动车组车轮修程修制理论研究和实际验证

刘小龙[1]，陈二庆[1]，丛韬[2]，杨智勇[1]，李志强[1]，范新光[1]，韩建民[1]

（1.北京交通大学 机械与电子控制工程学院，北京 100044；2.中国铁道科学研究院 金属及化学研究所，北京 100081）

摘　要：我国动车组的发展经历了引进-消化-吸收-再创新的阶段，但是在修程修制领域，目前采用借鉴国外标准和运营经验相结合的方法，实际上是逆向设计的方法。这导致车轮检修周期调整缺乏理论依据，成为动车组自主化“卡脖子”的问题。本文基于实际车轮辋裂的物理机制，采用 ABAQUS+FRANC3D 一体化的仿真方法，开展了实际车轮损伤容限和剩余寿命研究，通过实际辋裂失效验证了仿真结果有效性，为车轮修程修制研究提供理论依据。

关键词：动车组；车轮；辋裂；裂纹扩展；损伤容限；寿命评估

1　引言

我国动车组的发展经历了引进-消化-吸收-再创新的阶段，但是在修程修制领域，目前还处于借鉴国外标准和运营经验相结合的方法，实际上是逆向设计的方法，这导致车轮检修周期调整缺乏理论依据，从而制约了修程修制的自主化研究[1-3]。目前国外车轮修程修制改革的方法主要有两种方法，经验法和理论计算法。经验法根据缺陷情况和不同安全等级的需求，采取以下三种方式：在保障安全的前提下，执行现有的探伤方法及周期，现有的探伤周期不变，执行更省时、成本更低或更低发现概率（POD）的探伤方法，现有的探伤方法不变，改变探伤周期，如增加探伤频率。理论计算法可以为经验法提供依据和支持，首先利用有限元法和直接测量法进行在役车轮的应力分析，然后进行车轮关键区域如轮辋、踏面等位置缺陷表征，以此为初始条件，进行车轮裂纹扩展速率理论研究。最后进行实际线路跟踪，验证理论的有效性。

车轮属于超长寿命服役部件，一年运营里程 60 万公里，疲劳载荷周次达到 10^8 以上，传统的疲劳理论都是针对寿命小于 10^7 的疲劳行为，无法对车轮疲劳行为进行有效分析。寿命大于 10^7 的疲劳行为属于超高周疲劳，是当前疲劳研究领域前沿热点问题[6-8]。本文将借鉴国外车轮修程修制研究方法，研究实际车轮辋裂失效分析和基于轮轨系统的车轮内部裂纹扩展，发展车轮损伤容限和寿命评估方法，指导实际车轮修程修制改革。

2　实际失效车轮和仿真模型

2.1　实际失效车轮

取两个辋裂车轮进行分析研究，如图 1 所示。在轮辋上观察到裂纹，该裂纹扩展到踏面，称为穿透型辋裂（图 1a）。在车轮的踏面和轮辋上没有观察到裂纹，然而通过超声波探伤可检测到裂纹，这称为非穿透型辋裂（图 1b），继续服役，非穿透性裂纹将延伸至轮辋。

