

特种焊接技术 及应用

李亚江 王娟 等编著

第5版

TEZHONG HANJIE JISHU
JI YINGYONG

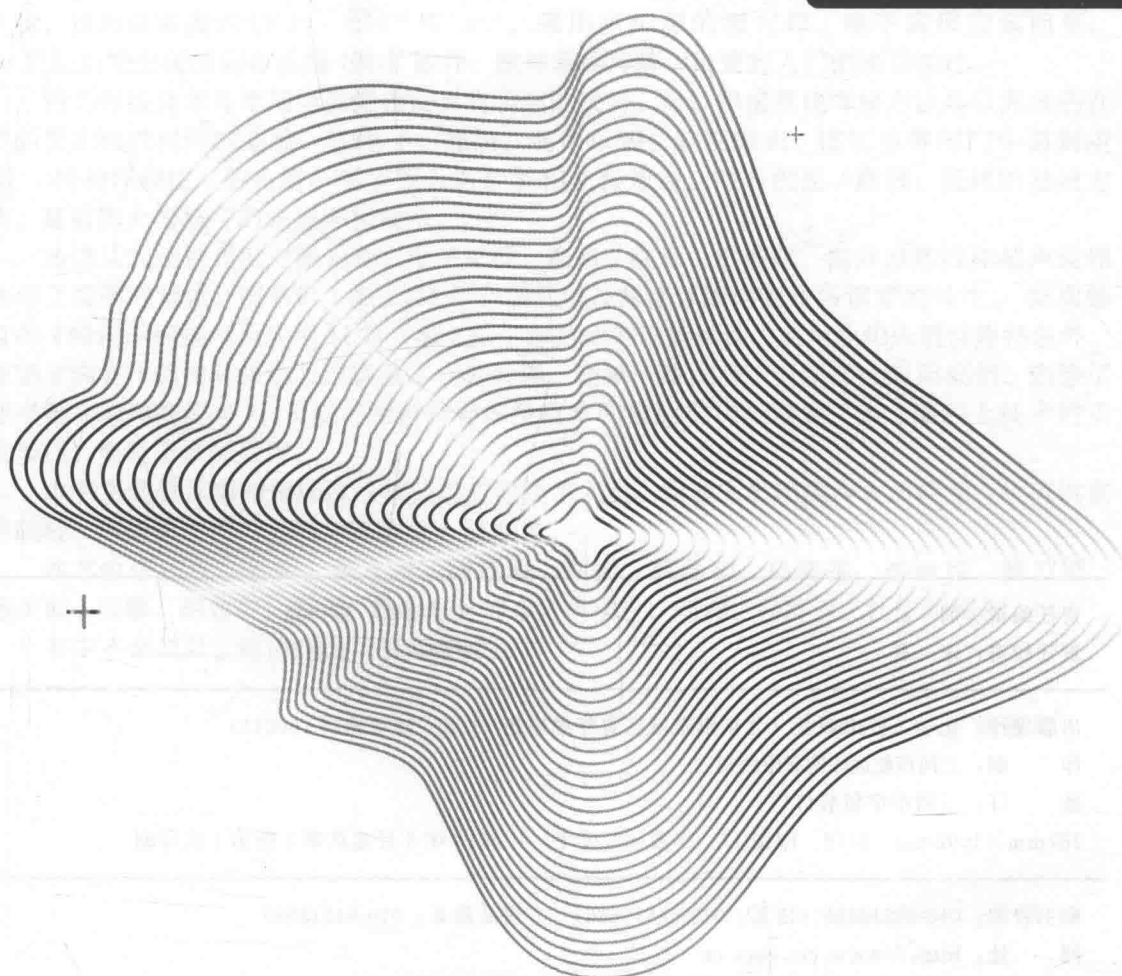


化学工业出版社

特种焊接技术 及应用

李亚江 王娟 等编著

第5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/李亚江等编著. —5 版.
北京: 化学工业出版社, 2018. 3
ISBN 978-7-122-31277-8

