

# 磨损对 U71Mn 材料表面高温氧化行为的影响

席艳君, 李宪哲, 董澍, 吴永乐

(中原工学院, 郑州 450007)

**摘要:** **目的** 研究 U71Mn 钢轨材料磨损后的高温氧化行为, 探讨高温和磨损对钢轨表面损伤的影响机制。**方法** 用磨损试验机对材料进行磨损试验, 将磨损不同程度的材料在加热炉中进行氧化实验, 用带能谱的扫描电镜对材料界面进行表征, 用 XRD 对氧化物相进行分析, 研究磨损对 U71Mn 钢轨材料表面高温氧化性能的影响。**结果** 磨损量随载荷增加而变大。在 800、900 °C 保温 5 h 后, 未磨损材料比磨损材料质量增加明显。这是因为磨损材料表面产生划痕裂纹, 空气中的氧在裂纹尖端快速吸附, 扩散到裂纹尖端的基体中, 生成氧化物, 降低了裂纹前沿原子键结合能, 造成材料表面大面积脱落。在 900 °C, 未磨损 U71Mn 材料高温加热后, 表面氧化膜主要为  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 500 N 磨损材料高温氧化膜主要成分为  $\text{FeO}$  和  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  相, 1000 N 磨损材料氧化膜主要成分为  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  和  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  相。**结论** 未磨损 U71Mn 钢轨材料的耐高温氧化性能明显优于磨损材料。磨损会加速材料高温损伤, 且具有一定的方向性。轮轨摩擦划痕严重影响高温氧化膜的相结构和附着力, 从而影响钢轨的使用寿命。

**关键词:** U71Mn; 高铁钢轨; 高温; 氧化; 磨损; 氧化膜

**中图分类号:** TG172.8; TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)05-0289-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.05.032

## Effect of Wear on Oxidation Behavior of U71Mn at High Temperature

*XI Yan-jun, LI Xian-zhe, DONG Shu, WU Yong-le*

(Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China)

**ABSTRACT:** The high temperature oxidation behavior of U71Mn rail material after wear was studied, and the influence mechanism of high temperature and wear on rail surface damage was discussed. The wear test of materials was carried out with a wear tester, and the oxidation tests were carried out in a heating furnace. The interface of materials was characterized by SEM with energy spectrum, and the phases of oxides were analyzed by XRD. The effect of wear on the surface oxidation properties of U71Mn rail material at high temperature was investigated. The results showed that the amount of wear increases with the increase of load. The weight of the material without wear was obviously increased compared with that of the worn material at 800 °C and 900 °C for 5 hours. This is because there were scratch cracks on the surface of the material after wear. Oxygen in the air rapidly was adsorbed at the crack tip, diffused into the matrix at the crack tip, and formed oxides, thus reducing the atomic bond energy at the crack front, causing a large area of material surface falling off seriously. This shows that the scratch caused

收稿日期: 2020-05-17; 修订日期: 2020-07-23

**Received:** 2020-05-17; **Revised:** 2020-07-23

**基金项目:** 河南省科技厅自然科学基金项目 (182300410231); 中国纺织工业联合会项目 (2018131)

**Fund:** Supported by the Natural Science Fund Project of Science and Technology Department of Henan Province (182300410231) and Textile Industry Federation Project in China (2018131)

**作者简介:** 席艳君 (1974—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为表面工程。邮箱: yjxi@sina.com

**Biography:** XI Yan-jun (1974—), Female, Doctor, Professor, Research focus: surface engineering. E-mail: yjxi@sina.com

**引文格式:** 席艳君, 李宪哲, 董澍, 等. 磨损对 U71Mn 材料表面高温氧化行为的影响[J]. 表面技术, 2021, 50(5): 289-294.

XI Yan-jun, LI Xian-zhe, DONG Shu, et al. Effect of wear on oxidation behavior of U71Mn at high temperature[J]. Surface technology, 2021, 50(5): 289-294.

by wheel-rail friction has a great effect on the high-temperature properties of rail materials. The oxide film on the surface of unworn U71Mn was mainly  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  at 900 °C for 5 hours. The oxide film on the surface of material after 500 N wear contained FeO and  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , while the oxide film on the surface of material after 1000 N wear contained  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  and  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  at 900 °C. The macro-defects on the surface of the material caused by scratch was the oxidation active region, and stable  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  was formed in a very short time, but the oxidation film grows quickly and unsteadily on the scratch, and part of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  falls off, then the exposed part of the substrate was oxidized again to form FeO. The high temperature oxidation resistance of unworn U71Mn rail material is obviously better than that of worn material. Wear can accelerate the material damage at high temperature, and has a certain direction. The scratch of wheel-rail friction seriously affects the phase structure and adhesion of oxide film at high temperature, and thus affects the service life of rail.

