

现代 激光焊接技术

陈彦宾 编著



科学出版社
www.sciencep.com



现代激光焊接技术

陈彦宾 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书对激光束的主要物理特性进行了介绍,详细讲解了不同先进激光器的主要工作原理、组成、工作台结构及其选择方法等。本书不仅对传统激光连续焊接、激光脉冲焊接方法进行了介绍,还针对一些新材料、新结构,着重介绍了新近发展起来的先进激光焊接工艺,如激光双热源焊接、激光钎焊、激光填丝填粉焊接等;同时对激光焊接过程的质量监测及激光焊接过程的传热特性及数值模拟等较深的理论知识也进行了阐述。

本书适用于从事激光加工方向研究的专业人士,大专院校材料加工专业的本科生、研究生,机械加工的工程技术人员也可参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代激光焊接技术/陈彦宾编著. —北京:科学出版社, 2005

ISBN 7-03-015822-9

I. 现… II. 陈… III. 激光焊-焊接工艺 IV. TG456.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第071803号

责任编辑:田士勇 于宏丽/责任校对:包志虹

责任印制:钱玉芬/封面设计:王浩

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2005年10月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2005年10月第一次印刷 印张: 13 1/2

印数: 1—3 000 字数: 262 000

定价: 30.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换(环伟))

前 言

激光焊接与传统焊接技术相比,在焊接精度、效率、可靠性、自动化等各方面都具有无可比拟的优越性。近年来,随着大功率、高性能激光加工设备的不断研制成功,激光焊接技术在日本、美国、英国、德国等发达国家的汽车、能源、电子等工业领域得到快速发展,激光焊接被认为是 21 世纪最有发展前景的制造技术之一。

当今工业生产中,零件材料与结构的不断更新,生产模式的逐步转变,为激光焊接技术带来了巨大的应用潜力。经过多年的基础与应用研究,激光焊接技术已具有更高的适应性、更强的加工能力以及更先进的质量监测手段,并在许多行业逐步替代一些传统的焊接技术。

本书的宗旨是希望读者能更深层次地了解激光焊接技术及其发展,对现代激光焊接设备和工艺的选择与优化提供帮助。全书系统介绍了与激光焊接技术相关的知识。前四章着重介绍激光焊接的基础理论,包括激光光束的基本物理特征、激光器工作原理及其特性、激光与材料之间的相互作用等。后四章对现代激光焊接工艺、先进激光焊接方法、激光焊接的质量监测与数值模拟技术等进行了全面的介绍。本书注重讲解激光焊接基本的原理与工艺特点,同时将前沿的激光焊接研究成果展现给读者,希望大家能对激光焊接技术有一种全新的认识。

本书强调统一性、系统性、新颖性和协同性,重点章节又保持相对独立性和可读性。本书概念清楚、图形并茂、由浅入深、循序渐进,具备材料加工基础知识的读者即可入门。

本书可作为材料加工领域的高年级大学生、研究生的教材,也可供有关专业的科研工作者、工程技术人员参考。

作者在国内外从事了多年的激光焊接技术基础与工程研究,书中集合了作者多年科学研究与实践成果,以及国内外同行的工作经验,许多成果已经付诸于工程应用。本书的编写分工如下:陈彦宾教授对全书结构与内容进行了规划与统稿,并撰写了第一章、第四章、第五章;李俐群副教授撰写第二章和第三章;李俐群副教授、封小松博士、方俊飞博士、雷正龙博士、陶汪博士等共同撰写第六章;方俊飞博士撰写第七章;封小松博士撰写第八章。书中部分插图引自公开发表的文献和专著,在这里对原作者致谢。

