

三种钢轨材料与车轮匹配时滚动磨损与损伤行为

丁昊昊, 付志凯, 郭火明, 周琰, 王文健*, 刘启跃

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室摩擦学研究所, 四川 成都 610031)

摘要: 利用 WR-1 轮轨滚动磨损试验机研究了 U71Mn、PD3、PG4 三种钢轨与 AAR-B 车轮材料匹配时的滚动磨损与损伤性能。结果表明: 不同钢轨材料的微观组织结构明显不同, 钢轨硬度对轮轨滚动摩擦系数基本无影响; 随钢轨硬度增加, 钢轨磨损率减小, 车轮磨损率增大, 轮轨系统总磨损率先减小后增大。随试验时间增加, 不同钢轨试样的硬化率趋于一致, 车轮试样硬化率随钢轨试样硬度的增加而变大, 轨轮硬度比随试验时间增加趋于相同。钢轨材料对轮轨试样表面损伤形貌有一定影响, 随钢轨硬度增加轮轨表面犁沟现象明显, 钢轨试样表面剥落损伤减轻且塑性变形层变薄, 出现了明显的疲劳裂纹损伤, 钢轨硬度增加导致车轮试样表面剥落加重且塑性变形层变厚; 轮轨试样表层出现明显的白层现象, 且车轮试样的白层更厚。

关键词: 轮轨材料; 材料匹配; 摩擦; 磨损; 损伤

中图分类号: TH117.3

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2014)03-0233-07

Rolling Wear and Damage Behaviors between Three Kinds of Rail Materials and Wheel Material

DING Hao-hao, FU Zhi-kai, GUO Huo-ming, ZHOU Yan, WANG Wen-jian*, LIU Qi-yue

(Tribology Research Institute,

State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The rolling wear and damage characteristics between three kinds of rails (U71Mn, PD3 and PG4) and AAR-B wheel material were investigated using a WR-1 wheel/rail rolling wear testing apparatus. The results show that three kinds of rail materials exhibited different microstructure. The hardness of rail material had no obvious effect on rolling friction coefficient of wheel/rail specimens. With an increase of rail hardness, the wear rate of rail specimen decreased and the wear rate of wheel specimen increased. Furthermore, total wear rate of wheel/rail specimens firstly decreased and then increased. The hardening rates of different rail specimens were tending to be the same with an increase of testing time. However, the hardening rates of wheel specimens obviously increased with an increase of rail hardness. The hardness ratios of rail/wheel specimens tended to be identical after a certain testing time. The rail material had an important effect on the surface damage morphology of wheel/rail specimens. With an increase of rail hardness, the surface ploughing of rail specimens became obvious. The surface spalling damage and plastic deformation of rail specimens alleviated. Furthermore, there was obvious fatigue crack on the rail specimens. However, the increase of hardness of rail material resulted in aggravating the spalling damage and plastic deformation of wheel specimens. The wheel/rail specimens exhibited obvious white layer and the white layer of wheel specimens were thicker than that of rail.

Key words: wheel/rail material, material matching, friction, wear, damage

Received 10 July 2013, revised 1 September 2013, accepted 8 October 2013, available online 28 May 2014.

* Corresponding author. E-mail: wuj527@163.com, Tel: +86-28-87634304.

The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (51174282, U1134202) and project supported by the National Basic Research Program of China (973 program, 2011CB711103).

国家自然科学基金项目(51174282, U1134202)和国家重点基础研究发展计划项目(973 计划, 2011CB711103)资助。

轮轨摩擦副是铁路运输工具的关键部件,大小约为 100 mm^2 的接触斑在轮轨间各种载荷的反复作用下容易形成轮轨接触表面剥离、擦伤、波浪形磨损、压溃,甚至引发断裂等损伤现象^[1-6]. 为了提高轮轨的使用寿命,除了设计合理的轮轨几何外形、优化轮轨维修准则外^[7],轮轨材料的合理匹配也成为重要的研究内容^[8]. Perez Unzueta 等^[9]对化学成分相似、珠光体片层间距不同的四种珠光体钢轨钢进行了纯滑和滚滑磨损试验,通过观测钢轨钢微观组织变化以此解释珠光体钢轨钢的磨损机制和抗磨性能. Ki Myung Lee 等^[10]先由铁路现场轨道上获取贝氏体和珠光体钢轨钢样品,通过测量样品硬度值来研究珠光体钢轨钢抗磨性能优于贝氏体钢轨钢的原因,后又通过实验室纯滑动试验再次验证上述结论. 王文健等^[11]通过试验手段研究了干态下两种钢轨(U71Mn 热轧和 PD3 热轧钢轨)的滚动磨损与疲劳性能. 李加驹等^[12]利用 M-200 试验机研究了轮轨硬度与干态滚滑磨损间的关系.

