

# 接触应力对轮轨材料滚动摩擦磨损性能影响

王文健, 郭俊, 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 MMS-2A 型微机控制摩擦磨损试验机研究了接触应力对轮轨材料的滚动摩擦磨损性能影响. 结果表明: 随接触应力的增加, 滚动摩擦系数呈增加趋势, 车轮和钢轨试样磨损加剧; 相同接触应力水平下, 车轮试样磨损量大于钢轨试样, 表面损伤严重; 随接触应力的增加, 车轮试样表面从犁沟且轻微剥落向严重剥落损伤转变, 钢轨试样表面损伤主要表现为犁沟效应并伴随有剥落现象, 但相比车轮试样的剥离损伤要轻微.

**关键词:** 滚动磨损; 车轮; 钢轨; 磨损机制; 接触应力

中图分类号: TH117.3

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2011)07-0352-05

## Effect of Contact Stress on Rolling Friction and Wear Behavior of Wheel – rail Materials

WANG Wen – jian, GUO Jun, LIU Qi – yue\*

(Tribology Research Institute,

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

**Abstract:** The effect of contact stress on rolling friction and wear behavior of wheel/rail materials were investigated using a MMS-2A testing apparatus. The results showed that the rolling friction coefficient would increase with the increase of contact stress, which resulted in the aggravation of wheel/rail wear. The wear mass of wheel specimen was larger than that of rail specimen under the same contact stress condition. Furthermore, the surface damage of wheel specimen was more severe. With the increase of contact stress, the damage of wheel specimen changed from the plough with slight delamination to serious spalling damage. However, the plough with spalling phenomena was dominant for the damage of rail specimen. But the spalling damage of rail specimen was more slight than that of wheel specimen.

**Key words:** rolling wear, wheel, rail, wear mechanism, contact stress

随着高速列车的发展和轴重的提高, 轮轨磨损及疲劳破坏现象日益严重, 我国每年用于更换和维修损伤轮轨的费用高达 80 多亿元, 轮轨突发性破坏导致列车脱轨而造成的直接和间接损失更是无法统计<sup>[1]</sup>. 现实中如果轮轨材料的硬度和韧性匹配不合理, 轮轨运行后出现的破坏现象不是以轮轨表面磨

损为主, 就是以滚动接触疲劳裂纹为主. 多年来, 众多研究者就轮轨材料的选择对轮轨磨损与疲劳裂纹损伤的影响进行了大量的试验和理论研究<sup>[2-6]</sup>. Perez – Unzueta 和 Beynon<sup>[7]</sup>对 4 种珠光体钢轨钢进行了纯滑和滚滑磨损试验, 调查了珠光体钢轨钢磨损过程中微观组织的变化和抗磨损性能. 李加驹

Received 15 November 2010, revised 17 December 2010, accepted 15 March 2011, available online 28 July 2011.

\* Corresponding author. E – mail: wwj527@163.com, Tel: +86 – 28 – 87634304.

The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (50875221), the National Science and Technology Support Program (2009BAG12A01 – B05 – 1) and the National Key Basic Research Program of China (973) (2007CB714702).

国家自然科学基金项目 (50875221)、国家科技支撑计划项目 (2009BAG12A01 – B05 – 1) 和国家重点基础研究发展计划项目 (973) (2007CB714702) 资助.

等<sup>[8]</sup>利用 M-200 试验机研究了轮轨硬度与滚滑干态磨损间的关系. 文献<sup>[9]</sup>研究了热处理钢轨的轨轮匹配关系,认为磨损率取决于轨轮间的硬度比,轨对轮硬度安全匹配区为 1.0~1.2. 研究表明<sup>[10]</sup>,重载铁路钢轨的失效主要是由于钢轨塑性变形及磨损导致,而高速铁路钢轨的失效主要由钢轨的接触疲劳及斜裂纹所导致.

为了解不同应力水平下的轮轨材料损伤机理,利用 MMS-2A 型微机控制摩擦磨损试验机研究了不同接触应力下轮轨材料的滚动摩擦磨损特性,分析了接触应力对轮轨材料损伤的影响机理. 研究结果可为轮轨材料的优化匹配提供有益的技术指导,也对降低轮轨损伤具有重要的指导意义.

