职业技术教育“十二五”课程改革规划教材
光电技术（信息）类

激光加工设备与工艺

JIGUANG

JIAGONG SHEBEI YU GONGYI



主　编　王中林　王绍理

华中科技大学出版社
http://www.hustp.com

需要全本请访问 www.ertongbook.com

内 容 简 介

本书内容主要包括激光加工设备装配调试及激光加工工艺两大方面，具体来说包括基本激光光学基本原理、激光标刻加工设备装配调试及标刻加工工艺、激光焊接加工设备装配调试及焊接加工工艺、激光切割加工设备装配调试及切割加工工艺、其他激光加工技术等。读者主要是高职高专、中职激光加工技术、光电子技术、光机电应用技术及其他相关专业的学生，也可以是从事激光设备制造和激光加工工艺工作的相关技术人员。

图书在版编目(CIP)数据

激光加工设备与工艺/王中林　王绍理　主编. —武汉：华中科技大学出版社，2011.9
ISBN 978-7-5609-7202-2

Ⅰ. 激…　Ⅱ. ①王…　②王…　Ⅲ. ①激光加工-设备-高等职业教育-教材　②激光加工-工艺-高等职业教育-教材　Ⅳ. TG665

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 180432 号

激光加工设备与工艺　　王中林　王绍理 主编

策划编辑：王红梅　刘万飞
责任编辑：刘万飞
封面设计：秦　茹
责任校对：祝　菲
责任监印：张正林
出版发行：华中科技大学出版社(中国·武汉)
武昌喻家山　　邮编：430074　　电话：(027)87557437
录　　排：武汉佳年华科技有限公司
印　　刷：武汉市新华印务有限责任公司
开　　本：787mm×1092mm　1/16
印　　张：14.75
字　　数：370 千字
版　　次：2011 年 9 月第 1 版第 1 次印刷
定　　价：28.00 元

本书若有印装质量问题，请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线：400-6679-118　竭诚为您服务
版权所有　侵权必究

前言

激光作为一门新兴的科学技术发展极快，迄今已渗透到几乎所有的自然科学领域，如激光加工、激光医疗、激光通讯、激光存储、激光印刷、激光光谱、激光分离同位素、激光检测和计量，等等，它们都在不同程度上得到了发展。激光对物理学、化学、生物学、医学、工艺学、园艺学及检测技术、通信技术、军事技术等都产生了深刻的影响。激光器种类繁多，新型激光器不断被研究开发出来。现代用于激光加工制造的激光器，主要有 Nd：YAG 激光器、CO_2 激光器、光纤激光器、准分子激光器和大功率半导体激光器等。

激光加工是指激光束作用于物体的表面而引起的物体变形或物体的性能改变的加工。按照光与物质相互作用的机理，大体可将工业激光加工分为激光热加工和激光冷加工（光化学反应加工）两类，具体包括激光标刻、激光焊接、激光切割、激光热处理和激光成形等。

激光加工工艺涉及光、机、电、材料和其他相关技术，对不同的加工对象，它有一定的内在规律和特点。激光加工热影响区小，光束方向性好，能使光束斑点尺寸聚焦到波长数量级，适合进行选择性加工和精密加工，是机械加工最有竞争力的一种替代手段。

本书采用项目任务式的编写体例，主要介绍了激光加工设备装配调试及各种类型的激光加工工艺过程，具体包括掌握激光原理及与激光加工相关光学原理、激光标刻设备装配调试与激光标刻加工、激光焊接设备装配调试与激光焊接加工、激光切割设备装配调试与激光切割加工和其他激光加工技术等 5 个项目。本书引入当今市场上具有先进性、代表性的激光设备和激光加工应用作为载体，注重实践应用，面向实际工作过程，具有较强的实用性。同时，兼顾技术发展前沿，引导读者进行更深入的技术探索，具备一定的前瞻性。

本书主编所在单位武汉软件工程职业学院、武汉职业技术学院与武汉楚天激光（集团）股份有限公司进行了以订单班为载体的全方位校企合作，形成了人才共育、过程共管、互惠共赢的双边合作机制。武汉楚天激光（集团）股份有限公司提供了大量的来自一线的实践素材，并直接参与了编写工作，在此表示诚挚的感谢。

本书项目 1 由武汉软件工程职业学院王中林、武汉楚天激光（集团）股份有限公司吴让大编写，项目 2 由武汉职业技术学院王绍理、深圳技师学院陈毕双编写，项目 3 由武汉软件工程职业学院杨晟、武汉楚天激光（集团）股份有限公司邓传经编写，项目 4 由武汉软件工程职业学院石金发、随州技师学院陈祥胜编写，项目 5 由武汉职业技术学院周琦、武汉船舶职业技术学院陈一峰编写。

由于编者水平有限，书中难免还存在遗漏和不妥之处，恳切希望广大读者批评指正。

编　者

2011 年 8 月

序

作为新兴的行业、产业，我国光电技术的发展一日千里，光电产业对我国经济社会的巨大作用日益凸显。我国光电与激光市场十几年来始终保持两位数的高速增长，2010 年我国光电与激光产业的市场规模已经突破千亿。随着信息技术、激光加工技术、激光医疗与光子生物学、激光全息、光电传感、显示技术及太阳能利用等技术的快速发展，我国光电与激光产业市场规模将进一步加大。

随着光电产业的不断产展，对光电技术人才的需求越来越大，高等职业院校光电技术方面的专业建设也会越来越受到重视。作为其中的重要部分，光电专业教材建设目前虽然取得了一定的成果，但还无法满足产业发展对人才培养的需求，尤其是面向职业教育的专业教材更是屈指可数，很多学校都只能使用自编的校本教材。值此国家十二五规划实行之际，编写和出版职业院校使用的光电专业教材既迫在眉睫，又意义重大。

