DOI: 10.3901/JME.2020.16.118

高速列车车轮多边形磨耗、机理、影响和对策分析*

金学松¹ 吴越¹ 梁树林¹ 温泽峰¹ 吴兴文² 王平³

(1. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室 成都 610031;

2. 西南交通大学机械工程学院 成都 610031;

3. 西南交通大学土木工程学院 成都 610031)

摘要: 简要地介绍我国高速列车车轮技术研究现状和应用情况, 提出它们服役过程中出现的影响列车运行品质、安全运营和运输成本的几个主要问题, 主要关心的是高速车轮非圆化或车轮多边形磨耗问题, 简单介绍国内外对车轮多边形磨耗的研究现状以及对策。总结分析我国高速车轮多边形磨耗情况和特征, 其显著特征是车轮多边形磨耗凸显了 2~3 主波长的不均匀磨损, 主要为偏心磨损(1 阶)以及 14~23 边(14~23 阶)磨损。确立车轮多边形磨耗诱发和快速发展的基本条件, 发现在轮径变化的几个特殊阶段, 如果满足这一基本条件的话, 车轮多边形磨耗易快速发展。给出并简单讨论多边形磨耗对车辆行为、轮轨附件冲击载荷、振动噪声和疲劳的影响。仔细讨论影响车轮多边形形成和快速发展的基本因素。论述若干种抑制多边形发展的对策, 部分对策已经被现场运营经验所证明是十分有效的。提出多边形车轮维修策略和目前关键亟待开展的研究问题。
关键词: 高速列车; 车轮; 多边形磨耗; 轨道; 成因; 共振

中图分类号: U211

Characteristics, Mechanism, Influences and Countermeasures of Polygonal Wear of High-speed Train Wheels

JIN Xuesong¹ WU Yue¹ LIANG Shulin¹ WEN Zefeng¹ WU Xingwen² WANG Ping³

(1. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031;

2. Mechanical Engineering College, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031;

3. Civil Engineering College, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)

Abstract: Briefly introduces the current situation of techniques and applications of China's high-speed train wheels, and the several major problems influencing the operation quality, safe operation and transportation costs of high-speed trains. In these problems the most concerned one is the wheel out of roundness or called polygonal wear of wheel. The domestic and foreign researches the polygonal wear and its countermeasures are briefly reviewed. The situation and characteristics of polygonal wear of high-speed wheels of China are clearly classified and its characteristics shows that the polygonal wear includes 2 to 3 main wavelengths, they are respectively the eccentricity wear (called one-order polygonal wear), 14-order and 23-order polygonal wear (called high-order polygons). A basic condition for the initiation and fast development of the polygonal wear is established. It is found that in several special stages of wheel diameter change the polygonal wear develops fast if the basic condition is satisfied. The effects of the polygonal wear on the dynamical behavior and noise of high-speed vehicle, the impact load of wheel/rail, and the fatigue of the parts are discussed briefly. The basic factors affecting the formation and rapid development of wheel polygons are discussed in detail. Several countermeasures to suppress the development of the polygonal wear are discussed, and some of them have been proved to be very effective in field operation experience. The paper also puts forward the maintenance strategy of the polygonal wear wheel and the key research problems that need to be carried out urgently at present.

Key words: high-speed train; wheel; polygonal wear; track; mechanism; resonance

* 国家自然科学基金(U1734201, 51805450)和西南交通大学博士研究生创新基金资助项目。20191230 收到初稿, 20200505 收到修改稿

0 前言

车轮是轮轨铁路运输系统的关键部件。它与钢轨的滚动接触作用和引起的各种形态磨损, 直接关系到列车运行品质、安全以及运营成本。对它材料特性和几何形状的选择, 需要充分地考虑到钢轨材料特性和几何特性、车辆轨道结构参数、线路状态、运营状态(尤其运营速度)、运营维修能力和策略。不同线路运营状态、列车车型以及速度等级, 会导致车轮磨耗特征不同。对铁路车轮磨损的研究, 具有大量的文献报道。这些研究归纳起来主要有以下几个方面: ① 车轮材料选用和改进。车轮材料的选用综合考虑材料本身的两个性能指标, 硬度指标和韧性指标, 较高的硬度指标可以有效地提高车轮的抗磨损能力, 但其韧性相对下降, 则抗疲劳能力也会下降, 这是目前希望同时改善车轮两个性能指标时存在的难以解决的矛盾^[1]。同时, 在提高车轮材料抗磨损能力时, 需要考虑钢轨材料特性, 这方面的研究和解决办法涉及到轮轨系统疲劳和磨损综合抑制过程, 以及车辆轨道系统运营维修成本等系统工程问题。全世界高速铁路和普速铁路所采取的轮轨材料硬度匹配比, 不同的地区和不同的时间都不完全相同^[2]。中国铁路专家在中国高铁十多年的大规模运营过程中, 希望找到轮轨材料最佳硬度匹配方案^[3], 根据高速轮轨磨耗和疲劳特点及状态, 建议适当提高高速车轮材料的硬度。② 几何特性改进^[4]。几何特性是指车轮的几何尺寸和踏面廓形, 它们的确定不仅考虑列车的速度等级、车辆悬挂参数、轨道的几何参数, 还考虑到抗磨损抗疲劳能力的提高和运营维修周期的延长。在这方面, 中国铁路专家目前积累了较丰富的经验, 基本掌握了车轮几何参数和踏面优化设计方法、踏面磨耗规律与车辆行为的关系, 成功设计了中国 350 km/h 标准动车组新型车轮踏面并在运行试验中获得了成功^[5], 新型车轮踏面的优点是能够经历较长时间运行后, 不因踏面凹坑磨耗而引起踏面等效锥度随里程增加而迅速增加, 使车辆在长期高速运行条件下保持较高的平稳性。③ 车辆参数优化。车辆参数(主要指悬挂参数)优化通常是在车轮踏面或几何参数确定之后再进行的, 其能够保证车轮踏面在一个较长的镟修周期内(或较长的运营里程内), 不因轮轨滚动接触磨损改变了踏面廓形, 而降低车辆高速运行平稳性。④ 轨道几何参数和特性。目前对一个国家和地区, 线路标准往往基本统一或其几何参数物理参数

是预先确定的, 在服从这个前提下, 车辆悬挂参数和车轮几何参数做到统一优化设计, 系统地进行合理匹配, 中国高铁动车组基本是按照此思路做到了成功设计和运用^[4,6]。⑤ 运营条件的改善(含维修和润滑)。在前面所讨论的四个方面的工作开展后, 仍然不能满足高速列车在低速和不同线路特征(直线、小半径曲线、道岔、钢轨磨耗状态不同等)和环境下仍然具有优良的运行品质时, 通过合理钢轨轨头修形(打磨)、小曲线轨头润滑措施来弥补前面步骤无法考虑到的缺陷^[7-8]。上述的研究工作主要针对过去高速列车车轮踏面不适当的磨耗而带来的一系列问题。

我国高速铁路大规模运营以来, 车轮磨耗特征主要表现为踏面横向和周向不均匀磨耗。

(1) 在踏面横向不均匀磨耗方面, 主要存在车轮踏面凹坑磨耗和轮缘磨耗, 对于车轮踏面凹坑磨耗, 易导致列车 7~10 Hz 低频晃动, 这个问题机理已基本弄清了, 相应的有效措施也逐步实施^[9]; 对于轮缘磨耗, 主要是在高速列车通过小半径弯道进入车库时, 由于轮缘轨角严重摩擦作用导致轮缘严重磨耗, 使得车轮镟修量加大, 车轮使用寿命缩短。

(2) 车轮圆周方向不均匀磨耗较为普遍, 不均匀磨耗深度到某一阶段后, 导致轮轨之间高频冲击振动, 引起列车轨道大系统较宽带频带的强烈的振动和强烈的噪声^[10-13]。新线钢轨初期脱碳打磨产生了初期波浪形磨损和焊接头不平顺^[14], 也引起轮轨之间不可忽视的冲击振动和噪声, 轮轨振动引起车辆系统的共振, 此共振波长能够等分车轮滚动圆的周长时, 也可能加速车轮非圆化磨耗。

