

文章编号: 1006—2106(2010)07—0034—04

U71Mn钢轨表面激光熔覆 Fe基合金组织与性能研究^{*}

杨胶溪 刘华东^{**}

(北京工业大学, 北京 100124)

摘要: 研究目的: 随着列车运行速度的大幅提高, 对钢轨的耐磨性能及滚动接触疲劳性能提出了更高的要求。为提高钢轨的耐用性, 本文利用激光宽带熔覆技术对 U71Mn钢轨表面进行强化, 采用同步送粉方式进行自熔性 Fe基粉末的激光熔覆, 目的是获得厚度 1 mm左右无裂纹、气孔等缺陷, 且与钢轨冶金结合的高性能激光熔覆层。

研究结论: 通过测试分析和试验结果表明, 在 CO₂ 激光功率 4 200 W、扫描速度为 300 mm/min、送粉速率 18 g/min等工艺条件下, 可获得厚度 1 mm的优质涂层, 其显微硬度平均值可达 HV780, 高于熔合区及基体的硬度, 在过渡区处存在硬度拐点, 但经静载抗压实验看出, 涂层在 453 kN静载荷下无开裂现象。激光熔覆涂层的组织主要由 γ -Fe、Cr₁₉Fe₇Ni₁₁、NiCrFe 和 FeCr 等物相组成, 但是在熔合区靠近基体处有马氏体组织形成, 是由于激光快速加热及快速冷却造成的。

关键词: 激光熔覆; 钢轨; 铁基合金; 组织与性能

中图分类号: TG665 TG174.4 TG155.5 **文献标识码:** A

Research on the Microstructure and Properties of Laser Cladding Fe—base Alloy on U71Mn Rail Surface

YANG Jiao—xi LIU Hua—dong

(Beijing University of Technology Beijing 100124 China)

Abstract: Research purposes: With much increase of train running speed, the higher properties of wear—resistance and rolling contact fatigue—resistance are required to the rail. For increasing service life of the rail, the surface of U71Mn rail was strengthened by wide—band laser cladding technique. In order to obtain high—performance about 1 mm thick coating free of cracks and pores that metallurgically bonded with the rail matrix, the cladding process was conducted by CO₂ laser with direct injection of the Fe—based powder into the molten pool.

Research conclusions: The results of experiments and analysis showed that high quality cladding coating with the thickness of about 1 mm can be obtained under the conditions of laser power being 4 200 watts, scanning speed being 300 mm/min and powder feeding velocity being 18 g/min etc. The coating had a higher hardness value of HV780 than that of the substrate material, but there existed a hardness knee point between the coating and the substrate. The laser cladding coating did not appear cracks under the static load of 453 kN. The organs of the Fe—based coating were mainly composed of γ -Fe, Cr₁₉Fe₇Ni₁₁, NiCrFe and FeCr etc. The martensite structure was formed in the fusion area adjacent to the substrate because of the rapid heating and rapid cooling.

Key words: laser cladding; rail surface; Fe—based alloy; microstructure and property

^{*} 收稿日期: 2009—08—13

基金项目: 北京市 09 科技创新平台 (1010005366901); 北京市自然科学基金 (3092008); 北京市教委科研计划 (KM200910005022)

^{**} 作者简介: 杨胶溪, 1971 年出生, 男, 副研究员; 刘华东, 1984 年出生, 男, 硕士研究生。

列车运行时, 钢轨需要承受列车的压力、摩擦和冲击载荷, 要求有足够的强度、硬度及韧性, 材料质量要求较高。随着列车运行速度的提高, 对钢轨的性能提出了更高的要求, 特别是对钢轨的磨损性能及滚动接触疲劳性能。起始于钢轨表面的疲劳损伤可引起钢轨的失效^[1-3]。欧盟于 2000 年 4 月开展了“基础之星 (InfraStar)”项目研究, 目的在于提高钢轨的耐用性、使用寿命及降低运行噪声^[6-7]。具体是通过在钢轨轨头施加表面涂层制造所谓的 InfraStar 双材料钢轨, 降低滚动接触疲劳和在中小曲线半径轨道处的噪声。在 InfraStar 项目中, 激光熔覆技术用于既有的铁路线上和新钢轨的制造过程, 该技术由瑞典的 Duroc 钢轨公司开发, 并通过了实验室和实地轨道检测^[8-9]。

