

车轮钢滚动剥离摩擦磨损特性研究

王文健, 刘启跃, 周仲荣

(西南交通大学 摩擦学研究所, 四川 成都 610031)

摘要: 在 NENE-2 型摩擦磨损试验机上利用往复滚动试验装置研究了不同滚滑状态下车轮钢的剥离摩擦磨损特性和碳含量对车轮钢滚动剥离磨损性能的影响。结果表明: 在不同滚滑状态下摩擦副之间的摩擦力不同, 平面试样的表面磨痕形貌随着不同的切向摩擦力而明显不同, 随着切向摩擦力的增大滚动磨损机制亦发生改变, 剥离磨损加剧且磨损深度变大, 当相对滑动量增大到一定程度后, 磨损表现为明显的剥层机制; 碳含量对车轮钢的滚动磨损表面磨痕形貌影响显著, 碳含量低时磨痕以犁沟为主, 碳含量高时剥离磨损发生的概率增加。

关键词: 滚动磨损; 滚滑接触; 磨损机制; 碳含量; 车轮钢

中图分类号: TH117.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-0595(2005)05-0475-05

铁路运输是籍轮轨相互作用产生的牵引和制动粘着摩擦力而实现列车运行的, 随着高速列车的发展和轴重的提高, 轮轨间的磨损已成为铁路运输中耗资最大的问题^[1]。轮轨间的磨损失效形式主要有钢轨侧磨、钢轨波磨、轮缘磨耗以及钢轨和车轮踏面剥离等^[2], 磨损失效后需要更换钢轨和车轮, 造成巨大的人力和物力浪费, 增加了铁路的运行成本。轮轨系统所构成的摩擦副是典型的滚动接触方式^[3], 当车轮在钢轨上滚动时, 轮轨间的接触区域存在粘着区和滑移区, 若增加轮轨间牵引力或制动摩擦力, 将加剧车轮和轨道材料的磨损, 严重时可能造成车轮踏面的擦伤或剥离^[4~6], 影响车轮使用寿命。由于轮轨系统的运行一般处于滚滑状态, 因此研究滚滑状态下的滚动磨损机理对实际中有效减轻轮轨磨损有着重要意义, 也可为开发新型车轮钢材质提供相应的试验依据。

本文作者在 NENE-2 型高精度液压试验机上研究了车轮轮箍钢在滚滑状态下的摩擦磨损特性, 探讨了碳含量对滚滑状态下车轮钢剥离磨损性能的影响, 并提出了减缓剥离发生的有效措施。

1 实验部分

试验在高精度液压试验机上进行, 滚动试验装置如图 1 所示^[3]。摩擦副为滚动轴承与平面试样相接触, 通过活塞的上、下运动来实现滚动轴承的往复滚动, 平面试样固定并通过与高精度载荷传感器连接来

