

铁路货车轮辐板孔裂纹激光再制造

陈常义, 陈 江

(沈阳大陆激光技术有限公司, 沈阳 110136)

摘 要: 铁路货车轮在辐板孔处产生疲劳裂纹, 影响安全运行。文中利用激光熔覆技术, 采用镍基合金在车轮辐板辗钢 CL60 试样表面进行激光再制造试验研究, 评价激光再制造试件的组织和性能。结果表明, 熔覆层无裂纹、夹杂和气孔等缺陷, 与基体形成了良好冶金结合, 熔覆层组织是铸态的奥氏体组织, 主要由弥散的共晶和亚共晶组成。激光再制造试件力学性能优于车轮基体材料, 延伸率提高 90 %, 冲击韧性提高 2~3 倍, 熔覆层的显微硬度提高近 50 %, 疲劳强度提高 2.2 倍。该工艺用于生产实践, 经十万公里试运行考核验证, 激光再制造后的车轮满足铁路货运的要求。

关键词: 货车车轮; 辐板孔; 裂纹; 激光; 再制造

中图分类号: TG174.44; TH17

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2011)02-0092-05

Remanufacturing Railway Wheels with Web Plate Hole by Laser Cladding Cracks

CHEN Chang-yi, CHEN Jiang

(Dalu Laser Technology Co., Ltd., Shenyang 110136)

Abstract: The Railway wheel generated fatigue cracks at the wheel web plate holes, which would arouse safe servicing problem. In order to remanufacture the wheels with web plate hole cracks, laser cladding technique was employed to fabricate nickel-based alloy coatings on steel CL60 from which the railway wheels were made. Microstructure and properties of the laser clad samples were analysed. The results showed that the cladding layer was free of cracks, inclusions, pores and other defects, and metallurgically bonded with the substrate material. The clad microstructure was cast austenite, mainly composed of eutectic and hypoeutectic phases. Mechanical performance of the laser clad samples was better than the wheel steel CL60. Its elongation was 90 % higher than the wheel base, impact toughness increased by 2 to 3 times, microhardness of clad increased by about 50 %, fatigue strength increased by 2.2 times. The process has applied to production practices, test running by the hundred thousand kilometers verificated the laser remanufactured wheels could meet requirements of rail freight.

Key words: truck wheel; web plate hole; crack; laser; remanufacturing

0 引 言

激光熔覆技术是金属材料表面强化和改性、表面缺陷修复的有效方法之一。利用激光技术实现工业产品再制造和延寿, 是实现循环经济发展的重要途径。许多发达国家已经在众多领域开展了颇具规模的激光再制造工程应用^[1]。我国近年来也在石化、电力、冶金、军工等领域广泛开展了激光再制造技术探索和实践^[2-4], 但对铁路车辆关键零部件的激光再制造技术研究应用还刚刚起步。我国幅员辽阔, 铁路货物运输量大、车辆多, 相应的需要再制造的货车关键零部件批量大。经过六次铁路大提

速, 全行业正向高速重载方向发展, 不可避免地出现零部件的局部磨损、裂纹等失效形式^[5]。由于更新条件的限制, 迫切需要对众多失效零部件加以再制造, 恢复继续使用。近十几年来, 激光熔覆和激光表面强化技术的深入研究和不断探索发展, 以及在其它行业积累的成功再制造的经验, 为在铁路行业开展激光再制造工程研究打下了坚实的基础。文中结合铁路货车轮辐板孔裂纹的激光修复实践, 探讨研究铁路车辆关键零部件的再制造问题。

1 货车车轮辐板孔裂纹产生机理分析

1.1 货车轮材质

货车轮由国产辗钢 CL60 制造, 化学成分见表 1。

收稿日期: 2011-02-24; 收稿日期: 2011-03-02

作者简介: 陈常义(1956—), 男(汉), 辽宁沈阳人, 高级工程师。

表 1 CL60 辗钢的化学成分 (质量分数/%)
Table 1 Chemical composition of CL60 steel (w/%)

元素	C	Si	Mn	Cr	Ni	
含量	0.51~0.56	0.15~0.40	0.65~0.80	0.15~0.25	≤0.25	
元素	Cu	Al	V	S	P	Fe
含量	≤0.25	≤0.04	0.08~0.15	≤0.015	≤0.02	余量

1.2 失效形式

原设计制造的货车车轮辐板上有两个 $\Phi 45\text{ mm}$ 的吊装孔(见图 1)，沿孔的圆周方向两边均有不同程度的微裂纹(见图 2)，长度和深度分别为 15~40 mm 和 5~12 mm。



