

TEZHONG HANJIE JISHU
JI YINGYONG

The Fourth Edition

第四版

特种焊接技术及应用

李亚江 王娟 等编著



化学工业出版社

014056849

TG456
15-4



The Fourth Edition
第四版

特种焊接技术及应用

李亚江 王娟 等编著



化学工业出版社

· 北京 ·



北航

C1741979

TG 456

15-4

018820910

图书在版编目 (CIP) 数据

特种焊接技术及应用/李亚江, 王娟等编著. —4 版. —北京: 化学工业出版社, 2014. 8
ISBN 978-7-122-20961-0

I. ①特… II. ①李… ②王… III. ①焊接工艺
IV. ①TG44

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 129287 号

责任编辑: 周 红
责任校对: 吴 静

文字编辑: 陈 喆
装帧设计: 王晓宇

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装: 三河市延风印装厂
787mm×1092mm 1/16 印张 21½ 字数 574 千字 2014 年 9 月北京第 4 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 69.00 元

版权所有 违者必究

前 言

科学技术进步对焊接质量和接头性能提出新的、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。近年来,与高新技术密切相关的特种焊接技术的应用受到人们的高度重视。

特种焊接技术是指除常规焊接方法(如焊条电弧焊、埋弧焊、气体保护焊等)之外先进的焊接技术。20世纪中期,新的高能束热源(电子束、等离子弧、激光束等)相继问世,其功率密度达到 $10^5 \sim 10^{13} \text{ W/cm}^2$,采用新热源的特种焊接技术应运而生。高能束焊接与常规电弧焊相比具有明显的优点,可以焊接许多原先难焊的材料,在电子、能源、现代车辆、航空航天、核工业等部门中得到广泛的应用。固态连接(如扩散焊、搅拌摩擦焊等)是21世纪将有重大发展的连接技术,可用于常规焊接方法难以完成的许多新材料(如耐热合金、高技术陶瓷、金属间化合物、轻金属等)的连接。特种焊接技术的广泛应用产生了巨大的经济效益,符合优质、高效、低耗的发展方向,是值得大力推广的先进焊接技术。

《特种焊接技术及应用》一书针对激光焊、电子束焊、等离子弧焊、扩散焊、摩擦焊、冷压焊、热压焊、超声波焊和爆炸焊等,从实用性角度对特种焊接技术及应用作了简明的阐述,该书2004年出版后受到很多读者的关注;2008年和2011年的修订版也得到众多读者的欢迎。第四版的《特种焊接技术及应用》除了保持原书的新颖性、实用性和先进性等特色外,更新了内容(如激光复合焊等),使之能跟上技术进步的步伐,更适于实际应用。

本书内容反映了当前特种焊接技术的应用现状,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。

本书由李亚江、王娟等编著。参加本书编写的人员还有:张永喜、蒋庆磊、吴娜、刘鹏、夏春智、张蕾、马海军、沈孝芹、黄万群、胡效东、魏守征、陈茂爱、高进强、杜红燕、刘强、张永兰、刘坤、马群双等。

