

DOI: 10.3901/JME.2022.04.191

# 两种典型动车组车轮磨耗演变规律 及其动力学影响研究<sup>\*</sup>

侯茂锐<sup>1,2</sup> 陈秉智<sup>2</sup> 成 棣<sup>1</sup> 胡晓依<sup>1</sup> 孙丽霞<sup>1</sup>

(1. 中国铁道科学研究院集团有限公司铁道科学技术研究发展中心 北京 100081;

2. 大连交通大学机车车辆工程学院 大连 116021)

**摘要:** 为对比不同线路、相同平台动车组车轮磨耗演变规律及其对动车组动力学性能的影响,对速度等级 250 km/h 的 A、B 两条高速线路上运行的同平台动车组车轮磨耗进行长期跟踪测试。将实测车轮踏面与实测钢轨廓形匹配,对比分析车轮磨耗对等效锥度、接触点分布等轮轨接触几何关系的影响。利用多体动力学软件建立动车组拖车动力学仿真模型,研究车轮磨耗演变规律对动车组动力学性能及轮轨滚动接触疲劳损伤的影响。研究表明, A 线路车轮平均磨耗速率为 0.05 mm/万 km,踏面磨耗分布在 -20~30 mm 范围内,呈现凹形磨耗;等效锥度增大速率约为 0.006/万 km;轮轨接触点逐渐向钢轨轨肩处靠拢,存在明显跳跃现象。B 线路车轮平均磨耗速率约为 0.025 mm/万 km,踏面磨耗分布在 -35~50 mm 范围内,磨耗分布较均匀;等效锥度稳定在 0.03 左右,随运营里程的增大没有明显的变化趋势,轮对横移量在 10 mm 以内的轮轨接触点始终保持车轮踏面中部与钢轨轨顶中部接触,轮轨接触点分布均匀。随着运行里程的逐渐增大, A 线路的动力学性能略有下降, B 线路的动力学性能基本稳定。B 线路的车轮表面疲劳指数小于 A 线路,车轮发生滚动接触疲劳裂纹的可能性较小。

**关键词:** 动车组; 车轮磨耗; 轮轨接触关系; 动力学性能; 滚动接触疲劳

**中图分类号:** U211

## Two Typical Wheel Wear Evolution Characteristics and Its Influence on Dynamic Performance of High-speed EMU

HOU Maorui<sup>1,2</sup> CHEN Bingzhi<sup>2</sup> CHENG Di<sup>1</sup> HU Xiaoyi<sup>1</sup> SUN Lixia<sup>1</sup>(1. Railway Science and Technology Research and Development Center,  
China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081;

2. College of Locomotive and Rolling Stock Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116021)

**Abstract:** In order to compare the wheel wear evolution characteristics on different lines and its influence on the dynamic performance of EMUs, the wheel wear of EMUs on the same platform running on two high-speed lines A and B with a speed grade of 250 km/h was tested for a long time. Matching the measured wheel tread with the measured rail profile, the influence of wheel wear on the contact geometric interaction such as equivalent conicity, wheel-rail contact point distribution is compared and analyzed. A vehicle dynamic model was established by the multibody dynamic analysis software SIMPACK to study the evolution of vehicle dynamic performance and rolling contact fatigue damage with the evolution of wheel wear. The results indicated that the average wheel wear rate of line A was 0.05 mm/10 000 km, the tread wear was distributed in the range of -20~30 mm, showing hollow. The increase rate of equivalent conicity was about 0.006/10 000 km, as well as the wheel-rail contact point gradually draws close to the rail shoulder and there is obvious jumping phenomenon. The average wheel wear rate of B line was about 0.025 mm/ 10 000 km, which was distributed in the range of -35~50 mm was uniformly distributed. The equivalent conicity was stable at about 0.03, and there was no obvious change trend with the increase of operating mileage. The wheel-rail contact points within 10 mm always kepted the middle wheel tread in contact with the middle rail top, and the wheel-rail

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金高铁联合基金(U1734201)、中国铁路总公司科技研究开发计划课题(2017J003-B)和中国铁道科学研究院集团有限公司科技研究开发计划课题(2019YJ162)资助项目。20210331 收到初稿, 20210821 收到修改稿

contact points were uniformly distributed. With the gradual increase of operating mileage, the dynamic performance of A line decreased slightly, while the dynamic performance of B line was basically stable. The wheel surface fatigue index of line B was less than the line A, so the possibility of rolling contact fatigue crack is less.

**Key words:** high-speed EMU; wheel wear; wheel-rail contact interaction; dynamic performance; rolling contact fatigue

## 0 前言

目前我国构建了涵盖不同速度等级、成熟完备的高速铁路技术体系,截止 2020 年底,我国高速铁路运营里程达 3.6 万 km,建成了世界上最发达的高速铁路网<sup>[1]</sup>。高速铁路运营版图的不不断延伸,干旱风沙、湿热潮湿等气候环境对车轮磨耗的影响逐渐显现,加上长距离持续高速运行等特点,使得我国高速车轮磨耗问题愈发复杂<sup>[2]</sup>。

对于高速铁路,轮轨型面的微小变化直接影响轮轨匹配关系,导致车辆运行的平稳性、舒适性变化。动车组车轮磨耗不但直接影响动车组运行的安全性和旅客乘坐舒适性,同时对于运营成本也有重要的影响。保证车轮踏面外形的常用方法是运用一定距离后应用不落轮镟床将车轮踏面外形恢复成设计外形。车轮镟修周期过长,容易引起动车组运行平稳性和旅客乘坐舒适性的下降,严重时危及行车安全;镟修周期过短,车轮踏面镟修频繁,经济性较差<sup>[3]</sup>。目前,和谐号动车组的镟轮周期一般为 20 万~25 万 km。铁路运用部门正在推进机辆装备造修一体化及修程修制改革,力图通过延长车轮镟修周期,降低维修维护成本,提升经济效益<sup>[1]</sup>。由于等效锥度具有直观、简洁等特点,可间接评价车辆动力学性能,所以运用部门一般通过等效锥度限值控制车轮踏面镟修周期。

研究人员分别借助现场试验、室内试验和数值仿真手段从不同角度研究车轮磨耗问题及其对车辆动力学性能的影响。货车、高速车辆普遍存在车轮踏面凹形磨耗问题,SAWLEY 等<sup>[4]</sup>针对北美货车车轮踏面凹形磨耗,研究了车轮磨耗对货车动力学性能的影响,并给出了凹形磨耗限值,我国黄照伟等<sup>[5-7]</sup>分别研究了车轮踏面偏磨、凹形磨耗对高速车辆轮轨相互作用的影响,发现同向偏磨、凹形磨耗对高速车辆运行稳定性、平稳性及舒适性的影响,同时凹形磨耗使得轮轨力高频成分增加。车轮磨耗问题不可避免,因此,诸多研究人员建立了车轮磨耗数值预测方法,分析车轮磨耗的关键影响因素,指导现场养护维修<sup>[8-11]</sup>。通过现场试验跟踪车轮磨耗演变规律,针对 TB60、60N 钢轨设计廓形开展轮轨接触几何关系及动力

