

润滑时机对地铁试验段曲线钢轨剥离掉块与磨耗影响研究^{*}

王学彦¹ 肖起鹏² 杜茂金³ 张光亮⁴ 王少锋^{2**}

(1. 湖南高速铁路职业技术学院铁道工程学院, 421002, 衡阳;

2. 华东交通大学铁路环境振动与噪声教育部工程研究中心, 330013, 南昌;

3. 南京地铁运营公司工务分公司, 211135, 南京; 4. 湖南恒德检测有限公司, 421002, 衡阳//第一作者, 教授)

摘要 为探究地铁小半径曲线润滑处理时机对钢轨磨耗及剥离掉块的影响, 选取两条运营条件相似的线路, 其中一条线路进行润滑与停止润滑两个阶段的处理, 将其称为工况1, 另一条未经任何处理的线路作为对比工况, 称为工况2。分别对2个工况现场进行跟踪观测, 并对观测结果进行对比分析。研究发现: 在进行了润滑处理的后期运营期间, 2个工况的钢轨侧磨都在正常增长值内, 润滑处理在新轨下道前期对钢轨侧磨影响不大, 主要对其轨距角与轨顶磨耗有抑制影响。对比工况2可以发现, 工况1在润滑阶段早期出现了大面积的剥离掉块现象, 这是由于早期润滑导致的“油楔效应”加速了疲劳裂纹的发展, 最终造成曲线段上大面积的剥离掉块。通过研究获得的地曲线合理润滑时机与周期, 可为地铁公司运营维护提供理论基础。

关键词 地铁线路; 小半径曲线; 钢轨磨耗; 钢轨润滑

中图分类号 U213.4⁺2

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2022.09.011

Study on Influence of Rail Lubricant Timing on Spalling Defects and Wear of Metro Test Section Curve

WANG Xueyan, XIAO Qipeng, DU Maojin, ZHANG Guangliang, WANG Shaofeng

Abstract In order to explore the effect of lubrication timing on rail wear and spalling defects in the metro sharp curve, two lines with similar operation conditions are selected. One line carries out treatment of the two stages of lubrication and stop lubrication, as in Case 1. The other line, as in Case 2, is without any treatment and used for comparison condition. Both working condition sites are tracked, observed and comparatively analyzed. Research results show that: in the later stage of the lubrication treatment, the rail side wear

amount of the 2 cases is within the normal growth range, and the lubrication treatment has little effect on the rail side wear in the early stage of the rail operation, and mainly suppressed the rail gauge corner and the wear of the rail top. However, compared to Case 2, Case 1 has a large area of spalling defects at early stage due to the ‘oil wedge effect’ caused by early lubrication accelerating the development of fatigue cracks, and finally causes large-area spalling defects on the curve segment. The reasonable lubrication timing and cycle of metro curve is obtained from research, providing theoretical basis for metro company operation and maintenance.

Key words metro line; sharp curve; rail wear and damage; rail lubrication

First-author's address College of Railway Engineering, Hunan Technical College of Railway High-speed, 421002, Hengyang, China

磨耗与疲劳裂纹是铁路钢轨的两种主要损伤^[1], 二者是一个同时存在、共同发展、相互影响的连续过程^[2]。磨耗改变轮轨型面, 使轮轨接触关系逐步恶化, 接触斑内受力增大, 最终加剧疲劳裂纹等其他损伤^[3]。当疲劳裂纹扩展到一定程度, 会导致钢轨表面发生剥离掉块^[4], 进一步影响轮轨接触关系, 加剧磨耗扩展速率, 增加维修费用, 并最终危害行车安全。

在这两种损伤中, 曲线钢轨服役寿命主要是由磨耗控制, 大量钢轨由于磨耗超限而报废^[5]。在城市轨道交通系统中, 小半径曲线段数量较多, 且钢轨损伤大部分集中于该处, 其中外轨侧磨损伤尤为明显^[6]。地铁运营公司采用了多种方法来减小钢轨磨耗, 例如采用高硬度钢轨^[7]、调整轨底坡^[8]、对