其实, 车轮滚动圆上非圆化磨耗现象广泛存在于铁路运输现场。20 世纪 90 年代德国 ICE 高速列车车轮出现了多边形磨耗, 其多边形磨耗以偏心(一阶)、椭圆(二阶)、三角形(三阶)、六边形(六阶)磨耗为主, 多边形磨耗的阶数一般低于 10 阶, 引起列车和轨道之间发生强烈的冲击^[15]。几年前, 我国广州地铁直线电机列车车轮出现了严重的九边形磨耗, 引起列车轨道强烈的振动和噪声, 导致列车许多零部件疲劳断裂和轨道扣件弹条断裂^[16]。最近我国高速列车和谐号电力机车大部分车轮出现了罕见的高阶多边形磨耗, 阶数分布在 15 阶(15 边)到 23 阶(23 边)^[17]。这是我国轨道交通运营以来遇到的难以解决的最大难题之一。

国内外对车轮多边形形成机理的研究不像对钢轨波磨形成机理的研究那么系统深入广泛, 研究的

历史也不长,没有形成理论体系,尚未达成共识。因为过去,很多列车(车速较低)车轮多边形磨耗不严重或没有发现,也并没有引起重视。车轮沿滚动圆不均匀磨耗包含了若干个多边形磨耗,即不同阶数(边数)多边形组合,它们各自的磨耗幅度(即波深)随着阶数(或边数)的增加而呈下降趋势,它们的重叠形成车轮的失圆磨耗程度并不严重。因而,引起轮轨的冲击振动不像钢轨波浪形磨损引起的冲击破坏那么严重。但是,最近高速列车车轮圆周上非均匀磨耗特征主要表现为单个波长、较高的阶数(边数)和较大的磨耗深度,2~3个谐波磨损组合成的多边形磨耗较为普遍,在高速运行条件下,车轮多边形磨耗引起的轮轨强烈的冲击振动和噪声,导致车辆许多关键零部件疲劳断裂,不仅影响乘坐舒适度,而且危及高速列车安全运营。

国内外也有不少学者主要从理论方面对车轮多边形磨耗形成机理和对策开展了工作,认为主要存在以下几个方面的机理:①轮轨滚动接触作用导致轮轴的共振和车轮节径模态振动而引起轮轨力/率的周期变化,而使车轮形成多边形磨耗^[16];②车轮非圆化磨耗中部分波长的多边形磨耗与轨道反共振有关,部分与轮轨耦合系统的P2共振有关^[18];③与轮对偏心、安装方式以及闸瓦制动引起的踏面材料磨损有关^[19]。

上述讨论的相关文献的研究结论对车轮多边形磨耗机理的认识较为分散,有些认识相对浅显,有些观点带有主观猜测的意识。这就难以对车轮多边形形成和发展采取有效地抑制措施。西南交通大学牵引动力国家重点实验室相关研究人员,对我国高速列车非圆化磨耗状态连续跟踪了5年多,从其发生发展的全面演化过程测试分析了车辆振动特性和轨道状态的变化及其振动特性,发现转向架结构(含轮对)被激发出的共振、车轮直径变化(因磨损和镟修在不断减小)的特定阶段以及车辆运营速度这三个常量,在它们满足一定条件时,就会出现车轮多边形的高速发展时期。所以,需要控制结构易被激发的共振特性或轮径尺寸或运营速度来破坏它们满足多边形快速发展的条件,才能有效地控制车轮多边形发生和快速发展。所以,彻底弄清和完全解决此问题仍然需要努力和时间。需要建立车辆轨道耦合大系统刚柔耦合模型与轮轨滚动接触摩擦磨损相结合的分析模型,来揭示车轮多边形磨损与大系统振动以及系统激励因素(轮轨表面激励、传动系统激励、制动系统激励、系统自激励、振动相位和车轮周期不均匀磨损之间关系)之间的内在关系,并对关键影响因素进行广泛的现场试验验证。

1 高速车轮多边形磨耗和特征分析

2008年,我国第一条运行速度在每小时340 km以上的京津城际高速铁路开通。到目前为止,我国列车运营速度在每小时200 km线路总长2.5万 km以上。近几年来,新修建的高速铁路主要是无砟轨道,且以桥梁为主,线路修建标准高,运营的多种高速列车车型采用了世界最先进的技术。这是经历了引进、吸收、消化、再创新已至完全自主化的全过程。列车具有优秀的动力学品质,高速运行准时、安全、平稳和舒适,受到全国乃至全世界乘客高度赞赏。无砟轨道结构力学一个显著的特性就是刚度大于有砟轨道的支撑刚度,导致轮轨滚动接触刚度大,在轮轨粗糙度激励和高速运动情况下,轮轨激励频带宽,能量大,容易激发列车轨道大系统耦合共振。高速列车另一个运行特点就是连续运行时间长,以恒定的运营速度在长运营区间内运行,高速车轮圆周向非均匀磨损速率高。

图1表示我国高速列车早期运营时车轮的(2008~2013)几种典型的非圆化磨耗测试结果,用极坐标表示,垂向坐标表示不均匀磨耗深度,单位是mm,图中两条曲线表示名义滚动圆附近相距10 mm间距的车轮圆度测试结果。图1a显示了圆度偏心磨耗,定义为一阶磨耗,图1b所示的车轮圆周非均匀磨耗主要包含了三角形磨耗(三阶)和高阶(或小波长磨耗),图1c表示了车轮滚动圆局部偏磨,图1d表示不规则磨耗。

图1所示的磨损状态对列车高速运行状态下轮轨冲击和系统噪声并不显著。但用极坐标描绘它们还不能清晰表示非圆化的信息和特征。图2表示某车轮非圆化磨耗极坐标表示的测试结果(图2a)和各阶谐波磨耗对总非圆化不规则磨耗的贡献谱图

图 1 高铁车轮早期典型的圆周非圆化磨耗测试的极坐标表示的结果(2008~2013)

(图 2b)。从图 2a 看, 此高速车轮非圆化磨耗主要包含偏心(一阶)和三角形磨耗为主, 但是经过谐波分解分析, 如图 2b 所示, 不仅包含了偏心和三角形磨耗, 还包含了 13 边形磨耗和 20 边形磨耗。图中虚线表示车轮圆度粗糙度峰值的限值, 偏心磨耗、三角形磨耗、11~13 阶和 20 阶多边形磨耗的幅值超

出了图中虚线。

图 2 车轮非圆化磨耗实测结果

图 3 为数百个车轮非圆化磨耗测试结果的统计, 测试统计结果显示了 96% 的车轮发生偏心磨损, 其次谐波磨损所占的比例分别是 11 阶(边)的 69%、6 阶的 58%、三阶的 35%。由于当时多边形磨损现象并不十分严重, 统计分析时未考虑到了更高阶多边形磨损的信息。

图 3 车轮非圆化磨耗各阶谐波磨耗所占比例数

图4a和4b为镟后运营里程14万 km、27万 km和40万 km时,两个车轮非圆化磨耗测量结果的对比。发现一旦非圆化磨耗形状形成,在后续的里程不断增加过程中,非圆化磨耗模式基本相似或接近。

图4 运营里程分别为14万 km、27万 km和40万 km两个车轮非圆化磨耗测量结果的对比

图5表示在车轮非圆化磨损发生后,选镟前和镟后车轮沿圆周材料硬度变化情况做对比分析。显然,材料硬度沿滚动圆分布规律与非圆化磨损不规则峰谷分布相似,即不规则磨损的峰值处硬化较高,波谷处情况相反。镟修后情况类似,说明非圆化磨损引起的轮轨接触冲击再引起材料的工作硬化,已经影响到车轮次表面深度处的材料,深度1~2 mm。

近几年来(主要指在2014年以后),我国许多高速线路上列车车轮普遍出现了高阶多边形磨损。主要特征体现在单个波长或2~3不同波长的谐波磨损为主。图6为300 km/h速度的动车组(A)某车辆第二位轮对左右车轮多边形磨损测试结果,显示了