目前关于轮轨材料的匹配研究仍不充分,匹配方案也尚不完善. 利用 WR-1 轮轨滚动磨损试验机开展滚滑试验,通过分析磨损率、表面磨痕损伤、塑性变形、裂纹及白层等变化情况,研究了三种不同钢轨与车轮材料的滚动磨损与损伤匹配行为. 研究结果可为认识轮轨材料损伤机制、合理选用轮轨材料起到有益的指导作用.

1 实验部分

试验在 WR-1 轮轨滚动磨损试验机上进行,试验中通过两个轮形试样的对滚方式来模拟轮轨接触

状态,上试样为车轮试样,下试样为钢轨试样,两个试样的直径均为 40 mm . 试验采用赫兹模拟准则,即保证实验室条件下轮轨试样间的平均接触应力和椭圆形接触斑的长短轴之比与现场工况相同^[13]. 轮轨试样的结构与尺寸如图 1 所示.

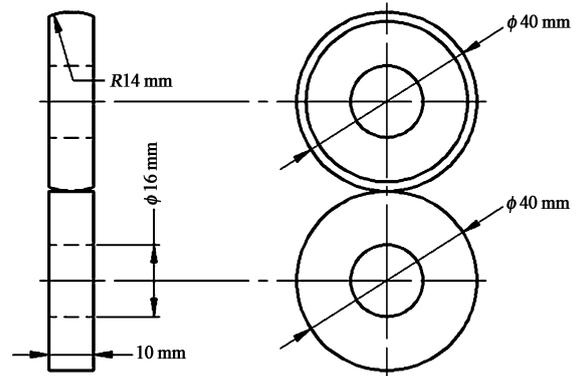


Fig. 1 Scheme size of wheel/rail specimens

图 1 轮轨试样尺寸示意图

试验参数:法向载荷 180 N 来模拟现场 25 t 轴重,平均接触应力为 1500 MPa ,其中动载系数 K 取 0.3 ;下试样转速 200 r/min ,上试样转速 180 r/min ,滑差率 10% ;试验时间 18 h . 车轮试样取自 AAR-B 车轮踏面处,钢轨试样取自三种不同钢轨材料轨头,其钢轨分别为 U71Mn 热轧、PD3 热轧和 PG4 钢轨,试验编号为 1[#]、2[#]、3[#],轮轨试样的化学成分见表 1.

试验在常温干态下进行,利用电子分析天平(JA4103)测量试样试验前后质量,以此计算轮轨试样的磨损率;利用维氏硬度仪(MVK-H21, Japan)测量试样的硬度值;利用扫描电子显微镜(SEM)

表 1 轮轨材料化学成分

Table 1 Chemical composition of wheel/rail materials

Wheel/rail materials	C	Si	Mn	P	S
U71Mn, hot rolling	0.65 ~ 0.76	0.15 ~ 0.35	1.00 ~ 1.40	≤ 0.030	≤ 0.030
PD3, hot rolling	0.71 ~ 0.80	0.50 ~ 0.80	0.70 ~ 1.05	≤ 0.030	≤ 0.030
PG4, steel rail	0.72 ~ 0.82	0.50 ~ 0.80	0.70 ~ 1.05	≤ 0.030	≤ 0.030
Wheel material	0.57 ~ 0.67	0.15 ~ 1.00	0.60 ~ 0.90	0.030	0.005 ~ 0.04

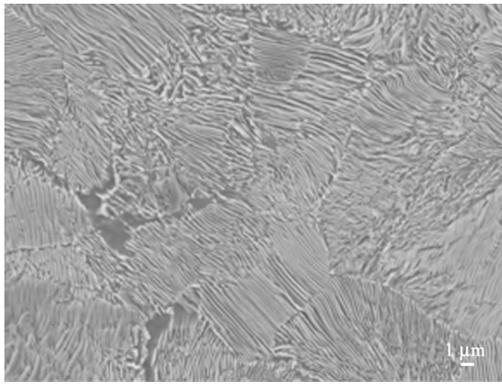
(JSM-7001F, Japan) 和光学显微镜(OM)(OLYMPUS BX60M, Japan)分析试样磨损后的表面磨痕损伤形貌、塑性变形和白层形成情况.

