

普通高等院校航空航天专业规划教材

Advanced Joining Technology and Application
先进连接技术及应用



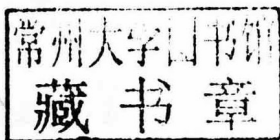
陈玉华 尹立孟 主编

航空工业出版社

普通高等院校航空航天专业规划教材

先进连接技术及应用

主 编：陈玉华 尹立孟
副主编：王善林 杨成刚 张体明



航空工业出版社

北 京

内容提要

本书共 10 章, 主要介绍了激光焊、电子束焊、活性剂焊接、扩散焊、冷压焊和热压焊、熔钎焊、摩擦焊、超声波焊接、爆炸焊和微连接等先进连接方法的原理、工艺及典型工程应用。

本书可作为普通高等学校焊接技术与工程、材料成型及控制工程(焊接方向)本科生和研究生的教材, 也可供于焊接技术相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

先进连接技术及应用/陈玉华, 尹立孟主编. —北京: 航空工业出版社, 2019. 7
ISBN 978-7-5165-1985-1

I. ①先… II. ①陈…②尹… III. ①焊接工艺
IV. ①TG44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 160210 号

先进连接技术及应用

Xian jin Lian jie Ji shu Ji Ying yong

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑 2 号院 100012)

发行部电话: 010-84936597 010-84936343

三河市华骏印务包装有限公司印刷

2019 年 7 月第 1 版

开本: 787×1092 1/16

印数: 1—2200

印张: 18.25

全国各地新华书店经售

2019 年 7 月第 1 次印刷

字数: 413 千字

定价: 45.00 元

前言

焊接被喻为“工业裁缝”，是实现材料永久连接的一种重要方法，广泛应用于机械制造、电子产品、航空、航天、石油化工、船舶、桥梁、建筑、动力工程等各个工业部门，从几十万吨的海洋工程结构到不足 1 克的微电子元件，在生产中都不同程度地依赖焊接技术，是现代制造业中不可缺少的加工工艺方法，产品的焊接质量直接影响其可靠性和使用寿命。

科学技术的进步、新材料的出现、极端条件下的性能需求等因素对产品的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，传统的焊条电弧焊、埋弧焊、气体保护焊等方法难以保证产品的生产效率或满足产品的质量要求，鉴于此，一些特种焊接方法相继问世，如高能束（激光、电子束）焊接、扩散焊、压力焊、熔钎焊，以及复合热源焊接等。这些特种焊接技术近年来得到广泛应用，产生了巨大的经济和社会效益。

目前，国内有 40 余所高校开设了“焊接技术与工程”专业，但本科教学过程中大多以传统的焊接方法为主，对于特种焊接技术没有系统的学习，不能满足企业对人才培养质量的需求。为加快建设高水平本科教育，全面提高人才培养能力，2018 年，教育部印发了《教育部关于加快建设高水平本科教育全面提高人才培养能力的意见》等文件，决定实施“六卓越一拔尖”计划 2.0。对于“焊接技术与工程”专业而言，承担着培养卓越焊接工程师的重要使命，为了使学生毕业后在企业能尽快掌握和应用这些技术，适应企业的实际需求，开展卓越工程师教育，提高毕业生的工作适应性，我们编写了《先进连接技术及应用》一书。

本书共 10 章，主要介绍了近年来广泛应用的特种焊接技术基本原理和特征、相关设备、工艺特点、应用情况等内容，包括：激光焊、电子束焊、活性剂焊接、扩散焊、冷压焊和热压焊、熔钎焊等内容。本书在编写过程中考虑到特种焊接设备型号不尽相同，在内容上力争做到全面性和普适性。

本书由南昌航空大学陈玉华教授和重庆科技学院尹立孟教授主编，参加本书编写的还有南昌航空大学王善林、杨成刚、张体明、谢吉林和重庆科技学院的许章亮等人。本书编写过程中参考了国内外同行的研究成果和文献，在此一并表示感谢！

由于编者水平有限，书中不妥之处，敬请读者批评指正。

目录

catalog.....

