

轮轨材料滑动摩擦磨损试验

巩友飞^{a,b},王良璧^{a,b}

(兰州交通大学 a. 机电工程学院;b. 铁道车辆热工教育部重点实验室,甘肃 兰州 730070)

摘要:以车轮钢 CL60 和钢轨钢 U71Mn 为研究对象,使用销-盘式摩擦磨损试验机,通过轮轨摩擦副的滑动摩擦磨损试验,进行了不同金相组织、滑动速度和接触应力下轮轨材料的滑动磨损研究。研究表明:在不同滑动速度和接触应力下,轮轨磨损率随金相组织变化趋势基本一致。对于单一金相组织摩擦副,相同组织摩擦副的磨损率小于相异组织摩擦副的磨损率。马氏体组织可以降低轮轨磨损率,珠光体组织会增大轮轨磨损率。随着滑动速度或接触应力的增大,轮轨磨损率逐渐减小并趋于稳定。

关键词:轮轨材料;滑动摩擦;金相组织;滑动速度;接触应力;磨损

中图分类号:U211.5

文献标志码:A

0 引言

随着轨道交通不断向高速化、重载化方向发展,轮轨磨耗引起的磨损和接触疲劳等问题越来越严重,这不仅降低了轮轨的使用寿命而且增加了铁路的运输成本^[1]。研究轮轨摩擦磨损特性和磨损机制可以为减轻轮轨磨耗和高速重载铁路的发展提供重要的试验依据^[2]。

列车速度的提高和轴重的增加,使轮轨接触更加频繁,并且轮轨间相对黏滑运动导致接触区域产生更多的摩擦热,使接触区温度迅速升高,甚至在轮轨表面附近发生奥氏体化的温度^[3]。在第三介质作用下,轮轨接触区温度会迅速下降,使珠光体轮轨表面附近的金相组织发生变化,最终在轮轨的持续接触与分离后形成稳定的马氏体组织^[4-5]。因此,车轮和轨道表面就会形成以珠光体和马氏体构成的混合体组织。新组织的出现改变了原有组织的耐磨性,从而影响了轮轨的使用寿命,轮轨磨损问题已经成为制约高速重载铁路进一步发展的核心问题^[6]。

目前,许多国内外学者从列车轴重^[7]、运行速度^[8]、材料特性^[9-10]、接触温度^[11-12]、材料硬度^[13]和润滑条件^[14]等角度研究了轮轨磨损问题,但是还没有关于金相组织对轮轨磨损率影响的报道。为此,本文选用同一种轮轨材料,热处理得到 3 种金相组织,组成 6 对摩擦副,在不同的工况(滑动速度和接触应力)下进行磨损试验,分析了金相组织对轮轨磨损率的影响。

1 试样制备与试验方法

摩擦试样选用车轮钢 CL60 作为上试件,与钢轨钢 U71Mn 下试件组合为销盘摩擦副。表 1 为轮轨钢材料的化学成分。轮轨试件采用线切割方法直接从车轮和钢轨踏面切取,切割时要保证摩擦销的直径方向与车轮踏面平行,摩擦盘的端面与钢轨踏面平行,再通过车床对试样毛坯细加工,最后在磨床上抛磨。摩擦销与摩擦盘试样尺寸如图 1 所示。

表 1 轮轨钢材料的化学成分

材料	w(Fe)	w(C)	w(Si)	w(Mn)	w(P)	w(S)	w(V)
车轮钢 CL60	97.66~98.78	0.54~0.65	0.18~0.78	0.50~0.90	≤0.006	≤0.009	0
钢轨钢 U71Mn	97.40~98.10	0.65~0.76	0.15~0.35	1.10~1.40	≤0.03	≤0.03	≤0.03

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51236003)

作者简介:巩友飞(1991-),男,甘肃天水人,硕士生;王良璧(1964-),男,甘肃静宁人,教授,博士,博士生导师,主要研究方向为铁道车辆热工学、强化传热基础理论及其应用等。

