

专题——激光熔覆技术及应用

## 激光熔覆技术研究进展

张津超, 石世宏, 龚燕琪, 余司琪, 石拓, 傅戈雁

(苏州大学 机电工程学院, 江苏 苏州 215021)

**摘 要:** 激光熔覆技术是一种先进的材料表面改性技术, 具有稀释率小、熔覆层组织致密、涂层与基体结合良好及工作环境无污染等优点。从激光熔覆喷头、激光熔覆工艺、激光熔覆材料、激光熔覆技术的工业应用这 4 个方面, 综述了激光熔覆的研究进展。其中, 在激光熔覆喷头方面, 介绍了激光光斑的种类及转换原理和熔覆材料的引入方式, 总结了激光束与粉末的耦合模式和熔覆喷头的种类, 包括旁轴送粉熔覆喷头、光外同轴送粉喷头、光内同轴送粉喷头以及特殊工况下的熔覆喷头。在激光熔覆工艺方面, 阐述了工艺参数对熔覆层宏观形貌和组织性能的影响, 总结了激光熔覆复合工艺的辅助加工方法, 论述了超高速激光熔覆新工艺的原理及技术优势, 并介绍了激光熔覆过程控制的研究进展。在激光熔覆材料方面, 阐述了熔覆材料的种类及增强相的添加方式。在激光熔覆技术的工业应用方面, 介绍了激光熔覆技术在矿山机械、模具再制造以及铁路修复等领域的应用。最后对激光熔覆技术的发展趋势及应用前景做出了展望。

**关键词:** 表面改性; 激光熔覆; 熔覆喷头; 熔覆工艺; 熔覆材料; 工业应用

**中图分类号:** TG174.4; TN249 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)10-0001-11

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.10.001

## Research Progress of Laser Cladding Technology

ZHANG Jin-chao, SHI Shi-hong, GONG Yan-qi, YU Si-qi, SHI Tuo, FU Ge-yan

(School of Mechanical and Electric Engineering, Soochow University, Suzhou 215021, China)

**ABSTRACT:** Laser cladding technology is an advanced surface treatment technology and has the advantages of low dilution rate, dense structure, good bonding between coating and substrate, and pollution-free working environment. The research progress of laser cladding technology was reviewed from four aspects: laser cladding nozzle, laser cladding process, laser cladding material, and industrial application. In the aspect of laser cladding nozzles, the types and conversion principles of laser spots and the introduction methods of cladding materials were introduced. In addition, the coupling mode of laser beam and powder beam and the types of cladding nozzles were summarized, including paraxial powder feeding cladding nozzle, outside-laser coaxial powder feeding nozzle, inside-laser coaxial powder feeding nozzle and cladding nozzle under special working conditions. In terms of laser cladding process, the influence of process parameters on the macro morphology and microstructure of the cladding layer was described. The auxiliary processing methods of laser cladding were summarized. The

收稿日期: 2020-08-05; 修订日期: 2020-09-08

Received: 2020-08-05; Revised: 2020-09-08

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFB1100300); 国家自然科学基金 (51675359)

Fund: Supported by the National Key R & D Project of China (2016YFB1100300) and the National Natural Science Foundation of China (51675359)

作者简介: 张津超 (1991—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为激光制造工程。

Biography: ZHANG Jin-chao (1991—), Male, Doctor, Research focus: laser manufacturing engineering.

通讯作者: 石世宏 (1956—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为激光制造工程。

Corresponding author: SHI Shi-hong (1956—), Male, Doctor, Professor, Research focus: laser manufacturing engineering.

引文格式: 张津超, 石世宏, 龚燕琪, 等. 激光熔覆技术研究进展[J]. 表面技术, 2020, 49(10): 1-11.

ZHANG Jin-chao, SHI Shi-hong, GONG Yan-qi, et al. Research progress of laser cladding technology[J]. Surface technology, 2020, 49(10): 1-11.

principle and technical advantages of extreme high-speed laser cladding, and the research progress of process control of laser cladding were introduced. In laser cladding materials, the types of cladding materials and the addition methods of reinforcement phase were introduced. In the industrial applications of laser cladding technology, the application of mining machinery, mold and rails was described. Finally, the development trend and application prospects of laser cladding technology were prospected.

**KEY WORDS:** surface treatment; laser cladding; cladding nozzle; cladding process; cladding material; industrial application

激光熔覆技术 (Laser Cladding) 是一种先进的材料表面改性技术,最早是由 Gnanamuthu 于 1974 年提出专利申请<sup>[1]</sup>,兴起于 20 世纪 80 年代。随着激光器技术的发展和资源节约的需求,激光熔覆技术的基础研究和应用推广得到了快速的发展。它是以激光为热源,将填充材料(粉末、丝材或板材)和基材表面一起熔凝,在基材表面形成与其冶金结合的熔覆层,从而显著改善其表面耐磨、耐蚀、耐热及抗氧化等性能的工艺<sup>[2]</sup>,涉及光、机、电、物理、材料、化学、计算机等多门学科。该技术可对局部易破损的零部件进行表面强化及修复,以延长其使用寿命,有利于降低成本,提高效益,节约贵重稀有金属材料,符合国家循环经济和可持续发展战略。因此,激光熔覆技术备受各国的关注和重视,成为当前的研究热点之一。

与其他表面强化技术,如堆焊、喷涂、气相沉积和电镀等相比,激光熔覆技术具有以下特点:激光能量密度高,加热速度快,对基材的热影响区域小,引起的工件热变形小;冷却速度快( $10^2 \sim 10^6$  K/s),涂层晶粒细小,组织致密;涂层稀释率低,涂层与基体呈冶金结合,结合强度高;材料选择性广,金属材料、陶瓷材料及复合材料均可作为熔覆材料;易实现自动化,无环境污染<sup>[3-4]</sup>。因此,该技术在航空航天、矿山机械、石油化工、汽车、船舶、电力、铁路等行业具有广阔的应用前景。激光熔覆技术与其他表面工程技术的参数对比见表 1。

本文从激光熔覆喷头、激光熔覆工艺、激光熔覆材料、激光熔覆技术的工业应用 4 个方面综述了激光熔覆技术的研究进展,并对发展趋势做出了展望。

表 1 表面工程技术特性对比  
Tab.1 Comparison of surface engineering technologies

Types	Coating thickness/mm	Dilution/%	Bonding	Environmental performance
Laser cladding	0.5~2	< 10	Metallurgical bonding	Good
Plasma spray	0.05~0.5	—	Mechanical bonding	Good
Tungsten argon arc surfacing welding	2~4	10~20	Metallurgical bonding	Good
Electroplating	<0.1	—	Physical bonding	Bad

## 1 激光熔覆喷头

激光熔覆设备主要包括激光器、熔覆喷头、加工平台和送料装置。而激光熔覆喷头是激光熔覆系统的关键核心部件,可实现激光束传输、变换、聚焦和熔覆材料的同步输送,在基材表面实现激光束、熔覆材料、熔池之间的精确耦合并连续形成熔覆层。其中激光束的整形变换聚焦、材料的传输喷射汇聚、光料的耦合方式是熔覆喷头的关键技术。

### 1.1 激光熔覆光斑及送料方式

激光熔覆喷头内集成有光束镜组,主要用于激光束的传输、变换及聚焦,可根据不同的加工需求对光束进行处理,包括变换光斑形状、光斑尺寸、光斑能量分布等。光学镜组一般包括准直镜、整形镜和聚焦镜。一般首先通过准直镜对输入的发散光束进行准直,然后对准直后的光束进行整形,变换成所需的光束,如圆形实心光斑转换为环状或矩形状,呈高斯分布的光束变换为光能均匀分布的平顶光束,单光束分

成多光束等,最后将光束聚焦至加工面,以满足加工所需的尺寸形状和光强分布。

目前,常见的光斑形状有圆形、环形、矩形和线形<sup>[5-6]</sup>,其形状和能量分布如图 1 所示。圆形实心光斑能量呈高斯分布,其特点是中心能量大,边缘能量小,在激光熔覆过程中易造成熔覆层中间过烧而边缘熔化不足。环形光斑能量呈双高斯分布,其特点是两边缘能量高,中间无能量,可通过锥透镜<sup>[7-9]</sup>、锥镜-反射聚焦镜<sup>[10]</sup>等对光束转换获得,如图 2 所示。在激光扫描过程中,在热传导和热对流作用下,熔池两侧的温度略高于中心,这有利于边缘有足够的能量熔化粉末颗粒,减少侧壁粉末的粘附<sup>[11]</sup>。矩形光斑能量分布较均匀,具有激光热加载均匀、加工效率高等特点<sup>[12-13]</sup>,通过微透镜阵列<sup>[14-16]</sup>、空间光调制器<sup>[17]</sup>、非球面透镜组<sup>[18]</sup>、衍射光学元件<sup>[19-20]</sup>、带式积分镜<sup>[21-22]</sup>等对光束整形获得。线形光斑扫描宽度大,大大提高了加工效率,且热作用过程均匀,可显著改善加工质量。

