





普通高等教育“十三五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU “13-5” GUIHUA JIAOCAI

激光材料加工及其应用

刘其斌 周芳 徐鹏 编著



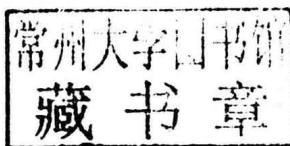
 冶金工业出版社
www.cnmip.com.cn



普通高等教育“十三五”规划教材

激光材料加工及其应用

刘其斌 周芳 徐鹏 编著



北京

冶金工业出版社

2018

内 容 提 要

全书共分5章, 主要内容包括: 激光产生的基本原理及其发展历程; 激光材料加工的技术基础; 激光与材料交互作用的理论基础; 激光相变硬化(激光淬火); 激光熔覆与合金化。内容由浅入深, 循序渐进, 结构严谨, 理论联系实际。

本书可供激光材料专业的师生使用, 也可供从事相关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

激光材料加工及其应用/刘其斌, 周芳, 徐鹏编著. —北京: 冶金工业出版社, 2018. 4

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5024-7733-2

I. ①激… II. ①刘… ②周… ③徐… III. ①激光材料—加工—高等学校—教材 IV. ①TN244

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第046290号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷39号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcs@cnmp.com.cn

责任编辑 郭冬艳 美术编辑 吕欣童 版式设计 禹蕊

责任校对 石静 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7733-2

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 固安华明印业有限公司印刷

2018年4月第1版, 2018年4月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16; 10.5印张; 253千字; 158页

30.00元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街46号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题, 本社营销中心负责退换)

前 言

激光是 20 世纪最伟大的发明之一。它一经出现就深刻地改变了人们对世界的认识，引领着人们利用激光创造了一个又一个奇迹。从激光制导炸弹到激光核聚变，从激光切割、激光焊接、激光打孔、激光打标、激光清洗、激光表面改性到激光增材制造再到激光 3D 打印，从激光测量到激光美容，从激光催陈到激光育种等等，激光技术已经逐步渗透到军事、工业、农业、医疗、食品安全以及人们生活的方方面面，可以预料，激光将在 21 世纪助推我国从世界“制造大国”向世界“智造强国”迈进。

激光材料加工是一种高度柔性和智能化的先进制造技术，被誉为“21 世纪的万能加工工具”，“未来制造技术的共同加工手段”。激光材料加工技术正以前所未有的速度向航空航天、机械制造、石化、船舶、冶金、电子、信息等领域扩展，并深刻影响着各国科技水平的发展。

激光材料加工技术是一门综合性的高技术，它交叉了光学、材料科学与工程，机械制造、数控技术及电子等学科，是当前国内外科技界和产业界共同关注的热点。由于激光固有的四大特性（高的单色性、方向性、相干性和高能量密度），它被广泛地应用于工业、农业、国防、医学、科学实验和娱乐诸多方面，并发挥着十分重要的作用。

激光材料加工技术主要包括激光打孔、激光焊接、激光相变硬化、激光熔覆与合金化、激光标记、激光雕刻等。本书第 1 章主要介绍了激光的基本知识，激光材料加工的特点，国内外发展状况及趋势。第 2 章主要介绍了激光材料加工的技术基础以及各种激光器的功能，尤其是现在迅速崛起的光纤激光器和半导体激光器。第 3 章主要介绍了激光与材料的交互作用原理、固态相变以及熔池流动特性，它是本书的基础理论部分。许多激光加工的技术问题都与此

相关，均能在此找到答案或获得启迪。第4章主要介绍了激光相变硬化（激光淬火）的原理、强化机制及应用。第5章则分别介绍了激光合金化与熔覆的原理，激光熔覆制备各种功能涂层的方法及应用，还介绍了当前十分流行的激光3D打印技术及其应用领域。

本书作者长期从事激光材料加工技术的教学、科研以及产业化推广应用工作，本书中许多内容都是作者科研成果的真实反映。特别是在产业化过程中，作者对激光材料加工的应用领域有一些自己的独到认识，已将这些认识体现在本书中，以使后人从事产业化少走弯路或者从中获得某些启迪。

本书目的在于向广大读者介绍激光材料加工技术的基础知识和应用领域，力争做到条理清楚，概念准确，通俗易懂。本书适于从事这一新兴领域的教师、工程技术人员以及研究生和高年级的大学生选用。

