

轮轨磨损与滚动疲劳裂纹损伤关系及预防研究*

王文健, 郭 俊, 刘启跃

(西南交通大学 摩擦学研究所, 成都 610031)

摘 要: 在JD-1型轮轨模拟试验机上研究了干态下两种钢轨的滚动磨损与疲劳性能。结果表明: 不同工况下U71Mn钢轨磨损量大于PD3钢轨, U71Mn钢轨表现出更好的抗疲劳性能; 磨损与疲劳裂纹损伤表现为相互争竞与制约的耦合关系; 增加磨损率能降低轮轨疲劳裂纹损伤。

关键词: 轮轨; 磨损; 疲劳; 裂纹; 预防措施

中图分类号: TH17; TH16

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2010)03-0106-04

Study on Relationship Between Wear and Rolling Fatigue Crack of Wheel/rail and Prevention Measures

WANG Wen-jian, GUO Jun, LIU Qi-yue

(Tribology Research Institute, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)

Abstract: The rolling wear and fatigue behaviors of two kinds of rail steels were investigated under dry condition using JD-1 wheel/rail simulation facility. The results indicate that the wear volume of U71Mn rail is larger than PD3 rail's. However, U71Mn rail has better resistance to fatigue damage. The relationship between wear and fatigue crack damage of wheel/rail is manifested as mutual competitive and restrictive coupling mechanisms. Increasing wear rate can alleviate fatigue crack damage of wheel/rail.

Key words: wheel/rail; wear; fatigue; crack; prevention measure

0 引 言

钢轨作为铁路运输的重要组成部件,其质量的好坏直接影响到铁路运输的安全和效率。随着高速重载铁路的迅速发展,对钢轨质量及性能也不断提出了更新、更高的要求。钢轨在使用过程中的主要失效形式是磨损、疲劳及断裂^[1]。在交变应力作用下钢轨会萌生微观裂纹,若没有得到及时处理就可能扩展为宏观裂纹,而宏观裂纹一旦扩展到其临界值就会发生骤然失稳,而引起钢轨的疲劳断裂,严重危及列车的行车安全。近年来,在我国第一条准高速线广深铁路上出现了钢轨斜线状裂纹,裂纹迅速扩展后可造成钢轨断裂,而从线路实际调查发现,若区段钢轨侧磨严重,钢轨斜裂纹现象就轻微;对于重载铁路钢轨,则主要以侧磨、压溃、剥离掉块和波磨等失效为主^[2,3],重伤轨数每年以20%的速度递增。

PD3和U71Mn作为两种常用钢轨材质,在成分和力学机械性能等方面存在很大的差异,但它们都处于铁-碳合金相图的共析点上,其基本组织是珠光体^[4]。珠光体团中相邻两片渗碳体片或铁素体片中心之间的距离称为珠光体的片层间距。片层间距的大小主要取决于珠光体的形成温度,冷却速度越大,形成温度越低,片层间距越小;此外,片层间距的大小对材料力学和磨损与疲劳性能都具有很大的影响^[5,6]。

通过滚动磨损试验研究了两种钢轨的磨损与疲劳性能;结合钢轨的疲劳裂纹扩展行为分析了滚动磨损与疲劳损伤之间的相互作用关系,研究结果将对高速铁路钢轨的开发和选材提供重要的理论参考。

1 试验方法

试验在西南交通大学JD-1轮轨模拟试验机上进行;试验采用赫兹模拟准则进行^[7];模拟试样尺寸见图1(a)。模拟小轮试样取自钢轨轨头部分,试

收稿日期: 2010-04-27; 修回日期: 2010-05-12

基金项目: *国家自然科学基金项目(50875221,50905148)