**KEY WORDS:** U71Mn; high-speed rail; high temperature; oxidation; wear; oxide film

随着轨道交通不断向高速化、重载化的方向发展, 钢轨的工作环境愈发恶劣, 其承受的载荷情况变得复杂, 钢轨表面损伤失效问题日益增多。其中轮轨磨损引起的摩擦和磨损等问题, 不仅加剧了铁路的运输成本, 而且对轨道交通行车安全也提出了更高的要求<sup>[1-3]</sup>。除列车速度、轮轨材料、轮轨几何外形等因素外, 摩擦热产生的温度也是影响轮轨材料磨损失效的关键因素<sup>[4-9]</sup>。高速铁路运行过程中, 轮轨相对滑动, 产生摩擦热<sup>[10-14]</sup>, 摩擦热集中在轮轨接触区, 使接触区的温度迅速升高<sup>[15-20]</sup>。研究人员通过数值模拟对轮轨摩擦温升进行了分析, 得知车轮和钢轨接触面积的最高温度约为 900 °C<sup>[21-24]</sup>。钢在空气中受热超过 500 °C 时, 其氧化反应开始明显加剧, 钢轨表面的氧化会因为温度的升高而迅速增加<sup>[25]</sup>。当温度达到 800~850 °C 时, 开始有脱碳现象。当温度在 850 °C 以上时, 脱碳和氧化过程会一起进行<sup>[26]</sup>, 因此研究钢轨材料在 800 °C 和 900 °C 的高温氧化行为显得尤为重要。在高铁列车紧急制动过程中, 钢轨表面会因列车重载和速度的影响而产生摩擦热, 加剧表面磨损物的剥离和脱落, 因此研究钢轨磨损对高温氧化行为的影响极为重要。钢轨表面剥落塌陷是磨损和氧化交错重复出现的结果, 氧化磨损是钢轨表面损伤的主要方式之一, 但未见相关研究报道。本文主要对 U71Mn 钢轨材料进行不同程度的磨损, 研究磨损后钢轨材料的高温氧化行为, 初步探讨高温和磨损对钢轨表面剥落塌陷的影响机制。

## 1 实验

实验所用材料为 U71Mn 钢轨材料, 用线切割机将材料加工成尺寸为 10 mm×10 mm×10 mm 的试样, 材料的标准化学成分见表 1。对试样进行砂纸打磨和抛

光处理, 丙酮除油并超声波清洗后, 用精度为 0.1 mg 的电子分析天平进行初始称量。

在摩擦磨损试验机 (MMS-2A) 上分别对材料进行 500、1000 N 的磨损实验, 进行 10 次循环磨损, 每次磨损时间为 30 s。磨损后, 用电子分析天平对 U71Mn 材料进行称量, 计算不同磨损载荷下的磨损率。用扫描电镜、数码相机、光学显微镜对磨损后的磨痕进行观察, 对不同磨损程度的磨痕进行宏观形貌分析。

取未磨损与 500、1000 N 磨损后的材料置于石英坩埚内, 放在加热炉中进行氧化实验, 加热温度分别为 800、900 °C, 保温 5 h, 取出试样, 空冷至室温, 观察表面形貌和表面膜脱落程度。用电子分析天平对氧化后的材料进行称量, 比较不同温度和不同磨损条件下, 试样单位面积上的氧化增重。对加热后的试样, 用金相镶嵌机进行镶嵌封样, 砂纸打磨, 抛光。用扫描电镜附带的 EDS 能谱仪分析氧化膜元素和成分, 用扫描电镜对氧化膜进行形貌观察, 用 XRD 对氧化产物进行分析。