华中科技大学出版社充分依托武汉·中国光谷的区域优势，在相继开发分别面向全国 211 重点大学和普通本科大学光电专业教材的基础上，又倾力打造了这套面向全国职业院校的光电技术专业系列教材。在组织过程中，华科大社邀请了全国所有开设有光电专业的职业院校的专家、学者，同时与国内知名的光电企业合作，在国家光电专业教指委专家的指导下，齐心协力、求同存异、取长补短，共同编写了这套应用范围最广的光电专业系列教材。参与本套教材建设的院校大多是国家示范院校或国家骨干院校，他们在光电专业建设上取得了良好的成绩。参与本套教材编写的教师，基本上是相关国家示范院校或国家骨干院校光电专业的带头人和长期在一线教学的教师，非常了解光电专业职业教育的发展现状，具有丰富的教学经验，在全国光电专业职业教育领域中也有着广泛的影响力。此外，本套教材编写还吸收了大量有丰富实践经验的企业高级工程技术人员，参考了企业技术创新资料，把教学和生产实际有效地结合在一起。

本套教材的编写基本符合当前教育部对职业教育改革规划的精神和要求，在坚持工作过程系统化的基础上，重点突出职业院校学生职业竞争力的培养和锻炼，以光电行业对人才需求的标准为原则，密切联系企业生产实际需求，对当前的光电专业职业教育应该具有很好的指导作用。

本套教材具有以下鲜明的特点。

课程齐全。本套教材基本上包括了光电专业职业教育的专业基础课和光电子、光器件、光学加工、激光加工、光纤制造与通信等各个领域的主要专业课，门类齐全，是对光电专业职业教育一次有效、有益的整理总结。

内容新颖。本套教材密切联系当前光电技术的最新发展，在介绍基本原理、知识的基础上，注重吸收光电专业的新技术、新理念、新知识，并重点介绍了它们在生产实践中的应用，如

《平板显示器的制造与测试》、《LED 封装与测试》。

针对性强。本套教材是结合职业教育和职业院校的实际教学现状，非常注重知识的“可用、够用、实用”，如《工程光学基础》、《激光原理与技术》。

原创性强。本套教材是在相关国家示范院校或国家骨干院校长期使用的自编校本教材的基础上形成的，既经过了教学实践的检验，又进行了总结、提高和创新，如《光纤光学基础》、《光电检测技术》。其中的一些教材，在光电专业职业教育中更是首创，如《光电子技术英语》、《光学加工工艺》。

实践性强。本套教材非常注重实验、实践、实训的“易实施、可操作、能拓展”。不少书中的实验、实训基本上都是企业实践中的生产任务，有的甚至是整套生产线上的任务实施，如《激光加工设备与工艺》、《光有源无源器件制造》。

我十分高兴能为本套教材写序，并乐意向各位读者推荐，相信读者在阅读这套教材后会和我一样获得深刻印象。同时，我十分有幸认识本套教材的很多主编，如武汉职业技术学院的吴晓红、武汉软件工程职业学院的王中林、南京信息职业技术学院的金鸿、苏州工业园区职业技术学院的吴文明、福建信息职业技术学院的林火养等老师，知道他们在光电专业职业教育中的造诣、成绩及影响；也和华中科技大学出版社有过合作，了解他们在工科出版尤其是在光电技术（信息）方面教材出版上的成绩和成效。我相信由他们一起编写、出版本套教材，一定会相得益彰。

本套教材不仅能用于指导当前光电专业职业教育的教学，也可以用于指导光电行业企业员工培训或社会职业教育的培训。



中国光学学会激光加工专业委员会主任

2011 年 8 月 24 日

目　　录

项目 1　掌握激光原理及与激光加工相关的光学原理 …… (1)
任务 1　掌握激光原理及与激光加工相关的光学原理 …… (1)
项目 2　激光标刻设备装配调试与激光标刻加工 …… (22)
任务 1　激光标刻设备整体结构认识及使用维护 …… (22)
任务 2　激光标刻机谐振腔及光路传输系统装调 …… (30)
任务 3　激光标刻机电控盒装配调试 …… (44)
任务 4　金属材料与非金属材料名片激光的标刻 …… (51)
任务 5　金属与非金属材料的激光旋转标刻和激光飞行标刻加工 …… (64)
项目 3　激光焊接设备装配调试与激光焊接加工 …… (80)
任务 1　激光焊接设备整体结构及使用维护 …… (80)
任务 2　激光焊接机谐振腔及光路传输系统装调 …… (107)
任务 3　激光焊接机 PLC 数控系统装配调试 …… (111)
任务 4　激光焊接加工 …… (115)
项目 4　激光切割设备装调与激光切割加工 …… (129)
任务 1　CNC2000 数控激光切割机使用 …… (129)
任务 2　大功率激光切割机结构及装配过程认识 …… (144)
任务 3　齿轮的大功率激光切割机切割加工 …… (152)
项目 5　其他激光加工技术 …… (185)
任务 1　激光淬火 …… (185)
任务 2　激光合金化 …… (191)
任务 3　激光熔覆 …… (203)
任务 4　激光快速成型技术 …… (217)
参考文献 …… (228)