按照熔覆材料的添加方式(下文中的材料均以粉末为例),激光熔覆送粉可以分为预置粉末法和同步送粉法。预置粉末法是将粉末以粘结或喷涂的方式预

置于基材表面, 然后采用激光辐射扫描熔化形成熔覆层。此方法工艺简单, 操作灵活, 但粉末烧损严重, 熔覆层存在气孔和裂纹多、组织不致密、表面粗糙等缺陷<sup>[23]</sup>。同步送粉法是采用送粉器使粉末连续输送至

激光作用区, 实现材料的熔覆加工。同步送粉法具有自动化程度高、熔覆速度快、成形性好等特点, 在激光熔覆中得到了广泛的应用, 但该方法对粉末的颗粒粒度和流动性等方面要求较高。

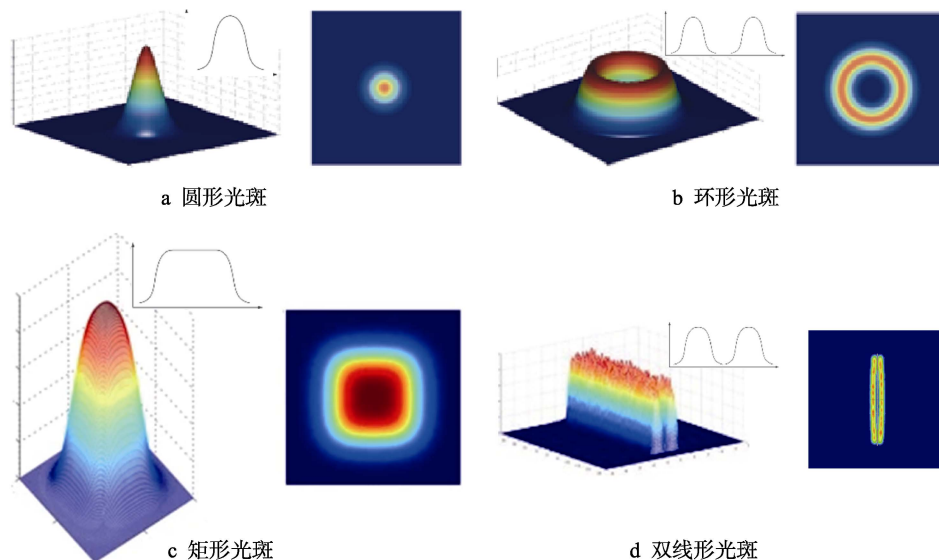


图 1 激光光斑形状<sup>[5-6]</sup>

Fig.1 Spot shape of laser beam<sup>[5-6]</sup>: a) circular spot; b) annular spot; c) rectangular spot; d) double linear spot

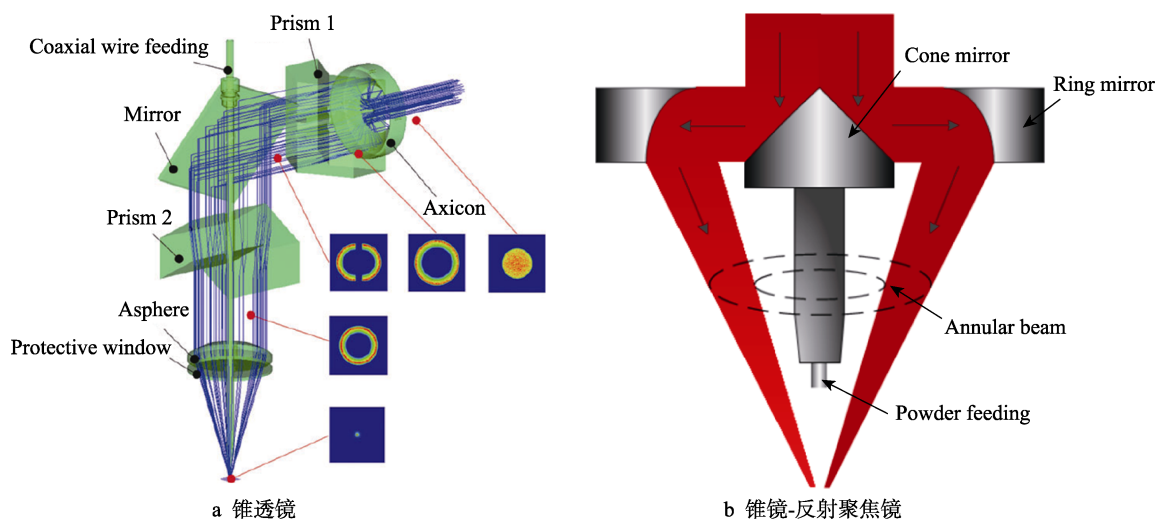


图 2 环形光束的转换示意图<sup>[9-10]</sup>

Fig.2 Schematic diagram of the annular beam<sup>[9-10]</sup>: a) axicon mirror; b) cone and ring mirror

## 1.2 光粉耦合模式及熔覆喷头

按照激光束和粉末的耦合形式, 可将激光熔覆喷头分为旁轴送粉熔覆喷头和同轴送粉熔覆喷头。对于旁轴送粉熔覆喷头, 其送粉喷嘴相对聚焦光束倾斜喷粉, 粉末和激光束轴线之间存在夹角。旁轴送粉熔覆喷头结构简单, 送粉喷嘴调节灵活, 粉末稳定好, 可实现异型零件的激光熔覆。随着高功率激光器技术发展以及使用成本的大幅下降, 旁轴激光熔覆喷头由传统的“圆形光斑+单束送粉”方式发展为“矩形光斑+宽带送粉”方式。采用大光斑的激光熔覆方式极大提

升了熔覆效率, 单道熔覆宽度可达 30 mm, 适用于形状简单的零件表面的大面积激光熔覆。但变化扫描方向时, 光粉耦合会出现明显的方向性, 影响熔覆层的性能。

对于同轴送粉熔覆喷头, 粉末和激光束同轴耦合输出, 粉末流各向同性, 克服了旁轴送粉方向性的限制, 可保证任意路径下熔覆层的一致性。目前激光熔覆多采用同轴送粉熔覆喷头。由于同轴送粉熔覆喷头无方向性问题, 也可应用于激光金属增材制造 (3D 打印), 通过逐层沉积可近净成形大型结构件、复杂结构件等<sup>[24]</sup>。按照激光束和粉末的相对位置, 同轴送粉熔覆喷头可分为光外同轴送粉喷头和光内同轴送

粉喷头<sup>[25]</sup>。光外同轴送粉喷头是采用“粉包光”的光粉耦合模式，激光束从中心出射，光束周围为倾斜布置的多个粉嘴送粉或环状送粉，工作时，激光束和粉束汇聚在工作表面并形成熔池，如图 3a 所示。光内同轴送粉喷头是采用“光包粉”的光粉耦合模式，圆形实心光束转换为圆环锥形光束或多光束，中空无光区域垂直放置送粉管，实现光束中空，粉管居中，光内送粉，如图 3b 所示。粉末垂直加工面喷射，由于粉末喷射方向与包围粉束的准气流方向、外围聚焦环锥形光束轴线方向均相同，故三相流互不干涉，粉

束未发散小，集束性好，因此在一定的长度范围内能够保证光束、保护气都包围粉束，大大提高粉末利用率，减少熔覆层的表面粘粉和熔覆过程中的飞溅。光外同轴送粉和光内同轴送粉效果如图 4 所示。从图中可以看出，同轴环形喷嘴比同轴多管喷嘴汇聚效果好，可实现更小的汇聚粉斑，适合精密熔覆加工。同轴单束粉管正向送粉，粉末流细小，挺度高，可进行长距离、大倾角熔覆加工。由于光粉真正同轴实现了“光包粉”，一般无需在熔覆前预调光斑粉斑与工作面对准，扫描过程中还可离焦变焦，熔覆出变宽的熔道。