## 1 实验部分

试验在 MMS-2A 型微机控制摩擦磨损试验机上进行,采用双轮对滚接触方式进行,通过双速电动机带动下试样轴和上试样轴转动. 试验采用赫兹模拟准则进行<sup>[11]</sup>,即保证实验室条件下模拟轮轨试件间的平均接触应力和接触椭圆的长短轴之比与现场中的相同. 试验过程中上试样为车轮试样,下试样为钢轨试样,两试样直径均为 40 mm,根据赫兹模拟准则计算得到车轮试样的圆弧半径  $R$  为 14 mm. 轮轨试样结构尺寸如图 1 所示.

试验参数:下试样转速 200 r/min,上试样转速 180 r/min,转动滑差率 10%;3 种接触应力水平分别为 1 000 MPa、1 300 MPa、1 600 MPa,对应的法向载荷为 70、150 和 250 N,其中动载系数取 0.2,3 种接触应力水平模拟现场轴重为 15、17 和 19 t;所有试验时间均为 100 h;钢轨材料为 U71Mn 热轧轨,车轮材料为高速车轮钢.

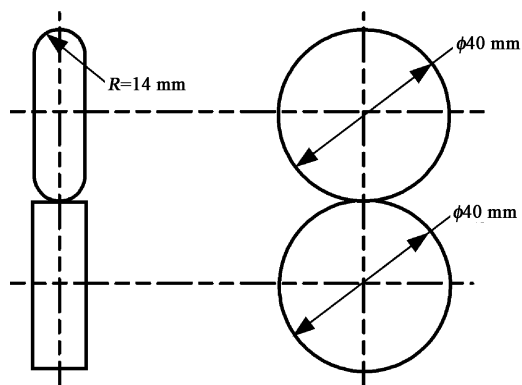


Fig. 1 Scheme size of wheel and rail rollers

图 1 轮轨试样尺寸示意图

试验在干态下进行;利用维氏硬度仪 (MVK-H21, Japan) 测量试样的硬度值;利用光学显微镜 (OLYMPUS BX60M) 测量试样的磨损宽度;用电子分析天平 (TG328A) 通过称重法测量试样磨损量;利用扫描电子显微镜 (SEM) (JSM-6490LV, Japan) 观察试样磨损后的表面磨痕损伤形貌.

## 2 结果与分析

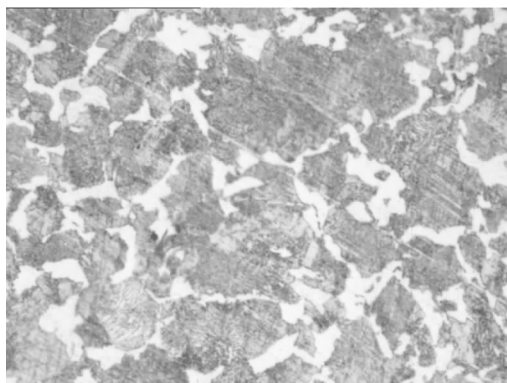
### 2.1 滚动摩擦行为

图 2 给出了轮轨试样的金相组织照片. 从图 2 中可看出:钢轨为珠光体钢轨,珠光体组织呈现细条状;车轮钢由铁素体和珠光体组织组成,其铁素体含量较多.

图 3 为不同接触应力水平下轮轨试样摩擦系数. 从图 3 可发现:随循环次数的增加,滚动摩擦副的摩擦系数首先呈现增加的趋势,一定循环次数后摩擦系数趋于稳定状态,由于转动过程中振动等因素的影响,使摩擦系数呈现一定的波动;接触应力越大,摩擦系数也越大,分析原因认为:接触应力大导



