

轮轨润滑对地铁小半径曲线段外轨磨耗影响^{*}罗信伟¹ 张 斌² 汪龙洋² 冯青松²

(1. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 510010, 广州;

2. 华东交通大学轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室, 330013, 南昌)

摘 要 [目的] 地铁线路小半径曲线段的数量占比高、钢轨磨耗严重,通过润滑改变轮轨接触区的摩擦因数可以有效降低钢轨磨耗,因此有必要对轮轨润滑与钢轨磨耗之间的影响关系进行研究。[方法] 介绍了润滑减磨理论;建立侧磨预测模型,将钢轨侧磨量为5 mm作为1个阶段,仿真计算不同侧磨阶段下的外轨磨耗规律;结合润滑减磨仿真计算结果,提出相应的外轨润滑措施。[结果及结论] 钢轨上道初期,当钢轨出现侧磨后进行润滑,润滑减磨效果不显著;当钢轨侧磨量达到5~10 mm时,润滑涂敷效果差别显著,可以延缓钢轨磨耗发展时间至少3个月;外轨磨耗后期,钢轨侧磨速度明显加快,润滑涂敷效果差别不显著。建议在钢轨出现侧磨后进行润滑涂敷,当钢轨侧磨量达到5~10 mm时,对钢轨进行重点润滑涂敷。轮轨润滑可以降低钢轨磨耗速率,减缓曲线外轨磨耗发展,延长钢轨使用寿命,降低维修成本。

关键词 地铁; 小半径曲线; 轮轨润滑

中图分类号 U231; U213.42

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.02.014

Impact of Wheel-rail Lubrication on Outer Rail Wear in Metro Small Radius Curved Segments

LUO Xinwei¹, ZHANG Bin², WANG Longyang², FENG Qingsong²

(1. Guangzhou Metro Design and Research Institute Co., Ltd., 510010, Guangzhou, China; 2. State Key Laboratory of Performance Monitoring and Protecting of Rail Transit Infrastructure, East China Jiaotong University, 330013, Nanchang, China)

Abstract [Objective] For metro lines with high proportion of small radius curved segments and severe rail wear, lubrication can alter wheel-rail contact area friction coefficient and in turn effectively reduce rail wear, thus it is necessary to study the relationship between wheel-rail lubrication and rail wear. [Method] The theory of lubrication and wear reduction is introduced. A side wear prediction model is established, consid-

ering 5 mm of rail side wear as one stage, the law of outer rail wear at different stages of side wear is simulated and calculated. Based on the simulation calculation results of lubrication and wear reduction, corresponding outer rail lubrication measures are proposed. [Result & Conclusion] During the initial stage of rail service, rail lubrication measures after the side wear can not significantly reduce wear. When rail side wear reaches 5-10 mm, the effect of lubrication is evidently significant and can delay the development of rail wear by at least 3 months. In the later stage of outer rail wear, the speed of rail side wear accelerates significantly, and the difference in lubrication coating effect is not significant. It is recommended to apply lubrication on rail after the side wear, and to prioritize lubrication when rail side wear reaches 5-10 mm. Wheel-rail lubrication can reduce rail wear development speed, slowing down the development of outer rail wear in curved segments, prolonging rail service life and reducing maintenance costs.

Key words metro; small radius curve; wheel-rail lubrication

由于受到地铁线路的地形制约,地铁线路中小半径曲线段的占比较高。在地铁实际运营中,小半径曲线段的钢轨损耗较大,而更换钢轨的决定因素是外股钢轨侧面磨耗超限。目前,通过润滑改变轮轨接触区的摩擦因数是降低钢轨磨耗最普遍的方法^[1]。已有文献研究表明,轮轨润滑是缓解钢轨磨耗最有效的办法之一^[2]。文献[3-4]的研究结果表明,在润滑状态下,钢轨的减磨效果可达2~10倍,且不同摩擦因数条件下,车辆的曲线通过性能差异性明显。由于设备的局限性,目前还无法较为直接地获得轮轨润滑与钢轨磨耗之间的影响关系。因此研究人员基于仿真技术对钢轨的润滑减磨效果开展研究。

