

李亚江 王娟 夏春智 编著

特种焊接 技术及应用

第二版

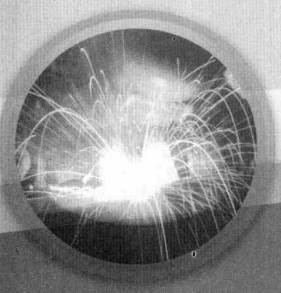


化学工业出版社

TG456/1

2008

李亚江 王娟 夏



特种焊接 技术及应用

第二版



化学工业出版社

·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, 夏春智编著.
—2 版. —北京: 化学工业出版社, 2008. 5
ISBN 978-7-122-02663-7

I. 特… II. ①李…②王…③夏… III. 焊接-技术
IV. TG456

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 056916 号

责任编辑: 周 红
责任校对: 陈 静

文字编辑: 陈 喆
装帧设计: 刘丽华

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: 化学工业出版社印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张 18 $\frac{3}{4}$ 字数 467 千字 2008 年 7 月北京第 2 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: 45.00 元

版权所有 违者必究

前 言

随着科学技术的进步,新产品、新结构不断涌现,对焊接质量和接头性能提出了新的更高的要求。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及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)之外的焊接技术。20世纪中期,新的高能密束热源(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。高能密束焊接与常规电弧焊相比具有明显的优点,可以焊接许多原先非常难焊的材料,在电子、能源、汽车、航空航天、核工业等部门中得到广泛的应用。

电子束焊可一次焊透厚度200mm的板材,焊缝的深宽比可达20~60。激光束具有可以在大气中焊接的优点,聚焦后的光斑只有0.2~2mm,既可以深熔焊,又可以完成精密连接,焊接过程热量输入小、变形小、接头质量好。固态连接是21世纪将有重大发展的连接技术,可用于采用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、金属间化合物等)的连接。金属与陶瓷能够采用扩散焊实现连接;搅拌摩擦焊已经在发动机转子部件上得到应用。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、摩擦焊和超声波焊等,从实用性角度对常用的特种焊接方法及应用作了简明的阐述,该书2004年出版后得到众多读者的欢迎。第二版的《特种焊接技术及应用》除了保持第一版的新颖性、实用性和先进性等特色外,更新了部分内容并补充了新的应用实例,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。

其他写作人员还有:张永喜、刘鹏、马海军、沈孝芹、黄万群、蒋庆磊等。

书中不当之处,敬请广大读者批评指正。

编者

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 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 选择特种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	12
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	20
2.2.1 激光焊设备	20
2.2.2 激光焊接工艺及参数	21
2.2.3 激光复合焊接技术	30
2.2.4 激光焊的安全与防护	33
2.3 激光切割	33
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	36
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	45
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	49
2.5.4 汽车桥壳的激光切割	50
第 3 章 电子束焊	52
3.1 电子束焊的特点及分类	52
3.1.1 电子束焊的特点	52
3.1.2 电子束焊的分类	53
3.1.3 电子束焊的应用范围	55
3.2 电子束焊的设备与装置	57
3.2.1 电子束焊机的分类	57
3.2.2 电子束焊机的组成	57
3.3 电子束焊的焊接工艺	59
3.3.1 电子束焊接的工艺特点	59
3.3.2 焊前准备及接头设计	60
3.3.3 电子束焊的工艺参数	63
3.3.4 获得深熔焊的工艺方法	64
3.3.5 电子束焊的操作与安全防护	66
3.4 不同材料的电子束焊	67
3.4.1 钢铁材料的电子束焊	67
3.4.2 有色金属的电子束焊	68
3.4.3 异种材料的电子束焊	70
3.4.4 高温合金的电子束焊	75
3.4.5 其他难焊材料的电子束焊	77
3.5 电子束焊的应用实例	80
3.5.1 在电子和仪表工业中的应用	80
3.5.2 在汽车零部件生产中的应用	82
3.5.3 发动机部件(钛合金与钕合金)的电子束焊接	84
3.5.4 空心铝球的电子束焊接	86
第 4 章 等离子弧焊接与切割	90
4.1 等离子弧的类型及应用特点	90
4.1.1 等离子弧的基本类型	90
4.1.2 等离子弧的静特性及对电源外特性的要求	91