鉴于作者水平有限,书中疏漏之处在所难免,敬请读者提出宝贵的意见和建议。

作 者

2005 年 6 月

目 录

前言

第1章 绪论	1
第2章 激光的物理特性	5
2.1 激光的基本物理特性	5
2.2 光束特征描述及光束传播定义	6
2.2.1 光束的模式	6
2.2.2 发散角	8
2.2.3 光束传播因子和光束衍射极限因子	9
2.2.4 光束参数积	10
2.2.5 光束的聚焦	11
参考文献	12
第3章 工业激光器及其加工系统	13
3.1 激光产生的基本原理	13
3.2 CO ₂ 气体激光器	14
3.2.1 横流式 CO ₂ 激光器	15
3.2.2 轴流式 CO ₂ 激光器	17
3.2.3 扩散冷却 CO ₂ 激光器	18
3.3 Nd: YAG 固体激光器	20
3.3.1 灯泵浦 Nd: YAG 激光器	21
3.3.2 二极管泵浦 Nd: YAG 激光器	22
3.4 半导体激光器	24
3.5 激光器的选择	27
3.6 光学材料	28
3.6.1 高反射率材料	29
3.6.2 透射材料	29
3.6.3 热透镜效应	30
3.7 光束传输系统	31
3.7.1 光束的扩束	31
3.7.2 光束的转向	32
3.7.3 光束的能量分配	32
3.7.4 反射镜传输	32

3.7.5 光纤传输	33
3.8 光束聚焦系统	36
3.9 保护气体与喷嘴结构	37
3.10 激光焊接加工系统	38
3.10.1 加工系统	38
3.10.2 控制系统和检测系统	40
参考文献	41
第4章 激光与材料之间的相互作用	42
4.1 激光与材料作用引起的物态变化	42
4.2 激光与材料作用的能量平衡	43
4.3 金属材料对激光的吸收	44
4.3.1 波长的影响	45
4.3.2 温度的影响	46
4.3.3 表面状况的影响	47
4.3.4 偏振的影响	48
4.4 光致等离子体行为	49
4.4.1 光致等离子体的形成	49
4.4.2 等离子体的周期性	50
4.4.3 激光维持吸收波	51
4.4.4 等离子体在能量传输中的作用	52
4.4.5 光致等离子体的控制	58
4.5 匙孔效应	59
4.5.1 匙孔内的能量吸收	59
4.5.2 匙孔内的压力平衡	60
参考文献	61
第5章 激光焊接特性	64
5.1 激光焊接基本原理	64
5.2 激光焊接的熔池、匙孔及等离子体行为	65
5.3 激光焊接的主要影响因素	69
5.3.1 激光能量	70
5.3.2 光束特性	73
5.3.3 焊接特性	74
5.3.4 保护气体	79
5.3.5 工件的准备与装夹	82
5.3.6 焊接飞溅及其防止	84
5.4 金属材料的激光焊接特性	85

5.4.1	碳钢	86
5.4.2	不锈钢	87
5.4.3	铜、铝及其合金	88
5.4.4	钛及钛合金	90
	参考文献	90
第6章	现代激光焊接技术	92
6.1	激光填丝焊	92
6.1.1	激光填丝焊特点	92
6.1.2	激光填丝焊的送丝特性	93
6.1.3	激光束与填充金属之间的相互作用	95
6.1.4	激光填丝焊技术的应用	97
6.2	激光-电弧复合热源焊接	99
6.2.1	激光-电弧复合热源焊接特点	100
6.2.2	激光与电弧的复合方式	101
6.2.3	激光与电弧之间的相互作用	105
6.2.4	激光-电弧复合热源焊接技术的应用	107
6.3	双光束激光焊接	111
6.3.1	双光束激光焊接原理	111
6.3.2	双束激光的实现	113
6.3.3	双光束激光焊接技术的应用	115
6.4	激光钎焊	119
6.4.1	激光钎焊原理	119
6.4.2	激光钎焊技术的分类	120
6.4.3	激光钎焊工艺特点	125
6.4.4	激光钎焊系统	127
6.4.5	激光钎焊技术的应用	128
6.5	激光点焊	130
6.5.1	激光点焊特点	130
6.5.2	激光点焊的缺陷分析	132
6.5.3	激光点焊技术的应用	134
	参考文献	136
第7章	激光焊接过程质量监测	139
7.1	声发射信号传感	140
7.1.1	结构负载声信号	140
7.1.2	空气负载声信号	142
7.2	光辐射信号传感	144

