长春 70%低地板轻轨车辆的车轮磨耗特征分析

刘　飞[1]　杨新文[2*]　陈德文[1]　左安国[1]

(1. 长春市轨道交通集团有限公司车辆中心,130062,长春;2. 同济大学交通运输工程学院,201804,上海//第一作者,高级工程师)

摘　要　针对长春市轨道交通 3 号线和 4 号线的车轮磨耗问题,通过跟踪测试车轮的廓形和硬度,统计分析了 70%低地板轻轨车辆的车轮磨耗特征和季节性因素的影响。研究结果表明:与 4 号线相比,3 号线轻轨列车车轮磨耗和硬度测试状况更差;动车整体轮对车轮踏面和拖车独立轮对车轮轮缘为磨耗严重区域;气温较低的秋冬季节的车轮踏面和轮缘磨耗状况均差于气温较高的春夏季节,说明低温更易导致车轮钢材的磨损。

关键词　长春轻轨; 70%低地板车辆; 车轮磨耗

中图分类号　U270.331^{+}.1:U239.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.09.003

Wheel Wear Characteristics Analysis of Changchun 70% Low-floor Light Rail Vehicles

LIU Fei, YANG Xinwen, CHEN Dewen, ZUO Anguo

Abstract　Aiming at the wheel wear problem of Changchun Rail Transit Line 3 and Line 4, the wheel wear characteristics and seasonal factors of 70% low-floor light rail vehicles are statistically analyzed by tracking and testing the wheel profile and hardness. Research results show that compared to Line 4, the wheel wear and hardness test of Line 3 light rail train is worse; the wheel tread of motor integral wheelset and the wheel flange of trailer independent wheelset are severely worn areas. The wear condition of wheel tread and flange in autumn and winter with lower temperature is worse than that in spring and summer with higher temperature, indicating that low temperature is more likely to lead to wheel steel wear.

Key words　Changchun light rail; 70% low-floor vehicle; wheel wear

First-author's address　Vehicle Center of Changchun Rail Transit Group Co., Ltd., 130062, Changchun, China

采用独立轮对的低地板轻轨车辆以其无需设置站台、方便旅客上下车等优点,在国内外轻轨线路中被大量使用。但由于独立轮对无需刚性连接车轴,左右车轮可以独立旋转,导致独立旋转车轮缺少纵向蠕滑力矩,从而丧失导向能力。因此,独立旋转车轮在实际运行中容易偏向钢轨一侧,在造成车轮偏磨的同时加剧钢轨磨耗,进而使车辆动力学性能下降。

国内外研究者关于车轮磨耗问题开展了一系列的试验、仿真及线路测试工作。文献[1]基于 Archard 磨耗模型,并结合试验数据建立了踏面磨耗模型。文献[2]基于 Archard 材料磨耗模型及轮轨多点非椭圆接触理论对低地板有轨电车车轮磨耗演变过程进行了模拟,研究了不同轮背内侧距下的车轮磨耗问题。研究结果表明:轮背内侧距对直线和曲线工况磨耗问题的影响是相互矛盾的,在一定范围内轮背内侧距越小,对直线工况越有利,而对曲线工况越不利。文献[3]参考德国和英国相关标准,以 Ri60R2 槽型轨为例,从车轮导向尺寸匹配、车轮强度和踏面镟修经济性等方面讨论了有轨电车车轮轮缘的最大磨耗限度问题,并给出了车轮轮缘磨耗的最大推荐值。文献[4]以深圳地铁 9 号线列车车轮轮缘严重磨耗问题为例,结合实测数据,分析了车辆镟修后运行里程与踏面磨耗、轮缘磨耗之间的关系,分析了列车运行的平稳性状态,并提出了相应的改进措施。文献[5]结合现场试验,分析了某条地铁线路的磨耗特征,阐述了造成轮缘偏磨的原因,从轮轨关系的角度出发,研究了一系纵向刚度及摩擦系数等对车轮磨耗的影响,提出了相应的车轮磨耗减缓措施。文献[6]针对轻轨车辆使用过程中的拖车轮缘及轨道异常磨耗问题,根据所掌握的调查试验数据,研究了轮缘磨耗发展过程与使用条件之间的关系、直线线路拖车导向轮对贴靠一侧运行的原因、车辆形位误差对车辆动态行为和轮缘磨耗的影响等问题,并给出了改善车辆轮缘及轨道磨耗的措施。文献[7]针对目前具有独立轮转向架的低地板轻轨列车所发生的脱轨问题和轮缘