关于在钢轨表面施加涂层是一难度较高的技术, 不仅要求涂层应无任何裂纹、气孔等缺陷, 而且涂层与钢轨基体应具有优良的冶金结合, 在承受反复的滚动压力之下不能有开裂、剥落等现象。激光熔覆是一先进的制造技术^[10-12], 可大幅度提高工件的使用性能, 并能实现涂层与基体材料的冶金结合, 与常规表面处理技术相比有很大的优越性。本文将在 U₇₁Mn 钢轨

表面激光熔覆 Fe 基合金层, 研究涂层的组织与性能, 探索在钢轨上进行大面积熔覆的工艺问题, 在所具备的有限实验条件之下研究激光熔覆技术在钢轨强化方面的可行性与可靠性。

1 实验材料及方法

试验用基体材料为 U₇₁Mn 重轨, 其材质如表 1 所示。激光熔覆材料为 Fe 基合金粉末, 其化学成分如表 2 所示。试验用设备为 Trumpf6000 高功率快速轴流 CO₂ 激光器。激光器聚焦特征参数值为 $K_f=8.67\text{ mm}\cdot\text{mrad}$, 输出激光束的模式为 TEM₀₁ 模。其光束经过焦距为 270 mm 的积分镜整形, 将圆形的激光束展宽后得到近似矩形的光束。光束的 X 截面尺寸为 8.0 mm, Y 截面尺寸为 2.4 mm。激光熔覆时采用同步送粉方式, 送粉喷嘴为相应尺寸的矩形^[13]。用 LEO-1450 型扫描电镜进行形貌观察, 德国布卢克 D8 型 X 射线衍射仪进行物相分析, HXD-1000 型显微硬度计进行硬度测试, WE-600 力学性能试验机进行涂层的静态加载抗压试验。

表 1 U₇₁Mn 钢轨材质

元素	碳 C	硅 Si	锰 Mn	硫 S	磷 P	铁 Fe
重量百分比	0.65~0.77	0.15~0.35	1.10~1.50	≤0.040	≤0.040	余量

表 2 Fe 基合金粉末化学成分

元素	碳 C	铬 Cr	镍 Ni	硼 B	硅 Si	铁 Fe
重量百分比	0.2~0.3	12.0~13.0	8.0~9.0	0.8~0.9	0.9~1.1	余量

2 实验结果与分析

2.1 钢轨表面激光熔覆工艺及涂层裂纹检验

激光熔覆所用钢轨的长度均为 30 m, 在激光熔覆之前, 将钢轨表面进行打磨除锈, 获得洁净的金属表面。激光熔覆的工艺参数是: 激光熔覆功率 4 200 W, 激光扫描速度为 300 mm/min, 激光束离焦量为 70 mm, 熔覆表面由多条单个熔覆轨迹搭接而成, 搭接率为 50%, 在不同的送粉速率 (18 g/min, 24 g/min, 31 g/min) 条件下获得不同的熔覆层厚度 (1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm), 编号分别为 1[#]、2[#]、3[#], 激光熔覆钢轨表面具有较高的平整度, 如图 1 所示。在 3 件样品中, 1[#]没有裂纹, 2[#]和 3[#]都有裂纹, 为了更加清晰的表征裂纹的长度和走向, 采用渗透探伤法检验, 所用探伤剂为 DIP-3 型着色渗透探伤剂, 由图 2 可以看出, 2[#]和 3[#]都有不同数量的裂纹, 2[#]样品中有 4 条裂纹, 3[#]样品中有 12 条裂纹, 裂纹的长度一般在 20~40 mm 之间, 与激光熔覆纹路大体呈 45°角, 裂纹多起始于钢轨

