

摩擦学学报

TRIBOLOGY



两种水基摩擦改性剂对轮轨黏着和损伤性能的影响

程焯, 师陆冰, 王文健, 沈明学, 丁昊昊, 郭俊, 刘启跃

Effects of Two Kinds of Water-Based Friction Modifiers on Wheel-Rail Adhesion and Damage

CHENG Zhuo, SHI Lubing, WANG Wenjian, SHEN Mingxue, DING Haohao, GUO Jun, LIU Qiyue

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2020109>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

两种激光熔覆涂层对轮轨材料磨损与损伤性能的影响

Effects of Two Laser Cladding Coatings on Wear and Damage Properties of Wheel/Rail Materials

摩擦学学报. 2020, 40(2): 225 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2019105>

石墨烯/LaF₃的制备及其作为水基润滑剂的摩擦学性能研究

Synthesis, Structure and Tribological Properties of Graphene/LaF₃ Composites as Water-Based Lubricant Additives

摩擦学学报. 2019, 39(1): 35 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018025>

质子型离子液体水基润滑液摩擦学性能研究

Lubricating Properties of the Protic Ionic Liquids as the Water-Based Lubricating Additives

摩擦学学报. 2019, 39(5): 628 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2019003>

U71Mn钢轨气压焊接接头滚动磨损与损伤性能研究

Research on Rolling Wear and Damage Properties of Gas Pressure Welding Joint of U71Mn rail

摩擦学学报. 2020, 40(5): 579 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2020014>

应用于高速轮轨滚动接触的蠕滑理论算法对比研究

Comparative Study on the Theory of Creeping Theory Applied to High Speed Wheel-Rail Rolling Contact

摩擦学学报. 2019, 39(3): 319 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018188>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16078/j.tribology.2020109

两种水基摩擦改性剂对轮轨黏着和损伤性能的影响

程焯¹, 师陆冰¹, 王文健¹, 沈明学², 丁昊昊^{1*}, 郭俊¹, 刘启跃¹

(1. 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;

2. 华东交通大学材料科学与工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 利用MJP-30A滚动磨损与接触疲劳试验机研究了两种水基摩擦改性剂(分别记为FM1和FM2)的最佳涂敷量, 分析了FM1和FM2在最佳涂敷量下对轮轨磨损和损伤的影响。结果表明: FM1和FM2单次的最佳涂敷量分别为14和8 μl 。FM1介质下轮轨试样的磨损率明显降低, 仅为干态下的23%和41%; FM2介质下车轮试样的磨损率略高于干态下, 钢轨试样的磨损率为干态下的64%。干态和FM2介质下轮轨试样表面出现起皮、剥落及明显的疲劳裂纹, 试样剖面出现多层裂纹、支裂纹和次表层裂纹; FM1介质下轮轨试样损伤轻微, 试样表面出现轻微起皮和点蚀, 试样剖面出现少量的单层微裂纹, FM1可有效减缓轮轨的磨损与损伤。

关键词: 水基摩擦改性剂; 轮轨材料; 黏着系数; 磨损; 损伤

中图分类号: TH117.1

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2021)02-0176-11

Effects of Two Kinds of Water-Based Friction Modifiers on Wheel-Rail Adhesion and Damage

CHENG Zhuo¹, SHI Lubing¹, WANG Wenjian¹, SHEN Mingxue², DING Haohao^{1*},
GUO Jun¹, LIU Qiyue¹

(1. Tribology Research Institute, State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University,
Sichuan Chengdu 610031, China

2. School of Materials Science and Engineering, East China Jiaotong University, Jiangxi Nanchang 330013, China)

Abstract: Using the MJP-30A rolling wear and contact fatigue test rig, the optimum coating amounts of two kinds of water-based friction modifiers (FM1 and FM2) were studied. The effects of FM1 and FM2 on wear and damage of wheel and rail under the optimum coating amount were analyzed. The results showed that the optimum coating amounts of FM1 and FM2 were 14 μl and 8 μl , respectively. The wear rates of wheel/rail specimens with the presence of FM1 medium were only 23% and 41% of those in dry condition. The wear rate of wheel specimen with the presence of FM2 medium was slightly higher than that in dry condition, and the wear rate of rail specimen was 64% of that in dry condition. Under the dry condition or with the presence of FM2 medium, peeling, spalling and obvious fatigue cracks appeared on the wheel and rail surfaces. On the cross sections of wheel and rail specimens, multi-layer cracks, branch cracks and subsurface cracks appeared. With the presence of the FM1 medium, the wheel and rail specimens were

Received 17 June 2020, revised 13 July 2020, accepted 24 July 2020, available online 28 March 2021.

*Corresponding author. E-mail: haohao.ding@swjtu.edu.cn, Tel: +86-28-87634304.

The project was supported by the National Key R&D Program Intergovernmental Key Items for International Scientific and Technological Innovation Cooperation (2018YFE0109400), Sichuan Science and Technology Program (2020YFH0057) and Foundation of State Key Laboratory of Traction Power (TPL1906).

国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项(2018YFE0109400)、四川省国际科技创新合作项目(2020YFH0057)和牵引动力国家重点实验室开放课题(TPL1906)资助。

damaged slightly. The slight peeling and pitting appeared on the surface and a small number of single-layer micro cracks appeared on the cross sections. FM1 could effectively reduce the wear and damage of wheel and rail.

Key words: water-based friction modifier; wheel and rail materials; adhesion coefficient; wear; damage

随着铁路向高速化和重载化方向发展,轮轨系统磨损和滚动接触疲劳损伤现象日益严重^[1-2]。特别是小半径曲线线路上轮轨磨损(钢轨波磨、车轮多边形磨损和钢轨侧磨等)与噪声严重,不仅降低乘坐舒适性,还会影响轮轨服役寿命与运行安全^[3]。因此,铁路现场需对轮轨界面进行减摩调控以降低轮轨黏着、磨损、损伤和噪声^[4-5]。目前轮轨界面减摩调控技术主要包括轮缘/轨侧润滑和踏面/轨顶黏着调控。轮缘/轨侧润滑主要用于曲线线路^[6],降低轮缘/轨侧黏着系数,从而减轻轮缘与轨侧磨损。经过几十年的发展,轮缘/轨侧润滑技术已相对成熟。然而,在车轮踏面/轨顶界面上,黏着系数过低将导致车轮打滑或空转,使列车牵引力不足或制动距离过长。因此,车轮踏面/轨顶界面黏着系数应保持在适中范围^[7]。目前,主要利用各类摩擦改性剂(Friction Modifier, FM),也称摩擦调节剂,将轮轨界面黏着系数调控至0.2~0.4的适中水平。常见摩擦改性剂包括固体FM、油基FM和水基FM。

早在90年代初期,温哥华铁路运输系统便已经开始使用摩擦改性剂^[8]。此后,国内外学者对摩擦改性剂的使用性能进行了实验室和现场试验研究^[9]。于水波等^[10]通过现场试验发现利用摩擦调控技术可以有效减缓钢轨波磨,降低脱轨系数。李珂等^[11]制备了固体FM,研究发现使用固体FM时摩擦系数可调节至0.3~0.4水平。Galas等^[12]研究发现油基FM具有调控轮轨界面黏着和减少轮轨磨损的能力,油基FM调控黏着的能力很大程度上取决于所施加的量,而金属颗粒的含量是控制磨损的关键因素。Meehan等^[13]利用理论模型研究了油基FM对车轮振动和噪声的影响,定量解释了油基FM作用下产生噪声的原因。Matsumoto等^[14]在实验室研究了水基FM对轮轨横向和纵向牵引曲线特性的影响,发现水基FM可以有效避免轮轨横向和纵向牵引曲线的负摩擦特性。Lu等^[15]分别研究了氧化铁、钙基轮缘润滑脂对水基FM(Keltrack™)的影响,结果表明加入氧化铁可以明显提高轮轨的黏着系数,油脂会降低水基FM的附着能力和轮轨第三介质层的剪切强度。Arias-Cuevas等^[16]研究了两种水基FM对轮轨黏着和损伤性能的影响,结果表明含有坚硬固体颗粒的水基FM介质下轮轨界面的黏着系数更高,但容易造成轮轨损伤。Eadie等^[17]通过现场研究发现水基