* 通信作者

严重磨耗问题,从轮轨系统的基本关系出发,分析了传统刚性轮对与独立轮对的导向机理和特点,对各种可能导致脱轨和轮缘磨耗的因素进行了分析。

长春市轨道交通 3 号线是长春市第一条轻轨线路,包括一期工程与二期工程两部分,线路位于城市核心区边缘,绕北、西、南三边呈 U 形线,并向净月组团延伸[8]。长春市轨道交通 4 号线是长春市第二条轻轨线路,一期工程北起长春站北,南到车场站,全线采用高架与地下结合的建设方式。长春市轨道交通采用的轻轨车辆是典型的 70%低地板轻轨车辆,轻轨车辆运行普遍存在异常磨耗情况,由此也带来了诸多的列车运行安全问题。为了探究 70%低地板轻轨车辆的车轮磨耗特征,本文针对长春市轨道交通 3 号线和 4 号线,通过跟踪实测车轮廓形和硬度,统计分析了 70%低地板轻轨车辆车轮磨耗特征,并分析了季节性因素的影响。本文研究成果可为城市轨道交通车辆的设计与维护提供理论支撑。

1 测试方案

1.1 测试方法

长春市轨道交通列车为 6 节编组列车,1~6 节分别为动车-拖车-动车-动车-拖车-动车,其中,拖车为独立轮对,动车为整体轮对。按车辆编号从前往后依次进行测试,左右轮分别定义为 L 和 R,如第 1 轴左侧轮为轴-1L,第 1 轴右侧轮为轴-1R;第 12 轴左侧轮为轴-12L,第 12 轴右侧轮为轴-12R,共 6 个转向架,12 个轮对,24 个车轮。依次使用车轮轮廓测量仪和硬度计对车轮廓形和硬度进行测试记录,其中,硬度测试为 1 个车轮 2 个测点,1 个测点测试 3 个硬度值,取平均值作为测试的硬度值。车轮硬度测点位置如图 1 所示。

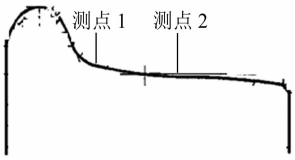


图 1 车轮硬度测点图

Fig. 1 Measuring points of wheel hardness

1.2 测试内容

目前,在长春市轨道交通 3 号线和 4 号线上服役的有中车长春轨道客车股份有限公司(以下简称为“长客”)生产的两种车型,其运行时的振动情况也有所不同。通过添乘情况并结合车辆的行车里程,选取长客两种编组车型中车轮磨耗情况最严重的列车各 2 列,具体测试信息如表 1 所示。测试内容包括:测试轻轨车辆的车轮型面和车轮硬度,并根据测试季节的气温分析季节性因素对车轮磨耗的影响。

表 1 长春轻轨测试车辆信息

Tab. 1 Test vehicle information of Changchun light rail

线路名称	不同测试时间的测试列车编号	
	2018 年 8 月	2019 年 4 月
3 号线	2002、3003	3044、3003
4 号线	3014、3035	3014、3035