收稿日期:2018-03-07

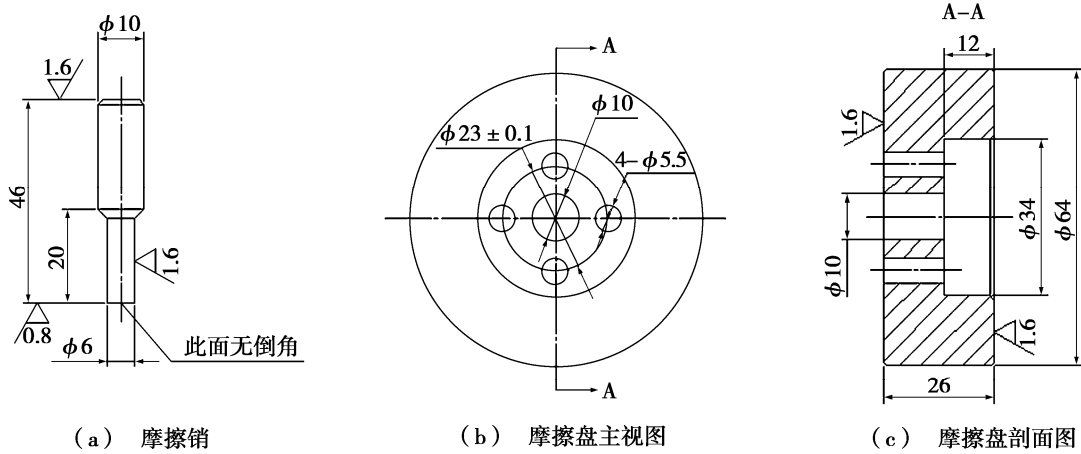


图 1 摩擦销与摩擦盘试样尺寸

车轮钢 CL60 和钢轨钢 U71Mn 均属于亚共析钢,两者含碳的质量分数相当,因此,试验中对 CL60 和 U71Mn 的热处理工艺确定均参照文献[15]对 U71Mn 钢动态连续冷却 C 曲线 (continuous cooling transformation, CCT) 的研究结果,按照 850 °C 奥氏体终温后 U71Mn 钢动态 CCT 曲线拟定轮轨钢的热处理工艺。轮轨钢热处理的试验流程为:将电阻加热炉温度设定为 850 °C 并开始加热,待炉内温度达到设定温度后,将准备好的轮轨毛坯试样按照炉膛大小放入加热炉内,保温 20 min 后以不同的速度冷却,可分别获得珠光体、混合体和马氏体。其中,空气冷却可获得珠光体组织,30 m/s 的风冷可获得混合体组织,淬水可获得马氏体组织。为了使淬水马氏体符合国家标准 GB 2585—2007《铁路用热轧钢轨》和国家标准 GB 8601—1988《铁路用辗钢整体车轮》对硬度的要求,对淬水马氏体进行回火热处理,按照文献[16]对亚共析钢及轮轨的热处理工艺取回火温度为 590 °C。

将热处理后的试件经过金相砂纸打磨抛光后,先用蒸馏水清洗,再用丙酮清洗 20 min 后烘干,最后用体积分数为 4% 的硝酸乙醇溶液腐蚀抛光面并在金相显微镜下观察热处理组织。不同工艺下轮轨钢的显微组织如图 2 所示。由图 2 可见:珠光体组织呈片层状,马氏体组织呈针状,混合体由片层状的珠光体和针状的马氏体构成。