作者简介: 王文健(1980—),男(汉),山东临沂人,副研究员。

样端面与钢轨踏面平行如图1(b)。

表1为试样材料的化学成分及含量;试验机模拟大轮材料含碳量为0.62~0.77%,硬度 ≥ 241 HV_{0.2}。

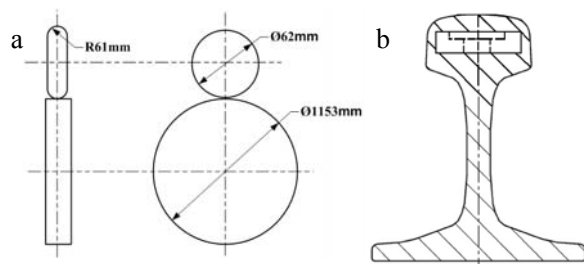


图1 试样尺寸(a)和钢轨轮试样截取(b)示意图
Fig.1 Scheme size (a) and positions from the rail rollers were taken (b)

表1 PD3 和 U71Mn 热轧钢轨的化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical composition of PD3 and U71Mn rails			
组成元素	C	Si	Mn
PD3	0.72~0.82	0.65~0.90	0.75~1.05
U71Mn	0.65~0.77	0.15~0.35	1.00~1.50
组成元素	V	P	S
PD3	0.05~0.12	≤ 0.035	≤ 0.035
U71Mn		≤ 0.035	≤ 0.035

试验中通过滚轮转速来模拟现场的车速;通过垂向载荷来模拟现场的轴重;曲线半径由模拟试验冲角来实现。试验参数1号试验:轴重16 t、曲线半径1200 m;2号试验:轴重21 t、曲线半径1200 m;3号试验:轴重25 t、曲线半径800 m。模拟车速均为160 km/h。滚动磨损试验在干态下进行;模拟小轮循环次数 10^6 ,摩擦因数为0.2。用TG328 A型机械式光电分析天平(精度0.1 mg)通过称重法测量钢轨试样磨损量,通过光学显微镜(OM)及扫描电子显微镜(SEM)观察表面磨痕形貌及裂纹形成情况。

2 试验结果与分析

图2给出了PD3图(a)和U71Mn图(b)两种钢轨的微观组织 SEM 照片。从图中可看出,两种钢轨均为珠光体钢轨,U71Mn 钢轨的组织更为细密,即珠光体间距更小,从而使两种钢轨的耐磨性和抗疲劳性能表现出一定的差异。