2 结果与讨论

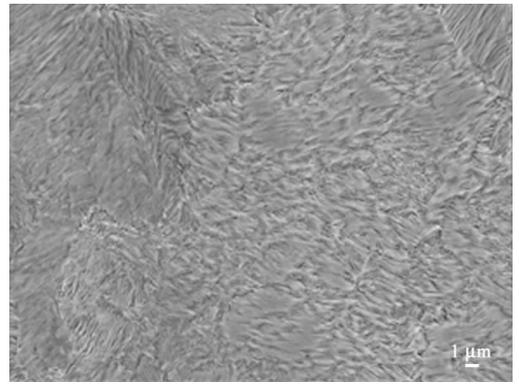
2.1 滚动摩擦行为

图 2 给出了试验前轮轨试样经 4% (体积百分

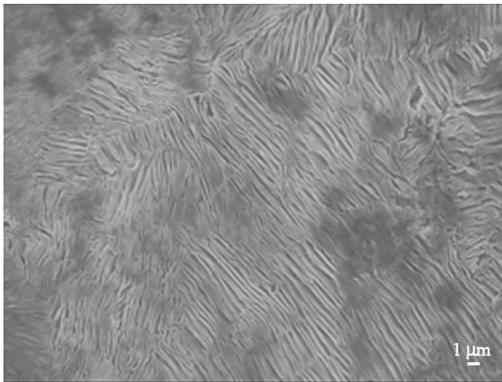
数)硝酸酒精溶液腐蚀后的微观组织照片. 从图 2 中可看出三种钢轨材料均主要由珠光体构成. U71Mn 热轧钢轨钢的微观组织结构为整齐排列的片状珠光体,在珠光体之间存在少量铁素体,PD3 热轧钢轨钢的珠光体中渗碳体片层更加稠密,珠光体间的铁素体更少,PD4 钢轨钢的珠光体间基本观察不到铁素体. AAR-B 车轮钢由珠光体和较多的铁素体组成.



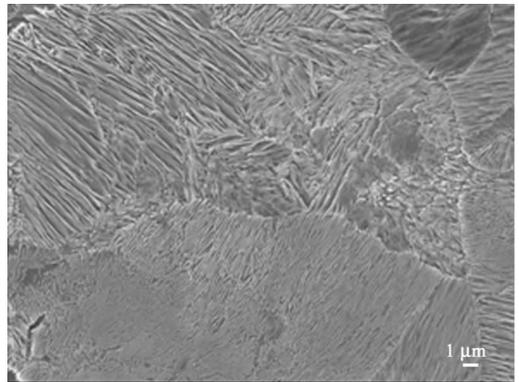
(a) U71Mn rail



(b) PD3 rail



(c) PD4 rail



(d) AAR-B wheel

Fig. 2 SEM micrographs of rail and wheel specimen structure

图2 轮轨试样微观组织照片

图3为试验前测得的轮轨试样硬度.从图3中可看出,钢轨材料U71Mn热轧钢轨、PD3热轧钢轨、PG4钢轨的硬度依次增加,AAR-B车轮的硬度比钢轨硬度小,这主要是由于轮轨材料的含碳量不同所导致的,含碳量越高硬度越高.图4为实验过程中轮轨滚动摩擦系数曲线.摩擦系数曲线大致可以分为两个阶段,第一阶段为跑合阶段,因为试样加工表面光滑并吸附有保护膜,所以初始阶段摩擦系数较