I. ①特… II. ①李… III. ①焊接-特种技术
IV. ①TG456

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 330459 号

责任编辑: 周 红
责任校对: 宋 夏

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 刷: 三河市航远印刷有限公司

装 订: 三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 17 字数 455 千字 2018 年 3 月北京第 5 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: 88.00 元

版权所有 违者必究

前言 FOREWORD

近年来与高新技术发展密切相关的特种焊接技术的应用受到人们的重视。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，如激光焊、电子束焊、扩散焊、搅拌摩擦焊、超声波焊等。20世纪中期，高能密束热源相继问世，其功率密度达到 $10^5 \sim 10^{13} \text{ W/cm}^2$ ，采用新热源的激光焊、电子束焊应运而生。20世纪后期出现的固态连接（如扩散焊、搅拌摩擦焊等）也受到人们的密切关注。

特种焊接技术与常规电弧焊相比具有明显的优势，可以焊接常规焊接方法难以完成的许多新型和特殊材料的连接，在电子、能源、现代车辆、航空航天、核工业等部门中得到应用。特种焊接技术的应用产生了巨大的经济效益和社会效益，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。

本书从实用性角度对激光焊、电子束焊、等离子弧焊、扩散焊、搅拌摩擦焊和超声波焊等作了简明的阐述，该书第1版2004年出版后以及其修订版得到众多读者的关注。此次修订的《特种焊接技术及应用》（第5版）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（例如有些小节内容做了合并处理、删减一些图表、更新部分应用实例、删除了原书第9章爆炸焊等），反映了当前特种焊接技术的应用现状及发展，使之能跟上技术进步的步伐，更适于实际应用。

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。

本书由李亚江、王娟、张永喜、陈茂爱、刘鹏、夏春智、马海军、沈孝芹、黄万群、蒋庆磊、吴娜、胡效东、张蕾、魏守征、刘强、李嘉宁、刘坤、马群双、杜红燕编著。

书中不足之处，敬请广大读者批评指正。

编著者

目 录 CONTENTS

第 1 章 概 述

- 1.1 焊接方法的分类及发展 /001
 - 1.1.1 焊接方法的分类 /001
 - 1.1.2 特种焊接技术现状及发展 /003
- 1.2 特种焊接方法的选择 /008
 - 1.2.1 选择焊接方法应考虑的因素 /008
 - 1.2.2 焊接技术的新发展 /010

第 2 章 激光焊

- 2.1 激光焊的原理、分类及特点 /012
 - 2.1.1 激光焊原理及分类 /012
 - 2.1.2 激光焊的特点及应用 /013
- 2.2 激光焊设备及工艺 /015
 - 2.2.1 激光焊设备 /015
 - 2.2.2 激光焊接工艺及参数 /016
 - 2.2.3 激光复合焊接技术 /026
 - 2.2.4 不同材料的激光焊特点 /028
 - 2.2.5 激光焊的安全与防护 /032
- 2.3 激光切割 /032
 - 2.3.1 激光切割的分类及特点 /032
 - 2.3.2 激光切割设备 /034
 - 2.3.3 激光切割工艺参数 /035
- 2.4 激光焊的应用实例 /039
 - 2.4.1 42CrMo 钢伞形齿轮轴的窄间隙激光焊 /039
 - 2.4.2 冷轧钢与高强度镀锌钢车身的 CO₂ 激光拼焊 /041
 - 2.4.3 镁合金中厚板的 CO₂ 激光深熔焊 /041
 - 2.4.4 大厚度不锈钢的激光焊 /043
 - 2.4.5 不锈钢超薄板的脉冲激光焊 /045
 - 2.4.6 X52 管线钢的激光焊 /045
 - 2.4.7 汽车高强钢板光纤激光焊 /047
 - 2.4.8 汽车桥壳的激光切割 /049