## 2 结果及分析

### 2.1 磨损

如图 1 所示, 500 N 条件下, 磨损率随着磨损次

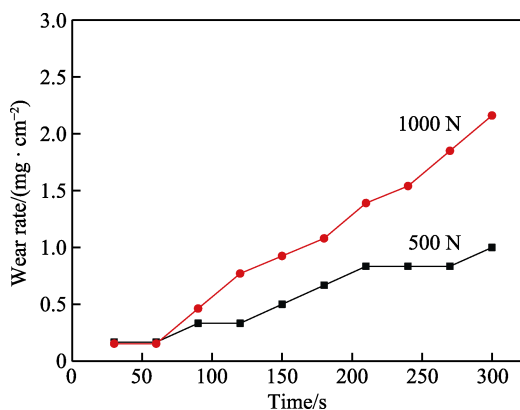


图 1 U71Mn 材料在 500、1000 N 下的磨损率  
Fig.1 Schematic diagram of wear rate of U71Mn material at 500 N and 1000 N

表 1 U71Mn 的化学成分  
Tab.1 Chemical composition of U71Mn wt%

C	Si	Mn	P	S	V
0.65~0.76	0.15~0.35	1.10~1.40	≤0.030	≤0.030	≤0.030

数的增加而增大，呈现阶梯式增长，增长速度比较缓慢。1000 N 条件下，随着磨损次数的增加，磨损率基本处于直线式增长，相较于 500 N，其增长速度明显加快。随着磨损载荷的增加，材料磨损量快速变大，说明随着高铁不断向重载方向演变，对钢轨本身的损害加重。

材料在 500 N 磨损后，宏观表面出现大量划痕，划痕明显且均匀分布，如图 2a 所示。1000 N 磨损材料的宏观表面出现凹陷，划痕加深，且呈不均匀分布，相对集中在中部区域，如图 2b 所示。磨损实验施加的载荷越大，划痕形成的速度越快，凹陷越深，越容

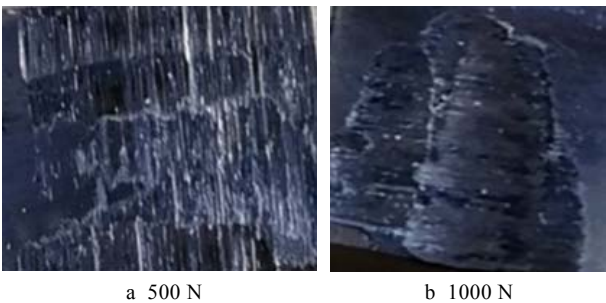


图 2 U71Mn 材料在 500 N 和 1000 N 下磨损后的宏观形貌  
Fig.2 Macroscopic morphology of U71Mn material after 500 N and 1000 N wear

易形成划痕集中区。这种不均匀分布的划痕不利于钢轨材料的长期使用。

2.2 高温氧化结果与分析

U71Mn 在不同条件下的氧化增重见表 2。800 ℃条件下，500、1000 N 磨损试样的氧化增重分别为 0.0173、0.0175 g/cm<sup>2</sup>，900 ℃条件下分别为 0.02、0.0189 g/cm<sup>2</sup>。试样在经过 500、1000 N 磨损后加热到 800 ℃，单位面积上的增重变化不大。同样，试样在经过 500、1000 N 磨损后加热到 900 ℃，单位面积上的氧化增重变化也不大，但在 900 ℃的氧化增重要明显高于 800 ℃的值。这是因为，材料在经过 500、1000 N 磨损后，表面均形成了大量的宏观划痕裂纹，在 800、900 ℃高温下，这些宏观裂纹上形成的氧化物极其不稳定，很快沿着这些划痕裂纹脱落，因此相同高温下，不同磨损后的试样几乎显示相同的单位氧化增重。此外，未磨损材料单位面积上的氧化增重明显大于磨损材料。这是因为未磨损材料表面完整，高温形成的氧化膜不容易脱落，基本附着在材料表面，所以质量增加明显。磨损材料表面产生了沟槽及划痕，经过高温处理后，材料表面形成一层松脆的氧化膜，与基体结合强度变差，造成表面氧化物严重脱落。

表 2 U71Mn 在不同条件下的氧化增重  
Tab.2 Oxidation weight gain of U71Mn under different conditions

