

DOI: 10.11973/jxgccl230599

不同温度和湿度下激光熔覆 304L 不锈钢局部修复 车轮的摩擦磨损性能

叶榕伟¹, 王欣纪², 邹 港², 徐逸勋², 何成刚^{2,3}, 李尚桂², 刘吉华^{2,3}(五邑大学 1. 机械与自动化工程学院, 2. 轨道交通学院, 江门 529020; 3. 江门市轨道交通智能运维与
应急管理重点实验室, 江门 529020)

摘 要: 采用激光熔覆 304 不锈钢对 CL60 钢车轮试样进行局部修复, 研究了不同温度和相对湿度条件(25℃, 60%; 50℃, 60%; 50℃, 90%)下修复车轮试样的摩擦磨损性能。结果表明: 温度越高, 稳定摩擦因数越小, 在温度 50℃ 下相对湿度对稳定摩擦因数几乎无影响; 温度越高或相对湿度越小, 局部修复车轮的磨损质量损失和裂纹长度角度越大, 耐磨性能越差。在温度 25℃、相对湿度 60% 条件下, 车轮表面熔覆层与基体结合区靠近基体一侧存在大块材料剥落和小角度多层裂纹, 裂纹向材料内部扩展, 损伤较严重; 相对湿度保持 60% 不变、温度提高至 50℃, 熔覆层损伤程度减轻, 结合区出现明显的分界线且无明显裂纹; 温度升高至 50℃、相对湿度增加至 90%, 熔覆层内无明显损伤, 结合区有少量剥落坑, 依然存在明显分界。

关键词: 车轮; U75 钢轨; 激光熔覆修复; 温度; 湿度; 磨损性能**中图分类号:** U266.2**文献标志码:** A**文章编号:** 1000-3738(2025)01-0089-08

0 引 言

随着我国高速铁路的快速发展、列车运行速度的不断提高以及铁路客货运量的不断增长, 轮轨间因摩擦磨损造成的损伤日益突出, 特别是在高速和重载线路上, 这种情况尤为严重。轮轨损伤主要表现为车轮踏面擦伤、剥离和轮缘磨损以及钢轨轨顶剥离、擦伤、压溃和侧磨等^[1-2]。轮轨损伤会受到湿度变化的影响^[3], 水分子以各种形式附着在钢轨表面, 作为接触面间的“第三介质”或与磨屑混合形成润滑剂^[4], 影响着轮轨间的摩擦磨损行为。ZHU 等^[5]在不同湿度下对轮轨试样进行摩擦磨损试验, 结果表明在相对干燥(相对湿度低于 55%)的条件下, 摩擦因数对湿度敏感。OLOFSSON 等^[6]研究发现, 随着相对湿度从 40% 增加至 95%, 轮轨试样的摩擦因数从 0.65 降低到 0.40 以下。轮轨损伤也会受到温度变化的影响。MA 等^[7]研究了轮轨材料在不同温度

条件下(-30, 20, 50℃)的摩擦磨损和滚动接触疲劳性能, 发现相比在室温下, 低温和高温下的磨损、塑性变形和次表面损伤更严重。HE 等^[8]研究发现: 随着高温高湿环境中温度和湿度的变化, U71Mn 钢轨试样的摩擦因数与塑性变形层变化趋势相似; 磨损量受温度与湿度影响较大。HE 等^[9]还研究了环境温度和湿度对 CL60 车轮钢黏着损伤行为的影响, 发现车轮表面氧化程度随温度的升高而增大, 黏附性随着湿度的增加而显著降低。

近年来, 海内外许多学者把激光熔覆技术用于轮轨损伤修复和表面强化处理, 成功延长了轮轨使用寿命, 提高了其抗磨损能力^[10-16]。激光熔覆是一种工艺灵活、效率高的表面处理技术, 能够直接对表面受损零部件进行局部修复^[10]。ZHU 等^[15]采用 316L、410 和 420 不锈钢粉末对车轮表面进行局部激光熔覆, 结果表明, 激光熔覆区具有较低的磨损率, 且磨损率随熔覆层硬度的增加而降低。丁昊昊等^[16]使用氮基、铁基和钴基自熔性合金粉末在钢轨试样表面进行局部激光熔覆, 研究发现, 激光熔覆区磨损深度比车轮基体区小, 两区结合处损伤最严重, 裂纹角度和深度最大。

目前, 服役于东南沿海地区的铁路轮轨损伤情况尤为突出, 采用激光熔覆局部修复轮轨损伤有很

收稿日期: 2023-12-20; **修订日期:** 2024-11-11**基金项目:** 广东省教育厅特色创新项目(2023KTSCX151); 省级大学生创新创业训练计划项目(S202211349073); 五邑大学创新创业基金资助项目(2023CX13); 五邑大学高层次人才科研计划项目(AG2018001)**作者简介:** 叶榕伟(1974—), 男, 广东江门人, 实验师, 学士**通信作者:** 何成刚副教授