在编写过程中始终得到贵州大学党政领导的关心和支持，得到我的研究生的无私帮助，尤其是研究生刘文成同学认真细致的检查和校对，在此一并向他们表示诚挚的谢意。

由于激光材料加工技术是一门快速发展的新型交叉学科，诸多理论和工艺尚处在不断发展中，同时由于作者交叉学科的知识有限，书中难免出现不当之处，欢迎广大读者批评指正。

作 者

2017年11月

目 录

1 绪论	1
1.1 激光产生的基本原理及其发展历程	1
1.1.1 激光产生的基本原理	1
1.1.2 激光的发展历史	2
1.2 激光的特性	3
1.2.1 激光的高亮度	3
1.2.2 激光的高方向性	3
1.2.3 激光的高单色性	3
1.2.4 激光的高相干性	3
1.3 激光材料加工的特点	4
1.4 激光材料加工的发展及应用现状	4
1.4.1 国外激光材料加工的发展及应用	4
1.4.2 我国激光材料加工的发展及应用	4
1.5 激光材料加工的发展趋势	5
复习题	5
2 激光材料加工的技术基础	6
2.1 激光材料加工用激光器	6
2.1.1 高功率二氧化碳激光器系统	6
2.1.2 固体激光器系统	7
2.1.3 准分子激光器	8
2.1.4 光纤激光器	8
2.1.5 半导体激光器	12
2.1.6 激光材料加工用其他激光器	13
2.1.7 正确选用材料加工用激光器	13
2.2 激光材料加工成套设备系统	14
2.2.1 激光加工机床	14
2.2.2 激光加工成套设备系统及国内外主要厂家	14
2.3 激光材料加工用光学系统	14
2.3.1 激光器窗口	14
2.3.2 导光聚焦系统及光学元部件 (激光加工外围设备)	15
2.4 激光束参量测量	15

2.4.1	激光束功率、能量参数测量	15
2.4.2	激光束模式测量	16
2.4.3	激光束束宽、束散角及传播因子测量	17
2.4.4	激光束偏振态测量	18
2.4.5	激光束的光束质量及质量因子的概念	19
	复习题	19
3	激光与材料交互作用的理论基础	20
3.1	材料对激光吸收的一般规律	20
3.1.1	吸收系数与穿透深度	20
3.1.2	激光垂直入射时的反射率和吸收率	21
3.1.3	吸收率与激光束的偏振和入射角的依赖关系	21
3.2	激光束与金属材料的交互作用	22
3.2.1	交互作用的物理过程	22
3.2.2	固态交互过程	23
3.2.3	液态交互作用	24
3.2.4	气态的交互作用	24
3.2.5	激光诱导等离子体现象	24
3.3	激光束作用下的传热与传质	25
3.3.1	传热过程	25
3.3.2	传质过程	31
3.4	高能束加热的固态相变	32
3.4.1	固态相变硬化特征	32
3.4.2	固态相变组织	35
3.5	高能束加热的熔体及凝固	38
3.5.1	熔体特性	38
3.5.2	凝固特征	40
3.5.3	凝固组织	42
3.5.4	重熔凝固组织	42
3.5.5	自由表面组织	42
	复习题	43
4	激光相变硬化 (激光淬火)	44
4.1	激光相变硬化 (激光淬火) 原理	44
4.2	激光相变硬化工艺	44
4.2.1	激光相变硬化工艺参数及相互关系	45
4.2.2	激光相变硬化工艺参数的选择和确定	45
4.3	表面预处理对硬化效果的影响	46
4.3.1	工件表面预处理方法	46

