

【特邀稿】

列车车轮踏面滚动接触疲劳研究进展

王延朋¹, 丁昊昊¹, 邹强², 肖峰³, 张晓峰⁴, 王文健¹, 郭俊¹, 刘启跃¹

(1.西南交通大学 牵引动力国家重点实验室 摩擦学研究所, 成都 610031; 2.马鞍山钢铁股份有限公司 技术中心, 安徽 马鞍山 243000; 3.宝武集团马钢轨道交通材料科技有限公司, 安徽 马鞍山 243000; 4.太原重工轨道交通设备有限公司, 太原 030032)

摘 要: 随着高速与重载铁路的发展, 车轮踏面滚动接触疲劳损伤问题变得更加显著, 不仅影响乘车舒适度, 增加维护成本, 还会直接危害行车安全, 目前尚无根本的解决办法。对国内外车轮踏面滚动接触疲劳损伤的形成机理、研究方法及影响因素进行了归纳总结。车轮滚动接触疲劳损伤形式有很多, 根据疲劳裂纹在踏面下方萌生位置的不同, 将踏面滚动接触疲劳损伤分为表面滚动接触疲劳、次表面滚动接触疲劳和较深层次滚动接触疲劳。随着冶金和车轮制造技术的提高, 由低周疲劳或棘轮效应造成的表面滚动接触疲劳损伤成为主要的疲劳损伤类型。车轮踏面滚动接触疲劳损伤的研究方法主要包括现场调研、数值仿真和试验研究。结合已有研究成果, 主要从车轮材料、车轮既有损伤、线路条件、列车运行参数、轮轨间第三介质等方面对踏面滚动接触疲劳损伤的影响因素进行了总结, 并进一步提出了减缓踏面滚动接触疲劳损伤的具体措施。此外, 探讨了车轮踏面滚动接触疲劳损伤未来的研究方向。

关键词: 列车车轮; 滚动接触疲劳; 研究方法; 影响因素; 裂纹扩展

中图分类号: TH117.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)05-0120-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.05.015

Research Progress on Rolling Contact Fatigue of Railway Wheel Treads

WANG Yan-peng¹, DING Hao-hao¹, ZOU Qiang², XIAO Feng³,
ZHANG Xiao-feng⁴, WANG Wen-jian¹, GUO Jun¹, LIU Qi-yue¹

(1.Tribology Research Institute, State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2.Technology Center, Ma'an Shan Iron and Steel Co., Ltd, Ma'an Shan 243000, China; 3.Baowu Group Ma Steel Rail Transportation Material Technology Co., Ltd, Ma'an Shan 243000, China; 4.Taiyuan Heavy Industry Railway Transit Equipment Co., Ltd, Taiyuan 030032, China)

ABSTRACT: With the development of high-speed and heavy-haul railway, the rolling contact fatigue (RCF) damage of wheel treads has become a significant problem, which affects the riding comfort, increases the maintenance cost and even threatens the

收稿日期: 2019-10-30; 修订日期: 2020-04-09

Received: 2019-10-30; Revised: 2020-04-09

基金项目: 国家自然科学基金 (51775455, 51975489); 四川省国际科技创新合作项目 (2019YFH0094)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51775455, 51975489), Sichuan Science and Technology Program (2019YFH0094)

作者简介: 王延朋 (1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为车轮滚动接触疲劳损伤。

Biography: WANG Yan-peng (1993—), Male, Master, Research focus: rolling contact fatigue damage of wheel.

通讯作者: 王文健 (1980—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为轮轨系统服役行为。邮箱: wwj527@163.com

Corresponding author: WANG Wen-jian (1980—), Male, Doctor, Researcher, Research focus: wheel-rail system service performance. E-mail: wwj527@163.com

引文格式: 王延朋, 丁昊昊, 邹强, 等. 列车车轮踏面滚动接触疲劳研究进展[J]. 表面技术, 2020, 49(5): 120-128.

