

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 ·

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/TH·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 $10^5 \sim 10^{13} \text{ W/cm}^2$ ，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，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	○
			氢原子焊	△
	气焊	氧-氢火焰		△
		氧-乙炔火焰		△
		空气-乙炔火焰		△
		氧-丙烷火焰		△
		空气-丙烷火焰		△
	铝热剂焊			△
	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		○

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:采用熔点比母材低的材料作钎料,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 10^5 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 10^5 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/ $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$	正常温度/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^{-3}	1.5×10^4	6000
	钨极氩弧(TIG)	10^{-3}	1.5×10^4	8000
	熔化极氩弧(MIG)	10^{-4}	$10^4\times 10^5$	8000~9000
高能密度束	等离子弧	10^{-5}	$(0.5\sim 1)\times 10^5$	18000~24000
	电子束	10^{-7}	$>10^6$	—
	激光束(0.1MPa)	10^{-8}	$>10^6$	—

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	—	超大规模集成元器件、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	动力装置封严、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 10^5 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 CO₂ 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 CO_2 激光焊接。此外，在食品罐身焊接、传感器焊接、电机定子焊接等领域，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。目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 高强钢筒形容器、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。

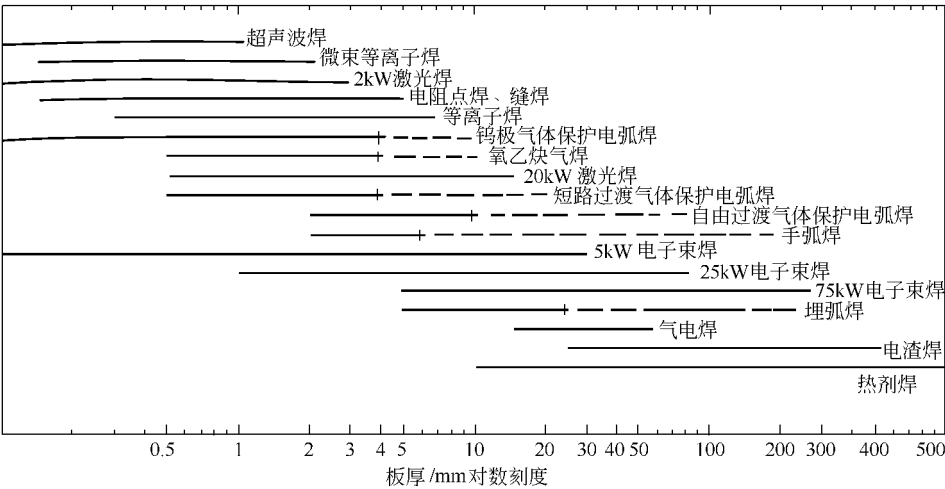


图 1.1 常用焊接方法推荐的适用工件厚度
(图中虚线表示采用多道焊)

(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。

(4) 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		△		△	△	△	△	△	△	△	△