7.2.1	基于光电二极管的光辐射信号	144
7.2.2	基于视觉传感的光辐射信号	149
7.3	电信号传感	160
7.4	超声传感	161
7.4.1	电磁声学转换	162
7.4.2	激光超声	163
7.5	X射线传感	166
7.6	激光焊接过程的融合传感	171
7.6.1	声发射与光辐射的融合	171
7.6.2	多波段光辐射的融合	173
	参考文献	176
第8章	激光焊接过程的数值计算	181
8.1	激光焊接传热基础	182
8.2	激光热导焊接温度场的解析计算	184
8.2.1	点热源模型	184
8.2.2	表面热源模型	186
8.3	激光深熔焊接的解析计算	187
8.3.1	静止线状热源	187
8.3.2	移动线状热源	188
8.3.3	移动点-线热源	190
8.3.4	匙孔热力学分析	190
8.4	激光焊接的数值解模型	197
8.4.1	控制方程及边界条件和初始条件	198
8.4.2	热源模型	200
8.4.3	材料性能参数	202
8.4.4	有限差分模型	204
8.4.5	有限元模型	206
	参考文献	207

第1章 绪 论

自从 20 世纪 60 年代美国采用红宝石激光器在钻石上打孔以来，激光加工技术经过几十年的发展，已成为工业生产中的一项常用技术。在今天，几乎所有的重要工业部门都应用了激光器。在国际范围内比较，激光加工的应用在各个地区的各个行业有所不同：在美国，激光加工主要应用于汽车业和金属加工业；在亚洲，电气工业和半导体工业则是激光器供应商的最大客户；在欧洲，金属加工业和汽车业中的激光加工应用较多，而在半导体工业则相对较少。另外，在欧洲，激光器在其他行业，如塑料加工业中也有广泛的应用。

图 1-1 给出了各种激光加工方法在重要工业领域中的应用比例。

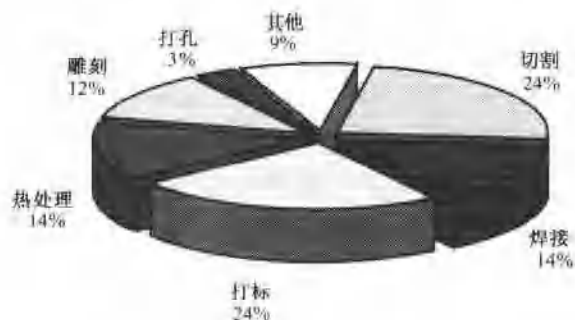


图 1-1 各种激光加工方法的应用比例

激光材料加工按其加工方法可分为切割、焊接、热处理及表面处理、雕刻、打孔、刻蚀以及激光成形和激光快速成形等。

汽车行业不仅是激光加工最重要的应用部门，而且在某种程度上说，也是引入新型激光器和加工方法的开创者。从图 1-2 中小轿车的生产工艺可以看出，激光加工方法在很大范围内得到了成功应用。

汽车工业中，激光技术主要用于车身拼焊、焊接和零件焊接。激光拼焊是在车身设计制造中，根据车身不同的设计和性能要求，选择不同规格的钢板，通过激光裁剪和拼装技术完成车身某一部位的制造，例如，前挡风玻璃框架、车门内板、车身底板、中立柱等。激光拼焊具有减少零件和模具数量、减少点焊数目、优化材料用量、减小零件质量、降低成本和提高尺寸精度等好处，目前已经被许多大汽车制造商和配件供应商所采用。激光焊接主要用于车身框架结构的焊接，



图 1-2 工业激光器在汽车生产中的应用

例如, 顶盖与侧面车身的焊接, 传统焊接方法的电阻点焊已经逐渐被激光焊接所代替。用激光焊接技术, 工件连接之间的接合面宽度可以减少, 既降低了板材使用量, 也提高了车体的刚度。激光焊接零部件, 零件焊接部位几乎没有变形, 焊接速度快, 而且不需要焊后热处理, 目前激光焊接零部件已经广泛采用, 常见于变速器齿轮、气门挺杆、车门铰链等。