第 3 章 电子束焊

- 3.1 电子束焊的特点及分类 /051
 - 3.1.1 电子束焊的特点及小孔效应 /051
 - 3.1.2 电子束焊的分类 /053
 - 3.1.3 电子束焊应用领域及前景 /054
- 3.2 电子束焊设备及工艺 /056
 - 3.2.1 电子束焊机的类型及组成 /056
 - 3.2.2 电子束焊的工艺特点 /058
 - 3.2.3 焊前准备及接头设计 /059
 - 3.2.4 电子束焊的工艺参数 /061
- 3.2.5 电子束焊接操作与安全防护 /063
- 3.3 不同材料的电子束焊 /065
 - 3.3.1 常规金属材料的电子束焊 /065
 - 3.3.2 异种材料的电子束焊 /068
 - 3.3.3 其他难焊材料的电子束焊 /072
- 3.4 电子束焊的应用实例 /076
 - 3.4.1 斯太尔汽车后桥壳体的真空电子束焊 /076
 - 3.4.2 发动机部件(钛合金/铝合金)的电

- 子束焊接 /078
- 3.4.3 薄壁空心铝球的电子束焊接 /080
- 3.4.4 大厚度钛合金的电子束焊 /082
- 3.4.5 汽车减震器的电子束焊 /083

- 3.4.6 不锈钢薄板的电子束焊 /085
- 3.4.7 铝合金薄板的电子束焊 /086
- 3.4.8 $\text{SiC}_p/101\text{Al}$ 铝基复合材料电子束焊 /088

第4章 等离子弧焊接与切割

- 4.1 等离子弧的类型及特点 /090
 - 4.1.1 等离子弧的基本类型 /090
 - 4.1.2 等离子弧的静特性及对电源外特性的要求 /091
 - 4.1.3 等离子弧的应用特点 /092
 - 4.1.4 等离子弧焊的分类 /093
- 4.2 等离子弧焊设备及工艺 /094
 - 4.2.1 等离子弧焊设备的组成 /094
 - 4.2.2 等离子弧焊的工艺参数 /098
 - 4.2.3 强流(大电流)等离子弧焊工艺 /099
 - 4.2.4 微束等离子弧焊工艺 /100
 - 4.2.5 脉冲等离子弧焊工艺特点 /103
 - 4.2.6 几种材料的等离子弧焊接 /104
- 4.3 等离子弧堆焊与切割 /107
 - 4.3.1 熔化极等离子弧堆焊 /107
 - 4.3.2 粉末等离子弧堆焊 /108
 - 4.3.3 等离子弧切割方法及设备 /109
 - 4.3.4 等离子弧切割工艺 /111
- 4.4 等离子弧焊接的应用实例 /117
 - 4.4.1 超薄壁管子的微束等离子弧焊工艺 /117
 - 4.4.2 焊接波纹管的微束等离子弧焊工艺 /118
 - 4.4.3 钛合金管的等离子弧焊接工艺 /121
 - 4.4.4 GH132 高温合金等离子弧焊接工艺 /123
 - 4.4.5 飞机发动机滤油网组件的微束等离子弧焊 /124
 - 4.4.6 内燃机车柴油机气门等离子弧喷焊 /126
 - 4.4.7 镁合金变极性等离子弧焊 /127
 - 4.4.8 化工容器钛板衬里的等离子弧焊 /129

第5章 扩散焊

- 5.1 扩散焊的特点、分类和扩散机制 /132
 - 5.1.1 扩散焊的特点及分类 /132
 - 5.1.2 扩散焊的三个阶段及扩散机制 /134
- 5.2 扩散焊的设备及工艺 /136
 - 5.2.1 扩散焊设备 /136
 - 5.2.2 扩散焊工艺及主要参数 /137
 - 5.2.3 同种材料的扩散焊 /140
 - 5.2.4 异种材料的扩散焊 /144
 - 5.2.5 陶瓷与金属的扩散焊 /154
 - 5.2.6 扩散焊接头的质量检验 /159
- 5.3 扩散焊的应用实例 /160
 - 5.3.1 TC4 钛合金与 304L 不锈钢网的扩散焊 /160
 - 5.3.2 工业纯钛(TA3)多层板及 TA3/TC4 扩散焊 /161
 - 5.3.3 Al_2O_3 陶瓷与工业纯钛 TA1 的真空扩散焊 /163
 - 5.3.4 亚微米级 $\text{Al}_2\text{O}_3_p/6061$ 铝基复合材料的扩散焊 /165
 - 5.3.5 镁合金与钛合金的过渡液相扩散焊 /167
 - 5.3.6 航空发动机叶片的扩散焊 /169
 - 5.3.7 冷作模具钢与弹簧钢的扩散焊 /170
 - 5.3.8 石油钻杆的过渡液相扩散焊 /171
 - 5.3.9 TP304 不锈钢管的过渡液相扩散焊 /173

