



“十三五”国家重点出版物出版规划项目
材料科学研究与工程技术系列图书

特种先进连接方法

Special Advanced Welding and Joining Technology

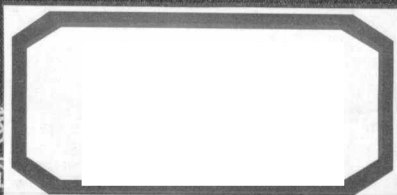
(第3版)

● 张柯柯 等编著

哈尔滨工业大学出版社



“十三五”国家
材料科学研究



目

特种先进连接方法

Special Advanced Welding and Joining Technology

(第3版)

● 张柯柯 等编著

哈尔滨工业大学出版社

内容简介

本书系统介绍了适应先进制造、高新技术和新材料发展需要的特种先进连接方法—激光焊、电子束焊、超塑性焊接和超塑成形/扩散连接(SPF/DB)、摩擦焊、爆炸焊和微连接技术等先进连接方法的基本原理、工艺及设备、常用材料及典型零件的连接技术特点、适用范围、质量检测及控制等基础内容和国内外相关领域的新成就及发展趋势。许多图表直接引自最新的国内外标准和典型企业成熟经验,可供实际生产中借鉴。

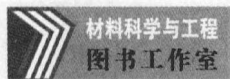
本书注重基础知识和基本概念,理论联系实际,加强能力培养,兼顾材料成型及控制工程(焊接)等不同专业(方向)的教学要求,深度和广度并重。既可作为高等院校材料成型及控制工程(焊接)及相关专业(方向)的主干课程教材,亦可供从事焊接科研和生产的科技工作者和工程技术人员阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

特种先进连接方法/张柯柯等编著. —3 版. —哈尔滨:
哈尔滨工业大学出版社, 2016. 8
ISBN 978-7-5603-6113-0

I. ①特… II. ①张… III. ①焊接工艺
IV. ①TG44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 158611 号



责任编辑 张秀华 杨 桦
封面设计 卞秉利
出版发行 哈尔滨工业大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006
传 真 0451-86414749
网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>
印 刷 哈尔滨市工大节能印刷厂
开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 21 字数 480 千字
版 次 2008 年 6 月第 1 版 2016 年 8 月第 3 版
2016 年 8 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5603-6113-0
定 价 38.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

哈尔滨工业大学出版社

第3版前言

特种先进连接方法作为材料成型及控制工程(焊接)专业的主干课程,多年来鲜见相关教材的出版。根据教育部材料成型及控制工程专业教学指导委员会制定的“材料成型及控制工程(焊接)专业培养方案”,结合本科院校专业(方向)培养目标和课程设置要求编写了本书。自2008年第1版出版以来,承蒙广大读者和同仁的厚爱,多次印刷。近年来,随着先进连接方法的发展和材料成型及控制工程(焊接)专业改革的深入,本书的适时更新与不断完善势在必行。

本次是修订后的第3版,在保持“原版特色、组织结构和内容体系”的前提下,力求最大程度地反映现代连接技术的最新研究成果和材料成型及控制工程(焊接)专业最新教学改革成果,主要介绍了适应先进制造、高新技术和新材料发展需要的特种先进连接方法,旨在满足现代焊接高层次专业人才需求。本着力求反映现代连接技术的最新研究成果,突出重点,兼顾“先进性”、“典型性”、“知识性”和“应用性”的原则,对熔化焊、压力焊、钎焊以及粘接等连接方法中特种先进连接技术进行了合理筛选以满足专业教学需要,具有内容体系新、综合性及工程应用性强等鲜明特点,被列入“十三五”国家重点出版物出版规划项目。全书分三大部分,系统阐述了高能束焊接技术(激光焊和电子束焊)、固态连接技术(超塑性焊接和超塑成形/扩散连接、摩擦焊和爆炸焊接)和微电子工程所需的微连接技术等主要特种先进连接方法的基本原理、工艺及设备、常用材料及典型零件的连接技术特点、适用范围、质量检测及控制和国内外相关领域的新成就及发展趋势。考虑到材料成型及控制工程(焊接)及相关专业的教学要求,本书既有一定深度又有一定广度,在使用时视情况选取。本书注重基础知识和基本概念,理论联系实际,加强能力的培养,许多图表直接引自最新的国内外标准和典型企业成熟经验,可供实际生产中借鉴。

本书由河南科技大学张柯柯教授等编著,作者分工如下:第1章,涂益民教授;第2章,石红信副教授;第3章,张柯柯教授;第4章,于华副教授;第5章,李炎教授;第6章,闫焉服教授。全书由张柯柯教授统稿定稿,由杨蕴林教授主审。河南科技大学王要利、张鑫讲师为本书的编著做了许多工作,谨此致谢。本书在编写过程中参考了许多文献资料,这些文献资料对本书的出版起到了很大作用,在此对原作者表示衷心的感谢。