FM可以有效预防钢轨波磨的形成,同时能够降低噪声3~5 dB。然而,当水基FM用量选择不当时,会引起轮轨低黏着效应^[18],也容易引发轮轨“油楔效应”,加剧轮轨疲劳损伤。但是,目前针对水基FM最佳涂敷量的研究较少,水基FM作用下轮轨损伤行为的研究也很缺乏。

本文中利用MJP-30A滚动磨损与接触疲劳试验机首先研究了两种水基FM(分别记为FM1和FM2)不同涂敷量下轮轨界面黏着行为,确定了FM1和FM2的最佳涂敷量。然后研究了FM1和FM2最佳涂敷量下对轮轨磨损和损伤性能的影响。研究结果可为轮轨界面摩擦调控应用及优化提供理论与技术指导。

1 试验材料及方法

轮轨滚动模拟试验在MJP-30A滚动磨损与接触疲劳试验机上进行^[19],如图1(a)所示。车轮试样和钢轨试样分别安装在试验机的上、下主轴上,并分别由两台独立的伺服电机驱动,通过调节轮轨试样的转速可以精确控制轮轨蠕滑率。轮轨试样取样位置与尺寸如图1(b)所示,轮轨接触方式为线接触^[20],接触宽度为5 mm。车轮材料为C级车轮(硬度约为HV_{0.5}346),钢轨材料为U75V热轧钢轨(硬度约为HV_{0.5}315)。滚动试验过程中,轮轨之间的法向载荷通过液压加载,并由压力传感器进行实时监测,通过安装在下主轴上的扭矩传感器可测得钢轨试样所受扭矩,除以钢轨试样半径后可得到轮轨界面切向力,通过轮轨界面切向力和法向力可得到轮轨黏着系数(切向力/法向力)。试验参数:法向载荷为2 350 N,通过赫兹模拟准则计算得到轮轨最大接触应力为1 100 MPa,对应列车轴重约14 t^[21],车轮试样转速为495 r/min,钢轨试样转速为500 r/min,轮轨滑差率为1%。

试验所使用的两种水基FM主要成分列于表1中。为了研究两种水基FM的机械稳定性能,将制备好的水基FM1和FM2装入试管中,密封静置并记录分层现象随时间的变化,结果列于表2中。静置5~10 d后,水基FM1和FM2均未出现分层;静置20 d后,水基FM2出现轻微分层,而水基FM1仍无分层现象;随着静置时间增加,水基FM2分层现象越来越明显并伴有颗粒沉淀,而水基FM1只出现轻微分层现象;水基FM1的机

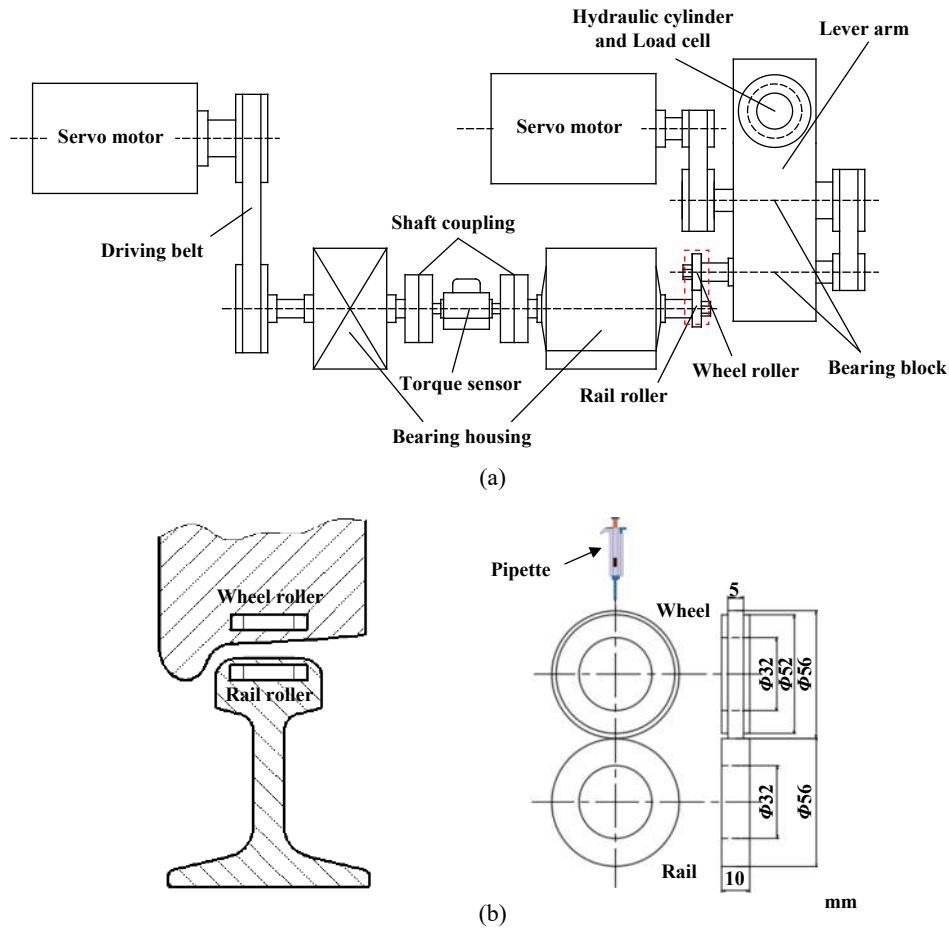


Fig. 1 (a) MJP-30A rolling wear and contact fatigue test rig; (b) sampling position and size of wheel/rail specimens
图 1 (a) MJP-30A滚动磨损与接触疲劳试验机; (b) 轮轨试样取样位置及尺寸

表 1 水基FM组成成分(w)

Table 1 Compositions of water-based FM (w)

FM	Water	Retention agent	Rheology modifier	Solid particles	Antifreeze	Surfactant
FM1	45%	8%	14%	10%	12%	11%
FM2	55%	6%	8%	10%	12%	9%

表 2 水基FM分层现象

Table 2 Layering of water-based FM

Standing time	5 days	10 days	20 days	30 days
FM1	No layering	No layering	No layering	Slight layering
FM2	No layering	No layering	Slight layering	Obvious layering and sedimentation

械稳定性能较FM2好, 主要是因为FM1中的保持剂比FM2中的高导致。

图2为水基FM1和FM2静置10 d后涂敷在钢轨试样表面的形貌. 可以看出: 水基FM1在钢轨试样表面形成了1层光滑、均匀的薄膜; 而水基FM2形成的薄膜表面相对粗糙且均匀性较差, 说明FM1具有更好的涂敷性能, 主要是因为FM1成分中具有更高的流变调节剂. 此外, 观察两种FM发现, FM1较为黏稠而FM2较