^{*} 国家自然科学基金项目(51708221); 湖南省自然科学基金项目(2020JJ6045); 江西省自然科学基金项目(20171BAB206055)

^{**} 通信作者

特定段曲线进行润滑等措施^[9],其中,润滑剂因成本低、效率高而获得了广泛的应用。

南京地铁各条线路开通以后,出现了以磨耗、疲劳裂纹为主的多种伤损^[10-11]。为减小磨耗,延长钢轨服役寿命,部分线路采用了外轨润滑措施。但由于磨耗与裂纹之间存在着共生及互相影响的关系,润滑剂对裂纹以及剥离掉块的影响需要进一步研究。为探索合理的润滑时机与周期,本文采用现场跟踪观测的方法,选取多条曲线段进行长期的跟踪观测,对比分析在有润滑剂和无润滑剂的两种工况下,钢轨侧磨以及疲劳裂纹与剥离掉块的发展规律,探求并界定合理的润滑剂涂抹周期,为地铁的运营维护提供相应的指导依据。

1 现场跟踪观测试验工况介绍

选取两条运营条件相似的线路,其中一条线路进行润滑与停止润滑两个阶段的处理,将其称为工况 1;另一条未经任何处理的线路作为对比工况,称为工况 2,分别对 2 个工况现场进行跟踪观测,并对结果进行对比分析。两条线路的运营参数为:列车采用 A 型鼓形列车 6 节编组,最高运行速度为 80 km/h,车

辆最大轴重为 16 t;轨距为 1 435 mm,最小半径为 350 m,轨底坡大小为 1/40,所采用的是 LM(车辆踏面)型车辆磨耗踏面,钢轨型面为 CHN60。工况 1:所选试验曲线段为严重磨耗钢轨,需进行换轨处理,分别挑选换轨时间间隔接近的 9 个试验段新轨,在下道后进行润滑处理;工况 2:所选试验曲线段为新开通地铁线路,未对试验曲线段进行润滑处理。

测试开始前,需检测扣件的组装精度及零部件的制造精度,判断其是否满足设计要求。对试验段 ZX-2 型扣件和地下线压缩型减振扣件进行节点静刚度和动静刚度比检测;对试验段扣件 T 型螺栓进行抗拉强度及疲劳强度检测;对 II 型弹条进行残余变形和疲劳强度检测;对预埋套管进行抗拉强度及疲劳强度等现场取样检测,最终得出了扣件螺栓、II 型弹条及预埋管套均满足设计要求的结论,排除了润滑剂以外其他因素的干扰。

在选取的试验段中,4 组对比曲线段的运营条件类似,即采用普通道床和 ZX-2 型扣件,试验段曲线的半径、超高和轨道参数等数据对比如表 1 所示。其余 5 组对比试验曲线段,在道床类型及扣件选择时稍有差别。

表 1 不同扣件类型的跟踪试验曲线参数表
Tab. 1 Parameters of tracking test curve of different fastener types

扣件类型	曲线编号	半径/m	曲线总长/m	缓和曲线长/m	圆曲线长/m	超高/mm
ZX-2	1	350	217/304	120	97/184	120
	2	450/400	289/270	140/130	149/140	120
	3	1 200/1 000	120/200	80/90	40/110	70/92
	4	1 200	140/178	90/95	50/83	90/68
ZX-2/压缩型轨道 减振扣件	5	350	571/329	120	451/209	110/120
	6	350/400	148/270	120/130	28/140	120
	7	450/600	287/253	140/170	147/83	120
	8	450/650	289/278	140/170	149/108	120
	9	1 200/1 000	266/216	70/160	196/56	90/92

