机车电传动 2017 年第 6 期 (2017-11-10)
ELECTRIC DRIVE FOR LOCOMOTIVES №6, 2017(Nov. 10, 2017)

文章编号：1000–128X(2017)06–0101–05

地铁车辆轮缘润滑对车轮磨耗的影响

温　邦，陶功权，温泽峰，关庆华

（西南交通大学 牵引动力国家重点实验室，四川 成都　610031）

摘　要：为了研究轮缘润滑对车轮磨耗的影响效果，对国内某地铁线路安装轮缘润滑器的列车和未安装轮缘润滑器的列车的车轮磨耗进行了跟踪测试。结果表明，该线路地铁车轮轮缘磨耗分布在 –40~–30 mm 位置范围内，主要集中在轮缘根部，踏面磨耗分布在 –30~60 mm 位置范围内；轮缘润滑对车轮的轮缘厚度、轮缘高度及踏面磨耗速率影响较小，且对踏面为 LM30 的拖车轮缘磨耗速率的影响也较小，但能极大地减缓踏面为 LM32 的动车和拖车车轮轮缘磨耗。仅在动车上安装轮缘润滑器时，减磨效果能达到 24%，而在整列车（包含动车和拖车）安装轮缘润滑器时，减磨效果则能达到 36%。针对所调查的地铁线路实际情况，建议整列车均保留轮缘润滑器。

关键词：车轮磨耗；轮缘润滑；镟修；地铁车辆

中图分类号：U231；U260.331^{+}.1　　**文献标识码：**A

doi：10.13890/j.issn.1000-128x.2017.06.022

Effects of Metro Wheel Flange Lubrication on Wheel Wear

WEN Bang, TAO Gongquan, WEN Zefeng, GUAN Qinghua

(Traction Power State Key Laboratory, Southwest Jiaotong University, Chengdu ,Sichuan 610031,China)

Abstract: In order to investigate the effect of flange lubrication on the wheel wear, tracking test in one metro line was made on the trains equipped with flange lubricator and the ones without flange lubricator. The results showed that for the tested line the wheel flange wear occurred in the range from -40 mm to -30 mm relative to nominal rolling circle with concentrating in the root of the flange, and wheel tread wear occurred in the range from -30 mm to 60 mm. The flange lubrication had little influence on the flange thickness, flange height, and tread wear rate in this metro line, as well as the flange wear area rate of trailers with the wheel profile of LM30, but it could greatly slow down the flange wear for motor cars and trailers with the wheel profile of LM32. By comparison with the trains without flange lubricators, the flange wear rate could decrease 24% for the trains of which only motor cars installed flange lubricators, and 36% for the trains of which all the cars installed flange lubricators. For extending the life of wheel, flange lubricators should be equipped on all the car of the train.

Keywords: wheel wear; flange lubrication; turning repair; metro vehicle

0　引言

车轮异常磨耗是地铁车辆较为常见的问题，它不仅影响地铁车辆的动力学性能，而且会导致车轮提前镟修，从而增加地铁的运营成本。当镟修轮缘异常磨耗的车轮时，每恢复 1 mm 轮缘厚度，踏面直径将减少 4~5 mm，很大程度上缩短了车轮的寿命[1–2]。

我国北京、上海和广州等城市的多条地铁线路都发生了车轮轮缘异常磨耗现象[3–5]。通过现场测试发现，对于轮缘异常磨耗的线路，其小半径曲线外轨侧面磨耗也较严重。针对这个问题，研究人员提出了很多的解决措施，轮缘润滑就是其中一个较为有效的措施[5–6]。文献 [7] 在改造的 MM-200 磨耗试验机上进行轮缘润滑试验，发现采用轮缘润滑系统后减磨效果显著，磨耗量降低了 66.7%。文献 [8–9] 以机车为载体，研究了固体润滑剂的减磨机理及效果。文献 [10] 利用数值预测