项目 1

掌握激光原理及与激光加工相关的光学原理

任务 1　掌握激光原理及与激光加工相关的光学原理

1.1　任务描述

掌握激光产生的原理及过程、激光的特性、激光束变换、常见激光光学零件；
能根据激光加工的光学原理指导有关实践操作环节；
能分析激光器涉及的相关具体问题。

1.2　相关知识

1.2.1　激光产生的过程及特点

1. 激光产生的过程

1）激光是受激辐射的光放大

光与物质相互作用的过程包括自发辐射、受激辐射和受激吸收，如图 1.1 所示。激光，全称为受激辐射光放大，即 Light Amplification by Stimulate Emission of Radiation Laser。通常所说的激光器，就是使光源中的粒子受到激励而产生受激辐射跃迁，实现粒子数反转，通过受激辐射而产生光的放大的装置。实现能级粒子数反转是实现光放大的前提，也就是产生激光的先决条件。要实现粒子数反转，需借助外来的力量，使大量原来处于低能级的粒子跃迁到高能级上，这个过程称为“激励”。激光器虽然多种多样，但其功能都是通过激励和受激辐射而获得激光。因此，其基本组成通常为激活介质（即被激励后能产生粒子数反转的工作物质）、激励装置（即能使激活介质发生粒子数反转的能源、泵浦源）和光谐振腔（即能使光

束在其中反复振荡和被多次放大的装置)等三个部分。

以早期使用较多的红宝石激光器为例说明激光产生的过程及其谐振腔结构,如图 1.2 所示。

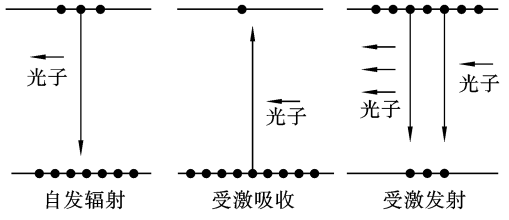


图 1.1 光与物质相互作用过程

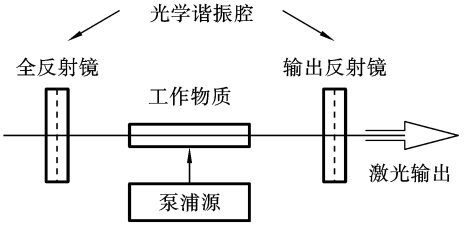


图 1.2 谐振腔的基本结构图

2) 激光工作物质能级结构

不同的激光器,其工作物质的能级结构不一样,分别有三能级系统、四能级系统和类四能级系统,如图 1.3 所示。例如,红宝石激光器采用三能级系统,CO_2、Nd:YAG、He-Ne 激光器采用四能级系统,掺 Nd^{3+} 双包层光纤激光器采用类四能级结构。

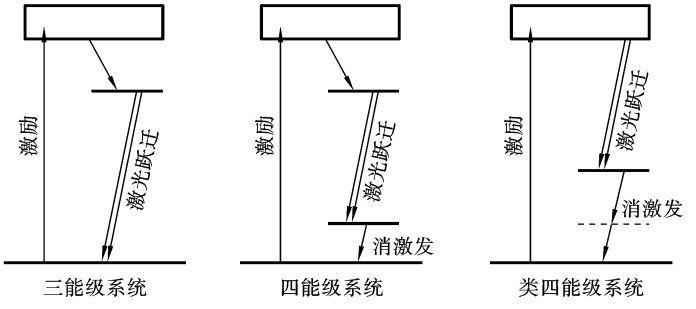


图 1.3 激光工作物质能级结构

2. 激光特点

激光具有以下特点。

(1) 方向性好。

普通光源(太阳、白炽灯或荧光灯)向四面八方发光,而激光的发光方向可以限制在几个毫弧度的立体角内,这就可将在照射方向上的照度提高千万倍。激光准直、导向和测距就是利用方向性好这一特性。

(2) 亮度高。

激光是目前最亮的光源,只有氢弹爆炸瞬间强烈的闪光才能与它相比拟。太阳光亮度大约是 10^3 瓦/(厘米^2 球面度),而一台大功率激光器的输出光亮度比太阳光的高出 7～14 个数量级。这样,尽管激光的总能量并不一定很大,但由于能量高度集中,很容易在某一微小点处产生高压和几万摄氏度甚至几百万摄氏度的高温。激光打孔、切割、焊接和激光外科手术就是利用这一特性。

(3) 单色性好。

光是一种电磁波。光的颜色取决于它的波长。普通光源发出的光通常包含着各种波

长，是各种颜色光的混合。太阳光包含红、橙、黄、绿、青、蓝、紫七种颜色的可见光，以及红外光、紫外光等不可见光。而某种激光的波长，只集中在十分窄的光谱波段或频率范围内。如氦氖激光的波长为 632.8 nm，其波长变化范围不到万分之一纳米。由于激光的单色性好，为精密度仪器测量和激励某些化学反应等科学实验提供了极为有利的手段。

(4) 相干性好。

干涉是波动现象的一种属性。基于激光具有高方向性和高单色性的特性，它必然相干性极好。激光的这一特性使全息照相成为现实。

1.2.2　激光束特性及其光学变换遵循的原理

1. 光学谐振腔

光学谐振腔是固体激光器的重要组成部分，不同类型的腔型结构，对激光输出的特性，诸如功率、模式、光束发散角等都有直接的影响。在设计固体激光器时，必须根据光学谐振腔的理论进行分析和计算，使设计的激光器的输出特征满足稳定的技术指标。设计光学谐振腔的目的是有效控制腔内的光场分布，所以谐振腔的结构往往与模式的选择技术分不开。最常用的是由两个球面镜(或平面镜)构成的共轴球面光学谐振腔，简称共轴球面腔。这里，平面镜看做是曲率半径为无穷大的球面镜。常见的共轴球面腔有平行平面腔、双凹面腔和平面凹面腔等三种，如图 1.4 所示。