注:“/”前为工况 1 的参数,“/”后为工况 2 的参数。

2 现场跟踪观测的磨耗发展规律

所选取的试验曲线段半径分别为 350 m、400 m、450 m、600 m、650 m、1 000 m 和 1 200 m,在所选工况区段的直线、直缓、缓圆、曲中、圆缓、缓直段及各点之间共布置 9 个测点,测点位置分布如图 1 所示。

在进行了长达 10 个月的长期现场跟踪测量后,获得了两种工况下,18 条曲线段的 9 个测量点的平均侧磨值,如图 2 所示。由图 2 可知,由于所选工况

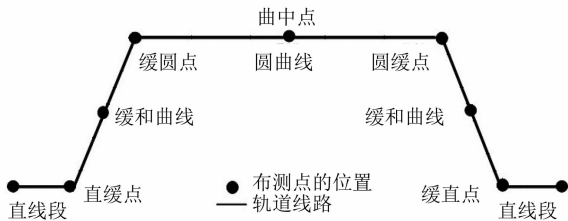


图 1 试验测点分布位置
Fig. 1 Distribution of test measuring points

的初始条件基本类似,试验开始时,2 个工况各曲线

段的平均侧磨量均为 0.1~0.4 mm,9 个测点的平均侧磨值均为 0.2~0.5 mm,磨耗增长量均为 0.03~0.12 mm,平均侧磨增长率分别约为 6×10^{-3} mm/月及 8×10^{-3} mm/月。与运营公司长期跟踪所得的运营期间侧磨发展规律对比可知,测量阶段的侧磨发展可认为在运营期间正常增长。

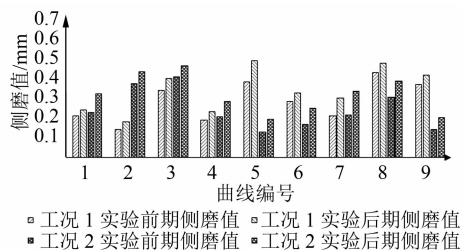


图2 试验工况下的平均侧磨值

Fig. 2 Average value of side wear in test working conditions

文献[12]的研究表明,地铁小半径曲线外轨侧磨的发展可分为3个阶段:阶段Ⅰ,磨耗从轨距角部分开始产生并向轨顶与轨侧扩展,尚未达到侧磨位置处,该阶段的侧磨速率约为0;阶段Ⅱ,开始出现侧磨并呈线性发展,侧磨达到9 mm左右进入阶段Ⅲ;阶段Ⅲ,侧磨速率明显提高,磨耗位置稳定。当地铁A型列车在300 m小半径曲线内以60 km/h的速度运行时,外轨侧磨速率约为0.53 mm/月。

试验期间,经过润滑处理的钢轨磨耗发展速率远未达到文献[12]的状态,随着后期跟踪观测发现,当发现磨耗速率线性发展、新增侧磨值达到0.5~1.0 mm时,对钢轨进行润滑处理,可有效减少钢轨侧面的磨耗速率。

上述实测数据表明,在此试验阶段,钢轨侧磨的发展十分缓慢,轮轨接触状态还未到达侧磨位置,此时有无进行润滑处理对2个工况的侧磨并无太大影响。

3 现场跟踪观测的剥离掉块发展情况

3.1 剥离掉块发展情况

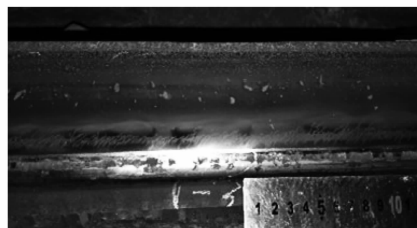
润滑阶段后期,工况1曲线上股钢轨出现大量剥离掉块,随着时间的增长,伤损范围逐渐扩展且有继续发展和恶化的趋势。