4.1.3 等离子弧的应用特点	92	4.5.2 粉末等离子弧堆焊	111
4.2 等离子弧焊的分类及设备组成	94	4.5.3 等离子弧切割方法及设备	112
4.2.1 等离子弧焊的分类	94	4.5.4 等离子弧切割工艺	114
4.2.2 等离子弧焊设备的组成	95	4.6 等离子弧焊接的应用实例	121
4.3 等离子弧焊工艺	99	4.6.1 超薄壁管子的微束等离子弧焊 工艺	121
4.3.1 等离子弧焊的工艺参数	99	4.6.2 保温瓶不锈钢外壳纵缝的等离子 弧焊接	122
4.3.2 强流(大电流)等离子弧焊工艺 ..	100	4.6.3 焊接波纹管的微束等离子弧焊 工艺	123
4.3.3 微束等离子弧焊工艺	102	4.6.4 钛合金管的等离子弧焊接工艺 ..	126
4.3.4 脉冲等离子弧焊工艺特点	105	4.6.5 GH132 高温合金等离子弧焊接 工艺	128
4.4 材料的等离子弧焊接	106	4.6.6 飞机发动机滤油网组件的微束 等离子弧焊	129
4.4.1 高温合金的等离子弧焊接	106		
4.4.2 铝及铝合金的等离子弧焊接	107		
4.4.3 钛及钛合金的等离子弧焊接	108		
4.4.4 银与铂的微束等离子弧焊接	109		
4.5 等离子弧堆焊与切割	109		
4.5.1 熔化极等离子弧堆焊	110		
第5章 真空扩散焊	133		
5.1 扩散焊的特点及分类	133	5.3.5 陶瓷与金属的扩散焊接	163
5.1.1 扩散焊的特点	133	5.4 异种材料扩散焊应用实例	171
5.1.2 扩散焊的分类	134	5.4.1 TC4 钛合金与 304L 不锈钢网的 扩散焊	171
5.1.3 扩散焊原理及扩散机制	136	5.4.2 工业纯钛(TA3)多层板及 TA3/ TC4 扩散焊	173
5.2 扩散焊的设备及工艺	138	5.4.3 Al ₂ O ₃ 陶瓷与工业纯钛 TA1 的真空 扩散焊	175
5.2.1 扩散焊设备	138	5.4.4 亚微米级 (Al ₂ O ₃) _p /6061 铝基 复合材料的扩散焊	176
5.2.2 扩散焊工艺及主要参数	139	5.4.5 镁合金与钛合金的瞬间液相 扩散焊	179
5.2.3 扩散焊接头的质量检验	143		
5.3 材料扩散焊的应用	143		
5.3.1 同种材料的扩散焊	144		
5.3.2 异种材料的扩散焊	147		
5.3.3 金属间化合物的扩散焊	154		
5.3.4 复合材料的扩散焊	158		
第6章 冷压焊和热压焊	181		
6.1 冷压焊的特点及工艺	181	6.3.1 热压焊的分类和特点	196
6.1.1 冷压焊的特点	181	6.3.2 气压焊	197
6.1.2 冷压焊的分类	182	6.3.3 锻焊和滚焊	199
6.1.3 冷压焊工艺及影响因素	183	6.3.4 热压焊的焊后热处理	200
6.1.4 冷压焊模具	186	6.4 热压焊的应用及质量检验	201
6.2 冷压焊的应用	190	6.4.1 钢轨的热压焊	201
6.2.1 异种材料的冷压焊	190	6.4.2 钢筋的热压焊	203
6.2.2 铝线和铜线的对接冷压焊	193	6.4.3 钢筋气压焊在小浪底工程中的 应用	205
6.2.3 高真空金属壳与壳座的冷压焊 ..	195	6.4.4 热压焊接头的检验	207
6.3 热压焊的工艺特点	196		
第7章 摩擦焊	209		
7.1 摩擦焊的原理、分类及特点	209	7.1.1 摩擦焊的原理及特点	209