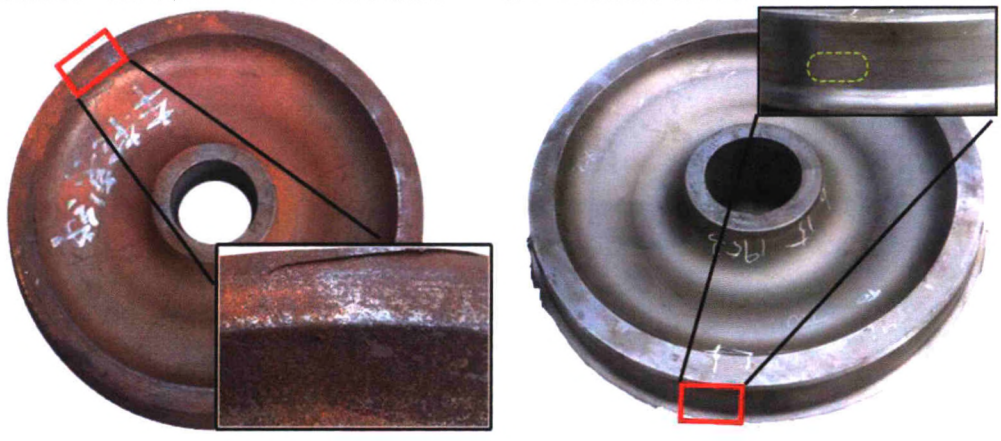
为了观察裂纹表面，将车轮的一侧安装在砧座上并用电动切割锯切割另一侧以打开裂纹，随后应用光学显微镜（OM）、扫描电子显微镜（SEM）以及能量色散谱分析仪（EDS）和 3 维共聚焦显微镜 MicroXAM 系统地观察裂纹表面，并制备含有裂纹的径向截面用于金相分析。金相制备过程中，通过安装使用 400-2000 粒度的砂纸和抛光顺序研磨表面，同时使用 4%Nital 溶液进行蚀刻。最后在横截面上沿径向进行布氏硬度的测量。

2.2　轮轨接触有限元模型

利用 Solidworks 软件建立轮轨系统的几何模型，车轮的直径为 860 mm，该模型中包含 20 万个八节点单元。在轮轨接触面远端，平均单元尺寸是 5 mm，由于接触分析的非线性因素，接触面需要进行网格细化，细化的网格平均尺寸为 1 mm。由于车轮的对称性和提高计算效率，截取了 1/6 个车轮进行计算（图 2）。轮毂位置通过一个节点和轮毂面进行耦合连接。所有的外载荷和边界条件都通过该耦合点

万方数据

施加。实际运用过程中的轴重变化比较大，为了计算方便，外加载荷统一采用轴重 15 吨。轮轨接触面采用面面接触设置，摩擦模型采用库伦摩擦定律，也就是摩擦力和法向压应力成正比。



（a）穿透型辐裂　　（b）非穿透型辐裂

图 1 辐裂车轮

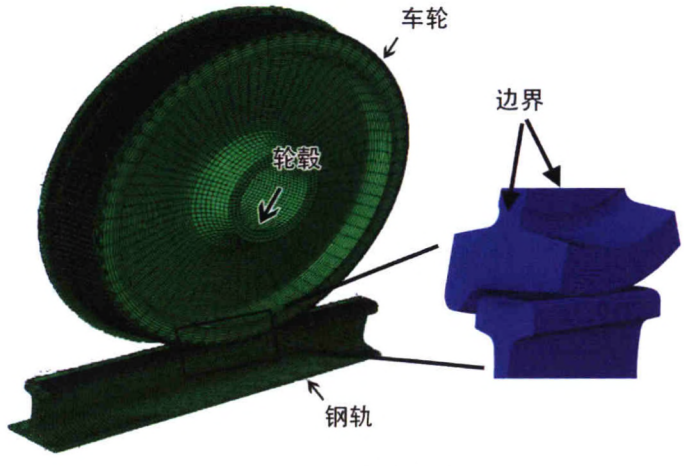


图 2 有限元几何模型

3 车轮辐裂失效分析

对近十年的铁路车轮辐裂的里程和裂纹萌生位置进行记录。图 3 所示为辐裂裂纹萌生区域距离踏面的深度和对应的疲劳寿命，疲劳寿命与裂纹萌生区域的深度无关。对于所有的辐裂车轮，裂纹萌生位置距离踏面的深度在 10 mm ~ 25 mm 的范围内。发生辐裂车轮的服役里程都在十万到百万公里，对应的疲劳寿命在 10^7-10^9 周次。通常，服役载荷低于传统的疲劳极限。因此综合考虑裂纹起始位置、服役载荷和疲劳寿命，车轮辐裂属于超高周疲劳行为。