本书的部分研究成果得到了国家自然科学基金(50774029)、河南省科技创新杰出人才计划(154200510022)、河南省杰出青年科学基金(074100510011)、河南省高校创新人才基金(教高2004-294)、河南省高校杰出科研人才创新工程计划(2004KYCX020)和先进连接技术河南省创新型科技团队、河南省高校科技创新团队支持计划(13IRTSTHN003)及有色金属共性技术河南省协同创新中心、河南省有色金属材料科学与工程重点实验室的资助支持,在此一并表示感谢。

因作者水平所限,书中难免有疏漏、错误和不妥之处,肯请广大读者和同仁批评指正。

编者

2016年8月

目 录

第1章 激光焊	1
1.1 激光的产生及其物理特性	2
1.1.1 激光的产生过程与激光束	2
1.1.2 激光的物理特性	8
1.2 激光焊的基本原理	10
1.2.1 激光与物质的相互作用	10
1.2.2 金属材料对激光的吸收	11
1.2.3 激光焊机理	13
1.2.4 激光焊过程中的几种效应	15
1.3 激光焊设备	17
1.3.1 激光焊设备的组成	17
1.3.2 固体激光器	19
1.3.3 气体激光器	23
1.3.4 典型激光器	28
1.3.5 激光器的选择	32
1.4 激光焊工艺	33
1.4.1 金属材料激光焊的焊接性	33
1.4.2 激光焊的接头设计	39
1.4.3 激光焊的工艺参数	40
1.4.4 激光焊在工业生产中的应用	46
1.5 激光焊新方法简介	49
1.5.1 激光填丝焊	49
1.5.2 激光-电弧复合热源焊接	50
1.5.3 双光束激光焊	52
1.6 激光切割	54
1.6.1 激光切割的机理和分类	55
1.6.2 激光切割特点	55
1.6.3 激光切割设备	56
1.6.4 激光切割工艺	57
1.6.5 激光切割应用	60
参考文献	62
第2章 电子束焊	63
2.1 电子束焊的基本原理及分类	63

2.1.1 电子束焊的基本原理	63
2.1.2 电子束焊的分类	64
2.1.3 电子束焊的特点	66
2.2 真空电子束焊设备	67
2.2.1 真空电子束焊机的组成	67
2.2.2 电子束焊机的电子光学基础	68
2.2.3 电子枪	73
2.2.4 电子枪供电系统	81
2.2.5 电子束焦点的观察、测量与对中	82
2.2.6 电子束焊机的真空系统	86
2.3 真空电子束焊工艺	89
2.3.1 电子束焊缝形成过程	89
2.3.2 电子束焊接规范参数对焊缝成形的影响	92
2.3.3 电子束焊接头设计	95
2.3.4 电子束焊工艺	98
2.3.5 电子束焊的安全防护	100
2.4 工程材料电子束焊的焊接性	101
2.4.1 钢铁材料	101
2.4.2 有色金属	102
2.4.3 难熔金属	104
2.4.4 高温合金	105
2.4.5 复合材料	106
2.4.6 异种材料	106
2.5 电子束焊的焊接缺陷及其防止措施	109
2.5.1 焊前工件准备和装配的缺陷	110
2.5.2 焊缝形状的缺陷和尺寸偏差	110
2.5.3 焊缝或接头的外部缺陷及内部缺陷	110
2.5.4 焊接接头成分、组织和性能的缺陷	116
2.6 电子束焊的应用及发展前景	116
2.6.1 电子束焊的应用	116
2.6.2 电子束焊的发展前景	120
参考文献	121
第3章 超塑性焊接和超塑成形/扩散连接(SPF/DB)	122
3.1 基于超塑性的固态连接方法	122
3.1.1 超塑性及其分类	122
3.1.2 超塑性的力学和组织特征	124
3.1.3 材料的超塑性及其实现	125
3.1.4 基于超塑性的固态连接方法的可行性	127

