

EA1N车轴激光熔覆工艺研究与应用

姚猛¹, 孙强¹, 张占东¹, 赵文渊², 李彦周³

1. 山西大同大学机电工程学院 山西大同 037038

2. 中车大同电力机车有限公司 山西大同 037001

3. 河北机电职业技术学院 河北邢台 054000

摘要: 在车轴服役过程中, 车轴的损坏主要包括装配过程中对内壁产生的摩擦微动损伤、经泥沙等冲刷腐蚀后不断损伤剥落、运行过程中承载的旋转弯曲载荷疲劳损伤, 以及检修推卸过程车轴的表面拉伤等, 这些损坏会导致车轴因表面失效而报废。针对这些问题, 选用中车研究院自行研制的CRRC-SP-13合金钢粉末对损伤的EA1N车轴进行激光熔覆处理, 并制定了详细的激光熔覆工艺, 分别从熔覆前、熔覆过程和熔覆后处理对车轴修复过程进行严格管控。结果表明: 车轴经激光熔覆工艺处理后效果良好, 无气孔、夹渣等新缺陷产生, 成功完成了EA1N车轴激光熔覆工艺研究, 对于延长车轴使用寿命、降低车轴报废率具有重大的现实意义。

关键词: EA1N车轴; 再制造; 激光熔覆; 合金钢粉末

Research and application of laser cladding process for EA1N axle

YAO Meng¹, SUN Qiang¹, ZHANG Zhandong¹, ZHAO Wenyan², LI Yanzhou³

1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Shanxi Datong University, Datong 037001, Shanxi, China

2. CRRC Datong Co., Ltd., Datong 037001, Shanxi, China

3. Hebei Institute of Mechanical and Electrical Technology, Xingtai 054000, Hebei, China

Abstract: During the service life of the axle, the damage of the axle mainly includes frictional micro-wear damage to the inner wall caused by assembly, continuous damage and peeling caused by erosion and corrosion by sand and other impurities, fatigue damage caused by rotational bending load during operation, and surface scratches caused by pushing and unloading during maintenance. This will cause the axle to fail due to surface failure. To address these issues, CRRC Research Institute selected its self-developed CRRC-SP-13 alloy steel powder to perform laser cladding treatment on the damaged EA1N axle, and formulated a detailed laser cladding process plan, strictly controlling the axle repair process from before cladding, during cladding, and after cladding. The results show that the axle has good effects after laser cladding treatment, without the generation of new defects such as pores and slag. The research on laser cladding process of EA1N axle has been successfully completed, which has significant practical significance for extending the service life of the axle and reducing the axle scrapping rate.

Keywords: EA1N axle; remanufacturing; laser cladding; alloy steel powder

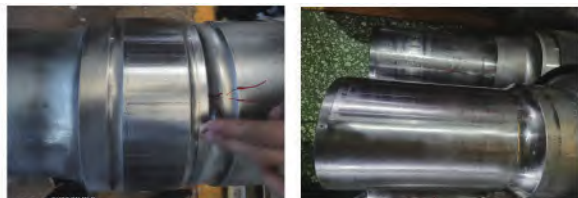
基金项目: 2022年度山西省基础 Research 计划(自由探索类): 面向液压支架作业过程的乳化液泵新型流量调控原理及其智能稳压供液方法研究(202303021211325)。

第一作者: 姚猛, 硕士研究生, 主要从事机械自动化研究, E-mail: 18734903196@163.com。

1 序言

目前,随着国内轨道交通行业的蓬勃发展,轨道交通装备已基本实现了自主化与规模化生产。然而,轨道交通行业如何实现绿色、低碳发展是社会给所有轨道交通装备行业工作者提出的一个新命题。绿色、低碳发展是国家构建绿色制造体系、走生态文明建设的发展道路、实现“碳达峰”“碳中和”的必然要求,而“再制造修复技术”是实现资源循环利用最为有效的途径之一。“再制造修复技术”可以拉长产品的全寿命周期链条(制造、使用、报废、再制造、再使用、再报废),延长产品的使用寿命,提高产品技术性能和附加值,还可以为产品的设计、改造和维修提供信息,最终以最低的成本、最少的资源消耗完成产品的全寿命周期,最大限度地挖掘产品的潜在价值,具有极高的经济效益和社会效益^[1-5]。故此,亟需在轨道交通行业开展相关研究工作,尽快实现“再制造修复技术”在轨道交通装备制造行业的深入应用。