为稀松, 主要是因为FM2中水含量较大导致。

(1) 水基FM不同涂敷量下的黏着试验

用移液器添加水基FM(精度可达1 μl, 图1(b)), 两种水基FM的单次涂敷量为2、4、6、8、10、12、14、16、18和20 μl, 在每个涂敷量下测量轮轨黏着系数、作用转数和最佳作用转数(黏着系数保持在0.25~0.35的转数, 即列车运行最佳黏着水平^[22]), 从而确定两种水基FM1和FM2的最佳涂敷量。

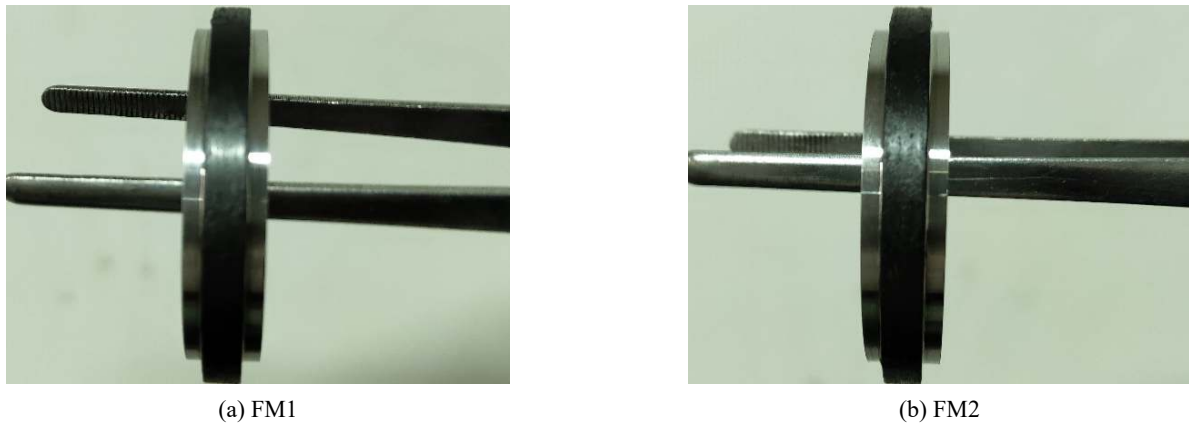


Fig. 2 Images of FMs coated on rail samples
图 2 水基摩擦改性剂在钢轨试样表面的涂敷照片

(2) 水基FM最佳涂敷量下轮轨摩擦磨损试验

轮轨试样首先在干态下跑合 5 000 r, 然后以最佳涂敷量添加水基FM, 每当黏着系数恢复至 0.4 时再添加 1 次, 直至循环次数达到 60 000 r. 为保证试验结果可靠性, 所有试验均重复 2 次.

试验前后使用无水乙醇在超声波清洗仪中清洗试样 10 min 并干燥处理, 利用电子分析天平(JA4103±0.1 mg)对试验前后的试样称重 10 次取平均值, 并计算试样的磨损率; 利用维氏硬度仪(MVK-H21, Japan)测量轮轨试样试验前的表面硬度和试验后剖面硬度; 利用轮廓仪测量试验后轮轨试样的表面粗糙度; 利用光学显微镜(OM)和扫描电子显微镜(SEM)观察试验后轮轨试样表面及剖面损伤.

2 结果与讨论

2.1 水基摩擦改性剂介质下轮轨黏着行为

图 3 给出了 FM1 和 FM2 在不同涂敷量下轮轨间的黏着系数曲线. 干态下轮轨黏着系数维持在 0.35~0.45

左右, 加入摩擦改性剂后, 轮轨黏着系数迅速降低至 0.1 左右, 随着循环次数的增加, 黏着系数以不同的变化趋势逐渐增加, 最终恢复至干态水平. 涂敷量较少时, 如 2~6 μl , 进入轮轨界面的摩擦改性剂较少, 黏着系数随循环次数几乎呈线性增加至干态水平. 涂敷量较大时, 黏着系数随循环次数的增长趋势不同. 涂敷 FM1 后, 轮轨黏着系数小于 0.2 时增长速度快, 在 0.2~0.3 范围内增长速度逐渐降低, 在 0.3~0.4 范围内增长速度较慢; 随单次涂敷量增加, 轮轨黏着系数维持在 0.2~0.4 范围内的作用转数明显增加[见图 3(a)]. 涂敷 FM2 后, 轮轨黏着系数小于 0.2 时增长速度较慢, 在 0.2~0.3 范围和 0.3~0.4 范围内增长速度较快; 随单次涂敷量增加, 黏着系数低于 0.2 的作用转数却逐渐增大, 而黏着系数维持在 0.2~0.4 范围内的作用转数增加不明显[见图 3(b)]. 可以看出: 干态下涂敷摩擦改性剂后, 轮轨黏着系数可从 0.3~0.5 的较高范围调节至 0.2~0.3 范围和 0.3~0.4 范围, 摩擦改性剂种类和涂敷量对其摩擦调节性能有明显影响. FM1 在用量较大时(大

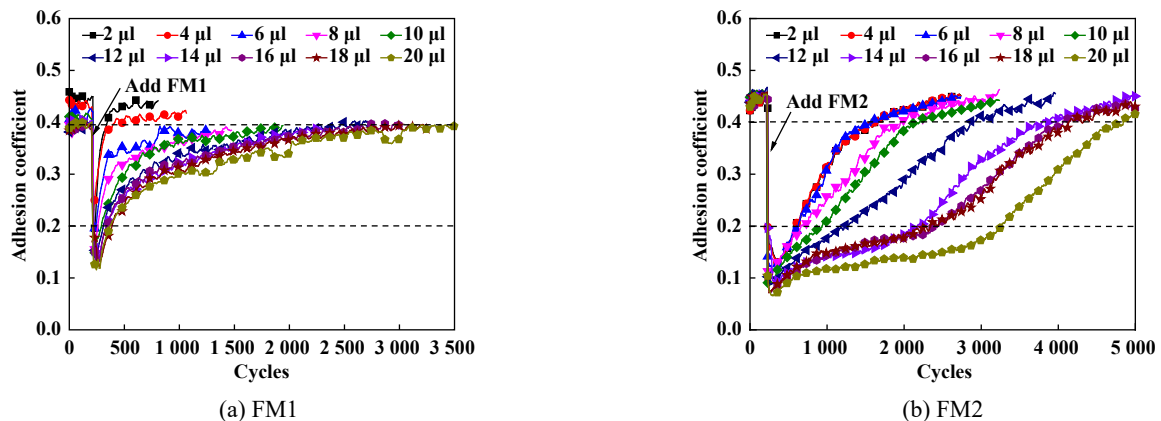


Fig. 3 Adhesion coefficients between wheel and rail under different dropping amounts of two FMs

图 3 水基摩擦改性剂不同涂敷量下轮轨间黏着系数

于8 μl), 黏着系数能较长时间保持在0.2~0.3水平, 可以更好地满足列车牵引和制动所需要的黏着水平^[23]; 而FM2在单次涂敷量较大时(大于10 μl), 容易造成低黏着现象(黏着系数小于0.2).