工业激光器作为一种高效可靠的生产工具已被广泛接受, 激光焊接作为一种重要的激光加工技术得到了日益广泛的应用和不断的开发与研究。随着工业激光器的出现, 在某些领域中, 激光焊接已经成了一些传统的焊接方法的替代技术(如电阻点焊和电弧焊), 这是因为激光焊接具有其独特的优点:

- (1) 热输入量小、深宽比大, 因此热影响区小, 工件收缩和变形较小;
- (2) 焊接具有连续性和可重复性;
- (3) 焊道窄且表面质量好, 焊缝强度高(刚度增加同时焊缝尺寸减小, 与不连续电阻点焊相比较具有较高的静载强度和疲劳强度);
- (4) 对于准确定位的焊缝易于实现自动化;
- (5) 可实现异种材料的焊接;
- (6) 激光束控制(包括分时控制)比较灵活, 柔性大, 能够焊接其他焊接方法难以达到的位置;
- (7) 焊接速度通常比其他焊接工艺快;
- (8) 某些情况下可减少后处理工序(如焊缝的清理)。

与此同时，激光焊接也存在一定的缺点：

- (1) 焊接淬硬性材料时易形成硬脆接头；
- (2) 合金元素的蒸发会导致焊缝出现气孔和咬边；
- (3) 相对于其他焊接工艺成本较高；
- (4) 对工件的装配、夹持及激光束的精确调整要求相对较高。

激光焊接的上述特点，使得激光焊接方法的选择和焊接结果的预测比较复杂。事实上，成功地进行激光焊接需要考虑三方面的因素，即激光参数、焊接工艺要求和相关工序。

由上述可知，激光焊接具有与传统焊接方法不同的特点，表 1-1 列出了激光焊接与传统焊接方法的焊接性能特点比较。

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	高
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

从表 1-1 中可见，激光焊接的有力竞争者是电子束焊接。图 1-3 为这两种焊接方法的焊接功率和熔深的关系。当功率为 1kW 时，两者的熔深大致相等，而当功率大、焊接速度快时，则电子束焊接比激光焊接能够获得更大的熔深。很显然，电子束焊对于厚板焊接更为有利。

但相对电子束来说，激光焊有一个很大的优点：完全不需要真空室。电子束焊虽然也有非真空室的，但有减小熔深及需要放射线防护等多方面的问题，因而几乎没有使用。激光焊不需要真空室，这样工件的尺寸、形状等可以不受限制并可实现加工自动化。

近年来，激光器的开发研究取得了较大进展，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 YAG 激光器、大功率半导体激光器、光纤激光器等。而且激光器的功率等级也越来越大，45 kW 的 CO₂ 激光器、5 kW 的 Nd:YAG 激光器已上市。随着这些大功率激光器产品化，激光焊

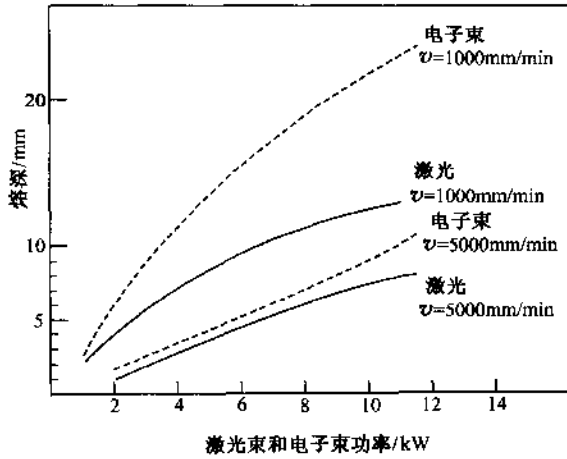


图 1-3 激光焊及电子束焊功率对熔深的影响

的应用范围逐渐在各工业领域扩展。现代激光焊接技术开始向大厚板、高适应性、高效率和低成本的方向发展。随着新材料、新结构的出现，激光焊接技术将逐步替代一些传统的焊接工艺，而在工业生产中占据重要地位。

