

BIAOMIAN GONGCHENG YU ZAIZHIZAO JISHU

表面工程与再制造技术

——激光熔覆耐磨耐蚀涂层

陈小明 刘德有 伏利 张磊 刘伟 等著

 黄河水利出版社

表面工程与再制造技术

——激光熔覆耐磨耐蚀涂层

责任编辑 景泽龙
封面设计 李 鹏
责任校对 杨秀英
责任监制 温红建

ISBN 978-7-5509-2609-7



9 787550 926097 >

定价：68.00元

表面工程与再制造技术

——激光熔覆耐磨耐蚀涂层

陈小明 刘德有 伏利 张磊 刘伟 等著

黄河水利出版社

· 郑 州 ·

内 容 提 要

本书主要从激光熔覆技术基础与激光熔覆设备及材料、激光熔覆耐磨耐蚀技术的发展、激光熔覆典型涂层工艺与组织性能研究等方面进行了系统阐述。通过对激光熔覆 Fe 基/Ni 基/Co 基合金、激光重熔 NiCr - Cr₃C₂ 复合涂层、激光多次熔覆新 Fe 基合金 - 伪高熵合金的相关工艺与性能以及激光熔覆合金涂层裂纹形成机制及敏感性等研究与探索,为有效解决金属表面因磨损、腐蚀等导致的零部件失效和寿命短的问题提供技术与理论依据。

本书可为相关行业工程技术人员和科研工作者提供有益参考,也可供相关专业的大学本科及研究生使用和参考,还可为有关科学决策提供科学依据。

图书在版编目(CIP)数据

表面工程与再制造技术:激光熔覆耐磨耐蚀涂层/陈小明等著. —郑州:黄河水利出版社,2020. 3

ISBN 978 - 7 - 5509 - 2609 - 7

I. ①表… II. ①陈… III. ①激光熔覆 - 研究
IV. ①TG174. 445

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2020)第 040214 号

书 名:表面工程与再制造技术——激光熔覆耐磨耐蚀涂层

作 者:陈小明 刘德有 伏利 张磊 刘伟 等著

出版发行:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层 邮政编码:450003

发行部电话:0371 - 66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hhsclbs@126.com

承印单位:河南承创印务有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:7.75

字数:158 千字

印数:1—1 000

版次:2020 年 3 月第 1 版

印次:2020 年 3 月第 1 次印刷

定价:68.00 元

前 言

机械部件磨损、腐蚀等是关系到国计民生的关键性共性问题,由其造成的经济损失超过了各种自然灾害所造成的损失总和,造成了许多灾难性的事故,并产生了资源浪费和环境污染。据美国和欧盟的权威专业机构统计,世界上由于机件、构件等的腐蚀、磨损等破坏造成的经济损失高达各国国民生产总值的6%~8%;据国家统计局公报显示,2018年我国国内生产总值突破90万亿元人民币,据此测算,我国因腐蚀、磨损等破坏造成的经济损失约合人民币5.4万亿~7.2万亿元。易磨易蚀件寿命短已成为发展生产的严重障碍,开发耐磨耐蚀涂层技术,延长设备使用寿命,具有重大的现实意义。

随着现代工业的高速发展,表面工程与再制造技术已成为不可或缺的关键技术之一。表面工程技术能大幅提高机械零件性能,使其能够在高速、高温、高压、重载、冲击、磨损、磨蚀及腐蚀等工况下可持续运行;同时,运用表面工程技术还可以对废旧机械零部件进行再制造,使其获得新的生命,实现节能减排,减少环境污染。正因如此,表面工程与再制造技术在各个行业得到高度重视和快速发展。

水利部杭州机械设计研究所(又名水利部产品质量标准研究所)致力于解决表面工程与再制造技术在实际工程应用中面临的关键技术难题,主要在热喷涂、激光熔覆与合金化等方面开展设备关键技术、配方和工艺研究与应用。经过十多年不断研究,取得了一系列科研成果,在高超音速火焰喷涂、激光熔覆与合金化、超音速等离子喷涂、超音速电弧热喷涂等方面拥有自主知识产权、适用于不同要求的高性能配方、工艺及喷枪关键技术,大幅提高了有关涂层的性能。这些研究成果已被广泛应用于水利水电、机械制造等行业。