车轴作为轨道交通车辆的关键零部件之一,在其生产过程中需要消耗大量的人力及财力。又由于车轴的性能对整车的安全有着重大影响,所以对车轴的各项参数有着极为严苛的要求,但车轴在安装及退卸过程中,难免会造成磕碰、拉伤等问题,这使得车轴报废量常年居高不下,从而造成极大的经济损失。图1所示为车轴表面拉伤实物。此时,若将“再制造修复技术”应用到车轴的修复上,便可以极大地降低车轴报废率。而其中,激光熔覆技术便是“再制造修复技术”的典型应用。



a) 轴承座拉伤实物

b) 轴颈拉伤实物

图1 车轴表面拉伤实物

国外在车轴激光熔覆补修工艺方面的研究起步较早。2013年,SOODI等^[6]对缺口车轴试样分别采用商用420不锈钢和17CrMoV5粉末进行熔覆补修,通过旋转弯曲疲劳试验证实CRMov5粉末修复效果更好,但是补修过程中产生的气孔等新缺陷导致其试验结果分散性变大。

在国内轨道交通行业领域,中车旗下多个子公司,如中车青岛四方机车车辆股份有限公司、中车戚墅堰机车有限公司、中车石家庄车辆有限公司等企业均已开展了再制造技术应用的研究工作。齐先胜等^[7]提出了激光熔覆修复EA4T车轴的可行性。2020年,侯有忠等^[8]以CRH380A/AL动车组EA4T车轴钢为基体、NiCrMo合金为增材材料,采用选区激光熔覆工艺方法进行补修和工艺评定,结果表明,激光熔覆效果良好。

目前,鉴于国内外对EA1N车轴激光熔覆工艺的研究还不够完善,加之EA1N车轴每年的报废量巨大,故本文开展对EA1N车轴激光熔覆工艺研究,旨在延长EA1N车轴的使用寿命,降低其报废率。

2 激光增材修复技术特点与优势

江吉彬等^[9]对激光熔覆的送粉工作原理进行了阐述,根据粉末喷射头和激光工作头的集成情况,将送粉方式分为同轴送粉方式和侧向送粉方式。车轴激光增材修复应采用同轴送粉方式,图2和图3所