针对地铁小半径曲线段的轮轨润滑问题,国内外学者主要从试验和仿真角度出发,文献[5-6]通过轮轨减磨试验,以及长期的钢轨和车轮廓形变化

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51608202,51878277);江西省重点研发计划"揭榜挂帅"项目(20223BBE51009)

的跟踪监测发现,润滑后的小半径曲线段在钢轨及车轮磨耗方面的改善较为显著。文献[7-9]通过建立车辆-轨道动力学模型,研究小半径曲线段的钢轨磨耗及减磨措施,并对小半径曲线段外轨侧润滑的减磨效果进行了预测,研究结果表明,轨侧润滑对小半径曲线段的钢轨侧减磨效果显著。

目前,轮轨润滑仿真计算主要用于研究摩擦因数与钢轨磨耗之间的规律,而对于轮轨润滑涂敷周期对磨耗控制效果的研究较少。基于此,本文利用动力学软件 Universal Mechanism 建立地铁 B 型列车模型,基于 Kalker 轮轨滚动接触理论,采用 Archard 磨损模型,研究轮轨润滑涂敷周期与外轨侧磨量之间的规律,分析轮轨润滑涂敷周期的合理性与有效性。本文研究对地铁线路的轨道养护及维修具有指导作用。

1 润滑减磨理论及侧磨预测模型

1.1 润滑减磨理论

钢轨与车轮之间的摩擦一般分为轨顶和轨侧两个摩擦区域。润滑减磨作用是通过在接触面上形成表面吸附分子来减轻摩擦的,其能够在钢轨侧面形成一层均匀的、连续的润滑层,当车辆经过钢轨时,轮缘与钢轨侧面之间的摩擦能够获得有效缓解,从而达到减磨效果。

在新轨上线初期,由于轮轨尚未磨合,曲线外轨极易出现轮轨两点接触的情况(第一接触点为轨顶面与车轮踏面接触;第二接触点为轨距角与车轮轮缘接触),两点接触的局部接触应力较大,容易产生滚动接触疲劳。根据润滑减磨理论,理想的润滑状态是在第一接触点保持中等摩擦因数(摩擦因数约为 0.4),在第二接触点保持低摩擦因数(摩擦因数约为 0.1)。为模拟这一情况,本文的计算模型采用多点接触轮轨模型,设置了踏面接触区、轮缘接触区等轮轨摩擦因数分区,并设置了 3 mm 的摩擦因数过渡区。外轨润滑减磨分区示意图如图 1 所示。

1.2 侧磨预测模型

利用动力学软件 Universal Mechanism 建立地铁钢轨磨耗预测模型。其中,地铁 B 型列车模型包括车体、转向架、轮对、悬挂系统、减振器和横向止挡等部件,编组形式为三动三拖。列车运行速度为 60 km/h,踏面为 LM 型,钢轨为 CHN60 型,轨道模型选取小半径曲线段,曲线半径为 300 m,缓和曲线长度为 55 m,超高为 120 mm,轨道不平顺采用美国

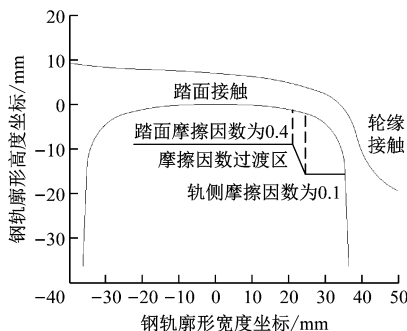


图 1 外轨润滑减磨分区示意图

Fig. 1 Diagram of outer rail lubrication wear reduction partition

六级谱。引入量纲一的权重因子分配于 AW0—AW3 载荷状态(AW0 表示空载;AW1 表示满座;AW2 表示满座 + 6 人/m², 额定载荷;AW3 表示满座 + 9 人/m², 超常载荷),以综合评价不同车辆条件和运营实际因素对钢轨磨耗演变的贡献。轮轨接触模型采用 Kalker 轮轨滚动接触理论进行计算。通过钢轨廓形变化和磨耗速率反映小半径曲线段钢轨磨耗的剧烈程度。磨耗模型采用 Archard 模型,可以表示为:

$$V = k \frac{Nl}{H} \quad (1)$$

式中:

V ——磨耗体积;
 k ——磨耗指数;
 N ——法向接触力;
 l ——滑动距离;
 H ——Vickers 硬度指数。

式(1)可进一步简化为:

$$V = k_v A \quad (2)$$

式中:

k_v ——体积磨耗系数,其只与材料的特性有关,取 $k_v = 1 \times 10^{-13} \text{ m}^3/\text{J}$;
 A ——磨耗功。

仿真模型通过迭代计算的方法模拟钢轨磨耗的演变过程。在每一步迭代步中,当钢轨累积磨耗深度峰值达到固定限值(磨耗深度限值为 0.1 mm)时,当前迭代步终止。对磨耗钢轨型面进行数据平滑更新,再利用更新后的磨耗钢轨型面作为下一步迭代步的计算初始型面。

2 润滑减磨仿真结果对比

2.1 计算工况

为预测轮轨润滑涂敷周期对钢轨侧磨的影响,

根据不同润滑工况对钢轨的涂敷情况进行仿真计算,对比不同润滑状态下钢轨廓形侧磨情况的发展规律。将钢轨廓形侧磨分为3个阶段,第1阶段的钢轨侧磨量为0~5 mm,第2阶段的钢轨侧磨量为5~10 mm,第3阶段的钢轨侧磨量为10~15 mm。仿真计算分为5种工况:① 工况1——无润滑且无涂敷;② 工况2——润滑且全过程涂敷;③ 工况3——润滑、在钢轨出现侧磨后进行涂敷;④ 工况4——润滑、在工况3的第2阶段、第3阶段停止涂敷;⑤ 工况5——钢轨无磨耗。

2.2 侧磨第1阶段

侧磨第1阶段的钢轨磨耗及廓形变化规律如图2所示。由图2可知:① 在钢轨上道初期,钢轨侧磨大致分为2个过程:钢轨出现侧磨前;钢轨侧磨量达到5 mm(运营时间约为5个月)后。② 对于第1个过程,各工况的侧磨积累速度大致相同,均属于轻微磨损,即新钢轨铺设初期的磨损速度较慢,润滑涂敷效果不显著。③ 对于第2个过程,相比于工况1,工况2和工况3约延后了3个月才达到侧磨量5 mm的限值,这说明在钢轨侧磨出现后,润滑涂敷起到了关键性作用,能够及时降低钢轨侧磨的磨耗速度;工况2和工况3在达到侧磨量5 mm时的运营时间基本一致,这说明在出现钢轨侧磨后,涂敷