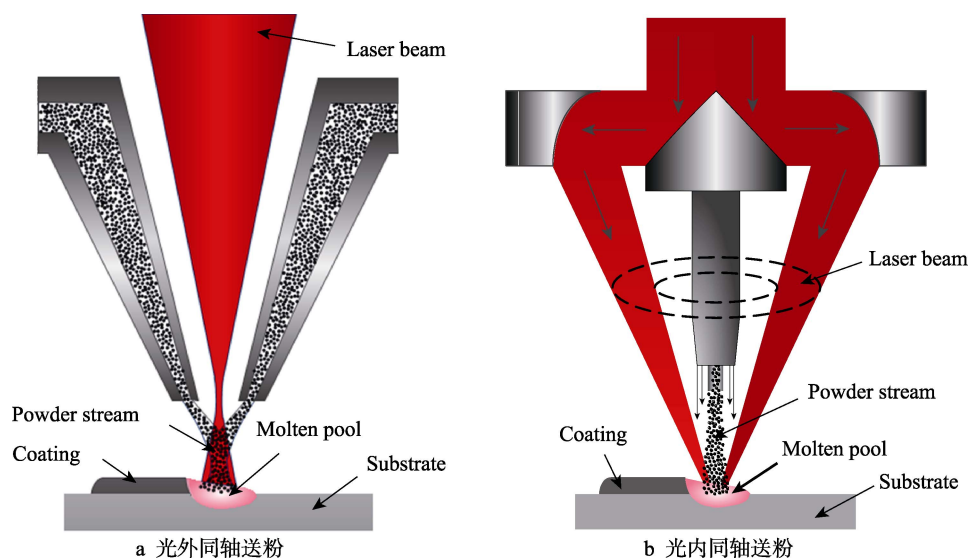


图 3 同轴送粉熔覆喷头原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of coaxial powder feeding: a) outside-laser coaxial powder feeding; b) inside-laser coaxial powder feeding

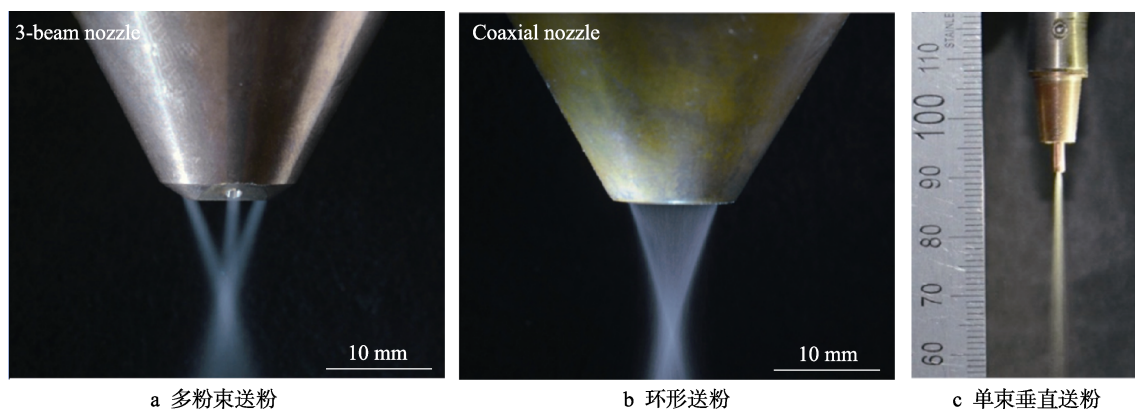


图 4 同轴送粉效果<sup>[11,26]</sup>

Fig.4 Coaxial powder feeding drawing<sup>[11,26]</sup>: a) multi-channel powder feeding; b) ring-channel powder feeding; c) single-tube vertical powder feeding

随着大功率激光器技术的发展与推广，宽带同轴送粉熔覆喷头得到了越来越多的应用，如图 5 所示。图 5a 为武钢华工激光研制的光外宽带同轴喷头<sup>[27]</sup>，主要由送粉道、保护气道和激光束通道组成。中心为矩形光斑，光束外两侧为与激光光斑相适应的矩形粉末流道。此喷头适用于 6~20 kW 的激光熔覆加工，特别是煤矿机液压支架立柱等回转件的大批量生产。图 5b 为苏州大学与激光加工技术国家工程中心联合

研发的光内宽带同轴喷头<sup>[28]</sup>，矩形送粉装置位于喷头中心，外层为双光束通道，其熔覆效果如图 5c 所示，熔覆宽度达 40 mm。

在一些特殊工况下的熔覆加工，激光熔覆喷头的内光路、粉路、水路、气路等结构有所不同。如针对圆筒形、腔体类等内壁熔覆的深孔激光熔覆喷头，针对各方位（如水平面、立面、仰面等）熔覆的全方位激光熔覆喷头，针对水下修复的激光熔覆喷头等。深



孔激光熔覆喷头将激光熔覆加工从工件的外表面延伸到孔的内壁表面, 此喷头呈细长状, 光路系统采用长聚焦镜, 并利用反射镜将光束反射至加工位置。德国弗洛霍夫研究所研制的深孔熔覆喷头最小内孔径达 33 mm, 工作孔深可达 0.5~3 m, 技术处于领先地位。图 6a 为武钢华工激光研制的深孔熔覆喷头<sup>[29]</sup>, 最小内孔径为 50 mm, 孔深为 0.5 m。全方位激光熔

覆喷头可实现 $\pm 180^\circ$ 三维空间熔覆, 在喷嘴口与聚焦镜间设置防护气帘, 可防止喷头连续变换方位时, 熔覆材料落到聚焦镜上而损坏镜片<sup>[30]</sup>, 其在仰面位置的熔覆加工如图 6b 所示。水下激光熔覆喷头集成了排水装置将水排出, 从而形成局部的稳定气体空间, 实现水下激光熔覆修复<sup>[31]</sup>。

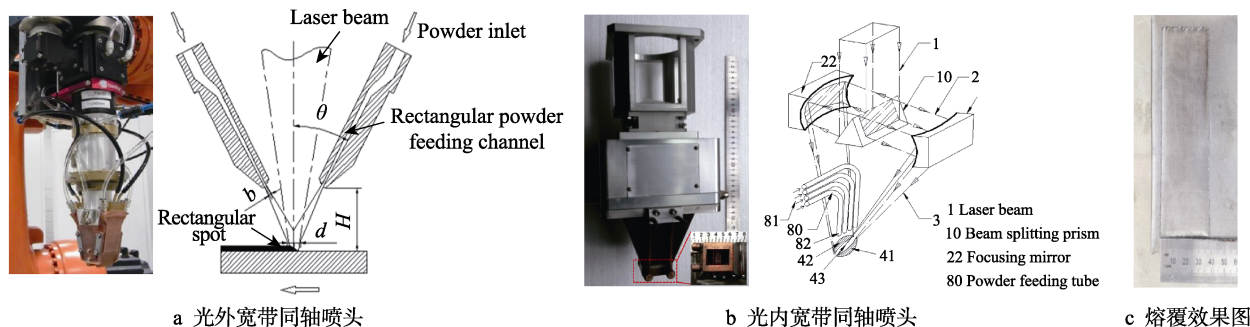


图 5 宽带同轴送粉熔覆喷头<sup>[27-28]</sup>

Fig.5 Broadband coaxial powder feeding nozzle<sup>[27-28]</sup>: a) outside-laser coaxial powder feeding nozzle; b) inside-laser coaxial powder feeding nozzle; c) cladding effect

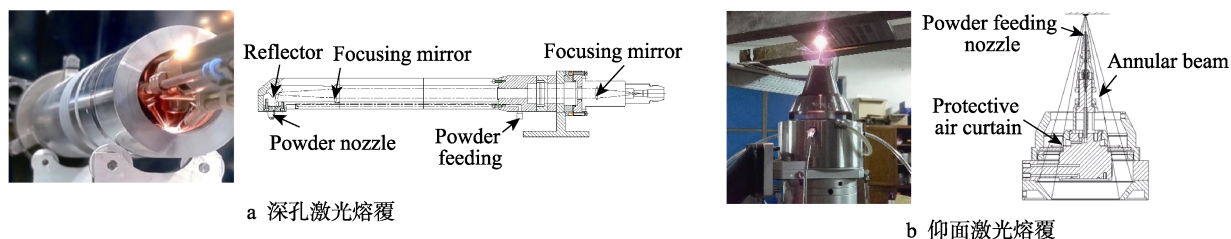


图 6 特殊工况下的激光熔覆喷头<sup>[29-30]</sup>

Fig.6 Laser cladding nozzle under special conditions<sup>[29-30]</sup>: a) deep hole laser cladding; b) overhead laser cladding