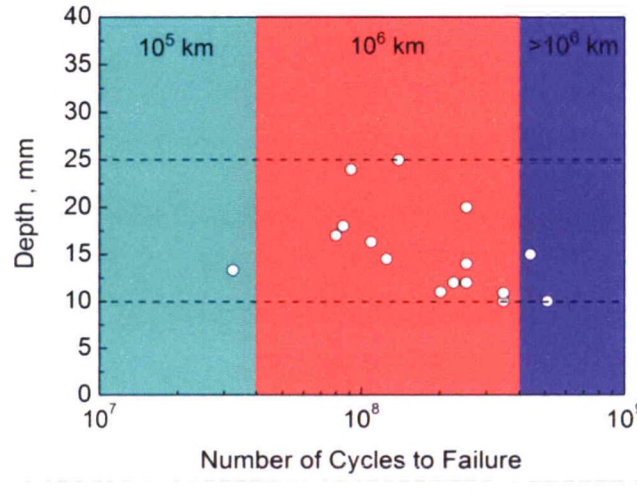


图 3 疲劳寿命与裂纹萌生区域的深度的关系

万方数据

图 4 所示为车轮辋裂的断口，图 4a 是对应于图 1b 中穿透型辋裂的断口。断口表面已被污染，裂纹起始区域由于腐蚀而模糊，但是依然可以观察到典型的疲劳断口特征。图 4b 是对应于图 1b 中车轮非穿透型辋裂的断口。断口表面清晰，有利于裂纹萌生机理的研究。裂纹萌生区域包含夹杂物和鱼眼位置，在裂纹扩展区域存在大量的疲劳条带，这些也是典型的超高周疲劳特征。

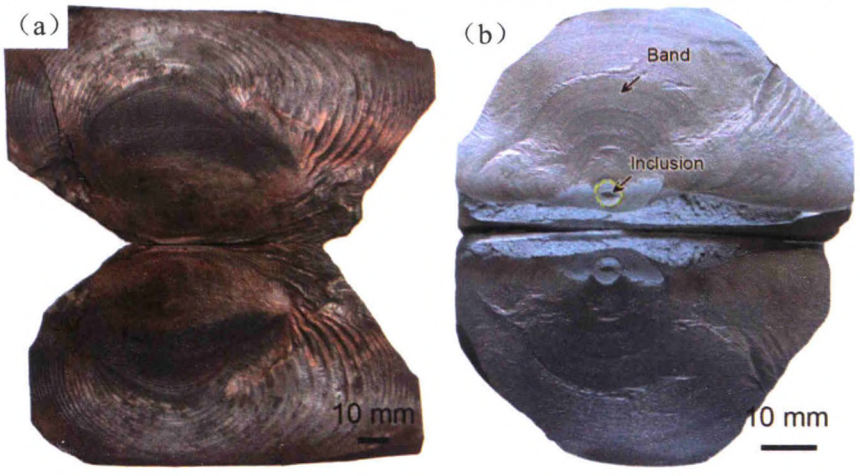


图 4 辋裂车轮断口（a）穿透，（b）非穿透

通过扫描电子显微镜（SEM）和 3 维共聚焦显微镜（MicroXAM）观察辋裂的断口形貌。图 5a 显示了 SEM 结果，辋裂断口呈现具有不同形态的三个典型区域，即夹杂物（Inc），鱼眼（FiE）和疲劳条带（Band）。图 5b 和 c 为断裂表面的三维形貌。夹杂物，鱼眼和裂纹扩展区域不在一个平面上，夹杂物位于低处，鱼眼位于最高处，高度差异约为 0.4 mm，这与单轴载荷的超高周疲劳断口特征不一样。先前对超高周疲劳的研究主要针对单轴应力状态，例如旋转弯曲和轴向载荷。对于车轮的辋裂，服役载荷是滚动接触载荷，属于多轴应力状态。在滚动接触载荷下，接触面存在较大的压应力，会抑制 I 型裂纹的产生，裂纹主要属于 II-III 型混合裂纹形式[9-11]。通常，II-III 型混合裂纹呈现三维特征，裂纹扩展区域中的疲劳条带是超高周疲劳在滚动接触载荷下的另一个独特特征。条带分布几乎均匀等距分，表明裂纹扩展速率是恒定的，这与单轴载荷情况下的快速扩展不同。值得注意的是，在夹杂物周围没有观察到细晶区（FGA）。