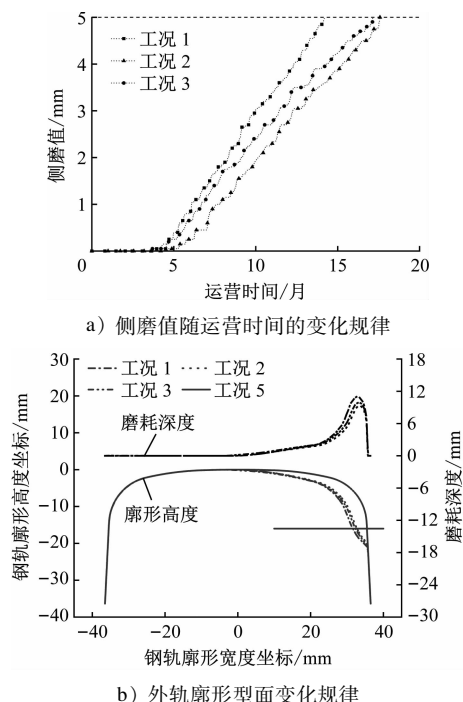


图2 侧磨第1阶段的钢轨磨耗及廓形变化规律

Fig.2 Change law of rail wear and profile in the first stage of side wear

时间点对润滑效果无明显改善。

结合现场实际情况可知,在钢轨上道初期,对曲线外钢轨进行全过程涂敷,虽然在一定程度上减缓了钢轨磨耗速度,但不利于轮轨自然磨耗形成共形接触。此外,新轨上线初期的轮轨接触应力较为集中,易出现塑性累积。因此,建议钢轨润滑涂敷时间可以延后至钢轨出现侧磨后再进行润滑涂敷作业。

2.3 侧磨第2阶段

侧磨第2阶段的钢轨磨耗及廓形变化规律如图3所示。由于轨距增加、轮轨冲击增大等因素,第2阶段的侧磨速度明显加快。第2阶段的钢轨侧磨量约在运营时间为10~12个月时达到10 mm,而第1阶段的钢轨侧磨量约在运营时间为17个月时达到5 mm。相同钢轨侧磨量下,第2阶段比第1阶段缩短了5~6个月。在侧磨第2阶段,工况1的侧磨积累速度>工况4的侧磨积累速度>工况3的侧磨积累速度>工况2的侧磨积累速度。当侧磨量相同时,各工况运营时间相差较为明显,无润滑条件相比润滑条件下的运营时间缩短约27%,主要原因是由于润滑涂敷降低了轮缘与钢轨轨头侧面之间的摩擦因数,在相同导向力的情况下,降低了轮缘与

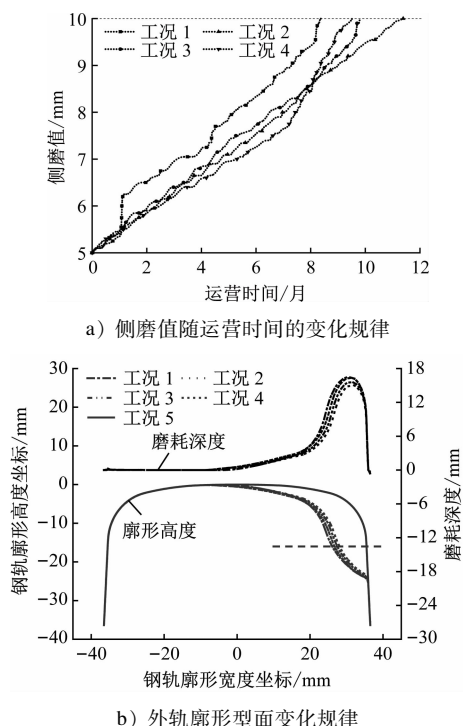


图3 侧磨第2阶段的钢轨磨耗及廓形变化规律

Fig.3 Change law of rail wear and profile in the second stage of side wear

钢轨轨头侧面之间的摩擦力。同时在此阶段,轮轨两点接触结束,接触应力偏于稳定,应力集中的钢轨廓形已被磨掉,钢轨廓形改变的速度加快。由此可知,在第2阶段,润滑涂敷对延缓外轨磨耗起到了重要的作用。

2.4 侧磨第3阶段

侧磨第3阶段的钢轨磨耗及廓形变化规律如图4所示。由于轨头形状发生改变,约在运营时间为7个月时,钢轨磨耗就会达到15 mm。在此阶段,轨距显著变宽,轮轨接触条件恶化,轮缘与轨侧间的滚动、滑动现象并存,导向轮轮缘紧压外轨头侧面,两者接触表面发生黏着,造成轨侧剧烈磨损。

