	197×43	1	64	1	38	2	38	1	38	227
406×406	44	227×44	1	70	2	51	2	38	2	38	318
406×610	51	252×51	1	70	2	51	2	38	2	38	522
610×610	59	300×59	1	64	2	51	2	44	2	44	851
610×911	67	359×67	1	64	2	51	2	51	4	51	1118
圆 形 截 面											
51	11	35×11	1	19	1	19	1	32	—	—	2.3
102	16	60×16	1	25	1	25	1	32	—	—	11.3
203	25	106×25	1	38	1	32	1	32	—	—	34
305	33	149×33	1	44	1	38	1	38	1	38	90
406	41	191×41	1	51	1	38	1	38	1	38	193

注：1. 所需热剂包括了单浇口时的10%和双浇口时的20%超量钢以备留在渣池内。

2. 包括一个单独的背面加热孔。

考虑到冷却时的焊缝收缩，一开始就要用记号为参考将零件比原来间隔位置多隔开1.6~6.4mm。精确的间隙增量则取决于焊缝尺寸和间隙的大小。所需的收缩余量可通过试验相当精确地判断。

(2) 造砂型

当制造单个大型焊缝时，采用蜡模来形成接头处的型腔，类似于石蜡铸造法。将石蜡放在间隙内和放在零件表面上以便形成所需的焊缝形状（包括焊缝加强环）。然后用适当的型模箱来装填型砂，并围绕蜡模造好砂型。

浇口、加热孔和冒口的木模在捣实砂型时就放在砂型内。当焊接两个尺寸相同的零件时，将加热孔直接指向蜡模中心部位。焊接两个尺寸不同的零件时，则将加热孔指向较大的零件，以便较均匀地将两工件加热。当复杂截面上有一个或更多顶点时，所有的顶点上面都应有冒口。砂型顶部要挖空成槽以便容纳由热剂反应产生的熔渣。应将砂型适当地扎出通气孔以便预热时水气容易逸出；最后取出木模。

要特别注意型砂的质量。型砂要具有高耐火性、高透气性以及足够的剪切强度。型砂中应不含低熔点的黏土组分。

(3) 预热

预热是通过加热孔将气体火焰吹入型腔来实现的。为此而专门设计的焊炬可以使用丙烷、天然气、煤油或汽油。预热完成后必须封闭加热孔。将一小段适当直径的钢棒推入孔内并抵住肩部，然后用型砂挡住。

预热最基本的目的是将石蜡熔化掉。要逐渐进行加热，并要频繁地将焊炬从加热孔移开以使熔化的蜡得以流出。当石蜡全部熔化之后，就要逐渐增加热量以预热母材金属表面并使砂型彻底干燥。必须将砂型完全烘干，以免由于型砂中残留水气而引起焊缝气孔。要不断加热直到待焊零件的端部呈樱红色，这表明其温度处在820~980℃之间。

(4) 坩埚装料

像有预热的钢轨焊接一样，热剂反应是在有耐热衬里的锥形坩埚中进行的。坩埚底部有一块硬而耐热的石块（镁砂）支撑着可更换的耐热出钢孔或套管。套管用出钢销堵塞，随后在销的顶端放一金属圆片。该圆片上盖一层耐火砂，热剂混合物装入坩埚时不要造成砂层移动。

有时在热剂混合物中加入低碳钢碎屑以增多生成的金属量。接头所需要的热剂混合物数量可用下述公式计算，即

$$X = E / (0.5 + 0.1S) \quad (10.1)$$

式中 X——需要的热剂质量，kg；

E——填满间隙所需要的钢液质量（包括10%的损耗在内），kg；

S——装料中碎钢屑的百分比。

作为初步估算，模型中每1kg的蜡相当于25kg的热剂。

(5) 焊接

可以用两种方法引起反应：

- a. 采用由火柴或气体点火器便可引燃的一种引燃粉；
- b. 采用引火棒。

在反应完毕而且钢液作用平静之后，向上猛击出钢销即可放出钢液，将钢液注入模型并填满接头。焊缝金属凝固后拆除模型。如有可能应将整个焊件退火以消除应力。如有必要，

可用机械加工或砂轮打磨去除焊缝加强环。冒口和浇口则可用气割炬切除。

10.3.5 铝热剂焊安全事宜

在热剂混合物中、坩埚中或工件上存在的水分都会在热剂反应进行时很快生成蒸汽，这就有可能使液态金属从坩埚中喷出。所以，必须将热剂混合物保存在干燥处所，坩埚必须是干燥的，焊前和焊接过程中不允许有水分进入系统之内。预热时采用的所有氧-燃料气体设备及操作都应适合安全措施。

在热剂焊作业区附近不应有能被火花或液态金属小颗粒引燃的易燃材料。作业区要有良好通风以防反应产生的烟、气积聚。要防止引燃粉末和引燃棒意外点燃。工作人员要穿着适当的防护物以抵御炽热颗粒或火花，这包括戴有保护眼睛的滤光镜的整个脸部防护罩、安全帽和防护靴。

第 11 章 爆 炸 焊

爆炸焊是以炸药作为能源进行金属焊接的方法。这种方法是利用炸药爆轰的能量，使被焊金属表面发生高速倾斜撞击，在撞击面上造成一薄层金属的塑性变形、适量熔化和原子间的相互扩散等。同种和异种金属就在这十分短暂的爆炸过程中形成结合。20 世纪 50 年代末，国外开始了对爆炸焊较系统的研究。我国从 1963 年开始爆炸焊的试验和研究，50 多年来，爆炸焊技术及其产品已较为广泛地应用于国民经济的一些部门。

11.1 爆炸焊的分类及特点

爆炸焊是利用炸药爆炸产生的冲击力，造成焊件的迅速碰撞而实现连接焊件的一种压焊方法。焊缝是在两层或多层同种或异种金属材料之间，在零点几秒之内形成的。进行爆炸焊时不需填加填充金属，也不必加热。

11.1.1 爆炸焊的分类

按初始安装方式不同，爆炸焊接有平行法和角度法两种基本形式。图 11.1 所示为用平行法复合板材的爆炸焊接装置及其焊接过程的示意。

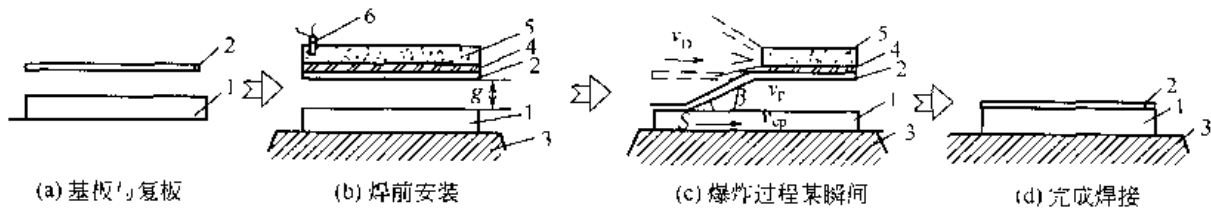


图 11.1 平行爆炸焊过程示意

1—基板；2—复板；3—基础；4—缓冲保护层；5—炸药；6—雷管
 β —碰撞角；S—碰撞点； v_D —炸药爆轰速度； v_p —复板速度； v_c —碰撞点速度；g—间距

从图中可以看出，欲把复板 2 焊到基板 1 上，基板常须有质量较大的基础 3（如钢砧座、沙、土或水泥平台等）支托，复板与基板之间平行放置且留有一定间距 g ，在复板上平铺一定量的炸药 5，为了缓冲和防止爆炸时烧坏复板表面，常在炸药与复板之间放上缓冲层 4，如橡胶、沥青、黄油等。此外，还须选择适当起爆点来放置雷管 6，用以引爆 [见图 11.1 (b)]。

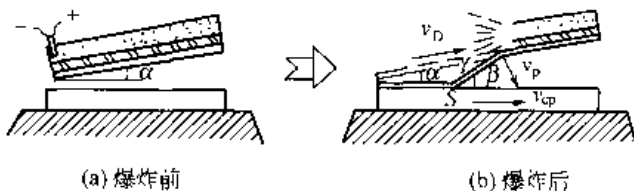


图 11.2 角度爆炸焊过程示意

爆炸从雷管处开始并以 v_D 的爆轰速度向前发生，在爆炸力作用下，复板以 v_p 速度向基板碰撞 [见图 11.1 (c)]，在碰撞点 S 处产生复杂的结合过程。随着爆炸逐步向前推进，碰撞爆炸逐步向前推进，碰撞点以 v_c 速度（这时与 v_D 同步）向前移动，当炸药全部爆炸完时，复板即焊接到基板上 [见图 11.1 (d)]。

用角度法进行爆炸复合材料焊接时，只需在安装过程中使复板倾斜一个预置角 α 即可 (见图 11.2)。这种方法只限于小件复合，对于大面积复合则不能采用，因为间距随爆炸点

位置的变化而变化。

按接头形式和结合区形状不同，爆炸焊可分为点爆炸焊、线爆炸焊和面爆炸焊三种类型，面爆炸焊（简称面焊）是爆炸焊的主要类型。

按爆炸焊实施位置可分为地面、地下、空中、水下和真空中的爆炸焊。

按产品形状可分为板-板、管-管、管-板、管-棒、金属粉末-板爆炸焊等。

此外，按初始安装方式的不同，又可分为平行法和角度法两种；按爆炸的次数可分为一次、二次或多次爆炸焊，因而有双层和多层爆炸焊之分；按布药特点可分为单面和双面爆炸焊，或从内、外或内外同时进行的爆炸焊；按焊件是否预冷或预热可分为冷爆炸焊和热爆炸焊等。