WANG Yan-peng, DING Hao-hao, ZOU Qiang, et al. Research progress on rolling contact fatigue of railway wheel treads[J]. Surface technology, 2020, 49(5): 120-128.

running safety of trains. So far, there is not a radical solution. The formation mechanism, research methods and influencing factors of RCF damage of wheel treads at home and abroad were summarized. There were many forms of RCF damage of railway wheels. According to the different initiation positions on wheel treads, the RCF cracks were classified into the surface-initiated, subsurface-initiated and large depth initiated RCF cracks. With the improvement of metallurgical and wheel manufacturing technology, the surface-initiated RCF cracks caused by low cycle fatigue or ratchet effect became the main type of damage of RCF damage. The research methods mainly included field, experimental and numerical studies. According to previous works, several influencing factors on RCF damage of the wheel treads were discussed, including the wheel material properties, existing surface damage and defects of wheel, rail conditions, locomotive operating parameters and third-body contaminants at the contact interface. Some specific measures were further put forward to reduce RCF damage of wheel treads. Furthermore, specific measures to reduce RCF damage of wheel treads were put forward. In addition, the future study direction of RCF damage of wheel treads was also proposed.

KEY WORDS: railway wheel; rolling contact fatigue; research methods; influencing factors; crack propagation

铁路交通以速度快、能耗低、运量大、安全性高等特点,成为我国重要的运输方式,并在国民经济发展中占据十分重要的位置。随着我国铁路高速化与重载化的推进,铁路运输已经达到了新的发展阶段。截止 2018 年底,我国高速铁路营业里程已达 2.9 万公里,占世界总里程的 2/3 以上。2014 年 4 月,大秦铁路成功组织实施了牵引质量 3 万吨重载列车运行试验,使我国成为世界上仅有的几个掌握 3 万吨铁路重载技术的国家之一。现场调研结果显示,CL60 和 ZL-B 车轮在大秦重载铁路列车(C_{76} 和 C_{80})上投入使用以来,相继出现严重的辗边、剥离和踏面圆周磨耗等问题,在轴重较大或线路平面条件不好的情况下尤为严重^[1]。随着速度与轴重的增加,轮轨滚动接触疲劳损伤也越来越严重,不仅影响乘车舒适度,增加检修与维护成本,而且直接危害行车安全。轮轨滚动接触疲劳一直是铁路行业中亟需解决的难题,国内外开展的相关研究有很多^[2-5],但目前尚未有根本的解决办法。

列车车轮是保障铁路车辆安全运行的重要部件,在运行过程中具有载重、导向、传递牵引力和制动力

的作用。因此,对车轮踏面滚动接触疲劳损伤进行系统研究和总结具有重要意义。本文综述了车轮踏面滚动接触疲劳的各种损伤形式与机理、相关研究方法以及影响因素,并探讨了车轮踏面滚动接触疲劳损伤的减缓方式和未来的研究方向。

1 车轮踏面滚动接触疲劳损伤分类与形成机理

轮轨滚动接触疲劳是指轮轨反复接触过程中发生在表面或亚表面材料的疲劳破坏,整个过程可分为裂纹萌生、裂纹早期生长、裂纹扩展和材料分离四个阶段^[6]。统计结果表明,车轮滚动接触疲劳损伤占有车轮损伤形式的 41%^[7],车轮踏面滚动接触疲劳损伤表现为周向裂纹、龟裂纹、麻点、起皮、剥离等。其中龟裂纹和剥离是较为严重的滚动接触疲劳损伤形式^[3,8],其形成过程主要为:表面微裂纹在较大的法向力和剪切力反复作用下,继续扩展成为龟裂纹,多条龟裂纹扩展、贯通形成剥离^[3]。图 1 给出了四种常见的车轮踏面滚动接触疲劳损伤形式。