(a) 平行平面腔　　(b) 双凹面腔　　(c) 平面凹面腔

图 1.4　共轴球面腔结构

2. 高斯光束

1) 高斯光束的特性

研究激光模式问题时，一般在研究基模高斯光束的基础上进行其他高阶横模的研究。如图 1.5 所示，高斯光束的光束波面振幅 A 呈高斯型函数分布。其光束截面的中心处振幅最大，随着 r 增加，振幅越来越小，常以 $r=\omega(z)$ 时的光束截面半径作为激光束的名义截面半径，并以 ω 来表示，即当 $r=\omega(z)$ 时，$A=\dfrac{A_0}{\mathrm{e}}$。这说明高斯光束的截面半径 ω 是当振幅 A 下降到中心振幅 A_0 的 $\dfrac{1}{\mathrm{e}}$ 时所对应的光束曲面半径。

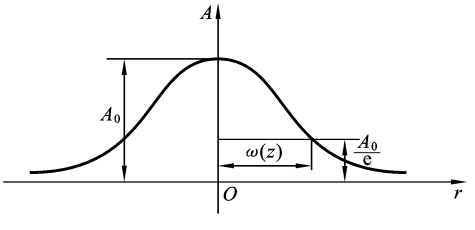


图 1.5　高斯光束截面

2) 高斯光束的传播

如图 1.6 所示，在均匀的透明介质中，高斯光束沿 Z 轴方向传播的光场分布为

$$E=\frac{C}{\omega(z)}\mathrm{e}^{-\frac{r^2}{\omega^2(z)}}\mathrm{e}^{-i\left[k\left(z+\frac{r^2}{2R(z)}\right)+\Phi(z)\right]}$$

式中：C 为常数因子；ω_0 为高斯光束的束腰半径；$k=\frac{2\pi}{\lambda}$ 为波数；$\omega(z)=\omega_0\left[1+\left(\frac{\lambda z}{\pi\omega_0^2}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}$ 为高斯光束的截面半径；$R(z)=z\left[1+\left(\frac{\pi\omega_0^2}{\lambda z}\right)^2\right]$ 为高斯光束的波面曲率半径；$\Phi(z)=\arctan\frac{\lambda z}{\pi\omega_0^2}$ 为高斯光束相位因子。

如图 1.7 所示，设高斯光束在传播过程中的发散角为 θ，则有 $\tan\theta=\frac{\lambda}{\pi\omega_0}$。

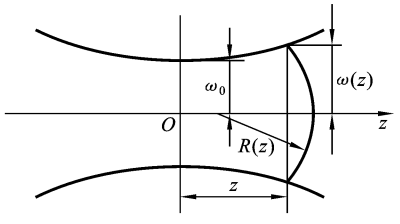


图 1.6 高斯光束传播

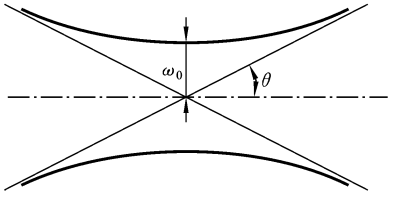


图 1.7 高斯光束的发散角

3）高斯光束的透镜变换

如图 1.8 所示，对高斯光束而言，在近轴区域其波面可以看做是球面波，其通过透镜的变换与球面波通过透镜的变换一致：满足近轴光成像关系 $\frac{1}{R_2}-\frac{1}{R_1}=\frac{1}{f'}$；当透镜为薄透镜时，高斯光束在透镜前后的通光口径相等，即 $\omega_1=\omega_2$；透镜前高斯光束束腰半径 ω_0 与 ω_0' 满足关系式为 $\omega_0'^2=\frac{f'^2\omega_0^2}{(f'+z)^2+\left(\frac{\pi\omega_0^2}{\lambda}\right)^2}$；经过透镜后高斯光束束腰位置为 $z'=\frac{z(z+f')+\left(\frac{\pi\omega_0^2}{\lambda}\right)^2}{(f'+z)^2+\left(\frac{\pi\omega_0^2}{\lambda}\right)^2}$。由此可知，当入射高斯光束束腰远离透镜时，近轴光学成像计算中无穷远处过来的光线聚焦到透镜的像方焦平面处。当入射高斯光束束腰处在透镜物方焦点处时则不能用近轴光学成像求解，此时，出射高斯光束的束腰恰好处在像方焦平面处，且出射光束束腰半径最大。

3. 激光准直扩束

在激光加工过程中，为了更好地对高斯光束进行聚焦，根据高斯光束的透镜变换公式，有必要对高斯光束进行准直扩束，即增加光束束腰半径，减小发散角。在实际中常用的方法是用望远系统进行准直扩束。如图 1.9 所示，高斯光束通过望远系统后发散角变为 $\frac{1}{\beta}$，束腰