测量切向摩擦力, 通过滚动轴承顶部的制动螺栓施加不同制动力来实现不同滚滑状态。试验所用滚动轴承

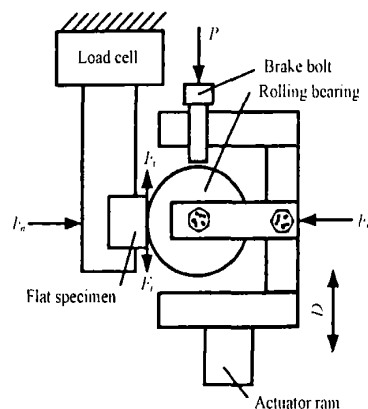


Fig 1 Scheme of rolling test device

图 1 滚动试验装置示意图

材料为 GCr15 轴承钢, 平面试样材料为车轮轮箍钢, 碳含量为 0.4%~0.70%, 强度极限 $\geq 800 \text{ MPa}$ 。

试验参数为: 运动位移幅值 $D = \pm 1\,000 \mu\text{m}$; 频率 $f = 2 \text{ Hz}$; 循环次数 $N = 10^4$; 法向载荷 $F_n = 200 \text{ N}$; 滚动轴承外径 $d = 30 \text{ mm}$; 接触宽度 $b = 7 \text{ mm}$; 试验温度 $18 \sim 23 \text{ }^\circ\text{C}$, 相对湿度 $RH = 20\% \sim 50\%$ 。每次试验前用丙酮对试样表面进行清洗后再施加法向载荷进行试验。利用载荷传感器测量切向摩擦力 F_t , 用共焦激光扫描显微镜 (LCSM) 对平面试样表面磨痕形貌进行观察分析并测量磨损深度。

2 结果与分析

2.1 车轮钢的剥离摩擦磨损特性

图2示出了不同滚滑状态下碳含量为0.7%的车

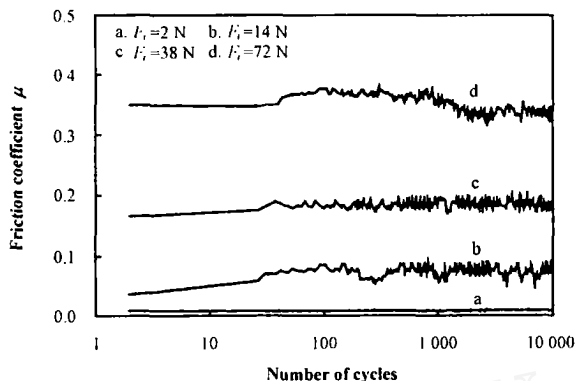


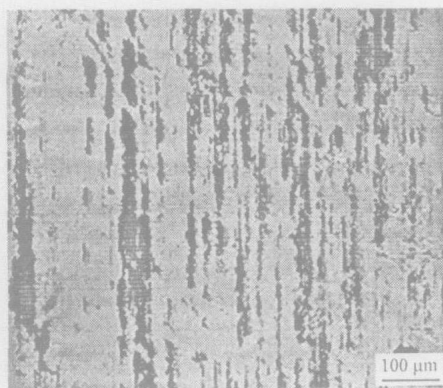
Fig 2 Friction coefficient under rolling-sliding condition

图2 滚滑状态下碳含量为0.7%的车轮钢摩擦系数曲线

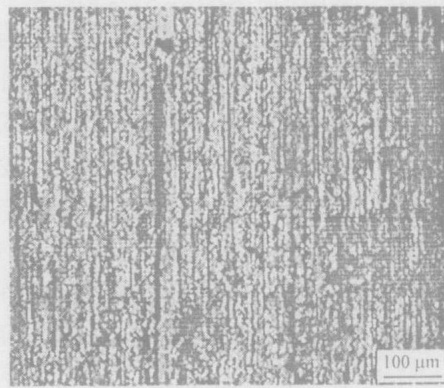
轮钢摩擦系数曲线, 为了便于试验分析同时给出1组

纯滚动试验结果作为对比, 可以看出: 纯滚动时摩擦系数最小(约为0.01) [见图2(a)], 相应的切向摩擦力 F_t 最小(约为2 N), 这是因为此时摩擦副间不存在相对滑动量, 其滚动摩擦阻力远小于滑动摩擦阻力所致; 当摩擦副处于不同滚滑状态时所对应的摩擦系数有明显变化, 随着施加制动力 P 的增加, 相对滑动量增大, 摩擦系数变大, 对应的切向摩擦力 F_t 增加。图2中其它3种滚滑状态的摩擦力分别为: 14 N、38 N 和 72 N。在滚动试验过程中由于表面磨损等原因, 在经历一定循环次数后摩擦系数有所降低 [见图2(d)], 可见摩擦副处于不同滚滑状态时所对应的摩擦系数和摩擦力均有所变化, 且随着所施加制动力的增加而变大。