11.1.2 爆炸焊的特点

(1) 爆炸焊的优点

a. 爆炸焊不仅可在同种金属而且可在异种金属之间形成一种高强度的冶金结合焊缝。例如 Ta、Zr、Al、Ti、Pb 等与碳钢、合金钢、不锈钢的连接，用其他焊接方法难以实现，用爆炸焊则很容易实现。主要是因为爆炸焊不易产生脆性化合物层或者能把它减小至最低限度。

b. 可以焊接尺寸范围很宽的各种零件，可焊面积从 $13\sim 28\text{m}^2$ 。爆炸焊接时，若基板固定不动，则其厚度不受限制；复板的厚度为 $0.03\sim 32\text{mm}$ ，即所谓包复比很高。

c. 可以进行双层、多层复合板的焊接，也可以用于各种金属的对接、搭接焊缝与点焊。

d. 爆炸焊工艺比较简单，不需要复杂设备，能源丰富，投资少，应用方便。

e. 爆炸焊不需要填充金属，结构设计采用复合板可以节约贵重的稀缺金属。

f. 焊接表面不需要很复杂的清理，只需去除较厚的氧化物、氧化皮和油污。

(2) 爆炸焊的缺点

a. 被焊的金属材料必须具有足够的韧性和抗冲击能力以承受爆炸力的剧烈碰撞。屈服强度大于 690MPa 的高强度合金难以进行爆炸复合。

b. 因为爆炸焊时，被焊金属间高速射流呈直线喷射，故爆炸焊一般只用于平面或柱面结构的焊接，如板与板、管状构件、管与板等的焊接；复杂形状的构件受到限制。

c. 爆炸焊大多在野外露天作业，机械化程度低，劳动条件差，易受气候条件限制。

d. 基板宜厚不宜薄，若在薄板上施焊，需附加支托，从而增加了制造成本。

e. 爆炸焊时产生的噪声和气浪，对周围环境有一定影响，虽然可以进行水下、真空中或埋在沙子下进行爆炸，但要增加成本。

11.2 爆炸焊原理及结合面形态

11.2.1 爆炸焊的基本原理

爆炸焊是一种动态焊接过程。焊接时，炸药爆轰并驱动复板作高速运动，并以适当的碰撞角 β 和碰撞速度 v_p 与基板发生倾斜碰撞（见图 11.3）。在碰撞点前方产生金属喷射，称为再入射流，它有清除表面污染的“自清理”作用。然后在高压下纯净的金属表面产生剧烈的塑性流动，从而实现金属界面牢固的冶金结合。

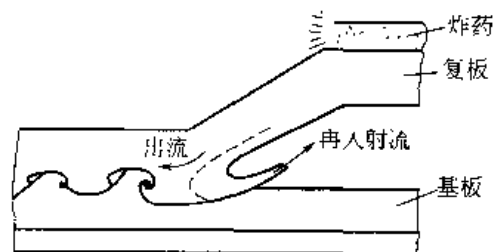


图 11.3 爆炸焊波状结合面的形成

良好的爆炸结合与射流的形成直接相关，射流的形成取决于两板件的碰撞角、碰撞速度、复板速度、碰撞点压强以及被焊两板的物理和力学性能等。试验证明：低于某一碰撞速度时，不能产生结合；为了产生射流和随后的爆炸结合，碰撞速度须低于两板材的声速。

表 11.1 列出了几种不同金属材料的声速。碰撞角 β 存在一个最小值，低于此值，不管碰撞速度如何，都不产生射流。平行法复合的碰撞角 β 决定于两板间的间距，而角度法复合则由预置角 α 和间距共同决定。

表 11.1 几种不同金属材料的声速

材 料	声速 $m \cdot s^{-1}$	材 料	声速 $m \cdot s^{-1}$
铁	4800	铜	5173
钢	5100	钛	4780
铜	3970	钴	3771
铝	5370	铌	4500
银	2600	铅	200~230
镁	4493	不锈钢	4550
镍	4667	锌	3100

11.2.2 爆炸结合面形态

爆炸时产生的碰撞速度和角度不同，两金属材料之间的冶金结合形式不同，结合面形态大致有以下三种（见图 11.4）。

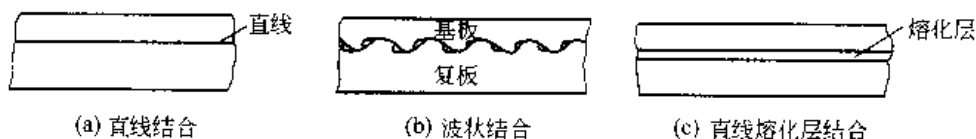


图 11-4 爆炸结合面形态示意

(1) 直线结合

形成直线结合与波状结合之间有一个临界碰撞速度，当碰撞速度低于这个临界速度时，结合面就呈直线结合状态，直线结合面上不发生熔化。这种结合形式没有得到实际应用，因为当碰撞条件发生微小变化就会引起未熔合的缺陷。

(2) 波状结合

当碰撞速度高于临界值时，就会形成波状结合。这种结合的力学性能比直线结合好，而且焊接参数选择范围宽。整个界面是由直线结合区和漩涡区组成，当基板和复板密度相近时，波峰两侧均有漩涡；密度相差较大时，仅在波峰一侧出现漩涡。漩涡内部由熔化物质组成，又称熔化槽，呈铸态组织。前漩涡以基板成分为主，后漩涡以复板成分为主。如漩涡内材料形成固熔体则呈韧性；如形成金属间化合物则呈脆性。良好的焊接结合面应由均匀细小的波纹组成，熔化槽呈孤立隔离状态。

(3) 直线熔化层结合

当撞击速度和角度过大，就会产生大漩涡，甚至形成一个连续的熔化层。这种大漩涡或熔化层如果是固溶体，一般不会对接头强度带来损害，但如果形成脆性金属间的化合物，则接头就会变脆，而且在其内部常常含有大量缩孔和其他缺陷，所以必须避免能形成连续熔化层的焊接操作。

11.3 爆炸焊工艺

11.3.1 接头形式与表面清理

(1) 接头形式

爆炸焊的接头设计形式主要有搭接和对接，如图 11.5 所示。

基板厚度 $\delta_{\text{基}}$ 与复板厚度 $\delta_{\text{复}}$ 之比称为基复比或厚度比，以 k 表示，即 $k = \delta_{\text{基}} / \delta_{\text{复}}$ 。 k 值越大，爆炸复合越容易，复合质量容易保证。若 $k = 1$ ，则爆炸复合较困难，一般要求基复比 $k > 2$ 。

(2) 表面清理

爆炸焊的接头须具有几何形状相同的重叠或紧密配合的结合面，该结合面必须平、光、净。平板覆合之前应先矫平并检查结合面上是否有缺陷，其表面粗糙度的要求取决于被焊金属，表面粗糙度越小越好，一般要求表面粗糙度 $R_a \leq 12.5 \mu\text{m}$ 。

焊前待焊金属表面必须清洁，虽然爆炸焊时形成的金属射流能清除金属表面的氧化膜，但其清除薄膜厚度只有几微米至几十微米，更厚的锈蚀和污层在焊前仍须清除。按不同材料、质量要求及批量大小，用不同的清除方法，常见的如下。

- ① 砂轮打磨 主要用于钢材表面清理。
- ② 喷砂或喷丸 用于要求不高的钢材表面清理。
- ③ 化学清洗 铜及铜合金、钛合金等主要用酸洗作表面清理；铝及铝合金主要用碱洗清理。