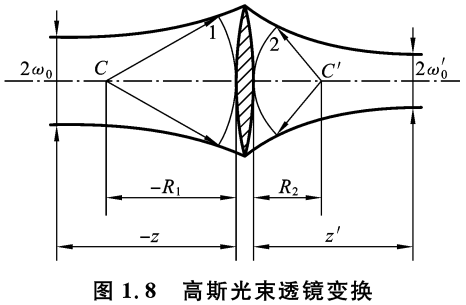


图 1.8 高斯光束透镜变换

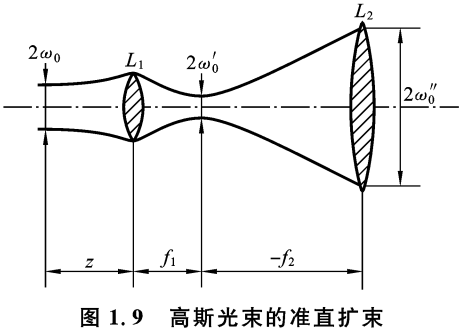


图 1.9 高斯光束的准直扩束

半径变为原来的β倍，其中β为望远系统的垂轴放大率。实际准直扩束一般用伽利略望远系统，避免出现实焦点。

1.2.3　激光模式及选模技术

1. 激光纵模及选择技术

激光纵模指谐振腔内激光沿轴向方向形成的每一种稳定的驻波形式，一般具体指可能产生的激光频率。每一个可以在腔内稳定振荡的某种频率的光都是一个纵模激光。所谓单纵模激光就是单色性很好、频率单一的激光，可以大致等效于单频率的激光。一般纵模选择技术包括长腔法、三反射镜法、内置法布里-珀罗腔法等。选择单纵模对用于测量的激光器影响很大，对工业用激光器一般影响很小。

2. 激光横模及选择技术

激光横模指激光的电场和磁场分量的空间分布，一般用TEM_{mn}表示，不同的横模对应不同的光束横截面形状，具体例子如图1.10和图1.11所示。在进行激光工业加工时，特别是进行激光精密加工时，常常要求激光模式为基横模TEM_{00}。评价其他激光束的光束质量因子M^2是表示激光束与基横模TEM_{00}接近程度的量。

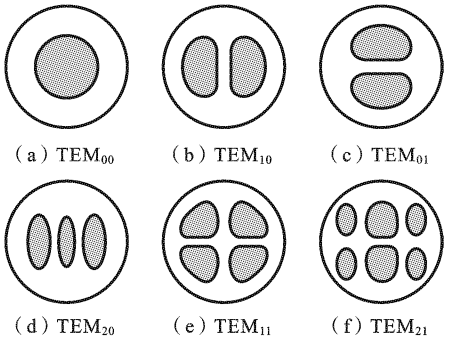


图1.10　轴对称式横模光斑形状

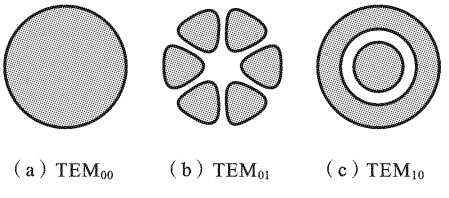


图1.11　旋转对称式横模光斑形状

1.2.4　激光器光学元件

1. 透射型光学元件

激光器的输出镜、聚焦系统的透镜、光路中的棱镜等均为透射型光学元件。用于透射型光学元件的材料应在工作波段有良好的透过率。在激光加工常用激光器中，CO_2激光器输出波长为10600 nm的红外光，不能透过普通光学玻璃，因此需要特殊的输出窗口和透射光学元件材料。Nd：YAG激光器输出波长为1064 nm的红外光，可以采用普通光学玻璃作为输出窗口和透射光学元件材料，采用最多的材料是硅酸硼冕牌玻璃，其透光波段为0.4～1.4 μm，被广泛用来制作透镜、反射镜、棱镜等。

常用的CO_2激光透射半导体材料有三种：锗(Ge，对10600 nm波长光的折射率$n=4$)、砷化镓(GaAs，对10600 nm波长光的折射率$n=3.277$)和硒化锌(ZnSe，对10600 nm波长光的折射率$n=2.4$)。前两者对可见光不透明，后者对可见光的黄光和红光部分透明，用其制

作输出窗口时，可用氦氖激光器的红光作为准直光来调节光路。锗在超过35℃时吸收率和透过率将发生明显变化，这将严重影响激光器的输出功率和稳定性，因此锗材料只能用于小功率激光器，并且窗口还需水冷。砷化镓的热破坏温度最高，适用于高功率激光器。绝大多数材料的吸收率随温度的升高而增大。半导体材料对红外光的吸收主要是自由载流子吸收，其吸收率随温度上升按指数规律增加。材料吸收红外光后产生热量，半导体内自由载流子受热产生运动又增加了对红外光的吸收，如此循环，当温度升到破坏阈值时，窗口或透镜等透射元件将产生热破坏。由于硒化锌不仅对可见光透射，而且吸收率最低，因此我国的高功率 CO_2 激光器多采用硒化锌制作窗口和聚焦透镜。

也可以采用氯化钾(KCl)或氯化钠(NaCl)作为 CO_2 激光器的透射材料，它们属于碱金属类红外材料，吸收率很低，对10600 nm波长光的折射率为1.5，折射率温度系数为负值，由热畸变引起的热透镜效应很小，对可见光透明；但其线胀系数大，热导率小，机械强度低，易潮解。

无论是Nd：YAG激光器采用硅酸硼冕牌光学玻璃作为输出窗口和透射光学元件材料，还是 CO_2 激光器采用锗、砷化镓或硒化锌作为输出窗口和透射光学元件材料，材料本身的透过率均不能满足要求，必须在两个表面镀介质膜或金属膜。

2. 反射型光学元件

激光器的全反射镜、导光系统中的高反射率转折镜和光路中的反射镜等都是反射型光学元件。反射型光学元件不存在色散，其光学特性主要的是指对不同波长光的反射率。用于反射型光学元件的材料应在工作波段有良好的反射率。

对于红外激光，用来制作反射镜的材料有铜、钼、硅、锗等。金、银、铜对 CO_2 激光器的反射率和热导率较大，很容易导出表面吸收的激光能量，所以破坏阈值很高，适合制作 CO_2 激光器的反射镜。