学影响分析,陆文教等<sup>[12-14]</sup>分别针对地铁线路、高速车轮镟修周期和高速动车组开展了相关研究工作。侯茂锐等<sup>[15]</sup>通过在 6 条高速线路开展长期的车轮、钢轨型面跟踪测试,获得了实测轮轨型面及轮轨匹配变化规律。金学松等<sup>[16]</sup>系统总结了我国高速铁路车轮踏面横向凹形磨耗情况,并提出了 7 方面的抑制措施。

关于高速列车车轮磨耗及轮轨匹配问题,已有诸多研究人员对其进行了研究,但大多针对新轮新轨状态,对不同线路车轮磨耗演变规律及其轮轨匹配特性的对比研究较少。本文选取两条线路等级为 250 km/h 的高速铁路,对运用的同平台动车组车轮磨耗进行了长期跟踪测试,对比分析了两条线路车轮磨耗特征及其轮轨接触关系演变规律。应用多体系统的动力学软件建立了动车组拖车仿真模型,研究了车轮磨耗对车辆直线运行性能、曲线通过性能和轮轨滚动接触疲劳损伤的影响。

## 1 车轮磨耗跟踪测试及分析

对 A 线路和 B 线路运行的动车组车轮廓形进行跟踪测试,每 2 万~5 万 km 采用 Miniprof 车轮廓形测量仪进行一次测试,在一个镟轮周期内,A 线路共进行了 10 次测试,B 线路共进行了 7 次测试。

图 1 给出了 A 线路运营的动车组全列 64 个车轮滚动圆附近磨耗数据箱型统计图随运营里程的变化,由统计结果可知,车轮磨耗随运营里程的增大逐渐增大,镟轮周期末期的车轮最大磨耗、最小磨耗分布区间增大,车轮平均磨耗速率为 0.05 mm/万 km;21.8 万 km 时车轮最大磨耗约 1.5 mm,车轮平均最大磨耗约 1.1 mm。

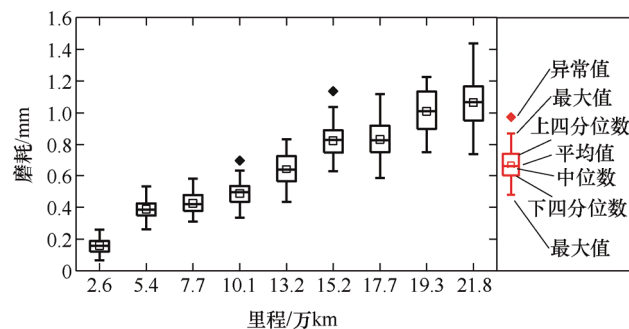


图 1 A 线路车轮磨耗随运营里程变化规律

选择 1 位导向轮进行车轮廓形对比分析, 如图 2a 所示, 以镟轮后首次测量的车轮廓形为基准, 其它里程的车轮廓形在法向减去基准廓形得到车轮磨耗分布, 如图 2b 所示。由图 2 可知, A 线路运营动车组车轮轮缘部分廓形基本重合, 轮缘几乎没有磨耗, 主要以车轮踏面磨耗为主, 踏面磨耗分布在  $-20 \sim 30$  mm 范围内, 轮轨接触范围较小, 出现凹形磨耗。

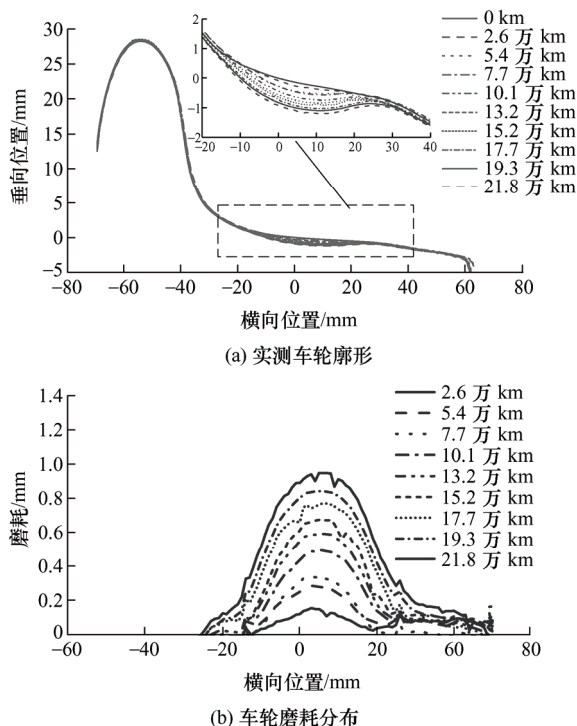


图 2 A 线路车轮廓形及磨耗分布

图 3 给出了 B 线路运营的动车组全列 64 个车轮磨耗数据的箱型统计图, 由统计结果可知, 车轮磨耗随运营里程的增大逐渐增大, 且离散性逐渐增大, 11.3 万 km 之前车轮磨耗速率约为  $0.022$  mm/万 km, 11.3 万 km 之后车轮磨耗速率有一定增大, 约为  $0.025$  mm/万 km。21.8 万 km 时车轮最大磨耗约  $0.75$  mm, 车轮平均最大磨耗约  $0.55$  mm。

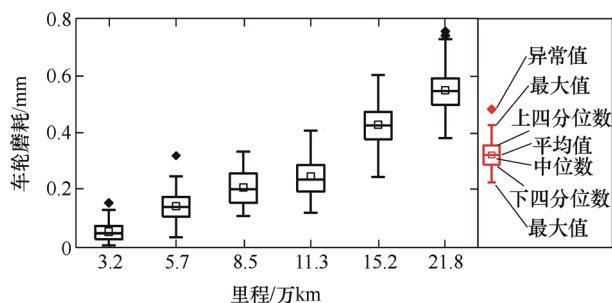


图 3 B 线路车轮磨耗随运营里程变化规律

选择 1 位导向轮进行车轮廓形对比分析, 如图 4a 所示, 车轮磨耗分布如图 4b 所示。由图可知, B 线路运营动车组车轮轮缘部分存在微小变化, 主要以车轮踏面磨耗为主, 踏面磨耗分布在  $-35 \sim 50$  mm 范围内, 踏面中部磨耗分布范围较宽, 磨耗分布较均匀。