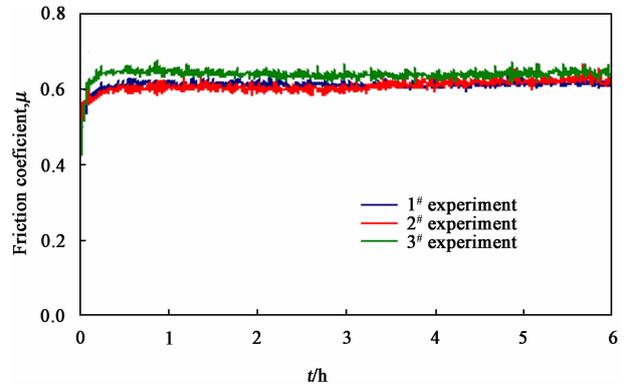


Fig. 4 Friction coefficient of wheel/rail specimens

图4 轮轨试样滚动摩擦系数

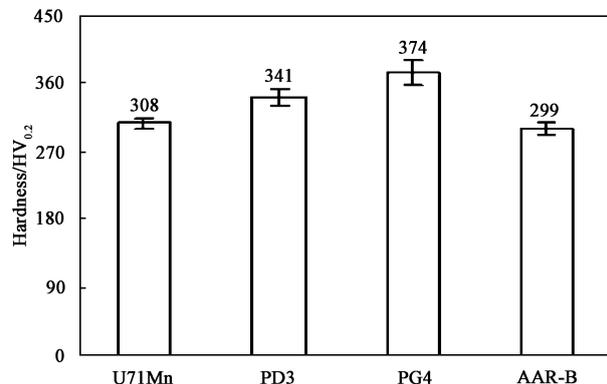


Fig. 3 The hardness of rail/wheel specimens

图3 钢轨车轮试样硬度

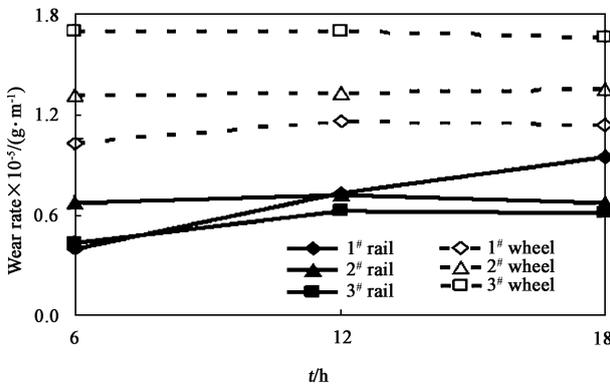
小,滚动过程中光滑的加工表面和吸附膜遭到破坏,试样表面变得粗糙,摩擦系数迅速上升.第二阶段为稳定阶段,经过跑合阶段后,轮轨接触表面状态达到动态平衡,摩擦系数曲线趋于平稳.从图4中可发现,不同钢轨和车轮匹配时滚动摩擦系数相差不大,均维持在0.62左右,这说明U71Mn热轧、PD3热轧、PG4三种钢轨材料对滚动摩擦系数无明显影响.

2.2 滚动磨损行为

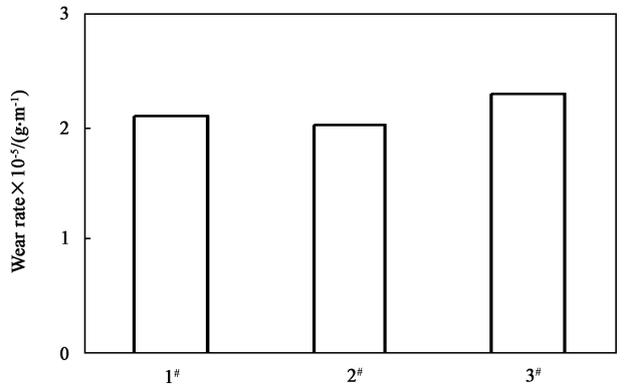
图5给出了轮轨试样的磨损率(磨损量与滚动距离比值).从图5中看出,车轮试样磨损率大于钢轨试样磨损率,这是因为车轮硬度低于钢轨硬度;从图5(a)中还可以看出,车轮试样磨损率随时间变化不大,钢轨试样磨损率随时间变化存在差异,1#钢轨试样的磨损率随时间有较大的增加,2#钢轨试样和3#钢轨试样的磨损率相对稳定.最终的磨损率表明U71Mn 热轧钢轨、PD3 热轧钢轨、PG4 钢轨的磨损率逐渐减小,这表明钢轨材料随着含碳量和硬度的

增加,耐磨性能得到增强.随着钢轨含碳量和硬度的增加,对摩副 AAR - B 车轮的磨损率呈增加趋势,这表明钢轨含碳量和硬度的增加,降低了车轮的磨损寿命[图5(a)].从轮轨系统的角度分析可知,轮轨总磨损率随钢轨材料含碳量和硬度的增加呈现先降低后增加的趋势[图5(b)],这表明通过改变钢轨材料来降低车轮磨损率的同时会导致轮轨总磨损率发生变化.

图6给出了轮轨试样磨损表面硬化率和硬度比变化.结果表明:钢轨的硬化率呈现先明显增加后稍



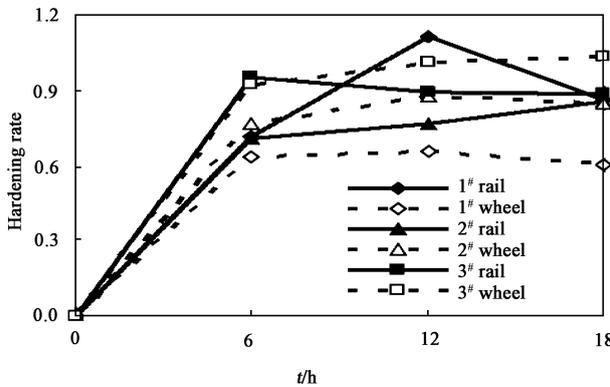
(a) Wear rate of wheel/rail specimens



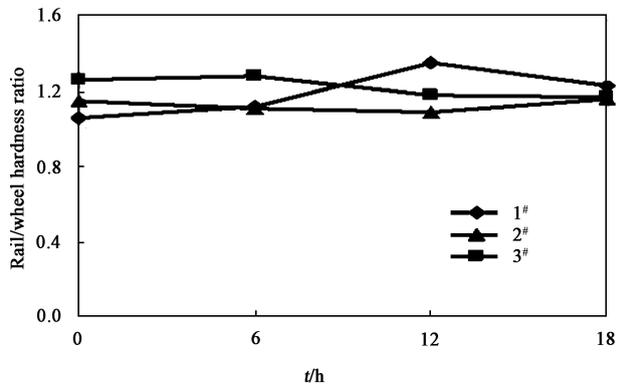
(b) Total wear rate

Fig. 5 The wear rate of wheel/rail specimens

图5 轮轨试样磨损率



(a) The hardening rate



(b) The hardness ratio

Fig. 6 The hardening rate and ratio of wear surface of rail/wheel specimens

图6 轮轨试样磨损表面硬化率和硬度比变化

微降低的趋势,并且前12 h的试验过程中,不同材料钢轨的硬化率不同,当试验达到18 h时,不同材料钢轨的硬化率趋于一致,硬化率大约为0.86,这是因为滚动过程中表面加工硬化使得磨损表面的硬化率呈现明显的增加趋势,磨损表面的磨屑剥落使得加工硬化层变薄,从而降低了表面硬化率,当表面加工硬化和剥落达到动态平衡时,钢轨的硬化率趋