7.1.2 摩擦焊的分类	210	7.3.2 搅拌摩擦焊设备及工艺	231
7.1.3 摩擦焊的应用范围	214	7.4 摩擦焊的应用实例	233
7.2 摩擦焊设备及工艺	216	7.4.1 45 钢/W8Co3N 高速钢刀具的 摩擦焊	233
7.2.1 摩擦焊设备组成	216	7.4.2 钨铜合金与铜的摩擦焊	234
7.2.2 摩擦焊的工艺及参数	219	7.4.3 钻杆的摩擦焊	235
7.2.3 摩擦焊接头焊接质量控制	227	7.4.4 船舶铝合金构件的搅拌摩擦焊 ...	236
7.3 搅拌摩擦焊	230		
7.3.1 搅拌摩擦焊的特点	230		
第 8 章 超声波焊	238		
8.1 超声波焊原理、分类及特点	238	8.2.3 超声波焊的工艺参数	247
8.1.1 超声波焊的原理	238	8.3 超声波焊的应用实例	250
8.1.2 超声波焊的分类	239	8.3.1 离心叶轮的低温超声波焊	250
8.1.3 超声波焊的特点及应用范围	241	8.3.2 聚乙烯医疗器具的超声波焊	251
8.2 超声波焊接设备及工艺	244	8.3.3 太阳能集热器吸热板的 超声波焊	252
8.2.1 超声波焊接设备的组成	244		
8.2.2 接头设计与表面准备	246		
第 9 章 热剂焊	254		
9.1 热剂焊的原理及特点	254	9.2.4 热剂焊安全	259
9.1.1 热剂焊的原理	254	9.3 热剂焊的应用实例	259
9.1.2 热剂焊的特点	255	9.3.1 钢轨的热剂焊	259
9.2 热剂焊材料及工艺	256	9.3.2 钢轨连接线的热剂焊	266
9.2.1 铝热焊剂	256	9.3.3 轧辊的热剂焊	266
9.2.2 铸型和坩埚	257	9.3.4 电气工程中的热剂焊	266
9.2.3 热剂焊工艺要点	258	9.3.5 热剂焊的修复补焊	268
第 10 章 爆炸焊	271		
10.1 爆炸焊的分类、特点及应用	271	10.2.4 爆炸焊安全与防护	284
10.1.1 爆炸焊的分类及特点	271	10.3 爆炸焊的应用实例	285
10.1.2 爆炸焊的原理	272	10.3.1 不锈钢管与铝或铝合金管的 爆炸焊	285
10.1.3 爆炸焊的应用范围	274	10.3.2 铌/不锈钢复合棒的爆炸焊	286
10.2 爆炸焊工艺及安全防护	276	10.3.3 工具钢/Q235 复合板的 爆炸焊	287
10.2.1 接头形式与焊前准备	276	10.3.4 铜管的外包爆炸焊	288
10.2.2 爆炸焊的工艺参数	279		
10.2.3 爆炸焊的质量检验	282		
参考文献	289		

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、半自动化和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。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,即熔化焊(fusion welding)、压焊(pressure welding)和钎焊(brazing and soldering);然后,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。