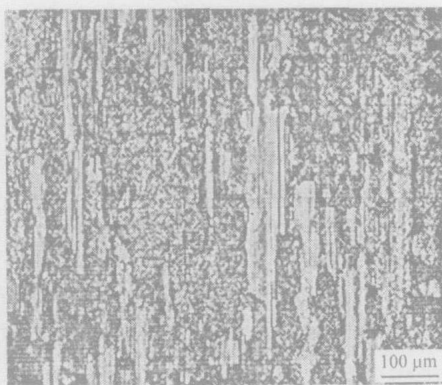
图3示出了不同滚滑状态下车轮钢表面的磨痕形貌 LCSM 照片, 图4所示为所对应的车轮钢表面磨损深度曲线。可以看出: 在纯滚动时由于切向摩擦力很小, 磨损表现为轻微擦伤痕迹 [见图3(a)], 无犁沟, 这主要是由于在法向力作用下摩擦副接触区域的变



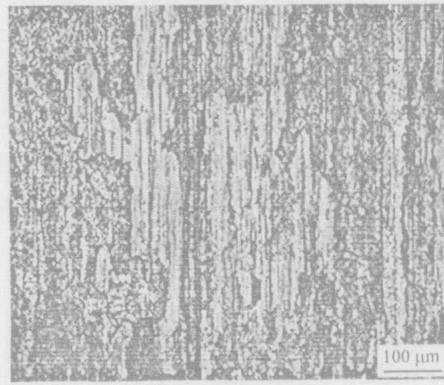
(a) $F_t = 2$ N



(b) $F_t = 14$ N



(c) $F_t = 38$ N



(d) $F_t = 72$ N

Fig 3 LCSM photographs of worn surface under rolling-sliding condition

图3 滚滑状态下碳含量为0.7%的车轮钢磨痕形貌 LCSM 照片

形压痕的缘故^[7], 且磨损深度很小 [见图4]; 随着切向摩擦力增加, 表面磨损迅速加剧, 磨痕表面出现明显的犁沟 [见图3(b)], 且犁沟沿滚动方向分布, 此时

磨损主要表现为磨粒磨损, 磨损深度较纯滚动时大得多; 当制动力达到一定值后, 由于摩擦副间相对滑动量增加, 对应的摩擦力变大, 磨痕表面呈现出较明显

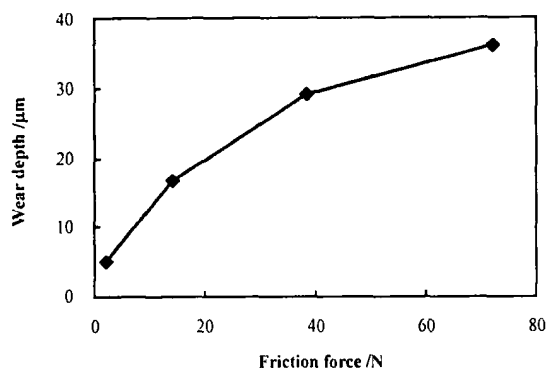
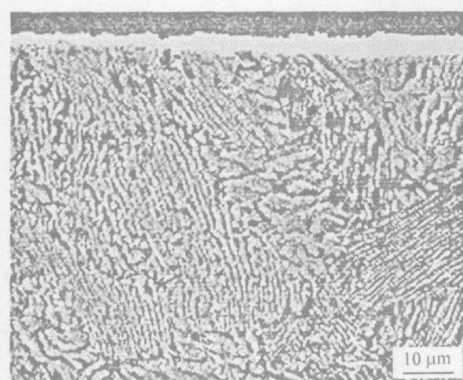


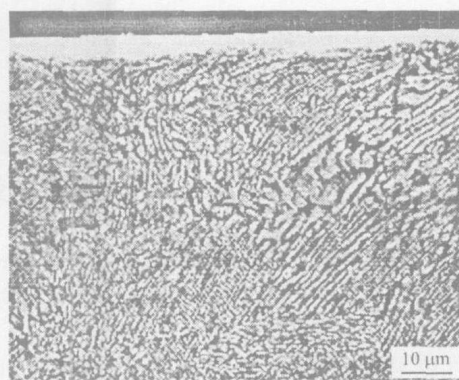
Fig 4 Wear depth vs friction force under rolling-sliding condition