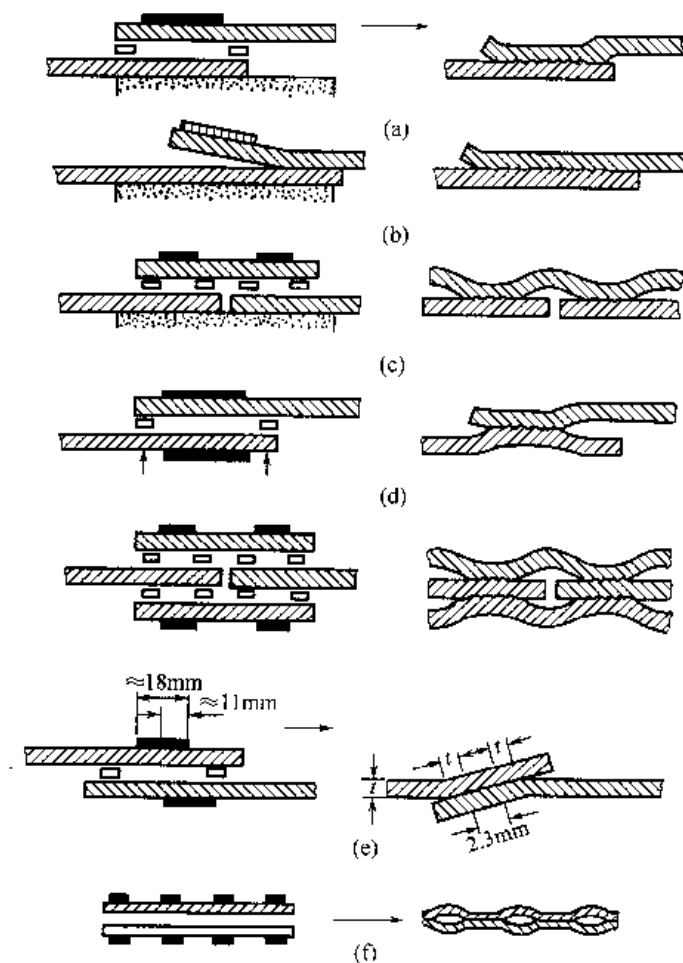


图 11.5

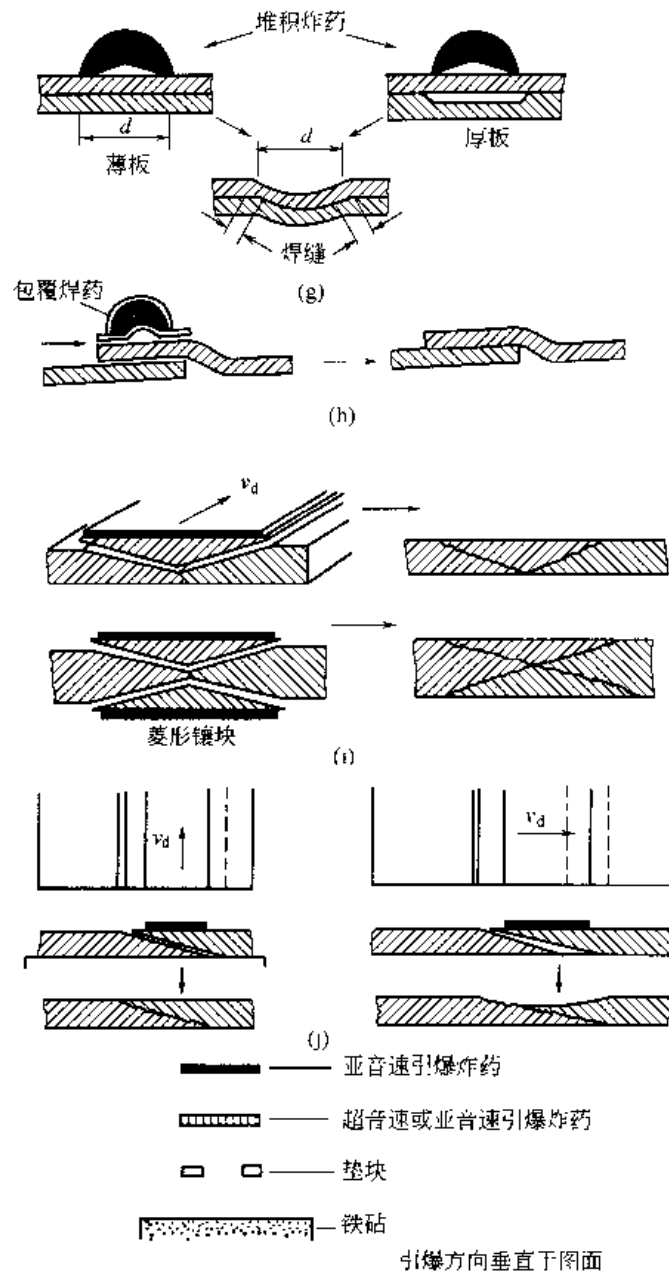


图 11.5 爆炸焊搭接和对接的接头形式

④ 砂布或钢丝刷打磨 用于不锈钢等表面清理。

⑤ 机械加工法 如车、铣、刨、磨等，用于要求较高的厚钢板、钢锻件或特殊表面的清理。

最好是当天清理工件，当天就进行爆炸焊。若当天不能进行焊接，则应对工件进行油封，爆炸焊前再用丙酮等将工件擦拭干净。

11.3.2 爆炸焊的工艺参数

爆炸焊接的工艺参数分初始参数、动态参数和结合区参数，三者相互关联。当初始参数确定后，动态参数和结合区参数（指波形的高和长）就相应确定了。合理的焊接工艺参数应满足以下三个要求：

- a. 在碰撞时产生射流；
- b. 在结合区呈现波形；

c. 消除或减少结合区内的熔化。

爆炸焊的初始参数包括单位面积炸药量和间距，前者表征输入焊接界面的能量，后者提供了复板加速的空间和便于排除再入射流的条件。

爆炸焊是一个动态过程，其动态工艺参数有冲击速度 v_p 、碰撞速度 v_c 和碰撞角 β 等。 v_p 决定焊接界面的碰撞压力； v_c 决定焊接界面的形态，当 v_c 小于临界碰撞点速度时，界面无波形，呈平直状态；碰撞角 β 合适的范围是 $5^\circ \sim 25^\circ$ 之间。超过此范围将不能产生结合，若过小则作用力过大，会撕裂结合部位。

影响碰撞区最终状态及爆炸焊过程能量耗散条件的可控参数主要有冲击速度 v_p 、碰撞点移动速度 v_c 和动态碰撞角 β_d 。

(1) 冲击速度 v_p

只有冲击速度 v_i 足够大，使冲击压力 $p_{mic} \approx 10\sigma_u$ (σ_u 为两金属强度高者的屈服点) 时，爆炸焊才能获得可靠连接强度。由此得到最低冲击速度。

$$\text{对异种金属} \quad v_{p_{mic}} \approx 10\sigma_u \left(1 + \frac{\rho_a v_a (\rho_b v_b)}{\rho_a v_a} \right) \quad (11.1)$$

$$\text{对同种金属} \quad v_{p_{mic}} \approx \frac{20\sigma_u}{\sqrt{\rho_a E_a}} \quad (11.2)$$

式中 ρ_a, ρ_b —— 两种金属密度， kg/m^3 ；

v_a, v_b —— 两种金属中声速， m/s ；

σ_u, E_a —— 强度高的那种金属屈服点及杨氏模量， N/mm^2 。

表 11.2 列出了按上式得出的估算值及实际测量的最低冲击速度，实际采用的冲击速度远远高于这些数值，最高已达 $400 \sim 600 \text{m/s}$ 。

表 11.2 爆炸焊的最低冲击速度

金属组合	密度 $[\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}]$	体积声速 $[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	假设屈服点 $[\text{MPa}]$	最低冲击速度 $v_{p_{mic}}, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$		附注
				估算	实测	
Al+Al	2.7	6400	3.6	41		—
6061Al+6061Al	2.7	6400	28.1	319	270	复板厚 6.35mm
Cu+Cu	8.96	4900	15.3	68	200 130 240	复板厚 1.1mm
钢+钢	7.87	6000	20.4	85	90 120 125 165 130	连接极限值 低碳钢+不锈钢 复板厚 $\geq 25\text{mm}$ 复板厚 10mm 复板厚 10mm
Ti15+Ti15	4.5	6100	25.5	182	220	—
Mo+Mo	10.2	6400	40.8	123		—
Al+Ti	2.7 4.5	6400 6100	3.6 25.5	236	—	—
Al+钢	2.7 7.87	6400 6000	3.6 20.4 3.6 47.9	158 372	160	复板厚 3mm
Ti+钢	4.5 7.87	6100 6000	25.5 20.4	144	200	复板厚 3mm
Ni+钢	8.9 7.87	5800 6000	15.3 20.4	81	200	复板厚 3mm

v_p 实际数值取决于炸药的爆炸功能，有许多经验公式，其中格氏修正公式为

$$v_p = \Phi \sqrt{2E \left(\frac{3R^2}{R^2 + 5R + 4} \right)} \quad (11.3)$$

式中 R ——单位面积炸药质量与单位面积的复板质量之比， $R = m_c / m_p$ ；

Φ ——二维引爆修正系数；

E ——爆炸动能。

(2) 碰撞点移动速度 v_c

碰撞点移动速度取决于引爆速度和安装条件。

对于平行安装
$$v_c = \frac{v_p}{\sin\beta} - v_0 \quad (11.4)$$

对于夹角安装
$$v_c = \frac{v_p}{\left[\sin \left(\alpha + \arcsin \frac{v_p}{v_0} \right) \right]} \quad (11.5)$$

式中 v_p ——引爆速度，m/s；

α ——安装夹角，(°)；

β ——碰撞角，(°)。

为了保证碰撞点前缘出现塑性金属射流，碰撞点移动速度 v_c 应小于金属中声速。当其他条件相同时，夹角安装采用比平行安装更高的引爆速度。

(3) 动态碰撞角 β_d

对于平行安装
$$\beta_d = \arcsin \frac{v_p}{v_0} = \beta \quad (11.6)$$

对于夹角安装
$$\beta_d = \alpha + \arcsin \frac{v_p}{v_0} - \alpha + \beta \quad (11.7)$$

显然， β_d 有一个由 v_{pmin} 和声速决定的最小值，只有达到这一最小值，才能获得满意的爆炸焊接头质量。

由上述可知，爆炸焊工艺参数的数值随炸药性能和用量、焊件安装几何尺寸而变化，目前很难完全从理论上确定和预测，但上述准则及经验公式将有助于通过焊接试验确定在各种应用条件下的工艺参数数值。

(4) 炸药量

引爆速度是由炸药的厚度、填充密度或混合在炸药中的惰性填料数量决定的。一般密度越大，爆速越高。当密度给定时，厚度大则爆速高。为了获得优质结合，要求爆速接近复板金属的声速。爆速过高则碰撞角 β 变小，引起结合区撕裂；爆速过低，则不能维持足够的碰撞角，也不能获得好的结合。如果沿整个装药层各处的密度和厚度不均匀，则上述三个动态参数 v_p 、 v_c 和 β 将不稳定，从而导致结合区的波形参数变化，连接质量没有保证。