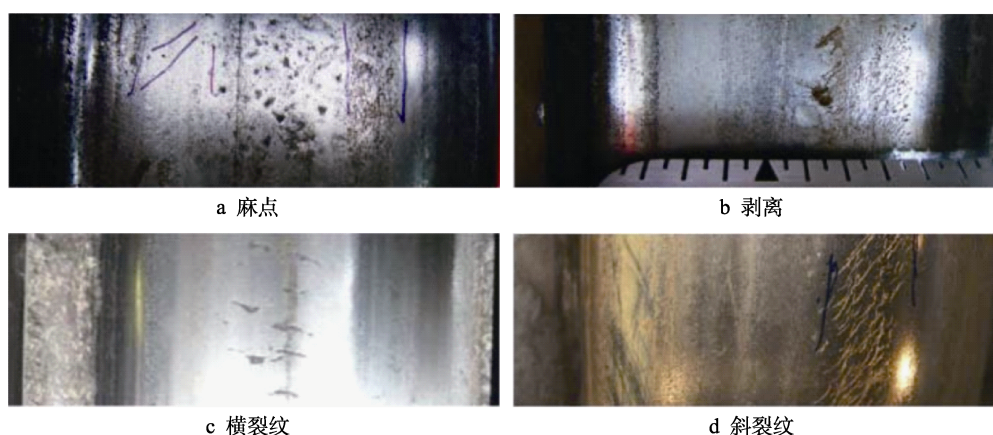


图 1 常见的车轮踏面滚动接触疲劳损伤形式^[8]

Fig.1 Common RCF damage forms of wheel treads^[8]: a) pitting; b) shelling; c) transverse cracks; d) angled cracks

根据现场观测,可将踏面滚动接触疲劳损伤分为局部滚动接触疲劳损伤(即剥离坑)和典型滚动接触疲劳损伤(即周向连续疲劳裂纹)两大类^[9]。踏面表面初始裂纹通常成周向分布,其中一部分浅层裂纹在车轮材料的磨损过程中会被去除,在踏面留下局部龟裂纹,严重的疲劳裂纹持续扩展生成剥离坑^[10]。Cong等^[11]认为滚动和滑动摩擦会造成表面材料塑性流动,使得循环应变区域产生滑移带,疲劳裂纹在滑移带萌生,并最终向表面扩展形成剥离。总之,踏面剥离是疲劳裂纹扩展、损伤加剧的结果。此外,擦伤引起的轮轨冲击和制动热引起的车轮材料相变也会诱发剥离的产生^[10]。

根据在垂直向上裂纹萌生位置的不同,可将车轮踏面滚动接触疲劳损伤分为三类:表面滚动接触疲劳、次表面滚动接触疲劳和较深层次滚动接触疲劳^[12-13]。踏面表面滚动接触疲劳裂纹主要由表面材料低周疲劳或棘轮效应导致,此类裂纹的扩展方式如图2所示。裂纹先与车轮踏面成小角度扩展,然后沿深度方向扩展,这一过程与表面材料的塑性变形方向一致,在到达一定深度后,裂纹发展为径向和周向分支裂纹。其中周向分支裂纹与其他表面裂纹贯通后,导致表面材料去除,形成剥离损伤。表面裂纹的分支位置与载荷有关,常见于踏面下方 0.5~5 mm 范围内^[13]。车轮次表面和较深层次滚动接触疲劳裂纹主要由夹杂物(如非金属氧化物)、空洞等缺陷带来的应力集中导致,裂纹的形成主要与材料缺陷深度、缺陷尺寸与形状、外部载荷等有关。次表面疲劳裂纹在踏面下方 3~10 mm 的范围内生成,并向下扩展至 20 mm 后,沿周向快速扩展,如图3所示,最终可能造成严重的轮辋损伤^[12-13]。较深层次的滚动接触疲劳裂纹萌生于踏面下方 10~30 mm 内,此类裂纹通常沿径向扩展,甚至会扩展至轴孔,造成车轮径向断裂^[12]。随着冶金和车轮制造技术的提高,车轮缺陷造成的疲劳损伤大大减少,表面滚动接触疲劳损伤成为研究者的关注重点。