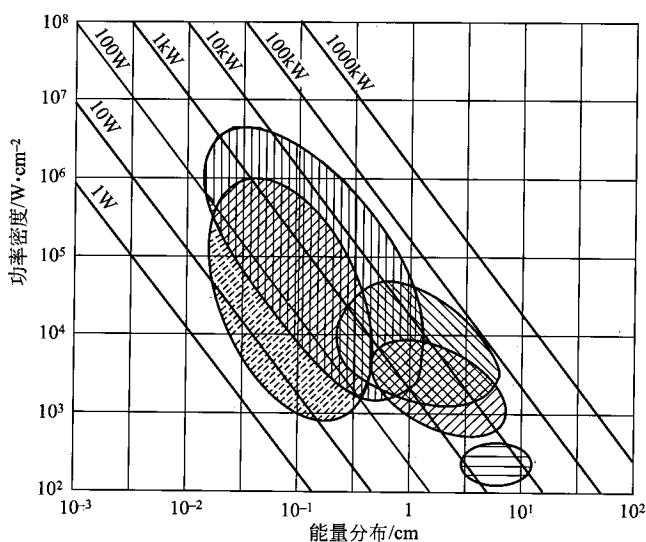
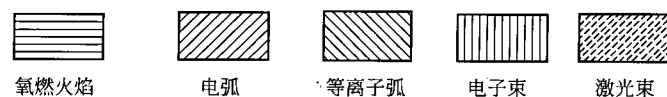
① 低功率密度区,功率密度约小于 $3 \times 10^2 \text{ W/cm}^2$ 。这时,热传导散失大量的热,被加热材料只有轻微的可以略而不计的熔化,这种热源难以实施对金属的焊接。

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。

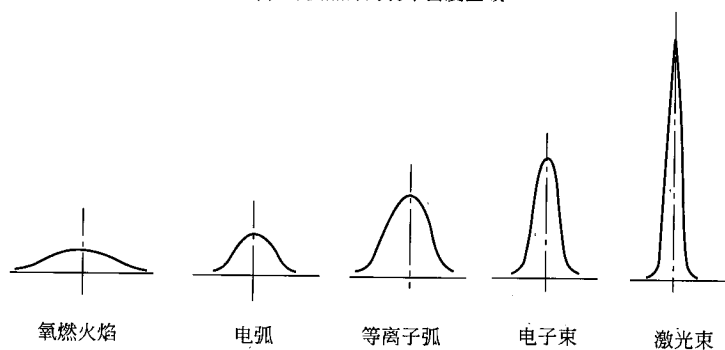
表 1.1 焊接方法的分类

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化焊	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	○
			螺柱焊	△
		非熔化极电弧焊	钨极氩弧焊(TIG)	○
			等离子弧焊	○
	气焊		氢原子焊	△
			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		○
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			△
	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:○表示易于实现自动化,△表示难以实现自动化。



(a) 焊接热源的功率密度区域



(b) 功率密度集中程度

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

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	—	$(1\sim2)\times 10^3$	—
	聚焦的氙灯光束	—	$(1\sim5)\times 10^3$	—
	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	10^{-3}	1.5×10^4	8000
	熔化极氩弧	10^{-4}	$10^4\sim 10^5$	8000~9000
高能束流	等离子弧	10^{-5}	$(0.5\sim1)\times 10^5$	18000~24000
	电子束	10^{-7}	$>10^6$	—
	激光束(0.1MPa)	10^{-8}	$>10^6$	—

③ 高功率密度区, 功率密度范围为 $10^5\sim 10^9$ W/cm²。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, 强烈的蒸发会在熔池中产生小孔。