为了确定FM1和FM2的最佳涂敷量, 分别统计了FM1和FM2不同涂敷量下的作用转数(施加摩擦改性剂至黏着系数恢复至0.4之间的转数)和最佳作用转数(黏着系数介于0.25~0.35之间的转数), 如图4所示. 随涂敷量的增加, FM1和FM2的作用转数呈增长趋势. 其中, FM1的作用转数增长趋势较为稳定[见图4(a)]; FM2则为先缓慢增长, 然后快速增长[见图4(b)]. FM1最佳作用转数与作用转数随涂敷量增加的变化趋势几乎相同; 而FM2的最佳作用转数在涂敷量较小

时, 如2~8 μl 呈缓慢增长, 当单次涂敷量达到10 μl 后增长趋势不明显.

图5为水基摩擦改性剂不同涂敷量下的最佳作用转数占比(最佳作用转数/作用转数). 可以发现: FM1的最佳作用转数占比均比FM2大, 说明FM1比FM2具有更优的将黏着系数维持在0.25~0.35的能力. 随着涂敷量的增加, FM1的最佳作用转数占比先减小后增大, 后逐渐趋于平稳, 在单次涂敷量为14 μl 时最佳作用转数占比达到最大, 约为65%; 随涂敷量增加, FM2的最佳作用转数占比先保持稳定, 再增至峰值, 然后逐渐下降, 最后趋于平稳, 在单次涂敷量为8 μl 时最佳作用转数占比达到最大, 约为39%. 因此, FM1的单次最佳涂敷量为14 μl , FM2的单次最佳涂敷量为8 μl .

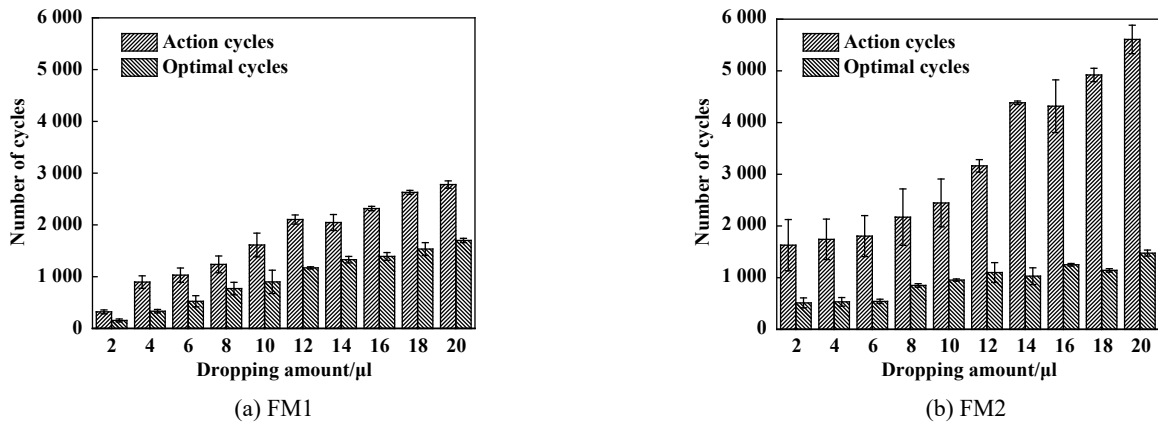


Fig. 4 Water-based friction modifiers' action cycles and optimal action cycles under different coating amounts

图4 水基摩擦改性剂不同涂敷量下的作用转数和最佳作用转数

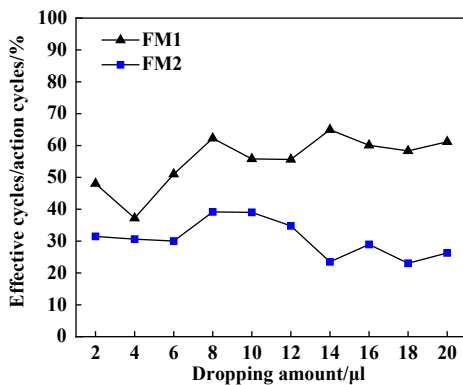


Fig. 5 Proportion of optimal action of water-based friction modifiers

图5 水基摩擦改性剂最佳作用转数占比

2.2 水基摩擦改性剂介质下轮轨磨损与损伤性能

2.2.1 磨损率

轮轨试样在干态下跑合5 000 r, 然后以最佳涂敷量添加水基FM(FM1的最佳涂敷量为14 μl , FM2的最

佳涂敷量为8 μl), 当黏着系数恢复至0.4时再次添加, 直至循环次数达到60 000 r. 图6给出了水基FM最佳涂敷量下轮轨试样的磨损率, 可以发现: 干态下轮轨试样磨损率较大, 分别为31.78和43.92 $\mu\text{g}/\text{m}$, 这是因为干态下轮轨间黏着系数较高(0.4以上), 轮轨间的切向

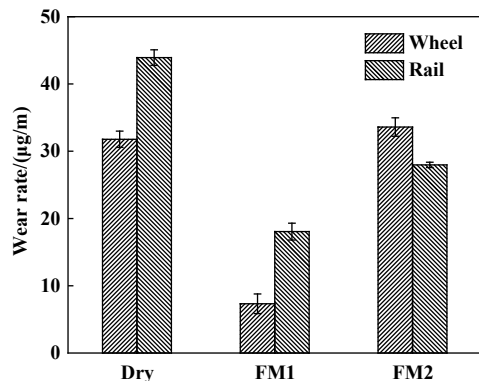


Fig. 6 Wear rates of wheel and rail specimens

图6 轮轨试样的磨损率

力较大导致的. FM1 介质下轮轨的磨损率明显降低, 分别为干态下的 23% 和 41%. 而 FM2 介质下钢轨试样的磨损率为干态下的 64%, 但车轮试样的磨损率比干态下略高, 这是由于 FM2 介质下轮轨试样存在表层材料破碎脱落现象, 进而加剧轮轨磨损. 以上结果表明, FM1 比 FM2 具有更优的减磨效果.

2.2.2 表面损伤行为

图 7 为试验后轮轨试样表面损伤的 OM 照片. 可以发现: 干态下车轮试样表面出现起皮和材料剥落现

象, 钢轨试样也伴有起皮和小的剥落坑 [见 图 7(a)]. FM1 介质下轮轨试样表面损伤较干态轻微, 车轮试样表面以轻微起皮和犁沟为主, 钢轨试样表面则以点蚀和犁沟为主 [见 图 7(b)]. 这是因为 FM1 改善了轮轨界面的黏着环境, 有效减缓了轮轨试样表面的磨损和损伤. FM2 介质下, 车轮试样表面出现明显的剥落坑、起皮和犁沟, 钢轨试样表面也出现犁沟和明显的剥落坑 [见 图 7(c)].