图3为3种工况下PD3和U71Mn钢轨试样的磨损量。结果表明所有工况下U71Mn的磨损量均大于PD3钢轨;对于同种钢轨材料,随轴重的增加

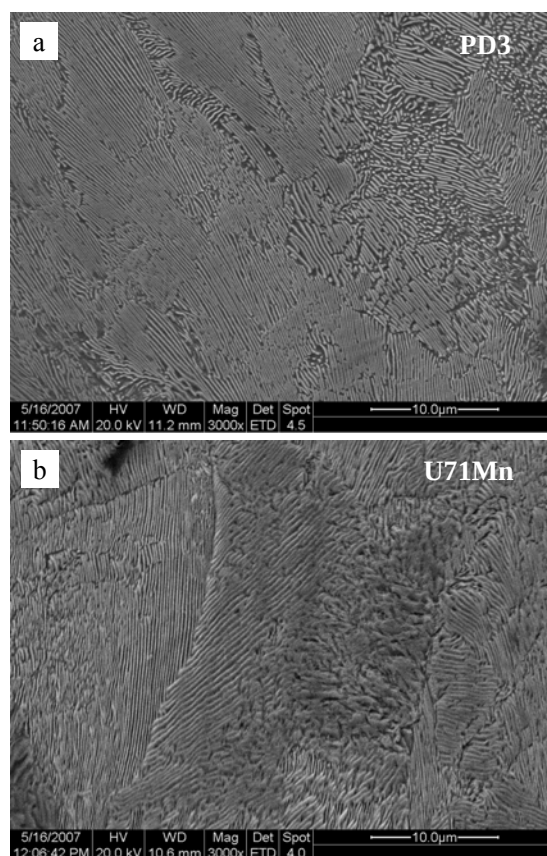


图2 钢轨试样微观组织照片
Fig.2 SEM photographs of rail roller structure

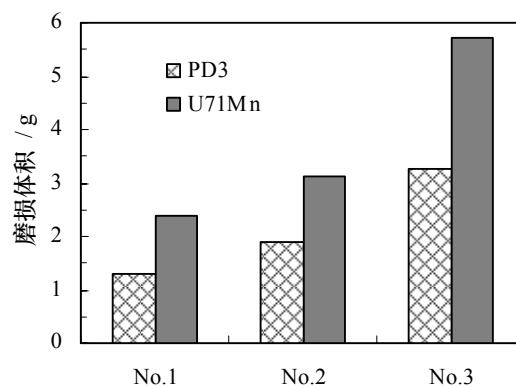


图3 钢轨试样磨损量
Fig.3 Wear volume of rail roller

和曲线半径的减小,钢轨磨损量迅速增加。由于U71Mn钢轨的含碳量较PD3要低,导致U71Mn的硬度较小,故耐磨性不如PD3钢轨。

从试样的宏观形貌(图4)中可发现PD3钢轨的表面磨痕形貌较U71Mn钢轨有较大的差异,PD3钢轨的磨痕宽度小于U71Mn,但表面压痕较深,磨损较为粗糙;U71Mn钢轨的表面磨痕形貌较为平滑,无较明显及较深的沟槽出现,这可能是由于在滚动过程中U71Mn钢轨的磨损量较大而来不及

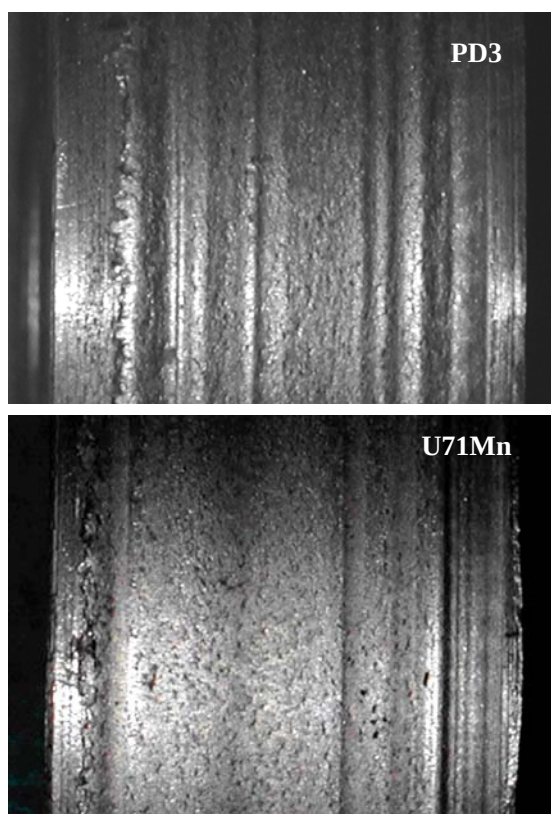


图4 钢轨试样磨痕形貌 OM 照片
Fig.4 OM photographs of rail roller

形成龟裂及材料堆积所造成, 相比而言, PD3 钢轨的磨损量小, 在磨损过程中由于振动等因素材料不容易磨耗掉而发生塑性变形, 塑变的累积造成了沟槽磨痕形貌。

图 5 给出了两种钢轨的表面疲劳损伤情况, 图 6 为对应的试样剖面的 OM 照片。从图中可看出, PD3 钢轨试样磨痕表面有已经出现了明显的疲劳裂纹现象, 疲劳微裂纹已沿与表面夹角约为 15° ~ 20° 的方向向材料纵深方向扩展且裂纹长度较长(图 6), 裂纹的继续扩展将导致材料的剥离掉块, 严重的可能导致钢轨的断裂失效。相比而言, U71Mn 钢轨表面疲劳微裂纹裂纹长度很短 (图 6), 在随后的滚动磨损过程中由于磨损量较大 (图 3), 裂纹来不及扩展就可能被磨耗掉, 因此 U71Mn 钢轨表现出更好的抗疲劳损伤性能。由于 U71Mn 钢轨含碳量的降低使其具有更好的韧性, 良好的塑性变形能力在一定程度上减缓了疲劳微裂纹的形成与扩展。虽然 U71Mn 钢轨磨损严重, 但它表现出更好的抗疲劳性能。由于钢轨疲劳裂纹主要在铁素体中萌生与扩展, 疲劳裂纹在铁素体中萌生后, 在交变应力的继续作用下会继续扩展。由于珠光体的片层结构导致