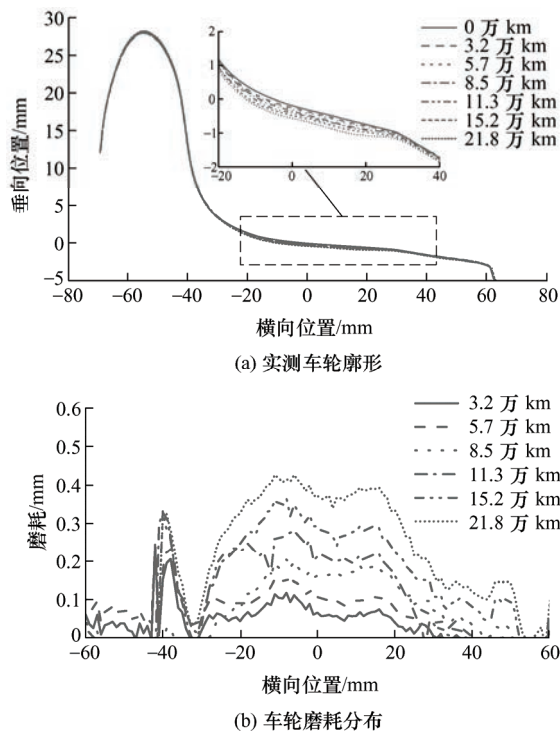


图 4 B 线路车轮廓形及磨耗分布

## 2 车轮磨耗对轮轨接触关系的影响

### 2.1 等效锥度

该动车组设计车轮踏面为 LMa 型踏面。动车组车轮镟修后, 全列车轮廓形具有一致性, 选择 1 位导向轮镟修后实测廓形进行比较, 如图 5 所示。

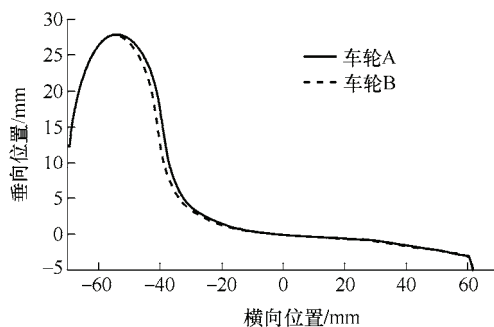


图 5 A 线路与 B 线路车轮镟修后廓形比较

由图 5 可知, 两车轮廓形在轮缘处存在差异,

B线路的车轮轮缘厚度较A线路小约2 mm,踏面部分完全重合。主要由于B线路车轮采用了薄轮缘外形镟修,动车段镟轮时为了减小车轮轮径的进刀量,一般多采用薄轮缘外形,不同车轮镟修后的轮缘存在一定差异,但踏面部分和标准车轮型面一致,以保证等效锥度稳定。

由图6可知,两条线路的钢轨指导打磨廓形均为60D,由于钢轨打磨主要采用砂轮对廓形进行修正,精度远不及车轮镟修的数控车床,不同工务部门采取的打磨工艺略有差异,导致两条线路实测钢轨廓形有微小的偏差,A线路钢轨实测廓形在轨距角处较B线路凸起。

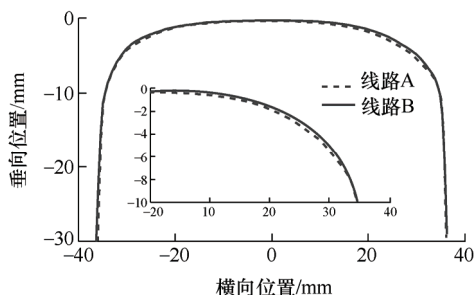


图6 A线路与B线路实测钢轨廓形比较

等效锥度是评价轮轨型面匹配的重要参数,应用UIC 519标准规定的方法<sup>[17]</sup>,采用实测车轮和实测钢轨廓形数据计算等效锥度。首先,对比分析了镟轮后车轮等效锥度随轮对横移量变化的曲线,如图7所示。由图7可知,轮对横移量在9 mm以内时,两条线的轮轨匹配等效锥度完全一致,由于B线路车轮采取薄轮缘外形,轮缘厚度减小,使得轮轨游间增大,A线路车轮在轮对横移量到达9 mm后,达到轮缘根部,等效锥度开始快速增大,B线路车轮在轮对横移量达到10 mm后进入轮缘根部,等效锥度开始逐渐增大。

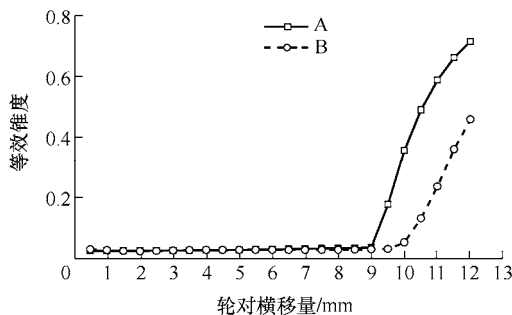


图7 镟轮后车轮与实测钢轨廓形匹配的等效锥度曲线

A线路和B线路1个镟轮周期内等效锥度随运用

里程变化的箱型统计图分别如图8、9所示。

由图8可知,A线路轮轨匹配等效锥度随着运营里程的增大缓缓增大,等效锥度增大速率约为0.006/万km,且离散性不断增加。

由图9可知,B线路在一个镟轮周期内的等效锥度稳定在0.03左右,随运营里程的增大没有明显的变化趋势。

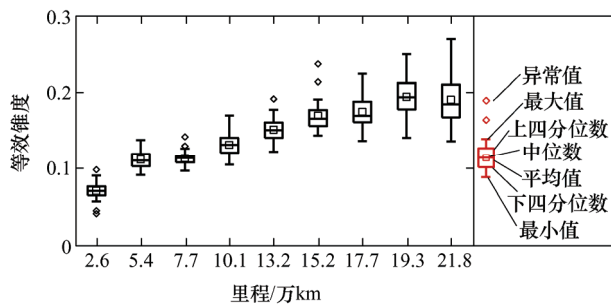


图8 A线路等效锥度演变规律

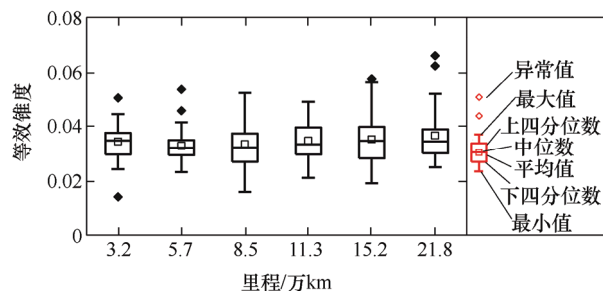


图9 B线路等效锥度演变规律

综合分析可知,造成B线路车轮踏面磨耗范围较宽,等效锥度没有明显增大趋势主要有以下两方面因素。一方面,两条线路的钢轨廓形不完全一致,存在一定差异。另一方面,可能由于车轮薄轮缘外形引起。采用薄轮缘车轮踏面外形,使得轮轨游间增大,通过曲线时轮对横移量增加,因此,轮轨接触点分布范围较宽。

## 2.2 轮轨接触点分布

在跟踪测试的动车组车轮磨耗数据中,每间隔约5万km选取车轮廓形数据与各线路实测钢轨廓形匹配,分析轮轨接触点分布演变特性。计算分析时车轮直径为860 mm,轮对内侧距为1353 mm,轨距为1435 mm,轨底坡为1/40,未考虑轮对摇头角的影响。考虑轮对在横移量为-10~10 mm的轮轨接触情形,每间隔0.5 mm计算一个接触位置。

A线路和B线路的轮轨接触点演变特性分别如图10、11所示。图中连接车轮与钢轨的细线表示在



指定横移量下车轮与钢轨的接触点, 车轮上方的数字表示轮对横移量。

由图 10 可知, 车轮刚镟修后踏面中部轮轨接触点分布均匀, 轮对横移量约大于 9 mm 后将会发生轮缘接触。运营里程 5.4 万 km 时踏面中部轮轨接触点逐渐分散, 轮对横移量大于 2 mm 后轮轨接触点出现跳跃, 轮轨接触点主要分布在