于稳定,并且不同材料钢轨稳定后的硬化率趋于相同.从图6(a)中还可发现:同一种车轮材料与不同钢轨材料滚动摩擦后的硬化率不同,对摩钢轨试样硬度越大,车轮试样的硬化率越大.图6(b)中的结果表明试验初期轮轨试样硬度比(钢轨硬度与车轮硬度的比值)相差较大,当试验进行18 h后轮轨硬度比接近,硬度比大约为1.2,这是因为车轮试样硬

度小于钢轨试样,而钢轨试样的硬度越大,对摩副车轮试样的硬化率越大,最后导致轨轮硬度比接近.同时 1#钢轨硬化比曲线呈现较为明显的先增加后减小的趋势,这是因为 1#钢轨硬化率呈现比较明显的先增加后减小的趋势,1#车轮硬化率较小并且稳定.

2.3 轮轨表面损伤行为

图 7 给出了轮轨试样表面损伤 SEM 照片,图 8 为对应的轮轨试样剖面塑性变形.从钢轨试样 SEM 照片中可看出,随着钢轨试样硬度增加,钢轨试样犁沟现象变得明显,塑性变形层变薄[图8(a)],这是

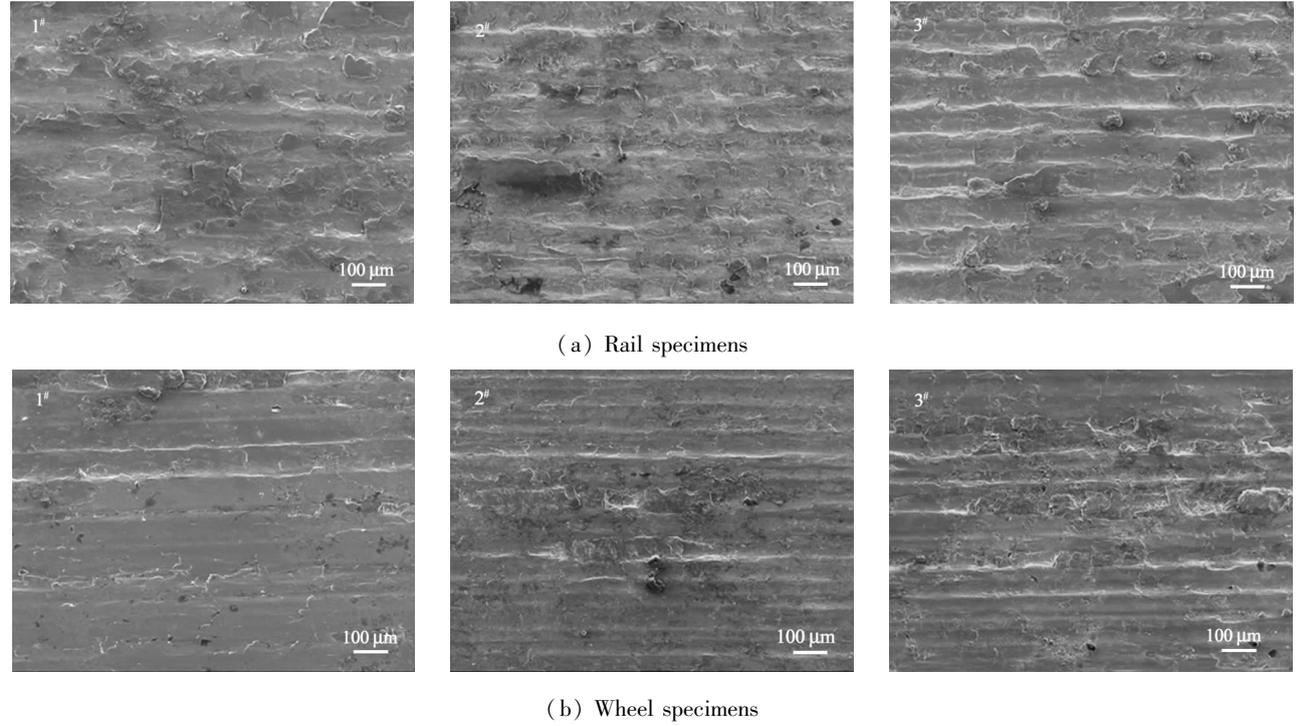


Fig. 7 SEM micrographs of surface damage of rail/wheel specimens

图 7 轮轨试样表面损伤 SEM 照片