根据分布区域和形成机理的不同,可将踏面表面连续型滚动接触疲劳裂纹细分为四类(图4)^[14-15],表1给出了四类裂纹的分布位置及诱发因素。其中,由于过曲线时,轮缘根部较大的蠕滑力会加剧车轮材料的磨损,因此第二类裂纹容易因磨损而减少。此外,第四类裂纹往往较浅,因此也容易因磨损而快速消失^[16]。

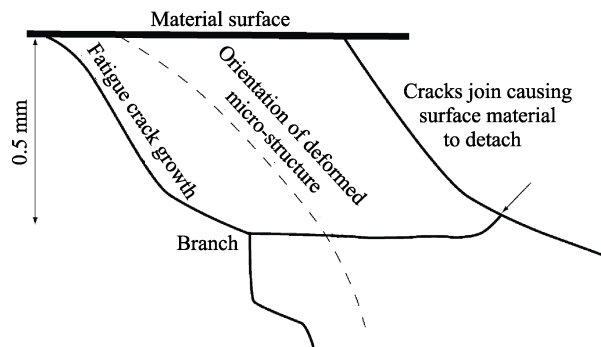


图2 车轮表面疲劳裂纹扩展示意图^[13]
Fig.2 Schematic diagram of growth of surface-initiated fatigue cracks in wheels^[13]

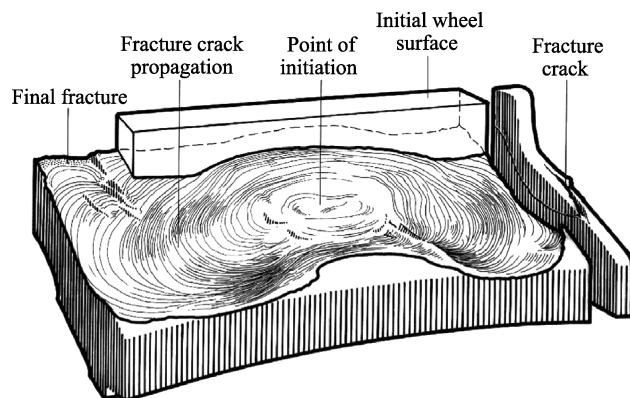


图3 次表面滚动接触疲劳损伤^[12]
Fig.3 Subsurface-initiated RCF damage^[12]

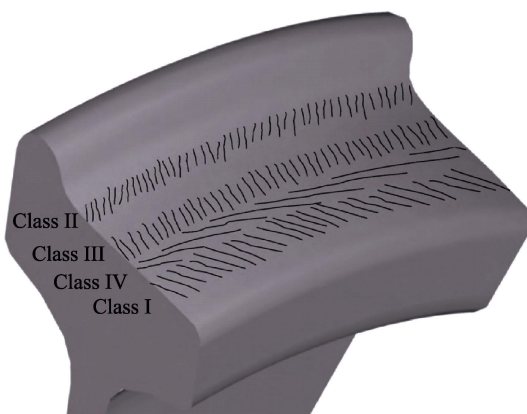


图4 踏面表面连续型滚动接触疲劳裂纹示例^[15]
Fig.4 Example of continuous RCF cracks on wheel tread^[15]

表1 踏面表面连续型滚动接触疲劳裂纹分类
Tab.1 Classification of continuous RCF cracks on wheel tread

Crack categories	Crack locations	The angle between the crack and the axle	Causes
Class I	The wider area outside the nominal rolling circle (NRC)	30°~45°	Periodic longitudinal and lateral creep force when curving
Class II	Root of rim	30°~60°	Periodic longitudinal and lateral creep force when curving
Class III	Around the NRC	0°~10°	Periodic longitudinal creep force
Class IV	The narrow area outside the NRC	70°~80°	Large lateral creep force