第6章 摩擦焊

- 6.1 摩擦焊的原理、分类及特点 /175
 - 6.1.1 摩擦焊的原理及特点 /175
 - 6.1.2 摩擦焊的分类 /176
 - 6.1.3 摩擦焊的应用范围 /178

6.2 摩擦焊设备及工艺 /179	的摩擦焊 /203
6.2.1 摩擦焊设备组成 /179	6.4.2 钻杆的摩擦焊 /204
6.2.2 摩擦焊的工艺及参数 /180	6.4.3 船舶铝合金构件的搅拌摩擦焊 /205
6.2.3 摩擦焊接头质量控制 /186	6.4.4 AZ31B/AZ61A 异种镁合金的 搅拌摩擦焊 /206
6.3 搅拌摩擦焊 /187	6.4.5 大厚度机翼框架铝合金搅拌 摩擦焊 /208
6.3.1 搅拌摩擦焊的特点 /187	6.4.6 搅拌摩擦焊在核工业中的应用 /211
6.3.2 搅拌摩擦焊设备 /193	6.4.7 FSW 在地铁、高速列车铝合金 车体上的应用 /213
6.3.3 搅拌摩擦焊工艺及参数 /194	6.4.8 铝合金薄板搭接接头搅拌 摩擦焊 /215
6.3.4 搅拌摩擦焊接头的组织与性能 /198	
6.3.5 搅拌摩擦焊缺陷与摩擦 塞焊修复 /202	
6.4 摩擦焊的应用实例 /203	
6.4.1 45 钢/W8Co3N 高速钢刀具	

第 7 章 冷压焊和热压焊

7.1 冷压焊的特点及工艺 /217	7.3.1 热压焊的特点 /233
7.1.1 冷压焊的特点 /217	7.3.2 气压焊 /234
7.1.2 冷压焊的分类 /218	7.3.3 锻焊和滚焊 /236
7.1.3 冷压焊工艺及影响因素 /219	7.3.4 热压焊的焊后热处理 /237
7.1.4 冷压焊模具 /222	7.4 热压焊的应用及质量检验 /237
7.2 冷压焊的应用 /225	7.4.1 钢轨的热压焊 /237
7.2.1 异种材料的冷压焊 /226	7.4.2 钢筋的热压焊 /239
7.2.2 铝线和铜线的对接冷压焊 /229	7.4.3 钢筋气压焊在小浪底工程中的 应用 /241
7.2.3 中同轴电缆的冷压焊 /231	7.4.4 热压焊接头的检验 /242
7.2.4 高真空金属壳与壳座的冷压焊 /232	
7.3 热压焊的特点及工艺 /233	

第 8 章 超声波焊

8.1 超声波焊原理、分类及特点 /245	8.3 超声波焊的应用实例 /255
8.1.1 超声波焊的原理 /245	8.3.1 离心叶轮的低温超声波焊 /255
8.1.2 超声波焊的分类 /245	8.3.2 聚乙烯医疗器具的超声波焊 /256
8.1.3 超声波焊的特点及应用范围 /247	8.3.3 太阳能集热器吸热板的超声 波焊 /257
8.2 超声波焊接设备及工艺 /249	8.3.4 铝热交换器的超声波钎焊 /258
8.2.1 超声波焊接设备的组成 /249	8.3.5 铝基复合材料的超声波钎焊 /260
8.2.2 接头设计与表面准备 /251	8.3.6 镁合金超声波钎焊 /261
8.2.3 超声波焊的工艺参数 /252	