(a) Rail, 500 ×



(b) Wheel, 500 ×

Fig. 2 Metallographic structure of wheel/rail specimens

图 2 轮轨试样的金相组织照片

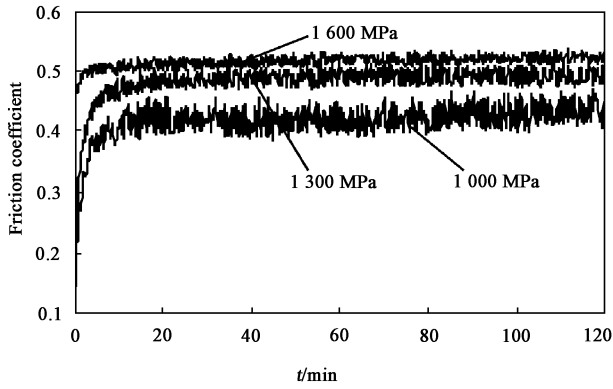
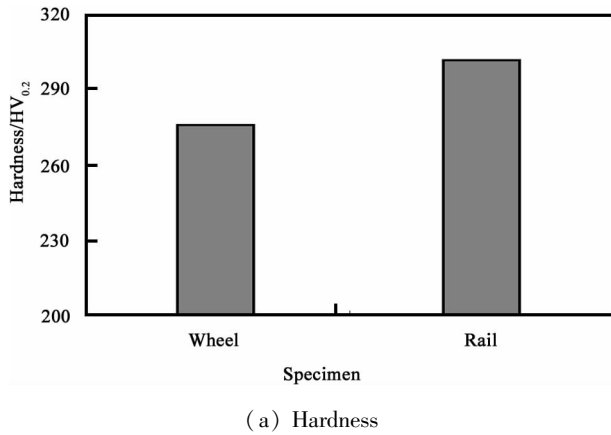


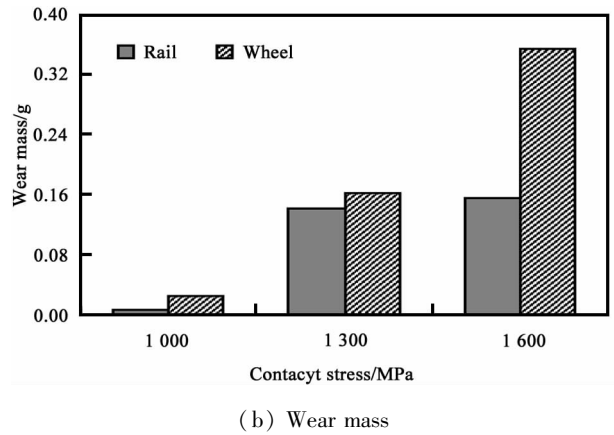
Fig. 3 Friction coefficient of wheel/rail specimens under different contact stress conditions