激光熔覆(Laser Cladding)是一种新的表面改性技术。它通过在基材表面添加熔覆材料,并利用高能密度的激光束使之与基材表面薄层一起熔凝的方法,在基层表面形成与其为冶金结合的添料熔覆层。激光熔覆是涉及光、机、电、材料、检测与控制等多学科的高新技术,是再制造技术的主要技术手段之一,可以解决传统制造方法不能完成的难题,是国家重点支持和推动的高新

技术之一。目前,激光熔覆技术已成为新材料制备、金属零部件快速直接制造、失效金属零部件绿色再制造的重要手段之一,已广泛应用于航空、石油、汽车、机械制造、船舶制造、模具制造等行业。与堆焊、喷涂、电镀和气相沉积相比,激光熔覆具有稀释度小、组织致密、涂层与基体结合好、适合熔覆材料多、粒度及含量变化大等特点。因此,激光熔覆技术应用前景非常广阔。但是,现有激光熔覆技术的应用水平和规模还不能适应市场的需求,还需要研究解决工程应用中的具体关键技术问题和揭示有关涂层失效机制,以及开发适合的材料配方与工艺体系等。鉴于此,作者针对上述问题进行了系统的研究,获得了一定有实际价值的数据和研究成果,在此基础上,结合国内外同行的有关文献资料,撰写了《表面工程与再制造技术——激光熔覆耐磨耐蚀涂层》一书。本书可为相关行业工程技术人员和科研工作者提供有益参考,也可供相关专业的大学本科生及研究生使用和参考,还可为有关决策提供科学依据。

本书主要从激光熔覆技术基础与激光熔覆设备及材料、激光熔覆耐磨耐蚀技术的发展、激光熔覆典型涂层工艺与组织性能研究等方面进行了系统阐述。通过对激光熔覆 Fe 基/Ni 基/Co 基合金、激光重熔 NiCr - Cr₃C₂ 复合涂层、激光多次熔覆新 Fe 基合金 - 伪高熵合金的相关工艺与性能以及激光熔覆合金涂层裂纹形成机制及敏感性等研究与探索,为有效解决金属表面因磨损、腐蚀等导致的零部件失效和寿命短的问题提供技术与理论依据。

本书共分 8 章,主要内容有:绪论、激光熔覆制备耐磨耐蚀涂层技术研究进展、激光熔覆 Fe 基合金涂层组织及其摩擦磨损性能、激光熔覆 Ni 基涂层组织及抗磨耐蚀性能、激光熔覆 Co 基涂层性能与工艺、激光重熔 NiCr - Cr₃C₂ 复合涂层的组织及磨损机制研究、激光多次熔覆的新 Fe 基合金 - 伪高熵合金涂层组织和性能、激光熔覆合金涂层裂纹形成机制及敏感性研究。全书由陈小明确稿,其中,第 1 章由张磊、刘德有撰写,第 2 章由张凯、陈小明确写,第 3 章由张磊、刘伟撰写,第 4 章由张磊、陈小明确写,第 5 章由伏利、刘伟撰写,第 6 章由张磊、刘德有撰写,第 7 章由伏利、陈小明确写,第 8 章由张磊、陈小明确写。

在本书的撰写过程中,得到了许多专家学者以及同事的大力支持和帮助,在此特向他们致以真诚的感谢。本书在撰写过程中参考和引用了许多国内外同行的文献资料,在此谨向他们表示诚挚的谢意。

本书的研究得到了浙江省“一带一路”国际科技合作项目、浙江省公益性技术应用研究计划项目、浙江省水利水电装备表面技术研究重点实验开放基金、水利机械及其再制造技术浙江省工程实验室自主创新项目等的大力资助，在此表示感谢。限于作者的水平，书中难免存在疏漏之处，敬请同仁批评指正。