4.3.2 对硬化效果的影响	47
4.4 原始组织对硬化后的组织性能的影响	47
4.5 常用金属材料激光相变硬化后的组织和性能	49
4.6 激光相变硬化后的残余应力及变形	52
4.6.1 残余应力	52
4.6.2 变形	53
4.7 激光硬化后的质量检测	54
4.8 激光相变硬化的应用实例	55
复习题	55
5 激光熔覆与合金化	56
5.1 激光熔覆与合金化的理论基础	56
5.1.1 激光熔覆与合金化联系与区别	56
5.1.2 激光熔覆与合金化的成分均匀性及其控制	56
5.1.3 激光熔覆与合金化的应力状态、裂纹与变形	57
5.1.4 激光熔覆与合金化的气孔及其控制	58
5.2 激光熔覆制备金属基梯度复合材料涂层	59
5.2.1 梯度涂层成分设计	59
5.2.2 梯度涂层的激光熔覆制备过程	60
5.2.3 梯度涂层的组织与性能	60
5.3 激光熔覆制备梯度生物活性陶瓷复合涂层及其生物活性	63
5.3.1 梯度生物活性陶瓷涂层成分设计	64
5.3.2 梯度生物活性陶瓷涂层的制备过程	65
5.3.3 梯度生物活性陶瓷涂层的组织结构	67
5.3.4 梯度生物活性陶瓷涂层的力学性能	73
5.3.5 梯度生物活性陶瓷涂层的生物活性及生物相容性	87
5.4 激光熔覆制备高熵合金涂层	107
5.4.1 高熵合金理论基础	107
5.4.2 高熵合金特性	108
5.4.3 高熵合金的制备方法	111
5.4.4 高熵合金的性能及应用	113
5.4.5 激光制备高熵合金工艺优化	114
5.4.6 激光熔覆功率对高熵合金涂层组织的影响	115
5.4.7 激光熔覆扫描速度对高熵合金涂层组织的影响	116
5.4.8 激光制备高熵合金涂层组织结构分析	118
5.5 激光熔覆制备形状记忆合金涂层	130
5.5.1 激光熔覆 Fe-Mn-Si 记忆合金涂层的制备工艺	131
5.5.2 激光熔覆 Fe-Mn-Si 记忆合金涂层的试验方法	131
5.5.3 记忆合金涂层的成分设计	136

5.5.4 记忆合金涂层的组织结构分析	138
5.5.5 记忆合金涂层的力学性能分析	140
5.6 激光表面熔覆技术的应用	148
5.6.1 在化工行业的应用	148
5.6.2 在机械行业的应用	148
5.6.3 在冶金行业的应用	149
5.7 激光表面合金化	150
5.7.1 激光表面合金化类型	150
5.7.2 激光表面合金化的合金材料体系	150
5.7.3 激光表面合金化的应用	152
5.8 激光选区熔化增材制造技术(激光3D打印技术)	153
5.8.1 激光选区熔化增材制造技术	153
5.8.2 激光选区熔化增材制造技术的应用	153
复习题	157
参考文献	158

激光是 20 世纪最伟大的发明之一，它一经出现就深刻地改变了人们对世界的认识，引领着人们利用激光创造了一个又一个的奇迹。从激光制导炸弹到激光核聚变，从激光切割、激光焊接、激光打孔、激光打标、激光清洗、激光表面改性到激光增材制造再到激光 3D 打印，从激光测量到激光美容，从激光催陈到激光育种等等，激光技术已经逐步渗透到军事、工业、农业、医疗、食品安全以及我们生活的方方面面，可以预料，激光将在 21 世纪助推我国从世界“制造大国”向世界“智造强国”迈进。

本章重点介绍激光产生的基本原理，激光的四大特性，激光发展的历程，激光材料加工技术的特点和发展趋势等。

1.1 激光产生的基本原理及其发展历程

1.1.1 激光产生的基本原理

激光是受激辐射而产生的增强光。受激辐射与自发辐射有本质的区别。光的受激辐射是指高能级 E_2 的粒子，受到从外部入射的频率为 ν 的光子的诱发，辐射出一个与入射光子一模一样的光子，而跃迁回低能级的过程，如图 1-1 所示。

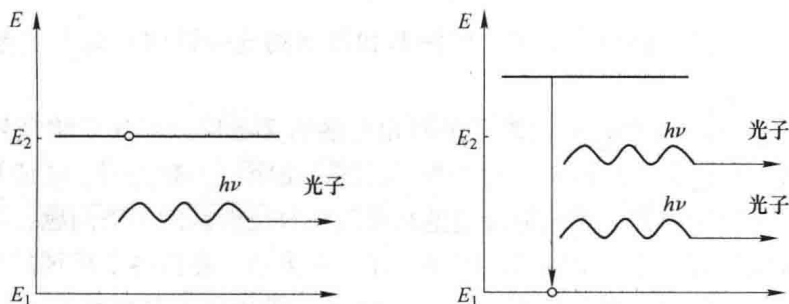


图 1-1 光的受激辐射

受激辐射光有三个特征：

- (1) 受激辐射光与入射光频率相同，即光子能量相同；
- (2) 受激辐射光与入射光相位，偏振和传播方向相同，所以两者是完全相干的；
- (3) 受激辐射光获得了增强。