单位面积炸药量 W_g 可用下式估算，即

$$W_g = K_v (\delta \rho)^{1/2} \quad (\text{g/cm}^2) \quad (11.8)$$

式中 K_v ——系数，一般为 0.9~1.4；

δ ——复板的厚度，cm；

ρ ——复板的密度，g/cm³。

(5) 间距 g

通常是根据复板加速至所要求的碰撞速度来确定间距 g 值。复板密度不同，使用的 g

值在复板厚度的 0.5~2.0 之间, 实用的最小 g 值与炸药厚度 δ_c 和复板厚度 δ 有关, 即

$$g = 0.2(\delta_c + \delta) \quad (11.9)$$

g 增大则 β 增大, 若 g 过大, 则波形尺寸将减小。

(6) 预置角 α

当采用高爆速炸药时, 炸药爆速比连接金属的声速高的多, 采用预置角 α 可以满足保持碰撞点速度低于连接金属的声速。当复板速度 v_p 达最大值时, 可按下式估算碰撞点速度 v_{cp} , 即

$$v_{cp} = \frac{v_p}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (11.10)$$

式中 β ——碰撞角, 一般焊接过程是在 $(\alpha + \beta) = 5^\circ \sim 25^\circ$ 范围内进行的。

只要估算出上述初始参数后, 就可以着手进行一组小型复合板试验, 通过试验来调整和确定满足技术要求的工艺参数, 然后进行正式生产。

11.3.3 其他工艺因素

(1) 炸药

爆炸焊接所需的能量由高能炸药爆炸时提供。炸药的爆炸速度很重要, 因为由它引起待焊两种金属间的碰撞速度必须控制在所需的速度范围之内。

选用炸药的原则是爆炸速度合适、稳定、可调、使用方便、价格便宜、货源广、安全无毒。研究表明, 炸药的最大爆炸速度一般不应超过被焊材料内部最高声速的 120%, 以便产生喷射和防止对材料的冲击损伤。

用于爆炸焊的炸药见表 11.3, 表中列出的低速和中速爆炸的炸药一般都在爆炸焊所需的爆炸速度范围之内, 并广泛用于大面积材料焊接的场合, 使用时需要很少的缓冲层或不需要缓冲层。

使用高速炸药时, 需要专门的设备和工艺措施, 如在基层、复层之间加缓冲材料, 如聚异丁烯酸树脂、橡皮等, 有间隙倾斜角安装或最小间隙平行安装等。为了特殊目的, 可以制造或混合专用的炸药。

表 11.3 爆炸焊用的炸药

爆炸速度范围	炸 药 名 称
高速炸药 4572~7620 (m·s ⁻¹)	TNT, RDX, PETN (季戊炸药) 复合料 B 复合料 C ₁ Delta 薄板 Prima 绳索
低速和中速炸药 1524~4572 (m·s ⁻¹)	硝酸胺 过氯酸胺 阿马图炸药 (硝酸胺=80%, 二硝基甲苯=20%) 硝基胍 黄色炸药 (硝化甘油) 稀释 PETN (季戊炸药)

炸药的爆炸速度是由炸药的厚度、填充密度或者混合在炸药中的惰性材料的数量所决定, 配制焊接用的炸药一般都是为了减低其爆炸速度。

爆炸焊接所用的炸药形态有塑料薄片、绳索、冲压块、铸造块、粉末状或颗粒状等多种, 可根据应用条件选用。

(2) 安装

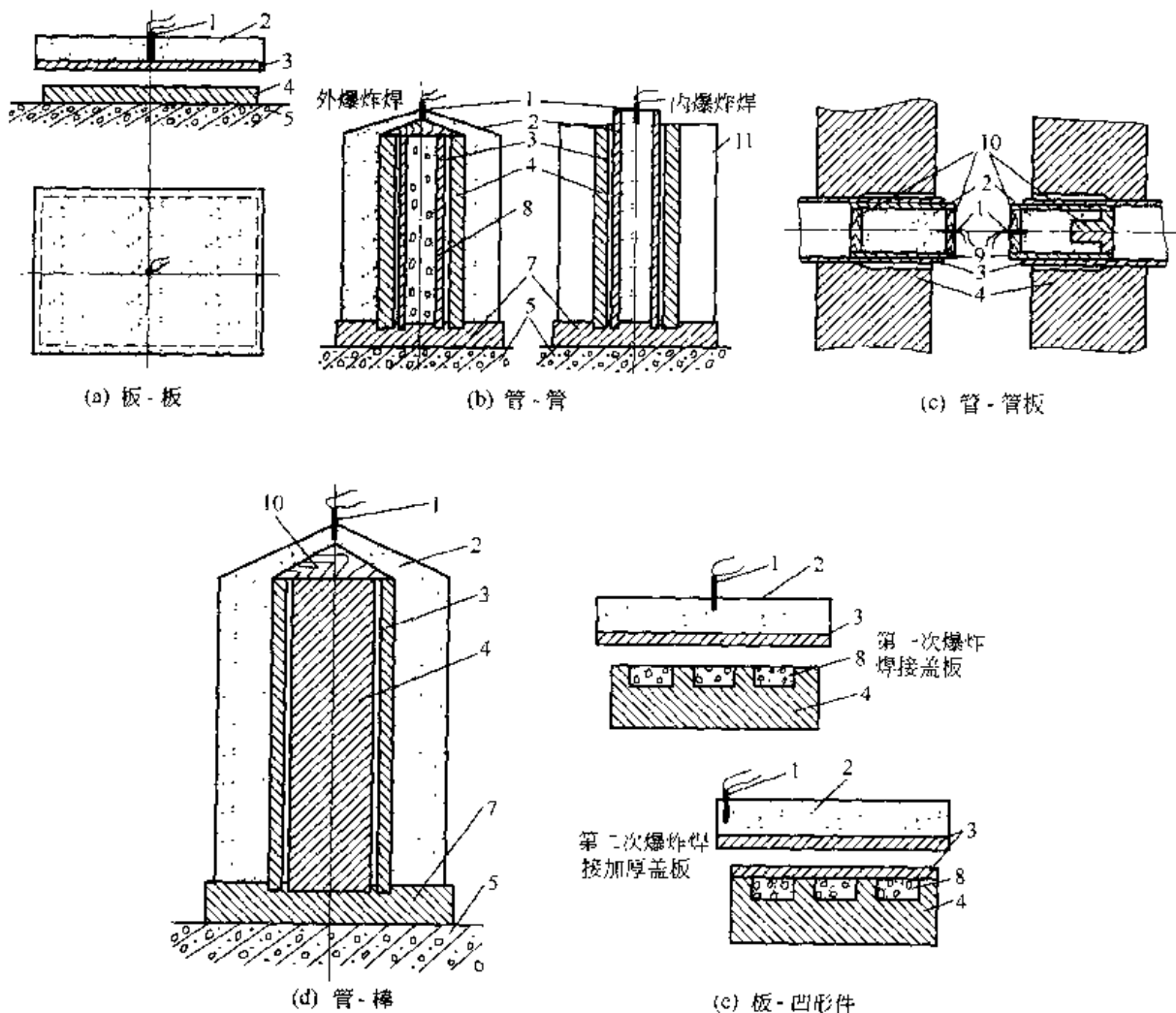
在爆炸场进行焊前安装的一些安装方法如图 11.6 所示。焊前做好一切准备，如接好起爆线、搬走所用的工具和物品，撤离工作人员和在危险区安插警戒旗等。根据药量的多少和有无屏障，设置半径为 25m、50m 或 100m 以上的危险区。

不同的爆炸焊方法有不同的安装工艺要求，其中进行平板复合爆炸焊时应注意如下事项。

a. 爆炸大面积复合板时最好采用平行法，若用角度法，则在间隙增大的复板过分加速，使其与基板碰撞时能量过大，会扩大边部打伤或打裂的范围，从而减少复合板有效面积和增加金属损耗。

b. 在安装大面积复板时，即使很平整的金属板安放后中部也会下垂或翘曲，以致与基板表面接触。为了保证复板下垂部位与基板表面保持一定间隙，可在该处放置一个或几个稍小于应有间隙值的金属片。当基板较薄时，需用一个质量大的砧座均匀地支托，以减小挠曲。

c. 采用合适的起爆方法，如端部引爆、边缘线引爆、中心引爆和四周引爆等，以保证整个界面获得良好的结合。对于大面积复合板时，最好用中心引爆或者从长边中部引爆，这样可以使间隙中气体的排出路程最短，有利于复板和基板的撞击，减少结合区金属熔化的面积和数量。