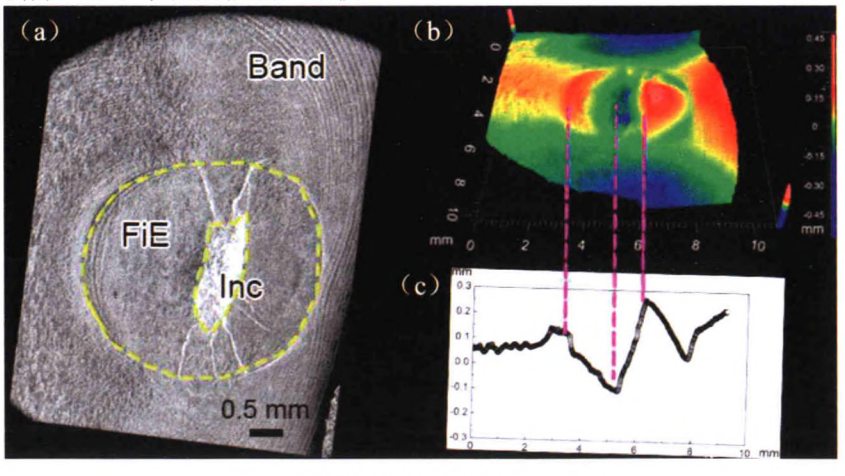


图 5 辋裂断口形貌

（a）SEM 结果，（b）三维共聚焦显微镜观察结果，（c）萌生区域裂纹起伏剖面图

图 6 所示为由夹杂物引起的辋裂形成机理的示意图。当夹杂物位于距离踏面深度小于 10 mm 时，由其引起的裂纹将优先扩展到踏面而不是轮辋，。这将导致踏面损坏，并影响车轮的使用。通

万方数据

过车轮镟修，车轮可以继续使用。当夹杂物位于车轮内部并且深度超过 10 mm 时，裂纹将扩展到轮辋外侧或内侧而不是踏面，称为辋裂。辋裂将导致车轮故障，甚至导致列车发生事故。

车轮辋裂发生前期具有隐蔽性，发生后产生的后果严重，是目前车轮修程修制关心的重点问题。由于早期裂纹萌生于轮辋内部，目前只能用超声探伤进行检测，同时缺乏理论依据，只要探测到内部 3 mm 的裂纹，即判定车轮失效。因此车轮损伤容限和剩余寿命评估方法称为车轮修程修制优化的关键。

车轮辋裂裂纹扩展研究可以通过实际线路跟踪，台架实验和模拟仿真方式进行。线路跟踪和台架实验存在数据采集困难，跟踪周期长，耗费大量人力物力，而且不能考虑复杂条件。目前有限元仿真计算已经大量应用到动车组强度设计领域，得到了广泛的认可。本文将基于断裂力学，结合 ABAQUS 和 FRANC3D 软件，对车轮轮辋位置的裂纹扩展进行研究。