书中不足之处,敬请广大读者批评指正。

编著者

目 录

CONTENTS

Chapter 1	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 特种焊接技术现状及发展	4
	1.2 特种焊接方法的选择	10
	1.2.1 选择焊接方法应考虑的因素	10
	1.2.2 一些特种焊接方法的适用范围	12
	1.2.3 焊接技术的新发展	13
Chapter 2	第 2 章 激光焊	16
	2.1 激光焊的原理、分类及特点	16
	2.1.1 激光焊原理及分类	16
	2.1.2 激光焊的特点及应用	18
	2.2 激光焊设备及工艺	19
	2.2.1 激光焊设备	19
	2.2.2 激光焊接工艺及参数	21
	2.2.3 激光复合焊接技术	31
	2.2.4 激光焊的安全与防护	34
	2.3 激光切割	34
	2.3.1 激光切割的分类及特点	34
	2.3.2 激光切割设备	36
	2.3.3 激光切割工艺参数	37
	2.4 不同材料的激光焊	42
	2.4.1 钢的激光焊	42
	2.4.2 有色金属的激光焊	43
	2.4.3 高温合金的激光焊	45
	2.4.4 异种材料的激光焊	46
	2.5 激光焊的应用实例	46
	2.5.1 42CrMo 钢伞形齿轮轴的窄间隙激光焊	46
	2.5.2 冷轧钢与高强度镀锌钢车身的 CO ₂ 激光拼焊	48
	2.5.3 铝/钢异种金属的激光-MIG 复合热源焊接	50
	2.5.4 镁合金中厚板的 CO ₂ 激光深熔焊	51
	2.5.5 大厚度不锈钢的激光焊	52
	2.5.6 不锈钢超薄板的脉冲激光焊	54
	2.5.7 X52 管线钢的激光焊	55
	2.5.8 汽车发动机排气阀脉冲激光焊	57
	2.5.9 汽车高强钢板光纤激光焊	58
	2.5.10 汽车桥壳的激光切割	60

第3章 电子束焊	62
3.1 电子束焊的特点及分类	62
3.1.1 电子束焊的特点及小孔效应	62
3.1.2 电子束焊的分类	64
3.1.3 电子束焊的应用前景	65
3.2 电子束焊的设备与装置	66
3.2.1 电子束焊机的分类	66
3.2.2 电子束焊机的组成	67
3.3 电子束焊接工艺	68
3.3.1 电子束焊接工艺特点	68
3.3.2 焊前准备及接头设计	70
3.3.3 电子束焊的工艺参数	72
3.3.4 电子束焊接操作与安全防护	73
3.4 不同材料的电子束焊	76
3.4.1 常规金属材料的电子束焊	76
3.4.2 异种材料的电子束焊	79
3.4.3 其他难焊材料的电子束焊	84
3.4.4 电子束焊的应用领域示例	89
3.5 电子束焊的应用实例	91
3.5.1 斯太尔汽车后桥壳体的真空电子束焊	91
3.5.2 发动机部件(钛合金/铌合金)的电子束焊接	92
3.5.3 薄壁空心铝球的电子束焊接	95
3.5.4 大厚度钛合金的电子束焊	98
3.5.5 汽车减振器的电子束焊	99
3.5.6 不锈钢薄板的电子束焊	100
3.5.7 铝合金薄板零件电子束焊	102
3.5.8 $\text{SiC}_p/101\text{Al}$ 铝基复合材料电子束焊	104

第4章 等离子弧焊接与切割	107
4.1 等离子弧的类型及特点	107
4.1.1 等离子弧的基本类型	107
4.1.2 等离子弧的静特性及对电源外特性的要求	108
4.1.3 等离子弧的应用特点	109
4.2 等离子弧焊的分类及设备	110
4.2.1 等离子弧焊的分类	110
4.2.2 等离子弧焊设备的组成	111
4.3 等离子弧焊工艺	115
4.3.1 等离子弧焊的工艺参数	115
4.3.2 强流(大电流)等离子弧焊工艺	116

4.3.3	微束等离子弧焊工艺	118
4.3.4	脉冲等离子弧焊工艺特点	121
4.4	材料的等离子弧焊接	122
4.4.1	高温合金的等离子弧焊接	122
4.4.2	铝及铝合金的等离子弧焊接	123
4.4.3	钛及钛合金的等离子弧焊接	124
4.5	等离子弧堆焊与切割	125
4.5.1	熔化极等离子弧堆焊	126
4.5.2	粉末等离子弧堆焊	127
4.5.3	等离子弧切割方法及设备	127
4.5.4	等离子弧切割工艺	130
4.6	等离子弧焊接的应用实例	136
4.6.1	超薄壁管子的微束等离子弧焊工艺	136
4.6.2	保温瓶不锈钢外壳纵缝的等离子弧焊接	138
4.6.3	焊接波纹管的微束等离子弧焊工艺	139
4.6.4	钛合金管的等离子弧焊接工艺	142
4.6.5	GH132 高温合金等离子弧焊接工艺	144
4.6.6	飞机发动机滤油网组件的微束等离子弧焊	145
4.6.7	内燃机车柴油机气门等离子弧喷焊	148
4.6.8	镁合金变极性等离子弧焊	149
4.6.9	化工容器钛板衬里的等离子弧焊	152
4.6.10	7A52 铝合金水蒸气等离子弧焊	154