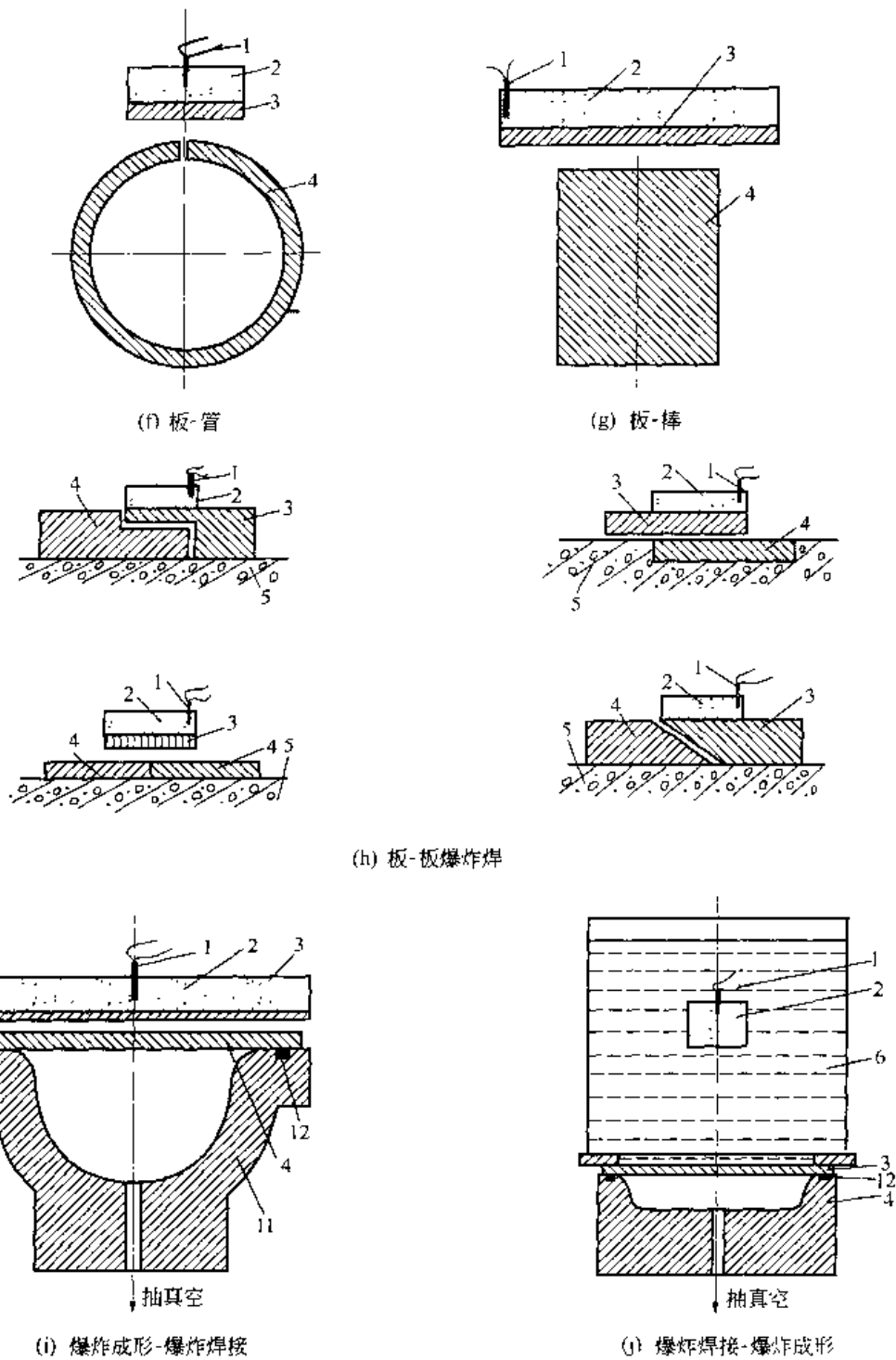


图 11.6 部分爆炸焊方法的工艺安装示意

1- 雷管；2- 炸药；3 复层（板或管）；4- 基层（板、管、管板、棒或凹形件）；5- 地面（基础）；6- 传压介质（水）；7- 底座；8- 低熔点或可溶性材料；9- 塑料管；10- 木塞；11 模具；12- 真空橡皮圈

d. 为了引爆低速炸药和减少雷管区的面积，常在雷管下放置一定数量的高爆速炸药。

e. 为了将边部缺陷引出复合板之外，并保证边部质量，常使复板的长、宽尺寸比基板大 20~50mm。管与管板爆炸焊时，管材也应有类似的额外伸出量。

f. 为了防止烧伤、压痕、起皮、撕裂等缺陷，常用橡皮、油灰、软塑料、有机玻璃、马粪纸、油毡等作炸药与基板之间的缓冲层。

g. 引爆炸药以实现爆炸焊时，待工作人员和其他物件撤至安全区后，用起爆器通过雷管引爆炸药，完成试验或产品的爆炸焊。

11.4 爆炸焊的应用及缺陷检验

11.4.1 爆炸焊的适用范围

爆炸焊被广泛应用于石油、化工、造船、原子能、宇航、冶金、运输和机械制造等工业部门。在具体应用上可以用于金属包覆或制造双金属板，使其表面或复层具有某种特殊的性能；也可以用于制造各种过渡接头，使其具有良好的力学性能、导电性能和抗腐蚀性能等。

(1) 可焊接的金属材料

任何具有足够强度与塑性并能承受爆炸工艺过程所要求的快速变形的金属都可以进行爆炸焊接。通常要求金属的伸长率大于或等于5%（在50mm标距长度上），却贝V形缺口试样的冲击吸收功大于或等于13.5J。工程上能用爆炸焊接的常用金属与合金的组合见表11.4。

表 11.4 工程上爆炸焊接的常用金属组合

材 料	奥氏体不锈钢	铁素体不锈钢	普通碳钢	低合金钢	铝及合金	铜及合金	镍及合金	钛及合金	钨	铌	铂	银	金	钼	铅	铋	钨	钼	铍	钴	镁	锌	锆
奥氏体不锈钢	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓			✓						✓
铁素体不锈钢	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓						✓						✓			✓
普通碳钢	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓						✓	✓	✓	✓
低合金钢	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓						✓	✓	✓	✓
铝及合金	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓													✓
铜及合金	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓									✓
镍及合金	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓									✓
钛及合金	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓							✓						✓
钨	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓									
铌	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓									
铂							✓	✓	✓	✓													
银	✓		✓		✓	✓	✓	✓					✓	✓									
金	✓		✓		✓	✓	✓	✓					✓	✓									
钼	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓				✓	✓								
铅			✓	✓																			
铋	✓							✓															
钨										✓													
钼	✓		✓	✓																			
铍																							
钴	✓		✓	✓																			
镁			✓	✓	✓			✓	✓														
锌			✓	✓																			
锆	✓		✓	✓				✓															✓

注：✓为焊接性良好（✓✓为同种金属焊接）；空白为焊接性差或无报道数据。

爆炸焊使焊接区受到强烈的塑性变形，某些金属的力学性能和硬度可能发生重大的变化。通常是爆炸焊以后金属的强度和硬度增高，而塑性降低，常常是采用热处理来消除这种硬化现象。图11.7所示为碳钢与不锈钢复层板横截面上爆炸焊前、后状态和焊后热处理后的硬度分布。

(2) 可焊接的产品结构

爆炸焊的产品多是结合面具有平面或圆柱面的简单结构。

1) 复合平板

爆炸焊的主要工业应用是生产双金属复合板。可以进行双层或多层复合，通常焊接时基板固定不动，这种情况下基板的厚度不受限制。但复板因被爆炸冲击波加速，故其厚度受到限制。

复合板一般是焊后状态供货的，由于采用爆炸焊生产复合板时，一般都会发生一些扭曲变形，所以焊后必须进行校平。可以在平板机械压力机上校平，如果在结合界面处发生的硬化已影响到工程应用，则焊后须进行热处理。若用于制作压力容器封头，对复合板进行热压成形时，要考虑结合面受温度影响可能产生脆硬的金属间化合物，例如钛与钢复合，加热温度不应高于 760℃，而不锈钢与碳钢的复合则无此要求。

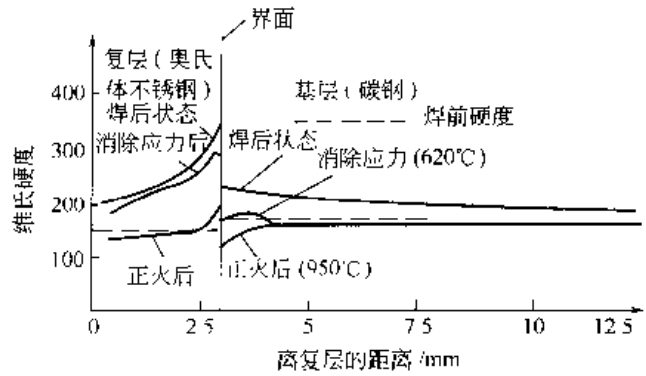


图 11.7 碳钢与不锈钢复层横截面上的硬度分布

可以在平板机械压力机上校平，如果在结合界面处发生的硬化已影响到工程应用，则焊后须进行热处理。若用于制作压力容器封头，对复合板进行热压成形时，要考虑结合面受温度影响可能产生脆硬的金属间化合物，例如钛与钢复合，加热温度不应高于 760℃，而不锈钢与碳钢的复合则无此要求。

2) 圆柱（锥）体的内或外包覆

对圆棒或实心圆锥体可以进行外包覆，对圆管或筒体之类产品可以根据需要进行内或外包覆，以获得具有特殊性能（如耐蚀、耐高温、耐磨等）的包覆表面。这种爆炸焊工艺可以生产双金属机件，也可用作修复易损机件。

3) 生产过渡接头

两种不相容的金属进行熔焊十分困难，甚至不可能焊接，即使焊成接头，其强度和塑性也很低。而爆炸焊却为两种异种金属或在冶金上不相容的金属之间实现高强度的冶金结合提供了一种良好的方法。因此，首先利用爆炸焊接方法把两不相容金属焊在一起，使之形成过渡接头，以此过渡接头再用普通熔焊方法，分别去与产品上同种金属或焊接性相近的金属（母材）进行焊接。

