DOI: 10.3901/JME.2014.18.142

重载铁路不同磨耗阶段车轮与曲线钢轨的接触分析*

张铁 张军 盛友艺 孙传喜

(大连交通大学交通运输工程学院 大连 116028)

摘要:应用轮轨型面测量仪在大秦重载线路上跟踪测量不同磨耗阶段的货车车轮和钢轨型面,并选取典型的轮轨型面,针对曲线轮缘贴靠位置,建立轮轨三维接触有限元模型,进行弹塑性计算分析。计算结果表明:在相同的载荷工况下,随着轮缘的磨耗,轮轨接触斑面积呈现出先增加后减小的变化趋势,初期车轮轮缘根部局部剧烈磨耗,逐渐扩大到整个轮缘剧烈磨耗,然后从 III 型面开始,轮缘和踏面磨耗均匀,轮缘磨耗进入相对稳定的磨耗阶段直至磨耗到限;在曲线位置处,各个磨耗阶段的车轮型面与磨耗稳定期钢轨型面相匹配时的等效应力均明显小于与标准钢轨相配合时的等效应力,而且磨耗后的钢轨型面能够显著改善轮缘贴靠时的应力分布情况,减小轮轨间等效应力,能相对减轻轮轨磨耗;综合考虑轮轨接触斑面积、等效应力的大小与分布情况,III 型车轮型面的综合指标相对较优。

关键词:重载;轮缘磨耗;有限元法;轮轨接触;曲线钢轨

中图分类号: U211

Analysis of the Contact between Wheel and Rail with Different Wear Profiles in Curve on Heavy Haul Railway

ZHANG Tie ZHANG Jun SHENG Youyi SUN Chuanxi

(School of Transportation Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028)

Abstract: The freight wagon wheel profiles and rail profiles of different wear stages are tracked and measured by the wheel-rail profile admeasuring apparatus from Datong-Qinhuangdao Heavy haul line. The typical wheel-rail profiles are selected and the finite element method(FEM) models of wheel-rail contact are established when the flange gets close to the rail in the curve segment. The elastic-plastic analysis of the FEM models is presented. The results show that under the same loading condition, with the abrasion of wheel flanges, the wheel-rail contact areas increase at first and then decrease. The root of wheel flange is worn severely at preliminary stage, and the wear gradually extends to the entire wheel flange. Starting with the wheel profile III, wheel flange and tread are worn evenly. The wheel flange wear gets into the relatively stable stage until the abrasion limit. When contacting with different stages of wheel profiles in curve, the equivalent stresses of the stable stage of worn rails are obviously smaller than that of the standard rails. Furthermore, the stable stage of worn rails could significantly improve the stress distribution when the flange gets close to the rail in the curve segment, and the wheel-rail contact stresses decrease, which can relatively reduce the abrasion of wheel and rail. Taking all the factors above into consideration, such as the wheel-rail contact area, contact stress and its distribution, the composite indicator of wheel profile III is relatively better.

Key words: heavy haul; wheel flange wear; finite element method; wheel-rail contact; curve rail

0 前言

随着我国经济的发展,铁路货物运量迅速增长,重载运输已成为我国铁路货运的发展方向,形成了大运量、高轴重、高密度的重载铁路运输模

式^[1-3]。但随着轴重的增加不可避免地要增大轮轨间的相互作用力,特别是曲线上的轮轨磨耗尤为剧烈,其结果必然会加剧轮轨磨损,导致钢轨、车轮频繁维修甚至更换,因此降低重载货车的轮轨磨耗是我国重载运输的核心技术问题^[4-6]。

国内外学者对此进行了大量的研究。俞展猷^[7]应用赫兹理论计算了车轮轮缘等效应力,研究了车轮侧压力与轮缘根部圆弧半径对轮缘等效应力的影

*教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20112124110002)和辽宁省自然科学基金(201202023)资助项目。20130909 收到初稿,20140505 收到修改稿