3.1.5 基于超塑性的固态连接方法及分类	128
3.2 超塑性焊接	129
3.2.1 恒温超塑性焊接	129
3.2.2 相变超塑性焊接	147
3.3 超塑性扩散连接	154
3.3.1 扩散连接的原理、工艺及设备	155
3.3.2 超塑性扩散连接的原理及工艺	157
3.3.3 典型材料的超塑性扩散连接	158
3.4 超塑成形/扩散连接(SPF/DB)	159
3.4.1 SPF/DB 的工艺原理及特点	160
3.4.2 SPF/DB 的工艺及设备	162
3.4.3 SPF/DB 的应用	167
3.5 其他基于超塑性的连接方法及组合技术	170
3.5.1 超塑性摩擦焊	171
3.5.2 超塑性表面喷涂	171
3.5.3 超塑性压接加工	173
3.5.4 超塑性焊接:钎焊	173
3.5.5 超塑成形/固态连接	174
参考文献	175
第4章 摩擦焊	177
4.1 摩擦焊的分类及工作原理	177
4.1.1 摩擦焊的分类	177
4.1.2 摩擦焊的工作原理	178
4.2 连续驱动摩擦焊	183
4.2.1 连续驱动摩擦焊的基本原理	183
4.2.2 材料摩擦焊的焊接性	186
4.2.3 连续驱动摩擦焊工艺	187
4.2.4 焊接参数检测及控制	194
4.2.5 连续驱动摩擦焊的应用	198
4.3 搅拌摩擦焊	201
4.3.1 搅拌摩擦焊的基本原理	203
4.3.2 搅拌摩擦焊工艺	207
4.3.3 搅拌摩擦焊新技术	209
4.3.4 搅拌摩擦焊的应用	212
4.4 摩擦焊设备	218
4.4.1 连续驱动摩擦焊设备	218
4.4.2 惯性摩擦焊设备	221
4.4.3 搅拌摩擦焊设备	222

4.5 摩擦焊接头的缺陷及无损检测	225
4.5.1 摩擦焊接头的缺陷及其成因	225
4.5.2 摩擦焊接头的无损检测	226
参考文献	228
第5章 爆炸焊	230
5.1 爆炸焊过程及特点	230
5.1.1 爆炸焊过程	230
5.1.2 爆炸焊的特点	231
5.2 爆炸焊的基本原理	232
5.2.1 金属板在爆轰作用下的飞行运动规律	232
5.2.2 高速飞行下复板碰撞和射流形成机理	235
5.2.3 波的形成机理	237
5.3 爆炸焊方法	242
5.3.1 爆炸焊方法分类	242
5.3.2 材料爆炸焊的焊接性	244
5.3.3 爆炸焊的界面特征	246
5.3.4 爆炸焊焊接件的制备工艺	247
5.4 爆炸焊的应用	256
5.4.1 爆炸焊的主要用途概述	256
5.4.2 金属板的爆炸焊	257
5.4.3 金属圆管的爆炸焊	266
5.4.4 过渡接头的爆炸焊	268
5.4.5 陶瓷与钢的爆炸焊	269
5.4.6 野外维修	272
参考文献	273
第6章 微连接技术	274
6.1 微连接技术概述	274
6.1.1 微连接技术及分类	274
6.1.2 微连接技术发展概况及发展前景	275
6.2 基于钎焊原理的微连接技术	277
6.2.1 钎焊原理及工艺	278
6.2.2 基于钎焊原理的微连接技术	281
6.2.3 微连接用钎焊材料	290
6.2.4 常见焊接缺陷	295
6.3 基于压力焊原理的微连接技术	299
6.3.1 压力焊原理	299
6.3.2 基于压力焊原理的微连接技术	300
6.3.3 微电子器件内引线连接的常用材料	305

6.3.4 常见焊接缺陷	307
6.4 “绿色”微连接技术:胶接	309
6.4.1 胶接原理	309
6.4.2 导电胶	312
6.4.3 导电胶胶接工艺	320
6.4.4 常见缺陷	322
参考文献	322

第1章 激光焊

激光焊(laser beam welding,简称LBW)是利用高能量密度的激光束作为热源的一种高度精密的焊接方法。它是随着激光技术的发展而开始得到应用并逐步发展起来的新型焊接技术。自从20世纪60年代中期将红宝石激光应用于焊接技术以来,至今激光焊接技术已经历了40余年的发展历史。与常规的熔化焊焊接技术相比,激光焊接技术及激光焊接接头具有以下多方面的优点:

- ① 焊缝组织多为极细树枝晶,接头综合力学性能优良。
- ② 激光焊接过程中存在着净化效应,焊缝中有害杂质含量较低,有更好的抗气孔和抗裂纹能力。
- ③ 焊接线能量小,焊道窄,焊缝深宽比大,热影响区极窄,工件收缩和变形较小。
- ④ 焊接生产效率高,可进行精确焊接并易于实现生产过程的自动化。
- ⑤ 较易于实现异种材料和非对称接头的焊接。
- ⑥ 可焊到性好,能够焊接其他焊接方法难以焊到的位置。