参考文献

第 1 章

概 述

焊接技术是通过适当的手段,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、搅拌摩擦焊等。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、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);也有的分类为熔化焊和非熔化焊(固相焊)。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,例如熔化焊和固相焊方法的分类见表 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如图 1.1 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,这种热源难于实施对金属的焊接。

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,绝大多数金属电弧焊的功率密度都在这个范围内。

表 1.1 熔化焊和固相焊方法的分类

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焊接方法)	电弧焊	熔化极电弧焊	焊条电弧焊(SMAW)	△
			埋弧焊(SAW)	○
			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(PAW)	○
	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	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		○
固相焊(利用加压、摩擦和扩散等克服两个连接表面的不平度,使界面处的原子接近到晶格距离,在固态条件下实现连接的方法)	电阻焊	点焊、缝焊		○
	冷压焊	搭接、对接		○
	热压焊	气压焊、锻焊、滚焊		△
	扩散焊	不加中间层扩散焊		○
		加中间层扩散焊		○
	摩擦焊	搅拌摩擦焊		○
		旋转和线性摩擦焊		○
	超声波焊	点焊、缝焊		○
	爆炸焊			△

注：○—易于实现自动化；△—难以实现自动化。

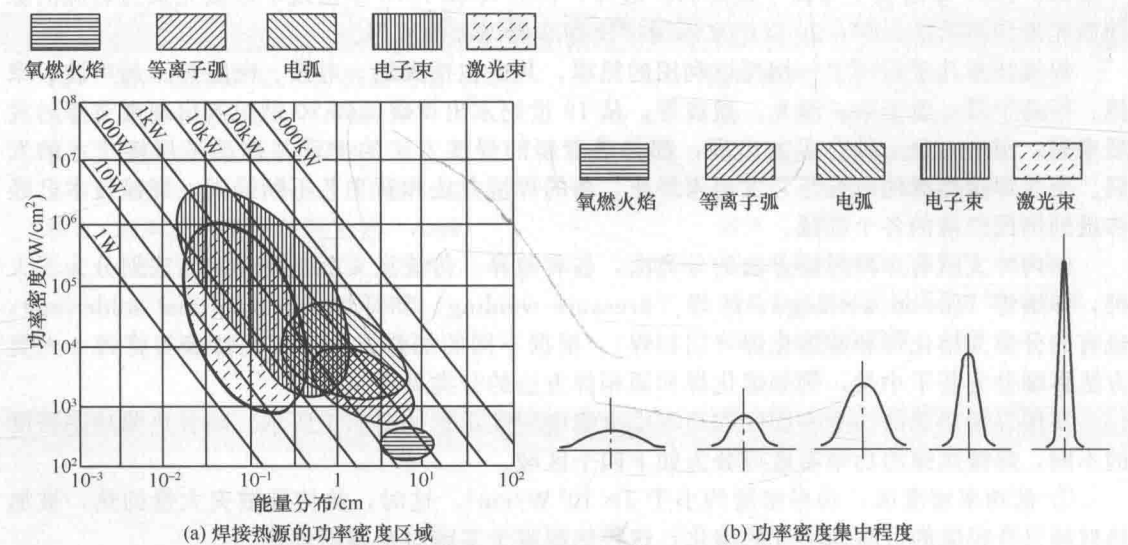


图 1.1 常用焊接热源的功率密度区和功率密度集中程度示意

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。

④ 超高功率密度区，功率密度大于 10^9 W/cm^2 。这时的蒸发更剧烈，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。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，高能束流焊接的功率密度达到 10^5 W/cm^2 以上。

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。

工业上常见的几种热源的功率密度见表 1.2，用在焊接领域的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。