强的现实需求。然而,有关车轮和钢轨局部激光熔覆修复的研究较少。为此,作者在CL60钢车轮表面制备了304L不锈钢激光熔覆局部修复层,研究了局部修复车轮的显微组织、硬度和不同温湿度条件下的滚动摩擦磨损性能,旨在为激光熔覆技术应用于轮轨损伤修复提供理论指导。

1 试样制备与试验方法

1.1 试样制备

激光熔覆材料为304L不锈钢粉,颗粒为球形,粒径主要分布在15~55 μm ,如图1所示;其化学成分(质量分数/%)为0.50Si, 19.63Cr, 9.50Ni, 0.84Mn, 0.009C, 0.004S, 0.01P, 余Fe,符合GB/T

20878—2007要求。车轮和钢轨试样分别取自CL60钢车轮踏面和U75V钢轨轨头,形状和尺寸见图2。对车轮试样进行激光熔覆局部修复模拟,如图3所示:采用线切割切除侧面深度为6 mm的部分,超声波清洗后采用MD250型磨床将试样熔覆面表面粗糙度控制在40 μm 以内,采用EOS-M100型金属成型设备通过预置粉末法将干燥后的304L不锈钢粉末局部熔覆在切割表面,将车轮试样修复为原形状,激光功率为110 W,扫描速度为750 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$,光斑直径为40 μm ,铺粉厚度为0.02 mm,保护气(高纯氩气)流量为2.5 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ [17]。将局部修复车轮和未处理钢轨试样进行车、铣、磨机加工,使其表面粗糙度为0.2 μm 。

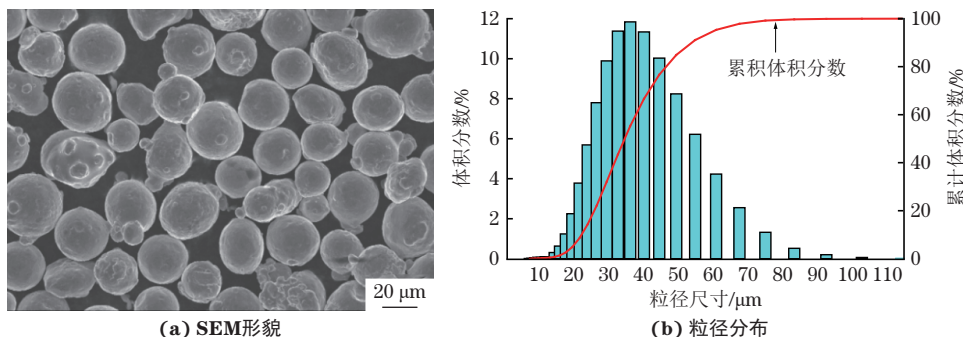


图 1 304L 不锈钢粉的 SEM 形貌和粒径分布

Fig. 1 SEM morphology (a) and particle size distribution (b) of 304L stainless steel powder

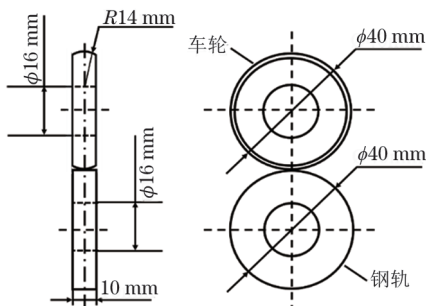


图 2 车轮和钢轨试样尺寸

Fig. 2 Size of wheel and rail samples

1.2 试验方法

采用自制温湿控制系统模拟轮轨不同温度和湿度的运行环境,该控制系统通过温度和湿度传感器以及比例积分微分(PID)控制,可以使轮轨试样所处腔体内的温度和湿度保持相对稳定,温度控制范围为20~60 $^{\circ}\text{C}$ (控制精度为 $\pm 2^{\circ}\text{C}$),相对湿度控制范围为40%~95%(控制精度为 $\pm 5\%$)。在MMS-2A型摩擦磨损试验机上进行滚动摩擦磨损试验,摩擦副为钢轨试样与车轮试样,采用点接触,根据Hertz

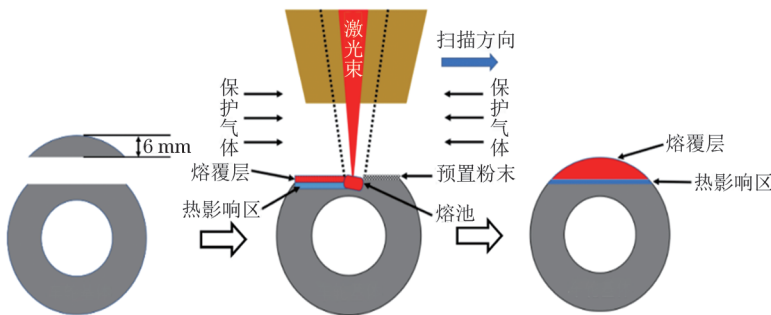


图 3 车轮试样激光熔覆局部修复模拟示意

Fig. 3 Partial repair of wheel sample by laser cladding

接触理论^[18],施加法向载荷110 N,对应的最大接触应力为1 300 MPa,以模拟现场21 t轴重,转速为 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,滑差率为10%,循环次数为 $1 \times 10^5 \text{ r}$ 。根据统计得到的上海、宁波、厦门和湛江过去两年的月平均相对湿度(不低于60%,大多数在80%左右)和月平均温度(不超过30 ℃),同时考虑暴露在室外的轮轨表面温度是空气温度的1.5倍以上^[19],设置3组温度和相对湿度条件,分别为25 ℃, 60%; 50 ℃, 60%; 50 ℃, 90%。