图4 滚滑状态下碳含量为0.7%的车轮钢磨损深度曲线

的片状剥落迹象[见图3(c)],这主要是由于接触表



(a) $F_t = 2 \text{ N}$



(b) $F_t = 72 \text{ N}$

Fig 5 SEM photographs of wheel steel cross-section

图5 碳含量为0.7%的车轮钢磨痕剖面形貌的SEM照片

微,增大相对滑动量后磨损加剧,磨损机制也发生相应的转变,磨痕表面呈现出不同形貌,随着滑动量增大,磨损加剧,所对应的磨损深度变大,当切向摩擦力达到一定值后,金属表层发生明显的塑性变形,磨痕表现为较明显的剥落迹象,剥离磨损十分严重

2.2 不同碳含量下的剥离磨损性能

图6所示为3种不同碳含量的车轮钢在相同滚滑状态下的磨痕形貌LCSM照片。可以看出碳含量对车轮钢滚动剥离磨损有明显影响:碳含量低时磨痕表面以犁沟为主,无剥落发生[见图6(a)],磨损机制表现为磨粒磨损为主;随着碳含量增加,试样表面开始出现麻点式小剥落并存在犁沟[见图6(b)],当碳含量达到0.7%时,出现明显片状剥落[见图6(c)],剥离磨损十分严重。因此在相同滚滑状态下降低钢的碳含量能够有效减轻剥离磨损发生的程度,这是因为碳含量改变了试样的微观结构,当碳含量较低时钢的韧性较好,抵抗塑性变形能力较强;随着碳含量增加,

面间产生的摩擦热而形成冷焊点的几率增大^[3]、对应的粘着磨损加剧所致,且片状剥落基本与往复滚动方向一致,此时磨损深度明显变大;当进一步加大制动力,切向摩擦力达到72N时,磨屑呈现出大块状剥落[见图3(d)],且剥落的方向性不明显,磨损深度达到最大,这主要是由于较大摩擦力作用下疲劳磨损和粘着磨损共同作用的结果^[8,9],此时磨损表现为较明显的剥层机制。图5给出了试样磨痕剖面形貌的SEM照片。可见:当切向摩擦力较小时,金属表层无明显的塑性变形,磨损轻微;随着切向摩擦力增加,表层金属发生明显的塑性变形[见图5(b)],在往复滚动过程中由于塑性变形作用使金属表层容易形成微裂纹,从而造成严重的剥离磨损。故在不同滚滑状态下,车轮钢的滚动磨损机制不同,切向摩擦力较小时磨损轻

金属的硬度和脆性增大(见表1),往复滚动过程中在接触应力反复作用下金属表层和次表层很容易产生微裂纹,随着裂纹的扩展金属表层出现大块金属脱落并形成片状剥落。但随着碳含量降低,试样磨损深度急剧上升(见表1),从而降低了车轮钢的耐磨性,因此通过降低碳含量来减轻剥离将增加磨损量,从而造成材料的巨大浪费,故利用此措施来减轻剥离磨损要在一定范围内才能得到最佳的经济效益。

综上所述,不同滚滑状态下车轮钢的磨损机理明显不同,实际中为了避免轮轨系统发生剧烈的剥离磨损,在车辆起动和制动过程中应严格控制车轮的滑行率处于较小范围内。不同碳含量车轮钢的滚动磨损特性明显不同,碳含量高时金属表层容易出现剥落。由于列车运行速度的提高,车轮剥离也日益增多,现有车轮材料已不能满足相应的性能要求,因此为了减轻车轮踏面的剥离损伤,可以通过在降低车轮钢碳含量的同时,在钢中添加某些合金元素而降低其耐磨性,