2 车轮踏面滚动接触疲劳研究方法

2.1 现场调研

通过现场调研可对车轮踏面滚动接触疲劳损伤的各种形貌进行梳理, 确定实际运行过程中轮轨接触关系的相关参数, 探讨各损伤形式发生的规律。现场轮轨参数的测量数据还可作为动力学仿真的输入参数, 从而计算牵引、制动、过曲线等不同工况下轮轨间的受力状态, 可作为进一步开展理论与试验研究的依据。

2.2 数值计算及仿真研究

轮轨材料的疲劳破坏主要是较大的轮轨接触应力反复作用的结果, 开展轮轨滚动接触疲劳研究离不开滚动接触应力的计算。图 5 所示的安定图给出了最大接触应力 p_0 、材料剪切屈服强度 k 和牵引系数 μ 三个参数下轮轨材料的响应状态, 其被广泛地应用于轮轨滚动接触疲劳损伤的预测。安定图可分为弹性状态、弹性安定、塑性安定和棘轮效应四个区域, 可使材料发生持续塑性变形的塑性安定和棘轮效应会导致滚动接触疲劳裂纹的萌生。但安定图没有考虑表面材料磨损对滚动接触疲劳的影响, 因此可以结合损伤函数或 Archard 磨损准则对预测模型进行补充^[17-18]。

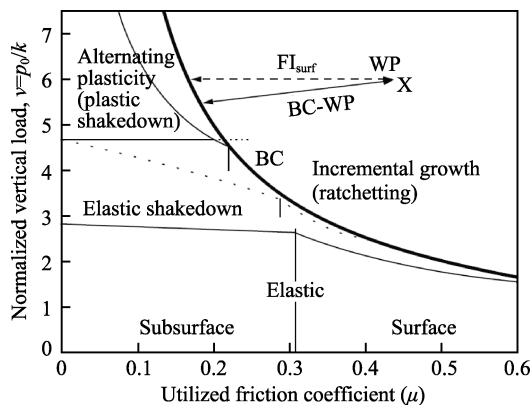


图 5 安定图^[4]
Fig.5 Shakedown map^[4]

在车辆动力学研究中, 基于三维弹塑性接触理论模型, 并考虑轮轨真实的几何型面、真实的边界条件、材料力学性能和摩擦接触边界条件后, 可以建立完整的力学模型, 确定轮轨的相对运动关系和作用力大小及方向。研究者们可通过数值计算或建立动力学仿真模型, 结合安定图和损伤函数建立车轮滚动接触疲劳损伤预测模型^[19-22]。此类模型由于考虑到了材料的磨损, 预测结果与实际运行情况较为符合。在研究复杂环境下的车轮滚动接触疲劳时, 需要考虑到轮轨界面第三介质 (包括水、砂等) 对疲劳的影响, 但目前仍缺乏考虑第三介质的轮轨疲劳损伤的预测模型。

有限元研究方法主要是和断裂力学理论相结合,

分析疲劳裂纹在周期性载荷作用下应力应变状态的变化, 进而对裂纹扩展及疲劳寿命进行预测。可以通过有限元软件建立二维或三维轮轨接触模型, 分析车轮踏面在不同接触条件下的应力、应变状态、裂纹扩展情况等^[23-30], 也可以利用有限元软件加入温度场, 研究热机耦合作用下车轮踏面的滚动接触疲劳损伤^[31-35]。