工况1中的曲线4(半径为1200 m、圆曲线长为50 m、缓和曲线长为90 m)和曲线7(半径为450 m、圆曲线长为147 m、缓和曲线长为140 m)的润滑处理后期现场剥离掉块如图3所示。从图3中

可以看出,小半径曲线段的剥离掉块现象尤为严重(见图3b)),掉块最大长度在20 mm以内,总体宽度在5 mm以内,深度为1~2 mm。其中,剥离掉块位置主要集中于缓和曲线段内,圆曲线段出现部分掉块现象,并且掉块的分布范围与面积大小随着半径的增大而减小。轨距角区域掉块分布尤为密集,轨顶区域呈零星分布状态。



a) 曲线4



b) 曲线7

图3 工况1的后期现场图(润滑处理阶段)

Fig. 3 Photo of later stage of Case 1 (lubrication treatment stage)

类比于工况1,工况2的试验曲线段上并未出现大面积的剥离掉块现象,仅在其表面出现正常运营时产生的细微裂纹。工况2中的曲线1(半径为350 m、圆曲线长为184 m、缓和曲线长为120 m)的后期现场图如图4所示。基于第2节的结论,此时所选取的两种工况中,润滑对侧磨均无太大影响。为探究出现大面积掉块现象的原因,对有无进行润滑处理的剥离掉块进行现场跟踪观测,过一段时间后,对两种工况的后期钢轨表面剥离掉块现象进行统计与对比。停止润滑后,两种工况的后期现场观测图如图5和图6所示。



图4 工况2的后期现场图(润滑处理阶段)

Fig. 4 Photo of later stage of Case 2 (lubrication treatment stage)

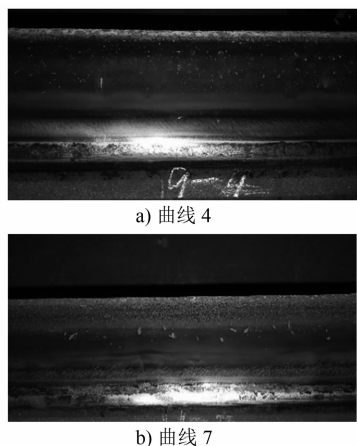


图 5 工况 1 的后期现场图(停止润滑处理阶段)

Fig. 5 Photo of later stage of Case 1 (stop lubrication treatment stage)



图 6 工况 2 的后期现场图(停止润滑处理阶段)

Fig. 6 Photo of later stage of Case 2 (stop lubrication treatment stage)

由图 5 可以发现,工况 1 中的钢轨剥离掉块新生率大大减少,根据现场实测获得,试验后期剥离掉块最大长度在 10 mm 以内,深度明显有所减小,部分曲线段触摸有毛刺感,最大宽度降低至 3 mm 以内,分布范围与面积大大降低,轨侧掉块严重区域其面积减小的速率要远大于轨顶区域。试验期间,工况 1 部分曲线段剥离掉块随时间的变换规律如表 2 所示。

表 2 停止润滑处理后的部分曲线段剥离掉块规律

Tab.2 Spalling defect law in some curve intervals after stop lubrication treatment

曲线 编号	曲线 半径/m	曲线 长度/m	掉块位置	测量期间掉块最大长度/mm			
				3 月	6 月	9 月	12 月
2	450	289	缓和曲线	19	18	13	10
6	350	148	圆曲线+缓和曲线	20	18	15	13
8	450	289	部分小圆弧掉块	15	13	9	8
9	1 200	266	部分小圆弧掉块	10	8	10	5

由图 6 可以发现,对比于润滑阶段后期情况,工况 2 在停止润滑后,轨顶面出现了一些细微裂纹,其磨耗量明显增加,但增长量在地铁运营侧磨增长量

范围内,属于正常现象。

3.2 原因分析

根据文献[13],润滑处理可使轮轨间摩擦因数降低至 0.1 以下,轮轨磨损率可以降低 85% 以上。但正常情况下,可通过轮轨接触磨去钢轨表面的早期裂纹,润滑处理虽然减小了轨顶与轨距角的磨耗,但也加速了早期微细裂纹的发展。此外,轮轨间存在的润滑等介质会随着轮轨接触产生的应力进入表面裂纹内部,最终形成“油楔效应”(进入裂纹内部的液体润滑剂在外部荷载作用下沿着钢轨内部结构薄弱的方向发展),再次加速疲劳裂纹发展。