响,给出了各种计算工况下的数值解,为分析轮缘磨耗与车轮型面优化设计提供了理论依据。李霞等^[8]提出基于车辆轨道垂、横向耦合动力学、轮轨滚动接触力学和材料摩擦磨耗模型为一体的车轮磨损计算模型,并发展相应的数值方法。彭齐放^[9]采用钢轨力学和车辆动力学方法对小半径曲线钢轨侧面磨耗进行研究,分析了轨道几何参数对曲线钢轨侧面磨耗的影响,并提出了减磨措施。REZVANI等^[10]利用 ADAMS/Rail 软件建立了车辆动力学模型,并通过动力学仿真计算,分析了磨耗车轮型面对车辆通过曲线时轮轨磨耗指数的影响。崔大宾等^[11]根据三维非赫兹滚动接触理论对轮轨间隙求解范围进行计算,针对我国重载货车车轮圆周磨耗严重的问题,对现有重载货车车轮踏面进行优化,利用车辆-轨道耦合动力学理论及三维弹性体非赫兹滚动接触理论对优化前后车轮踏面的静态接触性能及动态接触性能进行分析。任尊松等^[12]建立了包含多点接触轮对振动方程的车辆-轨道系统动力学模型,对轮轨多点接触计算和判定新方法-迹线极值法进行车辆曲线通过验证,给出曲线通过接触点在车轮踏面上位置、轮轨接触点数和轮轨法向力。

本文基于大秦重载线路大量实测数据,选取典型轮轨型面,建立三维接触有限元模型,在通过小半径曲线时,针对不同磨耗阶段型面车轮与曲线钢轨相匹配进行接触计算和分析并寻找规律,为轮轨型面设计及优化提供理论基础。

1 轮轨实测型面数据统计与分析

大秦铁路是我国第一条以开行重载单元式列车为主的双线电气化运煤专线铁路,应用轮轨型面专用测量仪,在大秦重载线路现场跟踪测得大量车轮和钢轨型面数据,并对数据点坐标进行前处理,从而得到轮轨型面轮廓线。依据轮缘厚度选出5个典型车轮型面,如图1所示。

图1 五种典型车轮型面

其中I型为标准LM型车轮型面,II型至V型型面为不同磨耗阶段的车轮型面,轮缘厚度分别为29.5 mm、27.1 mm、25.3 mm、23.1 mm。图2为在圆曲线处同一测量位置测得的两种钢轨型面的对比:

标准75 kg/m钢轨型面和实测的磨耗稳定期的圆曲线处钢轨型面。

图2 两种钢轨型面

对不同磨耗阶段的轮轨型面进行匹配,得出轮轨静态接触点对分布图。如图3、4所示。

图3 不同磨耗车轮与标准钢轨匹配的静态接触点对图

图4 不同磨耗车轮与磨耗钢轨匹配的静态接触点对图

通过图3可以分析出,不同磨耗阶段车轮型面与标准钢轨型面匹配时,接触点主要分布在钢轨顶面靠近轨距角一侧,而且随着车轮的磨耗,踏面的接触点范围逐渐变大;由图4可知,车轮型面与磨耗钢轨型面匹配时的接触点分布更为均匀,范围更大,这说明磨耗型车轮与磨耗型钢轨相互适应程度

更高。

2 轮轨接触有限元模型

将选出的 5 个车轮型面分别与标准 75 kg/m 钢轨型面和磨耗稳定期钢轨型面相匹配, 建立通过曲线时轮缘贴靠位置处的轮轨有限元接触模型, 如图 5 所示, 接触区网格边长为 1 mm, 非接触区域网格逐渐稀疏, 这样既满足了计算精度的要求, 又减小了不必要的计算量。