采用KQ3200E型超声波清洗机去除轮轨试样上附着的杂质,干燥后用电子天平称取质量,称5次取平均值。采用MVT-1000A型维氏硬度仪沿圆周方向测试钢轨试样、车轮试样基体和熔覆层区的表面硬度,载荷为4.9 N,保载时间为10 s。采用AM-4815ZT型便携式显微镜和ZEISS Sigma-500型扫描电子显微镜(SEM)观察微观形貌。沿试样滚动方向线切割制取尺寸为 $8 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 的试样,用树脂镶样,打磨后用 $0.3 \mu\text{m}$ 抛光膏抛至镜面,使用王水溶液刻蚀熔覆层,使用体积分数4%硝酸乙醇溶液刻蚀车轮基体部分,使用MR-51型光学显微镜(OM)和SEM观察剖面形貌。

2 试验结果与讨论

2.1 摩擦磨损行为

由图4可见,轮轨试样的摩擦磨损大致分为磨合和稳定两个阶段:在磨合阶段随着循环次数增加,温度50 ℃、相对湿度60%条件下的摩擦因数先增大后减小,另外两种条件下的摩擦因数逐渐增大;在稳定阶段,温度25 ℃、相对湿度60%条件下的摩擦因数最大,在0.7~0.8,温度升高至50 ℃后摩擦因数减小至0.3左右,在50 ℃下相对湿度变化对稳定摩擦因数几乎无影响。

由图5可见:在温度25 ℃,相对湿度60%条件

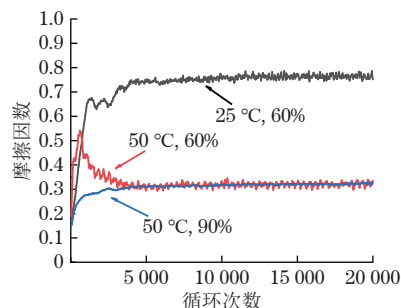


图4 不同温度和湿度条件下轮轨试样的摩擦因数随循环次数的变化曲线

Fig. 4 Changing curves of friction coefficient vs cycle number of wheel and rail samples under different temperature and humidity conditions

下,车轮试样的磨损质量损失远高于钢轨试样;当温度升高到50 ℃时,车轮试样和钢轨试样的磨损质量损失均大幅下降,且钢轨试样的磨损质量损失高于车轮试样;在温度50 ℃,相对湿度90%条件下,车轮和钢轨试样的磨损质量损失进一步下降。在温度50 ℃,湿度较高时车轮和钢轨的磨损质量损失均更小,这是因为高湿度气氛阻碍摩擦表面与氧气反应,促进水合反应^[20-23],在接触面凝结小水滴,阻止了车轮与钢轨之间的直接接触,进而减少了磨损。

由图6可见:在温度25 ℃、相对湿度60%条件下

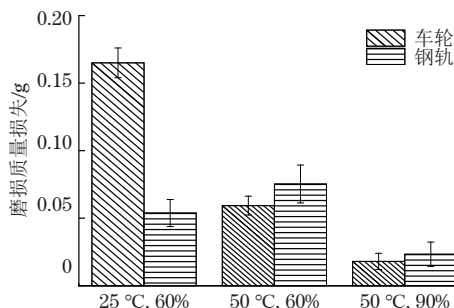


图5 不同温度和湿度条件下磨损轮轨试样的磨损质量损失

Fig. 5 Wear mass loss of worn wheel and rail samples under different temperature and humidity conditions

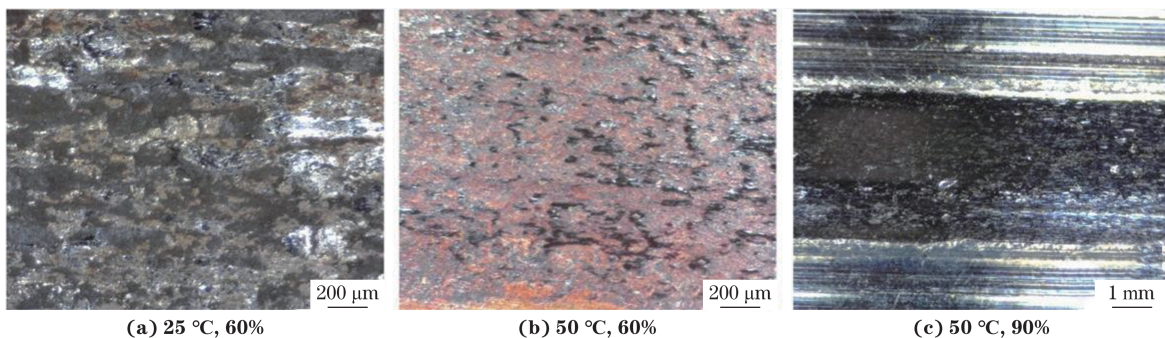


图6 不同温度和湿度条件下磨损后熔覆层表面形貌

Fig. 6 Surface morphology of cladding layer after wear under different temperature and humidity conditions