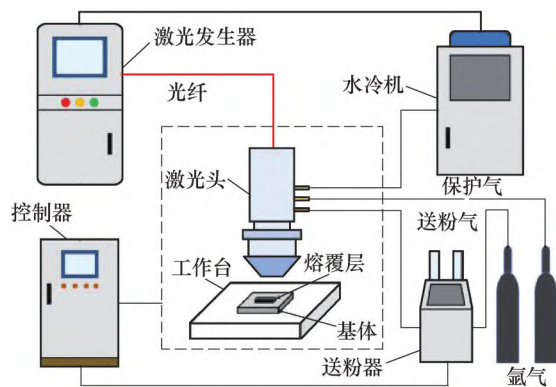


图2 激光增材系统构成

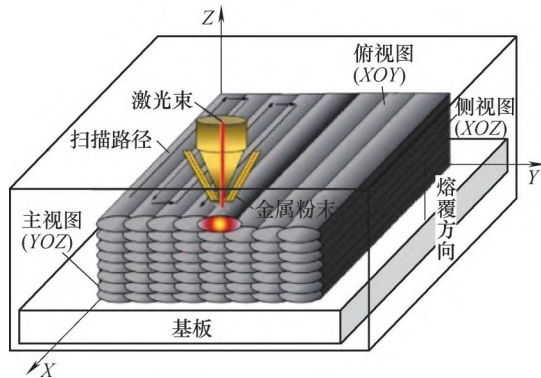


图3 激光增材修复成形示意

示分别为激光增材系统构成和激光增材修复成形示意。

目前,主流的修复技术有激光增材修复技术、焊接修复技术和热喷涂修复技术。激光增材修复技术与焊接修复技术、热喷涂修复技术相比,具有以下优势^[10]。

(1) 能量密度高 激光束具有能量密度高的特点,热输入少,热影响区小,即对基体热影响较小。因能量密度高,受热时间短,所以使得修复层与基体的残余应力较小。

(2) 修复层强度高 修复层致密度高,修复层与基体之间为冶金结合,稀释率低,结合强度高,可以用来修复重载条件下的零部件。

(3) 修复柔性高 能够实现工件表面大厚度、大面积激光熔覆,满足不同尺寸、形状轴类件表面修复要求,可实现缺损零件选定区域的“近净成形”再制造,后续加工余量小。

3 工艺方案

本文以技术提升HXD2型电力机车车轴为例验证,EA1N车轴合金钢的具体化学成分和主要性能要求分别见表1和表2。

表1 EA1N车轴合金钢化学成分及含量(质量分数)(%)

C	Mn	Si	P	S
0.34	0.10	0.31	0.005	0.015
Cr	Ni	Cu	V	Fe
0.11	0.01	0.005	0.005	余量

表2 EA1N车轴合金钢主要力学性能技术要求

抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	断后伸长率 (%)	冲击吸收能量 A_{KU} /J	冲击吸收能量 (-20℃) A_{KV} /J
550~650	≥ 320	≥ 22	≥ 30	≥ 17

针对EA1N车轴激光熔覆问题,通过选用中车研究院自行研制的CRRC-SP-13合金钢粉末进行EA1N车轴激光熔覆,分别从熔覆前、熔覆过程和熔覆后处理3个方面进行把控,具体车轴激光熔覆工艺流程如图4所示。

3.1 熔覆前准备

(1) 粉末处理 依据前期的试验成果,针对EA1N车轴合金钢的成分和性能要求,选用粉末粒径为53~150 μm 的合金钢粉末进行激光熔覆作业。

熔覆前需利用80目粉筛(孔径约为178 μm)对粉末进行筛粉处理,保证粉末中无杂质和团聚粉末,并在真空干燥箱中以80℃烘干30min。

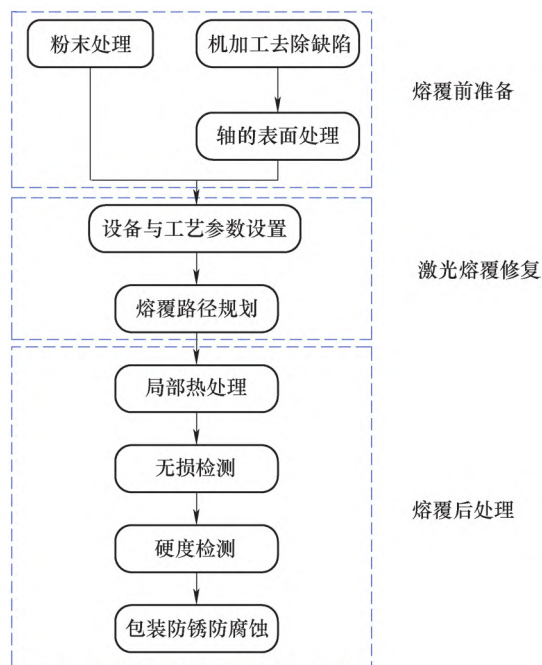


图4 车轴激光熔覆工艺流程

(2) 机械加工去除缺陷 为去除车轴轮座位置表面缺陷,需对该位置进行机械加工处理。机械加工操作需满足以下几个原则。

1) 基于前期的调查和统计结果,机械加工总切削深度应 $\geq 95\%$ 的缺陷深度。

2) 对于单个零件,机械加工后保证车轴轮座处无缺陷。

3) 尽管每个车轴的缺陷形貌各不相同,但单一型号的所有车轴应共用一套机械加工程序。

依据以上原则,选择将车轴整个轮座面均匀车削,并将直径减小2mm,对机械加工表面粗糙度不做具体要求。

(3) 车轴表面处理 由于机械加工后的车轴表面存在切削液、防锈油等污染物,因此为确保激光熔覆表面修复质量,需对车轴进行除锈和除油处理。首先目视检测车轴待修复位置,使用角磨机打磨去除生锈部位,同时确保打磨过程中不要在表面造成过深或边缘陡峭的打磨痕迹,不要损伤不修复部位。打磨完成后测量待修复部位直径,并使用酒精对整个待修复表面进行清洗,完全去除残留油渍、污渍。清洗完成后应避免再次接触待修复表