表 1.1 比较了激光焊接与传统焊接工艺的焊接性能。

表 1.1 激光焊接和传统焊接工艺的比较

性能特点	激光焊	电子束焊	电阻点焊	钨极氩弧焊	摩擦焊	电容放电焊接
焊接质量	极好	极好	较好	好	好	极好
焊接速度	高	高	中等	中等	中等	很高
热输入量	低	低	中等	很高	中等	低
焊接接头装配要求	高	高	低	低	中等	低
熔深	大	大	小	中等	大	小
焊接异种材料的范围	宽	宽	窄	窄	宽	宽
焊件几何尺寸的范围	宽	中等	宽	宽	窄	窄
可控性	很好	好	较好	较好	中等	中等
自动化程度	极好	中等	极好	较好	好	好
初始成本	高	高	低	低	中等	高
操作和维护成本	中等	高	中等	低	低	中等
加工成本	高	很高	中等	中等	低	很高

近年来,随着激光器开发研究的进展,多种新型激光器陆续在工业生产中出现:如直流板条式CO₂激光器、二极管泵浦的Nd:YAG激光器、大功率半导体、光纤激光器等。激光器的功率等级也越来越大,45kW的CO₂激光器、5kW的Nd:YAG激光器已上市。随着大功率激光器商品化进程的加快,激光焊接在工业领域的应用范围正迅速扩大,目前,使

用大功率的激光焊接设备可以对包括低碳钢、低合金高强钢、不锈钢、铁镍合金、铝及铝合金、钛及钛合金等多种金属材料进行有效的焊接,并获得优质的焊接接头。激光焊接的熔深也由不足 1 mm 猛增到十几甚至是几十毫米,由于可焊材料范围广泛,接头质量优异和生产效率的提高,激光焊接技术的应用领域日益广泛,有了更大的工业实用性。

汽车制造、航空航天和电器设备制造领域都是激光焊接技术的主要应用领域。尤其是在汽车制造领域,多种汽车零部件的焊接都可由自动化的激光焊接设备完成。随着这些工业领域和微电子、医疗以及轻工业领域的迅猛发展,零件结构形状越来越复杂,对材料性能及加工精度和表面完整性的要求越来越高,激光焊接技术作为现代高科技的产物,必然会得到越来越广泛的应用,成为现代工业生产中必不可少的加工工艺手段之一。

1.1 激光的产生及其物理特性

1.1.1 激光的产生过程与激光束

激光(laser)和无线电波、微波一样,都是电磁波,也具有波粒二象性。但激光的产生机理和产生过程与普通光完全不同,因此决定了激光具有一系列比普通光更为优异的特征和性能。

1. 受激辐射及粒子数反转分布

1913 年丹麦物理学家玻尔提出的氢原子理论认为,原子系统具有一系列不连续的能量状态,在这些状态中,电子虽然作加速运动但不辐射电磁能量,这些状态称之为原子的稳定状态(亦称为稳定能级)。原子系统中的电子可以通过与外界的能量交换改变其运动状态,从而导致原子系统能量状态或能级的改变。对处于非基态的所有激发态的原子或粒子系统,其较高的内能使之处于不稳定状态,它总是力图通过辐射跃迁或无辐射跃迁的形式回到较低的能级上。如果跃迁过程中发出一个光子(即辐射跃迁),那么这个过程称之为光的自发辐射(图 1.1)。自发辐射的特点是:它是一个纯自发产生的过程,自发辐射时每个光子都具有能量 $E = E_2 - E_1$,其频率都满足普朗克公式 $\nu = (E_2 - E_1)/h$;处于较高能级 E_2 上的粒子向较低能级 E_1 自发辐射跃迁时都各自独立地发出一个光子,这些光子是互不相关的。因此,虽然它们的频率相同,但是它们的相位、传播方向和偏振方向都不同,故是散乱、随机和无法控制的。

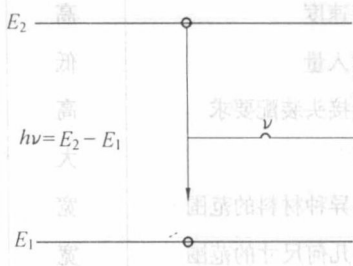


图 1.1 光的自发辐射

自发辐射常用自发跃迁几率(A_{21})来描述, A_{21} 是粒子处于较高能级 E_2 上平均寿命(τ)的倒数(即 $1/\tau$)。自然界中,常见的许多光源,如太阳、各种电灯等的发光都是粒子系统自发辐射的结果。

1916 年爱因斯坦首次提出了受激辐射的概念。他指出,处于不同能级的粒子在能级间发生跃迁,同时要吸收或发射能量,跃迁过程分为受激跃迁与自发跃迁两类,其中受激跃迁包括受激辐射和受激吸收。