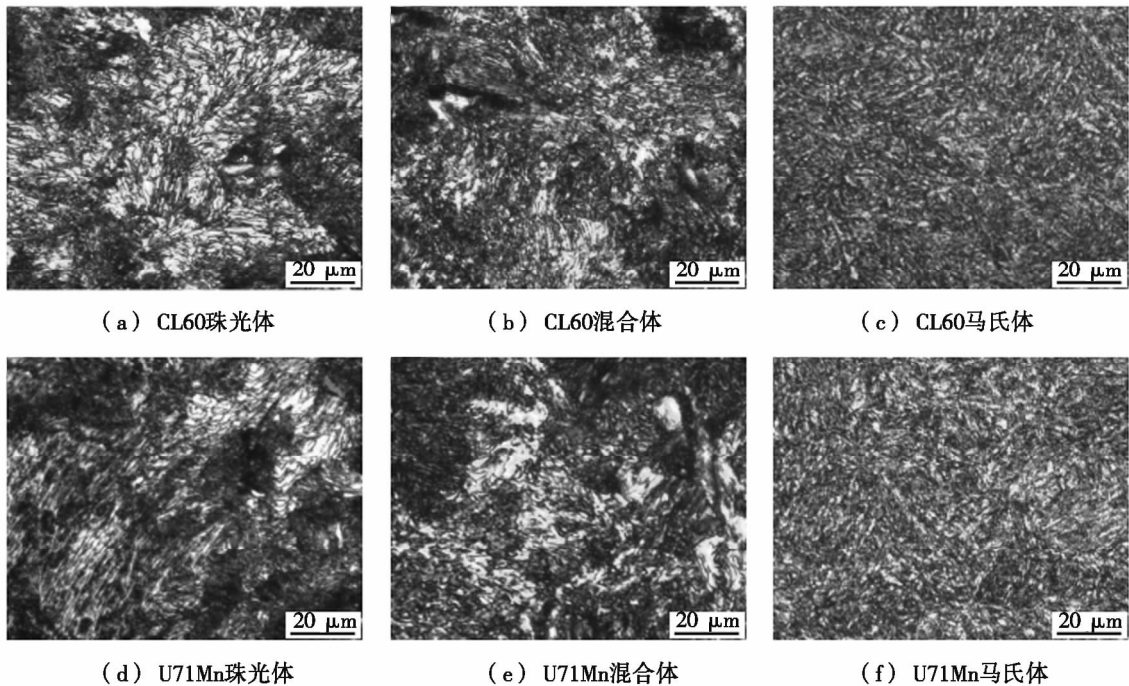


图 2 不同工艺下轮轨钢的显微组织

为了研究在不同的工况(滑动速度和接触应力)下金相组织对轮轨磨损率的影响,避免环境温度、表面粗糙度和接触面积等因素对磨损率的影响,将滑动速度、接触应力和金相组织定为试验工况参数,环境温度、表面粗糙度和接触面积定为试验基本参数。其中,试验基本参数中环境温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$,表面粗糙度约为 $0.1\ \mu\text{m}$,接触面积为 $28.27\ \text{mm}^2$;试验工况参数中金相组织包括珠光体、混合体和马氏体,接触应力 p 分别为 $3.54\ \text{MPa}$ 、 $5.31\ \text{MPa}$ 和 $7.07\ \text{MPa}$,滑动速度 v 分别为 $0.40\ \text{m/s}$ 、 $0.53\ \text{m/s}$ 和 $0.65\ \text{m/s}$ 。依据试验工况参数的3种金相组织可以组成6种摩擦副:珠光体-珠光体(P-P),珠光体-马氏体(P-M),马氏体-马氏体(M-M),混合体-珠光体(H-P),混合体-马氏体(H-M)及混合体-混合体(H-H)。

将上述销盘试样编号组合后在销-盘式试验机上进行磨损试验,试验时间 $t = 180\ \text{min}$,摩擦销旋转半径 $R = 25\ \text{mm}$ 。金相组织、滑动速度和接触应力对轮轨磨损影响试验共进行了54轮,磨损量用分析天平测定。

2 试验结果与讨论

2.1 金相组织、滑动速度和接触应力对钢轨磨损率的影响

不同工况下钢轨磨损率随金相组织变化曲线如图3所示。

由图3可知:(1)在不同滑动速度和接触应力下,钢轨磨损率随金相组织变化趋势基本一致,且试验工况范围内最大磨损率小于 $0.30 \times 10^{-2}\ \text{mm}^3 \cdot (\text{m} \cdot \text{N})^{-1}$ 。在相同滑动速度和接触应力下,珠光体-马氏体组织摩擦副的磨损率最大,马氏体-马氏体组织摩擦副的磨损率最小,珠光体-马氏体组织摩擦副的磨损率是马氏体-马氏体组织摩擦副磨损率的1.5~8.0倍。对于单一金相组织摩擦副,珠光体-珠光体和马氏体-马氏体组织摩擦副的磨损率小于珠光体-马氏体组织摩擦副的磨损率,即相同组织摩擦副的磨损率小于相异组织摩擦副磨损率。珠光体组织存在时,钢轨磨损率较大,马氏体组织存在时,钢轨磨损率较小,即马氏体组织可以降低钢轨磨损率,珠光体组织会增大钢轨磨损率。