作 者

2019年11月

目 录

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 激光技术基础	(1)
1.2 激光熔覆技术原理与特点	(4)
1.3 激光熔覆加工系统	(6)
1.4 激光熔覆材料	(14)
参考文献	(19)
第 2 章 激光熔覆制备耐磨耐蚀涂层技术研究进展	(24)
2.1 激光熔覆制备耐磨耐蚀涂层工艺	(24)
2.2 激光熔覆制备耐磨耐蚀涂层材料配方	(27)
2.3 激光熔覆制备耐磨耐蚀涂层的应用	(28)
2.4 本章小结	(29)
参考文献	(30)
第 3 章 激光熔覆 Fe 基合金涂层组织及其摩擦磨损性能	(34)
3.1 研究方法 with 材料	(34)
3.2 熔覆层的微观结构与性能分析	(35)
3.3 激光熔覆 Fe 基涂层的应用	(45)
3.4 本章小结	(46)
参考文献	(46)
第 4 章 激光熔覆 Ni 基涂层组织及抗磨耐蚀性能	(49)
4.1 研究方法 with 材料	(49)
4.2 熔覆层的组织性能分析	(51)
4.3 激光熔覆 Ni 基涂层的应用	(58)
4.4 本章小结	(59)
参考文献	(59)
第 5 章 激光熔覆 Co 基涂层性能与工艺	(61)
5.1 研究方法 with 材料	(61)

5.2	激光熔覆 Co 基涂层微观组织与性能分析	(64)
5.3	激光熔覆 Co - WC 复合涂层组织与性能分析	(69)
5.4	激光熔覆 Co 基涂层的应用	(74)
5.5	本章小结	(74)
	参考文献	(75)
第 6 章	激光重熔 NiCr - Cr₃C₂ 复合涂层的组织及磨损机制研究	(77)
6.1	研究方法 with 材料	(77)
6.2	涂层的组织与性能分析	(79)
6.3	干滑动摩擦磨损机制	(84)
6.4	料浆冲蚀磨损机制	(86)
6.5	本章小结	(90)
	参考文献	(90)
第 7 章	激光多次熔覆新 Fe 基合金 - 伪高熵合金涂层组织和性能	(93)
7.1	研究方法 with 材料	(93)
7.2	涂层的结构与性能分析	(94)
7.3	本章小结	(99)
	参考文献	(99)
第 8 章	激光熔覆合金涂层裂纹形成机制及敏感性研究	(101)
8.1	研究方案	(101)
8.2	熔覆层的微观组织结构与性能分析	(102)
8.3	熔覆层裂纹萌生和扩展机制	(109)
8.4	工艺因素对裂纹敏感性的影响	(112)
8.5	本章小结	(115)
	参考文献	(115)

第1章 绪论

1.1 激光技术基础

1.1.1 激光原理

“激光”(Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, LASER), 意为“通过受激辐射实现的光放大”。激光是人类 20 世纪以来继原子能、半导体、计算机之后的又一重大发明,被称为“最亮的光”“最准的尺”“最快的刀”。

1916 年,爱因斯坦在发表的论文《关于辐射的量子理论》中提出了“受激辐射”理论,奠定了激光的物理学理论基础。他认为,光与粒子相互作用时,粒子在高能级 E_2 和低能级 E_1 之间存在三种跃迁方式:受激吸收、自发辐射和受激辐射^[1]。

(1) 受激吸收。

处于较低能级 E_1 的粒子在受到一个能量为 $h\nu = E_2 - E_1$ (h 为普朗克常量, ν 为光子频率) 的外来光子激发,而跃迁到相应的高能级 E_2 , 这样的跃迁称为受激吸收。

(2) 自发辐射。

受到激发而进入高能级的激发态粒子处于不稳定状态,会自发地从高能级激发态 E_2 跃迁到低能级基态 E_1 , 同时辐射出能量为 $E_2 - E_1$ 的光子,光子频率为 $\nu = (E_2 - E_1)/h$, 该辐射称为自发辐射。

(3) 受激辐射与激光。

除自发辐射外,高能级粒子还可以另外一种方式跃迁到低能级。处于高能级上的粒子受到一个频率为 $\nu = (E_2 - E_1)/h$ 的外来光子激发时,从高能级 E_2 跃迁到低能级 E_1 的同时辐射出两个与外来光子频率、相位、发射方向及偏振态均相同的光子,这个过程称为受激辐射。

