

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。

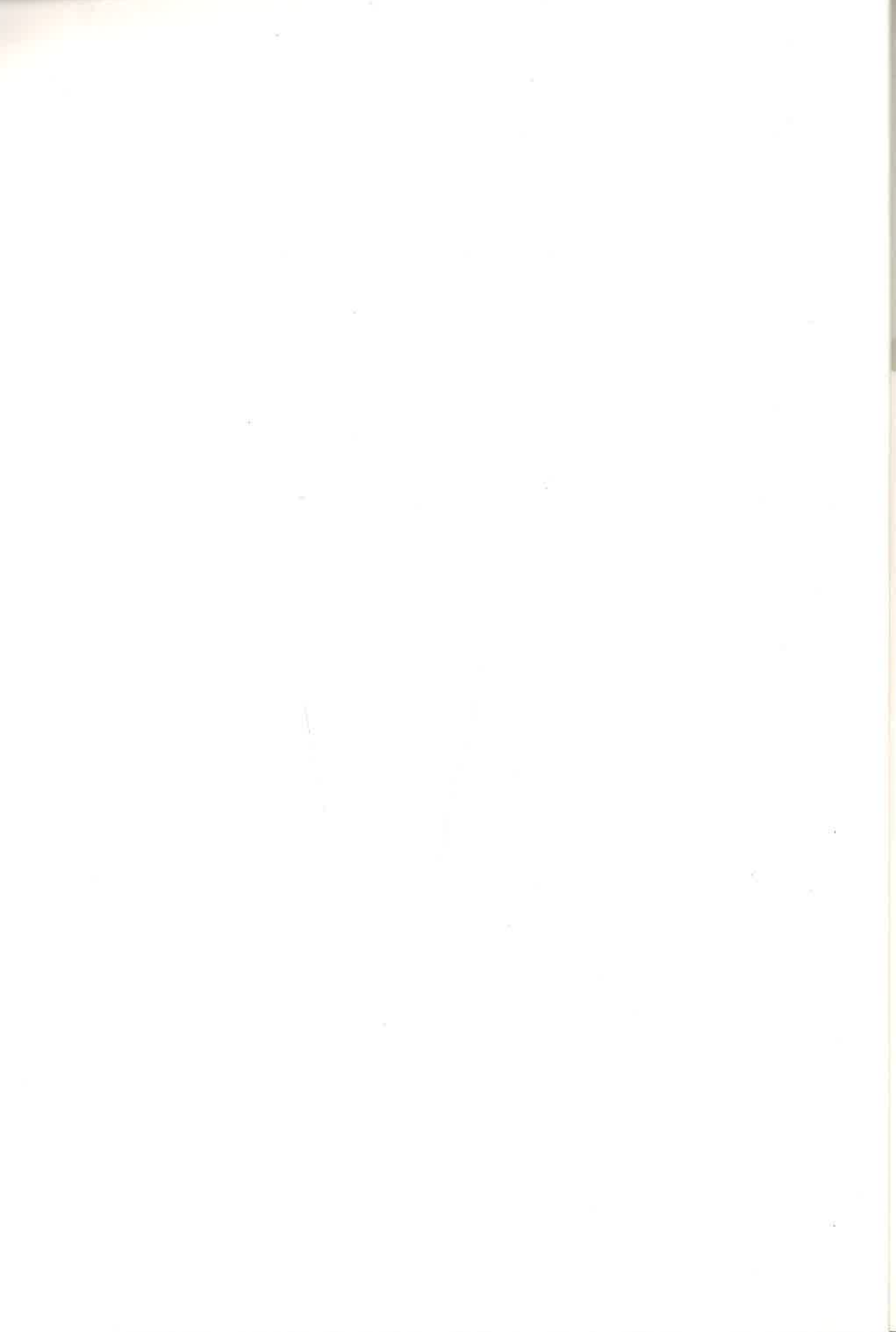
科学技术的进步、新材料的出现、极端条件下的性能需求等因素对产品的焊接质量和接头性能提出了新的、更高的要求，在许多情况下，传统的焊条电弧焊、埋弧焊、气体保护焊等方法难以保证产品的生产效率或满足产品的质量要求，鉴于此，一些特种焊接方法相继问世，如高能束（激光、电子束）焊接、扩散焊、压力焊、熔钎焊，以及复合热源焊接等。这些特种焊接技术近年来得到广泛应用，产生了巨大的经济和社会效益。

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.....

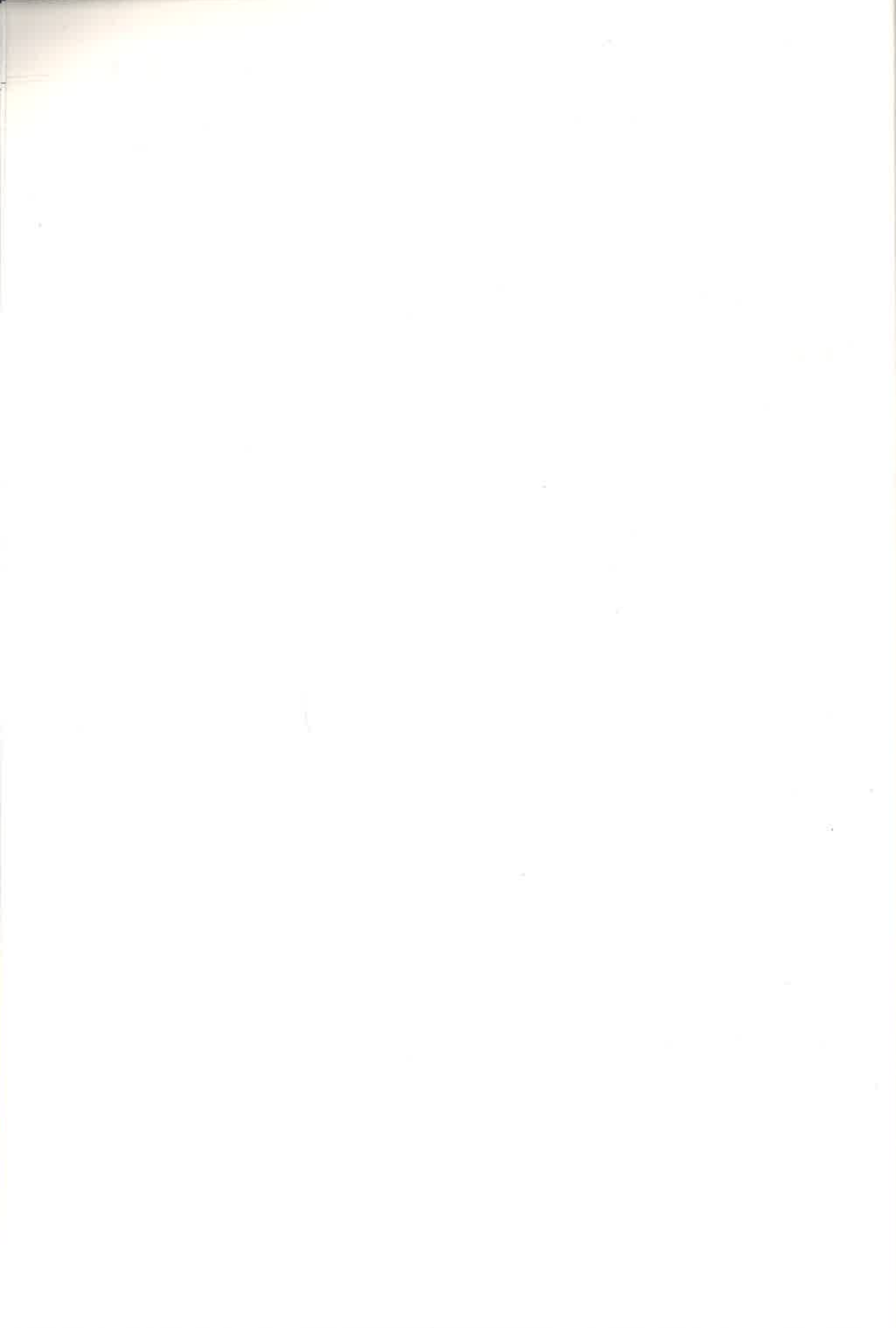
第 1 章 激光焊接及应用	1
1.1 激光焊接的原理及特征	1
1.1.1 激光的产生及特性	1
1.1.2 激光焊的原理	2
1.1.3 激光焊接的特点	5
1.2 激光焊设备	5
1.2.1 激光焊接设备的组成	5
1.2.2 CO ₂ 气体激光器	7
1.2.3 YAG 固体激光器	9
1.2.4 CO ₂ 激光器和 YAG 激光器的对比	10
1.2.5 其他激光器	11
1.3 激光焊焊接工艺	11
1.3.1 脉冲激光焊	11
1.3.2 连续激光焊	16
1.3.3 双光束激光焊	19
1.4 激光焊接的应用	21
1.4.1 激光焊接的应用领域及现状	21
1.4.2 钢的激光焊	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 CO_2 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 CO_2 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 CO_2 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。