图 5 轮轨有限元接触模型

轨距为 1 435 mm, 轮缘内侧距为 1 353 mm, 轨底坡取 1:40。有限元模型采用弹塑性接触计算, 轮轨材料本构模型为双线性本构模型, 弹性模量为 205 GPa, 泊松比取 0.3, 摩擦因数取 0.3。轴重取 25 t, 垂向作用在车轴两端的轴箱位置处, 并施加离心力等效成的横向力 F , 其中 $F=mv^2/R$, 圆曲线半径 $R=400$ m, 运行速度为 100 km/h。对钢轨底部三个方向施加位移全约束, 车轴两端施加纵向约束。

3 轮轨接触计算结果分析

基于 5 种车轮型面和 2 种钢轨型面, 在曲线位置处建立了轮缘贴靠时的轮轨接触三维有限元模型, 应用 Marc 软件进行有限元分析。

3.1 曲线位置处轮轨接触斑的分析

图 6 a、6b、6c 分别为 I 型、III 型和 V 型面车轮与标准 75 kg/m 钢轨相匹配时的外轨接触斑计算结果。从接触斑的分布、形状和大小可以看出, 标准 LM 型(I 型)车轮与标准钢轨在轮缘贴靠时发生共形接触, 接触斑呈哑铃形, 且位于轨距角附近。随着轮缘的磨耗, 车轮型面逐渐改变, 特别是轮缘处几何弧段明显变化, 磨耗 II 型-V 型面车轮与标准钢轨在轮缘贴靠位置处均出现了明显的两点接触, 钢轨轨头顶部靠近轮缘根部位置处的接触斑呈椭圆形, 并且椭圆长轴沿着纵向方向逐渐变长, 而钢轨侧面接触斑呈现条状且沿着纵向逐渐变得细长。III 型面的轮缘接触斑面积最大, 而 V 型面车轮的轮缘

接触斑面积最小, 容易造成钢轨侧磨。

图 6 不同型面车轮与标准 75 kg/m 钢轨匹配时的外轨接触斑

图 7 a、7b、7c 分别为 I 型、III 型和 V 型面车轮与磨耗稳定期钢轨相匹配时的外轨接触斑计算结果。与标准钢轨不同的是, 标准 LM 型(I 型)车轮与磨耗稳定期钢轨匹配时, 出现了明显的两点接触, 而不是共形接触, 且轨顶接触斑明显向轨顶外侧移动。II 型-V 型车轮与磨耗稳定期钢轨接触时, 钢轨轨顶靠近轮缘位置的接触斑形状也近似椭圆形, 但与标准钢轨有所不同, 椭圆形长轴是沿着横向的。钢轨侧面接触斑也呈现椭圆形, 且随着车轮轮缘的磨耗, 长短轴之比逐渐变小。

根据计算结果统计出外轨接触斑面积数据, 见图 8。各个阶段型面车轮与磨耗型面钢轨相匹配时的接触斑面积比与标准 75 kg/m 钢轨匹配时的接触斑面积大 30%~50%, 接触斑分布也比较分散。无论是与标准钢轨或是磨耗型面钢轨相匹配, III 型面车轮的接触斑面积均大于其他阶段车轮型面。随着车轮型面的磨耗, 车辆通过曲线过程中, 接触面积呈现出先增加后减小的变化趋势, 而且钢轨侧面接

触斑面积远小于轨顶接触斑面积。

(a) I 型面车轮

(b) III 型面车轮

(c) V 型面车轮

图 7 不同型面车轮与磨耗稳定期钢轨匹配时的外轨接触斑

图 8 外轨接触斑面积

3.2 曲线位置处轮轨等效应力的分析

图 9a、9b、9c 分别为 I 型、III 型和 V 型面车轮与标准 75 kg/m 钢轨相接触时的等效应力计算结果。从等效应力分布情况来看,在曲线位置处,与标准 75 kg/m 钢轨接触时,轮轨等效应力主要集中在轨顶偏轨距角附近。标准车轮与标准钢轨接触型面匹配较好,但随着轮缘磨耗,II 型-V 型车轮型面与标准钢轨型面配合不适,造成标准钢轨对轮缘根部附近等效应力集中且较大,使轨顶偏轨距角区