1.3 测试仪器

采用车轮廓形仪和硬度计对长春市轨道交通 3 号线和 4 号线列车的车轮廓形和硬度进行测试和记录,车轮廓形仪为 WS2016-3W-LFT 型低地板轮廓测量仪,并配合 WSCAD 软件进行处理;硬度计为深达威 SW-6230 里氏硬度计。车轮廓形仪、硬度计和现场测试照片如图 2 所示。

a) 硬度计

b) 车轮廓形仪

c) 现场测试

图 2 测试仪器和现场测试

Fig. 2 Test instrument and field test

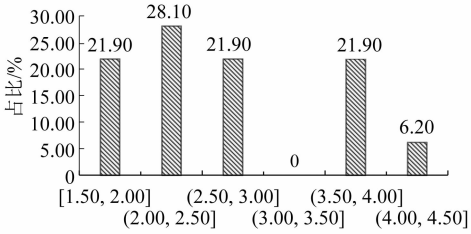
2 车轮磨耗特征分析

2.1 踏面磨耗特征分析

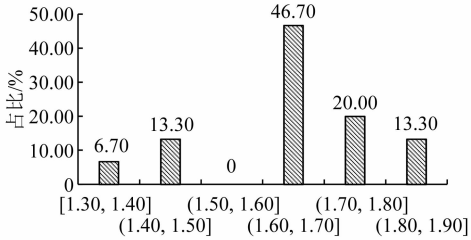
整理 2019 年 4 月长春市轨道交通 3 号线和 4 号线列车的测试数据,并对比动车整体轮对和拖车独立轮对的车轮踏面磨耗状况。车轮踏面磨耗量百分数分析对比如图 3 所示。

由图 3 可知,3 号线列车的车轮踏面磨耗程度较 4 号线更为严重,更易出现较大的踏面磨耗量。3 号线的踏面磨耗最大值达到 4.00 mm 以上,4 号线的踏面磨耗最大值小于 3.00 mm,导致这一现象的原因是相较于 4 号线,3 号线服役时间长、线路状况

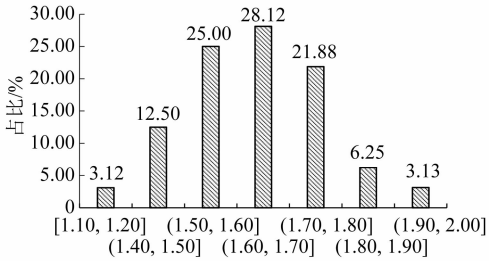
差。但无论是 3 号线还是 4 号线，动车整体轮对的车轮踏面磨耗量普遍较拖车独立轮对大，且踏面磨耗最大值都发生在整体轮对车轮上。



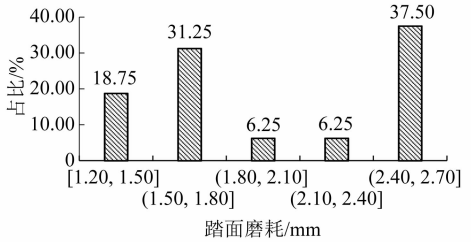
a) 3 号线动车



b) 3 号线拖车



c) 4 号线动车



d) 4 号线拖车

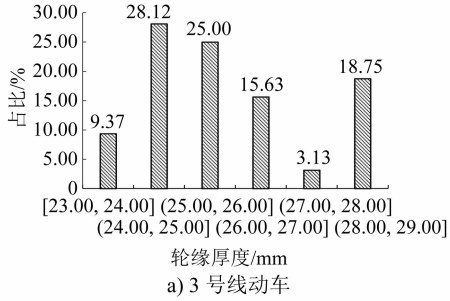
图 3　车轮踏面磨耗量分布对比

Fig. 3　Comparison of wheel tread wear distribution

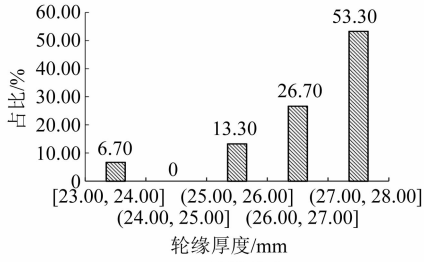
2.2　轮缘磨耗特征分析

将 2019 年 4 月长春市轨道交通 3 号线和 4 号线列车的测试数据进行整理，并对比动车整体轮对和拖车独立轮对的车轮轮缘磨耗状况。轮缘磨耗百分数分析对比如图 4 所示。