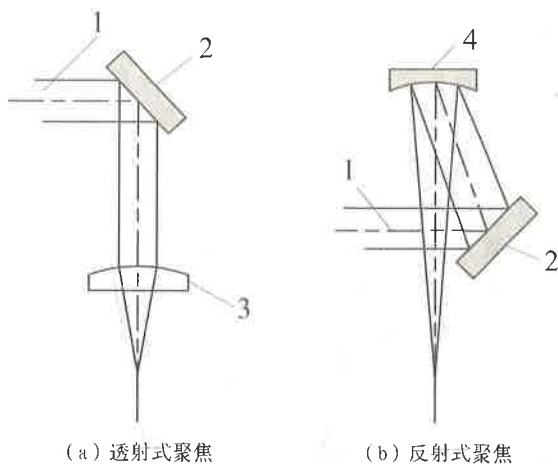


图 1.1 光束传输及聚焦系统示意图

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,最大可输出数十万瓦的连续激光功率。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。

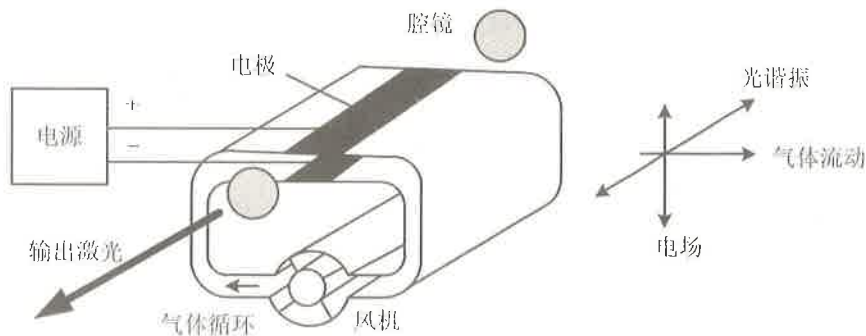


图 1.2 横流式 CO₂ 激光器结构示意图

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。

慢速轴流式激光器气体流动速度慢, 仅可获得 80 W/m 左右的功率, 但它消耗的气体量少, 减少 He 的损失, 使运行费用大大降低, 适合我国 He 气较贵的现状, 因此也得到采用。

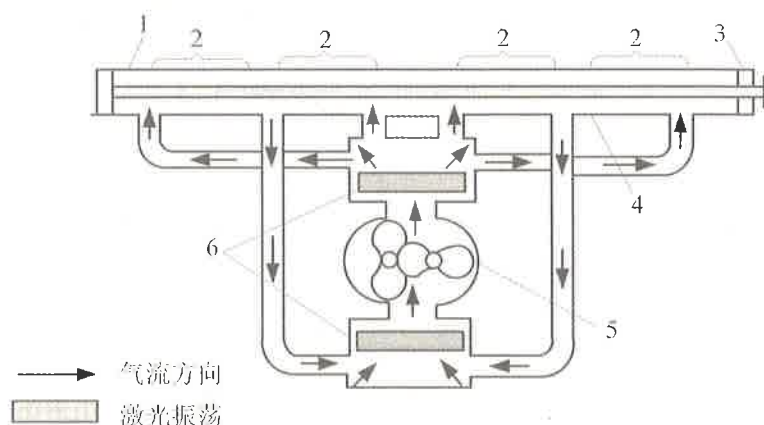


图 1.3 快速轴流式 CO_2 激光器示意图

- 1—后腔镜；2—高压放电区；3—输出镜；
4—放电管；5—高速风机；6—热交换器

1.2.3 YAG 固体激光器

固体激光器主要由激光工作物质（红宝石、YAG 或钕玻璃棒）、聚光器、谐振腔（全反射和输出窗口）、泵灯、电源及控制设备组成。

用于激光焊接的固体激光器主要是 Nd:YAG (Neodymium; yttrium, aluminum garnet) 激光器, 即 Nd:YAG 钕—钇铝石榴石, 简称 YAG。激光焊采用的 YAG 激光器平均输出功率为 $0.3 \sim 3 \text{ kW}$, 目前国外 YAG 激光器的最大功率已经达到 6 kW 以上。YAG 激光器可在连续或脉冲状态下工作, 也可以调制输出峰值功率很高的单一脉冲激光。YAG 激光器输出激光的波长为 $1.06 \mu\text{m}$, 是 CO_2 激光波长的 $1/10$ 。较短的波长有利于激光的聚焦和光纤传输, 也有利于金属表面的吸收, 这是 YAG 激光器的优势, 但 YAG 激光器采用光泵浦, 能量转换环节多, 器件总效率为 $2\% \sim 3\%$, 比 CO_2 激光器低, 而且泵浦灯使用寿命较短, 需要经常更换。另外, YAG 激光器一般输出多模光束, 模式不规则, 发散角大。

图 1.4 是固体激光器的基本结构示意图。激光工作物质 2 (又称激光棒) 是激光器的核心, 全反射镜 1 和部分反射镜 4 组成谐振腔, 8 为泵浦灯, 固体激光器一般都采用光泵抽运, 可用氙灯或氪灯。聚光腔 3 用以将泵浦源发出的光通过反射, 尽量多地照射到激光棒上以提高效率, 并可使泵浦光在激光棒表面分布均匀, 形成较好的光耦合, 提高输出激光的质量。理想的激光腔为椭圆形, 泵浦灯和激光棒分别放在两个焦点上, 聚光腔反射面镀有金膜或银膜, 并进行抛光, 以提高反射率。高压充电电源 6 用以对电容器组 7 充电, 已充电的电容器组通过泵浦灯放电, 电能部分转换为光能。

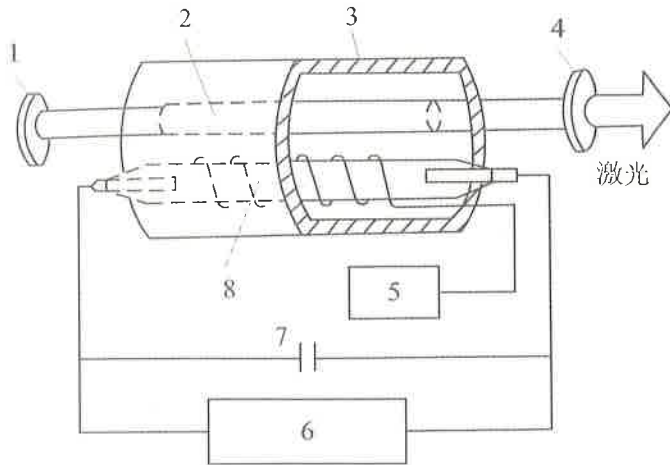


图 1.4 固体激光器基本结构示意图

1—全反射镜；2—激光棒；3—聚光腔；4—部分反射镜；
5—触发反射镜；6—高压充电电源；7—电容器组；8—泵浦灯

在钕铝石榴石单晶里掺入适量的三价钕离子 (Nd^{3+}) 便构成了掺钕—钕铝石榴石晶体，常表示为 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 。钕铝石榴石的化学式为 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ，它是由 Y_2O_3 和 Al_2O_3 按摩尔比 3:5 化合生成的。 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 的主要优点是易于实现粒子数反转，所需的最小激励光强比红宝石小得多。同时，掺钕—钕铝石榴石晶体具有良好的导热性，热胀系数小，适宜于在脉冲、连续和高重复率 3 种状态下工作，是目前在室温下唯一能连续工作的固体激光工作物质。它的光泵可采用氙灯或氪灯。为了提高 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 激光器的连续输出功率，可以多棒串联。