图 8 为轮轨试样表面损伤形貌的 SEM 照片. 可以

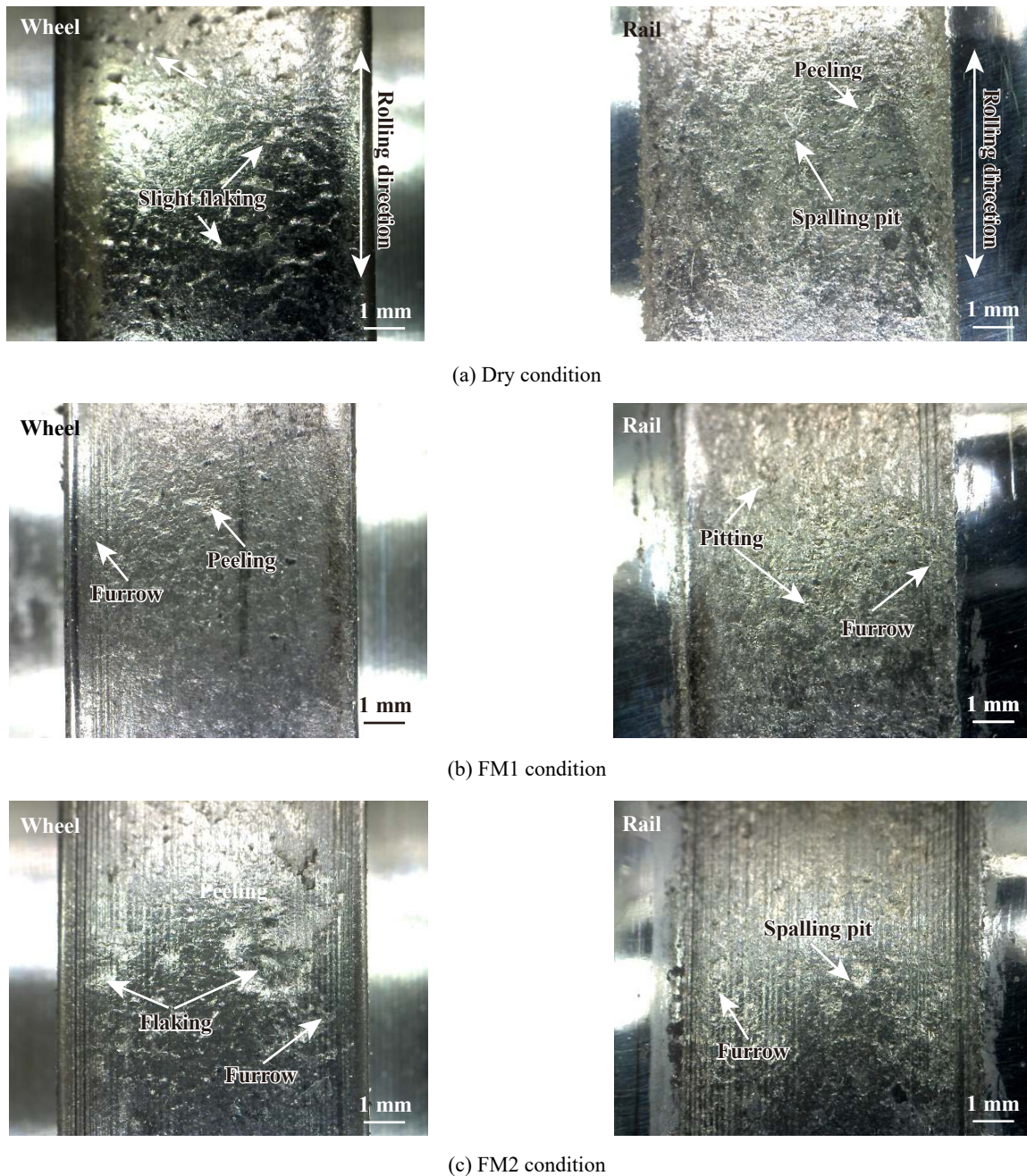


Fig. 7 OM micrographs of surface damages of wheel and rail specimens

图 7 轮轨试样表面损伤 OM 图片

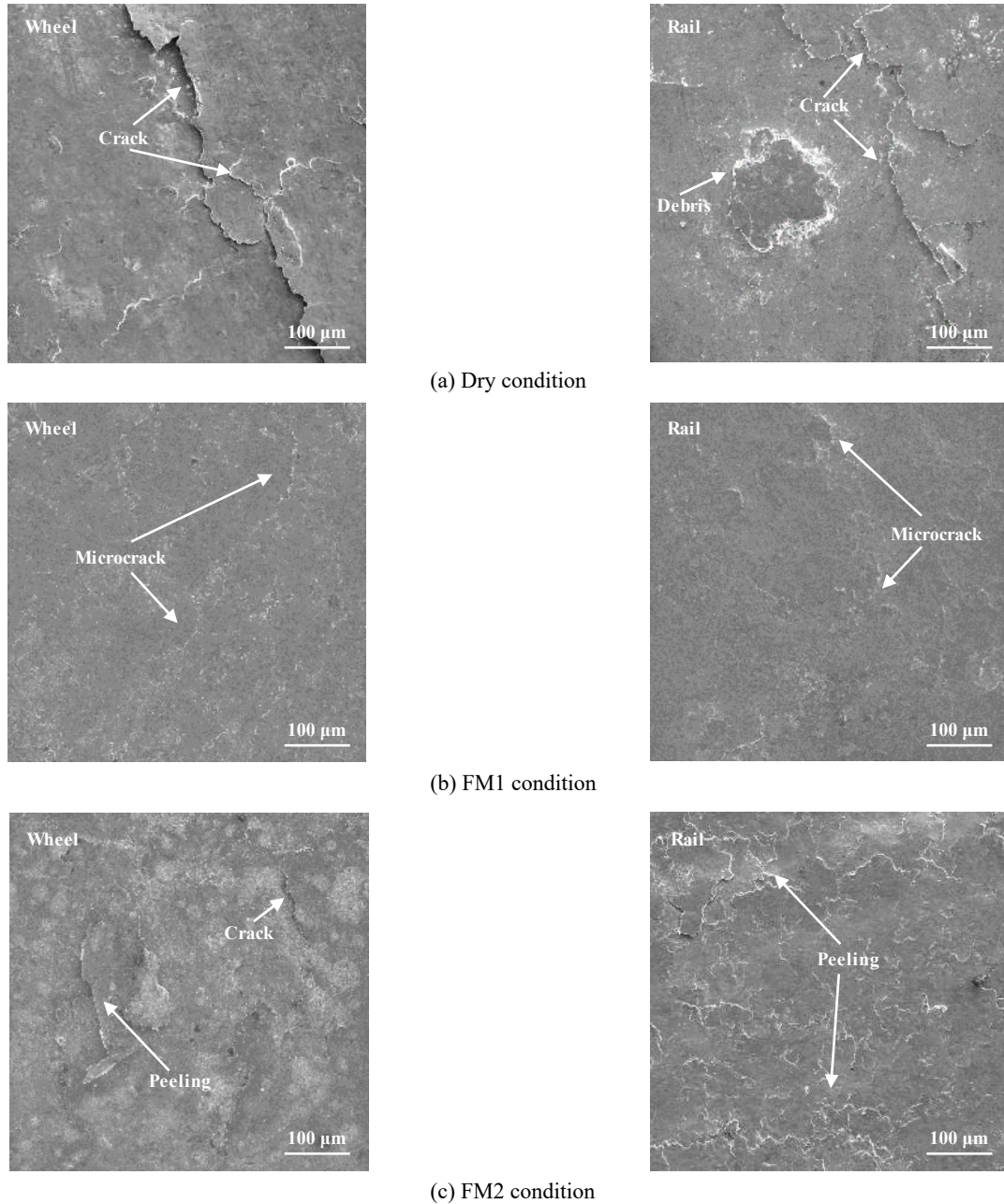


Fig. 8 SEM micrographs of wheel and rail specimen surface damages

图 8 轮轨试样表面损伤形貌的SEM照片

发现:干态下轮轨试样磨损表面出现明显的接触疲劳裂纹[见图8(a)],FM1介质下轮轨试样表面仅出现表面微裂纹[见图8(b)],而FM2作用下车轮试样表面出现了明显的疲劳裂纹和大面积起皮,钢轨试样表面也出现大面积起皮[见图8(c)].结合表面损伤形貌(图7和图8)发现:水基FM1可有效减缓轮轨试样表面损伤,而水基FM2对表面损伤的抑制作用较差.