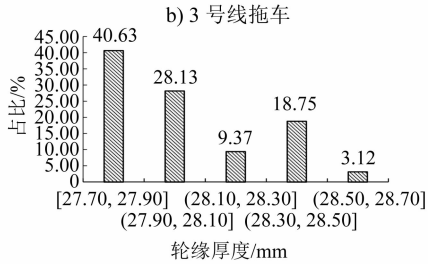
由图 4 可知，长春市轨道交通 3 号线列车的车轮轮缘厚度较 4 号线而言更薄，磨耗程度更为严重，更易出现较大的轮缘磨耗量。其中，3 号线轮缘厚度最薄小于 24.00 mm，4 号线轮缘厚度最薄大于 24.00 mm。但无论是 3 号线还是 4 号线，拖车独立轮对的车轮轮缘磨耗量较动车整体轮对大很多。根据 4 号线的列车测试结果，独立轮对轮缘厚度最小值为 24.00 ~ 25.00 mm，较整体轮对的 27.70 ~ 27.90 mm 约小 3.00 mm。



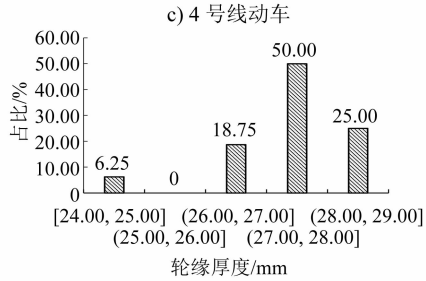
a) 3 号线动车



b) 3 号线拖车



c) 4 号线动车



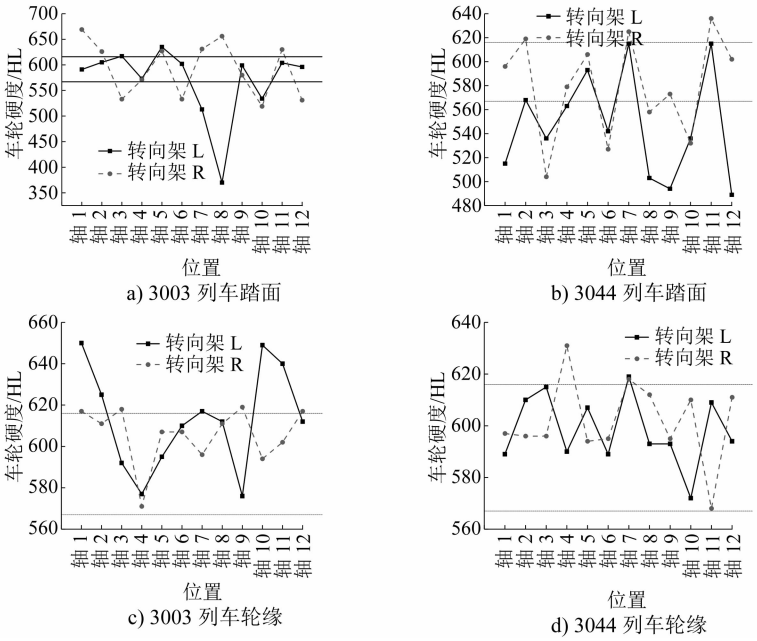
d) 4 号线拖车

图 4　车轮轮缘磨耗分布对比

Fig. 4　Comparison of wheel flange wear distribution

2.3　车轮硬度分析

根据 GB/T 2585—2007《铁路用热轧钢轨》规定，钢轨表面硬度要求在 567 ~ 616 HL 范围内，将 2019 年 4 月测试的长春市轨道交通 3 号线和 4 号线的列车踏面硬度进行分析统计，并与 GB/T 2585—2007《铁路用热轧钢轨》规定进行对比，如图 5 和图 6 所示。其中，轴 3、轴 4、轴 9 和轴 10 为拖车独立轮对，其余轴为动车整体轮对。