图5 非圆化磨损分布与车轮镟修前后硬度变化分布的对比

近似均匀的19个峰谷磨损,即19阶多边形磨损(典型单个波长多边形磨损)。车轮不圆度数据测试时的车轮平均半径大约864 mm,镟修运营里程212 234 km,最高运行速度300 km/h,谐波磨损的最高通过频率大约是583 Hz。图6所示了一个极端奇异磨耗现象,在列车高速运行条件下,轮轨之间的作用具有较强的随机性,影响的随机因素也很多,但沿车轮滚动圆不均匀磨损相当有“规律”。图6的结果也显示了车轮具有一定的偏心磨损。

图6 某型高速列车(A)车轮谐波磨损实测结果

图 7a 为 300 km/h 动车组(B)28 个车轮的非圆化磨损测试结果的谱图。在测试时, 轮对镟后运行里程约为 112 446 km, 车轮踏面圆周非均匀磨耗主要表现为几何偏心、17~18 阶多边形磨损现象。17 阶多边形磨损严重的主要发生在动车轮上, 轮径约为 835 mm, 18 阶多边形磨损也发生在另一节动车的车轮上直径约为 850 mm。车轮多边形磨损的最高通过频率大约 580 Hz。图 7b 为 300 km/h 列车(C)部分被测试车轮的不圆度阶次图, 显示了 21~22 阶多边形磨耗为主, 测量时车轮直径范围为 904~919 mm。测试时新车轮刚投入服役阶段, 也是车轮在全生命周期的轮径最大阶段, 即滚动圆周长最大阶段, 显著多边形磨损边数最多, 但是波长几乎相同, 显然, 多边形越过频率接近 580 Hz, 也几乎不变。

图 7 某型高速列车(A)和(B)车轮谐波磨损实测结果

通过两高速列车车轮非圆化磨损测试统计分析, 可知车轮轮径在 915 mm、865 mm 和 835 mm 左右时, 为车轮多边形磨损是高发期, 其对应的多边形磨损的阶数分别是 17~18 阶, 18~19 阶和 21~22 阶。另外, 现场大量测试数据综合分析, 显示了动车车轮多边形磨损普遍比拖车车轮严重, 每节车

辆 1 和 4 位轮对多边形磨损深度普遍要比 2 和 3 位轮对的情况严重, 左右车轮多边形磨损形状和峰谷相位分布也不完全对称。其原因在后文将进一步阐述。

对上述所讨论车型的多边形磨损和其特征, 在其他高速线路上运营的不同类型高速车辆的轮对上, 也出现类似的现象和特征。同时也发现, 对易发生车轮多边形磨损(或发生和发展速度很高)的车辆, 改变其运营速度或实现“交路”(实际也是变速运行)运营, 车轮多边形发生和发展得到了有效地抑制。在有一种动力和非动力轮对混装的高速车辆上, 动力轮对安装在车辆的 2 和 3 轴位置而非动力轮对安装在同一车辆 1 和 4 轴位置时, 发现非动力车轮多边形磨耗普遍比动力轮对的多边形磨损稍严重。上述的现象的机理或根本原因将在后面做全面分析。

2 车轮多边形的影响分析

2.1 对车辆轨道耦合系统动态行为的影响

图 8a 表示某运行速度 300 km/h、轮径约为 830 mm 车轮, 在不同运营里程下测得的车轮圆周不平顺谱的分布图。从图所显示的结果看, 18 阶多边形发展迅速, 而车轮偏心(1 阶)在里程增加过程中其发展速率远远低于 18 阶多边形发展的速率, 运营里程到了 17 万 km 时(车轮镟修期限 25 万 km), 18 阶多边形深度或对车轮非圆化的磨耗的贡献超过偏心磨耗的贡献。图 8b 为对应的里程时的轴箱垂向加速度谱分布图。显然, 随著运营里程的增加和 18 阶多边形波深的增加, 轴箱垂向加速度在 583 Hz 附近的幅值(峰值)迅速增加, 17 万运营里程时车轮多边形引起轴箱加速在 583 Hz 处的峰值大约是刚镟修后相应振动幅值的 20 倍, 如此大的振动幅值和如此高振动频率, 对轴箱轴承等关键部件疲劳寿命问题应该如何重新估算和评价, 是值得认真考虑的一个重大工程科学问题和亟待解决的难题。

观察图 8a 和 8b, 当运营里程达到 17 万 km 时, 图 8a 中除了在 1 阶(32 Hz)和 18 阶(583 Hz)处凸显峰值外, 也存在 8 阶、12 阶和 29 阶多边形磨耗, 对应的振动频率分别为 256 Hz、384 Hz 和 928 Hz。

图 9a 表示运行速度 250 km/h 的某高速列车多边形磨耗车轮镟修前后极坐标表示的多边形图, 镟修前图中显示了 23 个峰谷值并叠加严重的偏心磨耗。利用高速车辆轨道耦合动力学模型和相应的数值程序, 分析计算了镟修前后车轮粗糙度激励下的

(a) 某动车组车轮不同里程不圆度测试

图8 某动车组车轮多边形磨耗及轴箱振动测试结果

轮轨正压力变化,如图9b所示。由于多边形波深较大的差异和偏心磨耗(一阶多边形磨耗)的并存,导致如图9b所示的轮轨正压力的变化,正压力最大变化的幅度约是静载荷的两倍,由图9a中所示的较大波峰激发出来。正压力最小波动的幅度是静载荷的20%,发生在图9a所示的波峰11~15与钢轨发生冲击时刻。

(a) 某动车组车轮7万km里程不圆度测试阶次图

图9 某动车组车轮多边形磨耗测试结果及轮轨力计算结果

2.2 对车辆轨道耦合系统零部件疲劳断裂的影响

车轮高阶多边形磨耗达到一定程度后,轮轨之间高频附加动载荷如图9b所示,系统振动加速度如图8b所示,车辆和轨道系统零部件对会加速疲劳破坏。图10表示车轮多边形磨损严重阶段引起车辆轨

图10 车轮多边形磨损引起车辆轨道系统零部件疲劳断裂

道系统零部件疲劳断裂情况。有些关键零部件疲劳断裂会对高速列车安全运营造成很大的威胁。所以, 在高速列车运营过程中, 需要密切关注车轮圆度状态, 通过智能监控和科学维修来控制多边形发展速率并及时消除多边形。

2.3 对车辆内部噪声的影响

图 11 为多边形车轮镟修前后, 车辆以 300 km/h 速度运行条件下车厢内测试噪声水平情况对比。显然, 多边形导致车内 200~8 000 Hz 内噪声水平增加 8~10 dB, 目前在低噪声设计技术和制造工艺方面很难做到对现有的高速列车车厢降噪水平再提高 8~10 dB。图 11 中所示的镟修前噪声曲线在约 33 Hz 处有尖峰, 那就是由车轮偏心磨耗(一阶多边形磨耗)引起的冲击噪声, 在 600 Hz 处具有最高噪声水平。镟修后的噪声水平曲线表示了在 125~4 000 Hz

图 11 多边形车轮镟修前后车内噪声水平测试数据对比

区间内噪声水平相对平坦, 也是噪声最高水平的区间, 可能是轮轨噪声的贡献最大的区间。

3 高速车轮多边形形成的机理和影响因素初步分析

3.1 车轮多边形磨损形成和快速发展的基本条件

几乎所有铁路列车车轮存在不同程度多边形磨损或非圆化磨损或不规则磨损, 也就是在车轮长期滚动接触、摩擦磨损和疲劳剥离过程中, 车轮滚动圆表面产生不均匀的变化, 即车轮滚动接触面不再是圆顺的。通常这种不圆顺或不规则包含了多个波长的不平顺(至少两个以上波长)。如果这样的不平顺主要由 1~3 不同波长的磨耗深度决定, 这样的非圆化的车轮在运营过程中将会引起轮轨之间的强烈冲击、车辆和轨道系统的强烈振动和噪声以及零部件的疲劳伤损, 不仅影响行车的舒适性而且影响行车的安全。如果车轮滚动接触表面不圆顺度不及时修理消除, 会进一步恶化。如果主要由 1~3 个不同波长的不均匀磨耗深度决定了车轮圆度非圆化状态(即轮径跳的幅度), 主要是车辆轨道系统共振(含轮轨系统)引起。