1.2.4 CO_2 激光器和 YAG 激光器的对比

激光器最重要的性能是输出功率和光束质量。从这两方面考虑， CO_2 激光器较 YAG 激光器有很大优势，是目前深熔焊接主要采用的激光器，生产上大多数激光器的输出功率为 1.5~6 kW，现在世界上最大的 CO_2 激光器输出功率已达 50 kW。YAG 激光器在过去相当长一段时间内提高功率有困难，一般功率小于 1 kW，用于薄小零件的微连接。但近几年来，国外在研制和生产大功率 YAG 激光器方面取得了突破性进展，最大功率已达 5 kW，并已投入市场。由于其波长短，仅为 CO_2 激光的 1/10，有利于金属表面吸收，可以用光纤传输，使导光系统大为简化。可以预料，大功率 YAG 激光器在今后一段时间内将获得迅速发展，并成为 CO_2 激光焊接的有力竞争对手。表 1.1 为 CO_2 激光器和 YAG 固体激光器的特点对比。

表 1.1 CO₂ 激光器和 YAG 固体激光器的比较

名称	波长/ μm	可输出功率	光束质量	光纤传输	光学部件	运行消耗和维护
CO ₂ 激光器	10.6	大	好	不可	需特殊材料的光学部件 (ZnSn, GaAs 等), 较贵	需消耗气体; 清理电极较麻烦
YAG 激光器	1.06	小	次之	可以	可用普通光学部件制造, 便宜	只需必要时更换泵浦灯, 维护简单

1.2.5 其他激光器

1. CO 激光器

CO 激光器输出波长约为 $5\ \mu\text{m}$ 的多条谱线, 波长是 CO₂ 激光器输出波长的一半, 因此, 被金属吸收的性能好。这种激光器能量转换效率比 CO₂ 激光器高, 目前 CO 激光器输出功率可达 10 kW 以上, 光束质量也高, 发散角也为 CO₂ 激光器的一半, 其他条件相同的情况下, 聚焦后的功率密度是 CO₂ 激光的 4 倍, 并有可能实现光纤传输。但只能运行于低温状态 ($40\ ^\circ\text{C}$ 以下), 其制造和运行成本均较高, 尚处在实用化研究阶段。

2. 半导体激光器

极有发展前途的高功率半导体二极管激光器, 激光波长短 ($0.85\sim 1.65\ \mu\text{m}$), 可用光纤传输, 电光转换效率极高, 激光体积小; 随着其可靠性和使用寿命的提高及价格的降低, 在某些焊接领域将替代 YAG 激光器和 CO₂ 激光器。

3. 准分子激光器

准分子激光器产生的激光为紫外激光, 波长在 $193\sim 351\ \text{nm}$ 之间, 具有波长短、光子能量高的特点, 光子能量会高于某些材料的键和能量, 能深入材料分子内部进行加工, 基于光化学作用进行非放热反应加工, 材料变形极小。

1.3 激光焊焊接工艺

1.3.1 脉冲激光焊

脉冲激光焊焊接时, 每个激光脉冲在焊件上形成一个焊点。焊件是由点焊或由点焊搭接成的缝焊方式实现连接的。由于脉冲激光焊的加热斑点很小, 主要用于微型精密元件和一些微电子元件的焊接。

1. 接头形式设计

脉冲激光焊加热斑点微小,约为微米数量级,因而用于厚度小于0.1 mm的薄片、几微米甚至几十微米的薄膜和直径可小至0.02 mm金属丝的焊接。如果使焊点重合,还可以进行零件的封装焊。图1.5为脉冲激光焊的几种接头形式。

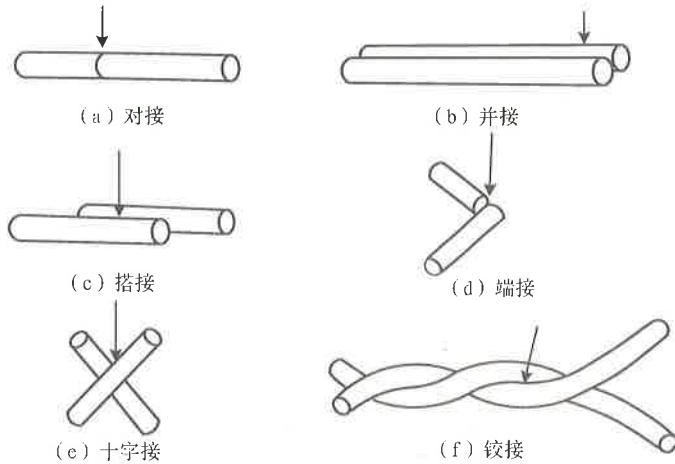


图 1.5 脉冲激光焊接头形式

2. 脉冲激光焊工艺参数

脉冲激光焊主要有四个焊接参数:脉冲能量、脉冲宽度、功率密度和离焦距。

(1) 脉冲能量和脉冲宽度

脉冲激光焊时,脉冲能量决定了加热能量的大小,它主要影响金属的熔化量;当能量增大时,焊点的熔深和直径增加。

脉冲宽度主要影响熔深,进而影响接头强度。脉冲宽度决定焊接时的加热时间,它影响熔深及热影响区(HAZ)大小。当脉冲宽度增加时,脉冲能量增加,在一定的范围内,焊点熔深和直径也增加,因而接头强度也随之增加。然而,当脉冲宽度超过一定值以后,一方面热传导所造成的热耗增加,另一方面,强烈的蒸发最终导致焊点截面积的减小,接头强度下降。脉冲能量一定时,对于不同材料,各存在着一个最佳脉冲宽度,此时焊接熔深最大。例如,焊铜时脉冲宽度为 $(1\sim 5)\times 10^{-2}$ s,焊铝为 $(0.5\sim 2)\times 10^{-2}$ s,焊钢为 $(5\sim 8)\times 10^{-3}$ s。最大熔深与材料的热物理性能,特别是热导率和熔点有关。导热性好、熔点低的金属容易获得较大的熔深。

脉冲能量和脉冲宽度在焊接时有一定的关系,随着材料厚度与性质的不同而变化。二者决定了激光功率的大小,其关系为

$$P=E/t \quad (1.1)$$

式中: P ——激光功率, W;

E ——激光脉冲能量, J;

t ——脉冲宽度, s。

为了维持一定的功率,随着脉冲能量的增加,脉冲宽度必须相应增加,才能得到较好的焊接质量。图 1.6 所示为不同厚度材料脉冲激光焊时所需的脉冲能量和脉冲宽度。脉冲能量 E 和脉冲宽度 t 成线性关系,随着焊件厚度的增加,激光功率相应增大。

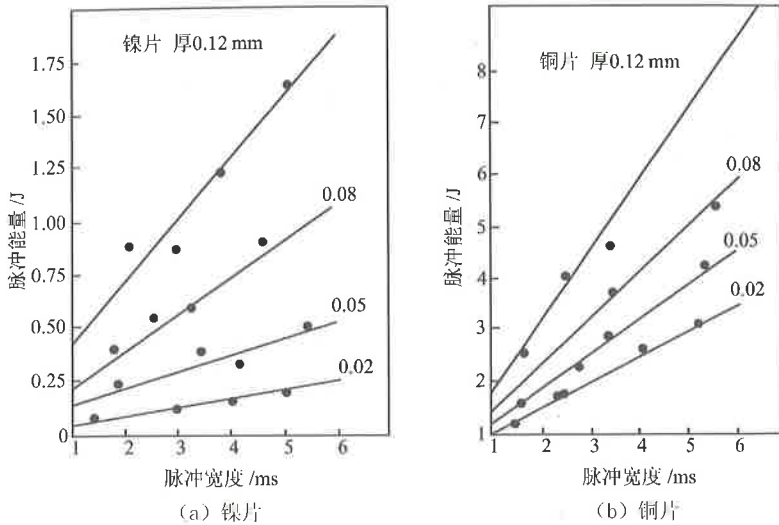


图 1.6 不同厚度材料脉冲激光焊时脉冲能量和脉冲宽度的关系

(2) 脉冲形状

对大多数金属来说,在激光脉冲作用的开始时刻,反射率都较高,因而可采用带前置尖峰的光脉冲。前置尖峰有利于焊件的迅速加热,可改善材料的吸收性能,提高能量的利用率,尖峰过后平缓的主脉冲可避免材料的强烈蒸发,这种形式的脉冲主要用于低重复频率焊接。而对高重复频率的脉冲激光焊来说,由于焊缝是由重叠的焊点组成,光脉冲照射处的温度高,因而,宜采用光强基本不变的平顶波。而对于某些易产生热裂纹和冷裂纹的材料,则可采用三阶段激光脉冲,从而使焊件经历预热→熔化→保温的变化过程,最终得到满意的焊接接头。