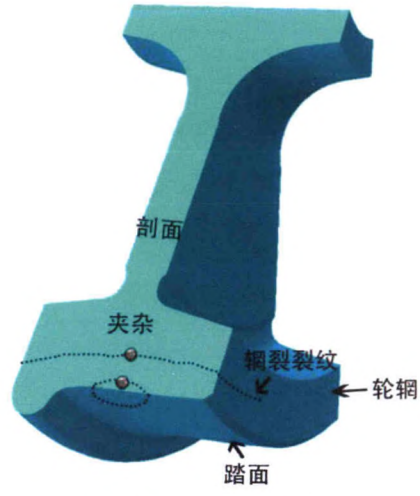
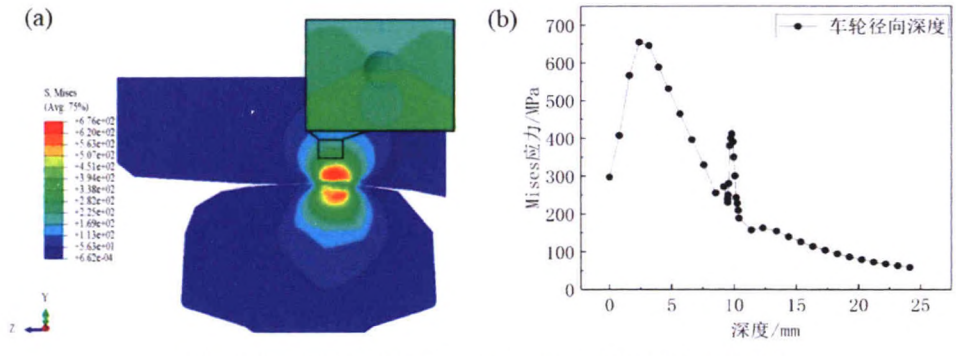


图 6 辋裂机理示意图

4 车轮损伤容限和剩余寿命评估

4.1 轮轨接触应力仿真

引起车轮辋裂的夹杂物可以看做一个孔洞型缺陷，因此可以在有限元模型中预制一个孔洞缺陷，进行应力分析。图 7 是在距踏面深度 10mm 位置存在孔洞缺陷的接触面附近等效应力分布，随着距踏面深度增加，等效应力先增加后减小，同时在夹杂位置存在应力集中。最大等效应力 650 MPa，夹杂位置应力集中，最大应力达到 400 MPa。距离踏面深度 25 mm 时，应力基本接近于 0。



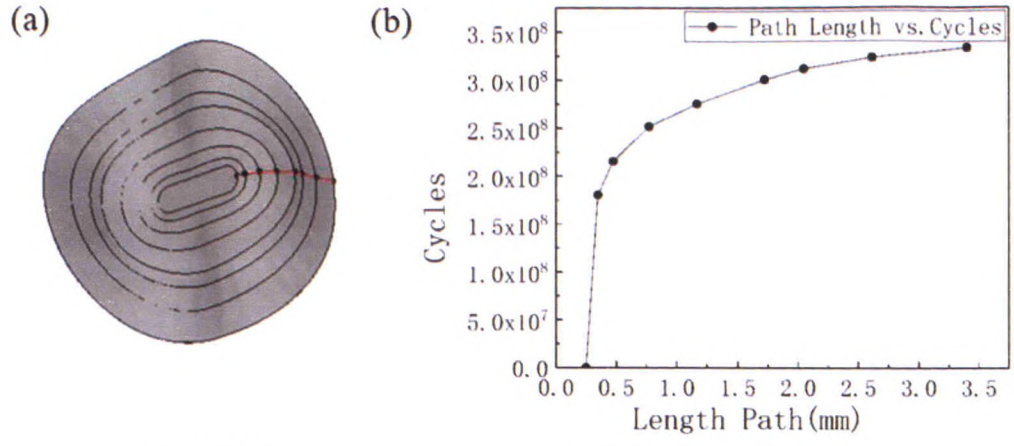
（a） Mises 应力分布云图，（b） Mises 应力深度分布曲线

图 7 孔洞处 Mises 应力分布

4.2 裂纹扩展仿真

实际车轮辋裂的裂纹源距踏面深度 11 mm，距轮辋外侧面 66 mm，夹杂物尺寸为长 2.28 mm、宽 0.6 mm，该轮对服役里程为 101 万公里。以此夹杂物的位置和尺寸为初始条件，进行车轮辋裂裂纹扩展仿真，结果如图 8 所示。预测疲劳循环周次约为 3.38×10^8 cycles，服役里程约为 91 万公里，与实际车轮辋裂里程接近。同时图 8a 显示的裂纹扩展呈三维特征与实际辋裂断口较符合。