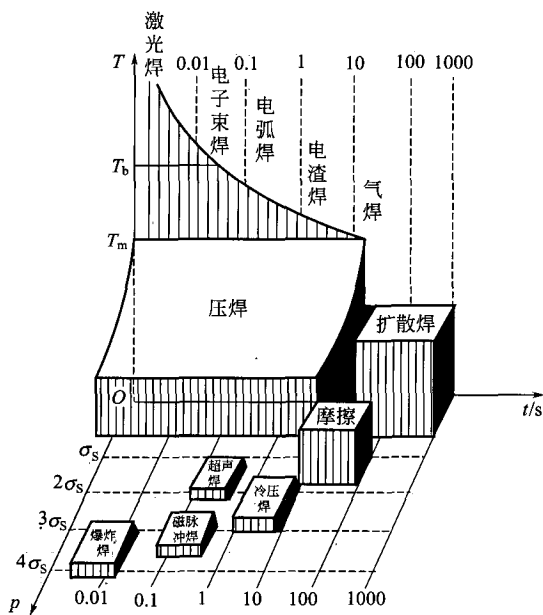


图 1.2 不同焊接方法的温度、压力及过程持续时间的对比

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开发中心，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。

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）则以其独特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、焊接、计算机等）的关注。国内在高能束流设备水平上与国外相比有一定差距，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。表 1.3 所示是高能束流加工技术的特点及其应用领域。

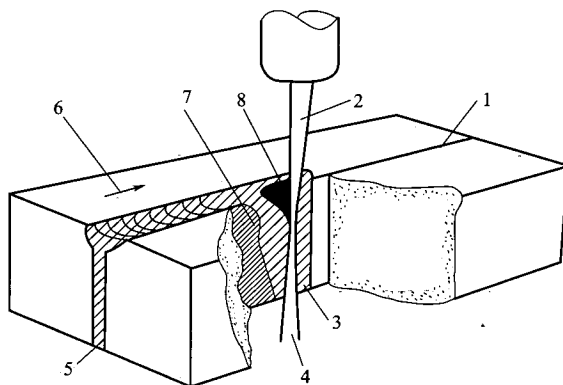


图 1.3 高能束流焊接过程的“小孔效应”特征

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	—	超大规模集成电路、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、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。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,可以相对降低焊接成本,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 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 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,同时降低结构重量。火车铝合金车厢、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 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。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的进展,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,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。目前在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)。可用于焊接极薄的铝片,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。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、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、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。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。

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。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的小孔行为被认为是影响焊缝成形及焊接质量稳定性的关键因素。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板的大电流穿孔等离子弧焊接技术在我国已得到广泛应用。

(2) 束流的复合

新产品、新构件和新器件对连接技术提出了新的要求,应促进连接技术的不断改进与特种连接技术的创新,以适应发展的要求。近年来,国内外关于束流复合焊接新工艺、新技术的研究报道,不断推动束流复合焊接技术的发展。其中最主要的是采用激光-电弧复合能源的高效焊接技术。

高能束流焊接的优势很明显,但目前高能束流焊接的成本仍较高。因此以激光为核心的复合技术受到人们的关注。事实上,激光-电弧复合在 20 世纪 70 年代就已提出,然而稳定的加工应用直至近几年才出现,这主要得益于激光技术以及弧焊设备的发展,尤其是激光功率和电弧控制技术的提高。

束流复合加工时,激光产生的等离子体有利于电弧的稳定;复合加工可提高加工效率,提高焊接性差的材料(如铝合金、双相钢等)的焊接性;可增加焊接的稳定性和可靠性;通常,激光加丝焊对参数变化是很敏感的,通过与电弧的复合,则变得容易而可靠。

激光-电弧复合主要是激光与钨极氩弧、等离子弧以及活性电弧的复合。通过激光与电弧的相互影响,可克服每一种焊接方法自身的不足,进而产生良好的复合效应。

熔化极活性电弧成本低,使用填丝,适用性强;缺点是熔深浅、焊接速率低、工件承受热载荷大。激光焊则可形成深而窄的焊缝,焊接速率快、热输入低,但设备成本高,对工件制备精度要求高,对铝等材料的适应性差。激光-活性电弧(Laser-GMA)的复合效应表现在:电弧增加了对间隙的桥接性,其原因一是填充焊丝,二是电弧加热范围较宽;但复合电弧的功率决定了焊缝顶部宽度;激光产生的等离子体减小了电弧引燃和维持的阻力,使电弧更稳定;激光功率决定了焊缝的深度。也就是说,复合电弧导致了焊接效率增加以及焊接适应性的增强。