Samples	800 ℃			900 ℃		
	Unworn	500 N	1000 N	Unworn	500 N	1000 N
Mass gain (g·cm <sup>-2</sup> )	0.0313	0.0173	0.0175	0.0269	0.02	0.0189

未磨损 U71Mn 材料在 800 ℃下的氧化截面形貌如图 3 所示。未磨损材料在 800 ℃下保温 5 h 后，部分氧化层基本完整，且最外层和次外层之间有明显的裂缝，在氧化膜和基体之间出现了大量的空洞，尤其是在氧化膜与基体界面附近，有一条近似连续的空洞，如图 3a 所示。这是因为，在氧化初期，铁和氧

充分接触，反应速度较快，氧化膜不致密，从而在初期形成的氧化膜上形成了一条近似连续的空洞。随着时间的推移，材料表面逐渐被氧化膜覆盖，限制了铁向外扩散，氧化膜形成速度逐渐减缓。在扫描电镜下能够看到，中间层的氧化膜相对比较致密。同时，未磨损 U71Mn 材料在 800 ℃氧化后，也会出现如图 3b

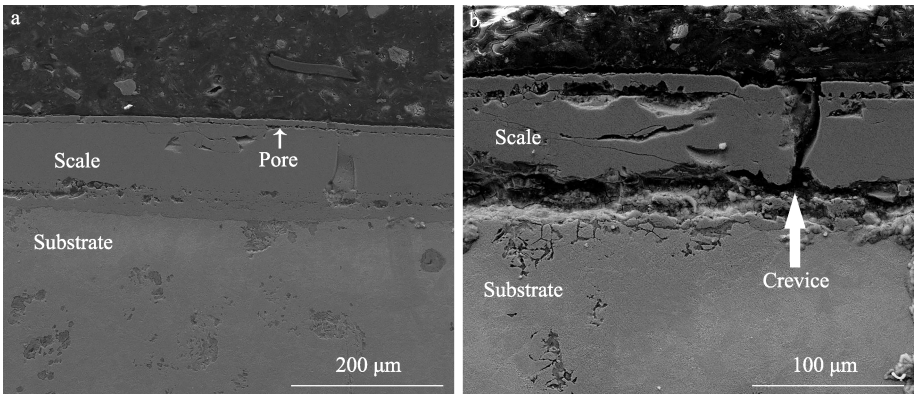


图 3 未磨损 U71Mn 材料在 800 ℃氧化后的截面形貌  
Fig.3 Cross-sectional morphology of unworn U71Mn at 800 ℃

所示的形貌,即部分区域氧化层和基体之间出现很宽的裂缝,裂缝处物质碎裂掉落,且氧化层出现贯穿式裂缝。这是因为在部分区域,最外层不稳定的氧化层发生掉块,氧化膜与基体界面处空洞不断扩散连续,造成最外层掉块区域逐渐和界面空洞连接贯穿,从而造成这部分区域结构不稳定。若实验时间延长,这部分区域氧化膜发生脱落,会造成钢轨材料的加速失效。

1000 N 磨损 U71Mn 试样在 800 °C 下的氧化截面形貌如图 4 所示。由图 4 可知,1000 N 磨损试样在 800 °C 下保温 5 h,截面上几乎观察不到氧化层。造成这种现象的原因可能是,材料磨损造成了深划痕裂纹,空气中的氧在裂纹尖端发生吸附和吸收,氧原子扩散到基体中,使这一区域变脆。氧降低了裂纹前沿的原子键结合能,吸附氧使得裂纹表面能下降,生成氧化物<sup>[27]</sup>。因此,氧在裂纹区聚集,降低了晶界金属晶体的原子间结合力,造成表面脱落。在图 4 中观察到氧化向材料基体内扩展的现象,即内氧化现象,扩展深度约为 800 μm,且内氧化也有明显的脱落现象,氧化腐蚀程度较重。内氧化是因为材料磨损造成的大量宏观划痕成为氧向内扩散的最优通道。内氧化使得材料的内应力急剧增加,自由能升高,内氧化区域通过氧化物的塑性变形、开裂和剥离,降低自由能,并释放内应力。用 EDS 分析图 4 中的 A 区域,其成分为 15.96Fe-0.5Mn-0.1P-0.16Si-52.69O-30.59C,表明 A 区域主要为 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。这通过 XRD 分析也得到了证实,如图 5 所示。此外,从图 4 还可以观察到,氧化层脱落后,在材料表面呈现出疏松的空洞状。