图 1 货车车轮辐板孔
Fig.1 Truck wheel web plate hole

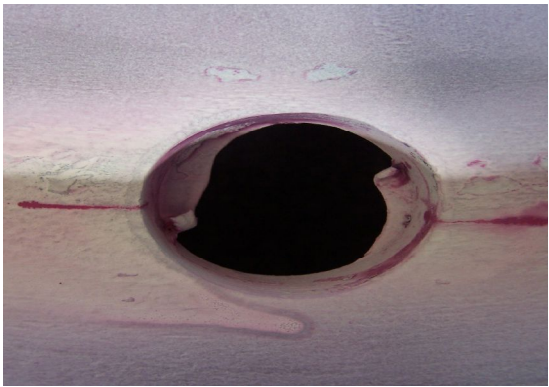


图 2 辐板孔微裂纹
Fig.2 Cracks around the web plate hole

1.3 失效原因

由于设计的原因，早期货车车轮辐板上有两个对称的吊装孔。铁道部科学研究院利用有限元分析方法，对车轮进行了应力分析^[6,7]。结果表明车轮在正常工况条件下运转，辐板孔裂纹位置的机械应力值均为负值，且最大应力较小，不会直接导致辐板

孔裂纹的萌生；但在制动工况下，内侧裂纹区域会产生较大的稳态热拉应力，该力与机械应力叠加造成制动后产生多次高拉应力值的疲劳应力，这是导致辐板孔裂纹萌生与扩展的最主要载荷条件。而机械载荷与制动载荷的叠加是辐板孔发生裂纹并扩展的充要条件，严重的将导致发生“崩轮”现象^[8,9]。

2 镍基合金粉末激光熔覆试验

在辗钢车轮上采取激光熔覆技术进行修复裂纹，实现激光再制造，选择熔覆粉末材料至关重要。通常考虑粉末自身的特性外，还要考虑熔覆材料与基材线膨胀系数和熔点等热物理参数的匹配^[10,11]。在熔覆试验中，选择具有自主知识产权的 DLF-镍基合金粉末作为激光熔覆材料，其主要化学成分如表 2 所示。该粉末材料熔点较低，熔覆成形性能好，其激光熔覆层合金具有优良的耐蚀耐热性能，优越的抗氧化性能，良好的韧性和耐冲击性能，较高的力学性能和耐疲劳性能。

表 2 DLF-镍基合金粉末化学成分 (质量分数/%)
Table 2 Chemical composition of the DLF-nickel-based alloy powder (w/%)

元 素	C	Mn	Si	Cr	Mo
含 量	0.01	0.5	0.3	20~24	8~12
元 素	W	Al	Ti	Ni	
含 量	6~10	1.2~3.0	1.0~2.8	余 量	

试验中所用基材为货车车轮辐板上经线切割、机加等方式获取的带裂纹的辗钢平板。先用特制铣刀铣出一个梯形槽，将裂纹彻底去除，同时形成适宜激光熔覆需要的坡口。经无损探伤确认裂纹彻底去除后，用丙酮将欲熔覆区域清洗干净。熔覆试验中聚焦光束从底到上沿垂直梯形槽走向逐层扫描，同时自动送粉机直接将金属粉末吹送到熔池中。

激光熔覆试验采用 DL-HL-5000 横流连续波 CO₂ 激光器，多模输出，最大功率为 5 000 W。同时，配备气动送粉器，工作台为三维自由移动数控加工机，精度 $\pm 0.2\text{ mm}$ 。激光熔覆主要工艺参数是：激光输出功率 3.5~4.2 kW，光斑直径 3~5 mm，扫描速度 5~8 mm/s，离焦量 260~340 mm，送粉率 0.6~1.2 g/s，单层厚度 0.5~1.2 mm，搭接率 30 %。

熔覆后将多余的覆层材料打磨平整，恢复辐板

孔正常尺寸状态。采用渗透探伤、磁粉探伤及超声波探伤的方法检测修复区域是否存在裂纹、夹杂和气孔等缺陷。通过线切割和铣磨等机加手段按标准制备各种试样，金相和显微硬度试样打磨抛光后用5 %硝酸酒精溶液腐蚀，进行金相组织观察和显微硬度测量。