边缘。由此可见, 在大面积激光熔覆时, 裂纹对涂层厚度是很敏感的, 厚度越高裂纹数量越多, 在厚度 1 mm 左右可以获得无裂纹的激光熔覆层。

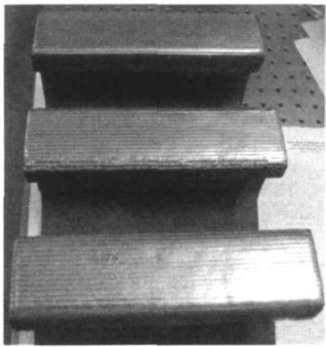


图 1 激光熔覆钢轨表面 (由上及下分别为 1[#]、2[#]、3[#])

2.2 激光熔覆层界面组织形貌

采用线切割的方式, 在 1[#]钢轨端部横向截面上中间位置进行取样, 并制备金相试样。试样经过抛光后用 5% 硝酸酒精腐蚀, 并使用扫描电子显微镜 (SEM

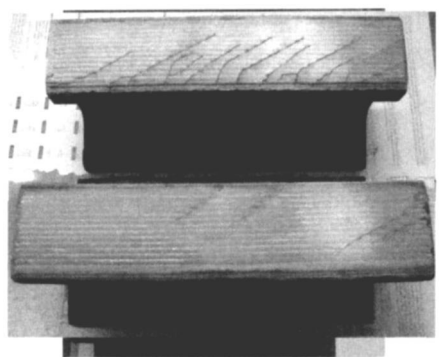


图 2 钢轨表面裂纹显示(下 2[#]、上 3[#])

LEO1450)进行熔覆层形貌观察。由图 3(a)可以看出激光熔覆层与基体界面为冶金结合,涂层熔合区为厚度 5 μm左右的平面晶,然后向外是柱状晶组织,为典型的快速凝固形貌。图 3(b)是靠近熔覆层外部等轴状的共晶组织,整个激光熔覆层无气孔、裂纹等缺陷。但是熔合区靠近基体处出现马氏体组织,如图 3(c)所示。马氏体的形成主要是因为 U₇₁Mn重轨属于一种高碳合金钢,具有良好的淬火倾向,特别是在激光快速加热、快速冷却的条件下满足了马氏体形成的条件,基体组织受热区域产生了马氏体相变。

2.3 激光熔覆层物相分析

采用 D8型 X射线衍射仪对熔覆层进行物相分析,取 2θ范围 20°~100°,步长:0.02°。为制备适于 X射线衍射检测的试样,将金相试样熔覆层表面打磨成平面。激光熔覆层的 XRD谱线如图 4所示。激光熔覆涂层的组织主要由 γ-Fe、Cr_{0.19}Fe_{0.7}Ni_{0.11}、NiCrFe₂C 等物相组成。由于 B、S等固溶强化元素会在铁基合金中形成一定量的硼化物、硅化物等强化相,但由于 B、S元素含量较少,其形成的物相没有在 XRD图谱中显示出来。

2.4 激光熔覆层截面硬度分布

为考察涂层截面及过渡区的硬度变化规律,对激光熔覆层进行硬度测试。用 HXD-1000型显微硬度计测试硬度,沿垂直于熔覆层方向间隔 50 μm进行多点测试,载荷 100 g,加载时间为 15 s。测得的数据如图 5所示。由硬度的分布曲线可以看出,激光熔覆层的平均硬度达到 HV780,明显高于钢轨基体影响区的平均硬度 HV520。钢轨表面硬度的提高,将会显著延长钢轨的使用寿命。但是在激光熔覆层与基体的熔合区存在硬度拐点,其硬度数值为 HV450。此区域硬度拐点的形成是由于两侧的合金元素发生扩散,产生了相对于钢轨基体碳的贫化和相对于涂层合金元素的弱化,形成了不同于熔覆层和基体组织结构的过渡区,因此硬度相对较低。硬度拐点的存在从受力角度来看,