第 2 章 激光的物理特性

2.1 激光的基本物理特性

激光最显著的特性是：单色性好，方向性好、亮度高，相干性好^[1,2]。

1) 单色性

激光中单色性最好的是气体激光器产生的激光。如 He-Ne 激光器产生的 632.8nm 谱线，线宽只有 10^{-9} nm。相比而言，在普通光源中单色性最好的用来作为长度基准器的氪灯 (Kr^{86})，其谱线宽度为 4.7×10^{-3} nm。显然，激光的单色性比一般光要高出 $10^6 \sim 10^7$ 倍以上。图 2-1 所示为自然光和激光的波长与能量分布的关系。自然光是由波长范围较宽的光构成，而激光的谱线展宽极小，具有很好的单色性。

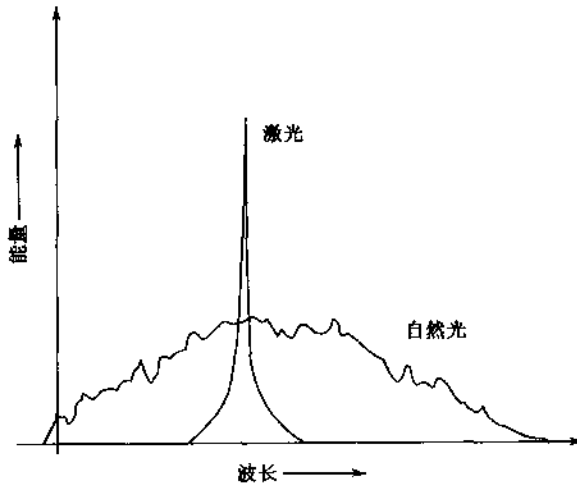


图 2-1 自然光和激光的波长与能量分布的关系

2) 方向性好、亮度高

从光源发出的激光平行传播的程度称为方向性。由于谐振腔对光束方向的选择作用，激光器输出的光束发散角度很小，可以小于或等于 $10^{-3} \sim 10^{-5}$ rad。考虑到光的波动性，即使是理想的平面波，在通过直径为 D 的孔径时，由于衍射也会产生一定的发散。对于相同的光束直径，波长越小其方向性越好。

激光的方向性带来两个结果，即光源表面的亮度高，被照射的地方光的照度

大。一个具有 10mW 功率的 He-Ne 激光器可产生比太阳高几千倍的亮度，这样亮的光源可在屏幕上形成面积很小但照度极大的光斑。因此，可以说方向性好、亮度高、照度大三者是同一性质的三种表现，归纳起来就是激光光束的能量在空间的高度集中。

3) 相干性好

以适当的方法将同一光源发出的光分成两束，再使两束光重合便产生明暗相间的条纹，这就是光的干涉。无论是激光还是电波，或是白炽灯光和大阳光，从本质上来说，它们都是电磁波。然而，激光与白炽灯光和大阳光有较大不同，其中之一就是激光具有很好相干性。白炽灯光（或太阳光）的光波是由无数的原子或分子发射的，故产生波长各不相同的杂乱光。即使将这些光合成后也会产生不规则的振动，所以不能形成整齐有序的大振幅的光波。而激光的相位在时间上保持不变，是整齐有序的，所以合成后能形成相位整齐、规则有序及大振幅的光波。

2.2 光束特征描述及光束传播定义

2.2.1 光束的模式

激光器都有谐振腔，它是由两个相隔一定距离的反射镜组成的。光波在反射镜之间的多次衍射传播形成稳定的电磁场，这个电磁场只能存在于一系列分立的本征状态之中，场的每一个本征状态具有一定的振荡频率和一定的空间分布。这种谐振腔内可能存在一定的电磁场的本征态称为激光的模式。通常把光波场的空间分布分解为沿传播方向的分布和垂直于传播方向的横截面内的分布，分别称之为纵模和横模。光腔理论证明，在稳定光腔内外沿光轴传播方向的任意位置处，光场的模向分布规律不变，但光束直径大小不同。光腔的模横代表了激光束光场的模向分布规律，对激光加工影响极大。而光腔的纵模主要影响激光的频率，与激光加工关系很小^[1]。