激光-电弧复合对焊接效率的提高十分显著,这主要基于两种效应:一是较高的能量密度导致了较高的焊接速度,工件热流损失减小;二是两热源相互作用的叠加效应。焊接时,激光等离子体使电弧更稳定;同时,电弧也进入熔池小孔,减小了能量的损失。

激光-钨极氩弧的复合可显著增加焊接速率,约为钨极氩弧焊(TIG)时的 2 倍。钨极烧损也大大减小,钨极寿命增加;坡口夹角也可显著减小,焊缝截面积与激光焊时相近。而且,与激光单弧复合焊相比,激光双弧复合焊接的焊接热量输入可减小 25%,而焊接速度可增加约 30%。

激光-电弧(或等离子弧)复合焊接的优点主要是提高了焊接速度和熔深。由于电弧加热,金属温度升高,降低了金属对激光的反射率,增加了对光能的吸收。这种方法在小功率 CO₂ 激光试验基础上,还在 12kW 的 CO₂ 激光以及光纤传输的 2kW 的 YAG 激光器上进行试验,并为机器人进行激光-电弧(或等离子弧)复合焊接打下了基础。

此外,激光焊接复合技术还有激光-高频焊、激光-压焊等。激光-高频焊是在高频焊管的同时,采用激光对熔焊处叠加热量,使得待焊件在整个焊缝厚度上的加热更均匀,有利于提高

焊管的接头质量和生产率。激光-压焊是将聚焦的激光束照射到被连接工件的接合面上,利用材料表面对垂直偏振光的高反射将激光导向焊接区。由于接头特定的几何形状,激光能量在焊接区被完全吸收,使工件表层的金属加热或熔化,然后在压力作用下实现材料的连接。这样不仅焊缝强度提高,焊接速度也得到大幅度提高。

近年来,通过激光-电弧复合而诞生的复合焊接技术获得了长足的发展,在航空、军工等部门复杂构件上的应用日益受到重视。目前,高能束流与不同电弧的复合焊接技术已成为高能束流焊接领域发展的热点之一。

(3) 固相焊接技术现状

新材料的出现对连接技术提出了新的课题,成为其发展的重要推动力。许多新材料,如耐热合金、钛合金、陶瓷、金属基/陶瓷基/树脂基/碳-碳复合材料等的连接,特别是异种材料之间的连接,采用通常的焊接方法无法完成,扩散焊、摩擦焊、超塑性成形扩散连接、液相扩散焊等方法应运而生,解决了许多过去无法解决的材料连接问题。

固相连接(solid phase welding)是21世纪将有重大发展的连接技术。许多新材料(如高技术陶瓷、金属间化合物、复合材料等)之间固相连接的优越性日益显现,真空扩散焊和搅拌摩擦焊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。陶瓷与金属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。搅拌摩擦焊等新技术的应用解决了某些用熔焊方法不易焊接的材料连接问题。

固相连接可分为两大类。一类是温度低、压力大、时间短的连接方法,通过塑性变形促使工件表面紧密接触和氧化膜破裂,塑性变形是形成连接接头的主导因素。属于这类的连接方法有摩擦焊、爆炸焊、冷压焊和热压焊等,通常把这类连接方法称为压焊。另一类是温度高、压力小、时间相对较长的扩散连接方法,一般是在保护气氛或真空中进行。这种连接方法仅产生微量的塑性变形,界面扩散是形成接头的主导因素。属于这一类的连接方法主要是扩散连接,如真空扩散焊、瞬间液相扩散焊、热等静压扩散焊、超塑性成形扩散焊等。