面,以免造成二次污染。

3.2 激光熔覆修复

(1) 激光熔覆设备与工艺参数 基于前期积累数据和车轴材料特征,使用验证过的激光熔覆工艺

参数进行车轴表面缺陷激光熔覆修复工作。需要指出的是,考虑到不同硬件之间的差别,该工艺参数仅限于激光增材修复专用试验平台使用,具体设备与工艺参数见表3。

表3 车轴激光熔覆设备及工艺参数

激光器	激光光斑 / mm	焦距 / mm	激光功率 / W	扫描速度 / (mm/min)	送粉量 / (g/min)	搭接率 (%)	送粉气流量 / (L/min)	保护气体流量 / (L/min)
Laserline LDF6000	$\phi 2.8$	正离焦1	1800	500~600	8~14	40~50	3~5	15~20

(2) 激光熔覆路径规划 鉴于车轴待修复位置为简单圆柱面(见图5红色部分),使用手动编程方式进行激光熔覆路径的规划,具体的顺序如下。

1) 从车轴修复区边缘开始熔覆,采用单条螺旋线的常规熔覆策略。

2) 待修复到红色区域内侧边缘后再额外熔覆1~2圈,确保无遗漏区域。

3) 红色部分熔覆完成后对转轴最外侧边缘和键槽两侧边缘进行边缘熔覆,此时可适当倾斜熔覆头,以确保机械加工时无缺肉。

4) 单层熔覆完成后利用角磨机对整个熔覆层进行打磨,均匀去除表面不平整部位,使表面完全恢复金属光泽,打磨深度约为0.3mm。

5) 打磨完成后重复进行前面4个步骤,直至熔覆2层结束,此时应确保熔覆后直径至少大于原直径2mm,熔覆第2层时应确保上下层熔覆轨迹错层堆叠。

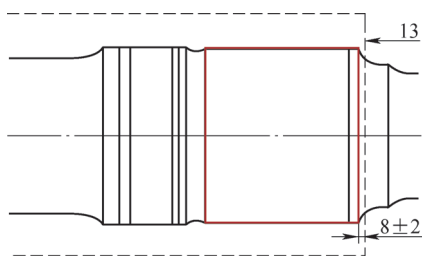


图5 车轴熔覆位置示意

3.3 熔覆后处理

(1) 局部热处理 在激光增材修复完成后,对车轴进行局部热处理。考虑到现场维修的应用场景需求,在确保热输入对基材的热损伤尽量小的前提下,选择利用定制加热套在空气环境下进行热处理。加热温度为500~550℃,保温时间2~3h,加热

和冷却过程中使用隔热棉对加热部位进行包裹,以提高加热速度和降低冷却速度。升温过程中使用热像仪进行温度监控,确保加热温度准确。

(2) 熔覆修复部位无损检测 为保证熔覆层修复质量,依照GB/T 18851.1—2012《无损检测 渗透检测 第1部分:总则》规定,使用荧光渗透剂和黑光灯进行修复部位无损检测。无损检测后使用清水洗去渗透剂,并迅速烘干零件防止锈蚀发生。

(3) 熔覆修复部位硬度检测 利用角磨机轻微打磨熔覆层表面,形成约至少1cm²光亮平面,使用超声硬度计对熔覆组织硬度进行检测并备案。

(4) 包装防锈防腐蚀 修复后的车轴包装前清洗干净,做好标记,并做防锈、防腐蚀处理,用结实不透水的中性塑料袋包装并密封。

4 试验验证

以技术提升HXD2型电力机车车轴为例,通过制备1组成品试验车轴,按照上述车轴激光熔覆工艺流程进行车轴激光熔覆前准备工作,完成粉末处理、轮座机械加工去除缺陷、车轴进行除锈和除油处理等工作;然后确定设备与工艺参数、规划激光熔覆路径,图6所示为车轴激光熔覆现场。在车轴激光熔覆完成后,对车轴进行局部热处理、熔覆修复部位无损检测、熔覆修复部位硬度检测,结果表明,激光熔覆效果良好,补修后无气孔、夹渣等新缺陷产生。