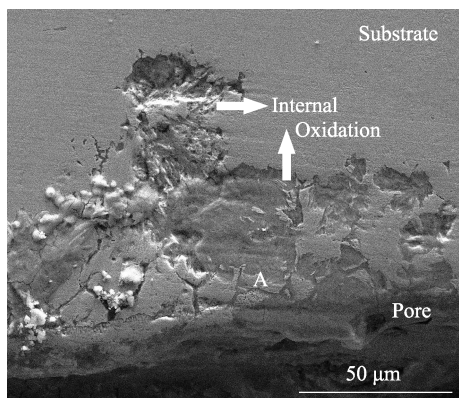


图 4 1000 N 磨损 U71Mn 材料在 800 °C 氧化后的截面形貌  
Fig.4 Cross-sectional morphology of U71Mn material worn with 1000 N at 800 °C

800 °C 氧化后,试样表面的 XRD 分析如图 5 所示。由图 5 可知,未磨损及 500、1000 N 磨损试样表面的 XRD 峰基本一致,其氧化膜成分主要为 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 相。这个结果与对图 4 中的 A 区域进行 EDS 分析的结果相吻合。磨损试样的 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 峰值明显高于未磨损试样,说明磨损试样表面膜的 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量显著增加。

1000 N 磨损试样的 XRD 峰相对较宽,表明其氧化产物晶粒尺寸较大。这是因为温度升高,材料表面粒子活性增强所致。

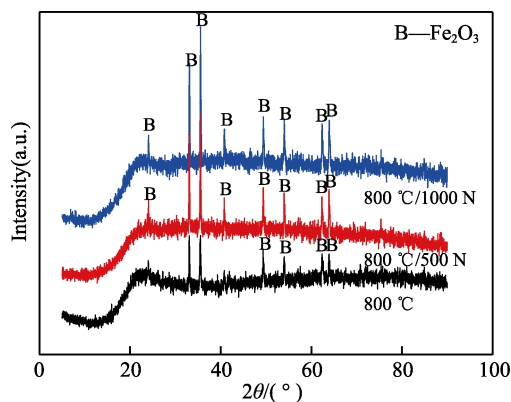
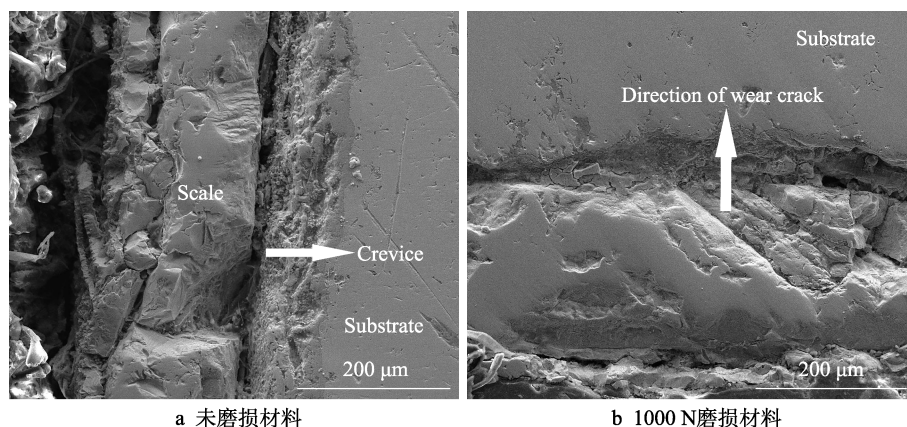


图 5 未磨损及磨损 U71Mn 试样在 800 °C 氧化后的 XRD 分析  
Fig.5 XRD patterns of U71Mn samples at 800 °C