图9为轮轨试样试验后的表面粗糙度.干态下,轮轨试样的表面粗糙度分别为0.54和0.59 μm,FM1介质下轮轨试样的表面粗糙度较干态下小,分别为0.28和0.42 μm;而FM2介质下,轮轨试样的表面损伤严重,车

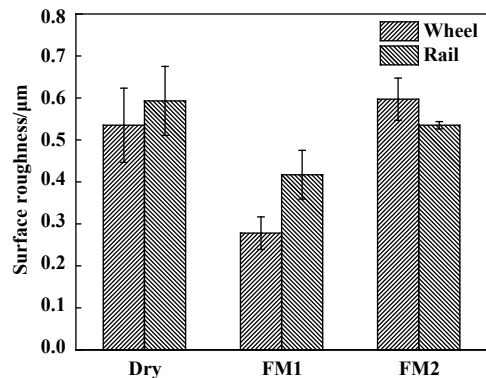


Fig. 9 Surface roughness of wheel and rail specimens

图 9 轮轨试样的表面粗糙度

轮表面粗糙度大于干态工况, 钢轨表面粗糙度略低于干态工况.

2.2.3 塑性变形

图10给出了轮轨试样塑性变形层OM图片. 干态下轮轨间切向力较大, 轮轨表面材料发生严重塑性形变, 因此轮轨试样塑性变形层厚度最大, 分别约为213和230 μm [见图10(a)]; 在水基摩擦改性剂作用下, 轮轨试样塑性变形层厚度均比干态下小, 这是因为水基摩擦改性剂介质下轮轨界面黏着系数较干态下低, 使得轮轨接触界面的切向力减小, 进而减缓了轮轨材

料的塑性变形, 轮轨试样的塑性变形层厚度介于130~160 μm 之间.

2.2.4 裂纹扩展行为

图11给出了试验后轮轨试样沿滚动方向剖面形貌的SEM照片. 可以发现: 干态下轮轨试样剖面出现了明显的多层裂纹和支裂纹[图11(a)], 在塑性变形层内支裂纹相互交织、不断扩展并相互贯穿至试样表面, 破碎脱落形成剥落坑[图7(a)]; 水基FM1可有效抑制轮轨试样裂纹扩展, 轮轨试样剖面仅出现少量的单层微裂纹[图11(b)]. 水基FM2作用下, 轮轨试样剖面