只有受激辐射效应大于受激吸收效应,即处于高能级的粒子数多于低能级粒子数,形成粒子数反转,才能产生激光。当大量粒子处在高能级 E_2 上,受激辐射产生的两个相同光子再激励 E_2 能级上的粒子,又使其产生受激辐射并再次得到两倍光子,如此反复受激辐射将放大光信号。这种在受激辐射过程中产生并被放大的光便是激光。

1.1.2 激光器

在激光理论上,美国科学家西奥多·梅曼(Theodore H. Maiman)于1960年发明了第一台激光器,获得了人类有史以来第一束激光,随后激光器得以快速发展。激光器通常包括三个组成:激光工作物质、激光泵浦源和谐振腔。

激光工作介质是激光的激发材料,用以产生粒子数反转和光的受激辐射以实现光的放大作用。工作物质也称增益媒质,类型包括气体,如氦气、氮气、二氧化碳等;固体,如红宝石、掺钛蓝宝石、Nd:YAG等;半导体,如砷化镓、硫化镉、磷化铟等;液体,如吐吨类染料、香豆素类激光染料等有机化合物液体以及无机化合物液体。激光泵浦源又称激励源,是为激光工作物质实现和维持粒子反转而提供能量来源的装置,常有光激励、放电激励和化学激励等方式。谐振腔是激光形成的腔体,一般由具有一定几何形状和光学反射特性的两面反射镜组成,它使受激辐射光子在腔内多次往返以形成相干的持续振荡,同时限制了腔内往返振荡光束的方向和频率,以保证输出激光的方向性和单色性。

1.1.3 激光特性

激光具有四大特性,分别为高亮度、高单色性、高方向性和高相干性。

(1) 高亮度。

激光具有高亮度,主要由于其光束高度聚集。激光经过透镜聚焦后,焦点附近的高温可达上千摄氏度甚至上万摄氏度,这一特性和优势使得激光能够通过高能密度的光束加工和处理各类材料,广泛应用于材料加工多个方面。

(2) 高单色性。

光的颜色是由光的波长决定的,波长分布范围越窄,表现出的单色性就越好。普通光源谱线宽度较大、频率范围较宽,表现出的颜色比较杂;而激光比普通光源的谱线宽度要窄得多,因此激光的单色性远胜任何一种单色光源。

(3) 高方向性。

普通光源发散角很大,发出的光沿着各个方向传播。由于激光器中谐振腔对光振荡方向的限制,激光只有沿腔轴方向受激辐射才能振荡放大,发射的激光的发散角很小,几乎沿着平行方向发射出去,因而具有很高的方向性。

(4) 高相干性。

从激光器中发射出来的光量子由于共振原理,使激光在波长、频率、偏振方向上一致,这就赋予激光很强的干涉性。因此,也将激光称作相干光。

1.1.4 激光与材料相互作用

1.1.4.1 激光与材料相互作用的能量转化

激光与材料的相互作用是激光加工的物理基础,其本质是光与物质内带电粒子的作用,即能量转换过程^[2]。它包括一系列宏观现象,如激光的反射、吸收、折射、衍射、干涉偏振、光电效应、气体击穿等。

激光与材料相互作用时,两者之间的能量转化遵守能量守恒定律:

$$E_0 = E_{\text{反射}} + E_{\text{吸收}} + E_{\text{透射}}$$

式中: E_0 为入射的激光能量; $E_{\text{反射}}$ 为被材料反射的激光能量; $E_{\text{吸收}}$ 为被材料吸收的激光能量; $E_{\text{透射}}$ 为透射的激光能量。

上式可转化为:

$$1 = \frac{E_{\text{反射}}}{E_0} + \frac{E_{\text{吸收}}}{E_0} + \frac{E_{\text{透射}}}{E_0}$$

$$1 = R + \alpha + T$$

式中: R 为反射系数; α 为吸收系数; T 为透射系数。

对于非透明材料如金属,主要能量转化过程为吸收和反射,认为 $E_{\text{透射}} = 0$,则有 $R + \alpha = 1$ 。

1.1.4.2 激光与材料相互作用的物态变化

激光与材料相互作用过程中,被材料吸收的激光能量转化成热能、化学能、电能及光能等形式的能量^[3]。随着材料对激光能量吸收的增加,温度逐步升高,两者相互作用过程经历如下五个阶段^[4]:

(1) 基本光学阶段。

当入射激光能量密度很低时,绝大部分入射光子与材料中的电子发生弹性散射,该阶段物理过程主要为反射、透射和吸收,属于基本光学阶段。

(2) 低于相变点加热阶段($T < T_s$)。

当入射激光能量密度较高时,入射光子与材料中电子产生非弹性散射,电子获得光子的能量。受激态的电子与声子(晶格)相互作用,使晶格发生强烈震动而使材料加热。在温度低于相变点的情况下,材料晶体结构不发生变化。该阶段主要物理过程为传热。

(3) 高于相变点但低于熔点加热阶段($T_s < T < T_m$)。

激光将材料加热至相变点以上时,材料发生固态相变,此时温度低于熔点,材料不发生熔化。该阶段物理过程为传热和原子扩散(传质)。

(4) 高于熔点但低于汽化点加热阶段($T_m < T < T_v$)。

当激光束加热材料至熔点以上时,材料熔化并形成熔池;熔池与未熔化材料之间发生传热;熔池内发生传热、对流和传质三种物理过程。

(5) 高于汽化点加热阶段($T > T_v$)。

高能量密度的激光加热并使材料汽化,形成等离子体。利用等离子体反冲效应,可以对材料进行冲击硬化。

1.2 激光熔覆技术原理与特点

1.2.1 激光熔覆技术原理

激光熔覆是20世纪70年代以来随着大功率激光器发展起来的一种激光材料加工技术。它是利用高能量密度的激光束将金属或合金材料在基材表面迅速加热熔化,使其以熔融状态均匀地铺展在工件表层,快速凝固后形成与基体呈冶金结合、致密性高、稀释率低的熔覆层。典型的同轴送粉激光熔覆工艺原理如图1-1所示^[5]。

激光熔覆过程涉及物理学、材料科学、冶金学、机械科学等多个学科领域。在激光熔覆过程中,激光、粉末、基材三者之间发生相互作用^[6]。一是激光与粉末的相互作用。当激光与气体送出的粉末作用时,粉末吸收激光的能量而发生熔化、半熔化或未熔化相变。二是激光与基材的作用。根据工艺的需要,高能密度的激光束一般在基材表面形成熔池,为熔覆层熔融和凝固的形成创造条件。三是粉末与基材的相互作用。粉末在熔覆头送粉口被载气送出后,部分进入基材的熔池中参与熔融和凝固成型,部分被束流挟带冲击基材表面

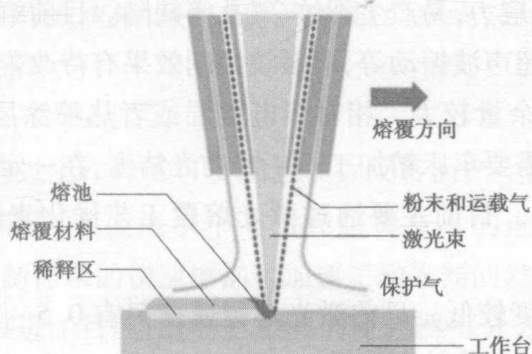


图 1-1 激光熔覆工艺原理示意图

而飞溅散失。

1.2.2 激光熔覆的特点

1.2.2.1 激光熔覆的优点

由于激光束本身的高能量密度和涂层材料熔融沉积的特点,相比其他表面技术激光熔覆具有以下优点:

(1) 激光熔覆层结合强度高、致密性好。涂层与基体及涂层内部呈完全冶金结合,相对电镀、喷涂等工艺有很大改进。

(2) 激光熔覆加热速度快,基体热影响区小,工件变形小且熔覆层稀释率低,可获得具有良好成分和微观组织结构的强化涂层。相比等离子堆焊等传统涂层,激光熔覆层稀释率低,晶粒粒度细,其耐蚀性和耐磨性能相对较好。