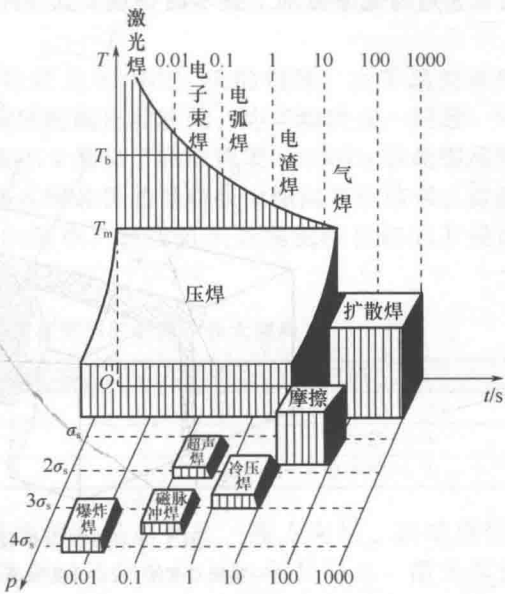


图 1.2 不同焊接方法的温度、压力及过程持续时间的对比

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	—	$(1 \sim 2) \times 10^3$	—
	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	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}	$(0.5 \sim 1) \times 10^5$	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、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。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

高能束流焊接技术的显著特点是焊接时产生“小孔效应”（图 1.3），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技术及国防科技的发展中起着无可替代的作用。表 1.3 是高能束流加工技术的特点及其应用领域。

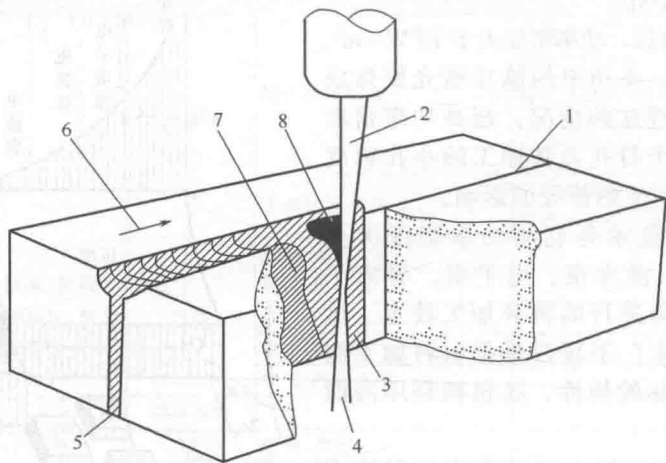


图 1.3 高能束焊接过程的“小孔效应”特征

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

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。国内在高能束流装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。

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、汽车等工业得到广泛的应用。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。

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、充气、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

高能束流焊接装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、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。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。因而复合焊接方法强化了工艺，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 倍以上。

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）的激光焊研究也取得了进展，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。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的应用。例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。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, 可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, 促进特种连接技术的不断发展, 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, 推动束流复合焊接技术的发展。其中最主要的是采用激光-电弧复合热源的高效焊接技术。

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。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十几年才出现,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,可增加焊接稳定性;激光加丝焊对参数变化很敏感,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,产生良好的复合效应。

熔化极电弧成本低,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,对工件装配精度要求高,对铝合金等材料的适应性差。激光-电弧的复合效应表现在: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。焊接钢时,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)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。与激光单弧复合焊相比,激光双弧复合焊接的热输入可减小 25%,焊接速度增加约 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 激光器试验基础上,还在 12kW 的 CO₂ 激光器以及光纤传输的 2kW 的 YAG 激光器上进行的试验,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,激光复合焊接技术还有激光-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

先进材料的不断出现对连接技术提出了新的挑战,成为其发展的重要推动力。许多新材料,如耐热合金、陶瓷、金属间化合物、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难以完成,扩散焊、摩擦焊、超塑成形扩散连接等方法应运而生,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)固相连接的优越性日益显现,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。陶瓷与金属能够采用扩散焊进行连接;摩擦焊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。这类连接方法有摩擦焊、爆炸焊、冷压焊和热压焊等，属于压焊连接。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、过渡液相扩散焊、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制、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，新的扩散连接工艺不断涌现，如过渡液相扩散焊等。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。

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宏观塑性变形，通过两侧材料间的动态再结晶而实现焊接。摩擦焊以其高效、节能、无污染（无烟尘、弧光）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（friction stir welding）是 20 世纪 90 年代初由英国焊接研究所开发出的一种先进焊接技术，它可以焊接用熔焊方法较难焊接的铝、镁等轻金属。搅拌摩擦焊具有工艺简单、焊接接头晶粒细小，抗疲劳性能、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、交通和车辆制造等工业也得到应用。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、桁条、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