通常用 TEM_{mn} 表示横模的光场分布，TEM 是横电磁波“transverse electromagnetic wave”的缩写， m 、 n 为正整数。模横可以是轴对称的，也可以是对光轴旋转对称的。采用稳定腔，典型的轴对称模横与旋转对称模横及其相应的 m 、 n 值如图 2-2 所示。

带 * 标记表示该旋转对称模横为两个相似的轴对称横模的叠加，这两个轴对称横模中，一个是另一个旋转 90° 的结果。如 TEM_{01}^* 模是轴对称 TEM_{01} 和 TEM_{10} 模的叠加。 TEM_{01}^* 常称为环形横，是采用非稳定腔的高功率激光器经常输出的模式。图 2-3 给出了三种典型旋转模横的能量分布^[3]。

不论是轴对称还是旋转对称，其 TEM_{00} 横是一致的，称为基模。光波的强度与光波电矢量振幅的平方成正比，一束沿 z 方向传播的基模光束的光强可表

示为

$$I(x, y, z) = \frac{2P}{\pi\omega^2(z)} \exp\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{\omega^2(z)}\right] \quad (2-1)$$

式中, P 为激光功率, $\omega(z)$ 为 z 处光斑半径。基模光束在任意截面内的光强分布按高斯函数 $\exp\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{\omega^2(z)}\right]$ 所描述的规律从中心向外平滑地降落, 故称为高斯

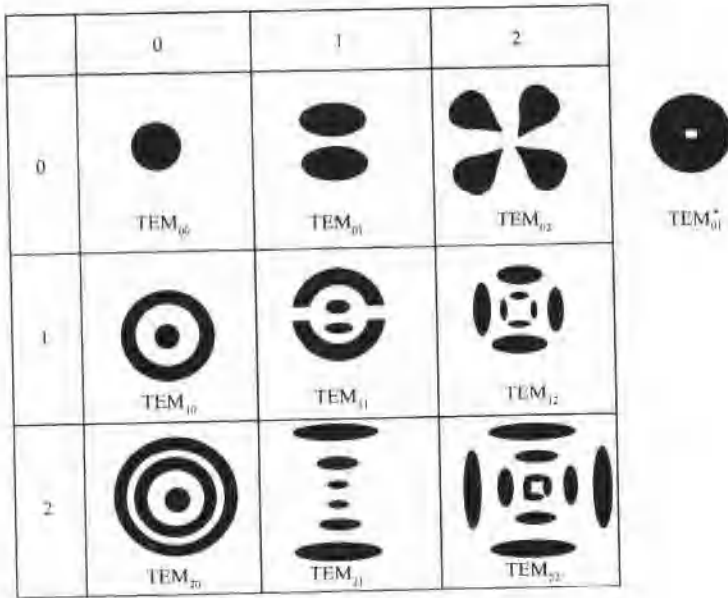


图 2-2 激光束的不同模式

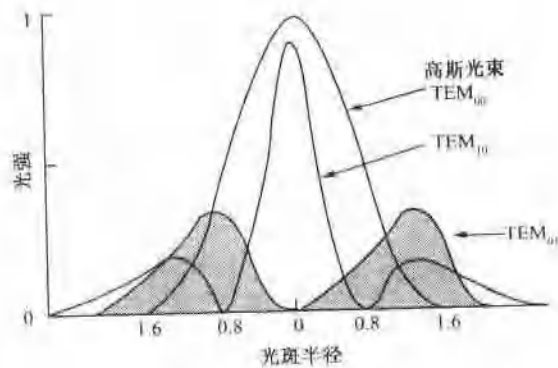


图 2-3 不同旋转横模的能量分布

光束。由光强降落到中心值的 $1/e^2$ 的点定义为光斑直径为 $\omega(z)$ ，在这个半径值的圆内包含了光束总能量的 86.5%。中心处最大光强为 $\frac{2P}{\pi\omega^2(z)}$ 。