对缓解激光熔覆应力是有利的,但是对涂层的抗压强度以及疲劳强度是否会造成不利影响,需要有进一步的实验验证。

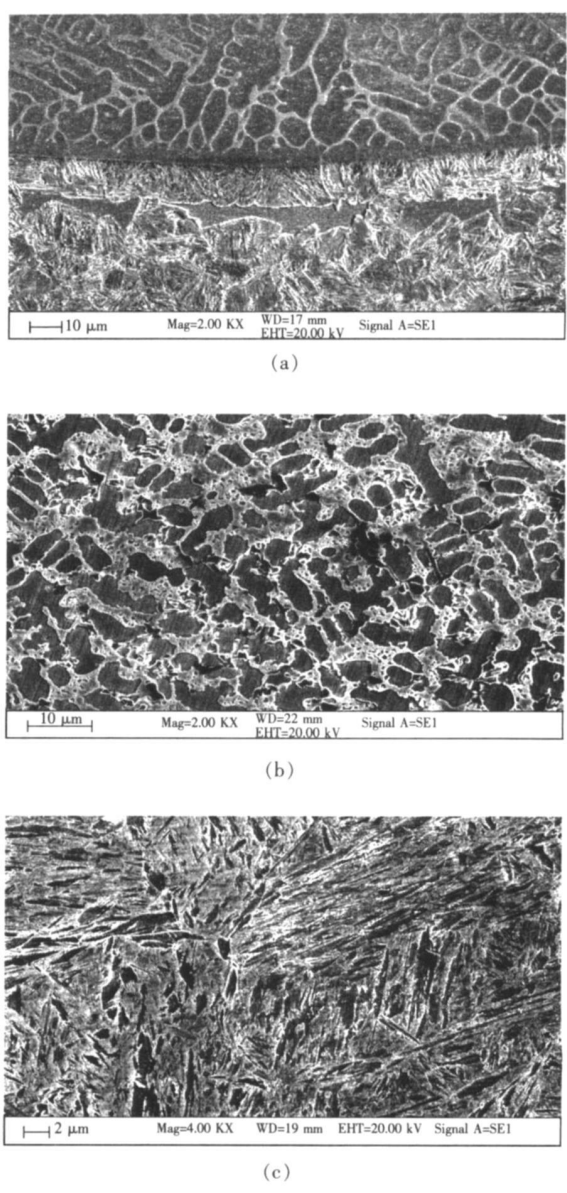


图 3 激光熔覆层截面 SEM形貌

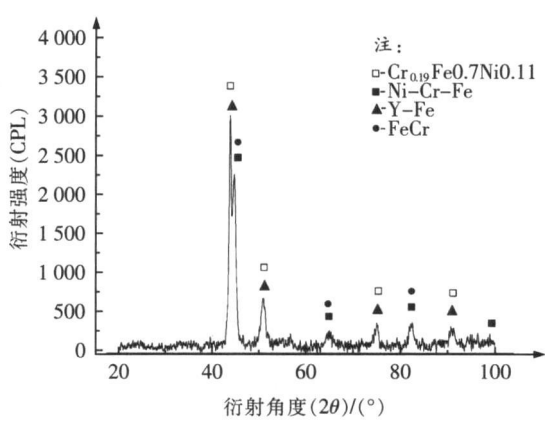


图 4 激光熔覆层 X射线衍射图谱

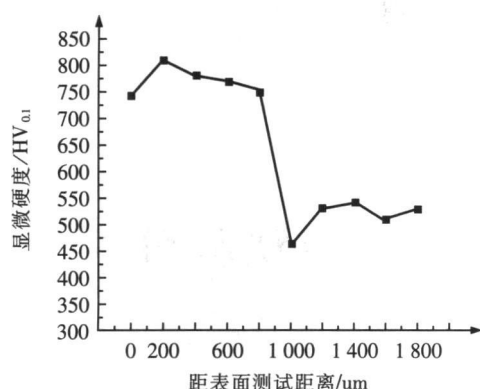


图 5 激光熔覆层的硬度分布曲线

2.5 激光熔覆层抗压实验

为考察激光熔覆层与钢轨基体的结合力以及涂层的抗压能力,采用 WE-600 力学性能试验机进行涂层的静态加载抗压试验。实验中模拟机车车轮对钢轨表面进行加载,钢轨面接触的圆弧面半径为 450 mm,宽度 90 mm,大于轨道头部宽度,压块材料为调制状态的 45 钢,圆弧面使用线切割方式加工而成。另外将钢轨表面的激光熔覆纹路打磨平整,以使钢轨与压块圆弧面有良好的接触,如图 6 所示。由实验结果可知,当载荷加载到 453 kN 时,涂层仍无开裂现象发生,说明涂层可以承受很大的压力,硬度拐点的存在对钢轨的抗压没有造成明显的影响。从力学性能试验设备安全的角度,没有使用更大的载荷进行实验。由实验数据可知,熔覆层可以承受很大的静载荷而不开裂,这并不能充分说明激光熔覆钢轨在使用时承受动载荷而不出现问题,激光熔覆 Fe 基涂层的抗疲劳性能需要在一定条件下模拟验证。目前,该工作已完成滚动摩擦的初步实验设计,今后将开展动载荷滚动疲劳实验。



图 6 钢轨涂层抗压试验

3 结论

(1) 钢轨表面激光熔覆铁基合金的工艺采用 CO_2 激光功率 4 200 W 扫描速度为 300 mm/min 激光束离焦量为 70 mm 搭接率为 50%,送粉速率 18 g/min 时,

可以得到涂层厚度为 1 mm 且无裂纹、气孔等缺陷的激光熔覆层;

(2) 激光熔覆铁基合金涂层的组织主要由 γ -Fe, $\text{Cr}_{19}\text{Fe}_7\text{Ni}_{11}$, NiCrFe , FeC 等物相组成,且在熔合区靠近基体处出现马氏体组织。

(3) 激光熔覆层的平均硬度达到 HV780 明显高于钢轨基体影响区的平均硬度 HV520 但是在激光熔覆层与基体的熔合区存在硬度拐点,其硬度数值为 HV450。

(4) 涂层静载荷达到 453 kN 时,涂层仍无开裂现象发生,说明涂层可以承受极高的静载荷,但激光熔覆层疲劳性能等动载荷实验需要进一步研究。

参考文献:

- [1] J A Polonsky, T P Chang, L M Keer. An analysis of the effect of hard coating on near-surface rolling contact fatigue initiation induced by surface roughness [J]. *Wear*, 1997 (1-2): 204-219.