目前,已经完成激光熔覆车轴加工、残余应力检测、无损检测和轮对压装试验,结果均满足相应的标准要求,图7和图8所示分别为激光熔覆后车轴实物和轮对压装试验,对激光熔覆再制造车轴性能进行验证具有一定作用,可以有效避免修复车轴在投入使用后造成重大安全事故。

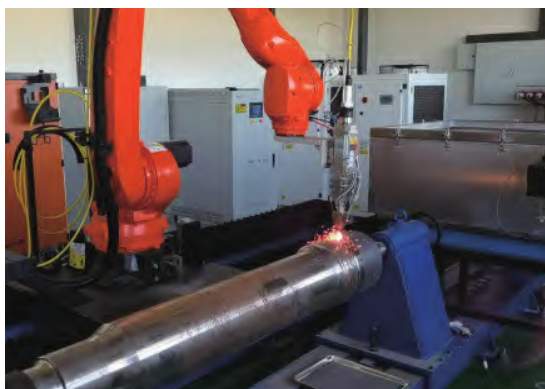


图6 车轴激光熔覆过程现场

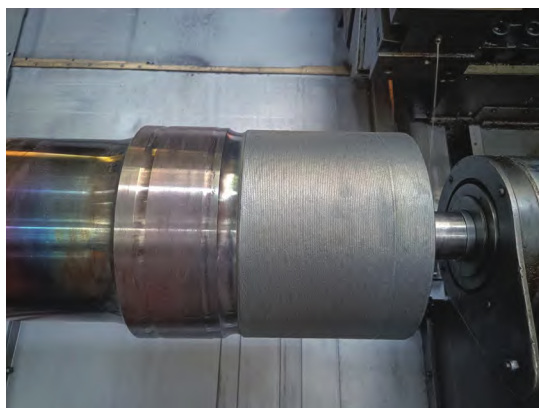


图7 激光熔覆后车轴实物



图8 轮对压装试验

5 结束语

本文针对车轴激光熔覆工艺方法不完善, 缺少EA1N车轴激光熔覆工艺研究等问题, 通过选用中车研究院自行研制的CRRC-SP-13合金钢粉末进行EA1N车轴激光熔覆, 分别从熔覆前、熔覆过程和熔覆后处理3个方面进行把控, 结果表明, 车轴激光熔覆效果很好, 补修后无气孔、夹渣等新缺陷产

生, 成功完成EA1N车轴激光熔覆工艺研究。目前正在进行车轴修复工程化应用验证。本次试验结果也为后续车轴修复工艺的开发提供了理论基础。

参考文献:

- [1] 祝弘滨, 刘昱. 金属3D打印技术在轨道交通装备领域的应用研究现状[J]. 现代城市轨道交通, 2019 (10): 77-81.
- [2] 李九一, 李刚卿, 孙晓光, 等. 金属增材制造技术在轨道客车领域的研究进展[J]. 高速铁路新材料, 2022, 1 (4): 8-14.
- [3] 艾岳巍, 王亿元. 激光增材制造技术在轨道交通装备中的应用及发展趋势[J]. 金属加工 (热加工), 2023 (7): 1-11, 39.
- [4] CHEN W J, CHEN H, LI C C, et al. Microstructure and fatigue crack growth of EA4T steel in laser cladding remanufacturing[J]. Engineering Failure Analysis, 2017, 79: 120-129.
- [5] 肖雪峰, 齐先胜, 李硕, 等. 高速动车组车轴激光熔覆再制造填充粉末选型研究[J]. 金属加工 (热加工), 2020 (11): 38-42.
- [6] SOODI M. Investigation of laser deposited wear resistant coatings on railway axle steels[D]. Australia: RMIT University, 2013.
- [7] 齐先胜, 侯有忠, 牛富杰, 等. 高速动车组车轴的再制造可行性分析[J]. 电焊机, 2017, 47 (10): 8-15.
- [8] 侯有忠, 齐先胜, 邓鸿剑, 等. 动车组车轴增材再制造材料选择和性能评价[J]. 表面技术, 2020, 49 (12): 162-169, 219.
- [9] 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 (1): 27-36, 46.
- [10] SHIM D S, LEE H, SON Y, et al. Effects of pre- and post-repair heat treatments on micro-structure and tensile behaviors of 630 stainless steel repaired by metal additive manufacturing[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 13: 980-999.

MW 20241015