

# 激光熔覆技术在钢铁行业中的应用和发展

薛 晶, 王乐乐

(内蒙古包钢钢联股份有限公司设备工程部, 内蒙古 包头 014010)

**摘 要:** 激光熔覆技术通过高能激光束熔化金属粉末, 使其与基材形成冶金结合层, 可制备功能涂层。通过调控工艺参数可优化涂层性能。在钢铁行业中, 该技术应用于零部件强化、设备防腐和高价值设备修复, 通过优化预处理、工艺参数及材料适配, 解决熔覆层剥离及裂纹问题。激光熔覆技术结合 3D 扫描与机器人技术实现复杂件高质量修复, 推动修复工序智能化。

**关键词:** 激光熔覆; 钢铁行业; 设备修复

中图分类号: TG174.4

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2025)04-0071-04

## Applications and Development of Laser Cladding Technology in Iron and Steel Industry

Xue Jing, Wang Lele

(Equipment Engineering Dept. of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

**Abstract:** For the laser cladding technology, metal powder is melted by high energy laser beam to form metallurgical bonding layer with base material, which could prepare functional coating. Its performances could be optimized through adjusting and controlling process parameters. In the iron and steel industry, the technology is applied for strengthening components and parts, corrosion prevention of equipment as well as repair of high value equipment. Such problems as peeling of cladding layer and cracks are solved by optimizing the pretreatment, process parameters and material adaptation as well as high-quality repair of complex components is realized combining the technology with such technologies as 3D scanning and robot, which could promote the intelligence of repair processes.

**Key words:** laser cladding; iron and steel industry; equipment repair

激光熔覆技术利用高能激光束熔化同步输送金属粉末, 通过冶金结合机制在基材表面形成高性能熔覆层。高功率激光器发射连续、脉冲激光束, 经聚焦镜调控光斑尺寸, 扫描振镜控制运动轨迹, 在基材表面形成瞬时高温热源<sup>[1]</sup>。金属粉末在激光辐照下完全熔化, 在基材表层形成 5 ~ 20  $\mu\text{m}$  深度的微

熔区, 所谓动态熔池<sup>[2]</sup>。熔融金属与基材微熔区发生原子互扩散, 冷却后形成致密细晶组织<sup>[3]</sup>。依靠熔覆层逐层堆积的方法, 可完成 0.1 ~ 2 mm 功能性涂层的熔覆, 界面结合强度达到基材抗拉强度的 85% ~ 120%, 显著提升关键部件修复与防腐强化效能<sup>[4]</sup>。

## 1 激光熔覆技术概述

### 1.1 定义

激光熔覆是指金属粉末在激光束照射下迅速熔化形成液态金属,该液态金属与基材表面微熔区发生原子互扩散与冶金结合,冷却凝固后形成固态熔覆层。通过逐层堆积,可精确控制熔覆层的厚度与形状。

### 1.2 设备组成

激光熔覆系统通常由以下几个主要部分组成。激光器:生成激光束的系统核心设备,常用的激光器包括  $\text{CO}_2$  激光器和固体激光器;光学系统:聚焦激光束,提高能量密度,以确保金属粉末的有效熔化;粉末供给系统:通过管道利用气体将金属粉末输送到激光熔化区;运动控制系统:主要控制熔覆头的移动路径,确保熔覆层的均匀性和一致性;冷却系统:冷却熔覆层,减小热影响区的温度变化,控制内应力和变形。

### 1.3 熔覆材料

根据不同的激光熔覆应用场景来选择合适的熔覆材料,常见的材料包括硬质合金、铬基合金等耐磨材料,适用于需要高耐磨性的场景;不锈钢、镍基合金等耐腐蚀材料,适用于腐蚀性环境中工作的部件修复;钴基合金、镍基合金等高温材料,适用于高温工况下的设备修复。

### 1.4 工艺参数

激光熔覆作业的工艺参数直接影响熔覆层的质量和性能,主要工艺参数包括激光功率、扫描速度、粉末供给速度和保护气体。激光功率影响熔化速度和熔覆层的厚度,功率过高导致溶液温度过高,而功率过低则粉末熔化不充分;激光扫描速度决定了激光束在基材上的移动速度,影响熔覆层的均匀性和结合强度;粉末供给速度需与激光扫描速度相匹配,以确保粉末熔化充分;通常使用氩气或氮气作为保护气体,以防止熔融金属在高温下与空气反应形成氧化物熔渣,影响熔覆层的质量。

### 1.5 后处理

激光熔覆作业结束后,熔覆层往往需要通过后处理强化性能。后处理的步骤分三步,首先通过热处理调控熔覆层的微观结构,提高硬度和韧性;然后对熔覆层表面进行机加处理,提高表面光洁度和尺寸精度;最后对工件表面进行喷砂、抛光等处理,提高熔覆层的耐腐蚀性和耐磨性。