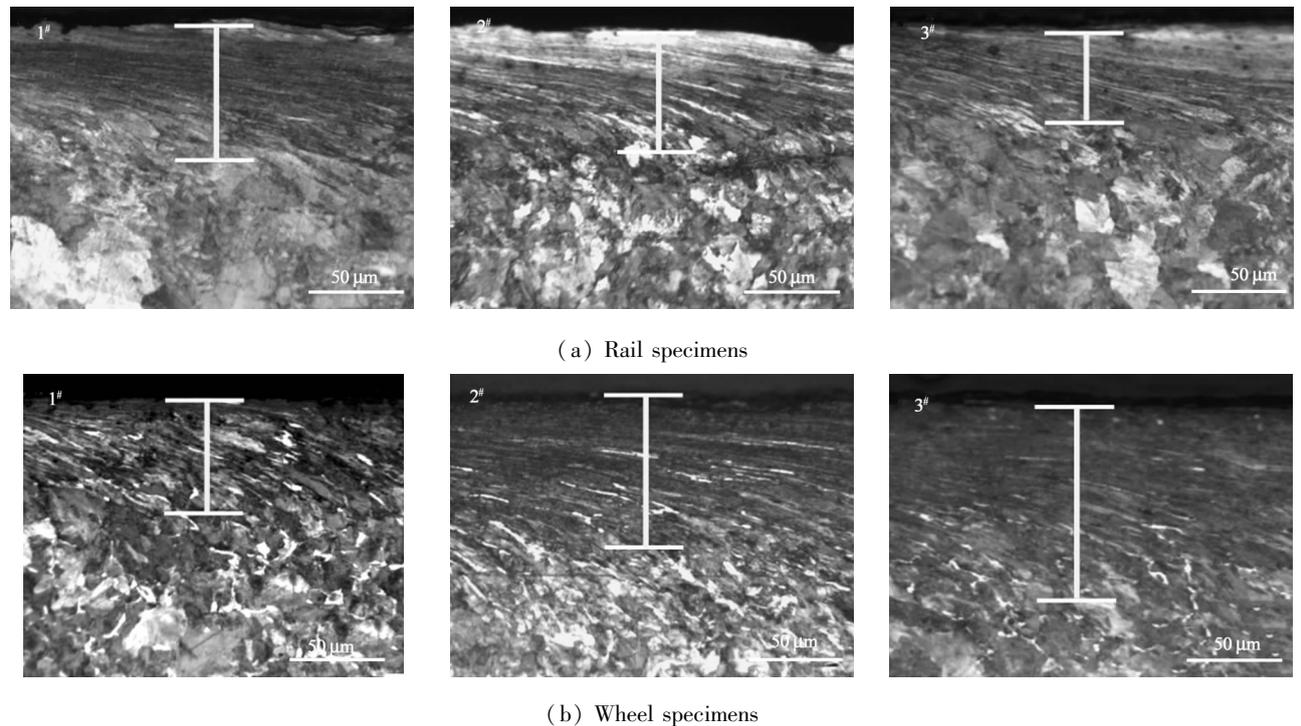


Fig. 8 OM micrographs of plastic deformation of wheel/rail specimens

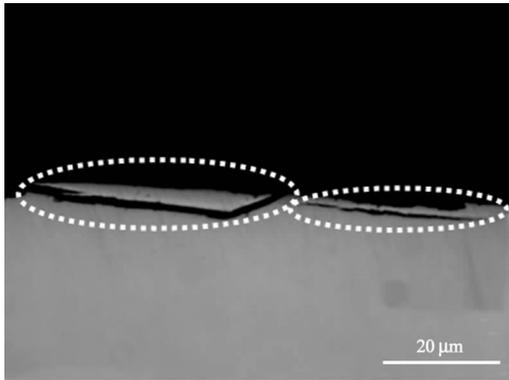
图 8 轮轨试样塑性变形 OM 照片

因为钢轨硬度提高导致材料抵抗塑性变形的能力增强,故钢轨塑性变形呈现减轻趋势. 钢轨试样硬度较低时,在反复的滚动摩擦过程中大量以块状剥落为特征的磨屑很容易从钢轨表面剥落,从而形成较严重的块状剥落损伤,此时对应的钢轨试样塑性变形层厚度最大[图 8(a)]. 从车轮试样 SEM 照片[图 7(b)]可看出,车轮试样表面均存在明显的犁沟现象,且犁沟方向和轮轨试样滚动方向一致,随着对摩钢轨硬度增加,车轮试样表面剥落损伤加重,同时表面磨痕的犁沟现象也更加明显,对应的车轮试样塑性变形层也随钢轨硬度增加变得更明显[图 8(b)]. 上述结果表明,钢轨硬度的增加可明显提高钢轨抵抗塑性变形能力和耐磨损能力,导致钢轨试样磨损机制从轻微犁沟与明显的剥落损伤并存向犁沟与轻微剥落损伤并存转变,而对摩车轮材料的磨损及塑性变形更加严重,使其磨损机制从轻微犁沟向犁沟与剥落损伤并存转变.