具有下列条件之一, 轮轨接触表面就能形成波浪形磨损或周期性磨损, 如图 12 所示。无论车辆系统发生共振(尤其是转向架部分), 还是轨道系统发生共振, 或者轮轨系统耦合共振(可能的 P2 共振), 都会引起轮轨力(尤其正压力)和轮轨蠕滑率的波动。

图 12 形成车轮多边形磨损或多个波长磨损叠加的不均匀磨损的可能条件

如果当车轮的周长(或滚动圆周长)为上述讨论的系统所激发出的某一阶共振所对应的振动波长的整数倍数或近似整数倍数的话, 车轮多边形将以此波长高速发展。这个振动波长不仅决定于被激发出的共振频率的大小, 还决定列车的运行速度。列车车轮在全生命周期里, 因磨损和镟修其半径不断在缩小, 在一定的周长阶段(或轮径阶段), 很容易满足上述条件, 即轮的周长为系统共振所对应的振动波长的整倍数或近似整倍数时, 是车轮多边形磨耗的高速发展时期。也有可能同时为两个以上不同频率的共振所对应不同波长的整倍数或近似整倍数,

多边形的磨耗就会显示了多个不同波长的磨损叠加, 如图 13 所示。该图为轮径 860 mm、速度为 250 km/h 的动车组多边形磨损车轮镟修前后测得的圆度不规则谱图。显然, 在峰 A 处, 为车轮偏心磨损(也称一阶多边形磨损), 由车轮原始几何偏心或质量偏心或镟修加工偏心等引起。在峰 B 处, 为 14 边形磨损, 其对应振动频率大约 360 Hz。峰值 C 处为 23 边磨损, 对应系统的共振频率约为 590 Hz。此三处, 满足上述讨论的多边形高速发展的基本条件, 即轮周大约是三个振动频率对应的波长的整倍数。

图13 形成车轮多边形磨损或多个波长叠加的不均匀磨损

由于高速车轮严重的多边形磨耗主要特征是高阶多边形磨耗,且以单一波长磨损为主,滚动冲击频率(或通过频率)接近 600 Hz 左右,如果是车辆系统共振所致,那应该是来自车辆转向架结构(含轮对)的共振,轨道系统的共振所致可能性较小,论文下面将进一步讨论引起多边形磨损共振源头。与钢轨波磨形成的条件相比,引起高速车轮高阶多边形磨损条件相对苛刻,许多现场试验和理论分析研究已经证明了钢轨波磨特性(波长和发展速率)与轨道共振特性相关(结构参数),一旦某处波磨形成,波深逐渐加大,波长基本固定,波磨区域沿钢轨不断向前扩展^[20]。但是对车轮高阶多边形磨损,它发生车轮滚动圆一周长度之上,车轮滚动时循环性反复碾压,每滚动一周轮轨振动相位的差异影响到多边形成型或发展速度,周期性的振动在车轮每滚动一周时,如其相位相同或接近的话,这多边形磨耗发展速度快,否则发展速度慢。实际控制振动在车轮滚动每一周相位时,只要控制振动波长与车轮滚动圆的整倍数的关系时,就能有效控制车轮高阶多边形的发展速度。

图 14 所示的列车运营速度为 300 km/h,在车轮轮径寿命周期 920~830 mm 变化过程中,在 581 Hz 系统共振频率导致轮轨振动波长为约为 143.4 mm 时,这样波长的振动导致该高速车轮全寿命周期里,有三个不同周长约为其振动波长的整倍数,它们对应车轮的直径分别为 915 mm、875 mm 和 830 mm。在此三个轮径阶段,车轮多边形磨损的阶数分别是 20 阶、19 阶和 18 阶。其他轮径阶段车轮相应的周长都不是振动波长 143.4 mm 的整倍数。也就是车轮在服役期间,按此固定频率振动或按此波长磨损车轮圆周时,车轮每滚动一周时周期磨损在圆周相同位置是不重复的,或相位不同,由此而导致多边形磨损不严重或发展较慢,也就是每

一周的不均匀磨损相互叠加时,相互之间具有一定的抵消作用。

图14 车轮全寿命周期里三个不同轮径多边形磨损三高发期

3.2 轨道特性的影响

列车在高速运行中车辆轨道系统共振是正常现象,如在一定速度条件下某个共振频率(或相应的振动波长)或若干共振频率满足上述多边形磨耗形成的条件时,就能导致车轮多边形磨耗的高速发展。现在有争议的问题是产生易导致多边形磨耗的系统共振是来源于车辆系统还是轨道系统还是它们耦合作用的结果。图 15 为刚刚投入运营的时速 250 km 线路频响特性图。新型城际动车在此线路上进行运营考核试验 7 万多 km 时,整列车车轮就发生了严重的多边形磨损,如图 9 和图 13 所示。对列车试验线路固有振动特性进行了现场试验,图 15 中上图就是钢轨轨头在轨枕上方和轨枕之间以及轨道板垂向激励垂向响应的频响特性,显然,280 Hz 附近的振动峰值代表轨道板与钢轨一起的相对低频的弯曲振动,如图 15 中右下方所示的轨道板底部弯曲振型;400~1 000 Hz 代表钢轨相对轨道板的相对高频的弯曲振动,如图 15 中左下方图中上部钢轨弯曲振型,大约 1 015 Hz 最高峰值表示钢轨的 Pinned- pinned 共振模型,图 15 中右下方钢轨的一种特殊振型,波长为两个枕距,轨枕处为零节点,轨枕中间为振型的最大幅值点处。从此图看,显然在 581 Hz 附近没有特别显著的峰值。

当将列车车轮镟修后,即车轮产生的多边形(图 9 和图 13)被消除后,列车高速通过此段线路时,钢轨轨头瞬态响应频域特征如图 16 所示,显然,轨道在 591 Hz 附近没有显著的响应峰值,也就是说,正常圆度的车轮通过此线路时,轨道并没有被激发出使车轮产生如图 9 和图 13 所示多边形磨耗激励频率的共振。图中约 750 Hz 峰值由钢轨波浪形磨损

激励引起的,如图 17 所示,左图为现场新线钢轨因去脱碳层氧化层打磨后的照片,右侧是钢轨打磨后测量所得的不规则图,显然具有深度很浅(约

0.01 mm),波长为 60~75 mm。在同样线路其他形式轨道板轨道结构也做了同样的试验分析,出现的情况类似。

图 15 车轮多边形严重磨损的高速试验线试轨道频响特性

图 16 多边形车轮镟修后(或无多边形磨损影响)列车通过时轨道瞬态响应

图 17 新线钢轨打磨后粗糙度情况

另外,在另一条时速 300 km 且运营 6 年的线路上,当列车车轮轮径磨耗到 915 mm、870 mm 和

835 mm 左右时,分别出现了严重的大约 20 阶、19 阶和 18 阶多边形磨损,对线路作了详细调查,也得到类似的结论,考虑篇幅限制,相关结果此处省略。所以,到目前已掌握数据,可以证明导致车轮多边形磨损的共振源不应该属于轨道结构,应该从车辆结构动态特性做深入仔细的调查。但是,轨道结构不平顺可能导致车辆结构产生与多边形磨损相关的共振。

3.3 车辆转向架特性的影响

轮轨不平顺(正常随机不平顺、轮轨擦伤、车轮不圆或偏心、钢轨焊接接头、钢轨波磨等)将会引起车辆或轨道结构共振,上述调查发现正常车轮(没有多边形磨损)通过轨道时,轨道没有产生与多边形磨损相关共振。而车辆转向架是我们关注的重点。图 18 为产生严重多边形磨损(图 9 和图 13)的新型城际动车转向架构架振动频谱图,此时,车轮的多边形被磨损已经通过镟修完全被去掉了。从图 18 看,构架有多个振动峰值,其中在多边形频率振动(581 Hz)最靠近的峰值频率(579 Hz),并且在这个频率处,构架的振动峰值接近轴箱的振动峰值。