## 2 激光熔覆工艺

### 2.1 激光熔覆工艺参数

激光熔覆过程中涉及众多工艺参数, 包括激光功率、扫描速度、光斑直径、送粉速率、气体流量和搭接率等, 这些工艺参数影响熔覆层的质量。熔覆层的质量包括宏观形貌(宽度、高度、宽高比、稀释率、裂纹、表面粗糙度等)和组织性能(气孔、杂质、组织形态、力学性能等)。

熔覆层的宏观形貌与工艺参数的关系模型可通过数据统计分析方法和数值模拟的方法进行预测。根据预测的关系模型, 对目标进行优化, 从而获得最佳的工艺参数组合。目前常用的数据统计分析方法有单因素法、正交法、神经网络和响应曲面法等。邢彬等<sup>[32]</sup>采用正交试验法研究了工艺参数对 IC10 高温合金熔覆层宽度、深度和高度的影响, 结果表明激光功率对宽度影响最大, 离焦量对深度影响最大, 而各参数对高度的影响无显著差别。过低的热输入会造成基体与涂层未熔合, 过高的热输入易形成气孔缺陷。倪立斌等<sup>[33]</sup>基于神经网络建立了熔覆层特征与工艺参数之

间的预测模型, 误差小于 4.5%。Ansari 等<sup>[34]</sup>采用响应曲面法建立了回归模型, 优化获得了稀释率小的熔覆层。以上均是对多输入单输出进行优化, 而激光熔覆是一个多输入多输出过程, 因此参数优化是一个多目标优化问题, 需要对多个目标值进行综合评价。目前有 PCA-TOPSIS 法<sup>[35-36]</sup>、NSGA-II 算法<sup>[37]</sup>、灰色关联分析法<sup>[38-41]</sup>等。赵尧等<sup>[36]</sup>以熔覆层宽度、稀释率和表面硬度为优化目标, 基于 PCA-TOPSIS 法获得了激光功率、扫描速度和送粉速率的优化组合。Wang 等<sup>[40]</sup>以熔覆层宽度、平整度和欠熔面积为优化目标, 采用灰色关联分析法将这些目标转化为单一目标, 并通过主成分分析法确定权重, 最终通过回归分析, 建立了灰色关联度与工艺参数的关系模型。采用数值模拟法预测熔覆层宏观形貌, 有利于简化工艺验证过程, 揭示熔覆层成形机理, 推动自动化、智能化的发展。李亚敏等<sup>[42]</sup>利用 Ansys 软件建立了瞬态三维有限元温度场模型, 数值模拟了工艺参数对熔池的影响, 确定了最优工艺参数并进行试验验证, 大幅减少了实验量。Li 等<sup>[43]</sup>建立了多场耦合三维数学模型, 得到了激光熔覆过程中温度场和速度场的分布状态和演化规律。

熔覆层的组织性能除与熔覆材料有关外,还与成形的工艺参数有关。不同的工艺参数会形成不同的凝固组织,从而影响熔覆层性能。杨丹等<sup>[44]</sup>研究了工艺参数对 Ni 基组织的影响,组织的大小与激光功率呈正相关,与送粉速率呈负相关,随着扫描速度的增加,组织先变小后变大。曾维华等<sup>[45]</sup>研究了工艺参数对熔覆层耐腐蚀性能的影响,结果表明熔覆层的耐腐蚀性能随着激光功率的增加而降低,随着扫描速率的增加而先增加后降低。顾赛男等<sup>[46]</sup>发现不同的工艺参数下,熔覆层内的 W 颗粒会呈现团簇、均匀分布、沿着熔覆层边缘分布及“W 包 Cu”结构的不同形态。

综上所述,熔覆层的宏观形貌和组织性能是工艺参数综合作用的结果,合理选择工艺参数组合,有利于提高熔覆层的质量。

## 2.2 激光熔覆复合工艺

国内外学者研究发现,将辅助加工工艺与激光熔覆复合,能够较好地改善熔覆层缺陷,提高熔覆层质量。现有的辅助复合加工方法有电磁场、机械振动、超声振动、感应、磁场、微弧、TIG 电弧、微锻造、激光冲击等。

研究发现,部分复合工艺能够细化晶粒、减少气孔裂纹、调控组织分布、降低残余应力等。王梁等<sup>[47]</sup>研究了电磁复合场对激光熔覆增强颗粒 WC 分布的调控,结果表明在电磁场的作用下,熔池流速受到抑制,当施加的定向洛伦兹力与重力同向时,增强颗粒集中在上层,反之集中在下层。Jiang 等<sup>[48]</sup>研究了超声振动角度对激光熔覆涂层组织和性能的影响,结果表明超声振动可以细化组织,使元素分布均匀化,当

超声振动为 45°时,摩擦系数最小,耐磨性得到了显著的提高。林英华等<sup>[49]</sup>研究表明,电磁复合场能够抑制 Ni60 熔覆层表面裂纹,消除涂层内部气孔,减小脆性相的尺寸和颗粒偏聚,有效抑制内部裂纹的产生。Farahmand 等<sup>[50]</sup>采用激光-感应复合熔覆 Ni-WC 复合涂层,研究发现在感应加热的辅助下,可获得无裂纹和气孔的复合涂层。综上所述,通过复合工艺的方法可以减少熔覆层缺陷,提高涂层的耐磨、耐腐蚀等性能。

## 2.3 超高速激光熔覆

超高速激光熔覆技术由德国弗劳恩霍夫激光技术研究所和亚琛工业大学提出并联合进行研发,主要解决传统激光熔覆加工效率低的问题。此技术可在短时间内制备大面积涂层,极大提高了生产效率和降低了成本,同时响应了政府提倡的发展绿色无污染加工的要求,有望成为替代传统电镀的技术之一。

与常规激光熔覆技术相比,从能量分配看,常规激光熔覆中基板吸收的光能要多于粉末颗粒,基板吸收能量形成熔池,将输送至熔池的粉末熔化,而超高速激光熔覆改变了能量分配,粉末颗粒吸收的能量要高于基板。因此,超高速激光熔覆调整了激光、粉末和熔池的汇聚位置,使粉末汇聚点位于熔池上方(如图 7a 所示),同时提高了激光束和粉末的汇聚性,光束和粉末的汇聚直径小于 1 mm<sup>[51]</sup>,从而增加了汇聚光斑内的激光能量密度,使粉末颗粒吸收足够的能量,在落入熔池前温度已达到熔点,进而减小了粉末在熔池内的熔化时间。制备的涂层如图 7b 所示,可见熔覆层表面光滑,只需经磨削加工就可达到精加工要求<sup>[52]</sup>。

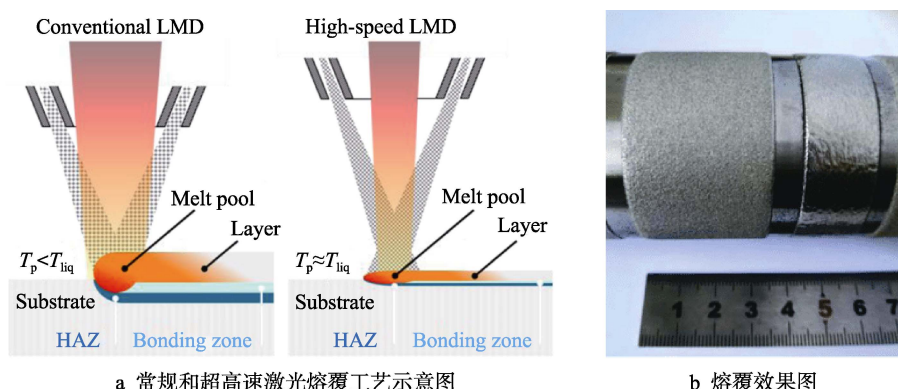


图 7 超高速激光熔覆<sup>[51-52]</sup>

Fig.7 High-speed laser cladding<sup>[51-52]</sup>: a) schematic process principle of conventional laser cladding (left) and high-speed laser cladding (right); b) cladding effect