激光形成的物理过程是产生激光的工作物质受激发造成粒子反转状态，并不断增强至占优势的过程。将受激的工作物质放在两端有反射镜的光学谐振腔中，并提供外界光辐射，如氙灯、氪灯或辉光放电等，则受激辐射将会不断产生激光光子。在此产生的光子中，其运动方向与光腔轴线方向不一致的光子，都从侧面逸出腔外并转换为热能，没有激

光输出。只有运动方向与光腔轴线方向一致的光子，被两面反射镜不断地往返反射，来回振荡，从而得到放大。当这种光放大超过腔内损耗（包括散射、衍射损耗等），即光放大超出腔内的阈值时，则会在激光腔的输出端产生激光辐射——激光束。

由上述激光原理可知，任何类型的激光器都包括三个基本要素：

- (1) 可以受激发的激光工作物质；
- (2) 工作物质要能够实现粒子数反转；
- (3) 光学谐振腔。

1.1.2 激光的发展历史

1960年，世界上第一台激光器是由美国科学家梅曼（T. H. Maiman）研究成功的。1960年7月7日，*New York Times*发表了梅曼研制成功的第一台激光器的消息，随后又在英国*Nature*和*British Commum*发表，第二年其详细论文在*Physical Review*上刊出。其实，Einstein在1916年便提出了一种现在称之为光学感应吸收和光学感应发射的观点（又叫受激吸收和发射），有谁能想到，这一观点后来竟成为激光器的主要物理基础。1952年，马里兰大学的Weiber（韦伯）开始运用上述概念去放大电磁波，但其工作没有进展，也没有引起广泛的注意，后来激光的发明人汤斯（C. Townes）向韦伯索要了论文，继续这一工作，才打开了一个新的领域。汤斯的设想是：由四个反射镜围成一只玻璃盒，盒内充以铯，盒外放一盏铯灯，使用这一装置便可以产生激光。汤斯的合作者肖洛（A. Schawlow）擅长于光谱学，对于原子光谱及两平行反射镜的光学特性十分熟悉，便对汤斯的设想提出两条修改意见：

- (1) 铯原子不可能产生光放大，建议改用钾（其实钾也不易产生激光）。
- (2) 建议用两面反射镜便可以形成光的振荡器，不必沿用微波放大器的封闭盒子作为谐振器。

直到现在，尽管激光器种类很多，但汤斯和肖洛的这一设想仍为各类激光器的基本结构。

1958年12月*Physical Review*发表了汤斯和肖洛的文章后，引起了物理界的关注，许多学者参加了这一理论和实验研究，都力争自己能造出第一台激光器。汤斯和肖洛都没有取得成功，原因是汤斯遇到了无法解决的铯和钾蒸气对反射镜的污染问题，而肖洛在实验研究后却误认为红宝石不能产生激光。可是，在一年多后，在世界上出现的第一台激光器正是梅曼用红宝石研制的。尽管世界上第一台红宝石激光器不是由汤斯和肖洛研制出来的，但是他们所提出的基本概念和构想却被公认是对激光领域划时代的贡献。

- (1) 1962年，出现了半导体激光器。
- (2) 1964年，C. Patel（帕特尔）发明了第一台CO₂激光器。
- (3) 1965年，发明了第一台YAG激光器。
- (4) 1968年，发展高功率CO₂激光器。
- (5) 1971年出现了第一台商用1kW CO₂激光器。

上述一切，特别是高功率激光器的研制成功，为激光加工技术应用的兴起和迅速发展创造了必不可少的前提条件。

我国激光研究起步之快，发展之迅速令我们骄傲和自豪。

(1) 1961年9月,王之江领导研制的第一个固体红宝石激光装置在长春光机所成功运行。

(2) 1963年7月,邓锡铭领导建立的第一台气体激光器(氩管)在长春光机所成功运行。

其后,在该所相继由王乃弘建立了钾铯半导体激光器,刘颂豪、沃新能用所里生产的晶体建立了氟化钙激光器,干福熹等建立了钹玻璃激光器,刘顺福建立了含钹钨酸钙晶体激光器;吕大元、余文炎建立了转镜Q开关激光器。