图 19 表示轴箱垂向加速度时频图,左侧垂向坐标表示列车加速时间的增长,列车试验速度从 20 km/h 增加 250 km/h,右侧垂向坐标轴表示加速度幅值,横坐标表示频率,图中显示了几个亮的光带,在大约 45 Hz、370 Hz、450 Hz、580 Hz、730 Hz

图 18 车轮镟修后转向架若干部位垂向振动加速度频谱图

和 790 Hz 处光带不随列车速度的变化而变化,说明它们在些频率处的强烈振动是转向架结构的固有频率共振。在速度 250 km/h、轮径大约 860 mm 条件下,在 370 Hz(波长为 188 mm)处发生共振,此刻车轮滚动圆的周长为其振动波长的整倍数,易对车轮造成约 14 边形的磨损,如图 13 中的峰值 B 所示;在 580 Hz 发生的共振,就导致了车轮 23 阶多边形的磨损,如图 13 中峰值 C 所示,此频率处光带较亮,振动幅值大于 370 Hz 处的共振幅值,由此而导致车轮多边形磨损深度也大于 370 Hz 处共振的磨损幅度,如图 13 中两个峰值(B 和 C)所示。这样的话,车轮 23 边形磨损波峰至波谷的深度大,车轮运行时刻不仅其冲击频率高,而且附加载荷大,导致列车和轨道系统强烈的振动和噪声,加速相关零部件振动疲劳。

图 19 车轮镟修后车辆时速 250 km 试验测得转向架轴箱垂向振动加速度时频谱图

这些共振源产自哪个部件需要进一步调查。图 20 为车轮产生严重多边形磨损的列车转向架有限元模型和振型图^[11-12]。此模态频率约 580 Hz,其与图 18 和 19 的共振频率相对应,其中轮对和构架在 590 Hz 附近也具有显著模态,如图 21 所示,它

们应该是车轮 23 阶多边形磨损的根本原因。

3.4 其他影响因素

影响车轮多边形磨损发展除了与上述讨论的根本因素和基本条件相关外,还有许多值得我们考虑的因素。

图 20 车辆转向架有限元模型和 580 Hz 模态振型

图 21 轮对和构架在 590 Hz 附近的模态振型

(1) 轮轨随机粗糙度。轮轨随机粗糙度具有幅值小、波长(或越过频率)分布宽的特点, 从几毫米到几十毫米, 它引起的冲击频率范围跟车速密切相关。轮轨粗糙度引起轮轨振动具有宽泛的频率, 容易激发车辆结构(尤其转向架结构含轮对)共振或线路的共振, 尤其车辆结构被激发出的共振, 其频率如能按上述讨论的车轮多边形磨损形成的基本条件, 容易形成并加速多边形磨损发展。

(2) 车轮的偏心(质量偏心 and 几何偏心)和车轮擦伤。轮轨滚动过程中轮轨将会发生周期性冲击, 冲击周期等于车轮的滚动圆周长 πD , 即轮对滚动的角速度(每一秒转速 Ω_0)。图 22 表示车轮几何偏心引起轮轨周期冲击行为, 车轮质量偏心 and 扁疤引起轮轨冲击行为类似。

图 22 车轮偏心引起轮轨周期性冲击行为(车轮偏心和车轮扁疤引起的冲击行为类似)

由于轮轨连续滚动而发生的周期性冲击, 轮轨之间将会发生谐频冲击振动, 谐频振动频率分布为 $n\Omega_0$ ($n=1, 2, \dots, n$)。这种由低向高等间距峰值频率振动特征充分体现在车辆结构响应上。图 23 表示轮径为 860 mm 城际动车在做 200 km/h 速度级运

图 23 车轮几何偏心旋转激励下的转向架振动特性

营考核试验时, 转向架结构不同位置(横向)加速度频谱图, 图中显示了间隔约为 21 Hz 若干峰值, 这个频率就是速度 200 km/h, 轮径 860 mm 车轮滚动角速度 Ω_0 。调查分析图中那些峰值频率形成的原因, 此次试验前对多边形车轮进行了彻底镟修, 去掉了车轮上的高阶多边形, 但是, 由于不落轮对旋床工艺问题, 利用镟修几乎不能消除车轮的几何偏心(也叫一阶磨耗)。见图 13, A 处峰值(一阶磨耗)表示偏心或一阶磨耗的贡献量, 部分实线线条的峰值高度(镟后)高于虚线线条的峰值高度(镟前)。车轮几何偏心在滚动接触状态下导致轮轨之间发生了周期性滚动冲击, 形成车辆轨道结构谐频高频振动, 由此而

形成如图 23 所示振动特性。由于峰值的存在,尤其是在 580 Hz 附近的尖峰(如图所示的 582 Hz 处尖峰)将会激发车轮和转向架结构 580 Hz 共振而导致车轮多边形磨耗。图中所示的峰值较密(21 Hz 区间),范围较宽,也容易激发转向架而诱发多边形磨耗发展的其它频率的共振。所以,控制车轮几何偏心率对控制车轮多边形磨耗是十分重要的。

(3) 钢轨表面不规则形式中一种特殊的不均匀激励形式,即钢轨波磨的影响。钢轨波磨是否是导致车轮多边形波磨的直接或根本原因一直是许多人关心的问题。如果车轮滚动圆的周长约为钢轨波磨主波长的整数倍数时,且车轮永远在这样的波磨轨上做纯滚动,这是符合车轮形成多边形磨损的基

本条件的,如图 24 所示。但是,无论钢轨波磨的波长如何,任何一条线上波磨都是在某些特殊地段上发生的,如较小曲线半径段,不适合减振扣件段等,并且减振扣件的差异或轨道结构的差异,波磨的波长也不同^[21]。这样的话,一条线路上运营的列车车轮滚过不同区段或不同波长波磨线路段时,导致轮轨接触振动而牵引车轮滚动圆的不均匀的磨耗的波长是难以一致的,这样不同波长的不均匀磨损反复叠加在车轮滚动圆上,它们之间发生相互消除的作用,难以形成单一波长的多边形磨损或多边形磨损发展较慢。实际上也就是破坏了多边形磨耗形成的基本条件。

图 24 钢轨波磨导致车轮多边形磨损基本条件之一

钢轨波磨还有一个不易导致车轮多边形磨损的事实需要说明。对于一条线路上不同地段可能存在不同程度的波浪形磨损,即使波长一样(在同样轨道结构形式同样过车速度情况下),且波长能够平分或近似平分车轮滚动圆周长,也是不易导致车轮多边形形成和快速发展的。因为列车每天往返在同一条线路上(数千米甚至数千千米),也可能运营在不同区间的线路上,无论是动车轮还是拖车轮,每天都要经历了数十万次的重复轮轨滚滑作用(中间还要定期经历镟修过程),每一次滚过同一钢轨波磨段,轮轨接触点是难以重复的,或者说钢轨的波磨和车轮前面滚过一次因波磨导致的不均匀磨损相位难以峰谷重合,这样的累积磨损将会相互抵消,导致车轮多边形磨损是轻微的或不均磨损是随机的发展,且非常缓慢。文献[28]做了这样一个数值模拟分析,一个车轮每一次随机(轮轨接触位置、或车轮非均匀磨损相对波磨的相位)的滚过一段波磨钢轨,这里假设车轮轮径为 830 mm,列车运行速度为 300 km/h,钢轨波磨长为 144.9 mm,车轮滚动圆的周长是波磨波长的整倍数,考虑两种运行工况如图 25a 和 25b,图 25a 车轮滚过长为 L_0 波磨段钢轨,图 25b 车轮距波磨段的随机距离 x_i ($i=1, 2, 3, \dots, 50$, 正常钢轨段),