3 个区域:  $-10 \sim 0$  mm、 $2 \sim 8$  mm、 $9 \sim 10$  mm。对比图 10a 和图 10e, 随着运营里程的增加, 图 10a 中轮对横移量 2 mm 对应钢轨横向位置 750 mm 处, 图 10e 中轮对横移量 2 mm 对应钢轨横向位置小于 750 mm, 靠近钢轨轨肩, 此时钢轨廓形的斜率逐渐增大, 使得轮轨接触等效锥度增大。

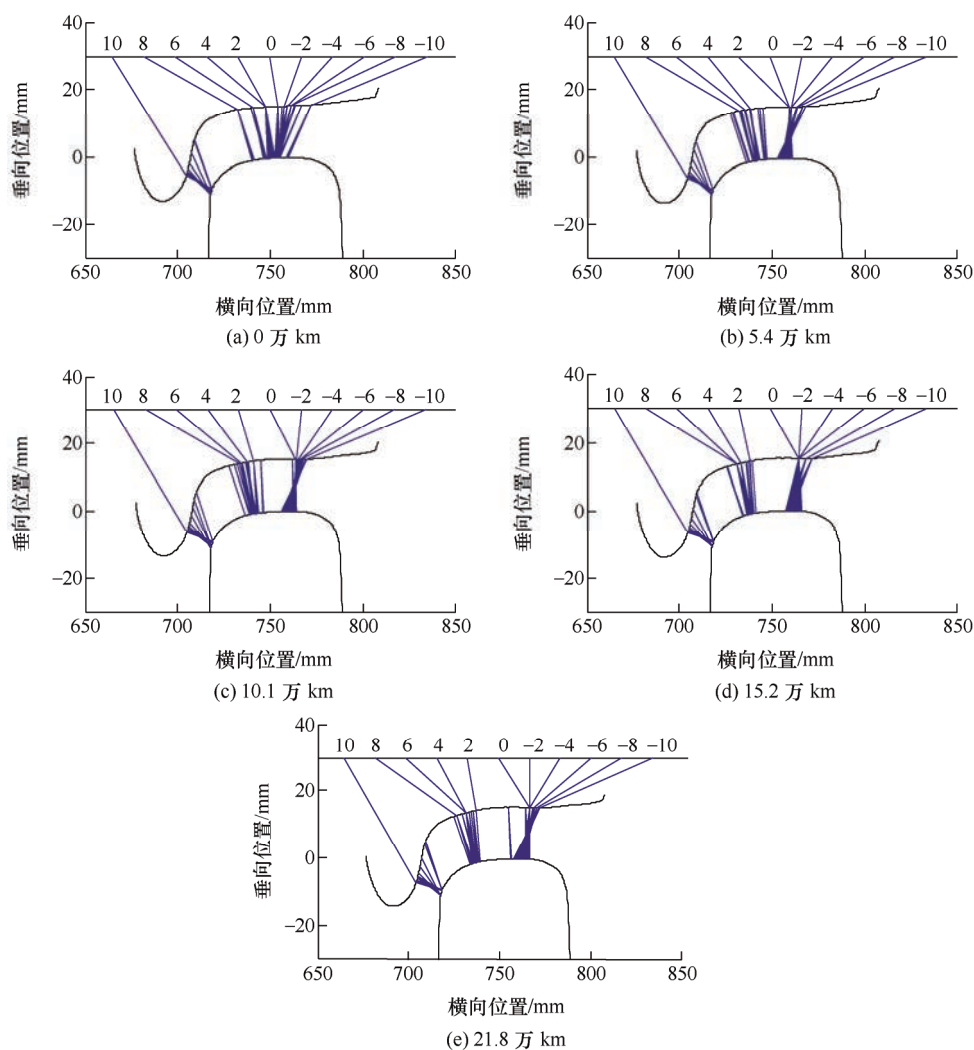
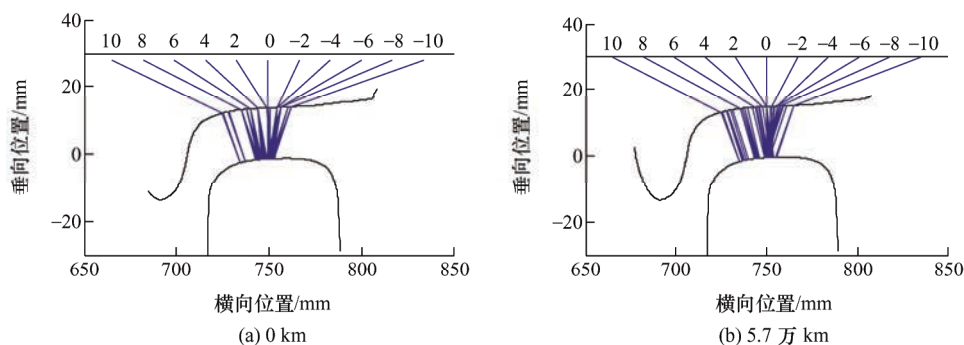


图 10 A 线路轮轨接触点演变



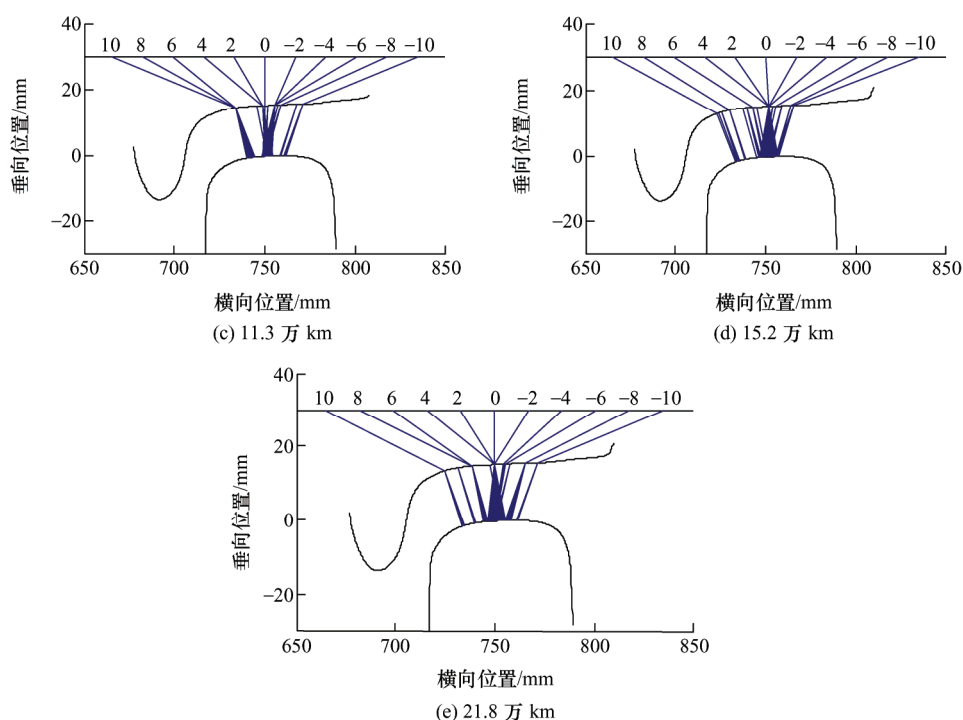


图 11 B 线路轮轨接触点演变

由图 11 可知,随着运营里程的增加,轮对横移量在 $\pm 10\text{ mm}$  以内的轮轨接触点始终保持车轮踏面中部与钢轨轨顶中部接触,轮轨接触点分布均匀,没有出现明显的接触带宽变化。