4) 管子与管板焊接

热交换器中管子与管板之间的焊接，可以采用

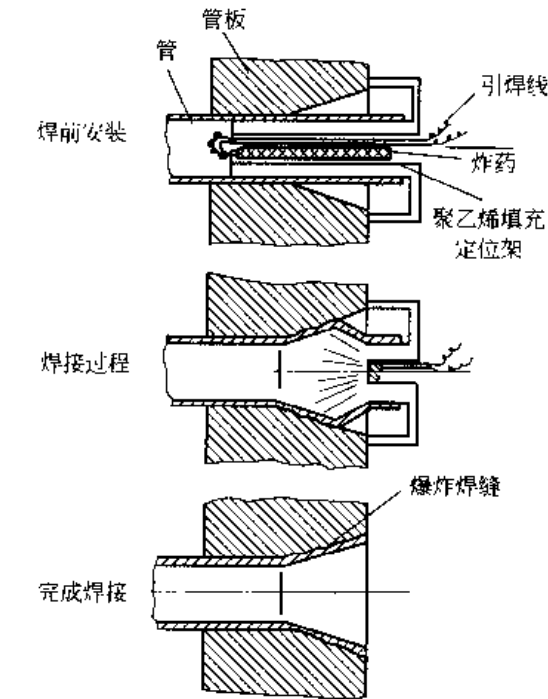


图 11.8 管子与管板的爆炸焊

内圆柱面包复爆炸焊工艺进行生产，见图 11.8。

5) 其他应用

① 利用爆炸焊焊接复杂的曲面结构 这时爆炸焊与爆炸成形往往同时完成。图 11.9 所示为其中的两种示意图，图 11.9 (a) 的基层（焊件）本身就相当于成形模具，图 11.9 (b) 需使用模具；前者是先成形后焊接，后者是先焊接后成形。

② 利用爆炸焊制造铜的六角形蜂窝结构 制造工艺是：在铜管内同时爆炸压紧和焊接一束镀铜的铝丝，焊后用化学方法把铝芯从结构中溶解掉，最后剩下的便是铜六角形蜂窝结构。

③ 铝与钢的爆炸焊 也是一种行之有效的焊接方法。一般生产中以厚度为 1.5~4mm 的纯铝与 1.5~15mm 厚的 1Cr18Ni9Ti 不锈钢进行爆炸焊，获得了质量良好的焊接接头，

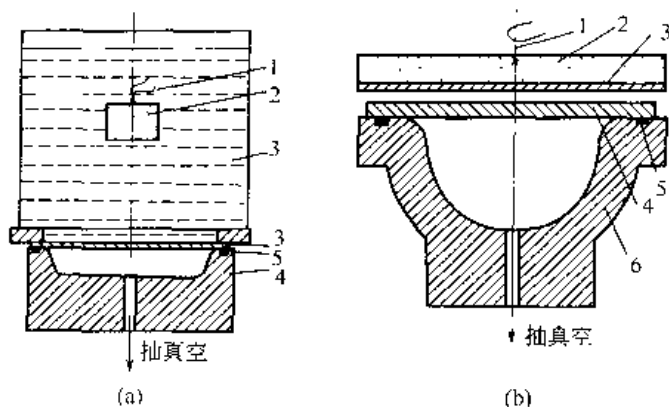


图 11.9 爆炸焊接-爆炸成形工艺示意

1—雷管；2—炸药；3—复层（焊件）；4—基层（焊件）；
5—真空橡皮圈；6—模具

其接头的剪切强度可达 70.56MPa。铝与碳钢的复合板也是用爆炸焊方法成形的，其接头质量优良。

从爆炸焊接头的组织分析可以看出，其接头金属在爆炸冲击波的作用下，接头两种金属之间的接触面上，由于金属塑性变形的流动，形成了带有波浪形的金相界面，并未发现有金属间化合物析出，而且具有波浪形的熔合线。

④ 不锈钢与锆及锆合金的爆炸焊 采用爆炸焊技术焊接直径 $\phi 50\text{mm} \times 3\text{mm}$ 的不锈钢管与直径 $\phi 42\text{mm} \times 1.5\text{mm}$ 的 Zr-2 锆合金管时，可采用如

下的爆炸焊工艺。

焊接前，必须清理两种母材表面。不锈钢管内表面粗糙度要求较高，还得用丙酮或酒精去除油污和杂质，再用水冲洗晾干。锆-2 合金管可用 45% HNO_3 + 5% HF + 50% H_2O 溶液进行清洗，去除氧化膜、油污和杂质。

进行装配时，要控制好间隙，要在固定的夹具上认真装配。锆管壁厚为 1mm 时，其间隙为 0.5mm；壁厚为 1.5mm 时，其间隙为 0.7~0.8mm；壁厚为 2.5mm 时，其间隙为 1.2~1.5mm。装配和固定好之后，装炸药，选择合适的炸药种类，其药量也根据锆管壁厚而定。如壁厚为 1mm 时，用药量 65~70g；厚度为 1.5~1.7mm 时，用药量 80g；厚度为 2.3~3.5mm 时，用药量 80~90g。

爆炸焊时，整个接头应放入固定好的夹模具中进行，此模具对成形起到良好作用，它应有足够的强度。焊接不锈钢管与 Zr-2 锆合金管爆炸焊的工艺参数见表 11.5。爆炸焊结束后，对焊接接头按工艺条件要求进行修整或加工。

表 11.5 不锈钢管与 Zr-2 锆合金管爆炸焊的工艺参数

管径直径/mm		管壁厚度/mm		安装间隙/mm	炸药量/g
不锈钢	Zr-2 锆合金	不锈钢	Zr-2 锆合金		
50	42	1.0	1.0	0.5	65~70
		1.5	1.5	0.7~0.8	75~80
		2.0	2.0	0.8~1.0	80~85
		2.5	2.5	1.2~1.5	85~90
		3.0	1.5	1.0~1.5	80~85
		3.0	2.5	1.5~2.0	90~95
		3.0	3.0	2.0~2.5	95~100

注：炸药种类为黑索金。

11.4.2 爆炸焊的常见缺陷

爆炸焊的宏观缺陷主要如下。

① 结合不良 是指爆炸焊后，复板与基板之间全部或大部分没有结合，或者即使结合但强度甚低。要克服这种缺陷首先应选用低爆速炸药，其次是使用足够的炸药量和适当的间隙距离，另外，选择好起爆位置，使之能缩短间隙排气路程，创造有利于排气的条件。

② 鼓包 在复合板上局部位置有凸起，其间充满气体，敲击时发出“梆梆”声。要消除鼓包除了选择合适炸药量和间距外，主要注意要造成良好的排气条件。

③ 大面积熔化 多发生在双金属爆炸焊，在结合面上产生大面积熔化。产生这现象的主要原因是焊接过程中间隙内没及时排出的气体，在高压下被绝热压缩，大量的绝热压缩热使气泡周围的一薄层金属熔化。要减轻和消除这现象，主要是采用低爆速炸药和中心起爆法，以创造良好的排气条件。

④ 表面烧伤 是指复板受爆炸热氧化烧伤。防止这一现象是使用低爆速炸药和采用黄油、水玻璃或沥青等保护层置于炸药与复板之间。

⑤ 爆炸变形 是指爆炸焊后复合板在长、宽、厚三个方向的尺寸和形状上发生宏观的和不规则的变化。一般情况下这种变形很难避免，但可以采取一些措施减轻变形，例如增加基板的刚度或其他特殊工艺措施。变形后的复合板在加工或使用前必须校平或调直。

⑥ 爆炸脆裂 多出现在材质常温冲击性能太低，强度或硬度很高的情况。除非采用热爆炸焊工艺（即爆前对工件预热），一般很难消除。

⑦ 雷管区未结合 在雷管引爆的部位，由于能量不足和排气不畅而引起该区未结合，通常采用在该处增加炸药量或将其引出复合面积之外的办法来避免。

⑧ 边部打裂 在复合板的周边或复合管（棒）的前端，由于边界效应而使复层被打伤、打裂的现象。产生的主要原因是周边或前端能量过大，因此，只要减少边部或前端的炸药量，增加复板或复管的尺寸或在厚板的待结合面之外的周边刻槽等措施就可以减少或清除这种现象。

⑨ 爆炸打伤 是指由于炸药结块或分布不均匀，使局部能量过大，或者炸药内混有固态硬物，它撞击复板表面而出现的麻坑、凹陷或小沟等，影响表面质量。主要防止措施是细化和净化炸药和布药均匀。

上述均为宏观缺陷。在爆炸复合板内部通过一些非破坏和破坏性的方法还可能测出微观缺陷，如微裂纹（特别是产生在双金属板结合界面的微裂纹）、显微孔洞、夹杂物或粗大的组织状态等。这些微观缺陷会造成爆炸复合件的显微组织不均匀，影响复合件的力学性能。

11.4.3 爆炸焊的质量检验

(1) 非破坏性检验

① 表面质量检验 主要是对爆炸复合板表面及其外观进行检查，如打伤、打裂、氧化、烧伤和翘曲变形等。

② 轻敲检验 用手锤对复层各个位置逐一轻敲，以其声响来初步判断其界面结合情况，可以大致计算结合面积率。

③ 超声波检验 利用超声波探测界面结合情况和定量测定结合面积。

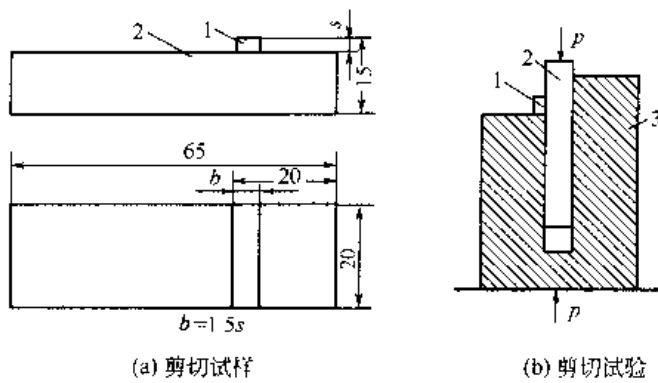
关于用超声波检验爆炸复合板结合情况的方法和标准，国内外已有不少。现将国内一单位的该项标准摘录（见表 11.6），国家标准有 GB/T 7734—1987。