(3) 功率密度

脉冲激光焊时,功率密度为

$$P_d = 4E / (\pi d^2 t) \quad (1.2)$$

式中 P_d ——激光斑点上的功率密度, W/cm^2 ;

E ——激光脉冲能量, J;

d ——光斑直径, cm;

t ——脉冲宽度, s。

激光斑点的功率密度较小时,焊接以传热焊的方式进行,焊点的直径和熔深由热传导决定。当功率密度达到一定值 ($10^6 W/cm^2$) 后,焊接过程中产生小孔效应,形成深宽比大于 1 的深熔焊点,这时金属虽有少量蒸发,但并不影响焊点的形成。但功率密度过大后,金属蒸发剧烈,导致气化金属过多,形成一个不能被液态金属填满的小孔,难以形成牢固的焊点。

调整光束能量密度的主要方法有：调整输入能量；调整光斑大小；改变光斑中的能量分布；改变脉冲宽度和衰减波的陡度。

(4) 光斑大小和离焦量

① 光斑大小

如果已知透镜的焦距和发散角（见图 1.7），可以用下面的公式计算出光斑直径的最小值。

$$d = f\theta \quad (1.3)$$

式中： d ——光斑直径，cm；

f ——透镜的焦距，cm；

θ ——光束的发散角，rad。

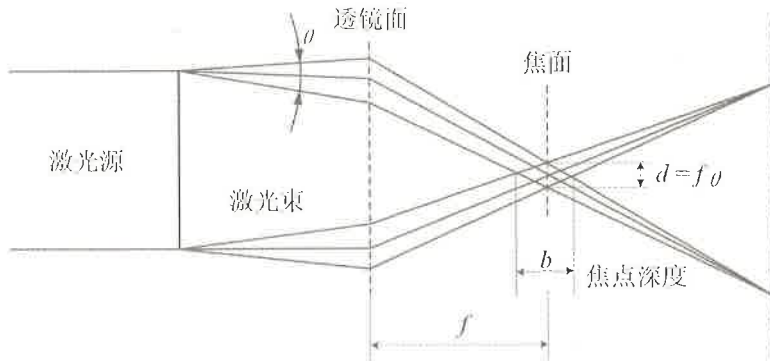


图 1.7 发散角与聚焦性

根据光的衍射现象，平行光束的发散角 θ 为

$$\theta = 1.27\lambda/D \quad (1.4)$$

式中： λ ——光束的波长， μm ；

D ——聚焦镜处的光束直径，cm。

经透镜聚焦的光束，在焦平面附近有一个直径和长度均很小的束腰，如图 1.7 中所标的 b ，焦点位于最小束腰位置，功率密度最大，束腰长度即是焦深。

当波长缩短、工作物质的直径增大时，光束的发散角变小，光束的宽度也就变窄。所以波长短的激光器，它的发散角就小些，光斑直径也就相应变得小些。

光束的发散角一般为 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ rad，焦距为几厘米的透镜在焦面上的光斑直径是几微米到几百微米，在微型件的焊接方面有着广阔的发展前途。由于光束可以聚焦成很小的光斑，所以看起来输出能量很小，只有零点几焦或者几十焦，但因为能量密度很高，所以能够进行焊接。

除了发散角之外，光斑直径的大小还与焦距有关。光斑直径可以通过缩短焦距而变小。但是由于焦点深度变浅，光束的有效区间就变窄了。

由此可见，当工作物质一定时，为了获得较小的光斑直径，应选用焦距较短的透镜。但是，当切割或加工一些厚度较大的材料时，为了获得较大的焦点深度，则应选用焦距较长的透镜。其与焦深 b 的关系式如下：

$$b = 16f^2\lambda/D^2 \quad (1.5)$$

短焦距透镜束腰长度小,加工头与焊件表面之间的可用距离变小。除装夹工件不方便外,还容易由熔融金属的飞溅或产生的金属蒸气而损伤透镜表面,造成光学元件过早损坏,而且焦距小,透镜球差严重,影响聚焦效果。如果焦距大,透镜的球差比较小,光学元件不容易受损伤,但是光斑直径大,影响聚焦点的能量密度。所以当选用透镜时,要综合考虑焊接要求,选择合适的焦距。

② 离焦量

离焦量(ΔF)是指焊接时焊件表面离聚焦激光束最小斑点的距离,也称为入焦量。激光束通过透镜聚焦后,如果焊件表面在焦点下面,则 $\Delta F > 0$,称为正离焦量;反之则 $\Delta F < 0$,称为负离焦量。改变离焦量可以改变激光加热斑点的大小和光束入射状况,焊接较厚板时,采用适当的负离焦量可以获得最大熔深。但离焦量太大会使光斑直径变大,降低光斑上的功率密度,使熔深减小。对于脉冲激光焊而言,其焊接件多为薄件,所以适合采用正离焦量。

(5) 脉冲激光焊的穿入深度

脉冲激光焊时,激光束本身对金属的直接穿入深度是有限的。根据光的吸收规律,金属表面对激光光束的吸收,将使光强迅速减弱,平面波振幅的衰减规律是:

$$I_X = I_0 e^{-2KX} \quad (1.6)$$

式中 I_0 ——入射激光束的光强;

I_X ——距金属表面深度 X 处的光强;

K ——金属的吸收系数;

X ——激光穿透深度。

对可见光来说,大多数金属在室温时的吸收系数为 $10^5 \sim 10^6/\text{cm}$,若定义吸收后光强 I_X 与入射光强 I_0 之比为 $1/e$ 时,激光被全部吸收,此时光的穿透深度在微米数量级。因此,脉冲激光焊时,传热熔化方式焊接的焊点最大穿透深度,是由金属表面层吸收光能后转化为热能,以热传导的方式进一步向金属深度加热的。所以其穿入深度主要决定于材料的导温系数,大的则穿入深度大。因此,对于传热熔化来说,能焊接的最大材料厚度,主要不是取决于激光器功率的大小,而是取决于金属导温系数的高低。

材料的导温系数与传热系数成正比,与密度和比热成反比。对于不锈钢和一些耐热合金而言,其导温系数一般较低,因此,在相同的脉冲宽度下,穿入深度较小。增大脉冲宽度可以增大穿入深度。对于银、铜等导温系数较高的材料,虽然穿入深度较大,但是由于导热性好,散失的热量也多些,因此,所需的能量也应大些。反之,焊接导温系数低的铁、镍等金属时散失的热量较少,因此所需的能量可以适当小些。

同一种金属,其穿入深度决定于脉冲宽度。脉冲宽度越大,则穿入深度也越大。关于激光焊的脉冲宽度下限,许多文献指出,必须等于或大于 1 ms ,否则即为打孔。脉冲宽度的上限一般约为 10 ms ,最大熔深约为 0.7 mm ,所以传热熔化焊接的最大穿入深度是有限的。

1.3.2 连续激光焊

1. 接头形式设计及装配要求

传统焊接方法使用的接头形式绝大部分都适合激光焊，但激光焊由于聚焦后的光束直径很小，因而对装配的精度要求很高。在实际应用中，连续激光焊最常用的接头形式是对接和搭接。

对接时，对于铁基合金和镍基合金材料，其装配间隙应小于被焊件厚度的 15%，零件的错边和不平度不得大于被焊件厚度的 25%；对于导热性好的材料，如铜合金、铝合金等，还应将误差控制在更小的范围内。

搭接是薄板连接时常用的接头形式。焊接时装配间隙应小于板材厚度的 25%。如果装配间隙过大，会造成上面焊件烧穿。当焊接不同厚度的焊件时，应将薄件置于厚件之上。同时，搭接还可以焊接多层板。

T形接头盒角接焊时，接头允许的最大间隙通常不超过腹板厚度的 5%。

图 1.8 给出了板材激光焊中常用的接头形式。其中卷边角接头的刚性最好，焊接时，如工艺参数适当，熔化金属正好填满间隙，内角外缘双面成形，这种接头既省工又省料，常用于金属壳体的制造。而叉形接头因熔池正好在焊件两边吻合处形成，并成小夹角以便更好地汇集激光能量，施焊中需稍加压力，但装配必须良好。