纯铜硬度低，不易进行光学抛光，一般是先将铜粗磨后镀镍、铬，再精密抛光，最后镀金或红外介质膜。镀金可以提高铜镜的反射率和抗腐蚀与抗氧化能力，红外介质膜可以提高反射率和保护镀金表面。近些年发展起来的金刚石精密车削技术能直接车削出高精度的铜镜，加以镀膜用做反射镜。

钼镜的硬度高，熔点高，激光加工中的溅射物不易黏附在表面，可擦拭污染表面，所以易污染的加工部位可选用钼镜。

硅的热导率很大，线胀系数很小，只有铜的15%，因而不易受热畸变，热稳定性好，其硬度很高，便于进行光学抛光。硅对 CO_2 激光的反射率低而吸收率高，抛光镀膜后可用做反射镜。但其破坏阈值低，一般在低功率密度下使用。

锗是 CO_2 激光器的透射材料，反射率很低，镀膜后反射率可达99%以上。锗的硬度也很高，便于进行光学抛光，但它的吸收率随温度的变化很大，只适用于低功率激光器。

砷化镓的吸收率小，基底材料抗破坏阈值大于 1.5×10^5 W/cm^2，尽管它对红外光的反射率很低，但经过镀膜后反射率可达99%以上，可以用做高功率激光器的反射镜。

3. 光学镀膜

镀膜是用物理或化学的方法在材料表面镀上一层透明的电介质膜(称为介质膜)，或镀

一层金属膜，目的是改变材料表面的反射和透射特性。

在可见光和红外波段范围内，大多数金属的反射率都可达78%～98%，但不可能高于98%。无论是对CO_2激光器采用铜、钼、硅、锗等来制作反射镜，采用锗、砷化镓、硒化锌作为输出窗口和透射光学元件材料，还是对Nd：YAG激光器采用普通光学玻璃作为反射镜、输出镜和透射光学元件材料，都不能达到全反射镜的反射率在98%以上。不同应用时输出镜有不同透过率的要求，因此必须采用光学镀膜方法。

对于CO_2激光等中红外波段，常用的镀膜材料有氟化钇、氟化镨、锗等；对于Nd：YAG激光等近红外波段或可见光波段，常用的镀膜材料有硫化锌、氟化镁、二氧化钛、氧化锆等。除了高反膜、增透膜以外，还可以镀对某波长增反射、对另一波长增透射的膜，如激光倍频技术中的分光膜（二色镜）等。

1.2.5　激光与物质相互作用

1. 作用种类

激光与物质相互作用过程分为以下几种。

1）无热或基本光学类

从微观上来说，激光是高简并度的光子，当它的功率（能量）密度很低时，绝大部分的入射光子被材料（金属）中电子弹性散射，这阶段的主要物理过程为反射、透射和吸收。由于吸收成热甚低，不能用于一般的热加工，主要研究内容属于基本光学范围。

2）在相变点以下（$T<T_s$）加热类

当入射激光强度提高时，入射光子与金属中电子会产生非弹性散射，电子通过逆韧致辐射效应，从光子获取能量。处于受激态的电子与声子（晶格）相互作用，把能量传给声子，激发强烈的晶格振动，从而使材料加热。当温度低于相变点（$T<T_s$）时，材料不发生结构变化。从宏观上看，这个阶段激光与材料相互作用的主要物理过程是传热。

3）在相变点以上但低于熔点（$T_s<T<T_m$）加热类

这个阶段的物理过程为材料固态相变过程，存在传热和质量传递物理过程。主要工艺为激光相变硬化，主要研究激光工艺参数与材料特性对硬化的影响。

4）在熔点以上但低于汽化点（$T_m<T<T_v$）加热类

激光使材料熔化，形成熔池。熔池外主要是传热，熔池内存在三种物理过程：传热、对流和传质。主要工艺为激光熔凝处理、激光熔覆、激光合金化和激光传导焊接。

5）在汽化点以上（$T>T_v$）加热出现等离子体类

激光使材料汽化，形成等离子体，这在激光深熔焊接中是经常见到的现象。利用等离子体反冲效应，还可以对材料进行冲击硬化处理。

2. 作用原理

1）物理过程

激光作用在被加工材料上，光波的电磁场与材料相互作用，这一相互作用过程主要与激

光的功率密度、激光的作用时间、材料的密度、材料的熔点、材料的相变温度、激光的波长，以及材料表面对该波长激光的吸收率、热导率等有关。激光使材料的温度不断上升，当作用区光吸收的能量与作用区输出的能量相等时，达到能量平衡状态，作用区温度将保持不变，否则温度将继续上升。这一过程中，激光作用时间相同时，光吸收的能量与输出的能量差越大，材料的温度上升越快；激光作用条件相同时，材料的热导率越小，作用区与其周边的温度梯度越大；能量差相同时，材料的比热容越小，材料作用区的温度越高。

激光的功率密度、作用时间、作用波长不同，或者材料本身的性质不同，材料作用区的温度变化就不同，使材料作用区内材料的材质状态发生不同的变化。对有固态相变的材料来讲，可以用激光加热来实现相变硬化。对所有材料来讲，可以用激光加热使材料处于液态、气态或者等离子体等不同状态。在不同激光参数下，各种加工的应用范围如图 1.12 所示。