弗劳恩霍夫激光技术研究所的 Schopphoven 等<sup>[51]</sup>研究表明,超高速激光熔覆的沉积速率由常规激光熔覆的 0.5~2 m/min 提升至 20~500 m/min,沉积率由 50 cm<sup>2</sup>/min 提升至 500 cm<sup>2</sup>/min,涂层厚度为 10~250 μm,稀释率小于 1%。Li 等<sup>[53]</sup>研究表明,超高速激光熔覆

涂层相较于常规激光熔覆涂层的组织更加细密,成分分布更均匀。

## 2.4 激光熔覆过程控制

为了提高激光熔覆过程的稳定性和熔覆层质量,

需要对成形过程中的相关信息进行监测和控制。监测对象主要有熔池温度、熔池几何特征和熔覆层几何特征。通过监测这些工况信息的变化,实时调控激光功率、扫描速度、喷头提升量等工艺参数,从而实现熔覆过程的闭环控制,补偿工艺过程中的偏差。

熔池温度和熔池形貌信息可通过高温计<sup>[54-55]</sup>、CCD 图像采集<sup>[56]</sup>、热成像仪<sup>[57-58]</sup>等设备监测获得。song 等<sup>[54]</sup>用双色高温计监测熔池温度,并采用广义预测控制器,通过调整激光功率实现了熔池温度的闭环控制。杨柳杉等<sup>[56]</sup>采用 CCD 摄像机和图像处理软件实现了熔池宽度的在线检测。熔覆层形貌信息主要为熔覆层的高度。石拓等<sup>[59]</sup>基于光学三角法原理,采用高速 CCD 相机监测层高,并设计了 P 和 PI 堆高闭环控制器,提高了成形尺寸精度。

### 3 激光熔覆材料

目前激光熔覆材料主要有自熔性合金粉末、陶瓷粉末和复合粉末。自熔性熔覆粉末有 Fe 基、Ni 基和 Co 基,粉末中含有脱氧和自熔作用的 Si、B 等元素,具有较好的工艺成形性。陶瓷粉末有碳化物陶瓷粉末、氮化物陶瓷粉末、氧化物陶瓷粉末和硅化物陶瓷粉末,具有较好的耐磨、耐蚀、耐高温和高温抗氧化性能,常被用于制备高温耐磨耐蚀涂层和热障涂层。复合粉末是指金属材料与陶瓷材料混合或复合而成的合金粉末,它将金属和陶瓷的性能有效结合起来,是激光熔覆技术研究的热点<sup>[60]</sup>。复合涂层的陶瓷相可通过机械外加法或原位合成法获得。机械外加法是将陶瓷颗粒直接加入合金粉末中,并混合均匀。原位合成法是指元素在一定的条件下发生化学反应,原位生成陶瓷相。此方法获得的增强相可与金属基体具有良好的浸润性能和界面结合性能<sup>[61]</sup>。

为获得质量良好的功能涂层,需要选择合适的材料体系。熔覆材料要与基体材料具有良好的匹配性,如相似的物理性质(如熔点、弹性模量和热胀系数等)和化学性质,以保证两者较佳的润湿性。若两者材料性质相差太大,会因不同材料界面引起的较大热应力而产生涂层开裂或剥落。此时,可采用中间过渡层的方法来制备梯度涂层,从而减小基体和涂层之间的性质突变。如 Chen 等<sup>[62]</sup>在铜合金上依次激光熔覆了 Ni 基合金和 Co 基合金,形成了 Cu-Ni-Co 梯度涂层,以镍基合金作为过渡层解决了 Cu 和 Co 之间性质差异大的问题,提高了铜合金表面的耐磨性。

熔覆材料吸收激光能量后迅速升温熔化,在和外界环境的热交换以及基体热传导的作用下快速降温,产生“液-固相变”。随着温度的进一步下降,组织会发生“固-固相变”,这决定了材料的最终组织<sup>[63]</sup>。由于激光熔覆快速熔化和快速凝固的特点,熔体的过冷度较大,在非平衡凝固条件下,可生成细晶组织、亚稳定相、非晶态合金等<sup>[64]</sup>。

## 4 激光熔覆技术的工业应用

### 4.1 矿山机械

煤矿机械工作环境复杂苛刻,粉尘颗粒、有害气体、湿气和煤渣对机械设备造成磨损、腐蚀,缩短了设备的使用寿命,如截齿、刮板运输机的运输槽、液压支架立柱、齿轮、轴类零部件等。采用激光熔覆技术可对零件易失效部位进行强化或修复,提高耐磨损、耐腐蚀性能,延长设备使用寿命。

苏伦昌等<sup>[65]</sup>在截齿上熔覆了 THPR-50 合金粉末(铁基合金加 Ti、W、Mo),涂层中原位生成了碳化物相,耐磨性提高了 3 倍。曹青等<sup>[66]</sup>采用激光熔覆技术在运输槽上制备了 35%Ni50+65%WC 无裂纹的熔覆层,并应用于 730 刮板机中,每 10 万吨的过煤量,其平均磨损量为 0.1 mm,提高了使用寿命。李春强等<sup>[67]</sup>在立柱上制备了 Ni60 熔覆涂层,具有很高的显微硬度和较强的耐腐蚀性能。

### 4.2 模具

模具作为成形物品的工具,其性能要求较高,价格昂贵,尤其是大型复杂精密模具。若模具局部磨损而报废,则加工周期长,造价高,严重影响生产。模具种类繁多,包括压铸模具、砂型铸造模具、塑料模具、锻压模具和冲压模具等,在长期的工作中,会出现表面磨损、热裂纹、热疲劳、腐蚀等问题,从而造成模具失效报废。因此,对模具表面进行处理以提高其使用寿命,以及对失效模具进行修复具有重要的意义。

Kattire 等<sup>[68]</sup>采用激光熔覆技术在 H13 工具钢上制备了 CPM9V 涂层,发现马氏体和残余奥氏体中析出高硬度的碳化钒,涂层硬度比基体提高了 4 倍。刘建永等<sup>[69]</sup>对汽车覆盖件拉深模易磨损区域进行局部激光熔覆强化,以 Fe40 合金涂层为打底层,用 GXN-65A 和 XY-27F-X40 合金分别强化模具的上部分和下部分,以满足不同部位的硬度要求。

### 4.3 铁路

磨损和滚动接触疲劳是影响钢轨使用寿命的两个因素。对钢轨关键部位进行强化,以及对钢轨的周期性维修和随时的现场抢修,有利于提高钢轨的使用寿命,减少铁路运营的成本。

Seo、Lewis 等<sup>[70-71]</sup>研究了各合金粉末对激光熔覆涂层耐磨性和滚动接触疲劳性能的影响。Liu 等<sup>[72]</sup>在列车制动盘表面熔覆了钴基涂层,并分析在不同温度下的磨损行为。结果表明,在高温环境下,Co06 涂层比基材具有更好的耐磨性和抗氧化性能。Lai 等<sup>[73]</sup>在钢轨表面熔覆了 410L 不锈钢涂层,并研究了扫描方向、预热和后热处理对涂层组织和性能的影响,如图 8 所示。



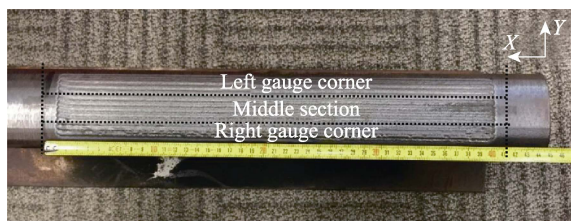


图8 激光熔覆修复钢轨  
Fig.8 Laser cladding for repairing rail

#### 4.4 其他行业

激光熔覆技术还可应用在航空航天、冶金、工程机械、汽车、船舶、3D 增材制造等行业,具有非常广泛的应用前景。如航空发动机钛合金叶片的修复、船用螺旋桨的修复、曲轴的修复、飞机大型复杂结构件的激光增材制造等。

激光熔覆技术是经济效益高的新型表面改性技术,不仅可以减少生产成本,缩短制造周期,还可以提高零部件的使用寿命。该技术属于先进制造、绿色制造领域,是“中国制造 2025”的重大战略规划发展方向之一,有利于加快发展先进制造业,推动信息技术与制造技术深度融合。