Chapter 5	第 5 章 扩散焊	156
5.1	扩散焊的特点、分类和扩散机制	156
5.1.1	扩散焊的特点及分类	156
5.1.2	扩散焊原理及扩散机制	158
5.2	扩散焊的设备及工艺	161
5.2.1	扩散焊设备	161
5.2.2	扩散焊工艺及主要参数	162
5.2.3	扩散焊接头的质量检验	165
5.3	材料的扩散焊 (连接)	166
5.3.1	同种材料的扩散焊	166
5.3.2	异种材料的扩散焊	170
5.3.3	金属间化合物的扩散焊	177
5.3.4	复合材料的扩散焊	180
5.3.5	陶瓷与金属的扩散焊	187
5.4	扩散焊的应用实例	194
5.4.1	TC4 钛合金与 304L 不锈钢网的扩散焊	194

5.4.2	工业纯钛 (TA3) 多层板及 TA3/TC4 扩散焊	195
5.4.3	Al_2O_3 陶瓷与工业纯钛 TA1 的真空扩散焊	197
5.4.4	亚微米级 (Al_2O_3) _p /6061 铝基复合材料的扩散焊	199
5.4.5	镁合金与钛合金的瞬时液相扩散焊	201
5.4.6	航空发动机叶片的扩散焊	203
5.4.7	冷作模具钢与弹簧钢的扩散焊	204
5.4.8	石油钻杆的瞬时液相扩散焊	206
5.4.9	TP304 不锈钢管的瞬时液相扩散焊	207

Chapter 6	第 6 章 摩擦焊	209
6.1	摩擦焊的原理、分类及特点	209
6.1.1	摩擦焊的原理及特点	209
6.1.2	摩擦焊的分类	210
6.1.3	摩擦焊的应用范围	212
6.2	摩擦焊设备及工艺	215
6.2.1	摩擦焊设备组成	215
6.2.2	摩擦焊的工艺及参数	216
6.2.3	摩擦焊接头质量控制	223
6.3	搅拌摩擦焊	224
6.3.1	搅拌摩擦焊的特点及热输入	224
6.3.2	搅拌摩擦焊设备及工艺	228
6.3.3	搅拌摩擦焊接头的组织与性能	236
6.3.4	搅拌摩擦焊缺陷与摩擦塞焊修复	239
6.4	摩擦焊的应用实例	241
6.4.1	45 钢/W8Co3N 高速钢刀具的摩擦焊	241
6.4.2	钻杆的摩擦焊	242
6.4.3	船舶铝合金构件的搅拌摩擦焊	243
6.4.4	AZ31B/AZ61A 异种镁合金的搅拌摩擦焊	244
6.4.5	大厚度机翼框架铝合金搅拌摩擦焊	246
6.4.6	搅拌摩擦焊在核工业中的应用	249
6.4.7	FSW 在地铁、高速列车铝合金车体上的应用	251
6.4.8	铝合金薄板搭接接头搅拌摩擦焊	253
6.4.9	钨铜合金与铜的摩擦焊	254

Chapter 7	第 7 章 冷压焊和热压焊	256
7.1	冷压焊的特点及工艺	256
7.1.1	冷压焊的特点	256
7.1.2	冷压焊的分类	257
7.1.3	冷压焊工艺及影响因素	258
7.1.4	冷压焊模具	261
7.2	冷压焊的应用	265
7.2.1	异种材料的冷压焊	266