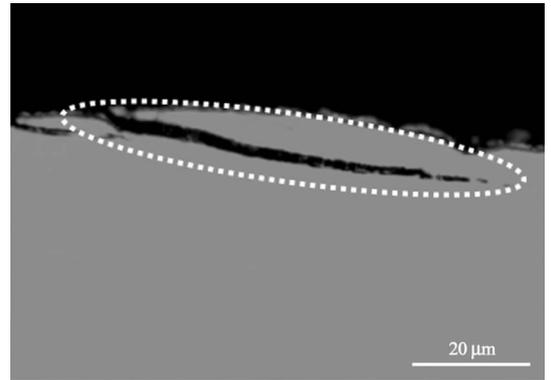
周期性高摩擦力作用形成塑性变形,在摩擦力下裂纹进一步扩展,起源于试样表层或次表层的裂纹以较小角度或平行方向扩展[图 9(a)],到达一定深度后裂纹方向折向表面,最后与表面连通,形成试样表面片状剥落掉块[图 7(a)]. 随硬度的增加,钢轨材料抵抗塑性变形能力变强,更容易形成向下扩展的疲劳裂纹并得到快速扩展[图 9(b)],扩展所形成的疲劳裂纹更加严重. 图 10 为轮轨试样的白层 OM 照片. 由于试样受高摩擦力作用在轮轨接触区因滚滑摩擦而产生局部高温,试样表面通过“热-机械作用”形成白层. 从图 10 观察发现,轮轨试样表层均出现了白层,轮轨试样白层由于硬而脆的特性在随后的滚动接触中更容易形成表面剥落损伤. 通过比较发现,钢轨试样表面白层厚度较小,不同钢轨试样表面白层现象无明显规律,相对而言车轮试样表面的白层厚度更加明显[图 10(b)],这可能是由于车轮材料硬度较小,塑性变形较大所导致.

图 9 为钢轨试样的疲劳裂纹情况. 轮轨表面受

综上所述表明:钢轨材料的不同可以造成轮轨



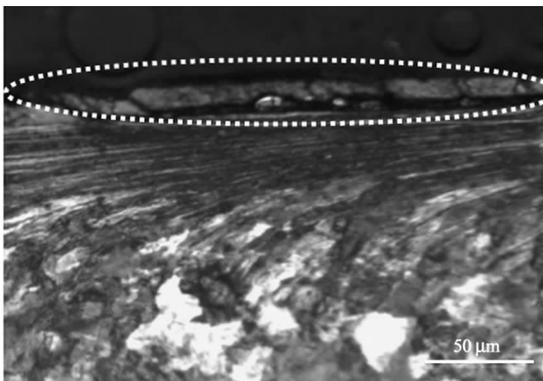
(a) 1[#] rail specimen



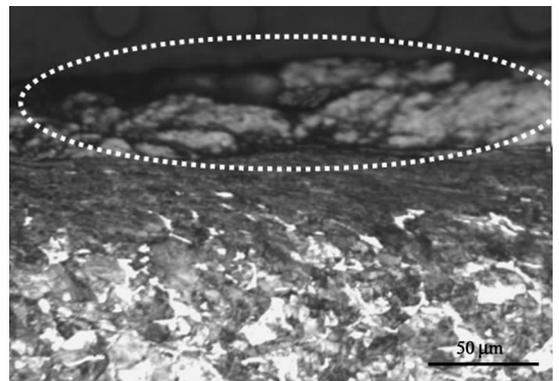
(b) 3[#] rail specimen

Fig. 9 OM micrographs of surface cracks of rail specimens

图 9 钢轨试样表面裂纹 OM 照片



(a) Rail specimen



(b) Wheel specimen

Fig. 10 OM micrographs of surface white layer of rail/wheel specimens

图 10 轮轨试样表面白层 OM 照片

硬度、磨损率和表面损伤的明显差异。钢轨硬度的增加可以提高钢轨的抗磨损能力,但降低了钢轨的抗疲劳能力,同时也加剧了对摩车轮的磨损和表面损伤。滚滑试验后车轮和钢轨试样硬度均有所增加,且轨轮硬度比趋于一致。实际中在轮轨材料的优化匹配时,要同时考虑车轮与钢轨材料的磨损和表面损伤情况,特别是要协调轮轨的抗磨损和抗疲劳能力,以期达到车轮材料和钢轨材料的最佳匹配,从而提高车轮和钢轨的综合使用寿命。