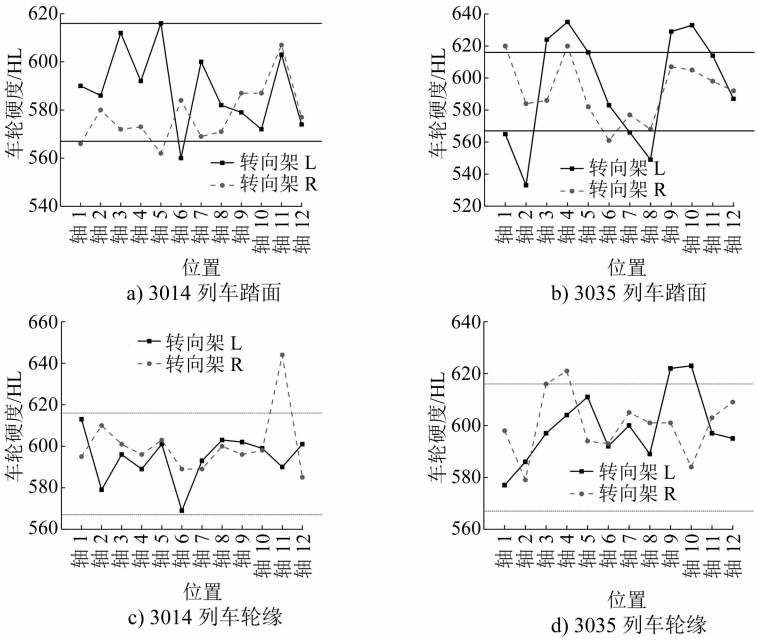


a) 3003 列车踏面　b) 3044 列车踏面

c) 3003 列车轮缘　d) 3044 列车轮缘

图 5　3 号线列车车轮硬度

Fig. 5　Line 3 train wheel hardness



a) 3014 列车踏面　b) 3035 列车踏面

c) 3014 列车轮缘　d) 3035 列车轮缘

图 6　4 号线列车车轮硬度

Fig. 6　Line 4 train wheel hardness

由图 5 和图 6 可知,长春市轨道交通 4 号线的列车车轮硬度状况明显优于 3 号线;两条线路同轴侧车轮硬度大多相近;3 号线车轮踏面硬度不合格测点较多,不合格测点的硬度多低于标准范围,导致这一现象的原因是车轮踏面钢材表面的硬化层被磨损,硬度高于标准范围的测点多为拖车独立轮对车轮,导致这一现象的原因是拖车从动轮受到的挤压更多。

根据 GB/T 2585—2007《铁路用热轧钢轨》规定值对图 5 和图 6 中的数据进行筛选,统计标准范围内的测点数比例,如表 2 所示。由表 2 可知,长春市轨道交通 4 号线列车车轮硬度合格率明显高于 3 号线。其中,4 号线合格率最低的是 3035 列车,其踏面硬度合格率为 54.2%,而 3 号线 2 列列车的踏面硬度合格率仅为 37.5% ;4 列车的轮缘硬度合格

率明显高于踏面硬度合格率,该现象在磨耗较为严重的 3 号线列车上尤为明显。

表 2　车轮硬度合格率百分比统计表

Tab. 2　Statistics of percentage of qualified wheel hardness

列车编号	位置	合格率/%
3 号线 3044	轮缘	62.5
	踏面	37.5
3 号线 3003	轮缘	87.5
	踏面	37.5
4 号线 3014	轮缘	95.8
	踏面	87.5
4 号线 3035	轮缘	87.5
	踏面	54.2

2.4　季节性因素对车轮磨耗的影响

由于 3 号线列车车轮磨耗较为严重,两次测试期间车轮进行了多次镟修更换等养护措施,所以对比 4 号线列车车轮来分析季节性因素对车轮磨耗的影响。根据长春市轨道交通公司的车辆维修情况,在 2018 年 8 月夏季测试时,列车运行磨耗时段为气温较高的春夏季节;在 2019 年 4 月春季测试时,列车运行磨耗时段为气温较低的秋冬季节。将 4 号线 3014 列车和 3035 列车两次测试的 48 个车轮的踏面磨耗和轮缘厚度测试值取算术平均值进行对比,结果如图 7 所示。