未磨损、1000 N 磨损 U71Mn 试样在 900 °C 保温 5 h 的截面形貌如图 6 所示。由图 6 可知,未磨损试样在 900 °C 下保温 5 h 后,基本存在多层氧化物,层与层之间的结合力较差,氧化层和基体之间出现很宽的裂缝。说明材料在这种条件下的氧化层不牢靠,延长后,极易造成氧化膜的脱落。1000 N 磨损试样在 900 °C 保温 5 h 后,氧化层几乎全部脱落,氧化向基体内扩散程度加重,内部很宽的破坏层出现与基体剥离的趋势。这个结果与氧化增重的结果相吻合,即未磨损材料的氧化增重远高于磨损材料。1000 N 磨损试样在 900 °C 保温 5 h 后,氧化物快速生长,呈现厚且脆的特征,同时磨损裂纹降低了氧化物与基体之间的结合力。因此,试样从高温加热炉内取出时,观察到大部分表面氧化物破碎并脱落在坩埚底部。在制备截面试样的过程中,试样的镶嵌、打磨、抛光,进一步使得表面氧化物几乎全部脱落。从图 6 可以观察到,向材料内部延伸的破坏层呈现出一定的方向性,与材料预磨损裂纹划痕方向基本一致。这说明磨损会加速材料高温损伤,且具有一定的方向性。

900 °C 氧化试样表面的 XRD 分析结果如图 7 所示。由 XRD 分析可知,在 900 °C 氧化后,未磨损试样表面氧化膜的主要成分为 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,500 N 磨损试样为 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 和 FeO。这主要是因为磨损划痕造成材料表面宏观缺陷,成为氧化活性区,氧化活性强,在很短的时间内形成了稳定的 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>,但氧化膜在划痕上生长速度快、不稳定,使部分 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 发生脱落,内部裸露的基体部分再次发生氧化,生成 FeO。因此,在 XRD 图谱上,存在明显的 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 和 FeO 的衍射峰。1000 N 磨损试样表面氧化膜的主要成分为 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,这是因为后期形成的 FeO 和氧发生反应,从而形成相对较稳定的 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。



a 未磨损材料

b 1000 N 磨损材料

图 6 未磨损及 1000 N 磨损 U71Mn 试样在 900 °C 保温 5 h 的截面形貌

Fig.6 Cross-sectional morphology of U71Mn material at 900 °C: a) unabraded material; b) 1000 N wear material

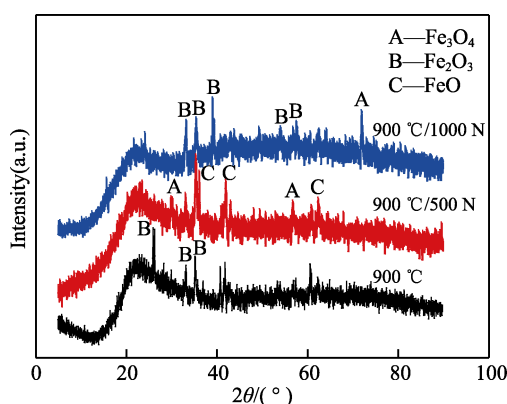


图 7 未磨损和磨损 U71Mn 试样在 900 °C 氧化后的 XRD 分析

Fig.7 XRD patterns of U71Mn samples at 900 °C

### 3 结论

1) 高温氧化 5 h 后, 相比磨损 U71Mn 试样, 未磨损 U71Mn 试样的氧化增重明显增大, 说明轮轨摩擦产生划痕对钢轨材料的高温性能影响较大。

2) 在 800 °C 氧化 5 h 后, 未磨损和磨损试样表面的氧化物基本一致, 主要为  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 。在 900 °C 氧化后, 未磨损试样氧化层的主要成分为  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 500 N 磨损试样为  $\text{FeO}$  和  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , 1000 N 磨损试样为  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  和  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 。这说明在轮轨摩擦造成钢轨温度快速升高时, 表面摩擦划痕会严重影响氧化膜的相结构, 从而影响钢轨使用寿命。

3) 磨损材料内部破坏方向与材料预磨损裂纹划痕方向基本一致, 说明磨损会加速材料的高温损伤, 且具有一定的方向性。

#### 参考文献:

[1] 巩友飞, 周玉双. 单一金相组织下轮轨材料摩擦磨损实验研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2019,

50(3): 520-523.

GONG You-fei, ZHOU Yu-shuang. Experimental research on friction wear of wheel-rail material under single metallographic structure[J]. Journal of Shandong Agricultural University (natural science edition), 2019, 50(3): 520-523.