### 3 车轮磨耗对车辆动力学性能影响

#### 3.1 动力学仿真模型

应用多体动力学软件建立动车组拖车动力学模型,模型中采用两系悬挂,考虑抗蛇行减振器阻尼等关键元件的非线性特性,其它悬挂部件力学特性简化为线型特性,由 Kalker 非线性蠕滑理论计算轮轨蠕滑力。动力学仿真模型由 1 个车体、2 个构架、4 个轮对和 8 个轴箱组成,共 50 自由度。应用子系统建模技术,分别把轮对、转向架和车体作为孤立子系统,通过不同子系统组建整车动力学仿真模型,车辆动力学仿真模型见图 12 所示。计算中采用高速铁路实测轨道不平顺激励,长度 5 000 m,轨向、高低轨道不平顺样本如图 13 所示。

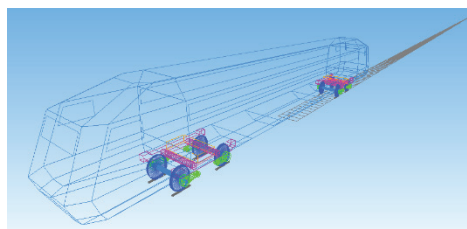
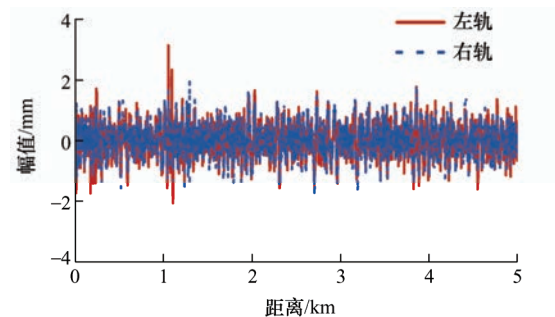


图 12 车辆动力学仿真模型

表 1 车辆关键参数

参数	数值
车体质量/t	33.79
构架质量/t	2.70
轮对质量/t	1.87
车辆定距/m	17.50
轴距/m	2.50
一系钢簧垂向刚度/(MN/m)	1.18
一系钢簧横向刚度/(MN/m)	0.98
二系空气弹簧垂向刚度/(MN/m)	0.19
二系空气弹簧横向刚度/(MN/m)	0.16



(a) 轨向不平顺

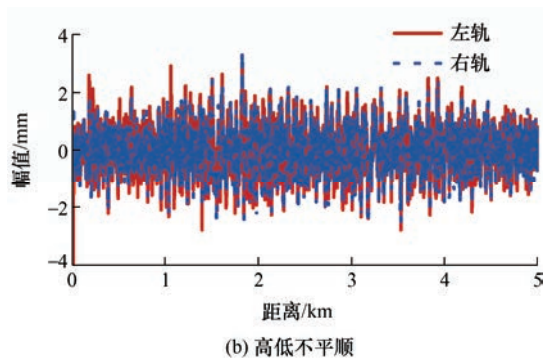


图 13 轨道不平顺曲线

### 3.2 直线运行性能

动车组直线运行性能主要考察运行稳定性和平稳性。稳定性的评价指标一般采用非线性临界速度, 非线性临界速度计算采用初始激励法<sup>[18]</sup>。在第 1 节跟踪测试的车轮廓形中选择 5 次实测车轮廓形分别与两条线路实测钢轨廓形进行匹配, 计算分析动车组非线性临界速度变化, 如图 14 所示。

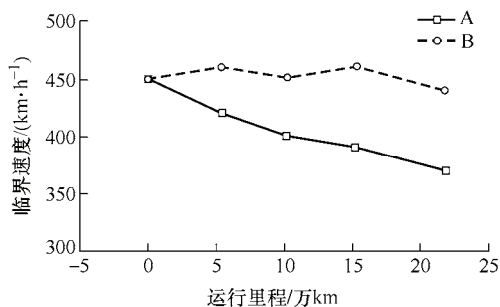


图 14 非线性临界速度曲线

本文所建立的动车组设计最高运行速度为 250 km/h, 按照 40% 的安全裕量考虑, 动车组的非线性临界速度应该大于 350 km/h。由仿真计算结果可知, 车轮镟修后, 两条线车轮廓形接近, 非线性临界速度均为 450 km/h。随着服役运营里程的增大, 车轮逐渐磨损, A 线路车轮廓形对应的非线性临界速度不断下降, 21.8 万 km 镟轮时的非线性临界速度为 370 km/h, 大于 350 km/h 的安全裕量要求。B 线路车轮廓形对应的非线性临界速度在 450 km/h 附近波动, 变化不大。

不同车轮磨耗对动车组横向平稳性和垂向平稳性指标变化如图 15、16 所示。

由图 15 可知, 前 5 万 km 的镟轮初期, A 线路动车组横向平稳性指标基本稳定在 1.5, 之后随着运行里程的增大逐渐增大, 15.2 万 km 时横向平稳性指标大于 2.75, 横向平稳性由“优秀”降为“良好”, B 线路动车组横向平稳性指标基本稳定在 1.5, 保持为“优秀”等级。

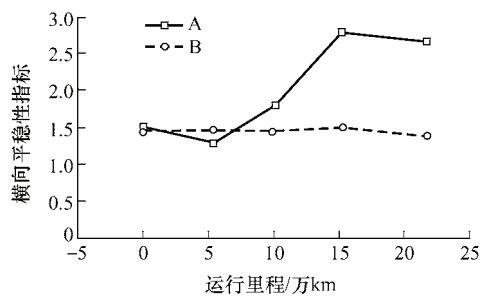


图 15 横向平稳性曲线

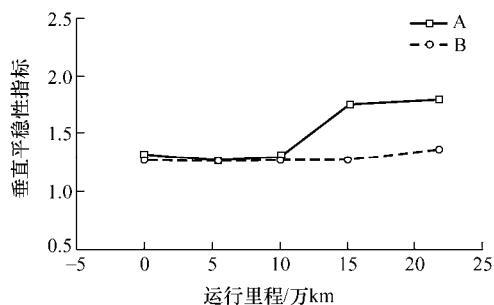


图 16 垂向平稳性曲线

由图 16 可知, 镟轮后 10 万 km 以内, A 线路动车组垂向平稳性指标基本稳定在 1.3, 之后随着运行里程的增大逐渐增大到 1.8, 横向平稳性均为“优秀”, B 线路动车组垂向平稳性指标基本稳定在 1.3, 保持为“优秀”等级。