收稿日期：2017–02–17
基金项目：教育部博士点基金项目（20130184110005）

方法，研究了一系纵向刚度、轮轨间摩擦系数和载客量对车轮磨耗的影响，发现摩擦系数每降低 0.05，轮轨磨耗将降低约 16.1%。

轮缘润滑是一种投资少、见效快的有效方法，通过降低轮轨摩擦系数，能迅速减少轮缘磨耗。本文对国内某地铁线路共 27 列车进行了车轮磨耗跟踪测试，对比分析轮缘润滑器及其安装数量对车轮磨耗的影响。

1 测试车辆基本信息

选择国内某条地铁线路，该线路的 27 列车都安装了轮缘润滑器，并且采用固体润滑材料。固体润滑材料具有抗压能力强、与接触表面结合强度高、润滑减磨性能好等优点[8]。目前多数轮缘润滑试验都是在机车上实现的，试验发现安装固体轮缘润滑器后，轮缘磨损减少了 40%~70%[8–9]。图 1 为地铁车辆轮缘润滑器安装示意图。

该线路的所有车辆编组形式均一致，其中 1、4、6 号车为拖车，2、3、5 号车为动车。1 号车轮缘润滑器安装在 1 轴，5 号车安装在 2 轴，6 号车安装在 4 轴，2~4 号车安装在 3 轴，图 2 为车辆车轮示意图。2015 年 11 月和 2016 年 5 月分别对 27 列车进行了车轮磨耗测试。第 1 次测试完成后，为了对比试验，拆除部分车轮轮缘润滑器。将试验列车分为 3 组：一组不拆除轮缘润滑器，共 6 列；另一组拆除 1、4、6 号车（拖车）润滑器，共 11 列；再一组拆除全部润滑器，共 10 列。车辆新轮采用标准踏面廓形 LM32（即 LM 踏面，轮缘厚度为 32 mm）。车辆镟修及轮缘润滑器拆除信息见表 1。

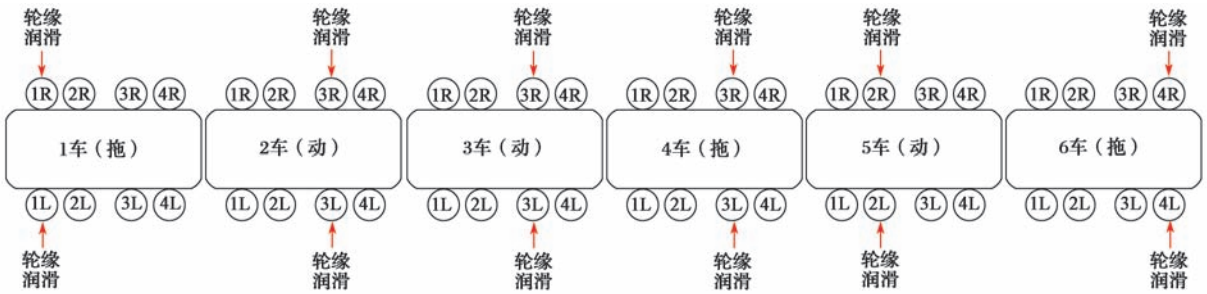


图 1 车辆车轮示意图

表 1 车辆镟修及轮缘润滑器拆除信息

镟修车轮对应车辆	镟修模板	拆除轮缘润滑器车辆（列）		
		未拆	拆拖车	拆整车
拖车	LM30	2	9	6
拖车	LM32	0	2	3
整列	LM32	4	0	1