表 11.6 钛-钢爆炸和爆炸+轧制复合板的超声波检验标准

I 类	II 类
钛材既作为耐蚀等特殊用途，又作为强度设计的	钛材不作为强度考核的
单个不结合区的长度小于 70mm，其面积小于 4.5cm ² ，不结合区的总面积小于复合板总面积的 2%	单个不结合区的面积小于 60cm ² ，不结合的总面积小于复合板面积的 2%
适用于爆炸复合板	适用于爆炸+轧制复合板

(2) 破坏性检验

根据 GB/T 6396 1995 复合钢板性能试验方法，用剪切和弯曲试验来确定钛-钢、不锈钢-钢、铜-钢和镍-钢的结合强度，用拉伸试验来确定其抗拉强度。



(a) 剪切试样

(b) 剪切试验

图 11.10 爆炸复合板的剪切试验

1—复板；2—基板；3—剪切模具

① 剪切试验 对装在模具内的剪切试件加压，使复层和基层发生剪切形式的破坏，以此剪切应力来确定复合件的抗剪切性能，图 11.10 所示为爆炸复合板剪切试验装置。一些爆炸复合材料剪切强度的试验数据见表 11.7。一些爆炸复合材料剪切强度的验收标准见表 11.8。

表 11.7 一些爆炸复合材料剪切强度的试验数据

复层	基层	剪切强度, MPa	复层	基层	剪切强度, MPa	复层	基层	剪切强度, MPa
钛	钢	220~350	镍	不锈钢	430	铝	钢	70~120
钛	不锈钢	280~530	铜	钢	190~210	铝	不锈钢	70~90
钛	钢	190~210	不锈钢	钢	290~310	铜	LY ₁ 铝合金	60~150
镍	钛	330	铝	铜	70~100			

表 11.8 一些爆炸复合材料剪切强度的验收标准

复层	基层	最低剪切强度, MPa	复层	基层	最低剪切强度, MPa
不锈钢、镍及其合金	钢	210	银	钢、铜	100
钛、铝、铅、铜及其合金	钢	140	铝	钢、铜	60

2) 弯曲试验 以预定达到的弯曲角或试件破断时的弯曲角来确定爆炸复合件的结合性能和加工性能。弯曲试验分内弯（复层在内）、外弯（复层在外）和侧弯三种，如图 11.11 所示。

内弯试验用的弯曲试样的形状和尺寸如图 11.12 所示。几种爆炸复合材料的弯曲性能见表 11.9。

3) 拉伸试验 对爆炸焊的拉伸试件，沿结合面方向施加拉力，直至破断为止，以此破断应力和相对伸长来确定爆炸复合板的抗拉强度和伸长率。典型拉伸试件的形状如图 11.13 所示。当复层较薄时宜用板状试件；当复层较厚时，则用棒状试件。拉伸试件尺寸应尽量和相关国家标准接近。几种爆炸复合板的抗拉性能见表 11.10。

4) 显微硬度检验 是对爆炸复合材料的结合区、复层和基层进行显微硬度的测量与分析，以确定在爆炸前后（包括后续热加工和热处理）这些材料各部分显微硬度的变化及其变化规律；也可以测量特定位置（如漩涡区）上特殊组织的硬度，从而判定它的性质和影响。

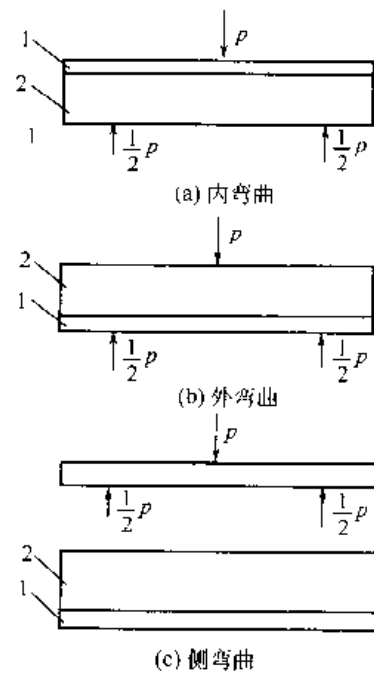


图 11.11 爆炸复合板的弯曲试验

1—复板；2—基板

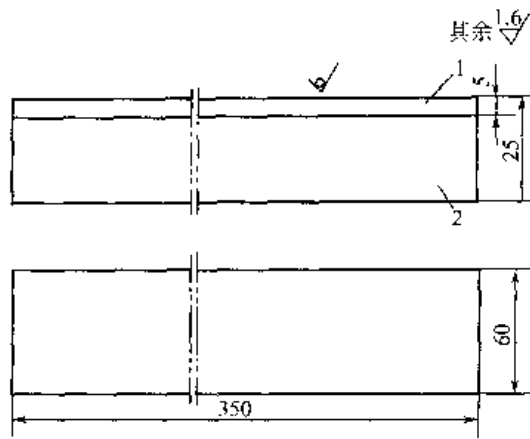


图 11.12 内弯曲试样的形状和尺寸
1 复板; 2 基板

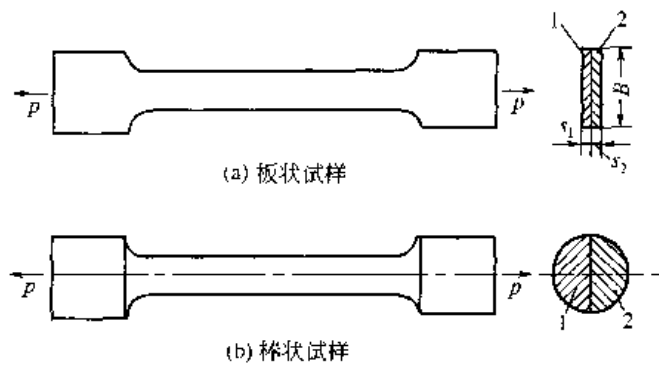


图 11.13 爆炸复合板的拉伸试验
1- 复板; 2- 基板

表 11.9 一些爆炸复合材料的弯曲性能

复合板	基 层	弯曲角 γ (°)	复合板	基 层	弯曲角 (°)	复合板	基 层	弯曲角 γ (°)
钛	钢	180	镍	钛	>167	不锈钢	钢	180
铝	钢	180	镍	不锈钢	180	B30	922 钢	180
钼	钢	180	钴	不锈钢 ^①	>110			

① 试样取自于复合管, 其余取自于复合板。

注: 弯曲性能均为内弯曲, 弯曲半径等于复合板厚或复合管壁厚。

表 11.10 几种爆炸复合板的拉伸性能

复合板	钛-Q235 钢	钛 18MnMoNb 钢	B30-922 钢	铜-LY ₁₂ 铝合金
σ / MPa	450~475	750	750~775	265~305
δ / %	3.5~14.0	5.0	10.5~11.5	6.5~10.9
试件形状	板状	棒状	板状	板状

图 11.14 所示为爆炸焊态和热轧态的钛-钢复合板界面结合区的显微硬度分布曲线。由图可见, 在爆炸焊态的情况下, 钛和钢在界面结合区及附近的硬度均高于爆炸前的母材, 这表明这些材料在爆炸载荷下发生了硬化。结合界面上硬度最高, 随着与界面距离的增加, 硬度逐渐降低。这与其中金属塑性变形程度的逐渐减弱有关。热轧后, 钛的硬度降到母材原始硬度以下, 钢的硬度也有所降低, 可是仍高于母材原始硬度。在 1000°C 加热和热轧后, 由于钛和钢的界面处生成了含有多种 Fe、Ti 金属间化合物的中间层, 使其中的硬度显的特别高。

5) 金相检验 从爆炸复合板的一定位置处切取金相样品, 进行界面结合区显微组织的检验。取样的位置可以是复合板中有代表性的部位, 也可以是任意部位。用金相显微镜在放大一定倍数 (低倍或高倍) 下进行界面结合区显微组织和形态的观察, 以确定是平面结合、波形结合还是熔化层结合, 以及与母材基体不同的显微组织。

爆炸焊接的双金属复合板的检验还可以视具体情况和需要, 进行另外一些项目的检验, 如冲击、扭转、杯突、疲劳、热循环和各种腐蚀性能的检验, 以及界面结合区的物理化学性

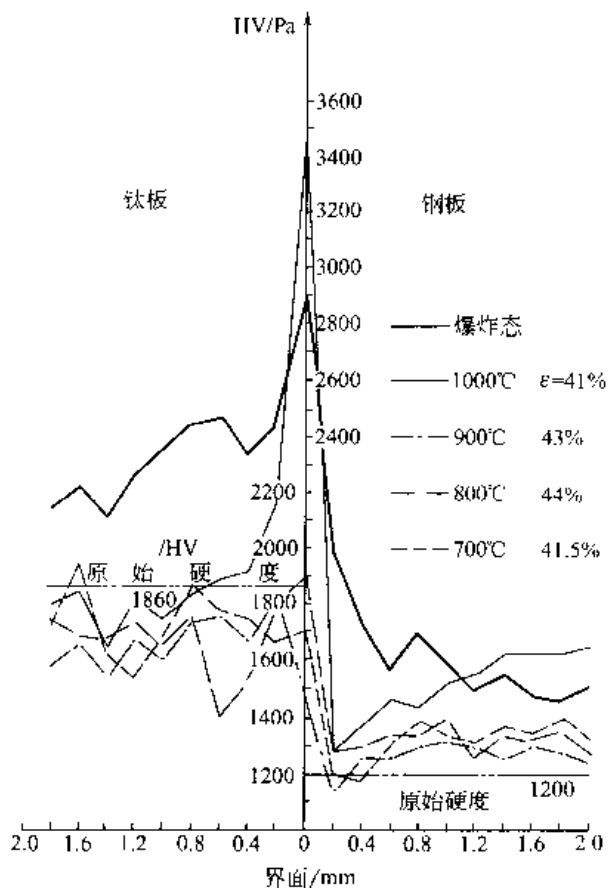


图 11.14 爆炸焊态和热轧态钛-钢复合板
界面结合区的显微硬度分布

件撤至安全区后方能引爆炸药。引爆前发出预定信号，使所有人员做好防声、防震和安全准备。

f. 炸药爆炸 3min 后，工作人员方能进入现场。如遇瞎炮，必须排除后方能进入现场进行检查和处理。

g. 严禁将火种火源带入工作现场。

h. 爆炸工作每告一段落要进行一次安全总结，查找事故苗头和杜绝隐患。

爆炸焊生产中通常使用低爆速的混合炸药，如铵盐和铵油炸药。前者由硝酸铵和一定比例的食盐组成，后者由硝酸铵和一定比例的柴油组成，仅使用少量的 TNT 来引爆炸药。硝酸铵是一种常见的化肥，它是非常稳定的，与食盐和柴油混合以后“惰性”更大。颗粒状的硝酸铵和鳞片状的 TNT 可以用球磨机破碎成粉末而不会爆炸。