2.3 试验研究

模拟试验是研究轮轨疲劳损伤的一种重要手段^[36]。通过开展轮轨模拟试验, 并结合先进的表面测试技术, 可以分析各种因素对滚动接触疲劳损伤的影响, 评价各种材料的滚动接触疲劳性能, 揭示轮轨滚动接触疲劳损伤的形成机理。影响车轮踏面滚动接触疲劳损伤的因素有很多, 包括车轮的材料组织、磨损性能、既有损伤和缺陷等。此外, 列车速度、轴重、蠕滑率 (滑差)、钢轨曲线半径、表面粗糙度、第三介质、环境因素等对轮轨滚动接触疲劳性能也有很大影响。这些影响因素都可以通过设置不同的试验参数, 控制试验环境, 开展系统研究。相关研究成果将在后文进一步讨论。

现场调研、数值仿真和试验研究这三种主要的研究方法不是孤立存在的, 研究者们在开展相关研究的过程中往往结合多种研究手段来保证研究成果的科学性和可靠性。

3 车轮踏面滚动接触疲劳损伤的影响因素

3.1 车轮材料对滚动接触疲劳的影响

车轮材料的性能需要参照具体的国家或行业标准, 相关标准对材料强度、塑性变形能力、冲击性能等都有一定的要求。研究者们主要通过改变车轮材料的成分或金相组织来提高车轮的综合性能。传统车轮材料的微观组织为珠光体+先共析铁素体, 随着 C 含量的增加, 先共析铁素体含量降低, 珠光体平均片层间距减小, 车轮材料的硬度和强度升高, 但塑性和韧性降低^[37]。研究者们研究了不同 C 含量车轮的滚动接触疲劳性能并发现: C 含量的改变基本对车轮的滚动摩擦系数无影响, 但会改变车轮的损伤机制^[38-40]。王文健等^[38-39]开展了含碳量分别为 0.51%、0.53% 和 0.57% 的车轮与 U71Mn 热轧钢轨的滚动接触模拟试验, 结果表明, 随着 C 含量的增加, 车轮表面剥离损伤加剧。陈水友等^[40]开展了 C 含量为 0.51%~0.72% 不等的四种车轮与 U75V 热轧钢轨的滚动接触模拟试验, 研究表明, 随着 C 含量的增加, 车轮表面损伤从轻微剥离损伤向大剥离掉块转变。两项研究均表明降低 C 含量可减轻车轮的疲劳剥离损伤。这是由于 C 含量降低, 材料硬度降低, 塑形和韧性提高, 进而提

高抗疲劳性能;同时 C 含量降低会导致车轮材料耐磨性降低,车轮表面的疲劳裂纹易被磨掉,一定程度上缓解了滚动接触疲劳损伤。

车轮材料的磨损与疲劳相互影响、相互制约。关于车轮材料磨损与疲劳的研究有很多。Sciammarella 等^[41]对比了 6 种不同硬度车轮材料的磨损性能和滚动接触疲劳性能,研究发现,一定的磨损会去除车轮表面浅层的疲劳裂纹,减小裂纹尺寸,从而提高车轮材料的滚动接触疲劳性能。Cantini 等^[42]在车轮试样表面不同位置预置了深度为 1~3 mm 不等的裂纹,观测试验后试样的磨损和裂纹扩展情况,定量地分析了磨损速率与裂纹扩展速率的竞争关系,将剥离发生时踏面裂纹向下扩展的最大深度定义为车轮材料的疲劳极限,认为裂纹扩展速率与磨损速率相等的位置越靠近疲劳极限,对应的车轮材料抗剥离性能越好。根据磨损与疲劳裂纹之间的竞争关系,降低车轮材料的 C 含量有利于车轮表面疲劳裂纹的去除,缓解了滚动接触疲劳损伤。但 C 含量的降低会加剧车轮磨损,诱发轮缘磨损等问题。因此,确定车轮材料最佳的 C 含量仍需进一步研究。