[2] 王彩芸, 刘启跃. PD3 与 U71Mn 钢轨材料微观与宏观磨损性能分析[J]. 润滑与密封, 2014, 39(11): 36-41.

WANG Cai-yun, LIU Qi-yue. Micro and macro wear performance of PD3 and U71Mn rail materials[J]. Lubrication engineering, 2014, 39(11): 36-41.

[3] 王彩芸, 申鹏, 刘启跃. 车速变化对钢轨磨损影响的数值计算与实验研究[J]. 润滑与密封, 2011, 36(11): 19-24.

WANG Cai-yun, SHEN Peng, LIU Qi-yue. Numerical and experiment analysis of the effect of speed on rail wear[J]. Lubrication engineering, 2011, 36(11): 19-24.

[4] 丁昊昊, 王文健, 郭俊, 等. 轴重对轮轨材料滚动磨损与损伤行为影响[J]. 材料工程, 2015, 43(10): 35-41.

DING Hao-hao, WANG Wen-jian, GUO Jun, et al. Effect of axle-load on rolling wear and damage behaviors of wheel and rail materials[J]. Journal of materials engineering, 2015, 43(10): 35-41.

[5] 丁昊昊, 付志凯, 郭火明, 等. 三种钢轨材料与车轮匹配时滚动磨损与损伤行为[J]. 摩擦学学报, 2014, 34(3): 233-239.

DING Hao-hao, FU Zhi-kai, GUO Huo-ming, et al. Rolling wear and damage behaviors between three kinds of rail materials and wheel material[J]. Tribology, 2014, 34(3): 233-239.

[6] WANG W J, GUO J, LIU Q Y. Effect of contact stress on rolling friction and wear behavior of wheel-rail materials [J]. Tribology, 2011, 31(4): 352-356.

[7] LUDGER D, MATTHIAS P. Friction and wear testing of rail and wheel material[J]. Wear, 2005, 258(7): 981-991.

[8] LI X, YANG T, ZHANG J, et al. Rails wear on the curve of a heavy haul line-Numerical simulations and comparison with field measurements[J]. Wear, 2016, 366-367: 131-138.

[9] 朱敏, 徐光, 侯蓉, 等. U68CuCr 与 U75V 轨道钢磨损行为研究[J]. 表面技术, 2017, 46(10): 149-155.