铵盐和铵油炸药只有在 TNT 等高爆速炸药的引爆下才能稳定爆炸。TNT 炸药还得靠雷管来引爆，而雷管中高爆速炸药只有在起爆器发出的数百伏高电压下才会爆炸。所以，在现场操作中，只要严格控制好雷管和起爆器，通常是不会出现严重的安全事故的。

能检验等。

11.4.4 爆炸焊安全事项

爆炸焊是以炸药作为能源的一种焊接方法，因此爆炸焊过程中的安全问题显的格外重要。爆炸焊实践中必须注意的安全事项如下。

a. 爆炸场地应设置在远离建筑物的地方。炸药和原材料、雷管和工作人员均须分车运输，严禁炸药和雷管同车运输。

b. 炸药库管理人员须昼夜值班，外人不得入内；炸药、雷管和导爆索等火工用品须分类分开存放，它们的人库和出库要严加管理，做到账物相符。

c. 所有工作人员必须遵守国家有关政策法规，接受安全和保卫部门的监督，接受工种训练和考核，并取得操作证。

d. 所有工作人员应在当班班长和安全员的指挥下进行工作；现场操作应按预定的工艺规程进行，特别是雷管和起爆器应自始至终由一人保管及使用，绝不可两人或多人保管和使用。

e. 工艺安装完毕并且所有人员和备用物

参 考 文 献

- 1 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册(第1卷 焊接方法及设备). 第2版. 北京: 机械工业出版社. 2001
- 2 Larry Jeffus. *Welding Principles and Applications*. New York: Delmar Publishers Inc., 1993
- 3 李亚江. 特殊及难焊材料的焊接. 北京: 化学工业出版社, 2003
- 4 李志远, 钱乙余, 张九海等. 先进连接方法. 北京: 机械工业出版社, 2000
- 5 曾乐. 现代焊接技术手册. 上海: 上海科学技术出版社, 1993
- 6 Jean Cornu. *Advanced Welding Systems (Vol. 1-3)*. London: IFS Publication/Springer-Verlag, 1988
- 7 邹增人, 李亚江, 孙俊生等. 焊接材料、工艺及设备手册. 北京: 化学工业出版社, 2001
- 8 任家烈, 吴爱萍. 先进材料的连接. 北京: 机械工业出版社, 2000
- 9 陈祝年编著. 焊接工程师手册. 北京: 机械工业出版社, 2002
- 10 Li Yajiang et al. Phase constitution characteristics of the Fe-Al alloy layer in the HAZ of Calorized steel pipe. *Welding Journal*, 1997, 76 (9): 356s~360s
- 11 何德孚主编. 焊接与连接工程学导论. 上海: 上海交通大学出版社, 1998
- 12 陈裕川主编. 焊接工艺评定手册. 北京: 机械工业出版社, 2000
- 13 李亚江, 陈茂爱, 孙俊生. 实用焊接技术手册. 石家庄: 河北科学技术出版社, 2002
- 14 张文敏. 焊接物理冶金. 天津: 天津大学出版社, 1991
- 15 傅积和, 孙玉林主编. 焊接数据资料手册. 北京: 机械工业出版社, 1994
- 16 钱在中主编. 焊接技术手册. 太原: 山西科学技术出版社, 1999
- 17 姜焕中等编. 电弧焊及电渣焊. 北京: 机械工业出版社, 1988
- 18 北京市技术协作委员会编. 实用焊接手册. 北京: 水利出版社, 1985
- 19 殷树言, 张九海. 气体保护焊工艺. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1989
- 20 Li Yajiang et al. XRD and TEM analysis of Fe₃Al alloy layer on the surface of the calorized steel. *Materials Research Bulletin*, 2001, 36 (9): 2389~2394
- 21 顾曾迪, 陈根宝, 金心溥编著. 有色金属焊接(第2版). 北京: 机械工业出版社, 1987
- 22 王文翰主编. 焊接技术手册. 郑州: 河南科学技术出版社, 2000
- 23 Mendel Sachs. *Solid State Theory*. New York McGraw-Hill Book Company, Inc., 1993
- 24 何康生, 曹雄夫. 异种金属焊接. 北京: 机械工业出版社, 1986
- 25 李亚江, 王娟等. Fe₃Al/Q235 异种材料扩散焊界面相结构分析. *焊接学报*, 2002, 23 (2): 25~28
- 26 Li Yajiang et al. Numeric simulation of thickness of intermetallic compounds in interface zone of diffusion bonding for Cu and Al. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2001 (11), 6: 908~911
- 27 戚正风主编. 固态金属中的扩散与相变. 北京: 机械工业出版社, 1998
- 28 李亚江, 吴会强等. Cu/Al真空扩散焊接头显微组织分析. *中国有色金属学报*, 2001, 11 (3): 424~427
- 29 Li Yajiang et al. Phase constitution near the interface zone of diffusion bonding for Fe₃Al/Q235 dissimilar materials. *Scripta Materialia*, 2002, 47 (12): 851~856
- 30 刘中青, 刘凯. 异种金属焊接技术指南. 北京: 机械工业出版社, 1997
- 31 Li Yajiang et al. Fine structure at the diffusion welded interface of Fe₃Al/Q235 dissimilar materials. *Bulletin of Materials Science*, 2001 (24), 6: 639~642
- 32 李致焕. 中同轴电缆的冷压滚焊技术. *焊接学报*, 1984, 5 (3): 9~13
- 33 李致焕, 亢世江. 冷压焊中原子扩散行为的试验研究. *焊接学报*, 1991, 12 (3): 7~12
- 34 美国焊接学会. 焊接手册(第7版, 中译本). 焊接方法(第3卷). 北京: 机械工业出版社, 1986
- 35 李致焕. 电气工程中的焊接技术与应用. 北京: 机械工业出版社, 1998
- 36 American Welding Society. *Welding Handbook (Section 2)*, 8th Edition, 1998
- 37 TB/T 2622. 1~6 1995.
- 38 TB/T 1632-91.
- 39 宁裴章, 才荫先编著. 摩擦焊. 北京: 机械工业出版社, 1983
- 40 赵亚光主编. 微型计算机在焊接中的应用. 西安: 西北工业大学出版社, 1991

- 41 机械工程手册编委会. 机械工程手册 (第2版). 机械制造工艺与设备 (一). 北京: 机械工业出版社, 1997
- 42 P. T. Houldcroft. Welding Process Technology. London. Cambridge University Press, 1977
- 43 [美] R. A. 林德伯格等. 焊接及其它连接方法. 李致焕, 叶文忠译. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1983
- 44 张汉谦. 钢熔焊接头金属学. 北京: 机械工业出版社, 2000
- 45 郑远谋等. 铁-钢爆炸复合板的工艺、组织和性能. 理化检验 (物理分册), 1989, 25 (2): 10~15
- 46 郑远谋等. 爆炸焊接对金属力学性能的要求. 理化检验 (物理分册), 1998, 34 (7): 6~10
- 47 郑远谋. 爆炸焊接与金属复合材料. 复合材料学报, 1999, 16 (1): 1~8
- 48 中国机械工程学会焊接学会. 第八次全国焊接会议论文集 (1~3册). 北京: 机械工业出版社, 1997
- 49 中国机械工程学会焊接学会. 第九次全国焊接会议论文集 (1~2册). 哈尔滨: 黑龙江人民出版社, 1999
- 50 中国机械工程学会焊接学会. 第十次全国焊接会议论文集 (1~2册). 哈尔滨: 黑龙江人民出版社, 2001

内 容 提 要

特种焊接技术是指除常规焊接方法（如手工电弧焊、埋弧焊、气体保护焊等）之外的焊接技术。本书主要针对激光焊、电子束焊、等离子弧焊、真空扩散焊、惰性气体保护焊、冷压焊和热压焊、摩擦焊、超声波焊等一些特殊的焊接方法，突出了特种焊接方法的工艺特点和应用，并且给出了具体的焊接工艺参数、相关技术数据及针对一些典型工程结构产品的焊接应用实例，突出了焊接工艺的技术要点，可以指导特殊应用场合的焊接生产和新产品开发。本书内容选用了一些新工艺和成功的经验，书中的数据大多选自近几年的技术文献和资料，反映了当前特种焊接技术的应用现状。

本书主要供从事与焊接技术相关的工程技术人员、管理人员和操作人员使用，也可供高等院校、科研单位的有关教学和科研人员参考。