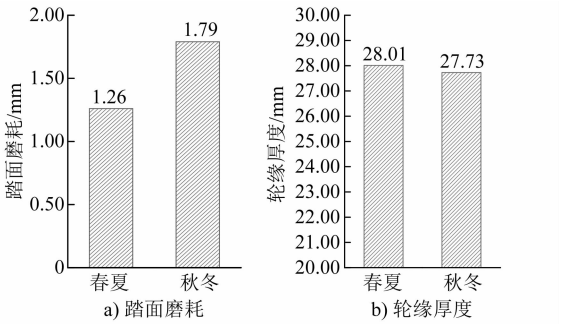


图 7　两次测试值的均值对比

Fig. 7　Comparison of mean values of two tests

由图 7 可知,气温较冷的秋冬季节的车轮磨耗各项测试指标均差于气温较高的春夏季节。其中,秋冬季较春夏季的踏面磨耗平均值增加了 0.53 mm,轮缘厚度平均值减小了 0.28 mm。可见,低温更易导致车轮钢材的磨损。

3　结语

本文针对长春市轨道交通 3 号线和 4 号线列车的车轮磨耗问题,通过跟踪实测车轮廓形和硬度,统计分析了 70%低地板轻轨车辆的车轮磨耗特征,并分析了季节性因素的影响。研究结果表明:

1）长春市轨道交通 3 号线的列车车轮踏面磨耗程度较 4 号线更为严重,更易出现较大的踏面磨耗量,3 号线的踏面磨耗最大值达到 4.00 mm 以上,4 号线的踏面磨耗最大值小于 3.00 mm。导致这一现象的原因是相较于 4 号线,3 号线的服役时间长、线路轨道状态差。但无论 3 号线还是 4 号线,动车整体轮对的车轮踏面磨耗量普遍较拖车独立轮对大,且踏面磨耗最大值都发生在整体轮对车轮上。

2）长春市轨道交通 3 号线的列车车轮轮缘厚度较 4 号线更薄,磨耗程度更为严重,更易出现较大的轮缘磨耗量。其中,3 号线的轮缘厚度最薄小于 24.00 mm,4 号线的轮缘厚度最薄大于 24.00 mm。但无论 3 号线还是 4 号线,拖车独立轮对的车轮轮缘磨耗量较动车整体轮对大很多,根据 4 号线的列车测试结果,独立轮对轮缘厚度最小值为 24.00~25.00 mm,较整体轮对的 27.70~27.90 mm 约小 3.00 mm。

3）长春市轨道交通 4 号线列车车轮硬度状况明显优于 3 号线列车;两条线路同轴两侧车轮硬度大多相近;3 号线车轮踏面硬度不合格测点较多,不合格测点的硬度多低于标准范围,导致该现象的原因是车轮踏面钢材表面的硬化层被磨损;硬度高于标准范围的测点多为拖车独立轮对车轮,导致该现象的原因是拖车从动轮受挤压更多。4 号线列车的车轮硬度合格率明显高于 3 号线,而且列车的轮缘硬度合格率明显高于踏面硬度合格率,这在磨耗较为严重的 3 号线上体现得尤为明显。

4）气温较低的秋冬季节的车轮踏面和轮缘的磨耗状况均差于气温较高的春夏季节。其中,秋冬季较春夏季的踏面磨耗平均值增加了 0.53 mm,轮缘厚度平均值减小了 0.28 mm。可见,低温更易导致车轮钢材的磨损。

参考文献

[1]　JENDEL T. Prediction of wheel profile wear-comparisons with field measurements[J]. Wear,2002,253(1-2):89.

[2]　丁军君,杨阳,李芾,等. 基于槽型轨的低地板有轨电车车轮磨耗及优化研究[J]. 铁道学报,2017(7):54.
DING Junjun, YANG Yang, LI Fu, et al. Research on wheel wear and optimization of low-floor trams based on groove track [J]. Journal of the China Railway Society,2017(7):54.

[3]　周业明,刘玉文. 有轨电车车轮轮缘磨耗最大限度的探讨[J]. 城市轨道交通研究,2017(6):21.

(下转第 22 页)