气体激光器的激活物质为气体，其光学性质和增益的空间分布比较均匀，常常输出接近前述理想状况的横模，也可能出现若干横模叠加在一起而使光场分布变得相当复杂的情况。

对于 YAG 等固体激光器，其光能的空间分布则较为复杂，不能用简单的数学公式描述。这是因为固体激光棒不可避免地存在很多缺陷，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典型的模向分布如图 2-4 所示。通过选横，固体激光器也可以在接近基横或低阶模下运行，但其输出功率将显著下降。

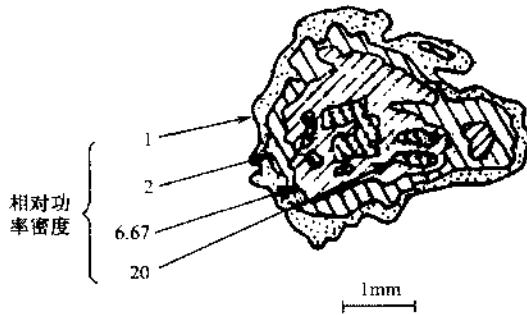


图 2-4 固体激光器输出光束的光能横向分布

2.2.2 发散角

激光的一个重要优点在于它是高度准直的，有良好的方向性，能够远距离传输而不显著扩束，并能聚焦于一个小的光斑内。实际的激光都有一定的发散，发散角的最小值由光束的衍射决定。

如图 2-5 所示，任何径向对称性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^[4]

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

式中， λ 为激光波长。一般，只要远场发散角 θ_∞ 较小，光束的传横也可由下面的简化公式描述

$$\omega^2(z) = \omega_0^2 + (z - z_0)^2 \cdot \theta_\infty^2 \quad (2-3)$$

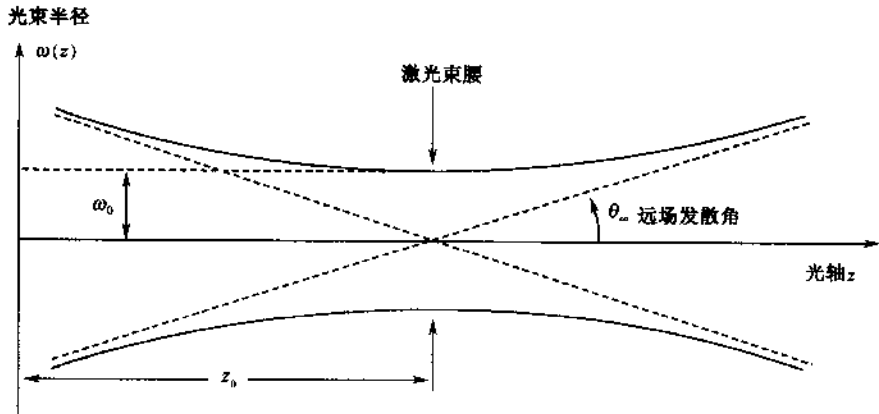


图 2-5 光束传播和光束特征方程的参数定义

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。基模高斯光斑半径随传输路程的变化按式(2-2)计算,由此可求其发散角的半角为

$$\theta = \frac{d\omega(z)}{dz} = \frac{\lambda z}{\pi\omega(z)f} \quad (2-4)$$

式中, f 为焦距。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

$$\theta_\infty = \frac{\lambda}{\pi\omega_0} = \sqrt{\frac{\lambda}{\pi f}} \quad (2-5)$$

此时发散角达到最大值,称为远场发散角。

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,通常以激光降到中心处的 $1/e^2$ 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。 CO_2 激光的基模与多模光束发散角全角在 1~3mrad 左右, YAG 激光的多模光束发散角全角在 5~20mrad 之间。

2.2.3 光束传播因子和光束衍射极限因子

通常来说,可用下面两个特征参数中的任何一个来描述光束的质量特性,即光束传播因子 K 和光束衍射极限因子 M^2 , 定义如下

$$K = \frac{1}{M^2} = \frac{\lambda}{\pi} \cdot \frac{1}{\omega_0 \cdot \theta_\infty} \quad (2-6)$$

如果 M^2 等于 1 (即 K 也等于 1), 那么激光光束质量实际上达到了衍射极