第 1 章 激光焊接及应用	1
1.1 激光焊接的原理及特征	1
1.1.1 激光的产生及特性	1
1.1.2 激光焊的原理	2
1.1.3 激光焊接的特点	5
1.2 激光焊设备	5
1.2.1 激光焊接设备的组成	5
1.2.2 CO ₂ 气体激光器	7
1.2.3 YAG 固体激光器	9
1.2.4 CO ₂ 激光器和 YAG 激光器的对比	10
1.2.5 其他激光器	11
1.3 激光焊焊接工艺	11
1.3.1 脉冲激光焊	11
1.3.2 连续激光焊	16
1.3.3 双光束激光焊	19
1.4 激光焊接的应用	21
1.4.1 激光焊接的应用领域及现状	21
1.4.2 钢的激光焊	22
1.4.3 有色金属的激光焊	24
1.4.4 高温合金的激光焊	25
1.4.5 异种材料的激光焊	26
1.4.6 激光焊的发展趋势	27
第 2 章 电子束焊接及应用	28
2.1 电子束焊接的原理及特点	28
2.1.1 电子束焊接的原理	28
2.1.2 电子束焊接的分类	31
2.1.3 电子束焊接的优缺点	33

2.2	电子束焊接设备	35
2.2.1	电子束焊机的组成	35
2.2.2	电子束焊机的技术参数	39
2.3	电子束焊的焊接工艺	40
2.3.1	电子束焊接工艺特点	40
2.3.2	焊前准备及接头设计	42
2.3.3	焊接工艺参数及其对焊缝成形的影响	45
2.3.4	获得深熔焊的工艺方法	47
2.4	电子束焊的应用	48
2.4.1	电子束焊的应用领域	48
2.4.2	钢铁和有色金属的电子束焊接	50
2.4.3	特殊材料的焊接	53
2.4.4	电子束焊接的应用前景	61
第3章	活性剂焊接	62
3.1	活性剂焊接原理及特点	62
3.1.1	活性剂焊接基本原理	62
3.1.2	活性剂焊接机理	63
3.1.3	活性剂的研制与开发	67
3.2	活性剂焊接的影响因素	68
3.2.1	焊接中的作用力	68
3.2.2	焊接相关工艺参数	69
3.2.3	被焊金属的性能	77
3.2.4	活性剂	81
3.3	活性剂焊接设备及工艺	83
3.3.1	A-TIG 设备及焊枪	83
3.3.2	焊接工艺	85
3.4	活性剂焊接应用	87
3.4.1	活性剂 TIG 焊	88
3.4.2	活性剂钎焊	88
3.4.3	活性剂激光焊	89
3.4.4	活性剂电子束焊	89
3.4.5	活性剂 CO ₂ 气保护焊	90
3.4.6	活性剂 CMT 焊	90
第4章	扩散焊	92
4.1	扩散焊的分类、原理和特点	92
4.1.1	扩散焊的分类	92
4.1.2	扩散焊接的原理	93

4.1.3	扩散焊的特点	96
4.2	扩散焊设备	97
4.2.1	扩散焊设备的分类和组成	97
4.2.2	典型扩散焊设备及其技术参数	99
4.3	扩散焊工艺	102
4.3.1	工件表面处理	102
4.3.2	中间层材料及选择原则	103
4.3.3	阻焊剂	104
4.3.4	扩散焊工艺参数	104
4.3.5	焊后质量检测	106
4.4	扩散焊的应用	106
4.4.1	异种金属的扩散焊	107
4.4.2	陶瓷/金属的扩散焊接	107
4.4.3	金属的扩散焊接	108
第5章	冷压焊和热压焊及应用	110
5.1	冷压焊	110
5.1.1	冷压焊的原理及分类	110
5.1.2	冷压焊的优缺点及适用范围	114
5.1.3	冷压焊工艺	116
5.1.4	冷压焊模具	119
5.1.5	冷压焊的应用	123
5.2	热压焊	127
5.2.1	热压焊的原理及特点	127
5.2.2	热压焊方法的工艺特点	129
5.2.3	热压焊接头质量控制及热压焊的应用	132
第6章	熔钎焊	136
6.1	电弧熔钎焊技术	136
6.1.1	电弧熔钎焊基本原理	137
6.1.2	电弧熔钎焊的特点	138
6.1.3	研究现状及应用	139
6.2	激光熔钎焊技术	142
6.2.1	激光熔钎焊基本原理	142
6.2.2	工艺参数对焊缝成形的影响	143
6.2.3	研究现状及应用	146
6.3	CMT熔钎焊技术	152
6.3.1	CMT熔钎焊设备及工艺	152
6.3.2	研究现状及应用	154