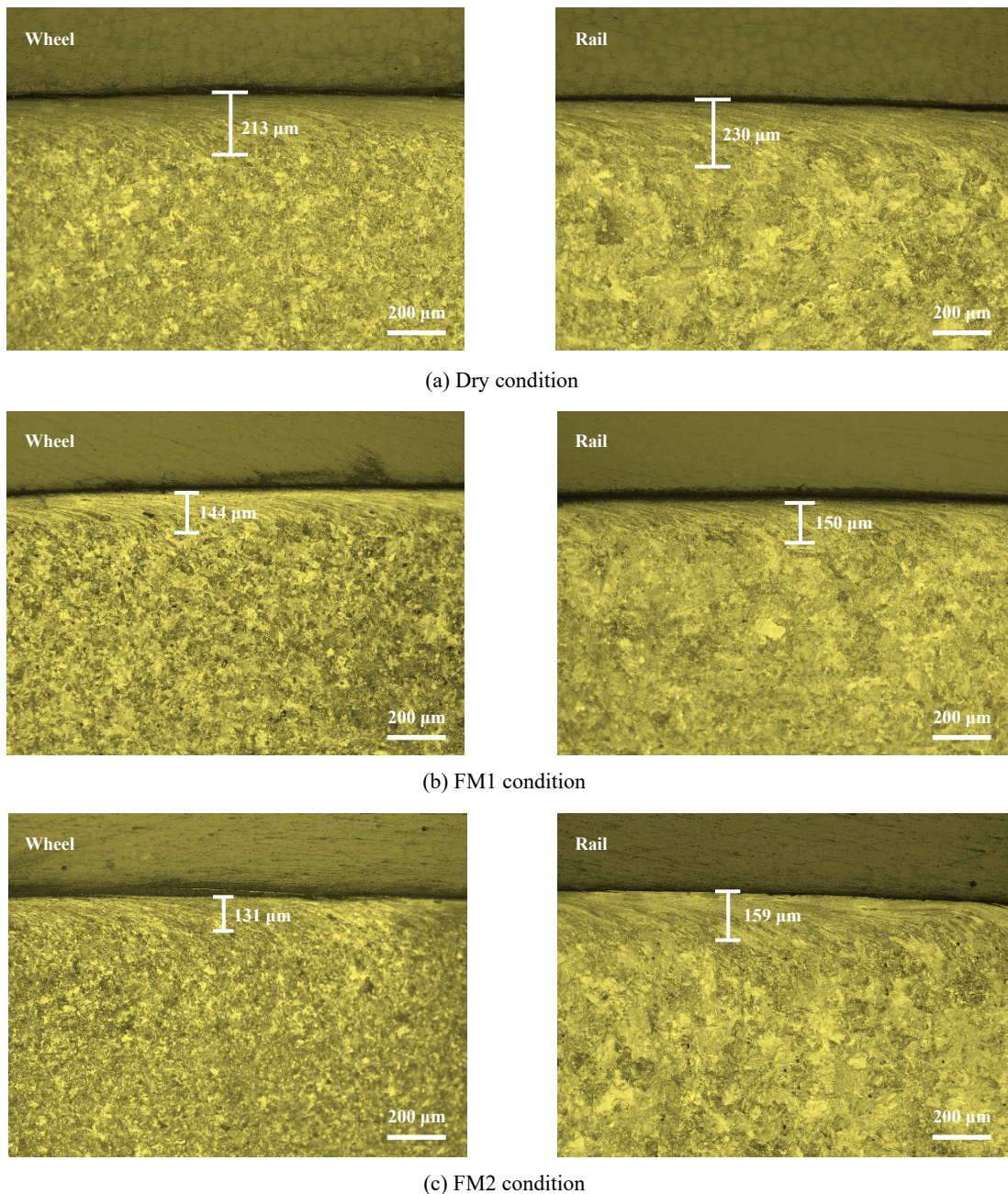


Fig. 10 Plastic deformation on cross sections of wheel and rail specimens

图 10 轮轨试样剖面塑性变形

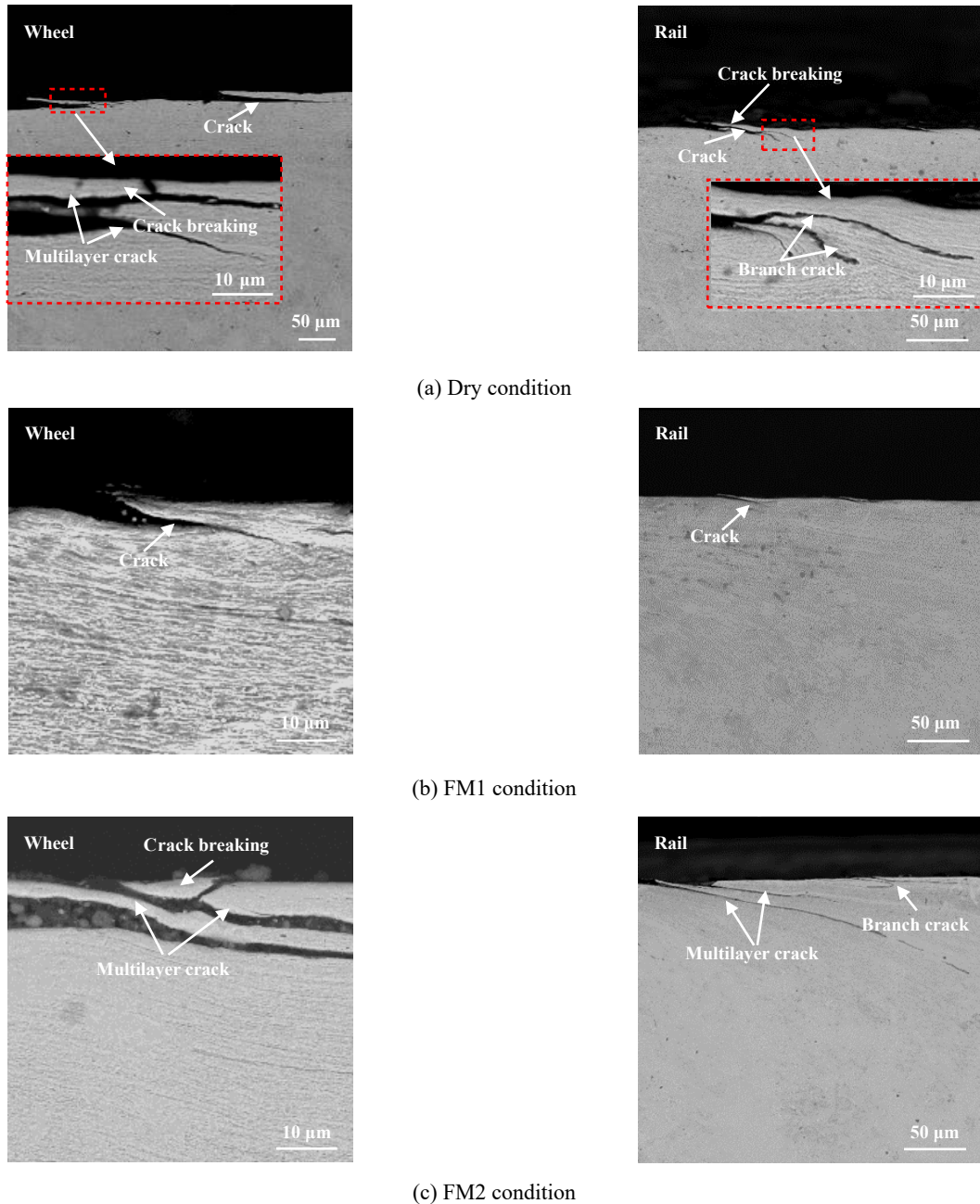


Fig. 11 SEM micrographs of cross sections of wheel and rail specimens

图 11 轮轨试样剖面形貌的SEM照片

出现明显的多层裂纹和支裂纹[图11(c)],特别是车轮试样多层裂纹长度较长,这是因为FM2较FM1流动性更好,FM2容易沿着车轮表面疲劳裂纹的开口进入裂纹内部,在循环应力的作用下,发生“油楔效应”,加速疲劳裂纹扩展。

图12为车轮试样疲劳裂纹的扩展长度和深度的统计结果.可以发现:干态下车轮试样裂纹平均扩展长度和深度最大,FM1、FM2作用下车轮试样裂纹的平均扩展长度和深度均低于干态下,裂纹平均扩展长度为干态工况的54.5%和80.3%,裂纹平均扩展深度为

干态下的60.7%和87.2%.裂纹长度和深度统计结果与轮轨磨损与损伤规律一致。

综上所述:水基摩擦改性剂中的水、流变调节剂和表面活性剂等介质起到减摩作用,而固体颗粒起到增摩作用(增加黏着系数),由于FM2中的水含量明显高于FM1,因此,FM2会导致较低的黏着系数(图3).此外,由于FM2中的保持剂和流变调节剂较少,其机械稳定性和涂敷性较差(图2),在周期性垂向与切向力作用下,涂敷在钢轨试样表面的FM2容易被破坏,从而导致轮轨较大的磨损与损伤(图6和图8).同时,由于

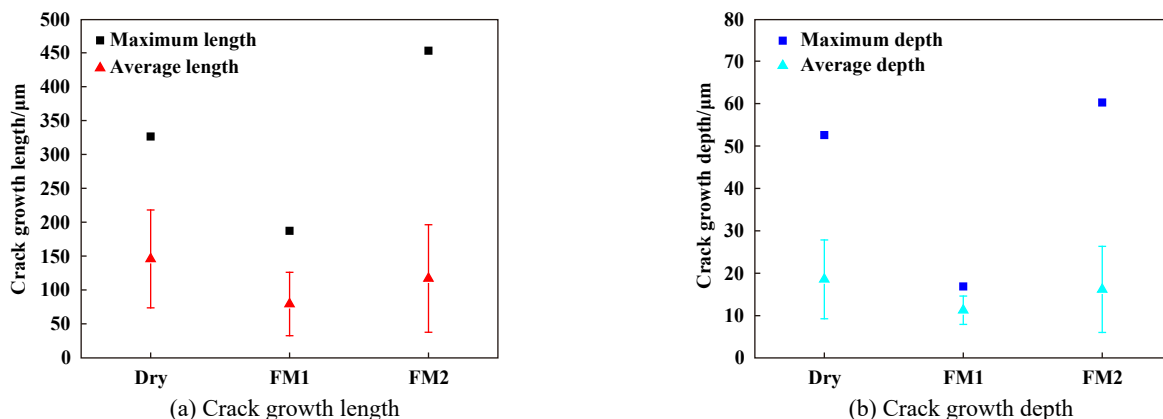


Fig. 12 Crack growth length and depth of wheel specimen

图 12 车轮试样裂纹扩展长度和深度

FM2中水含量较高, 较为稀疏, 容易进入轮轨试样已有的疲劳裂纹中, 引发“油楔效应”, 加速裂纹扩展, 进而导致较严重的滚动接触疲劳损伤(图11)。而FM1机械稳定性和涂敷性能均较好, 能有效改善轮轨黏着系数, 同时轮轨材料磨损和损伤也较轻微。

干态下未使用摩擦改性剂时, 轮轨黏着(摩擦)系数维持在0.35~0.45之间; 使用摩擦改性剂时, 黏着系数可调节至0.2~0.3范围内, 其中, FM1在用量较大时(大于8 μl), 黏着系数能较长时间保持在0.2~0.3水平。干态下未使用摩擦改性剂时, 轨磨损率为31.78和43.92 μg/m, 轮轨表面形成明显的疲劳裂纹损伤; 使用摩擦改性剂后, 轮轨磨损率明显减小, 其中, FM1在最佳用量下(14 μl)可使轮轨磨损率降低至未使用时的23%和41%, 轮轨表面损伤轻微, 仅出现轻微裂纹, 裂纹长度和深度明显减小。