裂纹要在珠光体中扩展需要很高的能量, 而且珠光体片层间距越小, 扩展阻力就越大, 需要的能量越高, 裂纹越不容易扩展, 因此认为珠光体钢轨的疲劳裂纹扩展速率主要取决于珠光体的片层间距^[4], 故实际中通过细化珠光体片间距可有效减缓钢轨的疲劳裂纹扩展速率, 延长钢轨疲劳寿命。

PD3 钢轨虽然磨损轻于 U71Mn 钢轨, 但疲劳损伤较严重, 且疲劳裂纹扩展速率大于 U71Mn 钢

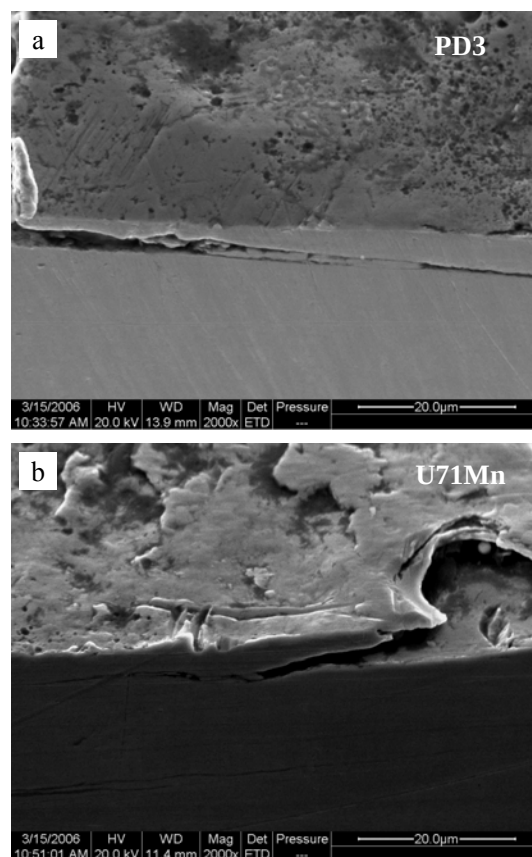


图5 钢轨试样磨痕形貌 SEM 照片
Fig.5 SEM microscopy photographs of rail roller

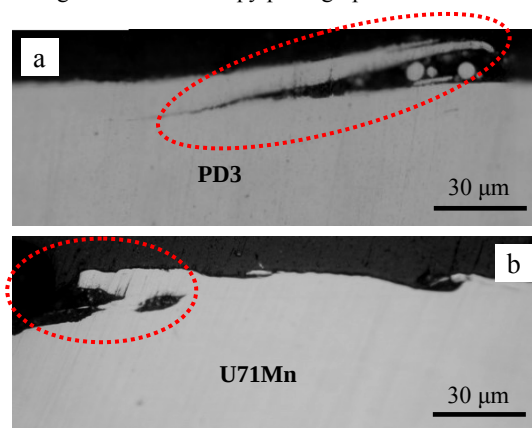


图6 钢轨试样剖面 OM 照片
Fig.6 OM photographs of cross-section of rail roller

轨,因此钢轨的磨损性能与疲劳性能是两种不同的材料特性。如果裂纹尖端扩展速率大于因表面材料磨损对裂纹根部的截断率,则裂纹能继续扩展;反之,裂纹长度将随磨损的进行不断缩短,直至裂纹彻底被磨掉^[8]。因此,滚动磨损与疲劳损伤之间存在着相互竞争与制约的作用关系,这主要表现为磨损严重时,疲劳损伤往往较轻;而疲劳损伤严重时,磨损相对轻微。广深铁路高速钢轨斜裂纹的疲劳损伤情况表明,钢轨侧磨严重时,钢轨斜裂纹现象就表现轻微^[9]。实际中根据表面磨损与疲劳裂纹扩展之间的相互作用关系,通过钢轨打磨磨损率^[9,10],可以有效地降低钢轨疲劳裂纹损伤行为,延长其使用寿命。