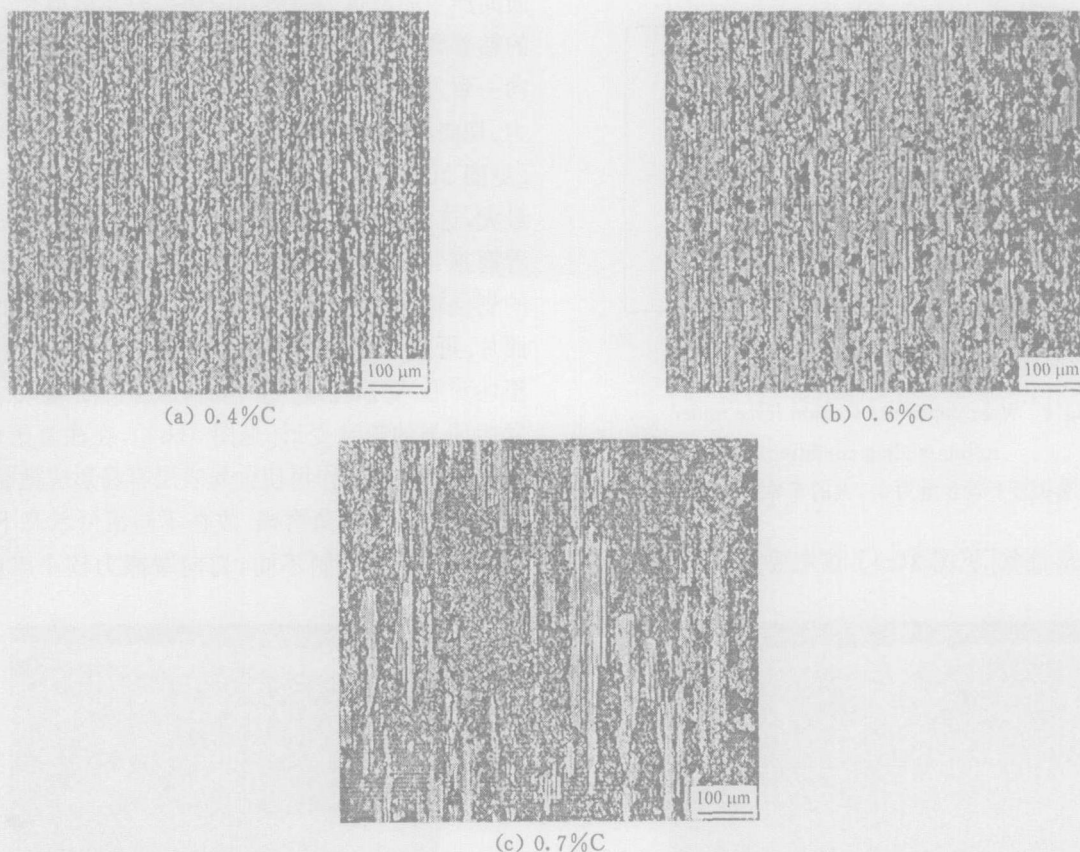


Fig 6 LCSM photographs of worn surface of wheel steel with different carbon contents

图6 $F_t=38\text{ N}$ 时不同碳含量的车轮钢表面磨痕形貌 LCSM 照片

这样既可以有效减轻剥离的发生, 又能防止由于碳

表1 平面试样硬度及磨损深度值

Table 1 Hardness and wear depth of wheel steel

Carbon content/%	Hardness HV_{200g}	Wear depth/ μm
0.4	229.1	47.215
0.6	252.2	39.550
0.7	268.2	29.084

含量降低而过多增加的车轮钢磨损^[10].