3 结论

a. 加入水基FM后轮轨黏着系数由干态下0.35~0.45迅速下降至0.1左右, 随循环次数的增加, 黏着系数逐渐增加至干态水平; 随涂敷量增加, 水基FM的作用转数和最佳作用转数均呈现增加趋势, 水基FM1最佳作用转数占比大于水基FM2, 水基FM1和FM2最佳单次涂敷量为14和8 μl。

b. 干态下轮轨试样磨损率分别为31.78和43.92 μg/m, 水基FM1介质下轮轨试样的磨损率明显降低, 仅为干态下的23%和41%; 水基FM2介质下车轮试样的磨损率略高于干态, 钢轨试样的磨损率为干态下的64%。

c. 干态下轮轨试样出现起皮、剥落坑和多层裂纹; 水基FM1介质下轮轨试样损伤最为轻微, 出现微裂纹和点蚀; 水基FM2介质下轮轨试样出现大面积起

皮、剥落坑和多层裂纹。相比水基FM2, 水基FM1作用下轮轨黏着水平更优、轮轨磨损与损伤更加轻微。

参考文献

- [1] Wang Yanpeng, Ding Haohao, Zou Qiang, et al. Research progress on rolling contact fatigue of railway wheel treads[J]. Surface Technology, 2020, 49(5): 120–128 (in Chinese) [王延朋, 丁昊昊, 邹强, 等. 列车车轮踏面滚动接触疲劳研究进展[J]. 表面技术, 2020, 49(5): 120–128]. doi: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.05.015.
- [2] Zou Xiaochun, Zhang Jun, Sun Chuanxi, et al. Simulation calculation and experimental research on contact between locomotive wheel tread and rail[J]. Tribology, 2020, 40(1): 128–134 (in Chinese) [邹小春, 张军, 孙传喜, 等. 机车车轮踏面与钢轨接触的仿真计及试验研究[J]. 摩擦学学报, 2020, 40(1): 128–134]. doi: 10.16078/j.tribology.2019146.
- [3] Y. Zhu, W. J. Wang, R. Lewis, et al. A review on wear between railway wheels and rails under environmental conditions[J]. Journal of Tribology-Transactions of the ASME, 2019, 141: 120801. doi: 10.1115/1.4044464.
- [4] Wang W J, Lewis R, Evans M D, et al. Influence of different application of lubricants on wear and pre-existing rolling contact fatigue cracks of rail materials[J]. Tribology Letters, 2017, 65(2): 1–15. doi: 10.1007/s11249-017-0841-9.
- [5] C Hardwick, R Lewis, R Stock. The effects of friction management materials on rail with pre-existing RCF surface damage[J]. Wear, 2017, 384: 50–60.
- [6] N Zhang, Z W Tong, H B Yang, et al. New technology for friction control of wheel/rail tread[J]. Synthetic Lubricants, 2011, 38(2): 16–18 (in Chinese) [张念, 童宗文, 杨洪滨, 等. 轮轨踏面摩擦控制新技术[J]. 合成润滑材料, 2011, 38(2): 16–18].
- [7] R Stock, L Stanlake, C Hardwick, et al. Material concepts for top of rail friction management-classification, characterization and application[J]. Wear, 2016, 366-367: 225–232. doi: 10.1016/j.wear.

- 2016.05.028.
- [8] J Kalousek, K L Johnson. An investigation of short pitch wheel and rail corrugations on the Vancouver mass transit system[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 1992, 206(2): 127–135. doi: [10.1243/PIME_PROC_1992_206_226_02](https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1992_206_226_02).
- [9] Li Jitian, Du Mintao. Application of noise control technology of rail-top friction regulator in urban rail transit[J]. Modern Urban Transit, 2019(7): 72–76 (in Chinese) [李跻添, 杜敏涛. 城市轨道交通轨顶摩擦调节剂降噪技术应用[J]. 现代城市轨道交通, 2019(7): 72–76].
- [10] Yu Shuibo, Yu Jun, Yang Xingkuan, et al. Development and application of side-by-side wheel/rail tread friction regulation equipment[J]. China Railway, 2013(6): 81–84 (in Chinese) [于水波, 余军, 杨兴宽, 等. 道旁轨轮踏面摩擦调控设备研制与应用[J]. 中国铁路, 2013(6): 81–84]. doi: [10.3969/j.issn.1001-683X.2013.06.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-683X.2013.06.019).
- [11] Li Ke, Hu Ping, Zheng Yu, et al. Process optimization and performance study of unsaturated polyester friction control agent for wheel tread[J]. Lubrication Engineering, 2020, 45(4): 94–99 (in Chinese) [李珂, 胡萍, 郑禹, 等. 车轮踏面不饱和聚酯摩擦控制剂的工艺优化及性能研究[J]. 润滑与密封, 2020, 45(4): 94–99]. doi: [10.3969/j.issn.0254-0150.2020.04.016](https://doi.org/10.3969/j.issn.0254-0150.2020.04.016).
- [12] R Galas, M Omasta, I Krupka, et al. Laboratory investigation of ability of oil-based friction modifiers to control adhesion at wheel-rail interface[J]. Wear, 2016, 368-369: 230–238. doi: [10.1016/j.wear.2016.09.015](https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.09.015).
- [13] P A Meehan, X G Liu. Modelling and mitigation of wheel squeal noise under friction modifiers[J]. Journal of Sound and Vibration, 2019, 440: 147–160. doi: [10.1016/j.jsv.2018.10.025](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.10.025).
- [14] K Matsumoto, Y Suda, T Iwasa, et al. A method to apply friction modifier in railway system[J]. JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing, 2004, 47(2): 482–487.
- [15] X Lu, J Cotter, D T Eadie. Laboratory study of the tribological properties of friction modifier thin films for friction control at the wheel/rail interface[J]. Wear, 2005, 259: 1262–1269. doi: [10.1016/j.wear.2005.01.018](https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.01.018).
- [16] Li Z, Arias-Cuevas O, Lewis R, et al. Rolling-sliding laboratory tests of friction modifiers in leaf contaminated wheel-rail contacts[J]. Tribology Letters, 2008, 33(2): 97–109. doi: [10.1007/s11249-008-9393-3](https://doi.org/10.1007/s11249-008-9393-3).
- [17] D T Eadie, J Kalousek, K C Chiddick. The role of high positive friction (HPF) modifier in the control of short pitch corrugations and related phenomena[J]. Wear, 2002, 253: 185–192. doi: [10.1016/S0043-1648\(02\)00098-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(02)00098-4).
- [18] R Galas, D Kvarda, M Omasta, et al. The role of constituents contained in water-based friction modifiers for top-of-rail application[J]. Tribology International, 2018, 117: 87–97. doi: [10.1016/j.triboint.2017.08.019](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.08.019).
- [19] L C Guo, W T Zhu, C G He, et al. Analysis of wear and damage performance of U75V rail under different creep slip rates[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(4): 167–175 (in Chinese) [郭立昌, 朱文涛, 何成刚, 等. 不同蠕滑率下U75V钢轨磨损与损伤性能分析[J]. 机械工程学报, 2018, 54(4): 167–175]. doi: [10.3901/JME.2018.04.167](https://doi.org/10.3901/JME.2018.04.167).
- [20] L B Shi, Q Li, D Kvarda, et al. Study on the wheel/rail adhesion restoration and damage evolution in the single application of alumina particles[J]. Wear, 2019, 426-427: 1807–1819. doi: [10.1016/j.wear.2019.01.021](https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.01.021).
- [21] H H Ding, C R Su, W J Wang, et al. Investigation on the rolling wear and damage properties of laser discrete quenched rail material with different quenching shapes and patterns[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 378: 124991. doi: [10.1016/j.surfcoat.2019.124991](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.124991).
- [22] O Polach. Creep forces in simulations of traction vehicles running on adhesion limit[J]. Wear, 2005, 258: 992–1000. doi: [10.1016/j.wear.2004.03.046](https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.03.046).
- [23] S Maya-Johnson, J F Santa, A Toro. Dry and lubricated wear of rail steel under rolling contact fatigue-wear mechanisms and crack growth[J]. Wear, 2017, 380-381: 240–250. doi: [10.1016/j.wear.2017.03.025](https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.03.025).