(2)在同一摩擦副相同接触应力下,当 $p = 3.54\ \text{MPa}$ 时,各摩擦副磨损率随滑动速度的增大逐渐减小,且减小率逐渐增大;当 $p = 5.31\ \text{MPa}$ 时,各摩擦副磨损率随滑动速度的增大先迅速减小,然后基本保持不变或者逐渐减小,例如,混合体-珠光体摩擦副的磨损率随滑动速度的增大呈线性减小趋势;当 $p = 7.07\ \text{MPa}$ 时,各摩擦副磨损率随滑动速度的增大先迅速减小,然后基本保持不变。总之,在轻载时,各摩擦副磨损率随着接触应力的增大呈减小趋势;在中、重载时,各摩擦副磨损率随着接触应力的增大先迅速减小,然后基本保持不变。

(3)在同一摩擦副相同滑动速度下,当 $v = 0.40\ \text{m/s}$ 时,各摩擦副磨损率随接触应力的增大先迅速减小,然后变化规律呈不明显趋势,例如混合体-珠光体摩擦副的磨损率随接触应力的增大逐渐增大,混合体-珠光体摩擦副的磨损率随接触应力的增大逐渐减小,其他各摩擦副的磨损率随接触应力的增大基本保持不变。当 $v = 0.53\ \text{m/s}$ 时,混合体-珠光体摩擦副的磨损率随接触应力的增大呈线性减小,其他各摩擦副磨损率随接触应力的增大迅速减小,然后基本保持不变或略有增大趋势。当 $v = 0.65\ \text{m/s}$ 时,各摩擦副磨损率随接触应力的增大变化不明显。总之,各摩擦副磨损率随着接触应力的增大呈减小或

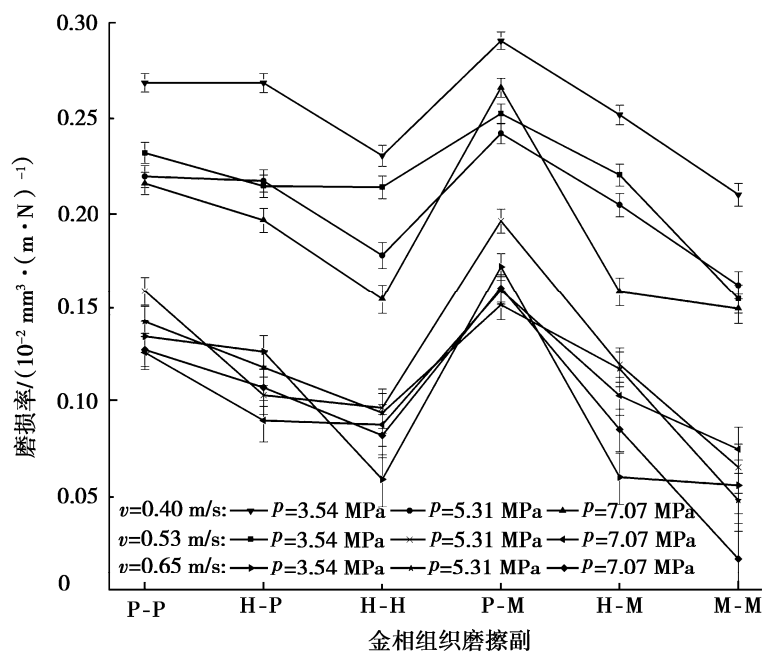


图3 不同工况下钢轨磨损率随金相组织变化曲线

基本不变的趋势;在高速滑动下,尤其当 $v = 0.65 \text{ m/s}$ 时,各摩擦副在不同压力下的磨损率基本一样,即在高速滑动下钢轨磨损率受接触应力的影响较小。