3 结 论

(1) U71Mn 钢轨的磨损量大于 PD3 钢轨, U71Mn 表现出更好的抗疲劳性能。

(2) 钢轨磨损与疲劳裂纹之间表现为相互竞争与制约的关系; 增加磨损率可减轻疲劳损伤。

参考文献:

- [1] 金学松, 刘启跃. 轮轨摩擦学 [M]. 北京: 中国铁道出版社. 2004.
- [2] 刘启跃, 张波, 周仲荣. 铁路钢轨损伤机理研究 [J]. 中国机械工程, 2002, 13(18): 1596-1599.
- [3] Stuart Grassie, Paul Nilsson, Kjell Bjurström, et al. Alleviation of rolling contact fatigue on Sweden's heavy haul railway [J]. Wear, 253(2002): 42-53.
- [4] 孙淑华. 显微组织对珠光体钢疲劳裂纹扩展速率的影响 [J]. 物理测试, 2004, (2): 7-10.
- [5] 李卫国, 彭向和. 具有片层状结构珠光体团的有限元分析 [J]. 重庆大学学报, 2005, 28(11): 110-113.
- [6] Akhmad A K, Miyashita Y, Mutoh Y, et al. Fatigue crack growth behavior in ferritic-pearlitic steels with networked and distributed pearlite structures [J]. International Journal of Fatigue, 2007, 29: 1140-1148.
- [7] 刘启跃, 张波, 周仲荣, 等. 滚动轮波形磨损实验研究 [J]. 摩擦学学报, 2003, 23(2): 132-135.
- [8] Kapoor A, Fletcher D I, Franklin. The role of wear in enhancing rail life [J]. Tribology Research and Design for Engineering Systems, 2003 Elsevier B V, 331-340.
- [9] 王文健, 陈明韬, 郭俊, 等. 高速铁路钢轨打磨技术及

其应用 [J]. 西南交通大学学报, 2007, 42(5): 574-577.

- [10] Kapoor, Schmid F, Fletcher D I. Managing the critical wheel/rail interface [J]. *Railway Gazette International*, 2002, 158(1): 25-28.

作者地址:成都市二环路北一段111号 610031

西南交通大学摩擦学研究所

Tel: (028) 8763 4304

E-mail: wwj527@163.com

❖ ❖

(上接第 105 页)

- sputtering for GaN growth [J]. Nucl. Inst. Meth. B, 2007, 262: 189-193.
- [7] Hurkmans T, Lewis D B, Paritong H, et al. Influence of ion bombardment on structure and properties of unbalanced magnetron grown CrN_x coatings [J]. Surf. Coat. Technol., 1999, 114: 52-59.
- [8] Pelleg J, Zevin L Z, Lungo S. Reactive sputter deposited TiN films on glass substrates [J]. Thin Solid Films, 1991, 197: 117-128.
- [9] Fornies E, Escobar R, Galindo H, et al. Growth and characterization of CrN deposited by DC reactive magnetron sputtering [J]. Surf. Coat. Technol., 2006, 200: 6047-6053.
- [10] Kondo A, Oogami T, Sato K, et al. Structure and properties of cathodic arc ion plated CrN coatings for copper machining cutting tools [J]. Surf. Coat. Technol. 2004, 177-178: 238-244.

作者地址: 武汉大学物理系加速器实验室 430072

Tel: (027) 68753587

E-mail: djfu@whu.edu.cn

[illegible]

•本刊讯•

《表面工程的理论与技术》出版

由徐滨士院士、朱绍华教授主编的《表面工程的理论与技术》是 99 年版再版后的修订版。书中阐述了表面工程的内涵、学科体系及发展表面工程的意义,探讨了贯穿于各种表面技术之中的基本科学技术问题,融入了复合表面工程、纳米表面工程、表面自修复技术和自动化表面技术等方面的最近研究成果。

(魏世承 供稿)