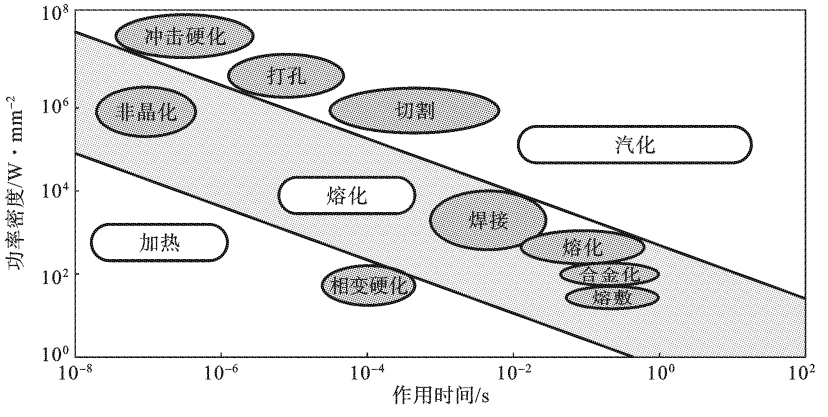


图 1.12　各种参数下激光加工的可能应用和影响

2）能量变化规律

激光照射到材料上，要满足能量守恒定律，即满足

$$R+T+\alpha=1 \tag{1-1}$$

式中：R 为材料的反射率；T 为材料的投射率；α 为材料的吸收率。

若激光沿 x 方向传播，照射到材料上被吸收后，其强度减弱且满足

$$I=I_0 e^{-\alpha x} \tag{1-2}$$

式中：I_0 为入射光强度；α 为材料的吸收率；x 表示位置，常用单位为 mm^{-1}，是一个与光强无关的比例系数。式(1-2)称为布格尔定律(朗伯定律)。

由此可见，激光在材料内部传播时，强度按指数规律衰减，其衰减程度由材料的吸收率 α 决定。通常定义激光在材料中传播时，激光强度下降到入射光强度的 1/e 时对应的深度为穿透深度。吸收率 α 与材料的种类、激光入射波长等有关。

当激光强度达到足够高时，强激光与物质作用的结果使物质的折射率发生变化，激光束中间强度高、两边强度迅速下降的高斯分布，使材料中光束通过区域的折射率产生中间大两边小的分布，因此材料会出现类似透镜的聚焦(或散焦)现象，称为自聚焦(或自散焦)。

3）吸收率

光传播到两种不同介质界面上，光波的电磁场与物质相互作用，将发生反射、折射和吸收。没有光波入射，介质处于电中性，当光波的电磁场入射到介质上时，就会引起光波场和介质中带电粒子的相互作用，反射光和折射光都是由于两介质交界面内一层的原子和分子对入射光的相干散射产生的，光波场使界面原子成为振荡的偶极子，辐射的次波在第一介质中形成了反射波，在第二介质中形成了折射波。光吸收是介质的普遍性质，除了真空，没有一种介质能对任何波长的光波都完全透明，只能对某些波长范围内的光透明，而对另一些波长范围的光不透明，即存在强烈的吸收。

4）反射率

大部分金属的初始反射率在70%～90%范围内。当激光由空气垂直入射到平板材料上时，根据菲涅尔公式，反射率为

$$R=\left|\frac{n-1}{n+1}\right|=\frac{(n_1-1)^2+n_2^2}{(n_1+1)^2+n_2^2} \tag{1-3}$$

式中：n_1 和 n_2 分别为材料复折射率的实部和虚部，非金属材料的虚部为零。

材料对激光的吸收和反射主要与激光波长、材料温度、激光入射角、入射光偏振态和材料表面状况有关。

（1）波长的影响。

吸收率 α 是波长的函数，根据吸收率随波长变化规律的不同，把吸收率 α 与波长有关的吸收称为选择吸收，与波长无关的吸收称为一般吸收或普遍吸收。例如，半导体材料锗(Ge)对可见光不透明，吸收率高；但对10600 nm的红外光是透明的，因此可以用做 CO_2 激光器的输出腔镜。在可见光范围内，普通光学玻璃的吸收率都较小，基本不随波长变化，属于一般吸收，但普通光学玻璃对紫外光和红外光则表现出不同的选择性吸收。有色玻璃具有选择性吸收，红玻璃对红光吸收少，而对绿光、蓝光和紫光几乎全吸收。所以当白光照到红玻璃上时，只有红光能透过去，看到它是红色的。若红玻璃用红光的对比光绿光照射，则看上去玻璃将是黑色的。绝大部分物体呈现颜色，都是其表面或内部对可见光进行选择吸收的结果。

金属在一般情况下对波长较长的激光初始吸收率较小，例如，在进行激光切割时Nd：YAG激光的初始吸收率金属对就比对 CO_2 激光的高。室温下，在氩离子激光(488 nm)、红宝石激光(694.3 nm)、Nd：YAG激光(1064 nm)和 CO_2 激光(10600 nm)作用下多种光洁表面材料的吸收率见表1.1。

（2）温度的影响。

当温度变化时，材料对激光的吸收率也随之变化，温度升高，材料对激光的吸收率增大；激光功率越大，使材料温度上升得越高，则材料对激光的吸收率也越大。例如，金属在室温下对激光吸收率较小，温度上升到熔点附近时，其对激光的吸收率达到40%～50%，若温度上升到沸点附近时，其对激光的吸收率可达90%。