2.1 熔覆层显微组织

在熔覆过程中，添加的熔覆金属粉全部熔解，

熔覆层和基体形成了良好的冶金结合。辐板基材与熔覆层间结合紧密，无裂纹、杂质及孔洞等缺陷。采用光学显微镜观察车轮辐板基材材料和激光熔覆层。图3所示为车轮辐板基体的正常组织，是典型的珠光体+铁素体组织；图4所示为激光熔覆层组织，主要为弥散的共晶和亚共晶组织，是铸态的奥氏体组织；图5所示为激光熔覆层/基体过渡区的组织，为球化珠光体和铁素体；图6所示是基体热影响区组织，为片状珠光体和铁素体。

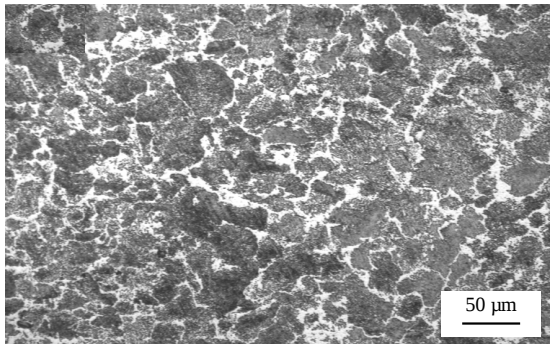


图3 基体材料组织
Fig.3 Microstructure of the substrate

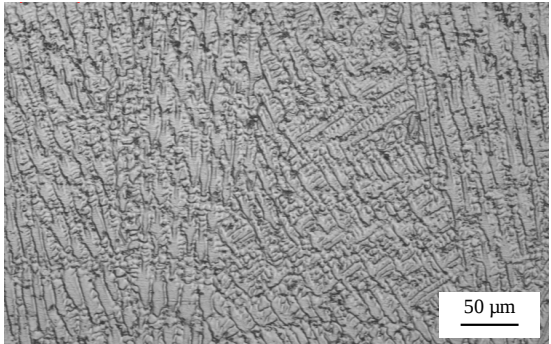


图4 激光熔覆层
Fig.4 Microstructure of the laser clad

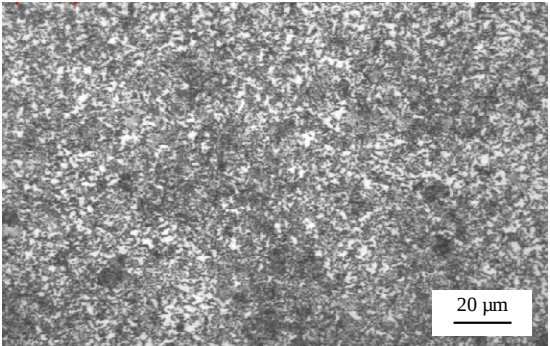


图5 激光熔覆过渡区显微组织
Fig.5 Microstructure of the transition zone

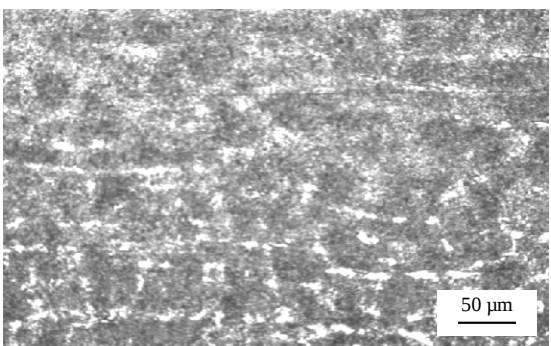


图6 激光熔覆热影响区显微组织
Fig.6 Microstructure of the HAZ

2.2 显微硬度

采用显微硬度计，从激光熔覆层表面向基材，测定激光熔覆试样的显微硬度，测试载荷为200 g，持载时间为15 s。测试结果如表3所示，由测试结果可以看出，其显微硬度分布特征很明显地分为3段：熔覆层、过渡区和基体热影响区、基体。第1段从熔覆层表面到基体界面，厚度约为3.2 mm，平均硬度304 HV_{0.2}，是熔覆层材料的硬度；第2段是结合界面和基体热影响区（过渡区），厚度约为0.3 mm，平均硬度235 HV_{0.2}；第3段为基体的硬度，平均值为201 HV_{0.2}。从硬度分布可见，过渡区向基

材的硬度过渡相对较平缓，熔覆层的硬度较基材提高近50 %。

表3 熔覆试样显微硬度 HV_{0.2} 测试结果
Table 3 Microhardness HV_{0.2} of the laser cladding sample