1.2 激光的特性

1.2.1 激光的高亮度

$$B = P / (S \cdot \Omega) \quad (\text{W} / (\text{cm}^2 \cdot \text{Sr}))$$

太阳光的亮度值约为 $2 \times 10^3 \text{ W} / (\text{cm}^2 \cdot \text{Sr})$ 。气体激光器的亮度值为 $10^8 \text{ W} / (\text{cm}^2 \cdot \text{Sr})$, 固体激光器的亮度更高达 $10^{11} \text{ W} / (\text{cm}^2 \cdot \text{Sr})$ 。这是由于激光器的发光截面 (S) 和立体发散角 (Ω) 都很小, 而输出功率 (P) 都很大的缘故。

1.2.2 激光的高方向性

激光的高方向性主要是指其光束的发散角小。光束的立体发散角为:

$$\Omega = \theta_2 \approx (2.44\lambda/D)^2$$

式中, λ 为波长; D 为光束截面直径。

一般工业用高功率激光器输出光束的发散角为毫拉德量级。对于基模或高斯模, 光束直径和发散角最小, 其方向性也最好, 这在激光切割和激光焊接中是至关重要的。

1.2.3 激光的高单色性

单色性用 $\Delta\nu/\nu = \Delta\lambda/\lambda$ 来表征, 其中 ν 和 λ 分别为辐射波的中心频率和波长, $\Delta\nu$ 、 $\Delta\lambda$ 是谱线的线宽。原有单色性最好的光源是 Kr^{86} 灯, 其 $\Delta\nu/\Delta\lambda$ 值为 10^{-6} 量级, 而稳频激光器的输出单色性 $\Delta\nu/\Delta\lambda$ 可达 $10^{-10} \sim 10^{-13}$ 量级, 要比原有的 Kr^{86} 灯高几万倍至几千万倍。

1.2.4 激光的高相干性

相干性主要描述光波各个部分的相位关系。其中: 空间相干性 S 描述垂直光束传播方向的平面上各点之间的相位关系; 时间相干性 Δt 则描述沿光束传播方向上各点的相位关系。相干性完全是由光波场本身的空洞分布(发散角)特性和频率谱分布特性(单色性)所决定的。由于激光的 θ 和 $\Delta\nu$ 、 $\Delta\lambda$ 都很小, 故其 $S_{\text{相干}} = \frac{\lambda}{\theta}$ 和相干长度 $L_{\text{相干}} = c \cdot \Delta t_{\text{相干}} = \frac{c}{\Delta\nu}$ 都很大。

正是由于激光具有如上所述四大特点, 才使其得到了广泛的应用。激光在材料加工中的应用就是其应用的一个重要领域。

1.3 激光材料加工的特点

由于激光具有四大特点,因此给激光加工带来了如下传统加工所不具备的可贵特点:

(1) 由于它是无接触加工,并且高能量激光的能量及其移动速度均可调,因此可以实现多种加工的目的。

(2) 它可以对于多种金属、非金属加工,特别是可以加工高硬度、高脆性及高熔点的材料。

(3) 激光加工过程中无“刀具”磨损,无“切削力”作用于工件。

(4) 激光加工的工件热影响区小,工件热变形小,后续加工量小。

(5) 激光可通过透明介质对密闭容器内的工件进行各种加工。

(6) 激光束易于导向。聚焦实现各方向变换,极易与数控系统配合,对于复杂工件进行加工,因此,它是一种极为灵活的加工方法。

(7) 生产效率高,加工质量稳定可靠,经济效益和社会效益显著。

1.4 激光材料加工的发展及应用现状

1.4.1 国外激光材料加工的发展及应用

迄今为止,全球已形成了以美国、欧盟、日本等国家为领头羊的激光加工市场,激光材料加工正以前所未有的速度成为 21 世纪先进加工及制造技术,并已经在全球形成了一个新兴的高技术产业。

(1) 激光器市场的发展。目前,激光加工所用设备主要为 CO₂激光器、Nd:YAG 激光器(掺钕钇铝石榴石激光器)、光纤激光器以及半导体激光器等,针对不同的材料加工,现已开发出多种激光器应用于工业加工,如准分子激光器、皮秒激光器、飞秒激光器等。