图 25 车轮越过波磨钢轨时磨耗计算方案

滚过长度 $L_0/50$ 波磨工况段, 随机地重复滚过 50 次, 与图 25a 滚过的波磨钢轨长度相同, 如图 25 所示。计算波磨对轮轨激振而导致车轮多边形情况, 如图 26 所示, 显然情况图 25a 比图 25b 多边形磨耗情况严重得多。因此, 钢轨波磨直接导致严重多边形磨耗或快速发展是难以实现的。

图 26 两种工况车轮多边形磨耗计算结果对比

(4) 钢轨特殊弯曲共振频率的影响。文献[22]的研究发现钢轨存在一个三阶弯曲共振, 如图 27 所示, 车辆转向架轴距 2.5 米, 几乎等于 4 个枕距, 这个对称的振型跨过 4 个枕距, 频率约为 650 Hz 左右, 取决于钢轨的弯曲刚度、扣件的刚度和枕距等。这个频率的共振可能被激发出来产生轮轨共振导致多边形快速磨耗。但是, 这个结论仍然存在下列需要进一步澄清的问题: ① 这个频率(约 650 Hz)与前面讨论过的现场遇到的诱发多边形磨耗实际共振频率相差较大, 导致多边形磨耗超出 2 级以上; ② 列车高速通过时, 前后车轮碾压状态下轨道结构应该是时变结构, 经历了点对称和主要非对称时变过程, 而这个如图 27 所示对称模式或频率将是一个变化过程, 不是一个固定频率或固定振型, 变化范围多大尚不清楚, 这是离散支撑轨道普遍存在的行为, 即使变化范围较小, 列车通过时这个频率的振动是否能被激发出来, 过去的试验过程中几乎没有显示这一特征(正如前面所讨论的内容); ③ 即使被激发出来, 是否导致轮轨共振诱发车轮滚动圆磨耗, 也同样存在如前面所讨论的波磨是否满足诱发车轮多边形磨耗高速发展的基本条件的问题, 如车轮滚动圆周长约为钢轨三阶弯振动波长的整倍数和车轮反复滚动碾压周期性磨耗累积过程中相位不重合问题。以作者的观点和经验, 钢轨的任何弯曲共振都不易导致车轮多边形磨耗快速发展。

图 27 车轮碾压下钢轨三阶弯曲振型

(5) 车轮加工和镟修过程形成的初始多边形的影响。车轮在初始加工时和镟修过程中, 由于加工设备结构特征因素, 新加工的车轮和镟修维护中车轮的圆度仍然存在不少缺陷, 即车轮镟修后的圆度仍然精度不足或者留下初始多边形^[15]。如果初始多边形的通过频率和车辆转向架结构某固有共振频率相同或接近的话, 会导致轮轨系统的强烈共振, 其共振频率如果满足多边形磨耗快速发展的基本条件时, 就能加速初始多边形的迅速发展。如果加工和维护镟修留下的初始多边形通过频率与转向架被激发共振频率不一致, 多边形将会因轮轨作用而消除掉^[15]。

图 28 为某高速列车车轮滚动圆镟修前后多边形或不规则情况对比, 图 28a 极坐标表示镟修前后非圆度情况, 图 28b 多边形阶次分布图。从图 28a 和图 28b 两个图看, 显然该高速车轮镟修前主要存在 19 阶多边形磨损和偏心磨损, 镟修后, 19 边形和偏心都缩小了一部分, 未能彻底消除, 见图 28b 中峰值所示, 尤其是 19 边形磨损明显存在, 镟修后在运营阶段将导致 19 阶多边形磨耗快速发展, 残余的偏心磨损后期影响同样存在。镟修后带来的另一个问题就是车轮圆度存在明显的 4 边形, 如图 28a 和图 28b 所示。这样的初始 4 边形, 在镟修运营中虽然被轮轨滚动接触磨耗逐渐消除掉, 但是它会象车轮几何偏心即一阶初始多边形一样, 导致轮轨之间的高频谐振振动, 易激发出导致车轮高阶多边形磨损的转向架系统共振。

车轮镟修后其滚动圆周上展示了如图 28 所示的 4 边形, 主要原因是不落轮对旋床驱动轮长期工作因偏心磨损或自身轴承间隙加大, 其在驱动轮对转动过程中, 发生自身偏心运动, 即类似凸轮转动行为, 如图 29 所示。车轮镟修过程中有下部驱动轮不仅支撑着待镟修的车轮, 而且驱动车轮转动进行切削修圆。镟修的圆度精度主要取决于驱动轮固定

图28 某高速车轮镟修前后车轮多边形及阶次分布图

轴 O_1 和 O_2 间隙和驱动轮圆度以及车轮的多边形磨损状态。如果镟修车轮轮径 D 约等于驱动轮径 $(D/4)$ 4 倍时, 且驱动轮其中有一个轮子因磨损或其它原因而出现偏心(图 29 的 O_2), 切削过程中将会产生 4 边形的切削, 4 边形将会形成, 如图 28 所示。如果两个驱动轮都有偏心存在, 将会导致切削过程车轮更高阶的多边形形成。如果两个驱动轮恰好与多边形车轮相接触的两个点 C_1 和 C_2 之间的弧长约等于多

图29 镟修机床驱动车轮存在偏心状态下进行多边形车轮镟修示意图

边形波长的整倍数, 如图 30 所示, 这车轮的周期多边形就不能有效地通过镟修得到消除。显然, 图 28 所示的 19 阶多边形磨损就不能通过镟修来消除, 如图 31 所示。

图30 镟修机床驱动车轮与多边形车轮两接触点弧长等于多边形边长整倍数时镟修示意图

图31 按图30所示镟修方式对19阶多边形磨损车轮镟修前后的情况比较

即使镟修机床的驱动轮处于最佳状态, 如果镟修的多边形车轮依靠驱动轮定位, 车轮的偏心(或一阶多边形)依然不能被有效地消除。这种依赖驱动轮来定位的车轮旋床, 具有先天性的缺陷。因此, 车轮镟修工艺和精度是十分重要的。对于传统列车车轮镟修工艺, 在镟修过程中, 轮对被驱动旋转时, 转动中心始终跟车轮几何中心 O_0 重合, 则就能大幅度提高车轮的镟修精度。

(6) 其他对车轮多边形形成的影响因素。现场大量高速车轮圆度测试分析显示了这样的一个特征: 动车车轮多边形磨损普遍比拖车车轮严重, 车辆 1 和 4 位轮对多边形磨损深度普遍要比 2 和 3 位轮对的情况严重, 左右车轮多边形磨损形状和峰谷相位分布也不完全对称。导致这种特征的可能因素被归纳如下。之所以动车轮多边形磨损比拖车轮的严重, 是因为动车轮驱动着列车运行, 轮轨的切向力在多数情况下大于拖车轮的切向力(主要是蠕滑力), 仅在制动工况下它们才有可能相近, 所以, 轮轨系统在相近的垂向激励下和相同运营立车条件下, 切向力较大的情况导致车轮沿圆周路面不均匀磨损相对严重, 即多边形磨损严重。这个结论可以通过理论

仿真和试验得到验证。同一车辆之所以1、4位轮对车轮多边形磨耗比2、3位轮对车轮多边形磨耗严重,是因为在车辆多数运行情况下,每一车辆1、4位轮对车轮摇头运动幅度要比2、3位轮对车轮摇头运动幅度大,也就是每一车辆1、4位轮对车轮横向蠕滑率幅度(冲角引起)要比2、3位轮对车轮横向蠕滑率幅度大,则轮轨在垂向振动强度相近时,1、4位轮对车轮的圆周不均匀磨耗一定大于2、3轮对的不均匀磨耗(即多边形磨耗)。这个结论将要用数值方法进行验证。在动力轮对(设为2、3位轮对)和非动力轮对(为1、4位轮对)混装在高速动车组车辆上,2、3轮对多边形磨耗较1、4轮对多边形磨耗严重,这说明动力车轮与钢轨驱动切向力相比1/4非动力轮对蠕滑力,在垂向轮轨激励相近的情况下,驱动力对多边形磨耗的影响更大。因为高速动车运营的线路直线比例高,弯道少,且半径大,这种情况下车辆过弯道和在直线运行时,1、4位轮对摇头运动和过弯道时冲角引起的蠕滑力,多数情况下小于动车和钢轨之间纵向驱动力。