2.2 轮轨试样的表面磨损特性

利用光学金相显微镜观测 $v = 0.40 \text{ m/s}$ 、 $p = 3.54 \text{ MPa}$ 时轮轨表面的摩擦磨损形貌,如图4所示。通过表面形貌对比图确定不同金相组织轮轨摩擦副摩擦磨损机理,并预测轮轨磨损率。

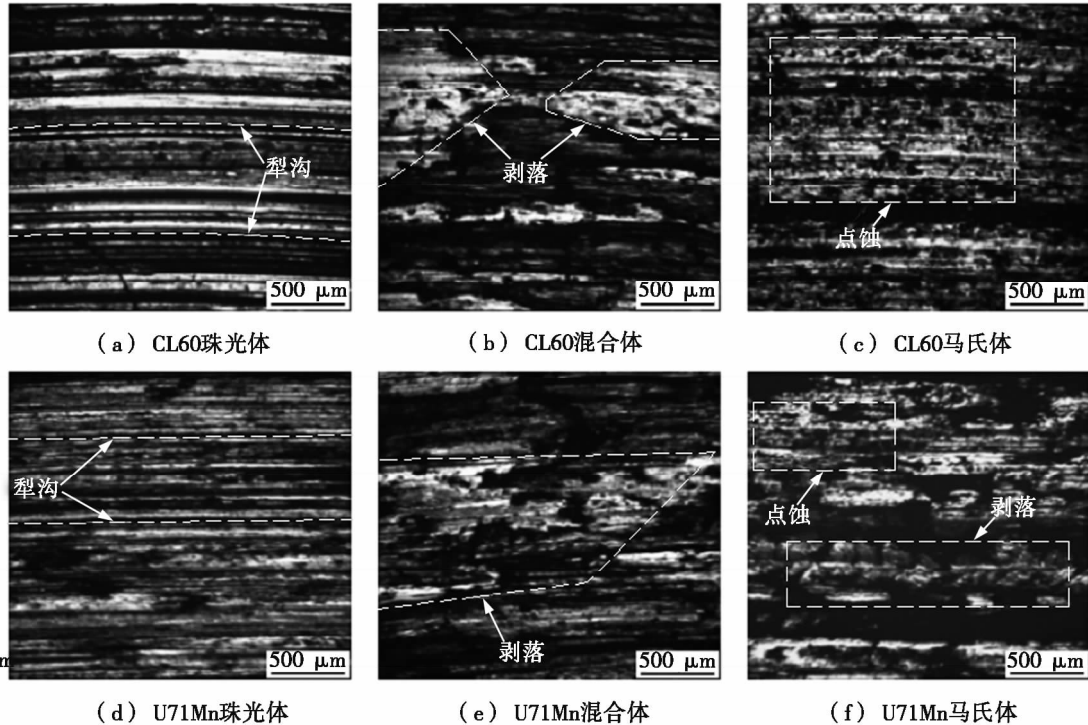


图4 $v = 0.40 \text{ m/s}$ 、 $p = 3.54 \text{ MPa}$ 时轮轨表面摩擦磨损形貌图

由图4可知:珠光体组织硬度较小,表面磨痕更为明显,犁沟较多,属于磨粒磨损;马氏体或者混合体组织硬度较大,表面磨痕更为模糊,点蚀和剥落较多,属于黏着磨损。由上文中金相组织对钢轨磨损率的影响可知,珠光体组织存在时,轮轨磨损率较大,马氏体组织存在时,轮轨磨损率较小。因此,磨粒磨损滑动时磨损率较大,黏着磨损滑动时磨损率较小。通过对比轮轨表面磨痕形貌和钢轨磨损率的大小可以预测珠光体车轮、混合体车轮和马氏体车轮的磨损率依次递减,即在相同接触应力和滑动速度下,车轮磨损率与钢轨磨损率变化规律相同。