处于较低能级 E_1 的粒子由于吸收频率为 $\nu = (E_2 - E_1)/h$ 的外来光子能量而从较低能级 E_1 跃迁到较高能级 E_2 上去,就称为光的受激吸收(图 1.2),外来光子的辐射能被粒子吸收,转变为粒子的势能或内能。

受激吸收不仅与粒子系统本身的状态有关,而且与外来光子有关,粒子系统中处于低能级 E_1 的粒子数目越多,外来光子越多,就越易产生受激吸收。

光的受激辐射是受激吸收的逆过程。如果处于较高能级 E_2 上的粒子受到频率为 $\nu = (E_2 - E_1)/h$ 的外来光子激励,便从高能级 E_2 跃迁到低能级 E_1 上,且发出一个和外来激励光子完全相同的光子,这一过程就称为光的受激辐射(图 1.3)。自发辐射、受激吸收和受激辐射在光与粒子系统的相互作用中常常是同时存在的。

特别要指出的是,受激辐射和自发辐射虽然都能发出光子,但它们的物理本质并不相同:受激辐射是外来光子激励引起的,而自发辐射却是自发产生的;受激辐射所产生的光子和外来光子完全一样,即发出光子的传播方向、频率、相位以及偏振方向等特性与外来激励光子完全一样,而自发辐射所产生的光子彼此间则不具有这一特点。

从效果上看,受激辐射相当于加强了外来激励光,即具有光放大作用,它是激光产生的主要物理基础。

物质在平衡状态下,各能级上的粒子数目服从玻尔兹曼分布,即正常分布。在这种平衡状态下,各能级间的能差越大,其上能级的粒子数越少。又因为受激辐射几率等于受激吸收几率,所以当外来光子入射到处于正常分布状态的粒子系统时,较低能级上受激吸收的粒子数将多于较高能级上受激辐射的粒子数,外来光得不到放大,光与这样的粒子系统相互作用只会损失能量。故通常只能看到粒子系统的吸收现象(光减弱),而看不到受激辐射现象(光增强)。由此可见,处于平衡状态下的粒子系统不能产生激光。

要使受激辐射超过受激吸收,必须使粒子系统中处于高能态的粒子数(N_2)多于低能态的粒子数(N_1),这种分布称为粒子数反转分布。处于粒子数反转分布状态的介质称为激活介质。当介质处于激活状态时,假若有一束强度为 I_0 的外来光入射到激活介质中(其频率 ν 必须满足 $\nu = (E_2 - E_1)/h$ 的要求)并在其中传播时,必然会在介质中同时产生光的受激吸收和受激辐射。但由于在激活介质中,单位时间内从较高能级 E_2 上受激辐射的粒子数大于从较低能级 E_1 上受激吸收的粒子数,受激辐射居主导地位,光通过介质后得到加强,即具有光的放大作用。通常将激活介质称做激光工作物质,将光通过激活介质后得到加强的效果称为增益。

激活介质(激光工作物质)具有以下特征:一是介质必须处于外界能源激励的非平衡

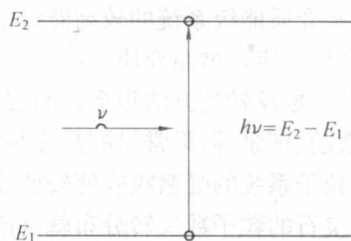


图 1.2 光的受激吸收

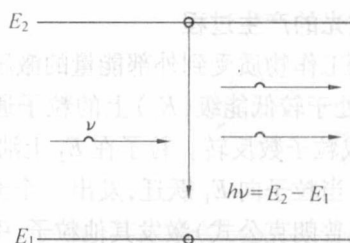


图 1.3 光的受激辐射

状态下;二是介质能级系统的较高能级中必须有亚稳态能级存在,以便实现粒子数反转;三是激活介质一定是增益介质。

形成粒子数反转的方法很多,如光泵浦、气体放电激励、电子束激励、气体动力激励、化学反应激励、核泵等,最常见的是光泵浦和电激励。光泵浦是用光照射来激励激光工作物质,利用粒子系统的受激吸收使较低能级上的粒子跃迁到较高能级上,形成粒子数反转分布,如红宝石的粒子数反转分布就是依靠氙灯照射实现的。电激励是通过介质的辉光放电,促成电子、离子及分子间的碰撞,以及粒子间的共振交换能量,使较低能级上的粒子跃迁到较高能级上,形成粒子数反转分布,如 CO_2 气体等的粒子数反转分布。