### 5 展望

1) 在激光熔覆喷头方面,改进光束传输变换聚焦方式,优化工作光斑及能场分布;变革送粉方式,提高粉末利用率和沉积率;实现光料精准耦合,提升工艺能力并扩展应用功能;高功率宽带熔覆喷头和超高速熔覆喷头可实现大面积高效激光熔覆,极大提高制造效率。这些都是表面工程领域和增材制造领域的研究热点。在制备过程中的成形工艺、成形精度、路径规划、缺陷控制以及组织性能的研究方面需进一步加强。同时,激光熔覆喷头需集成测控系统,加强工况实时监测和反馈控制技术的研发,向自动化、智能化方向发展。

2) 在激光熔覆对象方面,熔覆面由规则的平面向非规则的曲面发展,成形轨迹由二维直线向空间曲线发展,加工方位从水平面、小倾角面向立仰面、空间任意方向喷射熔覆发展。在朝空间任意方位进行激光熔覆时,激光束、粉末、熔池、工作面之间的耦合关系将发生变化,从而影响熔覆层成形质量。需要对空间不同方位下光粉气的喷射规律、空间不同方位甚至倒挂熔池的流动与凝固规律、熔覆层形貌特征规律、组织生长规律及其性能等方面进行研究。

3) 在激光熔覆应用方面,便携移动式激光熔覆原位修复技术会得到发展与应用。关键技术主要包括:高功率、小型化、智能化、便携式的熔覆成套装备,光粉气空间喷射耦合技术与全方位全位置熔覆成形技术及装备,室外环境下的惰性气氛保护装置,激

光熔覆工艺及后处理工艺等。

4) 在激光熔覆复合方面,将该技术应用于激光增材制造过程中,成形高质量的复杂结构件、大型结构件等。如激光熔覆与微压锻、激光冲击等复合的增材制造,可有效抑制成形零件的开裂、气孔、残余应力大等问题,提高成形件的组织性能和抗疲劳等综合性能。

#### 参考文献:

- [1] GNANAMUTHU D S. Cladding: America, US3952180A[P]. 1976-04-20.
- [2] 李嘉宁. 激光熔覆技术及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2016.
- [3] LI Jia-ning. Laser cladding technology and application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2016.
- [4] 杜学芸, 许金宝, 宋健. 激光熔覆再制造技术研究现状及发展趋势[J]. 金属加工(热加工), 2020(3): 15-19.
- [5] DU Xue-yun, XU Jin-bao, SONG Jian. Research status and development trend of laser cladding remanufacturing technology[J]. MW metal forming, 2020(3): 15-19.
- [6] 江吉彬, 练国富, 许明三. 激光熔覆技术研究现状及趋势[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2015, 29(1): 27-36.
- [7] JIANG Ji-bin, LIAN Guo-fu, XU Ming-san. Research on status and trend of laser cladding[J]. Journal of Chongqing University of Technology(natural science), 2015, 29(1): 27-36.
- [8] DUOCASTELLA M, ARNOLD C B. Bessel and annular beams for materials processing[J]. Laser & photonics reviews, 2012, 6(5): 607-621.
- [9] LIU D J, ZHONG H Y, YIN H M, et al. Spreading and coherence properties of a rectangular multi-Gaussian Schell-model beam propagating in biological tissues[J/OL]. [2020-03-18]. <https://doi.org/10.1007/s12648-020-01726-2>.
- [10] BLUM R, MOLIAN P. CO<sub>2</sub> laser coating of nanodiamond on aluminum using an annular beam[J]. Applied surface science, 2014, 288: 1-8.
- [11] GOVEKAR E, KUZNETSOV A, ANŽE J. Drop on demand generation from a metal wire by means of an annular laser beam[J]. Journal of materials processing technology, 2015, 227: 59-70.
- [12] PÜTSCH O, STOLLENWERK J, KOGEL-HOLLACHER M, et al. Annular beam shaping system for advanced 3D laser brazing[J]. Advanced optical technologies, 2012, 1(5): 397-402.
- [13] 石世宏, 傅戈雁, 王安军, 等. 激光加工成形制造光内送粉工艺与光内送粉喷头: 中国, CN101148760A[P]. 2008-03-26.
- [14] SHI Shi-hong, FU Ge-yan, WANG An-jun, et al. In-light powder feeding process and in-light powder feeding nozzle manufactured by laser processing: China, CN101148760A [P]. 2008-03-26.
- [15] ZHANG J C, SHI S H, FU G Y, et al. Analysis on surface finish of thin-wall parts by laser metal deposition with



- annular beam[J]. Optics & laser technology, 2019, 119: 105605.
- [12] 王彦芳, 孙旭, 宋增金, 等. 宽带激光熔覆非晶合金涂层界面组织结构[J]. 表面技术, 2018, 47(3): 61-65.  
WANG Yan-fang, SUN Xu, SONG Zeng-jin, et al. Interface microstructures of broad-band laser cladding amorphous alloy coating[J]. Surface technology, 2018, 47(3): 61-65.
- [13] TRACZYK M, WOJTANOWSKI J, MIERCZYK Z, et al. Theoretical analysis and optimization of 3D laser beam shaping[J]. Bulletin of the polish academy of sciences, 2015, 63(2): 555-560.
- [14] 雷呈强, 汪岳峰, 殷智勇, 等. 基于微透镜阵列的半导体激光器堆栈匀化系统[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 58-65.  
LEI Cheng-qiang, WANG Yue-feng, YIN Zhi-yong, et al. Homogenization system for diode laser stack beams based on microlens array[J]. Chinese journal of lasers, 2015, 42(5): 58-65.
- [15] 严雄伟, 王振国, 蒋新颖, 等. 基于微透镜阵列匀束的激光二极管面阵抽运耦合系统分析[J]. 物理学报, 2018, 67(18): 106-114.  
YAN Xiong-wei, WANG Zhen-guo, JIANG Xin-ying, et al. Analysis of laser diode array pump coupling system based on microlens array[J]. Acta physica sinica, 2018, 67(18): 106-114.
- [16] 殷智勇, 汪岳峰, 贾文武, 等. 基于微透镜阵列的光束积分系统的性能分析[J]. 中国激光, 2012, 39(7): 29-35.  
YIN Zhi-yong, WANG Yue-feng, JIA Wen-wu, et al. Performance analysis of beam integrator system based on microlens array[J]. Chinese journal of lasers, 2012, 39(7): 29-35.
- [17] 李森森, 吴凡, 吕志伟. 基于液晶空间光调制器的激光近场光束整形[J]. 光电技术应用, 2017, 32(3): 19-23.  
LI Sen-sen, WU Fan, LYU Zhi-wei. Beam shaping of laser nearfield based on liquid crystal spatial light modulator[J]. Electro-optic technology application, 2017, 32(3): 19-23.
- [18] 常颖, 王狮凌. 基于球面-非球面柱透镜的圆光斑高斯光束整形[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(6): 95-100.  
CHANG Ying, WANG Shi-ling. Gaussian beam shaping of round spot based on spheric-aspheric cylindrical lens[J]. Laser & optoelectronics progress, 2018, 55(6): 95-100.
- [19] NIKOLAJEFF F, HARD S, CURTIS B. Diffractive microlenses replicated in fused silica for excimer laser-beam homogenizing[J]. Applied optics, 1997, 36(32): 8481-8489.
- [20] HERRERA-FERNANDEZ J M, SANCHEZ-BREA L M, BERNABEU E. Near-field shaping with two binary diffractive optical elements in tandem[J]. Optics communications, 2013, 297: 182-189.
- [21] 黄雅峥, 季凌飞, 蒋毅坚. 一种反射型正交双带式积分镜均束装置的设计[J]. 中国激光, 2006, 33(suppl): 264-267.  
HUANG Ya-zheng, JI Ling-fei, JIANG Yi-jian. Design of crossed double strip integrators for high power laser beam homogenizing[J]. Chinese journal of lasers, 2006, 33(suppl): 264-267.
- [22] 刘晓东, 秦应雄, 柳洁, 等. 高功率激光大宽度矩形光束抛物带式积分镜研究[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(19): 150-157.  
LIU Xiao-dong, QIN Ying-xiong, LIU Jie, et al. Research on parabolic band integrating mirror for high-power large-width rectangular laser beams[J]. Laser & optoelectronics progress, 2019, 56(19): 150-157.
- [23] 李晓薇, 张春华, 张松, 等. 激光熔覆技术的研究进展[J]. 激光杂志, 2007(2): 1-2.  
LI Xiao-wei, ZHANG Chun-hua, ZHANG Song, et al. Developments of laser cladding technology[J]. Laser journal, 2007(2): 1-2.
- [24] 孙莹. 激光熔覆技术在金属 3D 打印中的应用[J]. 机电产品开发与创新, 2015, 28(6): 26-28.  
SUN Ying. Application of laser cladding technology in metal 3D printing[J]. Development & innovation of machinery & electrical products, 2015, 28(6): 26-28.
- [25] 王明娣, 左敦稳, 王珉, 等. 光内送粉激光熔覆工艺参数对单层熔覆质量的影响[J]. 南京航空航天大学学报, 2009, 41(3): 354-357.  
WANG Ming-di, ZUO Dun-wen, WANG Min, et al. Process in single-layer laser cladding using coaxial inside-beam powder feeding[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2009, 41(3): 354-357.
- [26] ZHONG C L, PIRCH N, GASSER A, et al. The influence of the powder stream on high-deposition-rate laser metal deposition with Inconel 718[J]. Metals, 2017, 7(10): 443.
- [27] 刘昌勇, 莫衡阳, 胡家强, 等. 一种激光宽带熔覆喷头: 中国, CN107419265A[P]. 2017-12-01.  
LIU Chang-yong, MO Heng-yang, HU Jia-qiang, et al. Laser wide-strip cladding spray head: China, CN107419265A[P]. 2017-12-01.
- [28] 雷定中, 石世宏, 傅戈雁. 激光宽带熔覆光内送粉喷嘴研制[J]. 中国机械工程, 2015, 26(22): 3076-3081.  
LEI Ding-zhong, SHI Shi-hong, FU Ge-yan. Research on inside-laser powder feeding nozzle for broadband laser cladding[J]. China mechanical engineering, 2015, 26(22): 3076-3081.
- [29] 胡家强, 莫衡阳, 刘昌勇, 等. 深孔激光熔覆头: 中国, CN106835118A[P]. 2017-06-13.  
HU Jia-qiang, MO Heng-yang, LIU Chang-yong, et al. Deep hole laser cladding head: China, CN106835118A [P]. 2017-06-13.
- [30] 石拓, 石世宏, 胡晔, 等. 一种三维空间任意方向熔覆喷头: 中国, CN109628920A [P]. 2019-04-16.  
SHI Tuo, SHI Shi-hong, HU Ye, et al. Three-dimensional space any-direction fusion covering spraying head: China, CN109628920A [P]. 2019-04-16.
- [31] 张胜标. 水下激光增材局部干法排水装置的设计与研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.  
ZHANG Sheng-biao. Design and research of local dry drainage cover assisting underwater laser additive manufacturing[D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [32] 邢彬, 常保华, 都东. 工艺参数对 IC10 高温合金激光熔覆层形貌的影响[J]. 焊接学报, 2015, 36(7): 88-92.  
XING Bin, CHANG Bao-hua, DU Dong. Effects of process