表 1.1 室温下不同激光波长作用时多种光洁表面材料的吸收率

材　料	氩离子激光 488 nm	红宝石激光 694.3 nm	Nd：YAG 激光 1064 nm	CO_2 激光 10600 nm
铝(Al)	0.09	0.11	0.08	0.019
铜(Cu)	0.56	0.17	0.10	0.015
金(Au)	0.58	0.07	—	0.017
铱(Ir)	0.36	0.30	0.22	—
铁(Fe)	0.68	0.64	—	0.035
铅(Pb)	0.38	0.35	0.16	0.045
钼(Mo)	0.48	0.48	0.40	0.027
镍(Ni)	0.58	0.32	0.26	0.030
铌(Nb)	0.40	0.50	0.32	0.036
铂(Pt)	0.21	0.15	0.11	0.036
铼(Re)	0.47	0.44	0.28	—
银(Ag)	0.05	0.04	0.04	0.014
钽(Ta)	0.65	0.50	0.18	0.044
锡(Sn)	0.20	0.18	0.19	0.034
钛(Ti)	0.48	0.45	0.42	0.080
钨(W)	0.55	0.50	0.41	0.026
锌(Zn)	—	—	0.16	0.027
砷化镓(GaAs)	—	—	—	0.005
硒化锌(ZnSe)	—	—	—	0.001
氯化钠(NaCl)	—	—	—	1.3×10^{-3}
氯化钾(KCl)	—	—	—	7×10^{-5}
锗(Ge)	—	—	—	0.012
碲化镉(CdTe)	—	—	—	2.5×10^{-4}
溴化钾(KBr)	—	—	—	0.420

(3) 激光入射角的影响。

激光入射角影响材料对激光的吸收和反射。由物理光学理论可知，对于普通电介质，根据菲涅尔公式，光波入射到两种电介质界面时，垂直于入射面的 S 分量的反射率为

$$R_S=\left(\frac{n_1\cos\theta_1-n_2\cos\theta_2}{n_1\cos\theta_1+n_2\cos\theta_2}\right)^2 \tag{1-4}$$

平行于入射面的 P 分量的反射率为

$$R_P=\left(\frac{n_2\cos\theta_1-n_1\cos\theta_2}{n_2\cos\theta_1+n_1\cos\theta_2}\right)^2 \tag{1-5}$$

式中：n_1 和 n_2 分别为两介质的折射率；θ_1 和 θ_2 分别为入射角和折射角。

若光波垂直入射，即 $\theta_1=\theta_2=0$，则有

$$R_P=R_S=\left(\frac{n_2-n_1}{n_2+n_1}\right)^2 \tag{1-6}$$

(4) 入射偏振态的影响。

介质表面对激光的反射率既与光波的入射角有关，又与光波的偏振态有关。若入射的激光为垂直于入射面的线偏振光，则反射率 R 随入射角增大而增大，则吸收率 α 就随入射角增大而减小；若入射的激光为平行于入射面的线偏振光，则反射率 R 随入射角增大而减少，而吸收率 α 就随入射角增大而增大。当达到布儒斯特角时，反射率 R 为零，吸收率 α 最大。这一特点可以应用于不加涂层直接用激光对材料进行表面处理的情况。对于不同材料，由于折射率 n 不同，将有不同的布儒斯特角。

(5) 材料表面状况的影响。

一般情况下，材料表面越粗糙，反射率越低，材料对激光的吸收率越大。而且在激光加工过程中，由于激光对材料的加热，存在表面氧化和污染，材料对激光的吸收率将进一步增大。

5) 不同材料对激光的吸收率与反射率各不相同

(1) 金属材料对激光的吸收与反射。

导电介质的特征是存在许多未被束缚的自由电荷，对金属来讲，电荷就是电子，其运动形成了电流(金属中 1 cm^3 中电子个数约为 10^{22} 的数量级)，因此金属的电导率 σ 很大，其电荷密度 ρ 会很快地衰减为零，可以认为金属中的电荷密度 ρ 为零。金属中，传导电子和进行热扰动的晶格或缺陷发生碰撞，将入射的光波能量不可逆地转化为焦耳热。因此，光波在金属中传播时，会被强烈地吸收。

当光照射在清洁磨光的金属表面时，金属中的自由电子将在光波电磁场的作用下发生强迫振动，产生次波，这些次波构成了很强的反射波和较弱的透射波，这些透射波很快被吸收。

由物理光学可知，金属材料的折射率为复数，光波在金属中传播时，定义光波振幅衰减到表面振幅的 1/e 时的传播距离为穿透深度，这个穿透深度的数量级比波长的小。一种材料若是透明的，它的穿透深度必须大于它的厚度。可见光波只能透入金属表面很薄的一层内，因此通常情况下，金属是不透明的。例如，铜在 100 nm 的紫外光照射下的穿透深度约为 0.6 nm，而在 10000 nm 的红外光照射下的穿透深度约为 6 nm。当把金属做成很薄的薄膜时，它可以变成透明的。

金属对光波具有强吸收和强反射作用。强吸收指的是在小于波长数量级的穿透深度内，金属中的传导电子将入射的光波能量转化为焦耳热，一般在 10^{-11}～10^{-10} s 的时间内被强烈地吸收，但由于穿透深度很小，因此电子耗散的总能量很小。强反射指的是由于金属表面的反射率比透明介质(如普通光学玻璃)的高得多，大部分入射能量都被金属表面反射掉。各种金属因其自由电子密度不同，反射光波的能力不同。一般情况下，自由电子密度越大，即电导率越大，反射率越高。

入射光波长不同，反射率不同。在可见光和红外光波段范围内，大多数金属都有很高的反射率，可达 78%～98%，而在紫外光波段，其吸收率很高。因为波长较长(频率较低)的红外光的光子能量较低，主要对金属中的自由电子发生作用，使金属的反射率高；而波长较短(频率较高)的可见光和紫外光，其光子能量较高，可以对金属中的束缚电子发生作用。束缚电子本身的固有频率正处在可见光和紫外光波段，它将使金属的反射率降低，透射率增大，呈现出非金属的光学性质。

正因为金属表面的反射率随激光波长变化而变化，所以在激光加工中，为了有效地利用激光能量，应当根据不同的材料选用不同波长的激光。红外光波段的 10600 nm CO_2 激光和