### 3.3 曲线通过性能

根据《高速铁路设计规范》<sup>[19]</sup>, 并参考 A、B 线路实际曲线参数设置了 5 种不同半径的曲线, 具体如表 2 所示。曲线半径分别从 8 000 m 减小到 1 000 m, 根据不同的实际通过速度设置不同的超高, 使得不同曲线的欠超高相当, 保证列车通过曲线时未被平衡的离心加速度一致。计算中设置不同曲线半径的钢轨廓形不变, 依然采用图 6 所示钢轨廓形。

表 2 曲线线路参数

半径/m	超高/mm	速度/(km·h <sup>-1</sup> )	欠超高/mm
8 000	60	250	32.2
5 500	100	250	34.1
3 500	115	210	33.7
1 600	90	130	34.6
1 000	110	110	32.8

采用磨耗指数表征车辆通过曲线时的轮轨磨耗程度<sup>[20]</sup>, 具体见式(1)

$$W_l = T_x v_x + T_y v_y \quad (1)$$

式中,  $T_x$ 、 $T_y$  分别为轮轨接触斑处的纵向和横向蠕滑力;  $v_x$ 、 $v_y$  分别为轮轨接触斑处的纵向和横向蠕滑率。

基于两条线路实测车轮、钢轨廓形匹配, 计算分析动车组通过不同曲线时的曲线通过性能。不同曲线下车轮磨耗对轮轴横向力、脱轨系数、磨耗指数的影响如图 17~19 所示。

由图 17 可知, ① 相较于 B 线路, 曲线半径相同时 A 线路轮轴横向力均随运营里程的增加呈现增大趋势。由于 A 线路车轮存在凹形磨耗, 并且随着运营里程的增加, 凹形磨耗逐渐加剧, 使得同一轮对通过曲线时的左右车轮轮径差减小, 曲线通过能力下降, 轮轴横向力增加; ② 对于 B 线路, 曲线半径相同时, 轮轴横向力随运营里程增大无明显变化规律。由于 B 线路车轮磨耗均匀, 轮轨接触范围较宽, 曲线上左右轮轨接触与直线类似, 左右轮轨横向力相差较小; ③ 对于 A 线路, 曲线半径对轮轴横向力影响显著, 随着曲线半径的减小轮轴横向力呈现逐渐增大趋势。对于 B 线路, 曲线半径对轮轴横向力的影响较 A 线路小, 曲线半径小于 5 000 m 后, 轮轴横向力变化较小; ④ 曲线半径相同时, A 线路的轮轴横向力大于 B 线路, 且随着曲线半径的减小, A 线路轮轴横向力比 B 线路增大幅度也增大; ⑤ 根据《高速动车组整车试验规范》<sup>[21]</sup>, 结合动车组轴重, 最大轮轴横向力应小于 48 kN。上述所有工况的最大轮轴横向力均远小于 48 kN, 满足动车组安全运行要求。

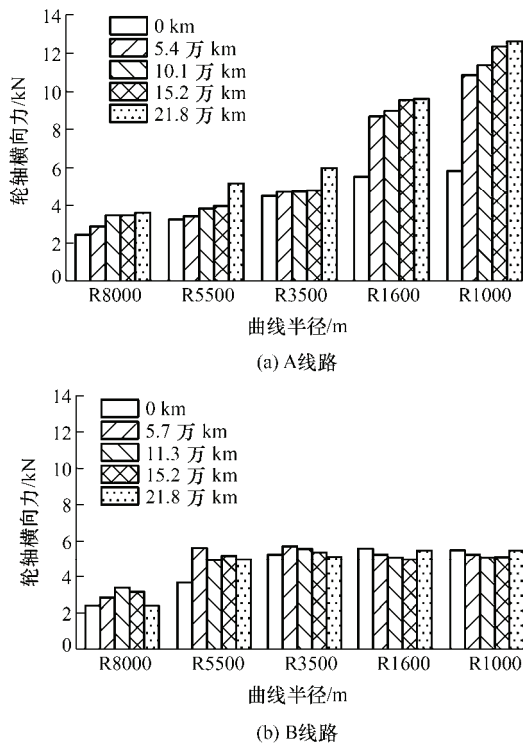


图 17 轮轴横向力比较

由图 18 可知, ① 对于 A 线路, 曲线半径相同时脱轨系数随运营里程的增大有一定增大趋势。随

着运营里程增加, 车轮凹形磨耗增大, 轮轨横向力增大的同时, 垂向力变化较小, 因此脱轨系数有一定增大; ② 对于 B 线路, 曲线半径相同时脱轨系数随运营里程增加无显著变化规律; ③ 脱轨系数随曲线半径减小显著增大, 但均小于安全限值 0.8。

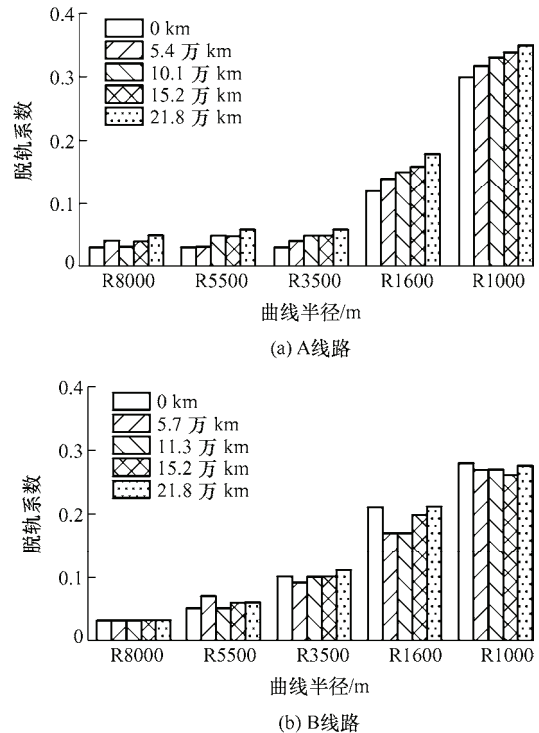
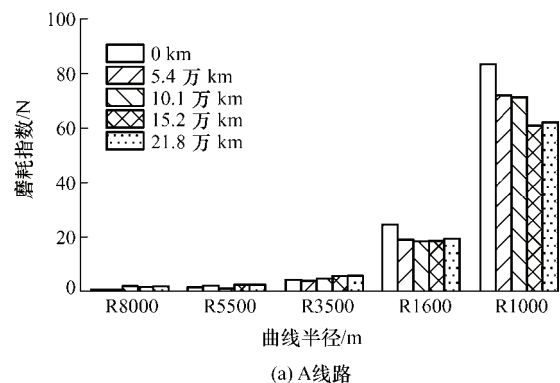


图 18 脱轨系数比较

由图 19 可知, ① 对于 A 线路, 曲线半径相同时磨耗指数随运营里程的增大变化不明显, 曲线半径 1 600 m 和 1 000 m 时磨耗指数随运营里程增大有一定的减小趋势, 主要因为发生了两点接触, 轮缘接触承担了一部分法向力, 车轮踏面部分承担的法向力减小, 而图中采用的磨耗指数主要针对车轮踏面磨耗, 所以磨耗指数有一定程度的减小; ② 曲线半径对磨耗指数影响显著, 尤其是曲线半径小于 1 600 m 时, 磨耗指数剧烈增大; ③ B 线路磨耗指数变化规律与脱轨系数相似, 随运营里程变化无明显规律。