车轮材料中的 Si 元素对组织性能也有很大影响。首先,添加适量 Si 元素可以提高车轮组织强度。拉伸试验结果表明, Si 含量每增加 0.4%, 车轮钢抗拉强度增加 50~60 MPa^[43]。这是由于固溶于铁素体中的 Si 元素会与铁素体晶格产生强烈的畸变,形成固溶强化,提高了车轮强度,但对塑性、韧性改变不大。Zeng 等^[44]通过增加 ER8 车轮材料中的 Si、Mn 含量、减少 Cr 含量来提高车轮材料的力学性能,相比 ER8 车轮,改进后的车轮碳含量较低,而硬度和强度较高,表现出更好的强韧性,但其磨损与滚动接触疲劳性能仍需进一步试验验证。其次, Si 元素的增加还会提高车轮奥氏体化温度,降低制动热和擦伤引起的踏面材料相变的几率,减少马氏体白层的形成,进而提高车轮踏面的滚动接触疲劳性能^[43,45]。

与传统的珠光体+铁素体组织的车轮材料相比,贝氏体车轮具有强度高、韧性好的特点。郑春雷等^[46]研究了无碳化贝氏体车轮的滚动接触疲劳性能,认为车轮表面严重的塑性变形层能有效阻止疲劳裂纹向深处扩展,从而提高车轮的滚动接触疲劳性能。但其研究结果主要对比了不同热处理条件下的无碳化贝氏体车轮,缺少同样试验条件下与传统车轮滚动接触疲劳性能的对比。此外, Gao 等^[47]研究发现,由于夹杂在珠光体-铁素体车轮中的贝氏体组织与基体材料有较大的硬度差,疲劳裂纹易在贝氏体组织边界萌生,因此贝氏体车轮的稳定性及可靠性仍需进一步验证。

3.2 车轮既有损伤对滚动接触疲劳的影响

车轮运行过程中会产生各种损伤,包括制动闸瓦的压痕、车轮打滑或抱死造成的擦伤、硬质物体引起

的硌伤等。在轮轨接触过程中,这些损伤会引起应力集中,加剧疲劳裂纹的萌生,降低踏面滚动接触疲劳寿命。Zhao 等^[48]研究了车轮表面球形硌伤坑对滚动接触疲劳性能的影响,球形硌伤坑下部材料的塑性变形不均匀、应力高,抗滚动接触疲劳性能较差,疲劳裂纹易在硌伤坑前端产生。Chen 等^[49]研究了制动造成的擦伤对滚动接触疲劳损伤的影响,擦伤会在车轮表面形成平面损伤区域,在车轮滚动过程中,平面损伤区域的冲击作用会加剧滚动接触疲劳损伤。试验结果表明,疲劳裂纹仅在平面损伤区域后端产生,与硌伤附近疲劳裂纹产生的位置不同,这可能是因为两种损伤的形貌差异对轮轨间接接触应力的影响不同所导致。两者^[48-49]的研究重点均在于,车轮踏面既有损伤在循环滚动过程中,损伤部位形貌和组织结构的变化,而对损伤车轮与钢轨接触时的受力状态分析不足。数值计算和仿真研究发现^[50],同一轮对上两车轮因磨损不均匀造成的轮径差过大,会加剧踏面法向载荷的冲击,诱发踏面滚动接触疲劳损伤的发生。三维轮轨接触有限元仿真表明,车轮材料缺陷和空洞附近易出现塑性变形和应力集中现象^[26-27],容易诱发疲劳裂纹的产生。由于轮轨间的作用力对车轮表层材料影响较大,材料缺陷和空洞越靠近踏面表面,其对滚动接触疲劳寿命的影响越明显^[23]。关于车轮材料缺陷和空洞对滚动接触疲劳损伤的影响研究主要停留在对损伤附近接触应力的计算与仿真,仍需开展进一步的试验验证。