万方数据



（a）扩展裂纹，　　（b）裂纹扩展长度与寿命

图 8 疲劳裂纹扩展寿命预测

4.3 损伤容限和剩余寿命评估

获得裂纹扩展曲线后，就进行车轮的滚动接触疲劳损伤容限分析和剩余寿命评估。裂纹扩展曲线通常分为早期缓慢扩展阶段和后期快速扩展阶段，选取两个阶段的分界点作为损伤容限的尺寸。实际服役车轮裂纹大于该尺寸，则车轮失效，小于该尺寸可以继续服役，继续服役寿命可以根据裂纹扩展曲线得到。

以距车轮踏面 20 mm 的位置处初始半径 0.3 mm 的裂纹为例，其裂纹扩展曲线如图 9a 所示。裂纹从 0.3 mm 扩展到 1 mm，经历了 2.6×10^8 以上的循环载荷，对应的里程为 71 万公里。裂纹进一步扩展，从 1 mm 扩展到 3.4 mm，经历了 7×10^7 以上的循环载荷，对应的里程数为 18 万公里。可见裂纹扩展早期阶段，虽然扩展尺寸小，但是消耗寿命更多，而继续扩展，扩展尺寸大，但消耗寿命少。针对这种裂纹扩展特征，可以提出相应的损伤容限，即裂纹进入快速扩展阶段的门槛值。针对距车轮踏面 20 mm 的位置处初始半径 0.3 mm 的情况，可以将裂纹长度 1 mm 作为初始扩展和快速扩展的分界。即该车轮的损伤容限为 1 mm，在探伤过程中，如果发现 20 mm 深度位置有小于 1 mm 的亚表面裂纹，可以认为车轮还是安全的，当裂纹扩展到大于 1 mm，判断车轮失效。

当裂纹小于 1 mm 的时候，车轮继续服役，其剩余寿命也是人们关心的，从该裂纹扩展曲线中，我们也可以得到相关的剩余寿命。假设探伤发现 0.5 mm 的裂纹，那么其继续扩展到 1 mm 需要的循环载荷由图 9a 可知为 5×10^7，对应的里程数为 13.5 万公里，即该车轮的剩余寿命为 13.5 万公里。需要指出的是该损伤容限和剩余寿命判断方法受初始裂纹的位置和尺寸的影响，同时实际服役载荷和轮轨条件也有影响。

同时也可以评估某一夹杂物尺寸下，实际车轮服役是否安全，以距车轮踏面 20 mm 的位置处初始半径 0.1 mm 的裂纹为例，其裂纹扩展曲线如图 9b 所示。裂纹从 0.1 mm 扩展到 1 mm，经历了 1.47×10^9 以上的循环载荷，对应的里程为 396 万公里。需要指出的是，目前的车轮全寿命服役里程为 200 万公里左右，可知车轮在整个服役周期都可以安全运营。