- parameters on morphology of laser deposited layer on IC10 directionally solidified superalloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(7): 88-92.
- [33] 倪立斌, 刘继常, 伍耀庭, 等. 基于神经网络和粒子群算法的激光熔覆工艺优化[J]. 中国激光, 2011, 38(2): 99-104.
- NI Li-bin, LIU Ji-chang, WU Yao-ting, et al. Optimization of laser cladding process variables based on neural network and particle swarm optimization algorithms[J]. Chinese journal of lasers, 2011, 38(2): 99-104.
- [34] ANSARI M, MOHAMADIZADEH A, HUANG Y, et al. Laser directed energy deposition of water-atomized iron powder: process optimization and microstructure of single-tracks[J]. Optics & laser technology, 2019, 112: 485-493.
- [35] 陈峰, 周金宇, 陈菊芳, 等. PCA-TOPSIS 法在激光熔覆工艺参数优化中的应用[J]. 机械设计与制造, 2018(3): 120-123.
- CHEN Feng, ZHOU Jin-yu, CHEN Ju-fang, et al. Optimization of process parameters for laser cladding based on PCA-TOPSIS method[J]. Machinery design & manufacture, 2018(3): 120-123.
- [36] 赵尧, 虞钢, 何秀丽, 等. 基于主成分分析法与逼近理想解法的 38MnVS6 激光熔覆工艺研究[J]. 兵工学报, 2019, 40(12): 2537-2544.
- ZHAO Yao, YU Gang, HE Xiu-li, et al. Research on laser cladding processing for 38MnVS6 by PCA-TOPSIS method[J]. Acta armamentarii, 2019, 40(12): 2537-2544.
- [37] 赵凯, 梁旭东, 王伟, 等. 基于 NSGA-II 算法的同轴送粉激光熔覆工艺多目标优化[J]. 中国激光, 2020, 47(1): 96-105.
- ZHAO Kai, LIANG Xu-dong, WANG Wei, et al. Multi-objective optimization of coaxial powder feeding laser cladding based on NSGA-II [J]. Chinese journal of lasers, 2020, 47(1): 96-105.
- [38] 赵丹丹, 焦锋. 基于灰色关联分析的 35CrMoV 钢活塞杆激光熔覆工艺参数优化[J]. 兵工学报, 2018, 39(10): 2073-2080.
- ZHAO Dan-dan, JIAO Feng. Optimization of laser cladding process parameters of 35CrMoV piston rod based on grey correlation analysis[J]. Acta armamentarii, 2018, 39(10): 2073-2080.
- [39] 于天彪, 宋博学, 郝文超, 等. 激光熔覆工艺参数对熔覆层形貌的影响及优化[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2019, 40(4): 537-542.
- YU Tian-biao, SONG Bo-xue, XI Wen-chao, et al. Influence of laser cladding process parameters on morphology of cladding layer and its optimization[J]. Journal of Northeastern University (natural science), 2019, 40(4): 537-542.
- [40] WANG Q T, ZENG X B, CHEN C R, et al. An integrated method for multi-objective optimization of multi-pass Fe50/TiC laser cladding on AISI 1045 steel based on grey relational analysis and principal component analysis[J]. Coating, 2020, 10(2): 151.
- [41] UDAYA PRAKASH J, ANANTH S, SIVAKUMAR G, et al. Multi-objective optimization of wear parameters for aluminium matrix composites (413/B4C) using grey relational analysis[J]. Materials today proceedings, 2018, 5(2): 7207-7216.
- [42] 李亚敏, 咬登治, 范福杰. 激光熔覆 718 合金工艺参数优化的数值模拟研究[J]. 应用激光, 2018, 38(6): 920-926.
- LI Ya-min, YAO Deng-zhi, FAN Fu-jie. Numerical simulation study on process parameters optimization of 718 alloy induced by laser cladding[J]. Applied laser, 2018, 38(6): 920-926.
- [43] LI C, YU Z, GAO J, et al. Numerical simulation and experimental study of cladding Fe60 on an ASTM 1045 substrate by laser cladding[J]. Surface & coatings technology, 2019, 357: 965-977.
- [44] 杨丹, 宁玉恒, 赵宇光, 等. 工艺参数对 304 不锈钢表面激光熔覆 Ni 基合金涂层的组织、耐磨性及耐腐蚀性的影响[J]. 材料导报, 2017, 31(24): 133-140.
- YANG Dan, NING Yu-heng, ZHAO Yu-guang, et al. Influence of processing parameter on microstructure, wear-resistance and corrosion-resistance of laser cladding Ni-based alloy on the surface of 304 stainless steel[J]. Materials review, 2017, 31(24): 133-140.
- [45] 曾维华, 刘洪喜, 王传琦, 等. 工艺参数对不锈钢表面激光熔覆 Ni 基涂层组织及耐腐蚀性能的影响[J]. 材料工程, 2012(8): 24-29.
- ZENG Wei-hua, LIU Hong-xi, WANG Chuan-qi, et al. Effects of technological parameters on microstructure and corrosion resistance of laser cladding Ni-based coating on stainless steel surface[J]. Journal of materials engineering, 2012(8): 24-29.
- [46] 顾赛男, 王广原, 秦渊, 等. 激光熔覆 W-Cu 复合材料的组织形貌与工艺参数的相关性[J]. 中国激光, 2018, 45(4): 176-183.
- GU Sai-nan, WANG Guang-yuan, QIN Yuan, et al. Correlation between process parameters and microstructure morphologies of W-Cu composites fabricated by laser cladding[J]. Chinese journal of lasers, 2018, 45(4): 176-183.
- [47] 王梁, 胡勇, 林英华, 等. 电磁复合场对激光熔注增强颗粒分布梯度的调控[J]. 中国激光, 2018, 45(10): 67-74.
- WANG Liang, HU Yong, LIN Ying-hua, et al. Distribution gradient control of laser melt injection reinforcement particles by electromagnetic compound field[J]. Chinese journal of lasers, 2018, 45(10): 67-74.
- [48] JIANG F L, LI C, WANG Y L, et al. Effect of applied angle on the microstructure evolution and mechanical properties of laser clad 3540 Fe/CeO<sub>2</sub> coating assisted by in-situ ultrasonic vibration[J]. Materials research express, 2019, 6(8): 0865h6.
- [49] 林英华, 袁莹, 王梁, 等. 电磁复合场对 Ni60 合金凝固过程中显微组织和裂纹的影响[J]. 金属学报, 2018, 54(10): 1442-1450.
- LIN Ying-hua, YUAN Ying, WANG Liang, et al. Effect of electric-magnetic compound field on the microstructure and crack in solidified Ni60 alloy[J]. Acta metallurgica sinica, 2018, 54(10): 1442-1450.
- [50] FARAHMAND P, LIU S, ZHANG Z, et al. Laser cladding assisted by induction heating of Ni-WC composite enhanced by nano-WC and La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>[J]. Ceramics international, 2014,