7.2.2	铝线和铜线的对接冷压焊	269
7.2.3	中同轴电缆的冷压焊	271
7.2.4	高真空金属壳与壳座的冷压焊	273
7.3	热压焊的特点及工艺	273
7.3.1	热压焊的特点	273
7.3.2	气压焊	274
7.3.3	锻焊和滚焊	277
7.3.4	热压焊的焊后热处理	278
7.4	热压焊的应用及质量检验	278
7.4.1	钢轨的热压焊	278
7.4.2	钢筋的热压焊	280
7.4.3	钢筋气压焊在小浪底工程中的应用	282
7.4.4	热压焊接头的检验	283

Chapter 8

第 8 章	超声波焊	286
8.1	超声波焊原理、分类及特点	286
8.1.1	超声波焊的原理	286
8.1.2	超声波焊的分类	287
8.1.3	超声波焊的特点及应用范围	288
8.2	超声波焊接设备及工艺	291
8.2.1	超声波焊接设备的组成	291
8.2.2	接头设计与表面准备	293
8.2.3	超声波焊的工艺参数	294
8.3	超声波焊的应用实例	298
8.3.1	离心叶轮的低温超声波焊	298
8.3.2	聚乙烯医疗器具的超声波焊	298
8.3.3	太阳能集热器吸热板的超声波焊	300
8.3.4	铝热交换器的超声波钎焊	301
8.3.5	铝基复合材料的超声波钎焊	302
8.3.6	镁合金超声波钎焊	304

Chapter 9

第 9 章	爆炸焊	306
9.1	爆炸焊的分类、特点及应用	306
9.1.1	爆炸焊的分类及特点	306
9.1.2	爆炸焊的原理	307
9.1.3	爆炸焊的应用范围	309
9.2	爆炸焊工艺及安全防护	311
9.2.1	爆炸焊接头形式与焊前准备	311
9.2.2	爆炸焊的工艺参数	314
9.2.3	爆炸焊的质量检验	317
9.2.4	爆炸焊安全与防护	320
9.3	爆炸焊的应用实例	320

883	9.3.1	不锈钢管与铝(或锆)合金管的爆炸焊	320
153	9.3.2	大面积双相不锈钢复合板的爆炸焊	322
172	9.3.3	钢轨连接线的爆炸焊	324
272	9.3.4	Cu/Al 复合 CPU 散热片的爆炸焊	326
472	9.3.5	钢管的水下爆炸焊技术	327
483	9.3.6	铌/不锈钢复合棒的爆炸焊	328
572	9.3.7	工具钢/Q235 复合板的爆炸焊接	329
672	9.3.8	铜管的外包爆炸焊接	329
973	9.3.9	铜/钛复合板的爆炸焊技术	330

683	参考文献	332
-----	------------	-----

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(同种或异种材料)产生原子或分子间结合而成为一体的连接方法。特种焊接技术是指除了焊条电弧焊、埋弧焊、气体保护焊等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。特种焊接技术对于一些特殊材料及结构的连接具有重要的作用,在航空航天、电子、计算机、核动力等高新技术领域得到广泛应用,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

半个多世纪以来,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,焊接技术取得令世人瞩目的进展,成为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、半自动化和自动化的独立加工领域。

科学技术的发展和焊接技术进步,使新的焊接方法不断产生。特别是 20 世纪 50 年代以后,焊接方法得到更快的发展。1956 年出现了以超声波和电子束作为热源的超声波焊和电子束焊;1957 年出现了等离子弧焊和扩散焊;1965 年和 1970 年出现了以激光束为热源的脉冲激光焊和连续激光焊;20 世纪末出现了搅拌摩擦焊和微波焊。

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、电阻热、超声波、摩擦、等离子弧、电子束、激光、微波等。从 19 世纪末出现碳弧到 20 世纪末出现微波焊的发展来看,历史上每一种热源的出现,都伴随着新的焊接方法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。