- ZHU Min, XU Guang, HOU Rong, et al. Wear behavior of U68CuCr and U75V railway-steels[J]. Surface technology, 2017, 46(10): 149-155.
- [10] NAEIMI M, LI Z I, WU J. Thermo mechanical analysis of the wheel-rail contact using a coupled modeling procedure[J]. Tribology international, 2018, 117: 250-260.
- [11] JIANG W J, LIU C, HE C G. Investigation on impact wear and damage mechanism of railway rail weld joint and rail materials[J]. Wear, 2017, 376-377: 1938-1946.
- [12] JI H Z, SU H, YANG C F, et al. Friction heat induced phase transformation and spalling mechanism of train wheel steel [J]. Journal of iron and steel research, 2005, 17: 55-59.
- [13] FARREN W S, TAYLOR G I. The heat developed plastic extension of metals[J]. Proceedings of the royal society A, 1925, 107: 422-451.
- [14] MARTIN E, KLAUS K. A comparison of analytical and numerical methods for the calculation of temperature in wheel/rail contact[J]. Wear, 2002, 253: 498-508.
- [15] XU J M, WANG P, GAO Y, et al. Geometry evolution of rail weld irregularity and the effect on wheel-rail dynamic interaction in heavy haul railways[J]. Engineering failure analysis, 2017, 81: 31-34.
- [16] HIENSCH M, STEENBERGEN M. Rolling contact fatigue on premium rail grades: Damage function development from field data[J]. Wear, 2018, 394-395: 187-194.
- [17] HUANG Y B, SHI L B, ZHAO X J, et al. On the formation and damage mechanism of rolling contact fatigue surface cracks of wheel/rail under the dry condition[J]. Wear, 2018, 400-401: 62-73.
- [18] MA L, SHI L B, GUO J. On the wear and damage characteristics of rail material under low temperature environment condition[J]. Wear, 2018, 394-395: 149-158.
- [19] SPANGENBERG U, FRÖHLING R D, ELS P S. The effect of rolling contact mitigation measures on wheel wear and rail fatigue[J]. Wear, 2018, 398-399: 56-68.
- [20] FLETCHER D I. Numerical simulation of near surface rail cracks subject to thermal contact stress[J]. Wear, 2014, 314: 96-103.
- [21] 韩晓乾, 于辉, 刘帅帅, 等. U71Mn 钢轨矫直断裂原因分析[J]. 理化检验-物理分册, 2017, 55(11): 37-40.
- HAN Xiao-qian, YU Hui, LIU Shuai-shuai, et al. Reason analysis on fracture of U71Mn steel rails during straightening[J]. Physical testing and chemical analysis part A: Physica, 2017, 55(11): 37-40.
- [22] VO K D, TIEU A K, ZHU H T. The influence of high temperature due to high adhesion condition on rail damage[J]. Wear, 2015, 330-331: 571-580.
- [23] SHEBANI A, IWNICKI S. Prediction of wheel and rail wear under different contact conditions using artificial neural networks[J]. Wear, 2018, 406-407: 173-184.
- [24] 裴有福, 金元生, 温诗铸. 用拉普拉斯变换方法研究轮轨滑动引起的温升[J]. 中国铁道科学, 1995, 16(4): 81-86.
- PEI You-fu, JIN Yuan-sheng, WEN Shi-zhu. Temperature rise due to slip between wheel and rail[J]. China railway science, 1995, 16(4): 81-86.
- [25] 葛影, 毕俊召, 安俊杰, 等. U71Mn 重轨钢组织与高温力学性能研究[J]. 铸造技术, 2018, 39(8): 1670-1672.
- GE Ying, BI Jun-zhao, AN Jun-jie, et al. Microstructure and high temperature mechanical properties of U71Mn heavy rail steel[J]. Foundry technology, 2018, 39(8): 1670-1672.
- [26] 李松原. U71Mn 钢高温氧化与脱碳的研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2013.
- LI Song-yuan. Research on high-temperature oxidation and decarburization of U71Mn steel[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2013.
- [27] 李美栓. 金属的高温氧化[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001.
- LI Mei-shuan. High temperature oxidation of metal[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2001.

(上接第 244 页)

- [23] FU Peng, JIANG Chuan-hai, WU Xue-yan, et al. Surface modification of 304 steel using triple-step shot peening[J]. Materials and manufacturing processes, 2015, 30(6): 693-698.
- [24] 吴桐, 张留艳, 蒋俊杰, 等. 超声喷丸对钢基体表面发黑膜耐蚀性的影响[J]. 表面技术, 2018, 47(3): 191-195.
- WU Tong, ZHANG Liu-yan, JIANG Jun-jie, et al. Effect of ultrasonic shot peening on corrosion resistance of steel substrate surface blackening film[J]. Surface technology, 2018, 47(3): 191-195.
- [25] LU Ke. Making strong nanomaterials ductile with gradients[J]. Science, 2014, 345(6203): 1455-1456.
- [26] ZHANG Ya-long, LAI Fu-qiang, QU Sheng-guan, et al. Effect of shot peening on residual stress distribution and tribological behaviors of 17Cr2Ni2MoVNb steel[J]. Surface and coatings technology, 2020, 386(3): 125497.
- [27] 乔嵩, 李智, 杨佳, 等. 硅含量对热浸镀 Zn-20%Al 镀层组织和耐蚀性的影响[J]. 金属热处理, 2018, 43(8): 178-183.
- QIAO He, LI Zhi, YANG Jia, et al. Effect of Si content on microstructure and corrosion resistance of hot-dip Zn-Al alloy coating [J]. Heat treatment of metals, 2018, 43(8): 178-183.
- [28] 宋玉, 陈小平, 王向东, 等. Q235B 钢和含 Cr 耐候钢在文昌海洋大气暴露的锈层特征与耐蚀性[J]. 腐蚀与防护, 2019, 40(9): 638-643.
- SONG Yu, CHEN Xiao-ping, WANG Xiang-dong, et al. Rust characteristics and corrosion resistance of Q235B steel and Cr-bearing weathering steel in Wenchang marine atmosphere[J]. Corrosion and protection, 2019, 40(9): 638-643.