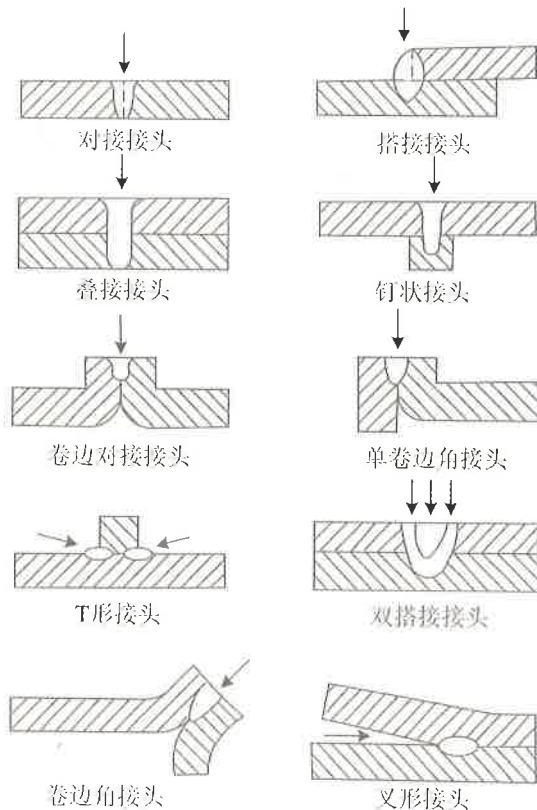


图 1.8 连续激光焊的接头形式

对于钢铁等材料,焊前对焊件进行表面除锈、脱脂处理即可。在要求较严格时,需要用乙醚、丙酮或四氯化碳清洗。

为了获得成形良好的焊缝,焊前必须将焊件装配良好。尽管焊接变形较小,但为了确保焊接过程中焊件间的相对位置不变,最好采用适当的方式装夹定位。

2. 连续激光焊的工艺参数

(1) 激光功率

激光功率是激光器的输出功率,没有考虑导光和聚焦系统所引起的损失。连续工作的低功率激光器可在薄板上以低速产生有限的传热焊缝。高功率激光器可用小孔法在薄板上以高速产生窄的焊缝,也可用小孔法在中厚板上以不低于 0.6 m/s 的低速产生深宽比大的焊缝。

激光焊熔深与输出功率密切相关。图 1.9 所示为不同材料激光焊时激光功率与熔深的关系。对一定的光斑直径,焊接熔深随着激光功率的增加而增大。尽管在不同的试验条件下可能有不同的试验结果,但熔深随激光功率的变化用公式近似地表示为

$$h \propto P^k \quad (1.7)$$

式中: h —— 熔深, mm;

P —— 激光功率, kW;

k —— 常数, $k \leq 1$, k 的典型试验值为 0.7 和 1.0。

可见,随着输出功率的增大,焊接的穿入深度增大。

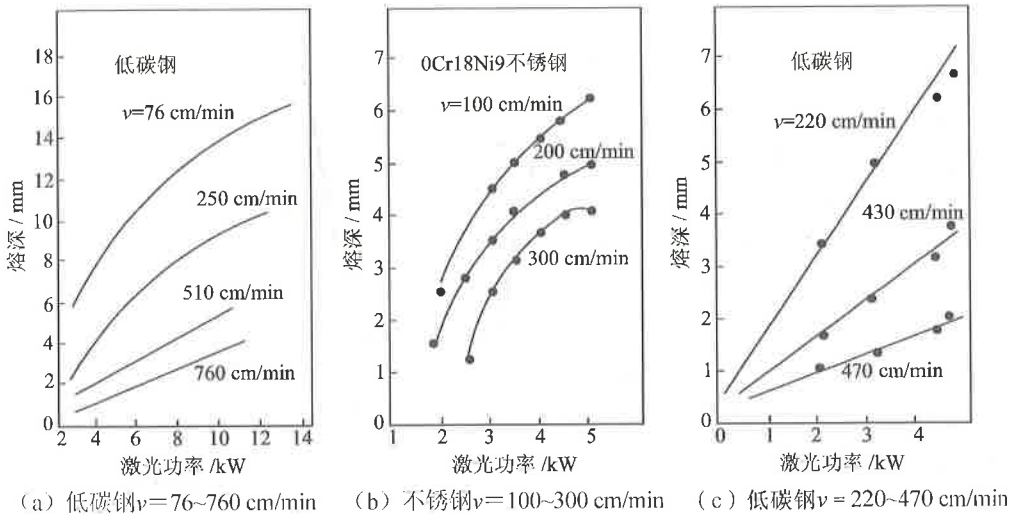


图 1.9 激光功率与不同材料熔深的关系

(2) 焊接速度

在一定激光功率下,提高焊接速度,热输入下降,焊缝熔深减小。适当降低焊接速度可加大熔深,但若焊接速度过低,熔深则不会再增加,反而使熔宽增大。当激光功率和其他参数保持不变时,焊缝熔深随着焊接速度的加快而减小。采用不同功率的激光焊,焊接速度与熔深的关系如图 1.10 所示。

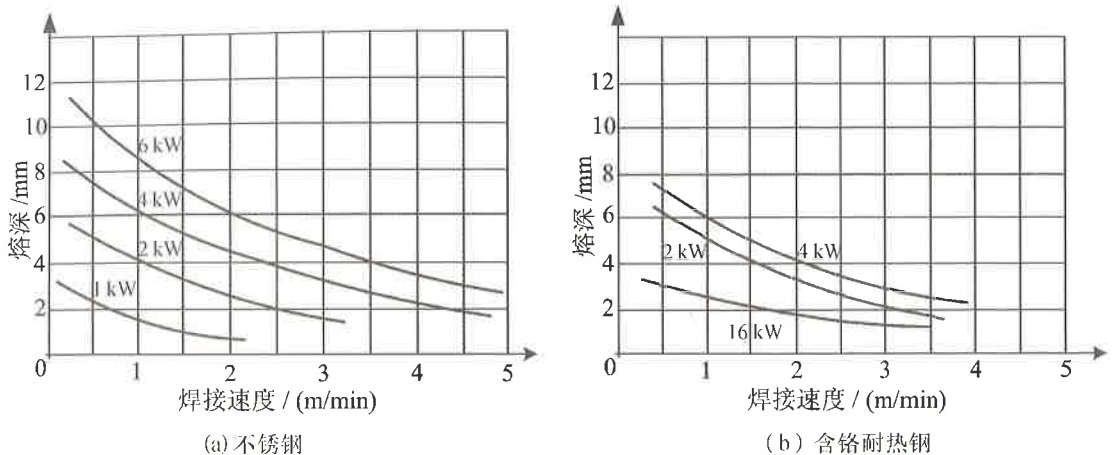


图 1.10 不同激光功率下焊接速度对焊缝熔深的影响

熔深与激光功率和焊接速度的关系可用下式表示:

$$h \approx \beta P^{1/2} v^{-\gamma} \quad (1.8)$$

式中: h ——熔深, mm;

P ——激光功率, kW;

v ——焊接速度, mm/s;

β 、 γ ——常数, 取决于激光源、聚焦系统和焊接材料。

激光深熔焊时, 维持小孔存在的主要动力是金属蒸气的反冲压力, 在焊接速度低到一定程度后, 热输入增加, 熔化金属越来越多, 当金属气化所产生的反冲压力不足以维持小孔的存在时, 小孔不仅不再加深, 甚至会崩溃, 焊接过程转变为传热焊型焊接, 因而熔深不会再增大。另外, 随着金属气化的增加, 小孔区温度上升, 等离子体的浓度增加, 对激光的吸收增加。这些原因使得低速焊时, 激光焊熔深有一个最大值。也就是说, 对于给定的激光功率等条件下, 存在一维持深熔焊接的最小焊接速度。

(3) 光斑直径

光斑直径是指照射到焊件表面的光斑尺寸大小。在激光器结构一定的情况下, 照射到焊件表面的光斑大小取决于透镜的焦距和离焦量。焊接时为获得深熔焊缝, 要求激光光斑上的功率密度较高。提高功率密度的方式有两个: 一是提高激光功率; 二是减小光斑直径。减小光斑直径比增加功率有效得多。减小光斑直径可通过使用短焦距透镜和降低激光束横模阶数来实现。低阶模焦可以获得更小的光斑。

(4) 离焦量

离焦量 (ΔF) 不仅影响焊件表面激光光斑大小, 而且影响光束的入射方向, 因而对焊接熔深、焊缝宽度和焊缝横截面形状有较大影响。在 ΔF 很大时, 熔深很小, 属于传热焊, 当 ΔF 减小到某一值后, 熔深发生跳跃性增加, 此处标志着小孔产生, 在熔深发生跳跃性变化的地方, 焊接过程是不稳定的, 熔深随着 ΔF 的微小变化而改变很大。激光深熔焊时, 熔深最大时的焦点位置位于焊件表面下方某处, 此时焊缝成形也最好。在 ΔF 相等的地方, 激光光斑大小相同, 但其熔深并不同。其主要原因是壁聚焦效应对