国内外文献有多种焊接方法的分类法,各有差异。传统意义上通常是将焊接方法划分为三大类,即熔焊(fusion welding)、压焊(pressure welding)和钎焊(brazing and soldering);根据不同的加热方式、工艺特点等将每一大类方法再细分为若干小类,如表 1.1 所示。

常用焊接热源的功率密度区和功率密度集中程度示意图如图 1.1 所示。不同焊接方法的温度、压力及过程持续时间的对比如图 1.2 所示。

随着热源功率密度的不同,焊接热源的功率密度可分为如下四个区域。

① 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略而不计的熔化,这种热源难以实施对金属的焊接。

② 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。

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，然后冷却结晶成为 一体的方法称为熔焊	电弧焊	熔化极电弧焊	焊条电弧焊	△
			埋弧焊	○
			熔化极氩弧焊 (MIG)	○
			CO ₂ 气体保护焊	○
		非熔化极电弧焊	螺柱焊	△
			钨极氩弧焊 (TIG)	○
			等离子弧焊	○
	气焊	氧-氢火焰	氢原子焊	△
				△
				△
				△
				△
	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		○
压焊： 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 膜及其他杂物，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			△

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
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	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。

③ 高功率密度区,功率密度范围为 $10^5 \sim 10^9 \text{ W/cm}^2$ 。处于此范围的焊接方法主要是电子束焊和激光焊,这时以蒸发为主,强烈的蒸发会在熔池中产生小孔。

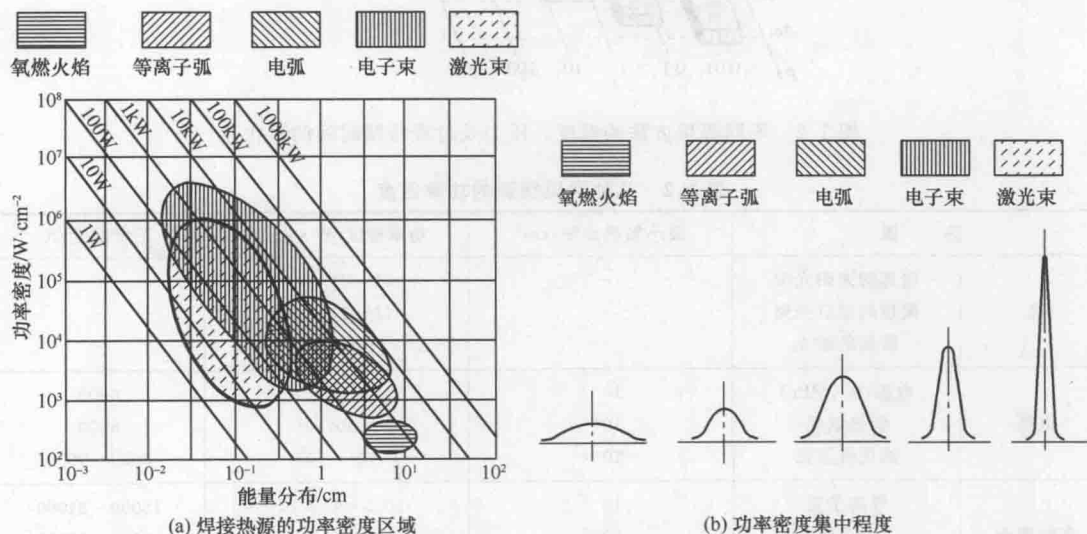


图 1.1 常用焊接热源的功率密度区和功率密度集中程度示意图

④ 超高功率密度区,功率密度大于 10^9 W/cm^2 。这时的蒸发更厉害,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中心,支持开展高能束流加工技术的研究和应用。我国在这一领域的研究和应用也取得了高速发展。