我国的搅拌摩擦焊技术开发时间不长，但发展很快，在焊接铝、镁及其合金方面受到重视，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、镁等轻金属的连接发生重大变革。

1.2 特种焊接方法的选择

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作出选择。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以下四类。

① 结构件类 如桥梁、建筑、锅炉及压力容器、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，一般焊缝不会太长，可根据对焊接精度的要求，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、等离子弧焊，圆截面件可选用摩擦焊，精度高的工件可选用电子束焊、激光焊。

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，除了考虑产品类型之外，还应考虑工件厚度、接头形式、焊缝位置、母材性能、生产技术条件、经济效益等因素。

(2) 工件厚度

不同焊接方法采用的热源各异，各有最适宜的焊接厚度范围。在限定的厚度范围内，要求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 1.4 所示。

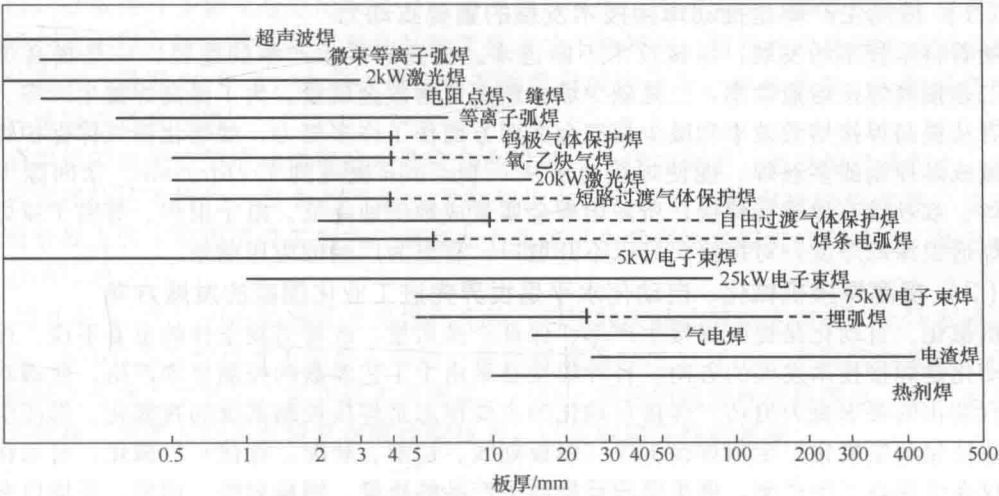


图 1.4 常用焊接方法推荐的适用工件厚度
(图中虚线表示采用多道焊)

(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，接头位置可能需要平焊、立焊、仰焊、全位置焊接等，这些因素都影响焊接方法的选择。平对接焊是最易于焊接的位置，适合于多种焊接方法，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。

(4) 母材性能

被焊母材的物理化学、力学和冶金性能不同,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。对热敏感材料宜选用激光焊、超声波焊等热输入较小的焊接方法。对难熔材料,如钼、钽等,宜选用电子束等高能束流的焊接方法。

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) 生产技术条件

技术水平、生产设备和材料消耗均影响焊接方法的选择。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,还需要对X射线的防护。激光焊需要大功率激光器以及专用工装和辅助装置。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 焊接技术的新发展

(1) 提高生产率是推动焊接技术发展的重要驱动力

随着科学技术的发展,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,二是提高焊接熔敷效率,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。电子束焊、等离子弧焊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。焊接生产自动化是焊接技术发展的方向。特种焊接技术由于工艺参数的控制要求严格,使得对机械化、自动化的要求更为迫切。焊接自动化的主要标志是焊接控制系统的智能化、焊接生产系统的柔性化和集成化。全部焊接工序(钢板划线、切割、装配、焊接)机械化、自动化的优势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,为特种焊接技术自动化打下了良好基础。

(3) 焊接过程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