第7章 摩擦焊	158
7.1 摩擦焊的特点、分类及原理	158
7.1.1 摩擦焊的特点	158
7.1.2 摩擦焊的分类	159
7.1.3 常用摩擦焊方法的原理	161
7.2 典型摩擦焊设备	167
7.2.1 连续驱动摩擦焊设备	167
7.2.2 惯性摩擦焊设备	169
7.2.3 线性摩擦焊设备	170
7.2.4 搅拌摩擦焊设备	173
7.3 摩擦焊工艺	181
7.3.1 连续驱动摩擦焊工艺	181
7.3.2 惯性摩擦焊工艺	186
7.3.3 线性摩擦焊工艺	188
7.3.4 搅拌摩擦焊工艺	189
7.4 摩擦焊技术的应用	198
7.4.1 连续驱动摩擦焊的应用	198
7.4.2 惯性摩擦焊的应用	202
7.4.3 线性摩擦焊应用	205
7.4.4 搅拌摩擦焊的应用	205
第8章 超声波焊	211
8.1 超声波焊原理及特点	211
8.1.1 超声波焊接的原理	211
8.1.2 超声波焊的特点	213
8.2 超声波焊焊接设备	214
8.3 超声波焊焊接工艺	218
8.3.1 接头设计	218
8.3.2 超声波焊接的工艺参数	219
8.4 超声波焊接的应用	222
8.4.1 金属的超声波焊接	222
8.4.2 塑料的超声波焊接	223
8.4.3 超声波焊接技术的新进展	226
第9章 爆炸焊	228
9.1 爆炸焊的原理、特点及分类	228
9.1.1 爆炸焊的基本原理	228
9.1.2 爆炸焊结合面的形态	229
9.1.3 爆炸焊的特点	230

9.1.4	爆炸焊的分类	230
9.2	爆炸焊工艺	232
9.2.1	焊前准备	232
9.2.2	接头形式	234
9.2.3	工艺参数	235
9.3	爆炸焊的应用	240
9.3.1	爆炸焊可焊接的金属材料	241
9.3.2	爆炸焊可焊接的产品结构	242
第 10 章	微连接及应用	245
10.1	微连接技术概述	245
10.1.1	概念	245
10.1.2	微连接技术的分类	246
10.2	芯片互连技术	247
10.2.1	引线键合技术	247
10.2.2	载带自动键合技术	250
10.2.3	倒装焊接技术	253
10.3	微电子元件组装技术	260
10.3.1	通孔插装焊接技术	260
10.3.2	表面贴装焊接技术	262
10.4	微连接技术应用	268
参考文献	271

第 1 章 激光焊接及应用

激光焊是利用能量密度极高的激光束作为热源的一种高效精密焊接方法。与传统的焊接方法相比，激光焊具有能量密度高、穿透能力强、精度高、适应性强等优点。作为现代高科技产物的激光焊，已成为现代工业发展必不可少的加工工艺。随着航空航天、电子、汽车制造、医疗以及核工业的迅猛发展，产品零件结构形状越来越复杂，对材料性能的要求不断提高；对加工精度和接头质量的要求日益严格；同时企业对加工方法的生产效率、工作环境的要求也越来越高，而传统的焊接方法难以满足这些要求，因此，以激光束为代表的高能束流焊接方法日益得到重视，并获得了广泛应用。