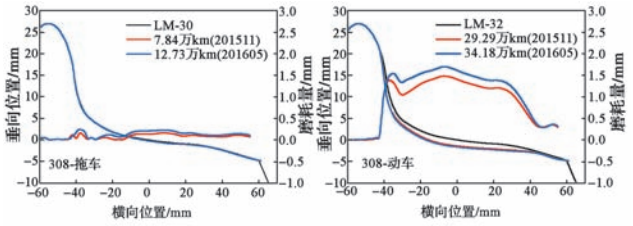


图 2 轮缘润滑器安装示意图

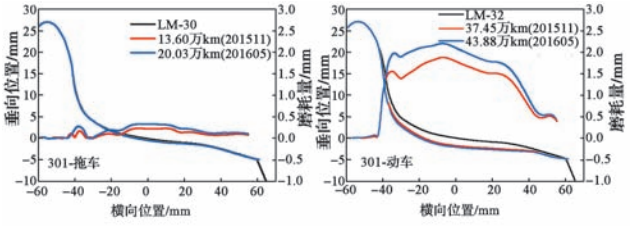
2 测试结果及评价

2.1 测试结果

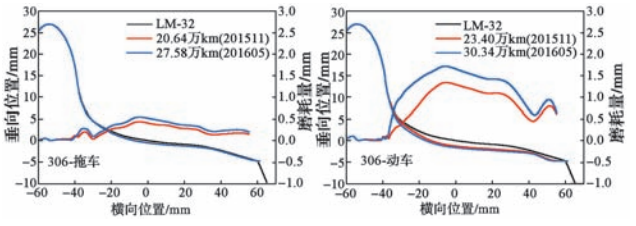
图 3 为不同运行里程下 3 列车的廓形测试结果，包括拖车踏面为 LM32 和 LM30 这 2 种情况在内。图中黑色实线代表标准车轮廓形，红色实线代表第 1 次测试的车轮廓形（该列车所有动车或者拖车车轮的平均廓形），蓝色实线代表第 2 次测试的车轮廓形，磨耗分布为实测廓形与标准廓形的法向距离。从图 3 可以看出，不同里程下车轮磨耗都分布在 –40~–60 mm 范围内，其中 –40~–30 mm 范围主要表现为轮缘磨耗，该范围的磨耗主要是由于车辆通过小曲线或道岔时，轮缘和钢轨贴靠而引起的；–30~60 mm 主要表现为踏面磨耗，并在 –10~0 mm 内达到最大；动车磨耗量要明显大于拖车磨耗量，这是由于动车车轮需要承受牵引力和制动力。



（a）308 列车



（b）301 列车



（c）306 列车

图 3 实测廓形结果

2.2　测试结果评价

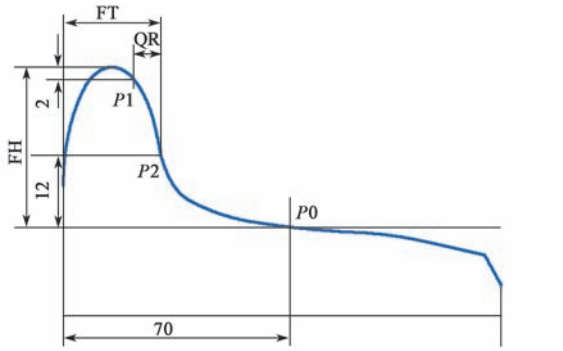
在 27 列车中，以拆除整车轮缘润滑器的车辆为对照组，拆除拖车轮缘润滑器和未拆轮缘润滑器车辆为试验组，按踏面为 LM32 的动车、踏面为 LM32 的拖车及踏面为 LM30 的拖车 3 种情况对磨耗进行评价，以满足单一变量法。部分车辆在 2 次测试期间进行了镟修，所以不作为统计对象。统计分类见表 2。

表 2　轮缘拆除信息统计表

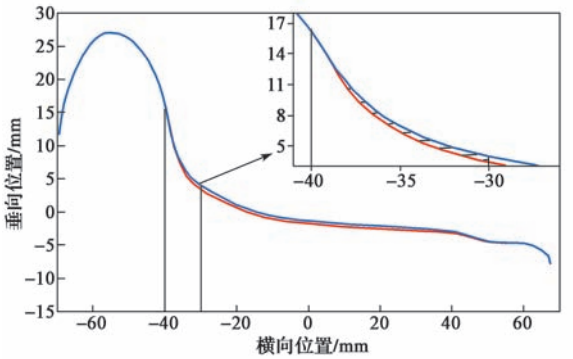
踏面车次分类	未拆除轮缘润滑器列数	仅拆除拖车轮缘润器列数	拆除整车轮缘润器列数	未统计车辆及原因
动车 LM32	4	11	10	2 列车在 2 次测试期间镟轮
拖车 LM32	2	2	4	3 列车在 2 次测试期间镟轮
拖车 LM30	1	6	9	