4 车轮多边形抑制措施讨论

许多理论分析和大量现场试验调查发现,抑制列车车轮多边形的形成和发展有许多有效措施。考虑文章篇幅限制,可用有力证明下述结论的相关现场测试结果省略。

4.1 变速运行或交路运行

根据前面的大量现场试验数据分析讨论和多边形形成的基本条件以及机理分析,可知,当列车车轮轮径约为转向架被激发出的共振波长的整倍数时,此刻车轮是多边形磨耗的高发期。此刻共振波长由列车运营速度除以共振频率得到。因此,改变运营速度或改变转向架振动频率,就能改变因车辆系统(尤其是转向架部分)共振导致轮轨滚动振动波长(或轮轨力波动的波长)的改变,破坏车轮滚动圆的周长为轮轨振动波长的整倍数的关系。但是,如果通过改变车辆转向架系统(尤其是构架和轮对)频率来抑制多边形形成和发展是十分困难的,甚至无效。因为转向架系统尤其是构架和轮对模态分布密集,改变它们的几何尺寸或质量,对它们密集模态分布的影响不大,另外车辆在动力学性能和强度等方面的要求严格,况且车轮轮径因不断磨耗和镟修,而导致轮径在全寿命周期中轮径逐渐减小。轮径的变化,以及转向架系统若干个共振频率发生小的变化,也容易导致多边形磨耗快速发展的基本条件形成。如

果不断地改变运营速度,是一个非常有效的措施,譬如说,列车运营的往返途中,中途停站数量越多对抑制多边形约有利;在较大的站间距或长距离的平直道上,适当提高运营速度,站间距小和弯道上速度适当降低,也能对降低多边形发展速度十分有利;对如果固定在某条线路上或城市之间运营列车,可能情况下,每天运营更多区间线路和采用不同运营速度,做到既提高列车的利用效率,又能降低车轮多边形的发展。

4.2 车轮踏面修形器(研磨子)的应用

车轮沿其滚动圆多边形磨损实际也是周期性磨损,主要包含了2至3个主波长磨损,一阶偏心磨损总是存在,其波长较大,为车轮轮周长度,通常引起的轮轨总载荷不大。另外两个主波长相对较小,冲击频率较高,如图13所示,分别在每小时250 km运营速度条件下,分别是370~380 Hz和580~590 Hz,在580~590 Hz处峰值相对较高,对应的波峰波谷深度较大,对轮轨附加冲击载荷的贡献最大(相比相对一阶偏心和370~380 Hz处的周期磨损的贡献)。如果高阶多边形磨损是单一波的形式,这样的多边形磨损危害是最大的。车轮安装车轮踏面修形器(或称研磨子),由于车轮服役过程中其不断与车轮踏面发生摩擦作用,将要破坏因车辆结构共振导致轮轨之间周期性接触振动而形成沿车轮圆周形成的周期性磨损。过去,现场关于使用轮对踏面制动系统和轮盘或轴盘制动系统以及车轮踏面研磨子系统情况下,车轮圆度磨损情况调查分析可知,它们对多边形磨损抑制起到了非常有效的作用。为了发挥踏面修形器更大的作用,需要对其进行更加智能化的改进:① 修形器长度和宽度需要更加合理,能有效地消除多边形和车轮踏面横向凹坑磨耗;② 其材料的选配以及合理作用,在保证有效消除车轮多边形磨耗和控制凹坑磨耗的前提下,尽可能不影响车轮的使用寿命;③ 沿踏面横向作用角度,尽可能维持车轮踏面初始锥度,以保证列车具有较高的平稳性和舒适性,也能有效地延长车轮镟修周期和使用寿命;④ 踏面修形器的安装位置的考虑,目前踏面修形器安装在转向架上,转向架相对轮对或轴箱发生相对运动,因它们之间隔着一系悬挂和转臂机构,修形器基座相对轮对不稳定,对车轮周向圆度控制和锥度控制精度差,这也是目前修形器使用的严重缺陷之处,也是目前难解决的问题,但是它对踏面的摩擦磨损作用,能够有效地破坏高阶多边形形成和发展,但也可能会导致车轮圆度低阶非圆化的形成,如偏心、椭圆、三角形、月牙形以及它们组合形式,

在车轮锥度方面虽然能够抑制凹坑磨耗,但也可能导致过大的车轮锥度或过小的锥度形成,这是需要进一步研究的问题。

4.3 其他措施

对上面讨论的两个措施,目前运营实践证明是行之有效的措施。但是也是被动的措施。主动措施应该从下面几个方面去考虑。

(1) 新车轮加工生产一定严格控制其质量偏心 and 几何偏心,因质量偏心 and 几何偏心虽然引起轮轨冲击频率相对车轮高阶多边形引起附加载荷频率来说相对较低(20~30 Hz),但是车轮滚动旋转将会引起偏心激振的高频谐振振动,轮轨冲击频率成倍地增加到几百赫兹甚至上千赫兹,如图 23 所示,激发出转向架系统更多更高频率的共振,增加诱发多边形磨耗形成的风险。

(2) 车轮维修过程一定严格控制镟修质量,每次镟修一定完全去掉上一阶段运营过程中产生的多边形,大幅度降低车轮的几何偏心量,并通过严格的质量检查,要做到这一点首先要提高目前我国动车基地不落轮对旋床的镟修工艺水平,被镟修的轮对驱动、转动和定位都是依靠左右两侧的两个定位驱动轮来实现车轮旋转切削加工,如图 29、30 所示,这种镟修方式虽然效率高,但是会导致前面所述不良后果。在车轮在镟修过程中,轮对的定位一定要放在轴箱处,轮对在切削过程中导致几何偏心主要是由轴承的间隙和系统共振引起,这样的话,车轮高阶多边形就能有效地被消除,车轮偏心量也能得到控制。

(3) 对轮轨滚动接触表面平顺度和轨道支撑刚度的均匀性提出更加严格地要求,轮轨接触表面不规则和轨道支撑刚度不均匀包含了许多情形,如前面讨论车轮多边形,还有轮轨擦伤、钢轨波浪形磨耗、钢轨焊接接头、轨道的离散支撑和轨道板连接接头、桥梁墩台等,虽然这些因素不是车轮多边形形成和发展的根本因素,但是它们可以激发车辆系统共振,为多边形形成和发展提供条件。

(4) 在不影响轮轨材料合理匹配条件下适当提高车轮接触表面的抗磨损能力,使多边形发展速度相对慢一些。

(5) 在不影响列车动力学稳定性和安全性条件下,进行轮对和构架之间传振和隔振以及阻尼吸振方面的研究,通过改进和优化结构,来有效地消除轮对和构架之间耦合共振。

(6) 多边形磨耗车轮经济修策略研究和制定。车轮多边形形成的过程和特征也说明不同速度、不

同轮径条件下形成多边形速率是不同的。同样一列车不同车辆位置的轮对磨耗有一定的差异,同一车辆不同位置的轮对轮径也差异显著,对不同程度车轮多边形磨耗和不同发展速度的多边形状态,车轮的相应的镟修周期应该是不同的,考虑这些才能有效地节约车轮维修成本。如能做到这样,需要如下几个方面的问题:① 借助理论仿真和现场试验,初步确定多边形形成和快速发展基本条件(速度、车辆共振频率和轮径之间关系),由此,可以基本掌握或准确预测多边形高速发展期;② 车辆结构系统的共振频率在运营速度和多边形磨耗波长确定的情况下,确定波深与其引起轮轨附加载荷幅度以及关键零部件疲劳生命关系规律;③ 加快高效精确检测车轮多边形磨耗状态技术的研究和应用。这三个方面问题的成功解决,就能在任何时候任何情况下掌握车轮圆度或非圆化磨耗状态,镟修策略的智能系统就能随时给出车轮镟修指令。