## 2 激光熔覆在钢铁行业中的应用

### 2.1 机械零部件的强化

钢铁生产设备的传动部件长期承受高载荷、摩擦及腐蚀介质侵蚀,造成表面磨损、磨耗,影响设备寿命,需通过表面处理技术强化部件表面性能。采取传统表面处理技术易出现涂层孔隙率高( $>5\%$ )、结合强度不足( $<300\text{ MPa}$ )等问题,在这种情况下,激光熔覆技术被用来强化机械零部件的表面性能。

某钢铁企业采用激光熔覆技术在 42CrMo 齿轮表面制备  $\text{Ni60} + 30\% \text{ WC} + 10\% 316\text{L}$  不锈钢粉末复合涂层,经台架试验验证,齿轮在同等工况下的磨损量降低 72%,使用寿命从 6 个月延长至 18 个月。此外,熔覆层残余压应力(约 200 ~ 400 MPa)可显著抑制疲劳裂纹扩展,使轴承在交变载荷下的疲劳寿命提升 40% 以上。对于高炉风口这样的高温部件,通过熔覆  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Y}_2\text{O}_3$  纳米颗粒增强的镍基复合涂层,可使修复区抗热震性能提升 50%,在 1 200 °C 循环热冲击下不会开裂失效。针对球磨机衬板的耐磨部件,通过定制化合金粉末(如 WC/Co 金属陶瓷、Stellite 6 钴基合金或 FeCrMoB 系铁基合金)与基体原位冶金结合,可制备厚度 0.5 ~ 3 mm 的功能梯度涂层,其显微硬度可达 800 ~ 1 500 HV(基材硬度约 200 ~ 300 HV),耐磨性提升 3 ~ 8 倍。

### 2.2 设备的防腐处理

钢铁生产环境中的高温、高湿及酸性介质会大幅加速设备腐蚀失效,可通过在设备表面熔覆超低碳不锈钢、镍基合金或非晶合金涂层实现主动防腐。某炼钢厂在脱硫塔内壁熔覆厚度 1.2 mm 的镍基合金涂层后,基材在 60 °C 的  $\text{H}_2\text{SO}_4$  溶液( $\text{pH} = 2$ )中浸泡 720 h,腐蚀速率从 1.20 mm/a 降至 0.03 mm/a,且涂层表面无点蚀、剥落现象。机理研究表明,熔覆层中 Cr 和 Mo 元素的富集促进致密钝化膜形成,使自腐蚀电位正移,腐蚀电流密度降低。某沿海钢厂输料管道表面熔覆 316L 不锈钢涂层后,在海洋大气环境下的服役寿命从 2 年延长至 8 年,每年维护成本下降 65%。

### 2.3 设备的修复

据统计,钢铁厂的高炉布料溜槽、连铸机扇形段、热轧输送辊道等重要设备,因局部磨损或热疲劳导致的失效占比超过 70%。针对损坏的部位,可通过缺陷定位→基体清洁→熔覆成形→后处理的激光

熔覆工艺链,实现外形与性能的同步恢复。采用激光熔覆修复大型轧辊,单次可节约成本70万元,年维护费用降低65%。以 $\Phi 850$  mm 热轧支撑辊修复为例,采用2 kW 光纤激光器在辊面磨损区熔覆3层 Fe55 铁基合金(单层厚度0.8 mm),修复后辊面硬度达58 HRC(原辊面52 HRC),单次修复成本仅为新辊价格的30%,且修复周期缩短至36 h,相比传统堆焊的72 h 工时大幅减少。研究表明,采用激