- [2] Makoto Akama, Tadao Mori. Boundary element analysis of surface initiated rolling contact fatigue cracks in wheel/rail contact systems [J]. *Wear*, 2002 (1-2): 35-41.
- [3] A Saubert, S Descartes, D Desmyter, D Levy, Y Berthier. A tribological characterization of the "damage mechanism" of low rail corrugation on sharp curved track [J]. *Wear*, 2006 (9-10): 984-995.
- [4] A Saubert, S Descartes and Y Berthier. Sharp curved track corrugation: From corrugation observed on-site to corrugation reproduced on simulator [J]. *Tribology International*, 2009 (11-12): 1691-1705.
- [5] 胡家杰, 王文健, 钟雯, 等. 弯矩作用下钢轨疲劳裂纹扩展行为研究 [J]. *铁道工程学报*, 2008 (9): 26-29.
Hu Jiajie, Wang Wenjian, Zhong Wen, etc. Research on the Growth of Fatigue Crack of Rail Steel under Moment of Flexure Condition [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2008 (9): 26-29.
- [6] Jonas W. Ringsberg, Anders Skvtebo, B Lennart Josefson. Investigation of the rolling contact fatigue resistance of laser clad twin-disc specimens: FE simulation of laser cladding, grinding and a twin-disc test [J]. *International Journal of Fatigue*, 2005 (6): 702-714.
- [7] F J Frank, G - J Weeda, A Kapoor, E J M. Hirsch. Rolling contact fatigue and wear behaviour of the infrastructural material rail [J]. *Wear*, 2005 (7-8): 1048-1054.