(2) 激光加工工艺的发展。激光加工工艺从最早的激光淬火到激光合金化,激光熔覆再到当前的激光加工组合工艺,已形成一套完整的工艺制度。

(3) 激光加工应用市场。目前,激光加工已广泛应用于航空航天、机械、冶金、化工、矿业、造船等行业。随着激光加工技术的不断推广应用,它必定会进一步向其他领域迈进。在激光加工服务方面,美国约有 1500 家激光加工站(Job Shop),欧洲约有 1600 家,日本约有 1000 家,其规模大小不等,有的只承担单一工种的加工,有的则可以承担各种要求的加工。所有这些激光加工站都具有良好的经济效益以及很强的生命力。

1.4.2 我国激光材料加工的发展及应用

我国第一台激光器在 1961 年便研制成功,1963 年研制成功激光打孔机,1965 年正式在拉丝和手表宝石轴承上采用激光打孔。以后相继采用 CO₂激光器,钎玻璃激光器,YAG 激光器对于不同材料、不同零件进行打孔。

我国自改革开放以来,通过“六五”、“七五”、“八五”三个五年计划的攻关,高功率激光器的研制水平日臻成熟。在激光热处理、激光焊接、激光打孔、激光切割等方面已取得了巨大的经济效益和社会效率。从 2005~2015 年,激光加工年产值以 42% 的速度递

增,目前,全国大约已建立了 2000 家 Job Shop。

(1) 在激光器的研制方面。我国现在已能自己生产从低功率到高功率的 CO₂ 激光器, YAG 激光器并能稳定运行。半导体激光器, 光纤激光器已经研发成功并已运用于激光切割、激光焊接、激光表面改性和激光 3D 打印中。碟片式激光器和准分子激光器尚处于研制中, 主要从国外进口这些设备进行产业化。

(2) 激光工艺研究和开发方面。激光淬火工艺已经成熟应用。

激光熔覆工艺有的已经成熟应用于生产, 有的则处于研究之中, 其中关键技术是熔覆材料的研发, 激光切割和焊接的复合工艺已在积极的研究之中。

(3) 激光加工应用市场。

1) 在汽车行业, 主要是激光淬火汽车的发动机曲轴、凸轮轴、缸体、缸套等。

2) 在冶金行业, 主要是大型轧辊的激光合金化与熔覆。

3) 在机械行业, 主要是报废贵重模具的激光熔覆修复。

4) 在电子行业, 主要是手机电池和集成电路激光焊接。

1.5 激光材料加工的发展趋势

目前, 激光材料加工的发展趋势主要体现在以下几点:

(1) 激光器方面。激光器研发正朝高智能化、高功率、高光束质量、高可靠性、低成本和全固态等方向发展。高亮度半导体激光器、光纤与碟片激光器、超快超短脉冲皮秒和飞秒激光器等将成为工业用激光器的发展主流并主导市场, 新的光源技术的发展将会引领一批新的应用领域。

(2) 材料方面。针对激光熔覆修复工件的材料种类, 分别研制出不同材料的激光熔覆修复材料。例如目前已研制出中碳、低碳钢激光熔覆修复用材料, 用于铸铁类零件激光修复的材料正在研制之中。

(3) 工艺控制方面。对于激光熔覆工艺而言, 其发展趋势是开发一套基于激光熔覆的在线监控系统, 对激光熔覆过程进行实时监控。研制与激光熔覆相配套的复合工艺使熔覆过程中避免工件的开裂趋势。

(4) 加工过程的智能化与机器人化。为了提高激光材料加工的工作效率, 智能化机器人已逐步得到应用。

复 习 题

1-1 简要介绍激光产生的物理过程。

1-2 产生激光的三大条件是什么?

1-3 什么是激光的四大特性?

1-4 激光制导炸弹与激光四大特性中的哪一个相关联? 激光测量厚度与激光四大特性中的哪一个相关联?

1-5 简述我国激光器发展的历程。

1-6 激光材料加工技术的特点是什么?

1-7 激光材料加工技术的发展趋势是什么?