(3) 激光熔覆过程中,因快速冷却($10^5 \sim 10^6$ K/s)而形成产速凝固的组织特征^[6],易得到细晶组织或产生非稳相、非晶态等平衡态所无法得到的新相,使涂层性能得到提升。

(4) 激光熔覆适用材料广泛。许多金属或合金都适用于激光熔覆,尤其对高熔点合金等传统工艺难以制备的涂层具有很大优势。

1.2.2.2 激光熔覆的不足

激光熔覆作为新兴的表面技术,目前仍存在一些不足,期待进一步研究解决:

(1) 残余应力和裂纹缺陷。由于熔覆材料与基材在热膨胀系数、润湿性等物理性质方面存在差异,加之高能密度激光束的快速加热和急冷作用,导致

熔覆层产生很大的热应力,易产生裂纹、气孔等缺陷。目前解决方法主要有基材预热和工件缓冷、超声波振动等,但裂纹控制效果有待改善。

(2)后续机加工余量较大。相对于电镀层或者热喷涂层,激光熔覆层表面平整度较低,通常需要车床精加工至一定的光洁度,在一定程度上增加了工艺复杂性和经济成本。目前主要通过激光熔覆工艺优化来改善成品的表面质量。

(3)激光熔覆速度较低。目前激光熔覆速度只有 $0.5 \sim 2 \text{ m/min}$,相比热喷涂和电镀工艺,整体工作效率较低。

(4)投资成本较高。激光熔覆在应用初期一次性设备投入成本高,工艺研发投入较大,相比其他成熟技术,投入成本较高。随着激光核心设备的规模化、国产化,激光熔覆涂层应用成本将逐渐降低。其性能优势也将逐步显现。

1.3 激光熔覆加工系统

激光熔覆技术的发展是靠激光加工系统技术的不断发展来推动的。相应地,激光熔覆技术新需求也对激光熔覆加工系统的技术进步提出了新的、更高的要求。目前,激光熔覆加工系统随着激光器和自动化控制加工系统技术发展而不断进步,使得激光熔覆在表面工程领域的应用占比不断增大。

1.3.1 激光熔覆加工系统组成

激光熔覆是靠一套复杂的加工系统来实现的。其系统主要包括以下几个部分:

(1)激光器及其光路传输系统。目前主流用于激光熔覆加工系统的激光器有YAG激光器、 CO_2 激光器、半导体激光器和光纤激光器,作用是产生激光束;光路传输系统的作用是将激光束经过特定的光学器件进行传输,包括对激光束进行整形、扩束、准直、聚焦分束等,从而使得激光束能最优地适合激光处理工艺要求。

(2)送粉系统。主要包括送粉器、送粉管路、送粉喷嘴。送粉系统的作用是均匀地、平稳地将熔覆粉末输送到工件表面。

(3)激光加工平台系统。主要是通过多轴智能机器人和多功能数控平台完成激光光束与工件表面之间的距离和角度的变化控制。

除以上必要工作系统外,还可配备一些辅助系统,如保护气控制系统、监测和反馈控制系统等。

1.3.1.1 激光器

激光器是指通过工作介质可实现粒子数反转而产生激光的装置,是激光熔覆技术的核心部件,其发展水平与激光熔覆技术的进步密切相关^[7]。同时,激光熔覆技术新需求的快速增加也加速了激光器的发展,促进了各种激光器不断被发明和改进。目前,市场上主流的激光器可分为三类:固体激光器、气体激光器、半导体激光器。其中,气体激光器典型的有二氧化碳气体激光器和氦氖激光器,固体激光器典型的有 YAG 激光器和光纤激光器。此外,还有化学激光器、自由电子激光器等。