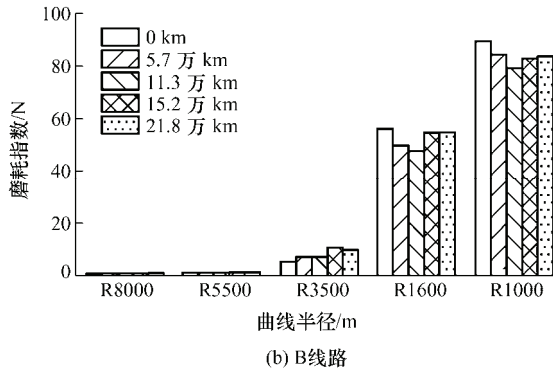


图 19 磨耗指数比较

#### 4 车轮磨耗对轮轨滚动接触疲劳的影响

采用基于安定图提出的表面疲劳指数来评价轮轨滚动接触疲劳特性<sup>[22]</sup>。疲劳指数

$$FI_{surf} = \mu - \frac{2\pi abk}{3F_z} \quad (2)$$

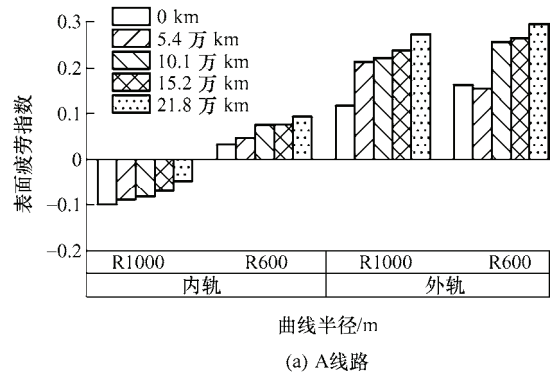
式中,  $a$ 、 $b$  分别为轮轨椭圆接触斑的短半轴和长半轴长度;  $k$  为材料纯剪切屈服强度, 取 584 MPa;  $F_z$  为轮轨接触法向力;  $\mu$  为牵引系数, 具体由式(3)确定

$$\mu = \frac{\sqrt{T_x^2 + T_y^2}}{F_z} \quad (3)$$

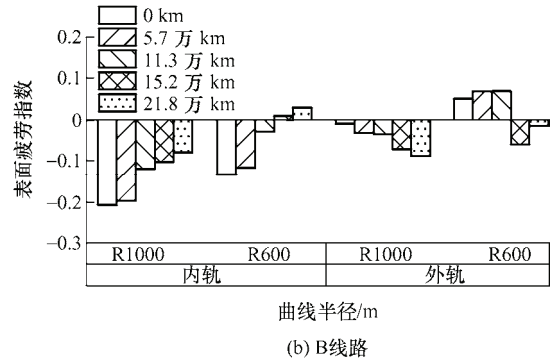
式中,  $T_x$  和  $T_y$  分别为轮轨接触纵向蠕滑力和横向蠕滑力。当  $FI_{surf} > 0$  时, 认为材料处于棘轮效应区, 材料的塑性变形持续累积, 最终导致材料失去韧性而发生疲劳裂纹。

根据线路实际, A、B 线路在枢纽区域均存在半径小于 1 000 m 的曲线, 站场、动走线的曲线半径甚至为 300 m<sup>[21]</sup>。因此, 设置半径 1 000 m 和 600 m 两种工况进行轮轨滚动接触疲劳影响分析, 计算时不考虑轨道不平顺的影响, 导向轮对外轨、内轨对应的车轮滚动接触疲劳指数如图 20 所示。

由图 20a 可知, 对于 A 线路, 半径 1 000 m 曲线内轨的表面疲劳指数为负值, 其外轨及半径 600 m 曲线内、外轨的表面疲劳指数均为正值, 说明半径 1 000 m 曲线外轨和半径 600 m 曲线容易导致车轮形成表面滚动接触疲劳裂纹。



(a) A线路



(b) B线路

图 20 滚动接触疲劳指数比较

由图 20b 可知, 对于 B 线路, 半径 1 000 m 曲线的车轮表面疲劳指数均为负值, 半径 600 m 曲线的车轮表面疲劳指数部分为正值, 表明车轮在半径 600 m 曲线上形成滚动接触疲劳裂纹的可能性稍大于半径 1 000 m 曲线。半径 600 m 曲线内轨, 随着车轮运行里程增大, 车轮表面疲劳指数逐渐增大, 运行里程大于 15.2 万 km 后, 车轮表面疲劳指数由负值转为正值, 长期作用下发生滚动接触疲劳裂纹的可能性增大。

相同曲线条件下, B 线路车轮的表面疲劳指数明显小于 A 线路, 说明 B 线路车轮形成疲劳裂纹的可能性小于 A 线路。

#### 5 结论

本文对国内某两条高速铁路上运行的相同平台动车组车轮磨耗进行了现场跟踪测试, 对比分析了车轮磨耗、轮轨接触关系演变规律, 以及不同轮轨匹配对车辆动力学性能和轮轨接触损伤的影响, 主要研究结论如下。

(1) A 线路车轮磨耗随运营里程增大呈现近似线性增大趋势, 车轮平均磨耗速率为 0.05 mm/万 km; 车轮主要以踏面磨耗为主, 踏面磨耗分布在 -20~30 mm 范围内, 呈现凹形磨耗。B 线路车轮在 11.3 万 km 之前磨耗速率约为 0.022 mm/万 km,

11.3 万 km 之后车轮磨耗速率增大到 0.025 mm/万 km; 踏面磨耗分布在 -35~50 mm 范围内, 踏面中部磨耗分布范围较宽, 磨耗分布较均匀。两条线路不同的轮轨磨耗特征主要受钢轨廓形差异和薄轮缘车轮外形影响。

(2) A 线路轮轨匹配等效锥度增大速率约为 0.006/万 km; 接触点逐渐向钢轨轨肩处靠拢, 存在明显跳跃现象。B 线路在一个镟轮周期内的等效锥度稳定在 0.03 左右, 没有明显的增大趋势; 轮对横移量在  $\pm 10$  mm 以内, 轮轨接触点始终保持车轮踏面中部与钢轨轨顶中部接触。

(3) 镟轮周期内, 随着车轮磨耗的逐渐增大, 两条线路的车辆直线运行性能、曲线通过性能的各项指标有一定程度的差异, 但均满足安全限值要求。对于半径 1 000 m 和 600 m 曲线, A 线路车轮表面疲劳指数明显大于 B 线路, 说明 A 线路车轮形成疲劳裂纹的可能性大于 B 线路。

(4) 测试期间, 两条线路的动车组车轮镟修周期均控制在 22 万~25 万 km, 对于 B 线路, 车轮踏面磨耗均匀, 等效锥度没有明显的增大趋势, 车辆动力学性能无明显恶化, 车轮发生滚动接触疲劳裂纹的可能性亦较小。因此, 对于此类车轮磨耗形式, 在一定监控措施、防止出现低锥度异常振动的条件下, 可适当延长动车组车轮镟修周期, 以延长车轮使用寿命, 降低动车组运用维护成本。