- 40(10): 15421-15438.
- [51] SCHOPPHOVEN T, GASSER A, WISSENBAACH K, et al. Investigations on ultra-high-speed laser material deposition as alternative for hard chrome plating and thermal spraying[J]. Journal of laser applications, 2016, 28(2): 022501.
- [52] SHEN B W, DU B R, WANG M H, et al. Comparison on Microstructure and properties of stainless steel layer formed by extreme high-speed and conventional laser melting deposition[J]. Frontiers in materials, 2019(6): 248.
- [53] LI L Q, SHEN F M, ZHOU Y D, et al. Comparative study of stainless steel AISI 431 coatings prepared by extreme-high-speed and conventional laser cladding[J]. Journal of laser applications, 2019, 31(4): 042009.
- [54] SONG L J, MAZUMDER J. Feedback control of melt pool temperature during laser cladding process[J]. IEEE transactions on control systems technology, 2011, 19(6): 1349-1356.
- [55] SONG L J, BAGAVATH-SINGH V, DUTTA B, et al. Control of melt pool temperature and deposition height during direct metal deposition process[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2012, 58(1-4): 247-256.
- [56] 杨柳杉, 刘金水, 刘继常, 等. 基于 CCD 的激光熔覆熔池宽度的在线检测研究[J]. 激光技术, 2011, 35(3): 31-34.  
YANG Liu-shan, LIU Jin-shui, LIU Ji-chang, et al. Study on CCD-based detection system for online monitoring of melt pool width in laser cladding[J]. Laser technology, 2011, 35(3): 31-34.
- [57] DOUMANIDIS C, KWAK Y M. Geometry modeling and control by infrared and laser sensing in thermal manufacturing with material deposition[J]. Journal of manufacturing science & engineering, 2001, 123(1): 45-52.
- [58] MARSHALL G J, THOMPSON S M, SHAMSAEI N. Data indicating temperature response of Ti-6Al-4V thin-walled structure during its additive manufacture via laser engineered net shaping[J]. Data in brief, 2016, 7: 697-703.
- [59] 石拓, 卢秉恒, 魏正英, 等. 激光金属沉积堆高闭环控制研究[J]. 中国激光, 2017, 44(7): 302-310.  
SHI Tuo, LU Bing-heng, WEI Zheng-ying, et al. Research of closed-loop control of deposition height in laser metal deposition[J]. Chinese journal of lasers, 2017, 44(7): 302-310.
- [60] 张凯, 陈小明, 张磊, 等. 激光熔覆制备耐磨耐蚀涂层技术研究进展[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2019, 24(4): 308-314.  
ZHANG Kai, CHEN Xiao-ming, ZHANG Lei, et al. Research progress of wear-resistant and corrosion-resistant coatings prepared by laser cladding[J]. Materials science and engineering of powder metallurgy, 2019, 24(4): 308-314.
- [61] 张坚, 邱斌, 赵龙志. 激光熔覆技术研究进展[J]. 热加工工艺, 2011, 40(18): 116-119.  
ZHANG Jian, QIU Bin, ZHAO Long-zhi. Latest developments of laser cladding technology[J]. Hot working technology, 2011, 40(18): 116-119.
- [62] CHEN S Y, LIANG J, LIU C S, et al. Preparation of a novel Ni/Co-based alloy gradient coating on surface of the crystallizer copper alloy by laser[J]. Applied surface science, 2011, 258(4): 1443-1450.
- [63] 任仲贺, 武美萍, 崔宸, 等. 激光熔覆温度场和  $\text{CeO}_2$ 、 $\text{TiO}_2$  对材料相变的影响[J]. 中国激光, 2019, 46(8): 118-125.  
REN Zhong-he, WU Mei-ping, CUI Chen, et al. Effects of temperature field and  $\text{CeO}_2$ /TiO<sub>2</sub> on material phase transition in laser cladding[J]. Chinese journal of lasers, 2019, 46(8): 118-125.
- [64] 张维平, 刘硕. 高能激光束对材料表层快速凝固组织及性能影响的研究进展[J]. 铸造, 2005(1): 28-31.  
ZHANG Wei-ping, LIU Shuo. Development of the effect of high energy laser on the rapid solidification structure and properties of the material surface[J]. Foundry, 2005(1): 28-31.
- [65] 苏伦昌, 董春春, 杜学芸, 等. 矿用截齿激光熔覆高耐磨颗粒增强铁基复合涂层的性能研究[J]. 矿山机械, 2014, 42(3): 102-106.  
SU Lun-chang, DONG Chun-chun, DU Xue-yun, et al. Study on properties of superior wear-resistant laser cladding layer with particle reinforced Fe base for mining picks[J]. Mining & processing equipment, 2014, 42(3): 102-106.
- [66] 曹青, 蔡志海, 秦航, 等. WC 增强镍基合金激光熔覆层性能及其在刮板输送机中部槽上的应用[J]. 应用激光, 2018, 38(4): 522-526.  
CAO Qing, CAI Zhi-hai, QIN Hang, et al. Properties of laser cladding layer of WC reinforced nickel-based alloy and its application in chute of scraper conveyor[J]. Applied laser, 2018, 38(4): 522-526.
- [67] 解文正, 李春强, 杨志伟, 等. 激光熔覆技术在液压支架上的应用研究[J]. 煤矿机械, 2010, 31(10): 106-108.  
XIE Wen-zheng, LI Chun-qiang, YANG Zhi-wei, et al. Study on application of laser cladding technology in hydraulic supports[J]. Coal mine machinery, 2010, 31(10): 106-108.
- [68] KATTIRE P, PAUL S, SINGH R, et al. Experimental characterization of laser cladding of CPM 9V on H13 tool steel for die repair applications[J]. Journal of manufacturing processes, 2015, 20(3): 492-499.
- [69] 刘建永, 杨伟, 李行志, 等. 机器人激光熔覆局部强化汽车覆盖件拉深模的应用研究[J]. 模具工业, 2015, 41(7): 25-29.  
LIU Jian-yong, YANG Wei, LI Xing-zhi, et al. Application and research of local reinforcement by robot laser aided cladding on automobile body panel drawing die[J]. Die & mould industry, 2015, 41(7): 25-29.
- [70] SEO J W, KIM J C, KWON S J, et al. Effects of laser cladding for repairing and improving wear of rails[J]. International journal of precision engineering & manufacturing, 2019, 20(7): 1207-1217.
- [71] LEWIS S R, FRETWELL-SMITH S, GOODWIN P S, et al. Improving rail wear and RCF performance using laser cladding[J]. Wear, 2016, 366: 268-278.
- [72] LIU Y, WU Y, MA Y, et al. High temperature wear performance of laser cladding Co66 coating on high-speed train brake disc[J]. Applied surface science, 2019, 481: 761-766.
- [73] LAI Q, ABRAHAMS R, YAN W Y, et al. Investigation of a novel functionally graded material for the repair of premium hypereutectoid rails using laser cladding technology[J]. Composites part B engineering, 2017, 130: 174-191.