域易发生塑性流动及磨损严重。

(a) I 型面车轮

(b) III 型面车轮

(c) V 型面车轮

图 9 不同型面车轮与标准 75 kg/m 钢轨相匹配时的等效应力

图 10 a、10b、10c 分别为 I 型、III 型和 V 型面车轮与磨耗稳定期钢轨相匹配时的等效应力。I 型面车轮与磨耗钢轨接触时,应力主要集中在轮缘根部和踏面处;其他各个磨耗阶段型面的车轮与磨耗稳定期钢轨相匹配时,型面廓形相互适应,轮轨间的等效应力分布得都比较分散。与标准钢轨相比,等效应力较大区域主要分布在钢轨轨顶偏轨距角区域和钢轨侧面,磨耗型面钢轨的侧面等效应力较大,容易发生侧磨。

从 I 型标准车轮型面演变至 V 型车轮型面可视为一个连续的磨耗过程,从车轮型面轮廓线形和应力分布可以看出,初期车轮轮缘根部局部剧烈磨耗,逐渐扩大到整个轮缘剧烈磨耗,然后从 III 型型面开始,轮缘和踏面磨耗均匀,轮缘磨耗进入相对稳定的磨耗阶段直至磨耗到限。

而对于钢轨来说,在轮缘贴靠时,如图 9c 和图 10c 所示,初期钢轨磨耗主要是轨距角附近的垂磨,

随着钢轨型面的磨耗, 接触斑向轨距角两侧移动, 轨顶偏轨距角区域的应力小于钢轨侧面的应力, 钢轨由轨距角附近的垂磨变为钢轨的侧磨。

(a) I型面车轮

(b) III型面车轮

(c) V型面车轮

图 10 不同型面车轮与磨耗钢轨匹配时的等效应力

各个轮轨接触模型的最大等效应力值如图 11 所示。由图 11 可知, III 型面车轮的最大等效应力值较小, 各磨耗阶段型面的车轮与磨耗钢轨相匹配时的最大等效应力均比与标准钢轨相配合时的应力小 24%左右, 而且磨耗后的钢轨型面能够显著改善应力分布情况, 减小轮轨间等效应力, 减轻轮轨磨耗。

标准钢轨型面与磨耗后的车轮型面匹配不佳, 曲线处钢轨换新或者调边铺设会相对增大轮轨等效应力, 轮轨磨耗反而加剧, 因此曲线外股钢轨的型面设计或是打磨可以参考磨耗钢轨型面, 使曲线外

股钢轨型面与磨耗车轮型面匹配, 从而减缓轮轨磨耗。

图 11 轮轨最大等效应力

4 结论

本文基于大秦重载货车不同磨耗阶段的轮轨型面, 针对曲线轮缘贴靠位置, 建立轮轨三维接触有限元模型, 利用 Marc 软件进行弹塑性接触计算分析, 得出以下主要结论。

(1) 由于重载线路轮轨间磨耗剧烈, 标准型面只能维持很短时间, 大部分车轮是以磨耗阶段型面运行的, 因此分析钢轨型面特别是曲线处钢轨型面时, 以磨耗阶段的轮轨型面为主要参考对象更加符合实际情况。

(2) 在相同的载荷工况下, 随着轮缘的磨耗, 轮轨接触斑面积呈现出先增加后减小的变化趋势。从应力分布的角度分析, 随着轮轨的磨耗, 车轮与钢轨的型面廓形相互适应, 应力分布逐渐均匀。

(3) 在曲线位置处, 各个磨耗阶段型面的车轮与磨耗稳定期钢轨相匹配时的等效应力均明显小于与标准钢轨相配合时的等效应力, 而且磨耗后的钢轨型面能够显著改善轮缘贴靠时的应力分布情况, 减小轮轨间等效应力, 能相对减轻轮轨磨耗。