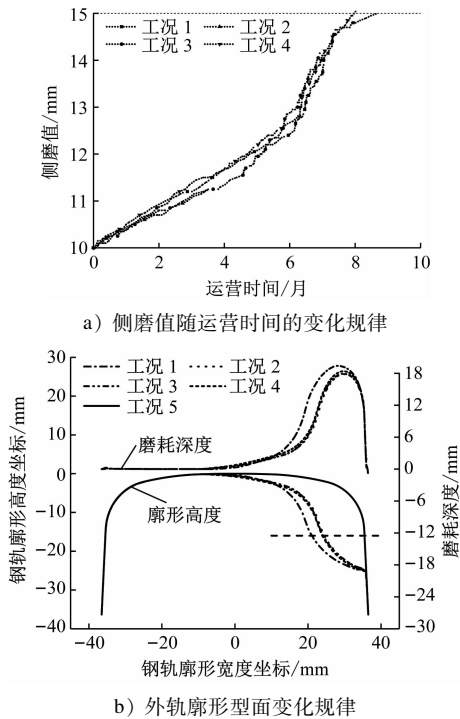


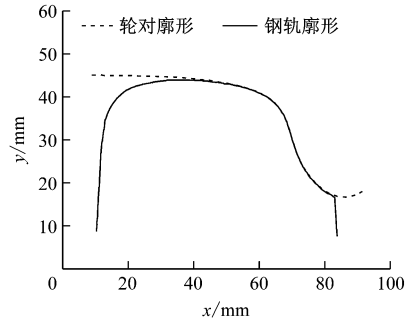
图4 侧磨第3阶段的钢轨磨耗及廓形变化规律

Fig.4 Change law of rail wear and profile in the third stage of side wear

为避免计算量过大,仿真计算中当判断达到轮轨共形接触状态后程序停止。轮轨系统廓形示意图如图5所示。轮缘和钢轨轨距角完全接触,轮轨间的接触应力相对较小。

2.5 侧磨全阶段对比分析

对小半径曲线段外轨侧磨全阶段的磨耗速率进行统计分析,如图6所示。各工况下,第2阶段的磨耗速率均比第1阶段高,其中工况1第2阶段的磨耗速率比第1阶段高出近一倍。第3阶段的磨耗速率相对于第2阶段有所缓和。全阶段中,工况1



注: x 为轮轨系统横向坐标; y 为轮轨系统垂向坐标。

图5 轮轨系统廓形示意图

Fig.5 Diagram of wheel-rail system profile

的钢轨平均磨耗速率积累速度>工况4的钢轨平均磨耗速率积累速度>工况2的钢轨平均磨耗速率积累速度>工况3的钢轨平均磨耗速率积累速度。在钢轨侧磨第2阶段需重点涂敷,通过施加润滑可以使钢轨磨耗周期延后至少3个月。同时,全过程涂敷润滑和出现侧磨后润滑的总体磨耗速率分别为0.36 mm/月和0.38 mm/月,两者差别不大,建议涂敷周期可延后至钢轨出现侧磨后再进行润滑涂敷作业。

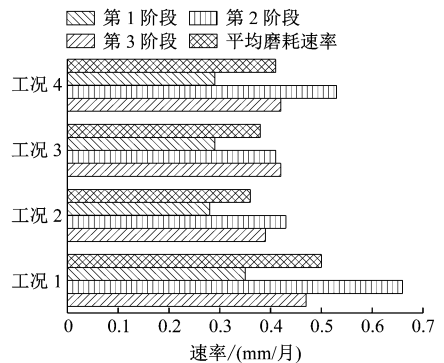


图6 全阶段钢轨磨耗速率分析

Fig.6 Analysis of rail wear rate in the whole stage

需要注意的是,以减缓外轨侧磨为目的的轮缘或轨侧润滑,对减缓波磨、钢轨剥离是不利的,因此润滑需要根据钢轨磨耗,以及轨道伤损变化与发展情况而定。通过现场测量、仿真预测、周期性涂敷等综合技术措施,达到延长小半径曲线段钢轨使用寿命的目标。