图3 不同接触应力水平下轮轨试样的摩擦系数

致试样间的接触面积增加,进而增大了切向摩擦力,从而导致摩擦系数增加,此外接触应力越大摩擦系数的波动范围越小,即摩擦过程相对越稳定。



(a) Hardness



(b) Wear mass

Fig. 4 Hardness and wear mass of wheel/rail specimens

图4 轮轨试样的硬度和磨质量

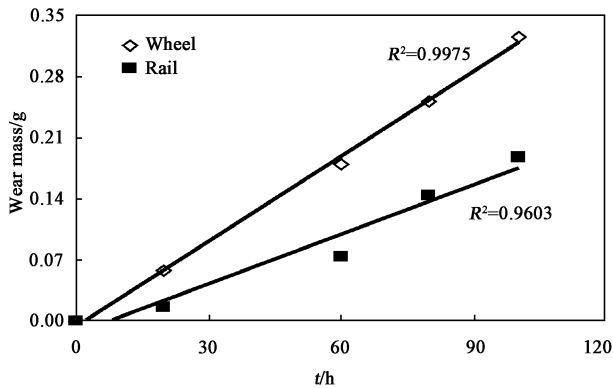


Fig. 5 Wear mass of wheel/rail specimens vs time

图5 轮轨试样磨质量随时间的变化

图6给出了车轮试样表面损伤的SEM照片.通过SEM照片可以看出:在较小接触应力水平下,车轮试样的表面磨损主要表现为沿着滚动方向为主的

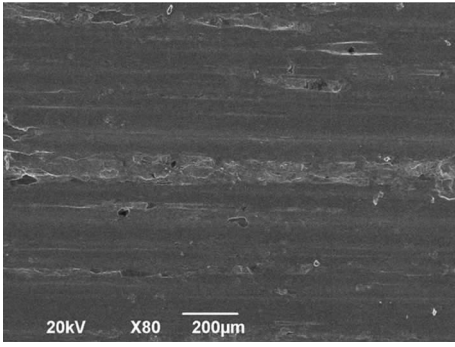
## 2.2 滚动磨损行为

图4为钢轨和车轮试样的硬度和磨质量变化情况.结果表明:车轮钢的硬度明显小于钢轨钢的硬度;对应的磨质量结果表明相同接触应力水平下车轮试样的磨质量要明显大于钢轨试样,即在轮轨试样对摩副中钢轨的耐磨性优于车轮试样,这与两者的硬度是相对应的,即硬度越大,耐磨性越好,磨质量越小.随接触应力的增加,轮轨试样的磨质量呈现明显的增加趋势,但钢轨与车轮试样增加趋势不同,对于钢轨试样在接触应力1 300 MPa后磨质量较为稳定,随接触应力增加磨质量增加缓慢,而车轮试样随接触应力的增加磨质量基本呈线性增加趋势.图5给出了接触应力1 600 MPa水平下车轮试样磨质量随时间的变化情况( $R$ 为拟合相关性系数),可以看出钢轨和车轮试样磨质量均随试验时间的增加呈线性增长趋势,相比而言,车轮试样的线性拟合关系更佳。

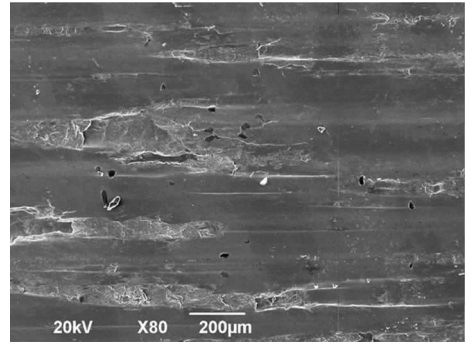
犁沟,且试样磨痕表面存在与滚动方向相一致的小块剥落掉块,但剥落损伤不严重[图6(a)],随接触应力的增加,车轮试样的表面损伤加重,车轮表面磨痕处的小块剥落数量增多,但其方向性相对较为明显,基本与滚动方向相一致,在剥落位置可发现表面有剥落坑存在[图6(b)],试样表面磨损较为严重。

当接触应力增至1 600 MPa后,车轮试样表面损伤非常严重,表面呈现不规则的剥离掉块,且数量较多,由于试样表面剥离掉块非常大,许多剥落坑已相互贯通[图6(c)],形成较大的剥离掉块,此时试样表面损伤非常严重,对应的车轮试样磨质量也最大。

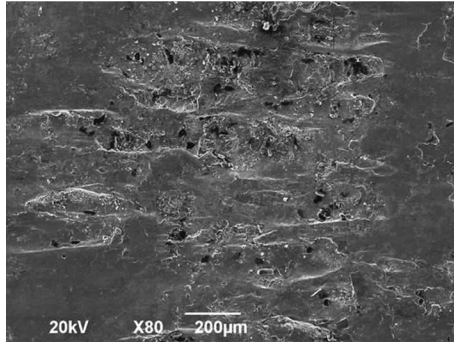
由不同接触应力水平下钢轨试样表面的SEM照片(见图7)可:当接触应力为1 000 MPa时,钢轨试样表面磨损轻微,其主要表现为与滚动方向相一致的犁沟,表面损伤轻微,沿滚动方向表面有很轻微