5 结 论

我国高速列车车轮多边形磨耗是一种普遍磨耗现象。许多线路上列车车轮在不同运营速度和不同轮径状态下,形成严重的多边形磨耗,且发展速度较快。使车辆结构和轨道结构产生了强烈的振动和很大的噪声,导致部分车辆零部件断裂。本文从车轮多边形特征、形成的机理、影响范围以及措施方面,系统总结和分析了我高速列车车轮圆度磨耗情况,得到结论如下。

(1) 当车轮形成多边形并高速发展时,列车的运营速度、轮径和车辆转向架结构某些与多边形磨耗相关的共振频率满足如下基本关系:车轮滚动圆的周长约为其共振波长的整倍数。其波长由行车速度除以共振频率所得。

(2) 我国高速列车多边形磨耗主要为 2~3 个主波长周期性磨耗的叠加,第一个主波长磨耗为车轮一阶几何偏心磨耗,其余是高阶多边形磨耗,大约 14 阶至 24 阶。如果高阶多边形磨耗仅含一个主波长,这样车轮多边形磨耗对轮轨冲击和车辆轨道系统振动噪声以及疲劳寿命的影响是最大的。

(3) 影响车轮多边形发生发展的根本原因是车辆转向架结构(含轮对)共振,轨道不平顺和自身的共振会激发车辆结构的共振,但不是车轮多边形磨耗最根本的原因。尽可能减少轮轨接触表面不平顺和抑制轨道的共振,同时也要通过优化转向架隔振系统,尽可能消除和降低转向架与多边形有关的系

统共振。

(4) 高速车轮维修所用的不落轮对旋床镟修工艺不能满足消除多边形的精度要求, 其驱动轮不适用作轮对镟修时定位, 轮对的定位应该放在轴箱之处, 这样可以大幅度提高多边形磨耗车轮的镟修精度。

(5) 工程运营实践证明有许多抑制车轮多边形生长的措施, 其中最有效的措施是列车运营速度的变化和交差路线运营, 能够有效地抑制多边形发生和发展; 踏面修型器的科学利用能有效地抑制多边形的发展。在保证轮轨接触行为和伤损程度最低的前提下, 适当提高车轮材料的抗磨损的能力, 此措施研究和应用请慎重。

(6) 开展多边形磨耗车轮经济镟修策略的研究。车轮多边形磨耗直接影响高速列车正常运营、运营品质和运输成本。需要科学经济合理地治理它。车轮镟修是及时消除多边形磨耗关键手段。科学的镟修策略包含了多边形深度镟修限界合理的确定、车轮多边形快速发展阶段的准确预测模型的研究和应用、车轮多边形磨耗实时精确监控技术。这些都是目前需要进一步开展的工作。

参 考 文 献

- [1] 张曙光. 高速列车设计方法研究[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2009.
ZHANG Shuguang. Design method of high-speed train[M]. Beijing: China Railway Press, 2009.
- [2] RAZHKOVSKIY A, BUNKOVA T, PETRAKOVA A, et al. Optimization of hardness ratio in rail-wheel friction pair[J]. Journal of Friction and Wear, 2015, 36(4): 334-341.
- [3] 王文健, 刘启跃, 朱旻昊. 轮轨材料硬度匹配性能试验研究[J]. 摩擦学学报, 2013, 33(1): 65-69.
WANG Wenjian, LIU Qiyue, ZHU Minhao. Hardness matching behavior of rail/wheel materials[J]. Tribology, 2013, 33(1): 65-69.
- [4] 崔大宾. 高速车轮踏面设计方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
CUI Dabin. Study on wheel profile design method for high-speed train[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.
- [5] 李国栋, 曾京, 池茂儒, 等. 高速列车轮轨匹配关系改进研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(4): 93-100.
LI Guodong, ZENG Jing, CHI Maoru, et al. Study on the improvement of wheel-rail matching relationship for high speed train[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(4): 93-100.
- [6] 池茂儒, 张卫华, 曾京, 等. 高速客车转向架悬挂参数分析[J]. 大连交通大学学报, 2007, 25(3): 13-19.
CHI Maoru, ZHANG Weihua, ZENG Jing, et al. Research on suspension parameter of high-speed passenger car bogie[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2007, 25(3): 13-19.
- [7] CUI Dabin, ZHANG Weihua, TIAN Guangdong, et al. Designing the key parameters of EMU bogie to reduce side wear of rail[J]. Wear, 2016, 366-367: 49-59.
- [8] 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, 39(3): 50-55.
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, 39(3): 50-55.
- [9] 金学松, 梁树林, 陶功权, 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): 3-13.
JIN Xuesong, LIANG Shuling, TAO Gongquan, et al. Characteristics, mechanisms, influences and counter measures of high speed wheel/rail wear: Transverse wear of wheel tread[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(4): 3-13.
- [10] WU Yue, DU Xing, ZHANG Heji, et al. Experimental analysis of the mechanism of high-order polygonal wear of wheels of a high-speed train[J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2017, 18(8): 579-592.
- [11] LIU Jia, JIN Xuesong. Research on the vibration insulation of high-speed train bogies in mid and high frequency[J]. Shock and Vibration, 2018, 18(3): 1-13.
- [12] 吴越, 韩健, 刘佳, 等. 高速列车车轮多边形磨耗对轮轨力和转向架振动行为的影响[J]. 机械工程学报, 2018, 54(4): 37-46.
WU Yue, HAN Jian, LIU Jia, et al. Effect of high-speed train polygonal wheels on wheel/rail contact force and bogie vibration[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(4): 37-46.
- [13] ZHANG Jie, HAN Guangxu, XIAO Xinbiao, et al. Influence of wheel polygonal wear on interior noise of high-speed trains[J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2014, 15(12): 1002-1018.
- [14] 谷永磊, 赵国堂, 王衡禹, 等. 轨道振动特性对高速铁路钢轨波磨的影响. 中国铁道科学, 2016, 37(4): 42-47.

- GU Yonglei, ZHAO Guotang, WANG Hengyu, et al. Effect of track vibration characteristics on rail corrugation of high speed railway[J]. China Railway Science, 2016, 37(4): 42-47.
- [15] JOHANSSON A, ANDERSSON C. Out-of-round railway wheels: A study of wheel polygonalization through simulation of three-dimensional wheel-rail interaction and wear[J]. Vehicle System Dynamics, 2005, 43(8): 539-559.
- [16] JIN Xuesong, WU Lei, FANG Jianying, et al. An investigation into the mechanism of the polygonal wear of metro train wheels and its effect on the dynamic behaviour of a wheel/rail system[J]. Vehicle System Dynamics, 2012, 50(12): 1817-1834.
- [17] TAO Gongquan, WANG Linfeng, WEN Zefeng, et al. Experimental investigation into the mechanism of the polygonal wear of electric locomotive wheels[J]. Vehicle System Dynamics, International Journal of Vehicle Mechanics & Mobility, 2018, 56(1): 1-17.
- [18] MEYWERK M. Polygonalization railway wheels[J]. Archive of Applied Mechanics, 1999, 69(2): 102-120.
- [19] MORYS B. Enlargement of out-of-round wheel profiles on high speed trains[J]. Journal of Sound and Vibration, 1999, 227(5): 965-978.
- [20] JIN Xuesong, WEN Zefeng, WANG Kaiyun, et al. Effect of a scratch on curved rail on initiation and evolution of rail corrugation[J]. Tribology International, 2004, 37: 385-394.
- [21] JIN Xuesong, LI Wei, WANG Hengyu, et al. An investigation into rail corrugation, its mechanics and effects on the dynamic behaviour of metro trains and tracks in China[J]. International Journal of Railway Technology, 2016, 5(3): 1-29.
- [22] WU Xingwen, RAKHEJA S, CAI Wubin, et al. A study of formation of high order wheel polygonalization[J]. Wear, 2019, 424: 1-14.

作者简介: 金学松(通信作者), 男, 1956 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为轮轨关系和轨道交通振动噪声。
E-mail: xsjin@swjtu.cn