1.1 激光焊接的原理及特征

1.1.1 激光的产生及特性

激光的英文名称 Laser 是“Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation”的缩写，意思是“通过受激辐射实现光的放大”。激光和无线电波、微波一样，具有波粒二象性；但激光的产生机理与普通光不同，由此决定了它具有比普通光优异的特征。

物质发光有自发辐射和受激辐射两种方式。粒子接受外界能量（光、电等形式）被激发到高能级，粒子在某能级存在的平均时间称为该能级的能级寿命，一般来说，能级越高，寿命越短，处于高能级上的粒子具有向低能级跃迁的趋势。自发辐射是粒子从高能级自发向低能级跃迁而发射光子，这个过程不受外界影响自发进行，所产生的众多光子在频率、方向、相位、偏振等方面都不一致。受激辐射则是处于高能级上的粒子受外界入射光子的激励向低能级跃迁而发射光子，所产生的光子在频率、方向、相位、偏振等方面与入射光子完全一致。受激辐射相当于加强了外来激励光，即具有光放大作用，因此受激辐射是激光产生的主要物理基础。

上述受激辐射产生的加倍数量的光子又可作为激励光子，再去产生受激辐射，这

种过程继续下去,就会出现雪崩式的放大。激光器就是利用内部谐振腔的作用,将某一个方向的受激辐射产生的光反复放大,最后输出一束一定方向的激光,其中的光子在频率、方向、相位、偏振等方面是一致的,这就是激光。

在受激辐射的光放大的同时,也存在光子被低能级粒子吸收的过程,吸收严重时会使激光输出停止。一般情况下,低能级粒子数量总是大于高能级粒子数量,光子被吸收的概率更高;若要使激光稳定输出,必须使高能级粒子数相对大于低能级粒子数,这种情况可简称为粒子数反转。形成粒子数反转的方法很多,一般可以用气体放电的方法来利用具有动能的电子去激发介质原子,称为电激励;也可用脉冲光源来照射工作介质,称为光激励;此外,还有热激励、化学激励等。各种激励方式被形象地称为泵浦或抽运。为了不断得到激光输出,必须不断地“泵浦”,以维持处于高能级的粒子数比低能级多。然而,并不是任何一种粒子都能实现粒子数反转的,自然界中存在一些高能级寿命相对较长的特殊粒子,高能级寿命大于低能级寿命,有利于粒子在该高能级的积聚,实现粒子数反转。这样的特殊粒子有铬离子 Cr^{3+} (红宝石中存在)、钕离子 Nd^{3+} (钕—钇铝石榴石中存在)、 CO_2 分子等。

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,即方向性好、亮度高、高单色性和高相干性。

激光的发散角很小,接近平行光,单色性好,频率单一,经聚焦后可形成很小的光斑,最小光斑直径可以与激光波长的数量级相当;再加上激光的高亮度,使聚焦后光斑上的功率密度可以达到 $10^5 \sim 10^7 \text{ W/cm}^2$ 或更高。因为激光具有这些优异的特点,所以将其作为焊接热源是十分理想的。

1.1.2 激光焊的原理

1. 激光与物质的作用机理

激光焊是由激光器产生的方向性很强的高能密度激光束,照射到被焊材料的表面,通过与其相互作用,部分激光能量被吸收,从而造成被焊材料熔化、气化,最后冷却结晶形成焊缝的过程。

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。激光光波射入材料时,材料中的带电粒子依着光波电矢量的步调振动,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。因为电子比较轻,所以通常被光波激发的是自由电子或束缚电子的振动,也就是光子的辐射能变成电子的动能。另外,频率较低的红外光也可能激起金属中比较重的带电粒子的振动。这些原始激发能经过一定过程再转化为热能。物质吸收激光后,通过上述光子轰击金属表面转换的热能,使焊件表面加热形成蒸气,蒸发的金属可防止剩余能量被金属表面反射掉。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,另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为 $10^7 \sim 10^8/\text{m}$ 。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,热能仅局限于材料的激光辐照区,而后通过热传导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。