2.2.1　评价方式

本文通过 FH（轮缘高度）、FT（轮缘厚度）、车轮踏面磨耗速率以及车轮轮缘磨耗速率来评价车轮的磨耗情况。图 4 给出了 4 个磨耗参数的定义示意图。



（a）车轮参数示意



（b）轮缘磨耗面积示意

图 4　车轮磨耗评价参数

*P*0 点定义在距离轮背 70 mm 踏面处（即名义滚动圆），*P*1 点定义在轮缘最高点往下 2 mm 处，*P*2 点定义在距离 *P*0 点垂向往上 12 mm 处。轮缘高度 FH 为轮缘最高点与 *P*0 点之间的垂向距离，轮缘厚度 FT 为轮背与 *P*2 点之间的水平距离。车轮踏面磨耗量为 2 次测试廓形在名义滚动圆处的高度差，再用踏面磨耗量除以在 2 次测试期间运行的里程即为车轮踏面磨耗速率。

因为 2 次测试期间车轮轮缘厚度测量点的轮缘磨耗相对较小，并且车轮镟修和测量都会引入误差。针对这种情况，本文采用轮缘磨耗面积随里程的变化速率 (下面简称为轮缘磨耗面积速率) 来评价轮缘磨耗速率。考虑轮缘润滑器作用范围、车轮的几何外形以及测试结果，本文选用 –40~–30 mm 之间的磨耗面积差来计算轮缘磨耗面积速率，该区域涵盖了轮缘根部 *R*14 的圆弧。图 4(b) 为轮缘磨耗面积的示意图，其中阴影部分即为车轮轮缘磨耗面积。求得磨耗面积后再除以该车在 2 次测试期间运行的里程即为轮缘磨耗面积速率。

2.2.2　轮缘厚度和轮缘高度随里程的变化

LM32、LM30 这 2 种踏面的轮缘高度都为 27 mm，轮缘厚度分别为 32 mm、30 mm。统计结果如图 5~ 图 7，本次测试所有车辆的动车 (2、3、5 号车）车轮踏面都为 LM32。图中散点为车轮轮缘高度或轮缘厚度（该列车所有动车或者拖车车轮轮缘高度或轮缘厚度平均值），实线为未拆除轮缘润滑器情况的数值拟合直线，图 7 中数据点较少，拟合误差较大，故不做拟合。

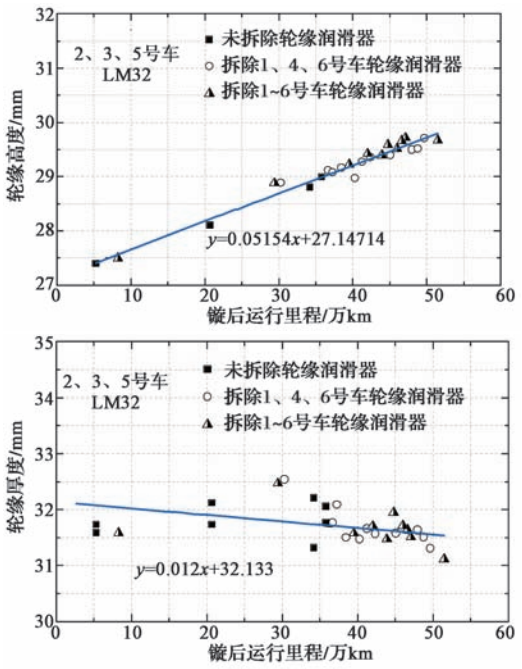


图 5　踏面为 LM32 的动车 FH 及 FT 随里程变化

由轮缘高度统计结果可知，3 种情况下轮缘高度都与运行里程成正比，车轮轮缘顶点没有磨耗，所以轮缘高度变化主要是由踏面磨耗引起的，且动车的轮缘高度随里程增加的速率明显快于拖车，再次验证了动车踏面磨耗速率明显大于拖车。此外，所有车轮轮缘高度值均大于标准型面，这种现象被称为“轮缘虚增高”。“轮缘虚增高”过大将会影响车轮通过道岔，并且有可能撞击钢轨有缝接头夹板螺栓。