磨损,车轮熔覆层表面未形成氧化物;在温度50℃、相对湿度60%~90%条件下,车轮熔覆层表面形成氧化物^[20-21],温度的升高加速了接触表面氧化,这使得接触界面间摩擦剪切作用减弱,起到耐磨效果。

2.2 显微硬度与塑性变形量

由图7可见:滚动摩擦磨损试验后车轮基体、熔覆层和钢轨表面均发生了硬化;在相对湿度60%条件下,升高温度使得车轮基体和钢轨的硬度减小,但对熔覆层硬度无影响,熔覆层硬度基本稳定在430~450HV;在温度50℃下,增大相对湿度对车轮基体及其表面熔覆层硬度基本无影响,但明显降低了钢轨硬度。激光熔覆具有快速熔凝特性,熔覆层发生了固溶强化与细晶强化^[24],其硬度受温度和湿度影响较小;在高湿度环境下,滚动接触界面间水汽起到润滑作用。

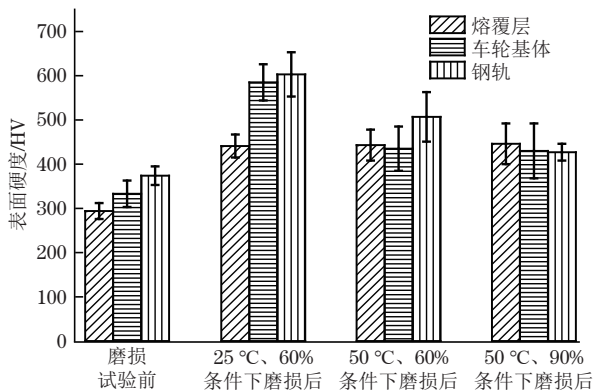


图7 不同温度和湿度条件下滚动摩擦磨损试验前后轮轨试样的表面硬度

Fig. 7 Surface hardness of wheel and rail samples before and after rolling friction wear test under different temperature and humidity condition

由表1可见:在温度25℃、相对湿度60%条件下,熔覆层的塑性变形层厚度比车轮基体和钢轨试样的大,这是材料的硬度差异所致;当温度升高至50℃后熔覆层和车轮基体的塑性变形层厚度减小,这是

表1 不同温度和湿度条件下磨损后轮轨试样的塑性变形层厚度

Table 1 Plastic deformation layer thickness of wheel and rail samples after wear under different temperature and humidity conditions

温度/℃	相对湿度/%	塑性变形层厚度/μm		
		熔覆层	车轮基体	钢轨
25	60	52	50	46
50	60	31	26	47
50	90	13	25	48

因为表面形成的氧化物降低了接触面间切向摩擦力,钢轨塑性变形层厚度基本未变;在温度50℃下,增大湿度后熔覆层塑性变形层厚度进一步减小,这是因为水汽起到润滑作用,钢轨和车轮基体的塑性变形层厚度未发生明显变化。综上:温度和湿度越大,熔覆层塑性变形层厚度越小;温度越高,车轮基体塑性变形层厚度越小但受湿度影响较小,钢轨塑性变形层厚度几乎不随温度和湿度变化。

2.3 磨损行为

由图8可见:在温度25℃、相对湿度60%条件下,熔覆层与车轮基体结合区表面明显起皮,靠近基体一侧存在大块材料剥落和裂纹;当相对湿度保持60%不变、温度提高至50℃时,基体与熔覆层的损伤程度减轻,结合区出现明显的分界线;当温度保持50℃不变、相对湿度增加至90%时,熔覆层表面无明显损伤,基体表面仅有少量剥落坑和磨屑,结合区表面有少量剥落坑,但依然有明显的分界。不同温度与湿度条件下,熔覆层表面磨损形貌均以材料剥落和疲劳裂纹为主,车轮基体表面存在连片的剥落坑和磨屑。车轮基体材料从表面剥离,存在于轮轨接触面间,引起了磨粒磨损。

由图9可见:在温度25℃、相对湿度60%条件下,熔覆层存在材料剥落和小角度多层裂纹萌生扩展现象,与基体结合区的裂纹在热影响区萌生并扩展至基体;保持湿度不变、温度升高至50℃时,熔覆层存在剥落坑和大角度短裂纹,裂纹有向基体内部扩展的趋势,结合区内无裂纹等损伤;在温度50℃下,相对湿度增加至90%,熔覆层损伤明显减轻,裂纹多为小角度短裂纹,结合区内无裂纹等损伤。激光熔覆急热急冷的特性导致熔覆层在外部拘束下极易产生内应力,温度较低时内应力无法及时释放,不断累积超过了材料强度就会导致裂纹的萌生与扩展^[25]。