(1) 激光波长、材料性质和温度对激光吸收的影响

不同波长的激光,在材料中的吸收率是有较大差别的。在可见光及其附近区域,不同金属材料的反射率呈现出较复杂的变化。在红外区,材料对激光的吸收率与波长近似存在反比关系,随波长的增加,吸收率减小。例如,大部分金属对 $10.6\ \mu\text{m}$ (CO_2 激光器产生的激光)波长的光反射强烈,而对 $1.06\ \mu\text{m}$ (YAG激光器产生的激光)波长的光反射较弱。室温下,金属表面对 $1.06\ \mu\text{m}$ 波长的吸收率比 $10.6\ \mu\text{m}$ 波长光的吸收率大一个数量级(理论上)。因此,其焊接相同厚度的材料,需要的YAG激光功率较小。

不同金属材料的吸收率也存在一定差别。一般情况下,导电性越好的材料,对红外光的反射率越高;在红外光区,所有金属的反射率表现出共同的规律性。另外,金属对激光的吸收率随温度的上升而增大,随电阻率的增加而增大。

(2) 材料表面状况对激光吸收的影响

材料表面状况主要是指材料有无氧化膜(皮)、材料粗糙度大小、有无涂层等。金属表面存在氧化膜可大大增加材料对激光的吸收。因此,实际上 CO_2 激光器产生的激光与YAG激光器产生的激光吸收率并没有理论上差别那么大。试验表明,粗糙表面与镜面相比,其吸收率比镜面高1倍以上。因此,可以通过表面喷砂等方法来增加吸收率。

表面涂层也可提高金属表面对激光的吸收率,可采用机械法(如涂黑涂料)或化学法(如在金属表面形成磷化膜、氧化膜等)提高吸收率。

(3) 激光功率密度对激光吸收的影响

理论计算得出的材料对激光的吸收率很小,但这些数值对应的激光功率密度远小于激光焊时的功率密度。一般情况下,激光功率密度越大,材料对激光的吸收率越大。在激光焊时,激光光斑上的功率密度处于 $10^6\sim 10^7\ \text{W}/\text{cm}^2$ 之间,材料对激光的吸收率发生变化。对于钢铁材料,当功率密度大于 $10^6\ \text{W}/\text{cm}^2$ 时,材料表面会出现气化,形成等离子体,在较大气化膨胀压力下,材料生成小孔,小孔的形成有利于增强对激光的吸收。就材料对激光的吸收而言,它对激光的吸收仅随表面温度的升高略有变化。当材料出现气化并形成等离子体和小孔时,材料对激光的吸收发生突变,其吸收率决定于等离子体与激光的相互作用和小孔效应等因素。

2. 激光焊接的分类

激光焊接的分类方法有很多种:按激光器输入能量方式的不同,激光焊分为脉冲激光焊和连续激光焊(包括高频脉冲连续激光焊)。前者焊接时形成一个个圆形焊点,后者在焊接过程中形成一条连续焊缝。按激光聚焦后光斑上功率密度的不同,激光焊分为传热焊和深熔焊。在工业应用中,由于传热焊和深熔焊所采用的焊接参数、设备功率、焊缝形状、焊接机理存在明显不同,因此成为主要的分类方法之一。

(1) 传热焊

传热焊采用的激光光斑功率密度较低,通常在 $10^5 \sim 10^6 \text{ W/cm}^2$ 之间,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。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,使金属熔化和汽化。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而材料相对较薄,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,这种方法也可称为薄板激光小孔效应焊。

从机理上看,深熔焊和小孔效应焊的前提都是焊接时存在着小孔,二者没有本质的区别。在能量平衡和液体流动平衡的条件下,可以对小孔稳定存在时产生的一些现象进行分析。只要光束有足够高的功率密度,小孔总是可以形成的。小孔中充满了被焊金属在激光束连续照射下所产生的金属蒸气及等离子体。这个具有一定压力的等离子体向工件表面空间喷发,在小孔之上,形成一定范围的等离子体云。小孔周围被熔池金属所包围,在液体金属的外面是未熔化金属及部分凝固金属,熔化金属的重力和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。