光熔覆技术修复的轧辊延期寿命可达新品的85%~95%,由此间接可减少60%的碳排放。

### 3 常见问题及处理方法

表1为笔者根据实际工作经验梳理出的激光熔覆作业过程中常见问题以及原因分析、解决办法,供工程技术人员参考。

表1 激光熔覆作业中的常见问题、原因分析和解决办法

问题描述	原因推测	解决方法
作业过程中出现熔覆层剥离或脱落,表面出现裂缝或凹陷	表面预处理不足;激光功率不匹配;材料不兼容	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 作业前,使用机械清洗、喷砂或酸碱等化学试剂清洗基材表面,确保洁净度。</li> <li>2. 通过实验调整优化激光功率和扫描速度,确定作业参数,确保熔覆层与基材良好结合。</li> <li>3. 选择兼容性好的熔覆粉末材料。</li> </ol>
熔覆层在冷却过程中出现裂纹,影响其力学性能和使用寿命	冷却速度过快;材料热膨胀系数差异大;金属粉末化学成分不匹配	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 采用适当的冷却方式,如缓慢冷却或使用保温材料,防止冷却速度过快。</li> <li>2. 选择膨胀系数相近的材料,减少热应力。</li> <li>3. 选择韧性强的熔覆材料,减少裂纹的发生。</li> </ol>
熔覆层厚度不均、表面粗糙,性能和外观质量差	激光束聚焦异常;粉末供给不均;扫描速度不稳定	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 调整激光光束聚焦度,检查和保证光束精准性。</li> <li>2. 检查粉末供给系统,清除堵塞异物等<sup>[5]</sup>。</li> <li>3. 针对实际情况,调整激光扫描速度和路径。</li> </ol>
熔覆层的硬度未达到预期水平,影响其耐磨性和抗腐蚀性	粉末材料选择不当;激光熔覆工艺参数设置不合理	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 选择高硬度、高耐磨的合金粉末。</li> <li>2. 优化工艺参数,确保熔覆层达到设计标准。</li> </ol>
熔覆作业中断或质量不稳定	激光器损耗;机械故障	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 对系统进行定期维护,保持设备正常工作状态。</li> <li>2. 部署实时监控系統,及时发现并处理潜在故障。</li> </ol>
熔覆后的部件在实际使用中未达到预期功能	作业操作未满足工艺要求;后处理不足	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 根据工作环境选择适当的熔覆材料和工艺参数,以满足特定的工作需求。</li> <li>2. 对熔覆层进行必要的热处理或其他表面处理。</li> </ol>

## 4 激光熔覆与机器人、3D 扫描技术的结合

在特殊作业中,由于工件在作业现场无法或者难以拆除,加之工件的复杂性,导致作业难度增加,相应提高了作业质量要求及验收标准。面对高难度的要求,激光熔覆作业需要联合机器人和3D扫描技术协同实施。

3D扫描技术指利用手持式扫描仪通过激光束对工件表面进行三维扫描,完成对工件整体高精度测量。扫描仪发射的激光束照射到工件表面,在表面发生反射,扫描仪内置的高精度相机记录激光反射的角度和时间,通过几何算法生成各个反射点的

三维空间云数据,所有的反射点云数据经运算处理生成STL文件。STL文件被导入到ABB机器人的Robot Studio控制系统,控制系统自动解析STL文件,获取工件的空间扫描信息。基于工件的扫描信息,Robot Studio控制系统自动规划激光熔覆作业工具的运动路径,ABB机器人将控制系统的规划路径指令自动转化成全套动作轨迹,从而完成激光熔覆作业。相比人工作业,机器人作业不仅效率高,而且质量更好。

## 5 激光熔覆技术的发展趋势

激光熔覆技术未来核心突破将体现在工艺精细化与装备智能化两方面。

在工艺精细化方面,大力开发梯度功能材料和同步送粉工艺,可实现涂层耐磨性、耐腐蚀性及高温性能的全面提升。未来引入惰性气体保护与粉末回收系统,减少材料消耗和熔覆作业过程的碳排放。

在装备智能化方面,国内某科技公司研发的双激光熔覆头专利技术,可同时处理 2 个区域,不仅减少热影响区变形,而且熔覆作业效率提升 30% 以上。配套红外热成像、熔池光谱分析等技术的监测系统以及激光功率、扫描速度及送粉速率等动态调节,有助于实现熔覆层孔隙率低于 0.5%、熔覆层强度提升的目标。

从钢铁行业的应用场景来看,激光熔覆技术已从传统的设备修复向表面强化→防腐→再制造一体化方向拓展。通过延长设备服役寿命、降低备件更换频率,不仅使得生产成本进一步下降,而且能够提升产线连续作业能力,支撑高强度汽车钢、风电钢、水电钢等高端钢材产能释放。

## 6 结束语

激光熔覆技术的持续迭代与深度应用,不仅显著提升了设备效能与材料性能,而且促进了资源循环利用,展现出其重要的技术价值和广阔的应用前

景,为钢铁生产技术装备的高质化利用开辟了一条全新的技术路径。

## 参 考 文 献

- [1] 刘昊,虞钢,何秀丽,等. 送粉式激光熔覆中瞬态温度场与几何形貌的三维数值模拟[J]. 中国激光,2013,40(12):84-91.
- [2] 李泓历,傅广,任治好,等. 多光束激光选区熔化拼接区域熔池动力学行为数值模拟[J]. 表面技术,2023,52(11):406-418.
- [3] 高阳,佟百运,梁勇,等. 不锈钢基体 NiCrBSi/NiCrBSi(SiC-Mo)合金层的激光熔敷[J]. 清华大学学报(自然科学版),2003(6):754-757.
- [4] ASTM C633-13, Standard Test Method for Adhesion or Cohesive Strength of Thermal Spray Coatings[S]. ASTM International, 2021.
- [5] 王志坚,董世运,徐滨士,等. 激光熔覆层局部形状不均匀现象及控制方法[C]//中国机械工程学会表面工程分会. 第八届全国表面工程学术会议暨第三届青年表面工程学术论坛论文集(二),2010:53-56.