由表2可知:当湿度一定时,温度越高,熔覆层和车轮基体中裂纹的平均长度、平均角度和最大角度越大,提高温度虽能提高耐磨损能力但降低了抗疲劳性,使得裂纹以大角度向材料内部生长;当温度一定时,相对湿度越大,熔覆层和车轮基体中裂纹的长度和角度均越小;在温度50℃,相对湿度60%,90%条件下结合区无明显裂纹。湿度的增加使得试样表面形成保护膜,起到润滑效果,从而减轻损伤。

3 结 论

(1) 在温度50℃、相对湿度60%条件下滚动摩

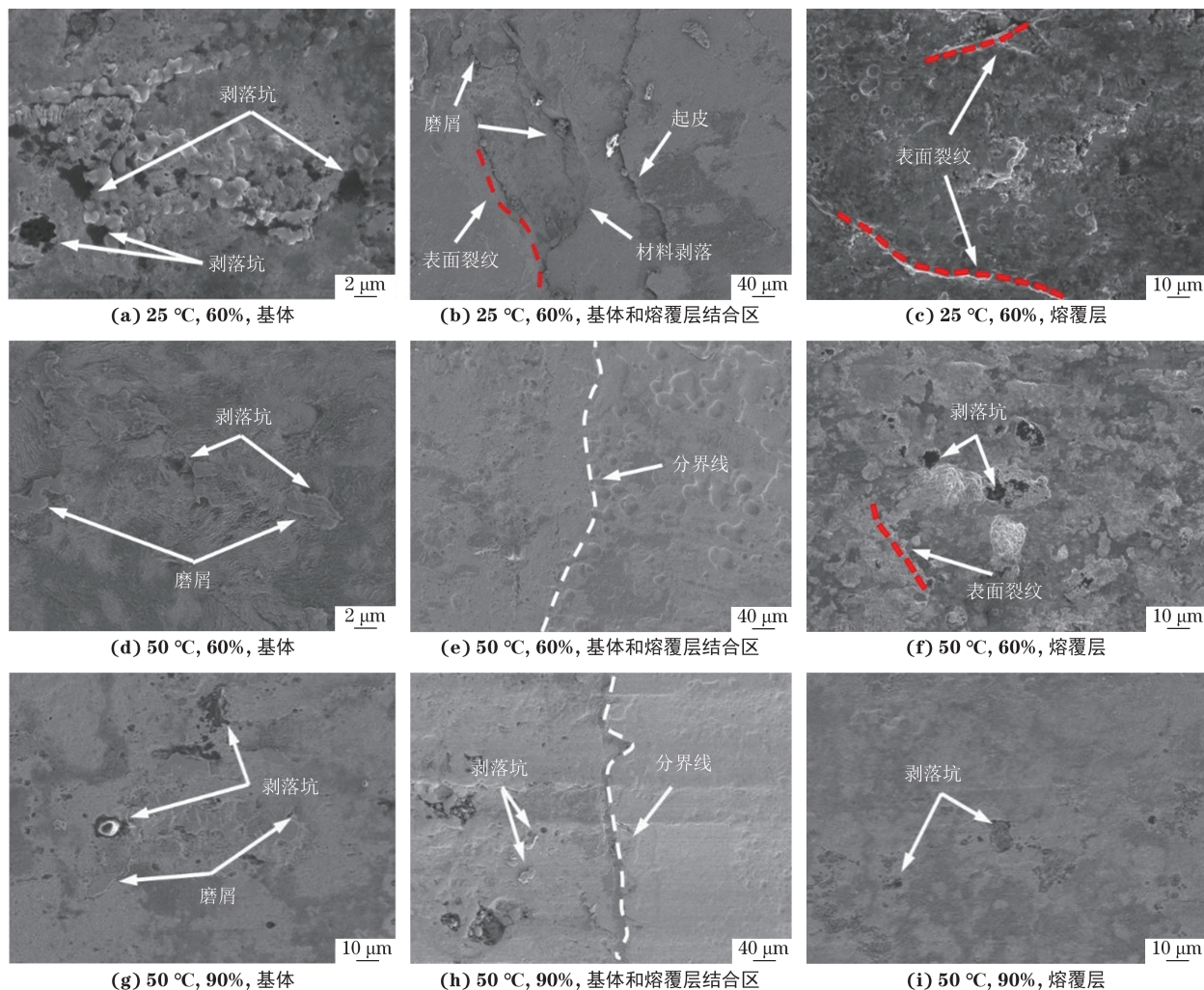


图8 不同温度和相对湿度条件下车轮试样的表面磨损形貌

Fig. 8 Surface wear morphology of wheel samples under different temperature and relative humidity conditions: (a, d, g) matrix; (b, e, h) bond zone between matrix and cladding layer and (c, f, i) cladding layer