当小孔跟着光束移动时,在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,熔融材料绕小孔的周边由前沿向后沿流动。此外,温度梯度的存在使得气液分界面的表面张力随温度升高而减小,从而沿小孔的周边建立了一个表面张力梯度,前沿处表面张力小,后沿处表面张力大,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。小孔的形成伴有明显的声、光特征,可以利用这些特征对焊接质量进行监控。

1.1.3 激光焊接的特点

激光器诞生不久,人们就尝试将其用于焊接。激光焊成为20世纪70年代的崭新焊接技术,它以高能量密度的激光作为热源,对金属进行熔化形成焊接接头,是一种高效精密的焊接方法。与一般焊接方法相比,激光焊具有以下特点:

(1) 聚焦后的激光具有很高的功率($10^5 \sim 10^7 \text{ W/cm}^2$ 或更高),焊接以深熔焊方式进行;在相同功率和焊接厚度条件下,焊接速度高;由于激光加热范围小($<1 \text{ mm}$),所以焊接热影响区小,激光焊残余应力和变形小。

(2) 除普通金属材料外,激光还可以焊接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的焊接,如陶瓷、有机玻璃等。

(3) 激光能反射、透射,能在空间传播相当一段距离而衰减很小,可以进行远距离或一些难以接近部位的焊接;对于一些产生有毒气体和物质的材料,由于激光可穿过透明物质,可以将其置于玻璃制成的密封容器中或通过透明物质进行焊接。

(4) 一台激光器还可以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。

(5) 与电子束焊相比,激光焊最大的优点是不需要真空室,不产生X射线,同时光束不受电磁场影响。这是由于激光束是与电子束截然不同的束流,具有光的特性,而电子束是由运动电子形成的,是一种粒子。但激光焊接厚度比电子束焊小。

正是由于激光焊的上述优点,它的发展很快,随着生产和科学技术的进步,对焊接方法的要求越来越高,激光焊用于解决一般熔焊方法难以完成的焊接是必不可少的。目前,激光焊已走出实验室,在工业生产中发挥效益和作用。但激光焊方法在工业应用过程中也存在一些局限和不足之处:

(1) 焊接一些高反射率的金属还比较困难;表面处理、深熔焊、激光电弧复合焊接等方法可以有效改善反射率高的影响。

(2) 设备投资比其他方法大,特别是高功率连续激光器。

(3) 对焊件加工、组装、定位要求均较高。

(4) 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 $10\% \sim 20\%$ 。

1.2 激光焊设备

1.2.1 激光焊接设备的组成

一套完整的激光焊接设备,通常由激光器、光束传输及聚焦系统、机械系统、计算机及应用软件、监测与控制系统、辅助气体控制与冷却系统以及一些辅助装置(例如准直激光器)等组成。

1. 激光器

激光器是激光焊接设备中的重要组成部分，提供加工所需的光能。对激光器的要求是稳定、可靠，能长期正常运行。目前用于激光焊接的激光器有 CO₂ 气体激光器、YAG 固体激光器、CO 激光器、半导体激光器、准分子激光器等，这几种激光器具有不同的特性。其中，工业激光器中应用最多的激光器为 CO₂ 气体激光器和 YAG 固体激光器两种。

2. 光束传输及聚焦系统

光束传输及聚焦系统又称为外部光学系统，用于把激光束传输并聚焦到工件上。图 1.1 是两种激光传输及聚焦系统的示意图。反射镜用于改变光束的方向，球面反射镜或透镜用来聚焦。在固体激光器中，常用光学玻璃制造反射镜和透镜。而对于 CO₂ 激光焊设备，由于激光波长较长，常用铜或反射率高的金属制造反射镜，用 GsAs 或 ZnSe 制造透镜。透射式聚焦用于中、小功率的激光加工设备，而反射式聚焦用于大功率激光加工设备。