2. 激光的产生过程

激光工作物质受到外部能量的激励,从平衡状态转变为非平衡状态,在两能级的粒子系统中,处于较低能级(E_1)上的粒子通过种种途径被抽运到较高能级(E_2)上,在 E_2 与 E_1 间形成粒子数反转。粒子在 E_2 上滞留时间(平均寿命 τ)较长,但有一自发向 E_1 跃迁的趋势。当粒子向 E_1 跃迁,发出一个光子,这些自发辐射的光子作为外来光子(其频率肯定满足普朗克公式)激发其他粒子,引起其他粒子受激辐射和受激吸收。但因 $N_2 > N_1$,产生受激辐射的粒子数多于受激吸收的粒子数,因而总的来说光是得到放大的。一个光子激励一个较高能级 E_2 上的粒子使之受激辐射,产生一个和激励光子完全一样的新光子,这两个光子又作为激励光子去激励 E_2 上的另外两个粒子,从而又产生两个与前面激励光子完全一样的新光子,这种过程继续下去,就出现光的雪崩式放大,光得到迅速增强。同时,在激光工作物质两端安装两块互相平行的反射镜以构成谐振腔,受激辐射的光子则在两反射镜之间来回振荡。在谐振腔的作用下,只有那些平行于谐振腔光轴方向的光子可以在激光工作物质中来回反射得到放大,而其他方向上的光子经两块反射镜有限次的反射后总会逸出腔外而消失,从而在粒子系统中出现平行于谐振腔光轴的强光,即激光。如果谐振腔的右边是一个半反射镜,当谐振腔内光子能量达到一定强度时则有部分激光会透过半反射镜输出腔外,随着腔内光子能量强度的增加,腔内受激辐射越来越强,其结果使较高能级 E_2 上的粒子数减小,而较低能级 E_1 上的粒子数增加,当光子能量强度增加到某一值后,受激辐射和受激吸收平衡,光子能量强度不再增加,就得到一束稳定输出的激光。图 1.4 是激光产生过程和激光产生的基本条件示意图。

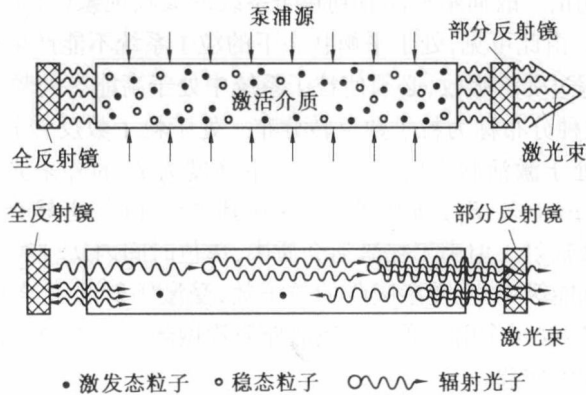


图 1.4 激光产生的过程和激光产生的基本条件示意图

综上所述,可以将激光的产生归结为:受激辐射理论为激光的产生奠定了理论基础;粒子数反转分布是激光产生的必要条件;受激辐射理论,粒子数反转分布和谐振腔三者的结合,使激光的产生成为可能。

当然,激光器工作时,一方面激光工作物质要产生受激辐射进行光的放大;另一方面还会产生损耗削弱甚至抵消增益。这些损耗包括衍射损失、散射损失和镜片的反射损失等。只有增益大于总的损耗,才能产生激光输出。

3. 激光束的模式

根据经典电磁理论和量子力学,激光是一种电磁波,它在谐振腔内振荡并形成稳定分布后,只能以一些分立的态出现。这些分立的态就称做腔模。而谐振腔中激光的每一个分立的态就是一个模式。每个模式都有一对应的特定频率和特定空间场强的分布。

CO₂ 气体激光的模式包括纵模和横模两种。描述激光频率特性和对应的一个光束场强在光轴方向(即纵向)的分布称为激光的纵模,它与激光加工的关系很小。描述其场强横向(即光轴横截面)分布特性的称为激光的横模,它在激光热加工中有着重要意义。因为激光在热加工中是作为热源使用的,而激光的横模既然反映了场强的横向分布特性,也就反映了激光能量在光束横截面上集中的程度和分布的状况。横模常用 TEM_{mn} 表示,其中 m 和 n 均为小正整数。横模可以是轴对称的,也可以是对光轴旋转对称的。对于轴对称的情况, m 和 n 分别表示沿两个互相垂直的坐标轴光场出现暗线的次数。采用稳定腔,典型的轴对称横模和对光轴旋转对称的横模及它们相应的 m 、 n 值如图 1.5 所示。