ΔF 的影响。在 $\Delta F < 0$ 时, 激光经孔壁反射后向孔底传播, 在小孔内部维持较高的功率密度, $\Delta F > 0$ 时, 光束经小孔壁的反射传向四面八方, 并且随着孔深的增加, 光束是发散的, 孔底处功率密度比前一种情况低得多, 因此熔深变小, 焊缝成形也变差。一般离焦量在焊件表面下 1.25~2.5 mm 时较好。

(5) 保护气体

激光焊时采用保护气体有两个作用: 一是保护焊缝金属不受有害气体的侵袭, 防止氧化污染, 提高接头的性能; 二是影响焊接过程中的等离子体, 这直接与光能的吸收和焊接机理有关。

大功率激光焊时, 在临近熔池表面之上会形成金属蒸气的激光等离子体。这种金属等离子体也就更加容易吸收激光束。由于等离子体的形成及散射现象, 激光束的光难以达到焊缝, 焊缝穿入深度也就不能增大, 使焊接能力显著下降。因此在一段时期内, 激光焊曾停滞不前, 只能焊一些薄件, 因而人们认为激光焊没有发展前途。

为了防止这样的激光等离子体的形成, 需在激光束照射区喷送适当的气体以去除等离子体, 常用的气体有氮气等。随着等离子体的消除, 熔深有所增大。产生这样等离子体的激光功率尽管也取决于光束的聚焦性, 但是从激光功率来说, 大体上在 8 kW 级以上。使用喷气体的方法对焊缝的形状也是有影响的, 主要表现在焊缝中间稍有弯曲。

激光焊时, 为了避免焊缝金属的氧化, 可像一般惰性气体保护焊一样, 对熔池进行气体保护, 有时还需要对焊缝背面进行气体保护, 具体使用什么气体作保护气体, 要根据所焊金属的性质而定。

在激光焊过程中采用保护气体, 可以抑制等离子体, 其作用机理如下:

其一, 通过增加电子与离子、中性原子相互碰撞来增加电子的复合速率, 降低等离子体中的电子密度。中性原子越轻, 碰撞频率越高, 复合速率越高。另外, 保护气体本身的电离能要较高, 才不致因气体本身的电离而增加电子密度。

其二, 利用流动的保护气体将金属蒸气和等离子体从加热区吹除。气体流量对等离子体的吹除有一定的影响。气体流量太小, 不足以驱除熔池上方的等离子体云, 随着气体流量的增加, 驱除效果增强, 焊接熔深也随之加大。但不能过分增加气体流量, 否则会引起不良后果和浪费, 特别是在薄板焊接时, 过大的气体流量会使熔池下塌形成穿孔。

不同的保护气体, 其作用效果不同。因为氦气最轻而且电离能最高, 因而使用氦气作为保护气体, 等离子体的抑制作用最强, 焊接时熔深最大。氩气的效果较差。但这种差别只是在激光功率密度较高、焊接速度较低、等离子体密度大时才较明显。在较低功率、较高焊接速度下, 等离子体很弱, 不同保护气体的效果差别很小。

1.3.3 双光束激光焊

双光束激光焊主要是解决激光焊对装配精度的适应性及提高焊接过程稳定性, 适用于薄板焊接及铝合金的焊接。这种工艺方法不仅有焊接熔深大、速度快、精度高的特点, 而且对于单束激光焊难以焊接的材料有很好的适用性。例如, 双光束激光焊技

术在汽车工业中常用于镀锌钢板的焊接，在不等厚度板焊接和厚大板的焊接中也都有应用。不等厚度板的双光束激光焊如图 1.11 所示。

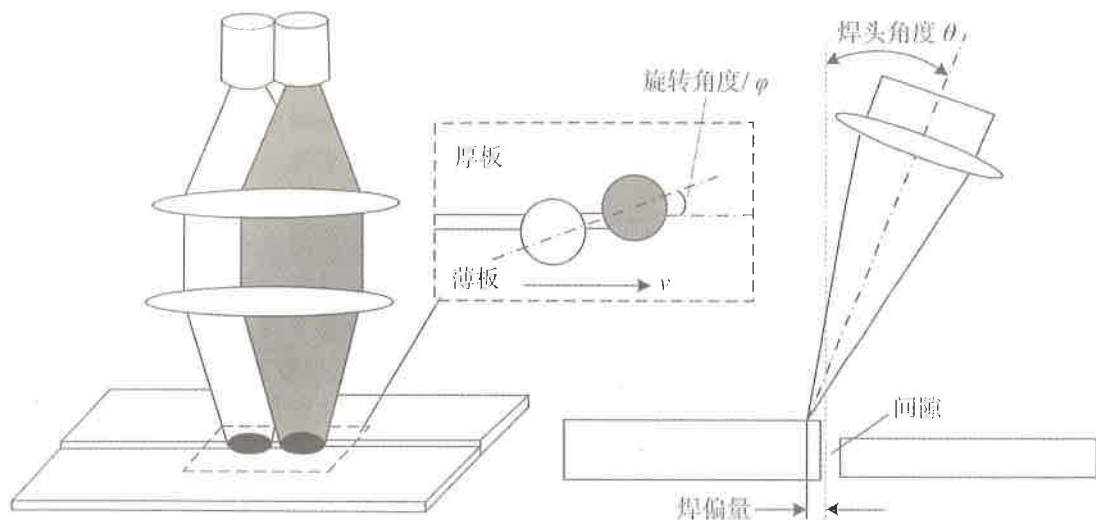


图 1.11 不等厚度板的双光束激光焊示意图

双光束激光焊可以将同一种激光采用光学方法分离成两个单独的光束进行焊接，也可以采用两束不同类型的激光进行组合， CO_2 激光、YAG 激光和高功率半导体激光相互之间都可以进行组合。

双光束激光焊在焊接过程中同时使用两束激光，光束排布方式、间距、两光束的角度、聚焦位置以及两光束的能量比等是重要的参数。双光束激光的排布方式一般有两种：一是沿焊接方向呈串列式排布，可以降低熔池冷却速度，减小焊缝的淬硬倾向和气孔的产生；二是在焊缝两侧并列排布或交叉排布，以提高对接头间隙的适应性。

采用两种不同类型的激光束组成双光束时，有多种组合方式。例如，使用一台能量呈高斯分布的高质量 CO_2 激光进行主要的焊接工作，再辅以一台能量呈矩形分布的半导体激光进行辅助加热。这种组合比较经济，两光束的功率能独立调节，可以针对不同的接头形式，通过调节 CO_2 激光与半导体激光的重叠位置获得可调的温度场，更适用于焊接过程控制。另外，也可将 YAG 激光与 CO_2 激光组合成双光束进行焊接，将连续激光和脉冲激光组合进行焊接，还可以将聚焦光束和散焦光束组合进行焊接。通过改变光束能量、间距或两光束的能量分布，对焊接温度场进行调节，改变熔孔模式与液态金属的流动方式，为激光焊工艺提供了更大范围的选择空间。

1.4 激光焊接的应用

1.4.1 激光焊接的应用领域及现状

激光焊作为一种独特的焊接方法日益受到重视。目前世界上 1 kW 以上的激光加工设备已超过万台,其中 1/3 用于焊接。早期的激光应用大都是采用脉冲固体激光器,进行小型零部件的点焊和由焊点搭接而成的缝焊。

20 世纪 70 年代,大功率 CO₂ 激光器的出现,开辟了激光应用于焊接的新纪元。激光焊在汽车、钢铁、船舶、航空、轻工等行业得到了日益广泛的应用,特别是在航空航天领域得到了成功的应用。大功率 CO₂ 激光焊用于生产方面的越来越多,激光焊接的部分应用实例见表 1.2。

表 1.2 激光焊接的部分应用

应用部门	应用实例
航空	发动机壳体、机翼隔架、膜盒等
电子仪表	集成电路内引线、显像管电子枪、全钽电容、调速管、仪表游丝等
机械	精密弹簧、针式打印机零件、金属薄壁波纹管、热电偶、电液伺服阀等
钢铁冶金	焊接厚度 0.2~8 mm、宽度 0.5~1.8 mm 的硅钢片,高中低碳钢和不锈钢,焊接速度为 100~1000 cm/min
汽车	汽车底架、传动装置、齿轮、点火器中轴与拨板组合件等
医疗	心脏起搏器以及心脏起搏器所用的锂碘电池等
食品	食品罐(用激光焊代替传统的锡焊或接触高频焊,具有无毒、焊速快、节省材料以及接头美观、性能优良等特点)等
其他	燃气轮机、换热器、干电池锌筒外壳、核反应堆零件等