激光材料加工成套设备包括激光发生器、冷水机组、外光路、数控系统、加工机床，这构成了激光材料加工柔性制造系统。要想娴熟地掌握这套柔性加工系统，必须认真学习该系统中的每一项内容，即必须掌握激光材料加工的技术基础。

2.1 激光材料加工用激光器

尽管激光器的种类繁多，但适用于激光材料加工用的激光器还只有高功率 CO₂ 激光器和掺钕钇铝石榴石 (YAG) 激光器两种。据统计，在国际商用激光加工系统的产值中，CO₂ 激光加工系统约占三分之二，YAG 激光加工系统约占三分之一，但是，近年来随着光纤激光器的快速运用，光纤激光器创造的产值大有超越 CO₂ 激光器之势。

2.1.1 高功率二氧化碳激光器系统

CO₂ 激光器的重要特点是：

- (1) 高功率，其最大连续输出功率已达 25kW。
- (2) 高效率，其总效率为 10% 左右，比其他加工用激光器的效率高得多。
- (3) 高光束质量，其模式较好且较稳定。

所用这些优点都是激光加工所需要的。

2.1.1.1 横向流动型 CO₂ 激光器

横向流动型 CO₂ 激光器的工作气体沿着与光轴垂直的方向快速流过放电区以维持腔内有较低的气体温度，从而保证有高功率输出。单位有效谐振腔长度的输出激光功率达 10kW/m，商用器件的最大功率可达 25kW。但其缺点是光束质量较差，在好的情况下可以得到低价模输出，否则为多模输出。这种类型的激光器广泛应用于材料的表面改性加工领域，如激光表面淬火、激光合金化、激光熔覆、激光表面非晶化等。

2.1.1.2 快速轴流 CO₂ 激光器

快速轴流 CO₂ 激光器是由工作气体沿放电管轴向流动来实现冷却，且气流方向同电场方向和激光方向一致，其气流速度一般大于 100m/s，有的甚至可以达到亚音速。其结构主要由细放电管、谐振腔、高压直流放电系统、高速风机（罗茨泵）、热交换器及气流管道等部分组成，该激光器的主要特点有：

- (1) 光束质量好（基模或 TEM₀₁ 模）；
- (2) 功率密度高；
- (3) 电光效率高，可达 26%；
- (4) 结构紧凑；

(5) 可以连续和脉冲双制运行。因此，这类激光器使用范围很广。

2.1.2 固体激光器系统

YAG 激光器的特点为：

(1) 输出的波长为 $1.06\mu\text{m}$ ，恰好比 CO_2 激光波长 $10.6\mu\text{m}$ 小一个数量级，因而使其与金属的耦合效率高，加工性能良好（一台 800W 的 YAG 激光器的有效功率相当于 3kW 的 CO_2 激光器的功率）。