试验后期,钢轨侧磨速率快速发展,为了延缓侧磨,可以选择在此时对其采取润滑处理^[14],此阶段内轮轨接触的仿真图如图 7 所示。

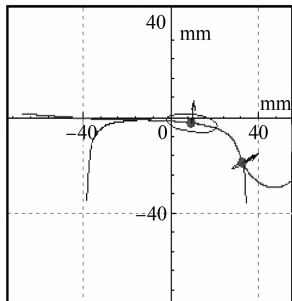


图 7 钢轨侧磨线性发展轮轨接触图

Fig. 7 Wheel-rail contact during rail side wear linear development

由图 7 可知,在有一定磨耗的情况下,外轨的轮轨接触斑位于轨面与轨侧,对其轨侧部分进行润滑处理可以有效延缓钢轨磨耗速率。倘若过早对钢轨进行润滑处理,在接触斑轨距角区域,润滑反而会加快剥离掉块的形成。随着后期的跟踪观测可以发现,当新增侧磨值达到 0.5~1.0 mm 时进行润滑处理,可以有效减少钢轨侧面的磨耗速率。润滑处理后,钢轨间摩擦因数变小,侧磨速率下降到一定的标准,但此时小半径曲线钢轨间存在的疲劳裂纹问题再次出现,因此应暂停润滑处理,并通过轮轨间接触磨耗来消灭钢轨表面新生的微细裂纹,从而避免剥离掉块的产生。

4 结语

本文通过对运营条件相似的两条地铁线路分别实行两个跟踪主题的长期现场观测,分析有无润滑处理对钢轨侧磨以及剥离掉块的影响,其主要结

论如下:

1) 在小半径曲线外轨侧磨未进入线性发展阶段前,润滑处理对钢轨侧磨速率的影响很小,其影响主要在轨距角及轨顶位置的磨耗。此时,对其进行润滑处理、降低轮轨间的摩擦因数,会使得钢轨表面本应随着轮轨接触而磨损的早期裂纹得以继续发展,当润滑剂进入表面裂纹内部,反而会造成“油楔效应”,进而加速疲劳裂纹的发展,最终形成大面积的剥离掉块。

2) 根据现阶段两组典型观测曲线段的研究结果可知,在轮轨接触未达到侧磨位置时,曲线上股钢轨无润滑必要。

3) 进行润滑的最优时机为钢轨开始出现侧磨时,当轨顶与轨距角再次出现裂纹时,应立即停止润滑处理,待钢轨新生的侧磨量达到一定范围,即0.5~1.0 mm,再对其进行润滑处理,以在减少钢轨剥离掉块现象的同时延缓钢轨的侧磨速率。

参考文献

- [1] 赵鑫,温泽峰,王衡禹,等. 中国轨道交通轮轨滚动接触疲劳研究进展[J]. 交通运输工程学报,2021(1):1.
ZHAO Xin, WEN Zefeng, WANG Hengyu, et al. Research progress on wheel/rail rolling contact fatigue of rail transit in China[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021(1):1.
- [2] 周宇,黄旭炜,王树国,等. 考虑轨道几何不平顺的钢轨裂纹萌生与磨耗共存预测[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019(11):1600.
ZHOU Yu, HUANG Xuwei, WANG Shuguo, et al. Prediction of rail rolling contact fatigue crack initiation and wear growth considering track geometric irregularity[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019(11):1600.
- [3] 周宇,孙鼎人,王树国,等. 钢轨疲劳裂纹萌生与磨耗发展共存预测中的磨耗阈值[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020(9):1336.
ZHOU Yu, SUN Dingren, WANG Shuguo, et al. Effect of wear threshold on prediction for rolling contact fatigue crack initiation and wear growth of rail[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2020(9):1336.
- [4] 贾昕昱. 基于轮轨瞬态滚动接触模型的钢轨接触疲劳损伤研究[D]. 北京:中国铁道科学研究院,2020.
JIA Xinyu. Research on contact fatigue damage of rail based on wheel-rail transient rolling contact model[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2020.
- [5] ZHOU Y, WANG S, WANG T, et al. Field and laboratory investigation of the relationship between rail head check and