测试区域	显微硬度/ HV _{0.2}			
熔覆层	308	303	304	300
过渡区和基体热影响区	239	236	231	234
基 体	198	203	201	202

2.3 力学性能

在辐板基材上经线切割切出一圆弧槽，再用选定的镍基粉末熔覆填满，后按平板拉伸样件的标准

制备“50 %基材+50 %熔覆材料”和“100 %熔覆材料”的拉伸样件。在 AG-250KNE 型拉伸试验机上进行室温拉伸，加载速率 5 N/min。测试结果见表 4。

表 4 激光熔覆试样和车轮辐板材料的力学性能

Table 4 Mechanical properties of the laser cladding samples and substrate material

试 样 材 料	抗拉强度 / MPa	屈服强度 / MPa	延伸率 / %
车轮辐板基材	895、890、890	625、633、641	14.2、13.3、13.5
基材+50 %熔覆材料	912、924、947	714、668、683	22.3、23.4、22.8
100 %熔覆材料	957、966、1049	745、759、820	24.8、28.8、23.9

由表 4 测试结果可以看出，50 %和 100 %熔覆材料的抗拉强度、屈服强度均高于辐板基材，表明选定的镍基熔覆材料具有足够的拉伸强度和结合强度；同时，激光熔覆试样具有较高的延伸率，100 %熔覆材料的延伸率比车轮辐板基材提高约 90 %。由此可见，采用激光熔覆 DLF-镍基合金修复车轮辐板裂纹，在实现零件强度提高的同时不降低材料塑性。

2.4 冲击韧性

由于货车车轮在运转中要经常抵御制动造成的冲击力，因此修复后的车轮辐板对冲击性能有特

殊的要求，即其整体冲击韧性不能降低。

按照冲击功测试要求，制备 10 mm×10 mm×55 mm 的标准冲击试样，并在试样上开设 U 型缺口。U 型缺口的开设位置分为两种，一是平行于涂层表面而完全在涂层侧，二是垂直于试样表面开设在试样侧面。在 JB60 型冲击试验机上进行常温 and 低温(−60 ℃)冲击韧性测试，测试结果见表 5。

将纯基材和 50 %镍基涂层试样的冲击功进行比较，由表 5 可见，带涂层的样件无论缺口开在哪侧，冲击功均高于纯基材，比纯基体冲击韧性提高 1 倍左右。表 5 测试结果表明，车轮辐板激光熔覆镍基材料后，其冲击韧性显著提升。

表 5 试样的冲击韧性

Table 5 Impact toughness of the samples

冲击功试样	室温冲击功 AkU / J		−60 ℃低温冲击功 AkU / J	
	U 缺口在涂层	U 缺口在侧面	U 缺口在涂层	U 缺口在侧面
车轮辐板基材				8、6、8
基材+50 %涂层	68、59、56	34、27、32	23、22、23	14、18、17
100 %涂层	89、87、92	49、56、54		

2.5 疲劳性能

车轮辐板在运转中所承载的机械载荷与制动载荷应力的重复叠加，要求辐板经激光修复后具有较高的耐疲劳性能。除熔覆材料自身应有较高的疲劳性能外，修复辐板孔裂纹后形成的复合材料也应有较高的疲劳性能。

按照板状疲劳试样标准，分别制备车轮辐板纯基材和半基材半熔覆材料的标准板状疲劳试样。在 Schenck PC160M 疲劳试验机上进行常温拉压疲劳试验，加载幅值 280 Mpa，加载频率 30 Hz。试验测试结果见表 6。由表 6 可见，激光熔覆层可以显著提升车轮基体 CL60 钢的抗疲劳性能，纯熔覆层

试样的疲劳强度约为基体 CL60 钢的 2~3 倍。

表 6 试样的疲劳性能测试结果

Table 6 Fatigue performance of the samples

试 样 材 料	循 环 次 数 / (×10 ⁵)		
车轮基材	3.78	3.10	2.91
50 %基材+50 %镍基熔覆层	5.94	4.63	5.87
100 % 镍基熔覆层	10.5	10.8	10.6

3 运行考验

综合以上测试结果，可以发现，激光熔覆再制造出现疲劳裂纹的车轮辐板，可以显著提升其综合性能，不会降低车轮服役安全性。

根据试验结果,采用 DLF-镍基合金粉末,实际激光熔覆再制造了一批失效的货车车轮。经无损探伤和超声波探伤检测,试修的一批货车轮全部合格,已投放国内某专用线装车运转。经过半年多时间,运行十万公里以上的跟踪检测,运行状态良好,修复部位未发现异常,探伤检测未见缺陷,达到了实际运转的要求。这说明,激光熔覆是火车车轮再制造的一项先进技术,将具有广阔应用前景。