摩擦磨损时轮轨试样的摩擦因数先增大后减小最后趋于稳定,而在温度50℃、相对湿度60%和温度50℃、相对湿度90%条件下摩擦因数先增大后稳定;在稳定阶段,温度越高,摩擦因数越小,相对湿度对稳定摩擦因数几乎无影响。

(2) 温度和湿度越大,熔覆层的塑性变形层厚度越小,硬度不变;温度越大,车轮基体的塑性变形层厚度和硬度均越小,但受湿度影响较小。

(3) 温度越高或相对湿度越小,局部修复车轮的磨损质量损失和裂纹长度角度越大。在温度25℃、相对湿度60%条件下,熔覆层与车轮基体结合区表面靠近基体一侧存在大块材料剥落和小角度多层裂纹,裂纹向材料内部扩展,损伤较严重;湿度不变、温度提高至50℃,熔覆层损伤程度减轻,结合区出现明显的分界线且无明显裂纹;在温度50℃下,相对湿度增加至90%,熔覆层内无明显损伤,结合区有

少量剥落坑,依然存在明显分界。

参考文献:

- [1] 王文健. 轮轨滚动接触疲劳与磨损耦合关系及预防措施研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
WANG W J. Study on coupling relationship between rolling contact fatigue and wear of wheel-rail and prevention measures[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008
- [2] OMASTA M, CHEN H. Wheel-rail interface under extreme conditions[M]//Rail Infrastructure Resilience. Amsterdam: Elsevier, 2022: 137-160.
- [3] GIRSCH G, JORG A, SCHOECH W. Managing rail life to match performance and cut costs[J]. Railway Gazette International, 2010, 166(8): 45-48.
- [4] 郭静, 王文健, 刘启跃, 等. 不同工况下轮轨材料间的摩擦磨损行为[J]. 机械工程材料, 2013, 37(1): 43-46.