(2) YAG 激光器能与光纤耦合，借助时间分割和功率分割多路系统能方便地将一束激光传输给多个工位或远距离工位，便于激光加工实现柔性化。

(3) YAG 激光器能以脉冲和连续两种方式工作，其脉冲输出可通过调 Q 和锁模技术获得短脉冲及超短脉冲，从而使其加工范围比 CO_2 激光更大。

(4) 结构紧凑、质量轻、使用简单可靠、维修要求较低，故其应用前景看好。

固体激光器的基本结构如图 2-1 所示，包括激光工作物质、谐振腔、光泵浦灯和聚光腔。

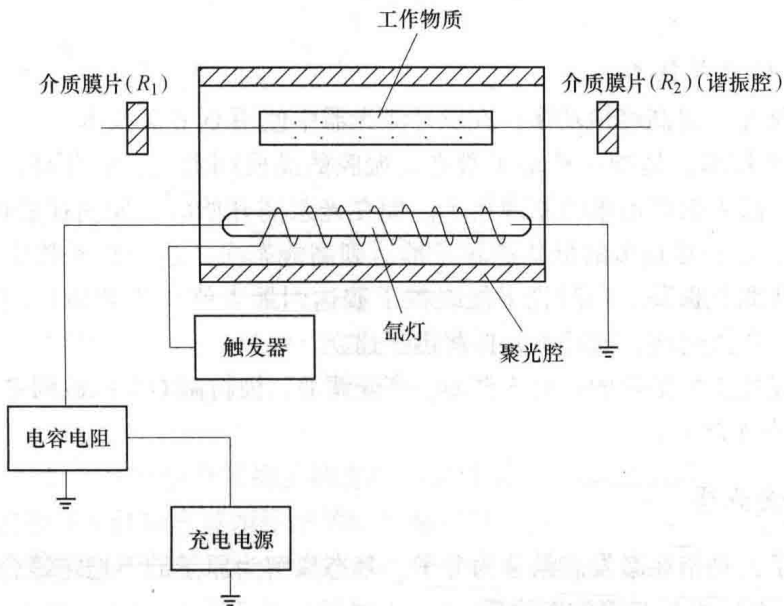


图 2-1 固体激光器的基本结构

2.1.2.1 工作物质（激光棒）

工作物质有晶体和玻璃两大类：

(1) 晶体：掺钕钇铝石榴石和红宝石晶体等。

(2) 玻璃：钕玻璃。

工作物质应具有较高的荧光量子效率，较长的亚稳态寿命，较宽的吸收带和较大的吸收系数，较高的掺杂浓度及内损耗较小的基质，也就是说具有增益系数 $(G(\nu))$ 高，阈值 $(\Delta N_{\text{阈}})$ 低的特性。

激光工作物质还应具有光学均匀性和物理特性好的特点，即棒无杂质颗粒、气泡、裂纹、残余应力等缺陷。

由于 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 具有荧光量子效率高、阈值低、热导率高等优点，是这三种固体激光器中唯一能够连续运转的激光器。

2.1.2.2 谐振腔

激光谐振腔是由两块平面或球面反射镜按一定方案组合而成的。其中一个端面是全反射膜片，另一个端面是具有一定透过率的部分反射膜片。

谐振腔是决定激光输出功率、振荡模式、发散角等激光输出参数的重要光学器件。谐振腔膜片一般是通过在玻璃基片上镀多层介质膜得到的。每层介质膜的厚度为特定激光波长的 $1/4$ 。介质膜的层数越多，发射率就越高。全反射膜片的介质膜一般有 $17\sim 21$ 层。

2.1.2.3 泵浦灯

在固体激光器中，激光工作物质内的粒子数反转是通过光泵的抽运实现的。目前常用的为光泵源脉冲氙灯和连续氙灯。

2.1.2.4 聚光腔

为了提高泵浦效率，使泵浦灯发出的光能有效地汇聚，并均匀地照射在棒上，可在激光棒和泵浦灯外增加一个聚光腔。早期的聚光腔常见的形式有单、双椭圆腔、圆形腔、紧裹形腔。

2.1.2.5 Q 开关技术

为了压缩脉宽，提高峰值功率，在脉冲激光器中使用 Q 开关技术。

所谓 Q 开关技术，是指一种基于激光谐振腔的品质因数，Q 值愈高，激光振荡愈容易，Q 值愈低，激光振荡愈难的原理技术。即在光泵浦开始时，使谐振腔内的损耗增大，降低腔内 Q 值，以让尽量多的低能态粒子抽运到高能态去，达到粒子数反转。由于 Q 值低，故不会产生激光振荡。当激光上能级粒子数达到最大值（饱和值）时，设法突然使腔的损耗变小，Q 值突增，这时激光振荡迅速建立。

目前在激光加工中采用的有电光调 Q、声光调 Q、染料调 Q、机械调 Q 等。但最多的是电光调 Q 和声光调 Q。

2.1.3 准分子激光器

所谓准分子，是指在激发态结合为分子、基态离解为原子的不稳定缔合物。工作物质有 XeCl 、 KrF 、 ArF 和 XeF 等气态物质。

激光波长属紫外波段，波长范围为 $193\sim 351\text{nm}$ ，如 XeCl 为 308nm ， KrF 为 248nm 。准分子激光器的基本结构与 CO_2 激光器相同。

目前准分子激光器主要为脉冲工作方式，商品化的平均功率为 $100\sim 200\text{W}$ ，最高功率已达到 750W 。

2.1.4 光纤激光器

光纤激光器（Fiber Laser）是指用掺杂稀土元素的玻璃光纤作为增益介质的激光器，光纤激光器是在光纤放大器的基础上开发出来的：在泵浦光的作用下光纤内极易形成高功率密度，造成激光工作物质的激光能级“粒子数反转”，当适当加入正反馈回路（构成谐振腔）便可形成激光振荡输出。20 世纪 60 年代初，美国光学公司的（斯尼泽）Snitzer 首