(a) 1 000 MPa



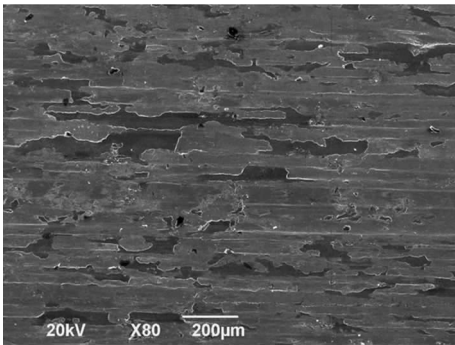
(b) 1 300 MPa



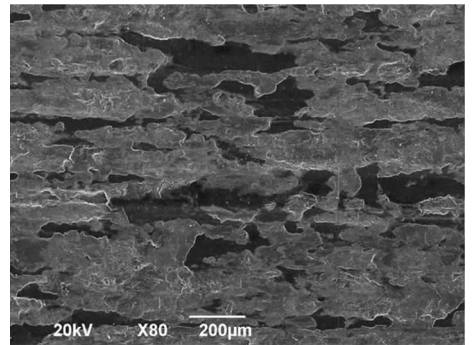
(c) 1 600 MPa

Fig. 6 SEM micrographs of surface damage of wheel specimen

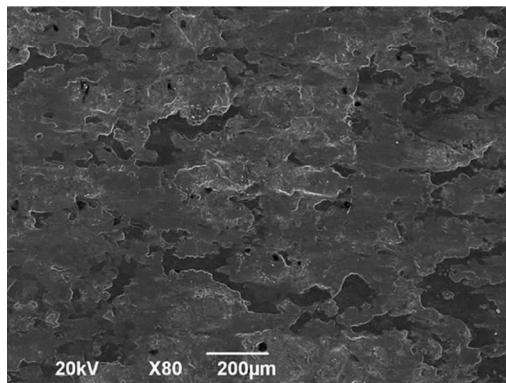
图 6 车轮试样表面损伤的 SEM 照片



(a) 1 000 MPa



(b) 1 300 MPa



(c) 1 600 MPa

Fig. 7 SEM micrographs of surface damage of rail specimen

图 7 钢轨试样表面损伤的 SEM 照片

的剥落现象. 随接触应力的增加, 钢轨试样的表面损伤加重, 所表现出的犁沟更为明显, 沿滚动方向也伴随有轻微的剥落损伤. 当接触应力达到 1 600 MPa 时, 钢轨试样的磨损量达到最大, 但表面损伤状态变化不明显, 主要表现为犁沟且伴随剥落损伤, 此时钢轨试样剥落的方向性不明显.

对比车轮和钢轨试样的 SEM 照片可知, 相同接触应力水平下, 车轮试样的损伤较钢轨试样严重, 两者的损伤形态存在一定的差别, 这可能主要是由于 2 种材料硬度差异所造成, 硬度的不同造成两者在匹配过程中形成不同的损伤形貌. 总体来说, 车轮试样的表面主要以剥离为主, 而钢轨试样表面以犁沟为主并伴随剥落损伤, 其损伤行为轻于车轮试样.

### 3 结论

a. 车轮材料的硬度小于 U71Mn 热轧钢轨的硬度; 随接触应力的增加, 车轮和钢轨试样的表面磨损加重, 滚动摩擦系数呈增加趋势.

b. 相同接触应力水平下, 车轮试样的磨损量大于钢轨试样, 表面损伤更为严重; 随接触应力的增加, 车轮试样的表面从犁沟伴随轻微剥落向严重剥落损伤转变, 钢轨试样的表面损伤主要表现为犁沟效应并伴随有剥落现象, 但较车轮试样的剥离损伤轻微.

### 参考文献:

[ 1 ] Su H Y. Study on alleviate wear of rail and wheel[J]. China railway, 1997, 6:42-43(in Chinese) [苏辉艳. 减轻重载列车轮轨磨损的研究[J]. 中国铁道, 1997, 6:42-43].

[ 2 ] Stuart G, Paul N, Kjell B, *et al.* Alleviation of rolling contact fatigue on Sweden's heavy haul railway[J]. Wear, 2002, 253, 42-53.

[ 3 ] Ludger D, Matthias P. Friction and wear testing of rail and wheel material[J]. Wear, 2005, 258: 981-991.

[ 4 ] Wang W J, Guo J, Liu Q Y. Study on effect of wear on rolling fatigue crack damage of rail [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2010, 34(1): 17-19 (in Chinese) [王文健, 郭俊, 刘启跃. 钢轨磨损对滚动疲劳裂纹损伤影响研究[J]. 机械工程材料, 2010, 34(1): 17-19].

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

[ 6 ] H D Grohmann, Klaus Hempelmann, Arnold Gro - Thebing. A new type of RCF, experimental investigations and theoretical modeling[J]. Wear, 2002, 253: 67-74.

[ 7 ] A J Perez - Unzueta, J H Beynon. Microstructure and wear resistance of pearlitic rail steels[J]. Wear, 1993, 162-164: 173-182.

[ 8 ] 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].

[ 9 ] Ma T, Zhu G L. Study on matching relationship between wheel and rail of heat treated rail [J]. Physics Testing, 1999, (5): 1-3 (in Chinese) [马腾, 朱桂兰. 热处理钢轨的轨/轮匹配关系研究[J]. 物理测试, 1999, (5): 1-3].

[ 10 ] Wang W J. Study on coupling relationship between rolling contact fatigue and wear of wheel - rail and prevention measures [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Doctor Degree Dissertation, 2008 (in Chinese) [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: 西南交通大学博士学位论文, 2008].

[ 11 ] Liu Q Y, Zhang B, Zhou Z R. Experimental study on rolling wheel corrugation [J]. Tribology, 2003, 23 (2): 132-135 (in Chinese) [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].