脉冲激光焊主要用于微型件、精密元件和微电子元件的焊接。低功率脉冲激光焊常用于直径 0.5 mm 以下金属丝与丝(或薄膜)之间的点焊。

连续激光焊主要用于厚板深熔焊。对接、搭接、端接、角接均可采用连续激光焊。最常见的接头形式是对接和搭接。对接间隙小于 0.15δ , 错边小于 0.25δ ; 搭接间隙小于 0.25δ (δ 为板厚)。

激光焊接虽然在焊接深度方面比电子束焊小一些,但由于可免去电子束焊真空室对零件的局限,无须在真空条件下进行焊接,故其应用前景更为广阔。20 世纪 80 年代以来,国外激光焊设备每年以 25% 的比例增长。激光加工设备常与机器人结合起来组成柔性加工系统,使其应用范围得到进一步扩大。

焊接领域目前主要采用 YAG 固体激光器和 CO₂ 气体激光器, 这两种激光器可以互相弥补自身的不足, 应用实例见表 1.3。

表 1.3 脉冲 YAG 和连续 CO₂ 激光焊接应用实例

激光类型	材料	厚度 /mm	焊接速度	焊缝类型	备注
脉冲 YAG	钢	<0.6	8 点/秒 2.5 m/min	点焊	适用于受到限制的复杂件
	不锈钢	1.5	0.001 m/min	对接	最大厚度 1.5 mm
	钛	1.3	—	对接	反射材料 (如 Al、Cu) 的焊接; 以脉冲提供能量, 特别适于点焊
连续 CO ₂ 激光器	钢	0.8	1~2 m/min	对接	最大厚度: 0.5 mm, 300W 5 mm, 1kW 7 mm, 2.5kW 10 mm, 5kW
		20	0.3 m/min	对接	
	钢>2	2~3 m/min	小孔		

激光焊的特点之一是适用于多种材料的焊接。所有可以用常规焊接方法焊接的材料或具有冶金相容性的材料都可以用 CO₂ 激光束进行焊接。用 10~15 kW 的激光功率, 单道焊缝熔深可达 15~20 mm。激光焊的高功率密度及高焊接速度, 使得激光焊缝及热影响区很窄, 所引起的焊件变形小。

1.4.2 钢的激光焊

1. 碳素钢

由于激光焊的加热速度和冷却速度非常快, 所以在焊接碳素钢时, 随着含碳量的增加, 焊接裂纹和缺口敏感性也会增加。

目前对民用船体结构钢 A、B、C 级的激光焊已趋成熟。试验用钢的厚度范围分别为 A 级 9.5~12.7 mm; B 级 12.7~19.0 mm; C 级 25.4~28.6 mm。在其成分中, 碳的质量分数均不大于 0.25%, Mn 为 0.6%~1.03%, 脱氧程度和钢的纯度从 A 级到 C 级递增。焊接时, 使用的激光功率为 10 kW, 焊接速度为 0.6~1.2 m/min, 焊缝除 20 mm 以上厚板需双道焊外, 其余均为单道焊。

激光焊接头的力学性能试验结果表明, 所有船体用 A、B、C 级钢的焊接接头抗拉性能都很好, 均断在母材处, 并具有足够的韧性。

(1) 焊接实例

① 冷轧低碳钢板的焊接

板厚为 0.4~2.3 mm, 宽度为 508~1279 mm 的低碳钢板, 用功率 1.5 kW 的 CO₂ 激光器焊接, 最大焊接速度为 10 m/min, 投资成本仅为闪光对焊的 2/3。

② 镀锡板罐身的激光焊

镀锡板俗称马口铁, 主要特点是表层有锡和涂料, 是制作小型喷雾罐身和食品罐

身的常用材料。用高频电阻焊工艺,设备投资成本高,并且电阻焊焊缝是搭接,耗材也多。小型喷雾罐身,由约0.2 mm厚的镀锡板制成,用1.5 kW激光器,焊接速度可达26 m/min。

用0.25 mm厚的镀锡板制作的食品罐身,用700 W的激光焊进行焊接,焊接速度为8 m/min以上,接头的强度不低于母材,没有脆化倾向,具有良好的韧性。这主要是因为激光焊焊缝窄(约0.3 mm),热影响区小,焊缝组织晶粒细小。另外,由于净化效应,使焊缝含锡量得到控制,不影响接头的性能。焊后的翻边及密封性检验表明,无开裂及泄漏现象。英国CMB公司用激光焊焊接罐头盒纵缝,每秒可焊10条,每条焊缝长120 mm,并可对焊接质量进行实时监测。

2. 低合金高强度钢

低合金高强钢的激光焊,只要所选择的焊接参数适当,就可以得到与母材力学性能相当的接头。HY-130钢是一种经过调质处理的低合金高强钢,具有很高的强度和较高的抗裂性。采用常规焊接方法时,焊缝和热影响区组织是粗晶、部分细晶及原始组织的混合体,接头的韧性和抗裂性与母材相比要差得多,而且焊态下焊缝和热影响区组织对冷裂纹很敏感。

激光焊后,沿着焊缝横向制作拉伸试样,使焊缝金属位于试样中心,拉伸结果表明激光焊的接头强度不低于母材,塑性和韧性比手工电弧焊和气体保护焊接头好,接近于母材的性能。

试验结果表明,激光焊焊接接头不仅具有高强度,而且具有良好的韧性和抗裂性,它的动态撕裂能与母材相比,有的甚至高于母材。激光焊接头具有高强度、良好的韧性和抗裂性,其原因如下:

(1) 激光焊焊缝细、热影响区窄。焊接裂纹并不总是沿着焊缝或热影响区扩展,常常是扩展进母材。冲击断口上大部分区域是未受热影响的母材,因此整个接头的抗裂性实际上很大一部分是由母材所提供的。

(2) 从接头的硬度和显微组织的分布来看,激光焊有较高的硬度和较陡的硬度梯度,这表明可能有较大的应力集中出现。但是,在硬度较高的区域,对应于细小的组织。高的硬度和细小组织的共生效应使得接头既有高的强度,又有足够的韧性。

(3) 激光焊热影响区的组织主要为马氏体,这是由于它的焊接速度高、热输入小所造成的。HY-130钢的含碳量很低,焊接过程中由于冷却速度快,形成低碳马氏体,加上晶粒细小,接头性能比手工电弧焊和气体保护焊要好。

(4) 低合金钢激光焊时,焊缝中的有害杂质元素大大减少,产生了净化效应,提高了接头的韧性。

3. 不锈钢

对Ni-Cr系不锈钢进行激光焊时,其材料具有很高的能量吸收率和熔化效率。用CO₂激光焊焊接奥氏体不锈钢时,在功率为5 kW,焊接速度为1 m/min,光斑直径为0.6 mm的条件下,光的吸收率为85%,熔化效率为71%。由于焊接速度快,减轻了不锈钢焊接时的过热现象和线膨胀系数大的不良影响,焊缝无气孔、夹杂等缺陷,接

头强度和母材相当。

不锈钢激光焊的另一个特点是，用小功率 CO_2 激光焊焊接不锈钢薄板，可以获得外观上成形良好、焊缝平滑美观的接头。不锈钢的激光焊，用于核电站中不锈钢管、核燃料包等的焊接，也可用于化工等其他工业部门。

4. 硅钢

硅钢片是一种应用广泛的电磁材料，但采用常规的焊接方法很难进行焊接。目前采用 TIG 焊的主要问题是接头脆化，焊态下接头的反复弯曲次数低或者不能弯曲，因而焊后不得不增加一道火焰退火工序，增加了工艺流程的复杂性。

用 CO_2 激光焊焊接硅钢薄板中焊接性最差的 Q112B 高硅取向变压器钢（板厚 0.35 mm），获得了满意的结果。硅钢焊接接头的反复弯曲次数越高，接头的塑性和韧性越好。几种焊接方法（TIG 焊、光束焊和激光焊）的接头反复弯曲次数的比较表明，激光焊接头最为优良，焊后不经过热处理即可满足生产线对接头韧性的要求。