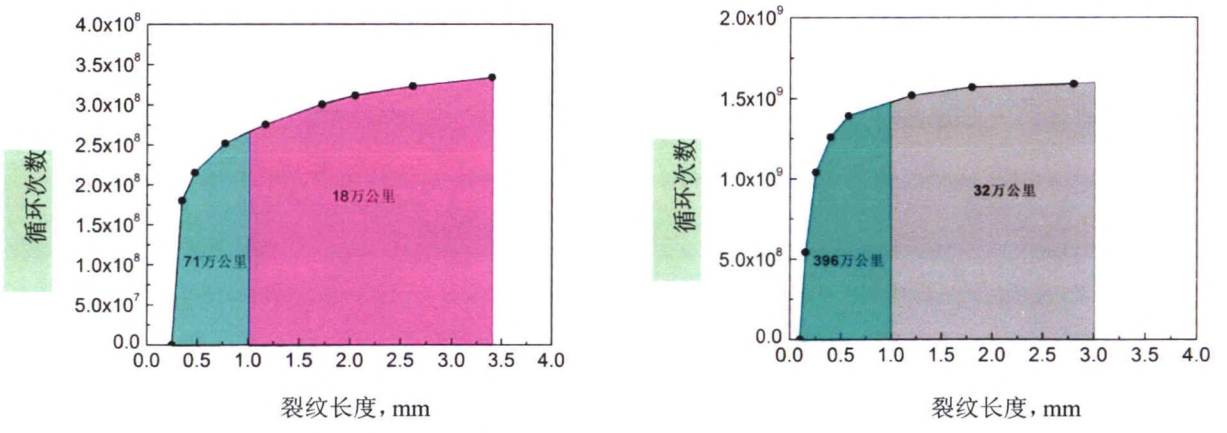
5 结论

（1）车轮辋裂失效分析表明，辋裂裂纹萌生于内部夹杂物，夹杂物尺寸一般在毫米级，位置在距踏面 10-25 mm 之间。失效里程在十万到百万公里，对应疲劳周次在 10^7-10^9 之间，属于超高周疲劳范畴。

（2）轮轨接触应力仿真结果表明，接触应力分布随着距踏面深度的增加，先增加后减小，在夹杂物位置存在明显的应力集中。裂纹扩展仿真结果与实际车轮辋裂里程接近，证明了仿真的有效性。

（3）基于裂纹扩展曲线，进行了车轮损伤容限和剩余寿命评估方法研究，该方法将为车轮修程修制提供理论依据。

万方数据



a) 初始裂纹半径 0.3 mm　　b) 初始裂纹半径 0.1 mm

图 9 距车轮踏面 20 mm 位置的裂纹扩展曲线

参考文献

[1] 文礼, 王华胜, 李忠厚. 基于可靠性维修的CRH2型动车组修程修制优化研究[J].铁道机车车辆, 35(1): 78-81.

[2]孙红林, 唐曼. 中国高速铁路创新发展的优势[N]. 学习时报, 2018-01-24(005).

[3]费良飞, 王鹏, 王灵芝. 动车组修程修制模糊综合评价方法与应用[J]. 城市轨道交通研究,2013,16(07):67-72+87.

[4]江敏. 动车组运用检修作业理论和实践研究[D].中国铁道科学研究院,2015.

[5]李建. 动车组运用与检修计划综合优化方法研究[D].北京交通大学,2017.

[6] Tao Cong, Jianmin Han, Youshi Hong, Joseph Domblesky, Xiaolong Liu. Shattered rim and shelling of high-speed railway wheels in the very-high-cycle fatigue regime under rolling contact loading[J], Engineering Failure Analysis. 2019;97:556-567.

[7] 丛韬，韩建民，陈刚，张关震，张斌. 高速动车组新材质车轮性能研究[J]，中国铁道科学，2018;39(1):75-81.

[8] 丛韬，韩建民，张关震，吴斯，张澎湃. 铁路车轮轮辋疲劳裂纹和踏面剥离掉块的微观伤损因素分析[J]，中国铁道科学，2017;38(5):93-99.

[9] Y. Liu, B. Stratman, S. Mahadevan. Fatigue crack initiation life prediction of railroad wheels[J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28(7):747-756.

[10] Y. Liu, L. Liu, S. Mahadevan. Analysis of subsurface crack propagation under rolling contact loading in railroad wheels using FEM[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2007,74(17):2659-2674.

[11] Y. Liu, L. Liu, B. Stratman, et al. Multiaxial fatigue reliability analysis of railroad wheels[J]. reliability Engineering & System Safety, 2008, 93(3):456-467.

基金项目：国家自然科学基金青年基金项目（11802011）

作者简介：刘小龙（1988 年-），男，讲师，主要研究方向：高速列车关键零部件超长寿命服役可靠性

通信联系人：刘小龙，讲师，主要研究方向：高速列车关键零部件超长寿命服役可靠性

E-mail：liuxiaolong@bjtu.edu.cn

万方数据