3 结论

(1) 在不同滑动速度和接触应力下,钢轨磨损率随金相组织变化趋势基本一致。对于单一金相组织摩擦副,相同组织摩擦副的磨损率小于相异组织摩擦副的磨损率。马氏体组织可以降低轮轨磨损率,珠光体组织会增大轮轨磨损率。

(2) 随着滑动速度或接触应力的增大,轮轨磨损率基本呈减小趋势,并趋于稳定。在相同接触应力和滑动速度下,车轮磨损率与钢轨磨损率变化规律相同。

(3) 珠光体组织硬度较小,表面磨痕更为明显,犁沟较多,属于磨粒磨损。马氏体或者混合体组织硬度较大,表面磨痕更为模糊,点蚀和剥落较多,属于黏着磨损。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 金学松,刘启跃. 轮轨摩擦学[M]. 北京:中国铁道出版社, 2004.
- [3] WU B, WEN Z F, WU T, et al. Analysis on thermal effect on high-speed wheel/rail adhesion under interfacial

- contamination using a three-dimensional model with surface roughness[J]. *Wear*, 2016, 366/367: 95 – 104.
- [4] 潘睿,任瑞铭,陈春焕,等. 钢中摩擦磨损白层的研究现状[J]. *钢铁研究学报*, 2016, 28(7): 1 – 7.
- [5] TAKAHASHI J, KAWAKAMI K, UEDA M. Atom probe tomography analysis of the white etching layer in a rail track surface[J]. *Acta materialia*, 2010, 58(10): 3602 – 3612.
- [6] 李晓骥. 铁路轮轨疲劳磨损及节能降耗问题的研究[J]. *装备制造技术*, 2013(11): 272 – 273.
- [7] 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.
- [8] DETERS L, PROKSCH M. Friction and wear testing of rail and wheel material[J]. *Wear*, 2005, 258(7/8): 981 – 991.
- [9] 陈水友,刘吉华,郭俊,等. 车轮材料特性对轮轨磨损与疲劳性能影响的研究[J]. *摩擦学学报*, 2015, 35(5): 531 – 537.
- [10] BUCHER F, DMITRIEV A I, ERTZ M, et al. Multiscale simulation of dry friction in wheel/rail contact[J]. *Wear*, 2006, 261(7/8): 874 – 884.
- [11] 马蕾,何成刚,赵相吉,等. 低温环境下轮轨材料滚动磨损模拟试验研究[J]. *摩擦学学报*, 2016, 36(1): 92 – 97.
- [12] 肖乾,穆明,周新建,等. 高速列车轮轨材料滑动摩擦实验研究[J]. *华东交通大学学报*, 2013, 30(5): 24 – 29.
- [13] 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.
- [14] OZSARAC U, ALANLAR S. Wear behaviour investigation of wheel/rail interface in water lubrication and dry friction[J]. *Industrial lubrication & tribology*, 2008, 60(2): 101 – 107.
- [15] 骆仁智. U71Mn 钢动态 CCT 曲线研究[J]. *浙江冶金*, 2013(2): 38 – 40.
- [16] 中国机械工程学会热处理专业学会《热处理手册》编委会. 热处理手册. 第 2 卷, 典型零件热处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.

(上接第 29 页)

- [11] 胥飞燕,郑华荣,周宦银,等. 基于 FPGA 的多串口控制器的设计与实现[J]. *物联网技术*, 2017, 7(10): 31 – 32.
- [12] 徐带娣,谭红. 基于 fpga 以太网及串口数据传输系统分析[J]. *信息通信*, 2017, 31(10): 229 – 231.
- [13] 马龙,易辉. 串口服务器在县级供电公司远动通信系统的应用[J]. *工程技术(文摘版)*, 2016, 8(6): 116.
- [14] 吕佩. 基于优先级排队算法的改进型串口服务器设计[J]. *工业技术创新*, 2016, 3(3): 422 – 426.
- [15] 翟永宁,张翼飞. 基于 FPGA 的以太网和串口数据传输系统设计分析[J]. *科技创新导报*, 2017, 14(11): 155 – 156.
- [16] 王闽,张静. 基于 FPGA 的串口通信设计与实现[J]. *通讯世界*, 2017, 25(22): 52 – 52.