由车轮厚度统计结果可知，轮缘厚度几乎都在标准型面厚度附近，只有在踏面为 LM32 的动车轮缘厚度随运行里程增加略有下降。这说明在轮缘厚度测量

点的轮缘磨耗较小，与现场实测廓形相一致。轮缘厚度保持稳定十分重要，合适的轮缘厚度的车轮和钢轨形成良好的匹配，保持适当的轮轨间隙，以便轮对能顺利沿直线运行并通过曲线。

总的来说，拆除轮缘润滑器与否对轮缘高度和轮缘厚度的影响较小。

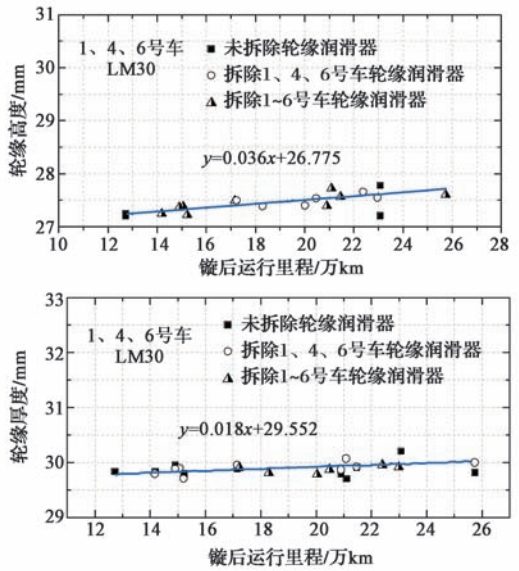


图 6　踏面为 LM30 的拖车 FH 及 FT 随里程变化

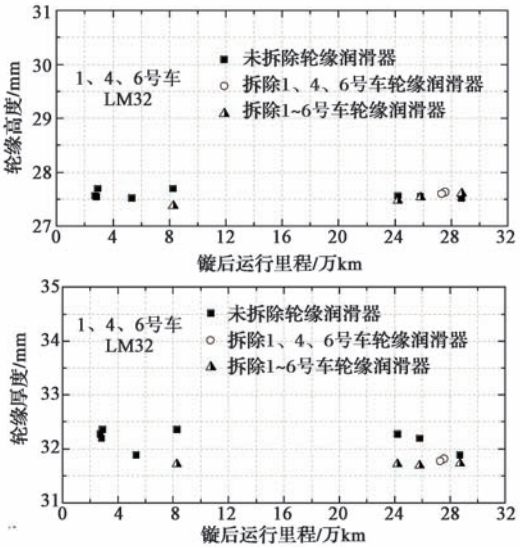


图 7　踏面为 LM32 的拖车 FH 及 FT 随里程变化

2.2.3　轮缘润滑器对轮缘磨耗面积速率的影响

对每节车 8 个车轮轮缘磨耗面积速率求平均值，图 8~ 图 10 为轮缘磨耗面积速率计算和统计结果。对于踏面为 LM32 的拖车，未拆除轮缘润滑器试验组中只有 1 列车，且运行里程过小，不具有统计意义，故图 9 中未做统计。

由图 8 可知，拆除轮缘润滑器对踏面为 LM32 的动车轮缘磨耗面积速率影响很大。只在动车上安装轮缘润滑器（即拆除拖车轮缘润滑器）时，轮缘减磨效果为 24%，而整列车（含动车和拖车）安装轮缘润滑器时，减磨效果为 36%。

由图 9 可知，轮缘润滑对于踏面为 LM32 的拖车轮缘磨耗面积速率影响也较大。只有动车安装轮缘润滑器时，轮缘减磨效果为 40%。由图 10 可知，踏面为 LM30 的拖车轮缘润滑器拆除与否对轮缘磨耗的影响非常小。

此外，动车车轮轮缘磨耗面积速率明显大于拖车。对于拖车而言，LM32 的磨耗也要大于 LM30，踏面几何参数很大程度上影响到轮轨接触时的蠕滑率和蠕滑力，从而影响车轮磨耗。