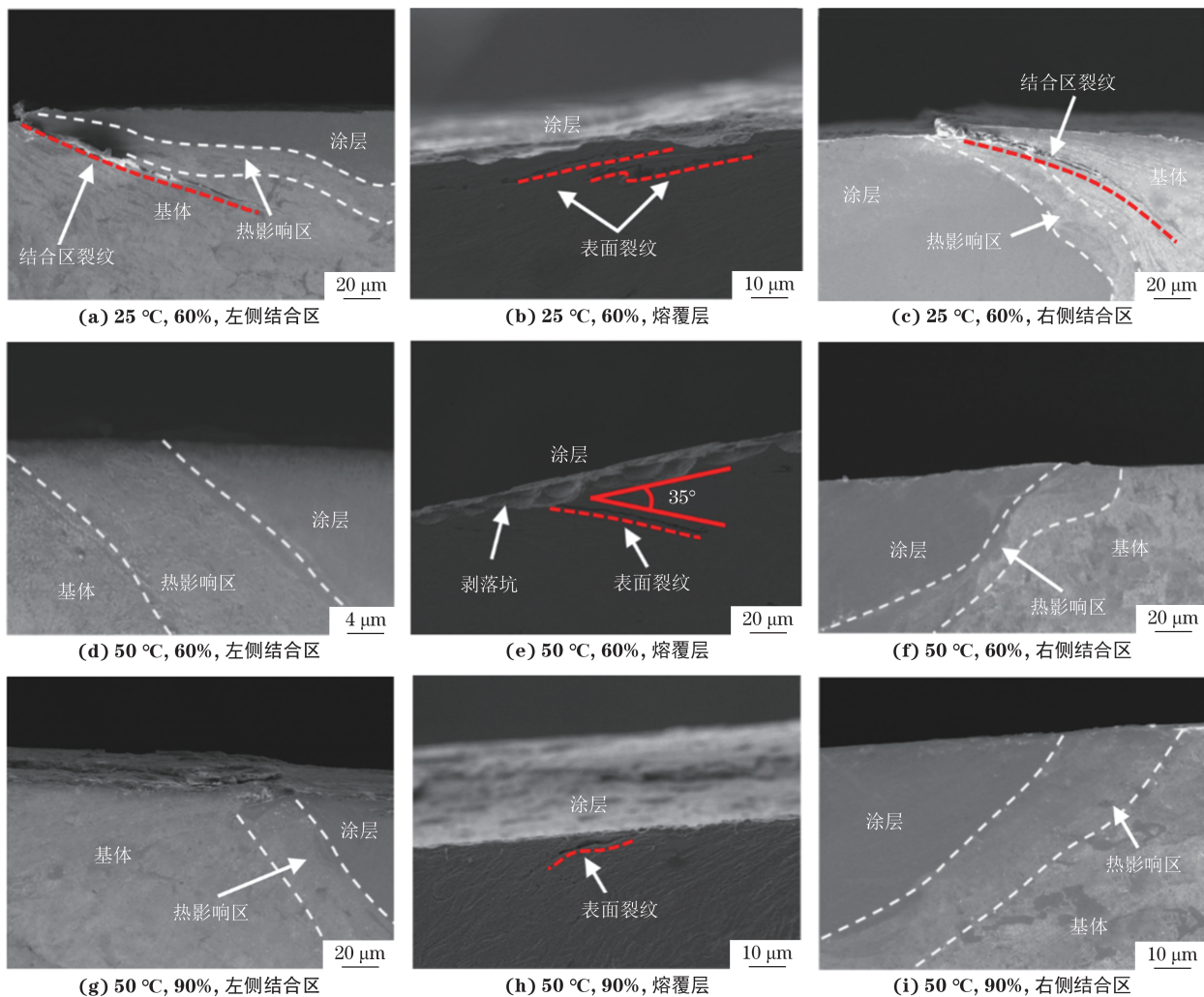


图 9 不同温度和相对湿度条件下车轮试样的剖面磨损形貌

Fig. 9 Profile wear morphology of wheel samples under different temperature and relative humidity conditions: (a, d, g) left bond zone; (b, e, h) cladding layer and (c, f, i) right bond zone

表 2 不同温度和相对湿度条件下车轮试样剖面裂纹长度和扩展角度统计

Table 2 Crack length and growth angle statistics of wheel sample profiles under different temperature and relative humidity conditions

温度/℃	相对湿度/%	位置	最大长度/μm	平均长度/μm	最大角度/(°)	平均角度/(°)
25	60	熔覆层	108	81±27	4	3±2
		基体	20	16±5	7	5±3
		结合区	173	160±13	32	30±3
50	60	熔覆层	93	93±17	30	22±8
		基体	33	26±9	30	13±17
		结合区	—	—	—	—
50	90	熔覆层	25	19±7	15	14±1
		基体	18	16±2	10	9±1
		结合区	—	—	—	—

GUO J, WANG W J, LIU Q Y, et al. Friction and wear behavior of wheel/rail materials under different working conditions[J]. Materials for Mechanical Engineering,

2013, 37(1): 43-46.

[5] ZHU Y, LYU Y, OLOFSSON U. Mapping the friction between railway wheels and rails focusing on

- environmental conditions[J]. *Wear*, 2015, 324: 122-128.
- [6] OLOFSSON U, SUNDVALL K. Influence of leaf, humidity and applied lubrication on friction in the wheel-rail contact: Pin-on-disc experiments[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2004, 218(3): 235-242.
- [7] MA L, WANG W J, GUO J, et al. Study on wear and fatigue performance of two types of high-speed railway wheel materials at different ambient temperatures[J]. *Materials (Basel, Switzerland)*, 2020, 13(5): 1152.
- [8] HE C G, ZHANG P Z, ZHU R Z, et al. Experimental study of the effects of temperature and humidity on the wear and damage behavior of U71Mn rail steel[J]. *Wear*, 2023, 524: 204827.
- [9] HE C G, ZHANG P Z, ZOU G, et al. Experimental investigation of the wear and damage of CL60 wheel material in a humid hot environment[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2023, 32(8): 3500-3514.
- [10] GUÉVENOUX C, HALLAIS S, BALIT Y, et al. Plastic strain localization induced by microstructural gradient in laser cladding repaired structures[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2020, 107: 102520.
- [11] ZHANG Z L, ZHAO Y, SHAN J G, et al. Influence of heat treatment on microstructures and mechanical properties of K447A cladding layers obtained by laser solid forming[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 790: 703-715.
- [12] NIEDERHAUSER S, KARLSSON B. Fatigue behaviour of Co-Cr laser cladded steel plates for railway applications[J]. *Wear*, 2005, 258(7/8): 1156-1164.
- [13] CLARE A, OYELOLA O, FOLKES J, et al. Laser cladding for railway repair and preventative maintenance[J]. *Journal of Laser Applications*, 2012, 24(3): 240-249.
- [14] 郭火明, 王文健, 刘腾飞, 等. 激光相变硬化处理对轮轨钢磨损性能影响[J]. *材料热处理学报*, 2014, 35(5): 165-170.
- GUO H M, WANG W J, LIU T F, et al. Effect of laser transformation hardening treatment on wear properties of wheel/rail steel[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2014, 35(5): 165-170.
- [15] ZHU Y, YANG Y, MU X, et al. Study on wear and RCF performance of repaired damage railway wheels: Assessing laser cladding to repair local defects on wheels[J]. *Wear*, 2019, 430: 126-136.
- [16] 丁昊昊, 谢天星, 王文健, 等. 钢轨材料局部激光熔覆自熔性合金涂层的磨损与滚动接触疲劳行为[J]. *中国表面工程*, 2024, 37(3): 1-13.
- DING H H, XIE T X, WANG W J, et al. Wear and rolling contact fatigue behavior of locally laser cladded rail material using self-fusible alloy[J]. *China Surface Engineering*, 2024, 37(3): 1-13.
- [17] HE C G, ZOU G, LIU H Q, et al. Rolling-sliding wear and damage behaviors of 304L stainless steel laser cladding on a damaged wheel tread under high ambient temperature conditions[J]. *Wear*, 2024, 546: 205330.
- [18] 陈帅, 吴磊, 陶功权, 等. 基于摩擦温升效应的地铁车轮磨损特性研究[J]. *机械工程学报*, 2023, 59(4): 213-220.
- CHEN S, WU L, TAO G Q, et al. Study of wheel wear characteristic of subway vehicle based on the effect of friction temperature rising[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(4): 213-220.
- [19] RONG K J, XIAO Y L, SHEN M X, et al. Influence of ambient humidity on the adhesion and damage behavior of wheel-rail interface under hot weather condition[J]. *Wear*, 2021, 486: 204091.
- [20] GODFREY D. Iron oxides and rust (hydrated iron oxides) in tribology[J]. *Lubrication Engineering*, 1999, 55: 33-37.
- [21] SUZUMURA J, SONE Y, ISHIZAKI A, et al. In situ X-ray analytical study on the alteration process of iron oxide layers at the railhead surface while under railway traffic[J]. *Wear*, 2011, 271(1/2): 47-53.
- [22] DORGHAM A, AZAM A, PARSAEIAN P, et al. Understanding the effect of water on the transient decomposition of zinc dialkyldithiophosphate (ZDDP)[J]. *Tribology International*, 2021, 157: 106855.
- [23] MOMOSE Y, TSURUYA K, SAKURAI T, et al. Photoelectron emission and XPS studies of real iron surfaces subjected to scratching in air, water, and organic liquids[J]. *Surface and Interface Analysis*, 2016, 48(4): 202-211.
- [24] 夏银锋. 自润滑激光熔覆层的制备及其组织与性能研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2011.
- XIA Y F. Microstructure and behavior of self-lubricating composite coating prepared by laser cladding[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2011.
- [25] 王廷宣, 章健, 刘敬, 等. 激光熔覆层裂纹控制的研究进展[J]. *机械工程材料*, 2023, 47(8): 1-7.
- WANG T X, ZHANG J, LIU J, et al. Research progress on crack control of laser cladding layer[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2023, 47(8): 1-7.