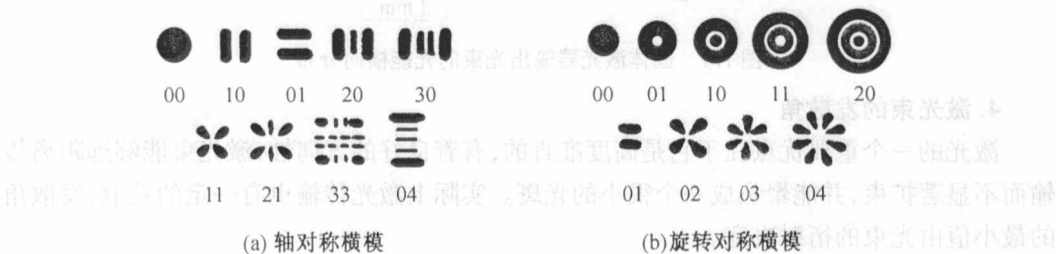


图 1.5 激光的模式与 m 、 n 值

横模 TEM₀₀ 称为激光的基模,其激光能量最集中。其余低阶模的激光能量虽有些分散,但仍很集中,这正是激光焊接和切割所需要的。旋转对称横模 TEM₀₁^{*} 是轴对称 TEM₀₁ 和 TEM₁₀ 模的叠加,称为环形模,是采用非稳腔的高功率激光器经常输出的模式。此外,高阶模(m 、 n 数值大)的激光能量分散,不易满足激光焊接和切割对热源的要求。由于激光器结构或形式不同,它可以输出一种模式的激光,也可以输出多种模式的激光。激光的模式与在光束直径上的功率密度分布如图 1.6 所示。

对于掺钕钇石榴石(Nd:YAG,含 Nd³⁺ 的 yttrium aluminium-garnet,简称 YAG)等的固体激光器,其光能的空间分布更为复杂,不能用简单的数学公式描述。这是因为固体激光工作物质不可避免地存在一些缺陷,如折射率不均匀,在光泵作用下受热而产生光程变化和双折射等。高功率固体激光器输出光束的典型分布如图 1.7 所示。经过选模,YAG 等固体激光器也可在接近基模或低阶模下运行,但其输出功率将显著下降。

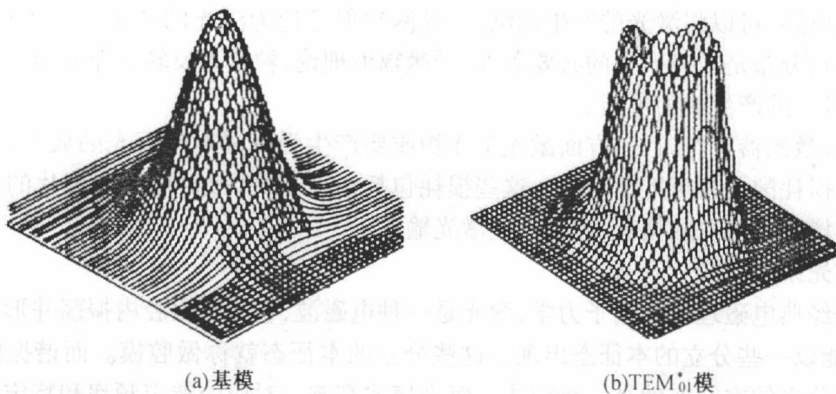


图 1.6 光的模式与功率密度分布

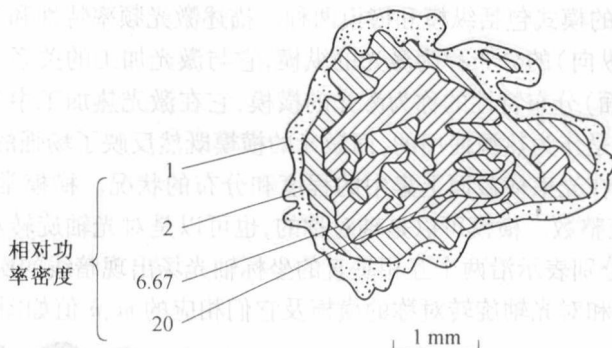


图 1.7 固体激光器输出光束的光能横向分布

4. 激光束的发散角

激光的一个重要优点在于它是高度准直的,有着良好的方向性,激光束能够远距离传输而不显著扩束,并能聚焦成一个很小的光斑。实际上激光传输也有一定的发散,发散角的最小值由光束的衍射决定。

如图 1.8 所示,任何径向对称激光束可由三个参数来描述:束腰位置 z_0 、束腰半径 ω_0 、远场发散角 θ_∞ 。根据光腔理论,衍射极限的 TEM_{00} 模高斯光束的有效半径 $\omega(z)$ 沿腔轴 z 方向以双曲线规律按下式变化

$$\omega^2(z) = \omega_0^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi \omega_0^2} \right)^2 \right] \quad (1.1)$$