## 参 考 文 献

- [1] 钱铭, 吕晓春, 黄成荣. 机车车辆造修一体化的思考[J]. 中国铁路, 2020(10): 1-8.  
QIAN Ming, LÜ Xiaochun, HUANG Chengrong. Reflection on manufacturing and repair Integration of locomotive & car[J]. China Railway, 2020(10): 1-8.
- [2] 胡华锋, 杨国涛. 我国高速铁路轮轨关系研究现状及创新发展规划[J]. 中国铁路, 2017(11): 1-9.  
HU Huafeng, YANG Guotao. The research status and innovation planning of China high-speed railway wheel-rail interaction[J]. China Railway, 2017(11): 1-9.
- [3] 董孝卿, 王悦明, 王林栋, 等. 高速动车组车轮踏面镟修策略研究[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(1): 88-94.  
DONG Xiaoqing, WANG Yueming, WANG Lindong, et al. Research on the reprofiling strategy for wheel tread of high-speed EMU[J]. China Railway SCIENCE, 2013, 34(1): 88-94.
- [4] KALAY S, WU H. The Formation of hollow-worn wheels and their effect on wheel/rail interaction[J]. Wear, 2005, 258(7-8): 1179-1186.
- [5] 黄照伟, 崔大兵, 杜星, 等. 车轮偏磨对高速列车直线运行性能的影响[J]. 铁道学报, 2013, 35(2): 14-20.  
HUANG Zhaowei, CUI Dabing, DU Xing, et al. Influence of deviated wear of wheel on performance of high-speed train running on straight tracks[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(2): 14-20.
- [6] CUI Dabin, LI Li, WANG Hengyu, et al. High-speed EMU wheel re-profiling threshold for complex wear forms from dynamics viewpoint[J]. Wear, 2015(338/339): 307-315.
- [7] 孙宇, 朱胜阳, 翟婉明. 车轮踏面凹形磨耗对轮轨相互作用的影响研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(4): 109-116.  
SUN Yu, ZHU Shengyang, ZHAI Wanming. Influence of tread hollow-worn wheel on wheel/rail interaction[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(4): 109-116.
- [8] WU H, KALAY S, TOURNAY H. Development of the wheel-rail interface management model and its applications in heavy haul operations[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2011, 225(1): 38-47.
- [9] 吴娜, 曾京. 高速车辆轮轨接触几何关系及车轮磨耗疲劳研究[J]. 中国铁道科学, 2014, 35(4): 80-87.  
WU Na, ZENG Jing. Investigation into wheel-rail contact geometry relationship and wheel wear fatigue of high-speed vehicle[J]. China Railway Science, 2014, 35(4): 80-87.
- [10] 黄彩虹, 罗仁, 曾京, 等. 系统参数对高速列车车轮踏面凹陷磨耗的影响[J]. 交通工程运输学报, 2016, 16(3): 55-62.  
HUANG Caihong, LUO Ren, ZENG Jing, et al. Effect of system parameters on tread-hollow wear of high-speed train wheel[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2016, 16(3): 55-62.
- [11] KARTTUNEN K, KABO E, EKBERG A. numerical assessment of the influence of worn wheel thread geometry on rail and wheel deterioration[J]. Wear, 2014, 317(1-2): 77-91.
- [12] 陆文教, 陶功权, 王鹏, 等. 地铁车轮磨耗对轮轨接触特性及动力学性能的影响[J]. 工程力学, 2017, 34(8): 222-231.  
LU Wenjiao, TAO Gongquan, WANG Peng, et al. Influence of wheel wear on wheel-rail contact behavior and dynamic performance metro vehicle[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(8): 222-231.
- [13] WANG Jianbin, SONG Chunyuan, WU Pingbo, et al. Wheel reprofiling interval optimization based on dynamic behavior evolution for high speed trains[J]. Wear, 2016(366/367): 316-324.

- [14] 谢清林, 陶功权, 王鹏, 等. 高寒动车组车轮磨耗演变特性及其影响分析[J]. 工程力学, 2019, 36(10): 229-237.  
XIE Qinglin, TAO Gongquan, WANG Peng, et al. Wheel wear evolution characteristics of alpine high-speed EMU and analysis of its influence[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(10): 229-237.
- [15] 侯茂锐, 刘丰收, 胡晓依, 等. 我国典型高速铁路轮轨型面变化及匹配特性[J]. 中国铁道科学, 2020, 41(4): 99-107.  
HOU Maorui, LIU Fengshou, HU Xiaoyi. Typical wheel-rail profiles change and matching characteristics of high-speed railway in China[J]. China Railway Science, 2020, 41(4): 99-107.
- [16] 金学松, 赵国堂, 梁树林, 等. 高速铁路轮轨磨损特征、机理、影响和对策-车轮踏面横向磨耗[J]. 机械工程学报, 2018, 54(4): 3-14.  
JIN Xuesong, ZHAO Guotang, LIANG Shulin, et al. Characteristics, mechanisms, influences and counter measures of high speed wheel/rail wear: Transverse wear of wheel tread[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(4): 3-14.
- [17] International Union of Railways. UIC Code 519 Method for determining the equivalent conicity[S]. 1st ed. Paris: International Union of Railways, 2004.
- [18] 侯茂锐, 胡晓依, 王成国. 转向架失稳的非线性计算方法研究[J]. 铁道机车车辆, 2011, 31(4): 49-52.  
HOU Maorui, HU Xiaoyi, WANG Chengguo. Study of non-linear methods of bogie instability[J]. Railway Locomotive & Car, 2011, 31(4): 49-52.
- [19] 国家铁路局. TB 10621-2014 高速铁路设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2014.  
National Railway Administration of the People's Republic of China. Code for Design of High Speed Railway: TB 10621-2014[S]. Beijing: China Railway Publishing House Co., Ltd, 2014.
- [20] SHEVTSOV I.Y, MARKINE V.L, ESVELD C. Design of railway wheel profile taking into account rolling contact fatigue and wear[J]. Wear, 2008, 265: 1273-1282.
- [21] 国家市场监督管理总局. 机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范: GB/T 5599—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.  
State Administration for Market Regulation. Specification for Dynamic Performance Assessment and Testing Verification of Rolling Stock: GB/T 5599—2019[S]. Beijing: China Quality and Standards Publishing & Media Co., Ltd, 2019.
- [22] EKBERG A, KABO E, ANDERSSON H. An engineering model for prediction of rolling contact fatigue of railway wheels[J]. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 2002, 25(10): 899-909.
- [23] 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): 45-50.  
HOU Maorui, WANG Weidong, CHANG Chongyi, et al. Study on rail wear and wear reducing measures of small radius curve of rolling stock depot[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(3): 45-50.

---

作者简介: 侯茂锐(通信作者), 男, 1985 年出生, 博士研究生, 副研究员。主要研究方向为铁道机车车辆动力学及轮轨关系研究。

E-mail: houmaorui@126.com