4 结 论

(1) 车轮辐板 CL60 钢表面激光熔覆 DLF-镍基合金粉末形成了组织致密、冶金结合的熔覆层,熔覆层组织为铸态的共晶和亚共晶奥氏体组织。

(2) 性能测试表明,激光熔覆 DLF-镍基合金层的硬度、抗拉强度、延伸率、冲击韧性、疲劳强度等力学性能指标均优于车轮辐板 CL60 钢,也就是说,激光熔覆再制造修复车轮辐板裂纹,可以显著提升其综合性能,为车轮辐板孔裂纹的绿色再制造打下了可靠的技术基础。

(3) 采用激光熔覆技术成功实现了铁路货车车轮辐板孔裂纹的再制造修复,实际运行考核表明,达到了实际运转的质量要求,可以批量对失效铁路货车车轮进行激光再制造。

参考文献:

- [1] 徐滨士,等. 21 世纪的再制造工程 [J]. 中国机械工程, 2000, (1-2): 36-39.
- [2] 邓树森. 我国激光加工技术的发展近况 [J]. 激光与红外, 1994, 5: 21-24.
- [3] Dong Shi-yun, Xu Bin-shi, Wang Zhi-jian, et al. Laser remanufacturing technology and its applications [J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2008, 6825.
- [4] 王茂才,张杰. 高温合金叶片粉末冶金修复再制造 [J]. 中国表面工程, 2010, 23(2): 80-86.
- [5] 田威,等. 基于绿色再制造的火车车钩裂纹激光修复和表面强化 [J]. 应用激光, 2008, (2): 103-107.
- [6] 付秀琴,张斌. DF11 机车整体辗钢车轮辐板孔螺纹工艺孔裂纹的失效分析 [J]. 铁道技术监督, 2001, 5: 22-25.
- [7] 习年生,刘敬辉. 840D 车轮辐板孔疲劳失效及裂纹容限研究 [J]. 失效分析与预防, 2010, 1: 48-52.

- [8] 郑红霞,谢基龙. $\Phi 840D$ 货车车轮辐板孔疲劳裂纹扩展特性研究 [J]. 铁道学报, 2006, 3: 27-31.
- [9] 陈雷. 840D 货车车轮辐板孔疲劳裂纹研究 [J]. 北京交通大学学报, 2007, 1: 1-7.
- [10] 关振中. 激光加工工艺手册 [M]. 北京:中国计量出版社, 1998. 255-265.
- [11] 郭文渊,王东生,王茂才. 镍基超合金的 Nd-YAG 激光熔覆涂层行为研究 [J]. 应用激光, 2002, 22(2): 101-104.

作者地址: 辽宁省沈阳市沈北新区

110136

道义经济开发区沈北路 29 号

Tel: (024) 89737208 转 8086

E-mail: ccycyy@163.com

• 本刊讯 •

《再制造与先进制造的融合及其相关技术》已出版

先进制造技术的“先进性”是摒弃浪费资源、污染环境的传统制造之路,迈向绿色制造发展的新路。再制造是绿色制造的重要组成部分,在国家可持续发展战略和大力发展循环经济政策指导下,再制造工程已成为发展循环经济、构建节约型社会的重要组成部分。先进制造技术与再制造之间是相互牵引、相互促进的。到目前为止,国内还没有一步综合论述先进制造和再制造关系的专著。

由装甲兵工程学院田欣利教授编著的《再制造与先进制造的融合及其相关技术》已于 2010 年 10 月正式出版。全书在概要总结近年来再制造与先进制造关系及其发展基础上,较全面地介绍了二者的融合理念和相互关联的技术。全书共分六章。主要介绍了再制造与先进制造的融合基础及其关系的发展趋势、基于资源与环境的制造/再制造的行为评价、制造与再制造的互补性技术、先进制造与再制造的共性技术、融合先进制造理念的再制造生产与物流,以及先进制造与再制造的发展等内容。

该书既可供再制造和机械制造专业的研究人员和工程技术人员参考,又可作为相关专业的研究生、本科生的选修或参考教材。现已由国防工业出版社出版,定价 52 元。

(刘晓亭 供稿)