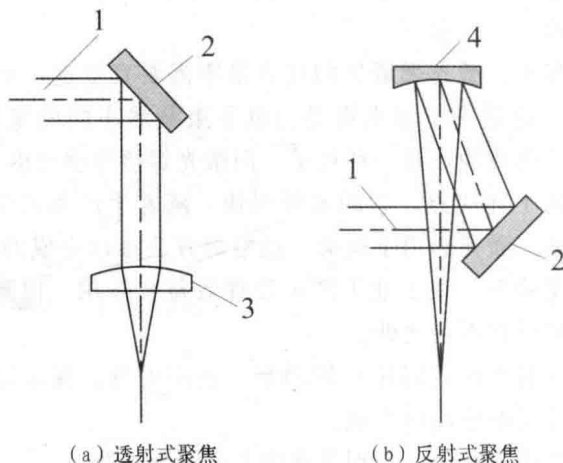


图 1.1 光束传输及聚焦系统示意图

1—激光束；2—平面反射镜；3—透镜；4—球面反射镜

3. 机械系统

机械系统包括机床主机及带有专用功能的数控系统，用以产生工件与光束间的相对运动。激光加工机的精度对焊接或切割的精度影响很大。根据光束与工件的相对运动，加工机可分为二维、三维和五维。二维的在平面内 x 和 y 两个方向运动，三维的增加了与 $x-y$ 平面垂直方向上的运动；五维的则是在三维的基础上增加了 $z-y$ 平面内 360° 的旋转以及 $x-y$ 平面在 z 方向上 $\pm 180^\circ$ 的摆动，可以实现全方位加工。

4. 计算机及应用软件

计算机用于对整个加工机进行控制和调节，如控制激光器的输出功率，控制工作台的运动，对激光加工质量进行监控等。利用计算机可以控制整个加工机的焊接参数

或加工参数,使焊接和加工过程在最好的焊接和加工参数范围内进行,从而得到良好的加工质量。

5. 监测与控制系统

监测与控制系统包括辐射参数传感器、工艺参数传感器及其控制系统。辐射参数传感器用来监测激光输出参数的变化。监测加工区的温度、加工件表面的状态、光束截面的亮度,并将信号传给程控设备,主要用于检测激光器的输出功率或输出能量,并通过控制系统对功率或能量进行控制。工艺参数传感器主要用于检测加工区的温度、工件的表面状况以及等离子体的特性等,以便通过控制系统进行必要的调整。控制系统的主要作用是输入参数并对参数进行实时显示、控制,另外,还有保护和报警等功能。

6. 辅助气体控制与冷却系统

焊接时该系统的主要功能是输送惰性气体和保护焊缝。大功率激光焊时,在熔池上方产生蒸气等离子体,该等离子体会对光束产生反射、吸收和散射,减小能量利用率,使熔池变浅,这时,输送适当的气体可将焊缝上方的等离子体部分吹走。针对不同的焊接材料,输送适当的混合气以增加熔深。

7. 准直激光器

一般采用小功率的 He-Ne 激光器进行光路的调整和工件的对中。

以上是激光焊接设备的典型组成,实际上,由于应用场合不同,加工要求不同,上述的各个部分不一定都具备,各个部分的功能也差别很大,在选用设备时可根据实际应用而定。

1.2.2 CO₂ 气体激光器

CO₂ 激光器是目前工业应用中数量最大、最广泛的一种激光器。CO₂ 激光器工作气体的主要成分是 CO₂、N₂ 和 He。CO₂ 分子是产生激光的粒子。N₂ 分子的作用是与 CO₂ 分子共振交换能量,使 CO₂ 分子激励,增加激光较高能级上的 CO₂ 分子数;同时它还有抽空激光较低能级的作用,即加速 CO₂ 分子的驰豫过程。He 的主要作用是抽空激光较低能级的粒子。He 分子与 CO₂ 分子相碰撞,使 CO₂ 分子从激光较低能级尽快回到基级。He 的导热性很好,故又能把激光器工作时气体中的热量传给管壁或热交换器,使激光器的输出功率和效率大大提高。CO₂ 激光器具有如下特点:

(1) 输出功率范围大。CO₂ 激光器的最小输出功率为数毫瓦,最大可输出数十千瓦的连续激光功率。脉冲 CO₂ 激光器可输出 10⁴ J 的能量,脉冲宽度为 ns。

(2) 能量转换功率大大高于固体激光器。CO₂ 激光器的理论转换功率为 40%,实际应用中,电光转换效率也可达到 15%。

(3) CO₂ 激光波长为 10.6 μm,属于红外光,它可在空气中传播很远距离而衰减很小。

根据 CO₂ 激光器中气体流动的特点,可将其分为 4 种类型:封闭式、半封闭式、

横流式、轴流式。

1. 封闭式和半封闭式 CO₂ 激光器

封闭式 CO₂ 激光器的放电管由石英玻璃制成，石英玻璃线胀系数小，用作放电管时稳定性较好，放电管内有 CO₂、N₂ 和 He 混合气体。谐振腔一般采用平凹腔，全反射镜是一块球面镜，反射率可达 98% 以上。通过在电极上施加的直流高压，使混合气体辉光放电，激励 CO₂ 产生激光，从窗口射出。由于放电管输出功率仅有 50 W/m，为了获得较大功率，常把多节放电管串联或并联使用，有时为了减小体积，采用折叠式结构。封闭式激光器由于气体无法更换，一旦气体“老化”，放电管就无法正常工作。半封闭式 CO₂ 激光器针对上述问题，在放电管上开孔，通过抽气—充气系统更换气体，保持放电管正常工作。

2. 横流式 CO₂ 激光器

封闭式或半封闭式激光器产生激光能量时受到限制，主要是过热的工作气体不能得到及时冷却，导致激光输出功率降低。横流式激光器是通过冷却系统直接对工作气体进行换热冷却，可以获得 2000 W/m 的输出功率，由于横流式激光器输出的激光束、放电区气体流动方向、放电方向互相垂直，所以被称为横流式激光器。如图 1.2 所示，工作时工作气体由风机驱动在风管内流动，流速可达 60~100 m/s，当工作气体流过放电区时，激励 CO₂ 产生激光，气体经过放电区温度升高，风机驱动较高温度气体通过冷却器强制冷却，冷却的气体又流回放电区，如此循环获得稳定的激光输出。

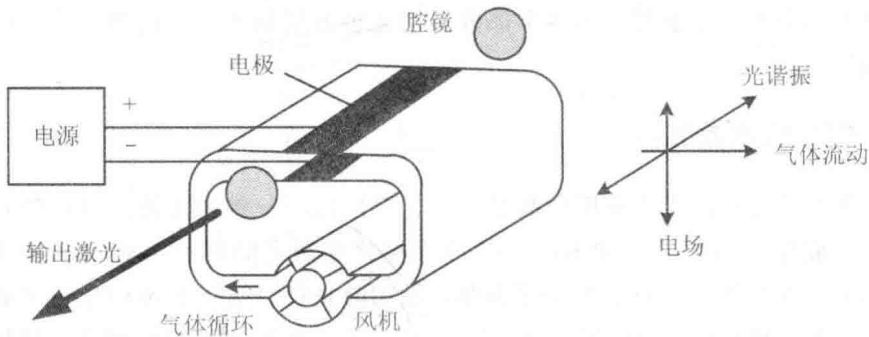


图 1.2 横流式 CO₂ 激光器结构示意图

3. 轴流式 CO₂ 激光器

轴流式 CO₂ 激光器中气体流动方向、放电方向以及激光的输出方向一致。根据气流速度的大小，又可分为慢速轴流和快速轴流两种。图 1.3 所示是快速轴流 CO₂ 激光器，它由放电管、谐振腔（包括后腔镜和输出镜）、高速风机以及热交换器等组成。放电管内可有多个放电区，图 1.3 所示为 4 个，高压直流电源在其间形成均匀的辉光放电，通常正极位于气流的上游，负极位于下游。为了提高激光器的输出功率，可增大气体流速。有的气体速度已接近声速，这时，每米放电管可获得 500~2000 W 的激光功率。