式中, λ 为激光波长。

一般地,只要远场发散角 θ_∞ 较小,光束的传播也可由下面的简化公式描述

$$\omega^2(z) = \omega_0^2 + (z - z_0)^2 \cdot \theta_\infty^2 \quad (1.2)$$

高斯光束在自由空间传输仍维持高斯光束,但其横向尺寸扩大。基模高斯光束光斑半径随传输路程的变化按式(1.1) 计算,由此可求得其发散角的半角为

$$\theta = \frac{d\omega(z)}{dz} = \frac{\lambda z}{\pi \omega(z) f} \quad (1.3)$$

式中, f 为焦距。

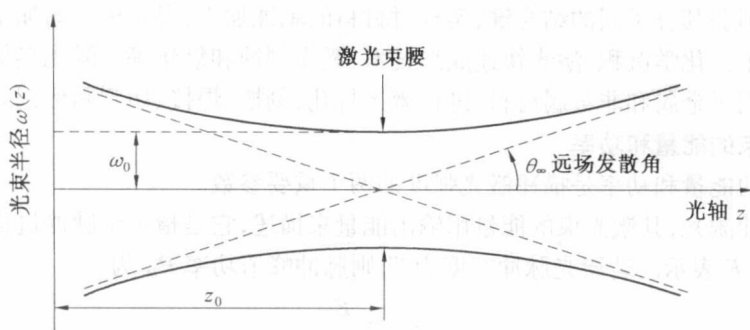


图 1.8 光束传播和光束特征方程的参数定义

发散角随 z 的增大而加大, 在 $z=0$ 时, $\theta=0$, 表明在光束的束腰处, 即共焦腔的中心处光束是平行的。

当 $z=f$ 时, $\omega(f) = \sqrt{2}\omega_0$, 光束在共焦腔镜面的发散角 $\theta = \sqrt{\lambda/(2\pi f)}$ 。

当 $z \rightarrow \infty$ 时, 有

$$\theta_{\infty} = \frac{\lambda}{\pi\omega_0} = \sqrt{\frac{\lambda}{\pi f}} \quad (1.4)$$

此时发散角达到最大值, θ_{∞} 为远场发散角。

目前, 国内外关于光束发散角的定义尚不统一, 有的定义为占 50% 总能量的发散角, 有的定义为占 90% ~ 95% 总能量的发散角, 通常以激光能量降到其中心处能量的 $1/e^2$ 计算激光束的发散角全角。由于整个激光系统不可避免地存在各种缺陷, 实际激光的发散角均大于其衍射极限。CO₂ 激光的基模与多模光束发散角全角在 1 ~ 3 mrad 左右, YAG 激光的多模光束发散角全角在 5 ~ 20 mrad 之间。

5. 激光的波长

不同的激光器输出不同波长的准单色光, 这是由于不同激光器的工作物质不同, 其上下能级的能量差 $E_2 - E_1 = h\nu$ 不同, 所输出激光的频率就不同。而光的波长与频率成反比, 因此输出激光的波长也是不同的。由于激光具有很好的单色性, 各准单色光的谱线宽度很窄, 在透射光学系统中应用时不存在色差, 但不同材料对激光的吸收率与波长密切相关, 因此激光的波长对于激光加工过程的影响很大。对于金属, 一般其表面对激光的吸收率随激光波长的增加而减小。另外, 激光波长与激光束的聚焦程度也有关系, 聚焦后光斑直径一般为几十微米, 将受到衍射极限的限制, 由于发射角 $\theta \propto \lambda/a$ (λ 为光波长, a 为衍射孔径尺寸), 因此激光波长越短, 越有利于聚焦。

常用激光器中, Nd:YAG 激光器输出 1.06 μm 的红外光, CO₂ 激光器输出 10.6 μm 的红外光。这些红外光的波长长, 频率低, 因而光子能量小, 加工过程主要是热作用过程, 属于“激光热加工”, 主要用于激光焊接、切割、表面处理等。1.06 μm 的红外光可以在光纤中传播, 10.6 μm 的红外光不能在光纤和普通光学玻璃中传播, 因为这些材料对 10.6 μm 的红外光不透明。准分子 (KrF) 激光器输出 0.249 μm 的紫外光, 其波长短, 频率高, 因而光子能量大, 甚至可高于某些物质分子的结合能, 可以直接深入到材料内部进行加工, 属于“激光冷加工”。紫外光用于加工时, 物质可以发生电子能带跃迁, 对于某些聚合物还