高能束流由单一的光子、电子和离子或两种以上的粒子组合而成,目前用在焊接领域的高能束流主要是激光束、电子束和等离子弧。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。

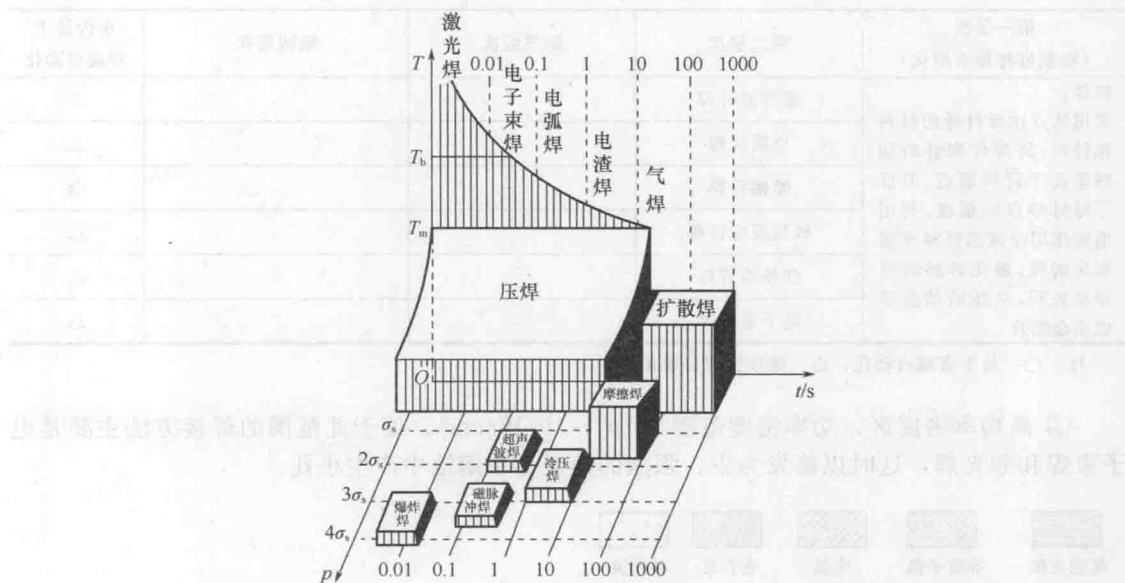


图 1.2 不同焊接方法的温度、压力及过程持续时间的对比

表 1.2 几种常见热源的功率密度

热 源		最小加热面积/cm ²	功率密度/W · cm ⁻²	正常温度/K
光	聚焦的太阳光束	—	$(1\sim2)\times10^3$	—
	聚焦的氙灯光束	—	$(1\sim5)\times10^3$	—
	聚焦的激光	—	$10^7\sim10^9$	—
电弧	电弧(0.1MPa)	10^{-3}	1.5×10^4	6000
	钨极氩弧	10^{-3}	1.5×10^4	8000
	熔化极氩弧	10^{-4}	$10^4\sim10^5$	8000~9000
高能束流	等离子弧	10^{-5}	$(0.5\sim1)\times10^5$	18000~24000
	电子束	10^{-7}	$>10^6$	19000~25000
	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等。

1.1.2 特种焊接技术现状及发展

在各种焊接方法中，近年来特种焊接技术所占的比例也在发生着变化，其应用范围正在扩大。在熔焊方法中，气焊的比例减小明显，电弧焊仍然是主角，而高能束流焊接技术（如电子束、激光束、等离子弧等）的比重在不断增大。电阻焊技术由于多以搭接的接头形式应用，缩小了应用范围。固态焊（如扩散焊、超塑成形/扩散连接、摩擦焊等）则以其独具的优势在高科技产品迅猛发展的年代显现出生机。

(1) 高能束流焊接现状

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更多

国内外相关人士（如物理、材料、机械、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，但在工艺研究水平上较为接近，在某些方面有自己的特色。