3 结论

a. 不同硬度钢轨与相同车轮材料匹配时滚动摩擦系数基本不变;不同钢轨试样的硬化率随时间变化趋于相同,车轮试样硬化率随钢轨试样硬度的增加而增大,轨轮硬度比随时间变化趋于一致。

b. 随钢轨硬度增加,钢轨磨损率减小,对摩车轮磨损率增大,总磨损率呈先减小后增加趋势。

c. 钢轨硬度对轮轨试样表面损伤形貌有明显影响;钢轨硬度增加使钢轨试样表面犁沟更加明显且减轻剥落损伤,并伴随有明显疲劳裂纹损伤;对摩车轮试样表面犁沟现象和剥落损伤随钢轨硬度增加变得严重。

d. 轮轨试样表层由于摩擦力作用出现明显的白层现象,车轮试样表层的白层更加明显。

参考文献:

[1] Wenjian Wang, Wen Zhong, Qiyue Liu, *et al.* Investigation on rolling wear and fatigue properties of railway rail [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2009, 223(7): 1 033 - 1 039.

[2] G Donzella, M Faccoli, A Ghidini, *et al.* The competitive role of wear and RCF in a rail steel [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2005, (72): 287 - 308.

[3] Deng J H, Liu Q Y, Wang F L, *et al.* Influence of train velocity on rail contact fatigue damage and how to select rail for high - speed [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2006, 27(3): 48 - 54 (in Chinese) [邓建辉, 刘启跃, 王飞龙, 等. 车速对钢轨接触疲劳损伤的影响及高速线路钢轨选用 [J]. 钢铁钒钛, 2006, 27(3): 48 - 54].

[4] Wen Z F, Jin X S, Liu X Q. Creepages and friction work of

wheelset and track with two type profiles in rolling contact [J]. Tribology, 2001, 21(4): 288 - 292 (in Chinese) [温泽峰, 金学松, 刘兴奇. 两种型面轮轨滚动接触蠕滑率和摩擦功 [J]. 摩擦学学报, 2001, 21(4): 288 - 292].

- [5] Wang B K, Dong G N, Liu Y H, *et al.* Shakedown analysis of rolling contact surface with short - wavelength corrugation [J]. Tribology, 2004, 24(1): 70 - 73 (in Chinese) [王步康, 董光能, 刘永红, 等. 钢轨短波长波浪形磨损的安定性分析 [J]. 摩擦学学报, 2004, 24(1): 70 - 73].
- [6] Guo J, Zhao X, Jin X S, *et al.* Analysis of wheel/rail thermal - mechanical coupling effects in sliding case [J]. Tribology, 2006, 26(5): 489 - 493 (in Chinese) [郭俊, 赵鑫, 金学松, 等. 全制动工况下轮轨热 - 机械耦合效应的分析 [J]. 摩擦学学报, 2006, 26(5): 489 - 493].
- [7] Dong X Q, Wang Y M, Wang L D, *et al.* Research on the reprofiling strategy for the wheel tread of high - speed EMU [J]. China Rail Way Science, 2013, 34(1): 88 - 94 (in Chinese) [董孝卿, 王悦明, 王林栋, 等. 高速动车组车轮踏面镟修策略研究 [J]. 中国铁道科学, 2013, 34(1): 88 - 94].
- [8] Guo J, Wang W J, Liu Q Y. Research progress of damage and material optimization matching of high - speed wheel/rail [J]. Lubrication Engineering, 2010, 35(9): 118 - 121 (in Chinese) [郭俊, 王文健, 刘启跃. 高速轮轨损伤及材料优化匹配研究进展 [J]. 润滑与密封, 2010, 35(9): 118 - 121].
- [9] A J Perez - Unzueta, J H Beynon. Microstructure and wear resistance of pearlitic rail steels [J]. Wear, 1993, 162 - 164: 173 - 182.
- [10] Ki Myung Lee, Andreas A Polycarpou. Wear of conventional pearlitic and improved bainitic rail steels [J]. Wear, 2005 (259): 391 - 399.
- [11] Wang W J, Guo J, Liu Q Y. Study on relationship between wear and rolling fatigue crack of wheel/rail and prevention measures [J]. China Surface Engineering, 2010, 23(3): 106 - 109 (in Chinese) [王文健, 郭俊, 刘启跃. 轮轨磨损与滚动疲劳裂纹损伤关系及预防研究 [J]. 中国表面工程, 2010, 23(3): 106 - 109].
- [12] Li J J, Yang K T, Ying H M, *et al.* Study on hardness matching between wheel and rail [J]. China Railway Science, 1984, 5(1): 49 - 59 (in Chinese) [李加驹, 杨开庭, 应惠敏, 等. 车轮和钢轨硬度匹配的研究 [J]. 中国铁道科学, 1984, 5(1): 49 - 59].
- [13] Wang W J, Liu Q Y, Zhu M H. Hardness matching behavior of wheel/rail materials [J]. Tribology, 2013, 33(1): 65 - 69 (in Chinese) [王文健, 刘启跃, 朱旻昊. 轮轨材料硬度匹配性能试验研究 [J]. 摩擦学学报, 2013, 33(1): 65 - 69].