3 结论

1) 轮轨润滑对于地铁运营的节能、降耗具有重要意义。有效的轮轨润滑可以达到减少线路养护维修工作量和降低运营成本的目的。建议在钢轨

出现侧磨后进行润滑涂敷,在侧磨量为 5 ~ 10 mm 阶段进行重点涂敷,以减缓外轨磨耗。

2) 润滑需要根据钢轨磨耗,以及轨道伤损变化与发展情况而定,涂敷周期是决定钢轨生命周期的重要因素。由于地铁线路的特点各不相同,轮轨润滑策略需要因地制宜、不断更新,以保证润滑效果满足实际需求。

3) 涂敷周期及其与线路曲线半径大小、轨道几何形位、列车类型、列车通过速度及通过列车质量之间的量化关系还有待进一步研究和探索。

参考文献

[1] 王学彦,肖起鹏,杜茂金,等. 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[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(9): 53.

WANG Xueyan, XIAO Qipeng, DU Maojin, et al. Study on influence of rail lubricant timing on spalling defects and wear of metro test section curve[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(9): 53.

[2] 温邦,陶功权,温泽峰,等. 地铁车辆轮缘润滑对车轮磨耗的影响[J]. 机车电传动, 2017(6): 101.

WEN Bang, TAO Gongquan, WEN Zefeng, et al. Effects of metro wheel flange lubrication on wheel wear[J]. Electric Drive for Locomotives, 2017(6): 101.

[3] 张念. 高速铁路小半径曲线钢轨的磨损及润滑[J]. 合成润滑材料, 2021, 48(1): 20.

ZHANG Nian. Wear and lubrication of small radius curved rails on high-speed railway[J]. Synthetic Lubricants, 2021, 48(1): 20.

[4] 罗国伟,李伟. 重载铁路钢轨润滑及摩擦控制研究[J]. 铁道建筑, 2011, 51(4): 114.

LUO Guowei, LI Wei. Study on rail lubrication and friction control of heavy-haul railway [J]. Railway Engineering, 2011, 51(4): 114.

[5] 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.

[6] 李建平,许自强. 动车组小曲线通过轮缘减磨措施深化研究[J]. 铁道机车车辆, 2021, 41(4): 1.

LI Jianping, XU Ziqiang. Further research on small curve wheel flange wear reduction control measurements of EMU[J]. Railway Locomotive & Car, 2021, 41(4): 1.

[7] 侯茂锐,王卫东,常崇义,等. 动车所小半径曲线钢轨磨耗及减磨措施研究[J]. 铁道学报, 2018, 40(3): 45.

HOU Maorui, WANG Weidong, CHANG Chongyi, et al. A study of rail wear on sharp curves in EMU maintenance depot[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(3): 45.

[8] 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, 44(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, 44(6): 60.

[9] 李星,吴少培,王相平,等. 小半径曲线钢轨侧磨减缓措施及其对滚动接触疲劳影响研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(5): 1155.

LI Xing, WU Shaopei, WANG Xiangping, et al. Side wear and rolling contact fatigue of rails on small radius curves[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(5): 1155.

· 收稿日期:2021-07-11 修回日期:2021-11-24 出版日期:2024-02-10
Received:2021-07-11 Revised:2021-11-24 Published:2024-02-10

· 第一作者:罗信伟,正高级工程师,luoxinwei@ dtsjy. com
通信作者:张斌,副教授,zhangbin010@126. com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 72 页)

SHI Jungang, ZHOU Feng, XU Ruihua. Set partition model and algorithm for crew pairing problem in urban rail transit[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43(2): 232.

[5] 石俊刚,史宏杰,徐瑞华. 城市轨道交通乘务任务划分模型及算法研究[J]. 铁道学报, 2014, 36(5): 1.

SHI Jungang, SHI Hongjie, XU Ruihua. Modeling and solving urban rail transit crew pairing problems[J]. Journal of the China

Railway Society, 2014, 36(5): 1.

· 收稿日期:2021-08-03 修回日期:2021-08-30 出版日期:2024-02-10
Received:2021-08-03 Revised:2021-08-30 Published:2024-02-10

· 通信作者:徐天捷,工程师,tjxu02@163. com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

欢迎订阅《城市轨道交通研究》
服务热线 021—56830728 转 821