(下转第 51 页)

- Wang Guichun, Pan JiaYing. Analysis of Vehicle — Bridge Coupled Vibration due to Track Irregularities [J]. Journal of Railway Engineering Society **2006**(**8**): **30—33**
- [5] 辛学忠, 郭向荣. 大跨度铁路桥梁刚度统一描述方法探讨 [J]. 铁道工程学报, 2007(**1**): 82—86
Xin Xuezhong, Guo Xiangrong. Exploration on Unified Describing Method for Rigidity of Large-span Railway Bridge [J]. Journal of Railway Engineering Society **2007**(**1**): **82—86**
- [6] 曾庆元, 杨平. 形成矩阵的“对号入座”法则与桁段空间分析的桁段有限元法 [J]. 铁道学报, 1986(**2**): 48—59
Zeng Qingyuan, Yang Ping. The “Set-in-Right-Position” Rule for Formulating Dynamic System Matrix and the Finite Element Method of Truss Section for Spatial Analysis of Truss Girder [J]. Journal of the China Railway Society **1996**(**2**): **48—59**
- [7] 陈锐林, 曾庆元. 横风对列车通过曲线限制速度的数值研究 [J]. 铁道学报, 2009(**1**): 40—45
Chen Ruilin, Zeng Qingyuan. Numerical Study on the Limit Speed when a Train Negotiates Curved Rails under Side Wind [J]. Journal of the China Railway Society **2009**(**1**): **40—45**
- [8] 周峰, 危韧勇, 李志勇. 一种基于小波神经网络的车辆构架人工蛇形波重构方法研究 [J]. 铁道学报, 2009(**3**): 50—53
Zhou Feng, Wei Renyong, Li Zhiyong. Research on Rebuilding Artificial Craw Waves of Vehicle Frames by Wavelet Neural Networks [J]. Journal of the China Railway Society **2009**(**3**): **50—53**
- [9] 罗浩, 郭向荣. 大跨度提篮拱桥车桥耦合振动分析 [J]. 振动与冲击, 2008(**2**): 147—149
Luo Hao, Guo Xiangrong. Coupled Vibration Analysis between a Long-span x-style Arch Bridge and a Train [J]. Journal of Vibration and Shock **2008**(**2**): **147—149**
- [10] 杨仕若. 拱桁组合体系桥横向刚度分析 [J]. 中南林学院学报, 2006(**3**): 94—97.
Yang Shiruo. Lateral Rigidity Analysis of Bridge Composed of Arch and Truss Structural System [J]. Journal of Central South Forestry University **2006**(**3**): **94—97**

(上接第 37 页)

- [8] Martin Hensch, Per-Olof Larsson, Olof Nilsson, Didier Levy. Two-material rail development: field test results regarding rolling contact fatigue and squeal noise behavior [J]. Wear **2005**(**7—8**): **964—972**
- [9] Jonas W. Ringsberg, Francis J. Franklin, B Lennart Josefson. Fatigue evaluation of surface coated railway rails using shakedown theory, finite element calculations and lab and field trials [J]. International Journal of Fatigue **2005**(**6**): **680—694**
- [10] M. Hazra, A. K. Mondal, S. Kumar, C. Bławert. Laser surface cladding of MR I 153M magnesium alloy with (Al + Al₂O₃) [J]. Surface & Coatings Technology **2009**(**16**): **2292—2299**
- [11] Guojian Xu, Munaharu Kutsuna, Zhongjie Liu. Characteristic behaviours of clad layer by a multi-layer laser cladding with powder mixture of Stellite-6 and tungsten carbide [J]. Surface & Coatings Technology **2006**(**6**): **3385—3392**
- [12] John C. Betts. The direct laser deposition of AISI 316 stainless steel and Cr₃C₂ powder [J]. Journal of Materials Processing Technology **2009**(**11**): **5229—5238**
- [13] 杨胶溪, 闫婷, 王喜兵, 等. 激光宽带熔覆碳化钨/钴基合金的组织与性能 [J]. 金属热处理, 2007(**11**): 26—29
Yang Jiaoxi, Yan Ting, Wang Xibing, etc. Microstructure and Properties of Laser Wide-strip Clad WC/Co-Base Alloy [J]. Heat Treatment of Metals **2007**(**11**): **26—29**