Friction and Wear Properties of Wheel Partially Repaired by 304L Stainless Steel Laser Cladding under Different Temperature and Humidity Conditions

YE Rongwei¹, WANG Xinji², ZOU Gang², XU Yixun², HE Chenggang^{2,3}, LI Shanggui², LIU Jihua^{2,3}

(1. School of Mechanical and Automation Engineering, 2. School of Rail Transportation, 3. Jiangmen Key Laboratory of Intelligent Operation, Maintenance and Emergency Management for Rail Transit, Wuyi University, Jiangmen 529020, China)

Abstract: C160 steel wheel samples were partially repaired by laser cladding 304L stainless steel. The friction and wear properties of repaired wheel samples under different temperature and relative humidity conditions (25 °C, 60%; 50 °C, 60%; 50 °C, 90%) were studied. The results show that the higher the temperature, the smaller the stable friction factor; the relative humidity had almost no effect on the stable friction factor at 50 °C. The higher the temperature or the lower the relative humidity, the greater the wear mass loss and crack length and angle of the partially repaired wheel. Under the 25 °C and 60% relative humidity condition, the bond zone between the cladding layer and the matrix on surface of the wheel had large material spalling and multi-layer cracks with small angles near the matrix, the cracks propagated inward, and the damage was serious. When the humidity was kept at 60% and the temperature increased to 50 °C, the damage degree of the cladding layer was reduced, and there was an obvious dividing line and no obvious cracks in the bond zone. When the temperature increased to 50 °C and the relative humidity increased to 90%, no obvious damage existed in the cladding layer, the bond zone had a few spalling pits and the boundary between the cladding layer and matrix was clear.

Key words: wheel; U75V steel rail; laser cladding repair; temperature; humidity; wear property

编写摘要的注意事项

1. 摘要应具有独立性和自含性,并拥有与论文同等量的主要信息,即不阅读论文的全文,就能获得必要的信息。

2. 摘要一般应说明研究工作的目的、试验方法、结果和最终结论等,而且重点是结果和结论。要采用第三人称的写法,不必使用“本文”、“作者”等作为主语。

3. 摘要中有数据、有结论,是一篇完整的短文,可以独立使用,可以引用,也可以用于工艺推广。

4. 结构严谨,表达简明,语义确切。摘要先写什么,后写什么,要按逻辑顺序来安排。句子之间要上下连贯,互相呼应。慎用长句,句型要力求简单。每句话要表意明白,无空泛、笼统、含混之词。

5. 除了实在无变通办法可用以外,摘要中不同图、表、化学结构式、非公知公用的符号和术语。

6. 缩略语、略称、代号,除了相近专业的读者也能清楚理解的以外,在首次出现时必须加以说明。

7. 英文题名以短语为主要形式,尤以名词短语最常见,即题名基本上有1个或几个名称加上其前缀和(或)后置定语构成。短语型题名要确定好中心词,再进行前后修饰。各个词的顺序很重要,词序不当,会导致表达不准。

8. 中文摘要一般不易超过200~300字;外文摘要不宜超过250个实词。如遇特殊需要,字数可以略多。

《机械工程材料》编辑部