wear in a heavy-haul railway[J]. Wear. 2014,315:68.

- [6] 王少锋,冯青松,罗信伟,等. 非椭圆接触下地铁小半径曲线外轨全寿命侧磨发展规律[J]. 中国铁道科学,2019(1):24.
WANG Shaofeng, FENG Qingsong, LUO Xinwei, et al. Development law of life cycle side wear on outer rail of metro with small radius curve under non-elliptical contact[J]. China Railway Science, 2019(1):24.
- [7] 王军平,周宇,沈钢. 钢轨硬度对疲劳裂纹萌生和钢轨磨耗的影响[J]. 西南交通大学学报,2021(3):611.
WANG Junping, ZHOU Yu, SHEN Gang. The effect of rail hardness on fatigue cracks initiation and rail wear[J]. Journal of Southwest Jiaotong University. 2021(3):611.
- [8] 徐凯,李芾,吴文逸,等. 高速铁路小半径曲线钢轨侧磨研究[J]. 铁道学报,2021(2):45.
XU Kai, LI Fu, WU Wenyi, et al. Research on side wear of rails on small radius curves on high-speed railway[J]. Journal of the China Railway Society, 2021(2):45.
- [9] 谢晨希,陶功权,陆文教,等. 地铁小半径曲线轨侧润滑对钢轨的减磨效果研究[J]. 润滑与密封,2019(6):60.
XIE Chenxi, TAO Gongquan, LU Wenjiao, et al. Effect of lubrication on high rail side wear of metro sharp curves[J]. Lubrication Engineering, 2019(6):60.
- [10] 杜茂金. 南京地铁钢轨掉块病害分析与防治[J]. 城市轨道交通研究,2015(1):78.
DU Maojin. Analysis and prevention of rail spalling disease in Nanjing Metro[J]. Urban Mass Transit, 2015(1):78.
- [11] 乔小雷. 南京地铁钢轨使用状况及换轨方式分析[J]. 都市快轨交通,2014(3):88.
QIAO Xiaolei. Application status of steel rail and rail exchanging modes in Nanjing Metro[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2014(3):88.
- [12] WANG S, QIAN Y, FENG Q, et al. Investigating high rail side wear in urban transit track through numerical simulation and field monitoring[J]. Wear, 2021, 470-471:203643.
- [13] 李胜杰,李佳辛,吴柄男,等. 不同润滑材料对轮轨磨损与滚动接触疲劳影响[EB/OL]. (2021-11-16) [2022-01-10]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1095.O4.20211115.2053.007.html>.
- LI Shengjie, LI Jiaxin, WU Bingnan, et al. Effects of different lubricating materials on wheel-rail wear and rolling contact fatigue[EB/OL]. (2021-11-16) [2022-01-10]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1095.O4.20211115.2053.007.html>.
- [14] 梁旭,刘兴平,周韶博,等. 高速铁路小半径曲线轮轨减磨技术研究[J]. 中国铁路,2021(1):39.
LIANG Xu, LIU Xingping, ZHOU Shaobo, et al. Study on wheel-rail wear reduction technology for small radius curve in high speed railway[J]. China Railway, 2021(1):39.

(收稿日期:2022-03-22)