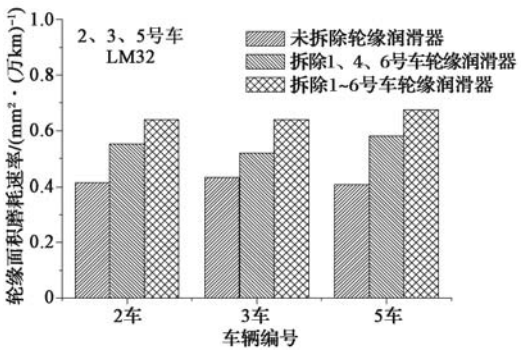


图 8　踏面为 LM32 的动车轮缘磨耗面积速率

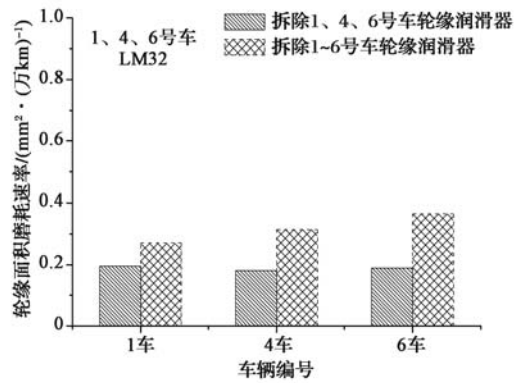


图 9　踏面为 LM32 的拖车轮缘磨耗面积速率

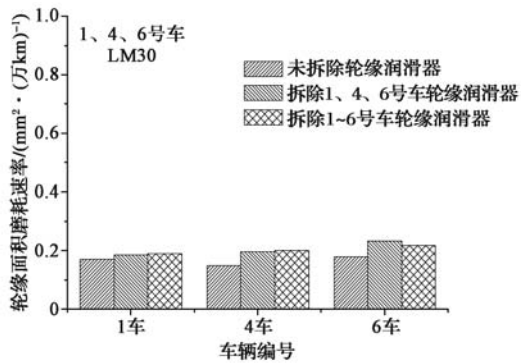


图 10　踏面为 LM30 的拖车轮缘磨耗面积速率

2.2.4　拆除轮缘润滑器对车轮踏面磨耗速率的影响

对每节车 8 个车轮踏面磨耗速率求平均值，图 11~ 图 13 为踏面磨耗速率计算和统计结果。图中散点为车轮踏面磨耗速率（该列车所有动车或者拖车车轮踏面磨耗速率平均值），实线为未拆除轮缘润滑器情况的数值拟合直线，图 13 中数据点较少，未做拟合。图 11~ 图 13 表明，拆除轮缘润滑器与否对车轮踏面磨耗速率的影响较小。

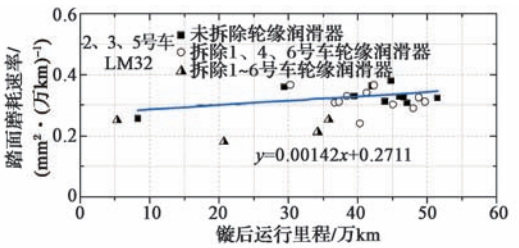


图 11　踏面为 LM32 的动车车轮踏面磨耗速率

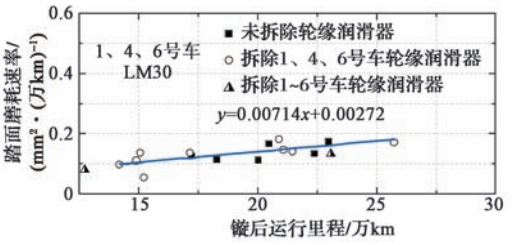


图 12　踏面为 LM30 的拖车车轮踏面磨耗速率

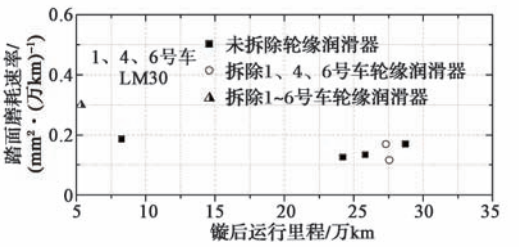


图 13　踏面为 LM32 的拖车车轮踏面磨耗速率

3　结语

本文通过对国内某地铁线路 27 列地铁列车车轮磨耗进行测试，通过统计分析轮缘厚度、轮缘高度、车轮轮缘面积磨耗速率及车轮踏面磨耗速率，掌握了轮缘润滑器对车轮磨耗的影响。