(4) 综合考虑轮轨接触斑面积、等效应力的大小与分布情况, III 型车轮型面的综合指标相对较优。

本文只是从轮缘不同磨耗阶段车轮型面的角度分析了重载货车的轮轨磨耗规律, 但其影响因素还有很多, 需要进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 王旭荣. 大秦铁路钢轨使用寿命和延长措施研究[J]. 中国铁路, 2011(6): 43-46.
WANG Xurong. The study on prolonging the service life of rails in Daqin railway[J]. Chinese Railways, 2011(6): 43-46.
- [2] OSSBERGER H, BISHOP G. Life cycle cost-driven

- innovations for heavy haul turnouts[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2010: 405-412.
- [3] 夏胜利, 杨浩, 张进川, 等. 我国重载铁路发展模式研究[J]. 铁道运输与经济, 2011, 33(9): 9-13.
XIA Shengli, YANG Hao, ZHANG Jinchuan, et al. The study on the heavy haul development model in China[J]. Railway Transport and Economy, 2011, 33(9): 9-13.
- [4] 金学松, 温泽峰, 肖新标. 曲线钢轨初始波磨形成的机理分析[J]. 机械工程学报, 2008, 44(3): 1-8.
JIN Xuesong, WEN Zefeng, XIAO Xinbiao. Investigation into mechanism of initial rail corrugation formation at a curved track[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(3): 1-8.
- [5] 阚叔愚, 陈岳源, 周锡九. 重载铁路工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1994.
KAN Shuyu, CHEN Yueyuan, ZHOU Xijiu. Heavy haul railway engineering[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1994.
- [6] 熊嘉阳, 金学松. 铁路曲线钢轨初始波磨演化分析[J]. 机械工程学报, 2006, 42(6): 60-66.
XIONG Jiayang, JIN Xuesong. Analysis on evolution of initial rail corrugation[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(6): 60-66.
- [7] 俞展猷. 车轮轮缘接触应力与影响因素的研究[J]. 中国铁道科学, 1996, 17(1): 68-77.
YU Zhanyou. Research on wheel-flange contact stress and influencing factors[J]. China Academy of Railway Sciences, 1996, 17(1): 68-77.
- [8] 李霞, 金学松, 胡东. 车轮磨耗计算模型及其数值方法[J]. 机械工程学报, 2009, 45(9): 193-200.
LI Xia, JIN Xuesong, HU Dong. Theoretical model and numerical method of wheel profile wear[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(9): 193-200.
- [9] 彭齐放. 小半径曲线钢轨侧面磨耗的探讨[J]. 铁道勘测与设计, 2004(5): 5-7.
PENG Qifang. The discussion on the side wear of rails in minor radius curves[J]. Railway Survey and Design, 2004(5): 5-7.
- [10] REZVANI M A, OWHADI A, NIKSAI F. The effect of worn profile on wear progress of rail vehicle steel wheels over curved tracks[J]. Vehicle System Dynamics, 2006, 47(3): 325-342.
- [11] 崔大宾, 李立, 金学松. 重载货车车轮踏面优化研究[J]. 铁道学报, 2011, 33(5): 31-37.
CUI Dabin, LI Li, JIN Xuesong. Study on optimization of wheel profiles on heavy haul freight car[J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(5): 31-37.
- [12] 任尊松, 金学松. 轮轨多点接触计算新方法曲线通过验证[J]. 机械工程学报, 2010, 46(16): 1-7.
REN Zunsong, JIN Xuesong. Verification for new wheel-rail multi-point contact method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(16): 1-7.

作者简介: 张铁, 男, 1988 年出生。主要研究方向为轮轨关系。

E-mail: xmgzst@163.com

张军(通信作者), 男, 1972 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为轮轨关系, 弹塑性接触理论与应用。

E-mail: zhangjun@djtu.edu.cn