很多教材或书籍把扩散连接方法归类到压力焊范畴,但以扩散为主导因素的扩散连接和以塑性变形为主导的压力焊在连接机理、方法和工艺上有很大区别。特别是近年来随着各种新型结构材料(如高技术陶瓷、金属间化合物、复合材料、非晶材料等)的迅猛发展,扩散连接的研究和应用受到各国研究者的普遍关注,新的扩散连接工艺不断涌现,如瞬间液相扩散焊、超塑性成形扩散焊等。再把扩散连接归类为压力焊已不适宜,把以扩散为主导因素的扩散连接列为一种独立的连接方法逐渐成为人们的共识。

钎焊属于典型的液-固相连接。钎焊连接时,选用比母材熔点低的填充材料(钎料),在低于母材熔点、高于钎料熔点的温度下,通过熔融钎料与母材的相互作用并借助熔化钎料的毛细作用填满被连接件间的间隙,冷却凝固形成牢固的接头。钎焊时只有钎料熔化而母材保持固态,故为液-固相连接。

摩擦焊(friction welding)是在外力作用下,利用焊接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适当的宏观塑性变形,通过两侧材料间的动态再结晶而实现焊接。多年来,摩擦焊以其高效、节能、无污染的技术特点,深受制造业的重视,特别是近年来开发的搅拌摩擦焊新技术,利用搅拌头高速旋转,与金属摩擦生热形成热塑性层。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，形成连续的焊缝。

搅拌摩擦焊 (stir friction welding) 是 20 世纪 90 年代初由英国焊接研究所开发出的一种专利焊接技术，它可以焊接采用熔化焊方法较难焊接的有色金属。搅拌摩擦焊具有连接工艺简单、焊接接头晶粒细小、疲劳性能、拉伸性能和弯曲性能良好、无需焊丝、无需使用保护气体以及焊后残余应力和变形小等优点。

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的焊接，完成了纵向焊缝的直线对接和环形焊缝沿圆周的对接。该技术已在新型运载工具的新结构设计中采用，在航空航天、交通和汽车制造等产业部门也得到应用。搅拌摩擦焊的主要应用示例见表 1.5。

表 1.5 搅拌摩擦焊的主要应用示例

领 域	应 用 示 例
船舶和海洋工业	快艇、游船的甲板、侧板、防水隔板、船体外壳、主体结构件、直升机平台、离岸水上观测站、船用冷冻器、帆船桅杆和结构件
航空、航天	运载火箭燃料储箱、发动机承力框架、铝合金容器、航天飞机外储箱、载人返回舱、飞机蒙皮、加强件之间连接、框架连接、飞机壁板和地板连接、飞机门预成形结构件、起落架舱盖、外挂燃料箱
铁道车辆	高速列车、轨道货车、地铁车厢、轻轨电车
汽车工业	汽车发动机引擎、汽车底盘支架、汽车轮毂、车门预成形件、车体框架、升降平台、燃料箱、逃生工具等
其他工业部门	发动机壳体、冰箱冷却板、天然气和液化气储箱、轻合金容器、家庭装饰、镁合金制品等

我国的搅拌摩擦焊工艺开发时间不长，但发展很快，在焊接铝及铝合金方面受到重视，在航空航天、交通运输工具的生产中有很好的前景，在异种材料的焊接中也初露头角。搅拌摩擦焊工艺将使铝合金等有色金属的连接技术发生重大变革。

此外，电磁脉冲 (MPW) 焊接方法近年来有了较快的发展和应用，其连接机理介于爆炸焊和超声波焊之间。这种连接方法利用大电流脉冲放电，在导电工件中感应涡流，产生瞬间强磁场冲力，使工件产生高速塑性流变，实现连接，可望在管接头与异种材料的连接中扩大应用。

1.2 特种焊接方法的选择

1.2.1 选择特种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、打底焊缝宜选用焊条电弧焊、氩弧焊。重要的焊接结构可选用电子束焊、等离子弧焊等。

② 机械零部件类 如各种类型的机械零部件。对于机械零部件类产品，一般焊缝不会