①该地铁线路的车轮存在踏面磨耗和轮缘磨耗，动车表现尤为明显。轮缘磨耗主要集中在轮缘根部，即 –40~–30 mm 范围内。

②轮缘润滑主要作用在轮缘根部，所以对轮缘高度、轮缘厚度、踏面磨耗速率的影响较小。

③踏面类型和轮缘润滑都是影响轮缘磨耗的 2 个重要因素。就拖车而言，踏面为 LM30 的车轮轮缘磨耗较小，轮缘润滑对其减磨效果也不明显。但是轮缘润滑能极大地减缓该线路踏面为 LM32 的动车车轮轮缘磨耗。仅动车安装轮缘润滑器和整列车安装轮缘润滑器减磨效果分别达到 24%、36%。同样，轮缘润滑在踏面为 LM32 的拖车也有较好的效果，仅动车安装轮缘润滑器后比未安装轮缘润滑器的轮缘磨耗速率降低 40%。

④针对该线路的实际情况，建议保留所有车辆上的轮缘润滑器。轮缘润滑对 LM32 踏面的车轮都能起到较好的减磨效果，从而延长车轮镟修周期，降低地铁运营成本。

参考文献：

[1] 曾全君 . 地铁车辆车轮寿命分析 [J]. 电力机车与城轨车辆，2005(2)：47–49.

[2] 王生华 . 上海地铁 4 号线车轮轮缘异常磨耗原因分析及解决措施 [J]. 铁道车辆，2007(6)：32–34.

[3] 邬春晖 . 北京地铁 1 号线车轮异常磨耗分析及其解决措施 [J]. 铁道车辆，2013(1)：40–42.

[4] 王生华 . 上海地铁 4 号线车轮轮缘异常磨耗原因分析及解决措施 [J]. 铁道车辆，2007(6)：32–34.

[5] 邱伟明，朱永波 . 广州地铁三号线车辆轮缘异常磨耗原因分析及解决措施 [J]. 电力机车与城轨车辆，2011(4)：80–81.

[6] 王锡伟 . 上海地铁车轮轮缘非正常磨耗的初步分析 [J]. 铁道车辆，1997（3）：36–38.

[7] 金学松，刘启跃 . 轮轨摩擦学 [M]. 北京：中国铁道出版社，2004：187–190.

[8] 吉万年 . 机车轮缘固体润滑减磨的研究及开发 [J]. 哈尔滨铁道科技，2000（1）：13–15.

[9] 梁绍敏 . 机车轮缘固态润滑的研究及应用 [J]. 内燃机车，1998（1）：28–29.

[10] 于春广，陶功权 . 地铁车轮磨耗测试及数值仿真 [J]. 工程力学，2016（1）：201–208.

作者简介：温　邦（1991–），男，硕士研究生，研究方向为轮轨关系（轨道车辆车轮磨耗及损伤）。

动态消息

首批“中国制造”美国波士顿橙线地铁车下线

2017 年 10 月 16 日，由中车长春轨道客车股份有限公司研制的首批美国波士顿橙线地铁车下线，预计将于 12 月运抵美国。这是“中国制造”的地铁车首次出口美国。

该车在车辆结构强度、控制安全、质量管理体系等方面均采用美国标准，是我国首批具有完全自主知识产权的美国标准地铁车。该车不仅满足美方在技术、商务、本地化及法律等方面多项要求，而且将凭借人性化设计改善乘客的出行体验。车辆采用不锈钢车体，运营速度为 102 km/h，车辆服务年限达 30 年。据悉，该车的不锈钢车体达到美标体系中更为严格的 ASME RT-2 2014 标准，此标准车体碰撞安全性更高。

能下楼梯的折叠轮椅、便携式应急担架、灵活的翻折座椅等诸多设施成为“中国制造”波士顿地铁的亮点。

（朱一迪）