高能束流焊接技术的最大特点是焊接时产生“小孔效应”（如图 1.3 所示），焊接熔深比热传导焊接方法显著提高。高能束流加工技术在高新技术及国防科技的发展中起着无可替代的作用。表 1.3 所示是高能束流加工技术的特点及其应用领域。

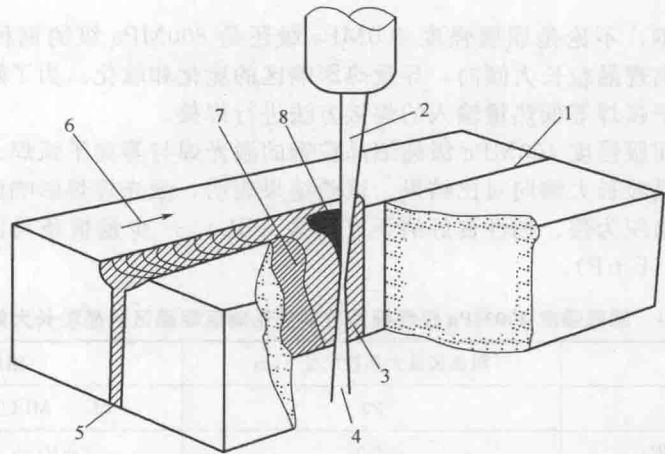


图 1.3 高能束流焊接过程的“小孔效应”特征

1—紧密对接线；2—高能束流；3—熔融金属；4—穿过小孔的能量；5—全熔透的焊缝；
6—焊接方向；7—凝固的焊缝；8—液态金属

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、精密陀螺、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、快速冷却	新型材料制备、特殊及异种材料连接	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

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，与常规电弧焊方法相比有明显的优点。高能束流焊接时基本不需要开坡口和填丝、焊缝熔深大于熔宽、焊接速度快、热影响区小、焊缝组织细化、焊接变形小。

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的材料，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。随着高能束流加工技术的不断

推广应用，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，提高熔深和焊接过程的稳定性，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 给出了屈服强度 400MPa 级超细晶粒钢的激光焊与等离子弧焊、混合气体保护焊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
激光焊 (LW)	20	BL + ML(少量) + (F+P)
等离子弧焊 (PAW)	250	(F+P) + B (少量) + W
混合气体保护焊 (MAG)	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。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，同时降低结构重量。高速列车铝合金车厢、管线钢等也应用了激光焊技术。

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 焊熔化母材使激光吸收率显著增加，因而很快形成稳定的熔深和焊缝。MIG 焊形成的熔池较宽，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控制方便。把激光 + 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。

尽管激光焊研发的历史不长，但在船舶、汽车制造等工业领域，激光加工已占有一席之地，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了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，而且大大减轻了飞机的结构重量。

在航空航天领域中常用的材料 (如铝合金、钛合金、高温合金和不锈钢等) 的激光焊研究取得了良好的进展，特别是 10kW 以上的大功率激光器出现之后，激光焊更具有了与电子束焊竞争的能力。在 15mm 以下厚度板的焊接应用中，由于激光焊兼有电子束焊的穿透力而又无需真空室，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。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应用广泛,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。目前工业中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,其功率密度一般为 15~45kW,加速电压 150kV 左右。在美国,非真空电子束焊接应用十分广泛,部分取代了埋弧焊,用于汽车、舰船制造等,获得了良好的经济效益。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),又可焊接常规部件(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,也可焊接大厚度的压力容器。

电子束焊可以焊接普通的结构钢,也可以焊接特殊金属材料(如超高强钢、钛合金、高温合金及其他稀有金属)以及用于异种金属之间的焊接。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、涡轮盘修复中也用到电子束焊接。

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致力的目标。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应用,例如用于对焊缝质量和焊接变形要求很高的压力容器、运载火箭、导弹等。

我国的等离子弧焊接技术研究始于 20 世纪 60 年代,并在航空航天工业中得到成功应用。例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。