生产中半成品硅钢板，一般厚度为 0.2~0.7 mm，幅宽为 50~500 mm，常用的焊接方法是 TIG 焊，但焊后接头脆性大，用 1 kW 的 CO_2 激光焊焊接这类硅钢薄板，最大焊接速度为 10 m/min，焊后接头的性能得到了很大改善。

1.4.3 有色金属的激光焊

1. 铝及其合金的激光焊

铝及铝合金激光焊的主要困难是它们对激光束的反射率高。铝是热和电的良导体，高密度的自由电子使它成为光的良好反射体，起始表面反射率超过 90%。也就是说，深熔焊必须在小于 10% 的输入能量开始，这就要求很高的输入功率，以保证焊接开始时必须的功率密度。而小孔一旦生成，它对光束的吸收率迅速提高，甚至可达 90%，从而使焊接过程顺利进行。

铝及铝合金激光焊时，随温度的升高，氢在铝中的溶解度急剧升高，溶解于其中的氢成为焊缝的缺陷源。焊缝中多存在气孔，深熔焊时根部可能出现空洞，焊道成形较差。在高功率密度、高焊接速度下，可获得没有气孔的焊缝。

铝及其合金对输入能量强度和焊接参数很敏感，要获得良好的无缺陷的焊缝，必须严格选择焊接参数，并对等离子体进行良好的控制。铝合金激光焊时，用 8 kW 的激光功率可焊透厚度 12.7 mm 的材料，焊透率大约为 1.5 mm/kW。

连续激光焊可以对铝及铝合金进行从薄板精密焊到板厚 50 mm 深穿入焊的各种焊接。铝及铝合金的 CO_2 激光焊的工艺参数见表 1.4。

表 1.4 铝及铝合金的 CO_2 激光焊的工艺参数

材料	板厚 /mm	焊接速度 / $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	功率 /kW
铝及铝合金	2	4.17	5

2. 钛及其合金的激光焊

钛合金化学性能高，在高温下容易氧化，在 330℃ 时晶粒开始长大。在进行激光焊

时,正反面都必须施加惰性气体保护,气体保护范围须扩大到 $400\sim 500^{\circ}\text{C}$ (即拖罩保护)。钛合金对接时,焊前必须把坡口清理干净,可先用喷砂处理,再用化学方法清洗。另外,装配要精确,接头间隙宽度要严格控制。

钛合金激光焊时,焊接速度一般较高($80\sim 100\text{ m/h}$),焊接熔深大致为 1 mm/kW 。

对工业纯钛和Ti-6Al-4V合金的 CO_2 激光焊研究表明,使用 4.7 kW 的激光功率,焊接厚度 1 mm 的Ti-6Al-4V合金,焊接速度可达 15 m/min 。检测表明,接头致密,无气孔、裂纹和夹杂,也没有明显的咬边。接头的屈服强度、拉伸强度与母材相当,塑性不降低。在适当的焊接参数下,Ti-6Al-4V合金接头具有与母材同等的弯曲疲劳性能。

钛及其合金焊接时,氧气的溶入对接头的性能有不良影响。在激光焊时,只要使用了保护气体,焊缝中的氧就不会有显著变化。激光焊焊接高温钛合金,也可以获得强度和塑性良好的接头。

1.4.4 高温合金的激光焊

激光焊可以焊接各类高温合金,包括电弧焊难以焊接的含高Al、Ti的时效处理合金。用于焊接的激光发生器一般为 CO_2 连续或脉冲激光发生器,功率为 $1\sim 50\text{ kW}$ 。

激光焊焊接这类高温材料时,容易出现裂纹和气孔。采用 2 kW 快速轴向流动式激光器,对厚度 2 mm 的Ni基合金进行焊接,最佳焊接速度为 8.3 mm/s ;厚度 1 mm 的Ni基合金,最佳焊接速度为 34 mm/s 。

高温合金激光焊的力学性能较高,接头强度系数为 $90\%\sim 100\%$ 。表1.5列出了几种高温合金激光焊焊接接头的力学性能。

表 1.5 高温合金激光焊焊接接头的力学性能

母材 牌号	厚度 /mm	状态	试验温度 / $^{\circ}\text{C}$	拉伸性能			强度系数 /%
				抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	延伸率/%	
GH141	0.13	焊态	室温	859	552	16	99
			540	668	515	8.5	93
			760	685	593	2.5	91
			990	292	259	3.3	99
GH3030	1.0	焊态	室温	714	—	13	88.5
	2.0			729	—	18	90.3
GH163	1.0	固溶+ 时效		1 000	—	31	100
	2.0			973	—	23	98.5
GH4169	6.4		1 387	1 210	16.4	100	

激光焊用的保护气体,推荐采用氦气或氦气与少量氟的混合气体。使用氦气成本

较大,但是氦气可以抑制离子云,增加焊缝熔深。高温合金激光焊的接头形式一般为对接和搭接接头,母材厚度可达 10 mm。接头制备和装配要求很高,与电子束焊类似。激光焊的主要参数是输出功率和焊接速度等,它是根据母材厚度和物理性能通过试验确定的。

1.4.5 异种材料的激光焊

异种材料的激光焊接是指两种不同材料的激光熔焊。异种材料是否可采用激光焊以及接头强度性能如何,取决于两种材料的物理性质,如熔点、沸点等。如果两种材料的熔点、沸点接近,能形成较为牢固连接的激光焊参数范围较大,接头区可获得良好的组织性能。

各种金属组合采用激光焊的可能性见表 1.6。在一定条件下,Cu-Ni、Ni-Ti、Cu-Ti、Ti-Mo、黄铜-铜、低碳钢-铜、不锈钢-铜及其他一些异种金属材料,都可以进行激光焊。Ni-Ti 异种材料焊接熔合区主要由高分散度的微细组织组成,并有少量金属间化合物分布在熔合区界面。在某些情况下,用激光焊接异种金属时还需要加入中间过渡金属(通常采用箔片),以改善焊接接头的性能。例如,Majumdar 等人实现了钛合金(Ti-6Al-4V)和铝合金(Al-Mg-Si)的无裂纹焊接。由于激光熔化铝和钛合金,焊缝金属中会形成金属间化合物(主要是 TiAl 和 Ti₃Al)。这些金属间化合物非常脆弱,而因凝固后受应力影响,Al 合金附近发现有裂纹形成。鉴于此,将 Nb 箔片作为缓冲材料加入到钛合金和铝合金之间,使接头的强韧性增加,性能得到优化。

表 1.6 各种金属组合采用激光焊的可能性

	Al	Mo	Fe	Cu	Ta	Ni	Si	W	Ti	Au	Ag	Co
Al	○					√		√		√		
Mo		○			√							
Fe			○	√	√							
Cu			√	○	√	√	√					
Ta		√	√	√	○	√						
Ni	√			√	√	○		√		√	√	
Si				√						√		
W	√					√		○				
Ti									○			
Au	√					√	√			○		√
Ag						√					○	
Co										√		○

注:“√”为焊接性良好;“○”为同种金属焊接;空白为焊接性差或无报道数据。

1.4.6 激光焊的发展趋势

近年来,激光焊接技术除了向大功率方向发展外,激光焊接过程的自动化、复合焊接方法、先进材料的激光焊接等迅速发展,衍生出众多的研究领域和方向。同时,随着激光焊接成本的降低,焊接技术的成熟,激光焊也真正走出实验室,走向工业应用,目前已被广泛应用于航空航天、汽车制造、电子轻工等众多领域。

在电厂的建造及化工行业,有大量的管—管、管—板接头,用激光焊可得到高质量的单面焊双面成形焊缝。在舰船制造业,用激光焊焊接大厚度板(可加填充金属),接头性能优于通常的电弧焊,能降低产品成本,提高构件的可靠性,有利于延长舰船的使用寿命。激光焊还应用于电动机定子铁芯的焊接,发动机壳体、机翼隔架等飞机零件的生产,航空涡轮叶片的修复等。

国外 20 世纪 80 年代以来,激光焊以 25% 的比例增加,激光加工设备与机器人结合起来组成的加工系统,使其应用得到进一步扩大。图 1.12 为激光焊在工业上的应用实例。



(a) 激光焊在汽车制造中的应用

(b) 激光焊在飞机制造中的应用

图 1.12 激光焊在工业应用中的实例

激光焊接还有其他形式的应用,如激光钎焊、激光—电弧焊、激光填丝焊、激光压焊等。激光钎焊主要用于印刷电路板的焊接,激光压焊主要用于薄板或薄钢带的焊接。