1) 气体激光器及其发展

气体激光器是指激光器在发射激光状态时工作介质为气体状态的激光器。在常温常压下,工作介质可以是气态、液态、固态,其中,像汞、铜、镉等常温常压时处于非气态,激光器工作时将工作介质加热至气态,利用此气态作为工作介质也可称为气体激光器^[8]。气体激光器工作时介质气体可以是原子、离子、分子。原子气体工作介质主要包括氩、氦、氖、氙、氫等惰性气体^[9]。氦氖激光器就是典型的原子气体激光器。其振荡波段在可见—红外光波段,其稳定性高、寿命长、功率低,在光学显微镜、干涉仪、流速流量测量等高精度测量领域获得了广泛应用。分子气体工作介质主要包括二氧化碳、氮气等。二氧化碳激光器就是典型的分子气体激光器,其振荡波段在远红外波段,其效率高、稳定性好、易被生物组织吸收,所以二氧化碳激光器在医美、牙科等领域应用广泛^[10]。离子气体工作介质主要是电离化的金属蒸气和惰性气体。铜离子激光器就是典型的离子气体激光器,其振荡波段在可见光波段,其平均功率高、重复频率高。铜离子激光器在大屏幕投影电视、高速闪光灯照相等领域应用广泛。气体激光器在市场上品类众多、应用广泛、占有率高,具有众多优点,如结构简单、造价便宜、维护方便、光束质量好,适合稳定连续地工作。

在实际应用中,气体激光器中常用二氧化碳激光器作为热源来进行激光熔覆表面处理。二氧化碳气体激光器首次在 1964 年被美国贝尔电话实验室的 G. K. N. Patel 研制成功。该二氧化碳激光器输出功率仅仅只有 1 mW,效率仅有 0.01%^[11]。2 年时间二氧化碳激光器的技术得到长足发展,连续二氧化

碳激光器输出功率达到 1.2 kW,效率增加到 17%,并且将 Q 开关技术应用于二氧化碳激光器,研制出可以输出 825 W 脉冲激光的二氧化碳激光器^[12]。之后 10 年间,随着二氧化碳激光器件不断革新,其输出功率和效率迅速增长,几千瓦到几十千瓦的二氧化碳激光器陆续被研制出来。其中,受激励的工作物质也经过创新,CO₂-N₂、CO₂-N₂-He 等优化后的工作介质被研制出来。优化后的工作介质具有效率更高的粒子能谱跃迁、更长的上能级有效辐射时间,使激光器的输出功率更高^[13]。G. Moeller 和 J. Dane Rigden 发现 CO₂-N₂-He 工作物质激励的二氧化碳激光器输出功率是 CO₂-N₂ 工作物质的二氧化碳激光器输出功率的 4~5 倍,原因是 He 的加入使得二氧化碳分子的扩散时间延长,减少了因为与壁碰撞而引起的受激分子熄灭的损失^[14]。目前,万瓦级别的二氧化碳激光器被研制出来,在大面积激光表面处理领域优势明显。首台万瓦级别的二氧化碳激光器由华工激光研制成功,处于世界领先地位。

2) 固体激光器及其发展

固体激光器是指工作介质为掺入少量激活离子的晶体或者玻璃的激光器。固体激光器的发展历史最为悠久,具有体积小、坚固耐用、应用方便、输出功率高等特点,连续功率可达 1 kW 以上,脉冲峰值功率可达到 1 000 MW^[15]。常用的固体激光器有掺钕钇铝石榴石(Nd:YAG)激光器、钕玻璃固体激光器、红宝石固体激光器和光纤激光器。同样的光纤激光器可以通过在光纤中掺杂不同的稀土离子输出不同波长的激光。材料对不同波长的光的吸收效率不同,所以不同材料加工应用场合就需要相应激光器。不过目前市场上应用最广的是 YAG 激光器和光纤激光器。

YAG 激光器是随着 1964 年 YAG 晶体的首次研制成功而诞生的,晚于钕玻璃和红宝石激光器,但是通过几十年的努力,YAG 激光器已经在材料加工、测距、雷达、医疗等领域有大量应用^[16]。Nd:YAG 激光器是目前综合性能最优的 YAG 固体激光器,输出激光波长 1 064 nm,能被铜、铝、铁等有色金属较好地吸收,所以在金属激光加工领域有很好的应用。Nd:YAG 激光器除了适合连续输出,还可以在高重频下平稳地运转,频率可达 100~200 次/s,平均功率可达 800 W,单脉冲能量可达 80 J^[17]。Yb:YAG 激光器能发出 1.03 μm 波长的激光,与 Nd:YAG 激光器激光波长相差不大,但是 Yb:YAG 激光器有晶