3 结论

a 在滚滑状态下, 切向摩擦力决定车轮钢的滚动磨损机制; 自由滚动时磨损轻微, 随着相对滑动量增大, 剥离磨损加剧, 磨损从磨粒磨损向粘着磨损和疲劳磨损转变, 磨痕表现出片状剥落, 磨损深度增大; 当相对滑动量增大到一定程度后, 磨损表现为明显的剥层机制

b 碳含量对车轮钢的滚动剥离磨损有显著影响, 碳含量低时磨痕以犁沟为主, 随着碳含量增加, 磨损机制亦发生转变, 磨痕表现为从麻点式剥落向片状剥落发展, 剥离磨损加重

参考文献

- [1] 苏辉艳 减轻重载列车轮轨磨耗的研究[J]. 中国铁道, 1997, 6: 42-43
Su H Y. Study on alleviate wear of rail and wheel[J]. China Railway, 1997, 6: 42-43
- [2] 金学松, 刘启跃 轮轨摩擦学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004
- [3] 刘启跃, 周仲荣, 石心余 45 钢/GCr15 钢摩擦副的滚动磨损特性研究[J]. 摩擦学学报, 2001, 21(1): 33-36
Liu Q Y, Zhou Z R, Shi X Y. The rolling wear behavior of A IS1 1045 steel plate against SAE 52100 steel roller [J]. Tribology, 2001, 21(1): 33-36
- [4] Stone D H, Moyer G J. Wheel shelling and spalling——an interpretive review [J]. Rail Transportation, 1989, 9-30
- [5] Sun J, Saw le K J, Stone D H. Progress in the reduction of wheel spalling [C]. Proceeding of the 12th International Wheelset Congress, Qingdao, 1998 18-29
- [6] Clayton P. Tribological aspects of wheel-rail contact: a review of recent experimental research [J]. Wear, 1996, 191: 170-183
- [7] 邱海波, 裴有福, 金元生 塑性变形对钢轨磨损影响的试验研究 [J]. 摩擦学学报, 1996, 16(1): 80-84
Qiu H B, Pei Y F, Jin Y S. Experimental research about effect of plastic deformation on wear of rail[J]. Tribology, 1996, 16

- (1): 80-84
- [8] Liu Q Y, Zhou Z R. Effect of tangential force on wear behaviour of steels in reciprocating rolling and rolling/sliding contact[J]. Wear, 2001, 250(1-12): 357-361.
- [9] 刘启跃, 周仲荣. 受制滚动钢摩擦副的摩擦特性研究[J]. 机械工程学报, 2003, 39(7): 56-67.
- Liu Q Y, Zhou Z R. Investigation of friction characteristic of steels under rolling-sliding contact [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(7): 56-58, 67.
- [10] 水恒勇, 张永权, 杨才福. 高速列车车轮用材料的开发动向[J]. 钢铁研究学报, 2003, 15(2): 66-69.
- Shui H Y, Zhang Y Q, Yang C F. Development trend of high-speed rail wheel material [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2003, 15(2): 66-69.

Study on Friction and Wear Properties of Wheel Steel under Rolling-Sliding Condition

WANG Wen-jian, LIU Qi-yue, ZHOU Zhong-rong

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

Abstract: Rolling-sliding friction and wear behavior and effect of carbon content on rolling wear of wheel steel were investigated by a reciprocating rolling test apparatus on tension-compression hydraulic machine with a high precision. Results showed that tangential force of rolling friction pair and morphology of worn surface were distinct under different rolling-sliding conditions. Tangential force of free-rolling is smallest and wear was very slight. Wear mechanism would be changed and depth of wear and plastic deformation of material would become severely with tangential friction force increasing under rolling-sliding conditions. Fatigue wear and delamination of wheel steel become distinctly with increasing slippage of rolling friction pair. Influence of carbon content on wear behavior and hardness of wheel steel was very obvious. Abrasion was dominated when carbon content was low and spalling may occur with carbon content increasing.

Key words: rolling wear; rolling-sliding contact; wear mechanism; carbon content; wheel steel

Author: LIU Qi-yue, male, born in 1964, Ph. D., Professor, e-mail: lqy9065@yahoo.com.cn