3.3 线路条件对车轮滚动接触疲劳的影响

轨道与车轮踏面直接接触,其线路条件(包括轨道曲线半径、道岔、钢轨粗糙度等)也会影响车轮踏面的滚动接触疲劳损伤。何成刚等^[51]开展试验模拟车轮通过半径为 300、800、1200、2000 m 的曲线钢轨时车轮的疲劳损伤情况,通过在轮轨试样间设置一定的冲角来模拟列车经过曲线时的轮轨接触状态。随着线路曲线半径的减小,车轮试样的滚动接触疲劳损伤加剧。列车在过曲线过程中,车轮会与钢轨之间形成横向力,列车通过的曲线半径越小,车轮所受横向力越大,车轮踏面的磨损和滚动接触疲劳损伤会随之加剧。此外,横向力造成的塑性变形积累会加剧踏面中心位置的滚动接触疲劳损伤,而踏面外侧则以轻微磨损为主^[52]。进一步的研究表明,在横向力与切向力共同作用下,车轮表面产生的斜裂纹与所受合力的方向垂直,随着所受合力增加,车轮表面疲劳损伤加剧^[53]。Plet 等^[28]通过数值仿真发现车轮在经过道岔时,冲击力的波动达到 200 kN,过大的冲击力会加剧车轮踏面的滚动接触疲劳损伤。Nielsen 等^[54]的研究表明,钢轨表面粗糙度的增加不仅会加大车轮通过时的噪声,还会加剧车轮的滚动接触疲劳损伤。此外,数值计算和仿真结果表明,钢轨波浪形磨损会加剧轮轨法向冲击载荷,进而加剧列车车轮踏面的滚动接触疲劳

损伤^[55]。结合已有研究, 列车车轮在经过曲线、道岔、不平顺的钢轨时, 车轮与钢轨间剧烈的接触应力是诱发踏面滚动接触疲劳损伤的主要原因。

3.4 列车运行参数对车轮滚动接触疲劳的影响

列车的运行参数(牵引力、速度、轴重、滑差等)对车轮踏面的滚动接触疲劳损伤具有重要影响。轮轨间较大的牵引力会加快剥离损伤的产生, 高速动车组车轮踏面剥离的统计结果表明, 69%的剥离损伤出现在牵引机车轮对上^[9]。速度的提高也会加剧车轮滚动接触疲劳的损伤, 时速为 380 km/h 的列车车轮剥离发生率是时速为 250 km/h 列车车轮的 2.87 倍^[9]。He 等^[56]研究了 80、160、250、350 km/h 转速下的车轮疲劳损伤, 研究结果表明, 随着运行速度的提高, 车轮表面硬度降低, 滚动接触疲劳损伤加剧, 疲劳裂纹角度和长度均有所增加, 有向更深层扩展的趋势。随着轴重的增加, 轮轨界面法向力变大, 车轮踏面磨损和滚动接触疲劳损伤均明显加剧^[22,57]。胡军等^[24]利用 ANSYS 软件建立三维轮轨接触模型, 用以研究不同轴重(14、16、20、25 t)以及不同摩擦系数(0.05、0.10、0.20、0.30)条件下的疲劳损伤情况, 结果表明, 随着轴重和摩擦系数的增加, 疲劳裂纹扩展速度均会增加。随着摩擦系数的增加, 轮轨接触斑内剪切应力增大, 加剧了塑性变形层的周向滑移, 进而促进滚动接触疲劳裂纹的萌生^[58]。Ma 等^[59]通过开展不同滑差(0.17%~9.43%)下轮轨滚动模拟试验发现, 随着滑差的增加, 车轮磨损从轻微磨损向严重磨损转变, 表面损伤从轻微疲劳裂纹向剥离转变。Makino 等^[60]通过一系列轮轨模拟试验, 绘制了疲劳寿命与滑差、接触应力的关系图, 如图 6 所示, 随着接触应力和滑差的增加, 车轮的滚动接触疲劳寿命降低。对比试验和仿真结果, 牵引力、速度、轴重、摩擦系数和滑差的增加都会加剧车轮疲劳损伤, 其本质是直接或间接加大轮轨间切向力, 进而加速车轮表面疲劳裂纹的扩展。

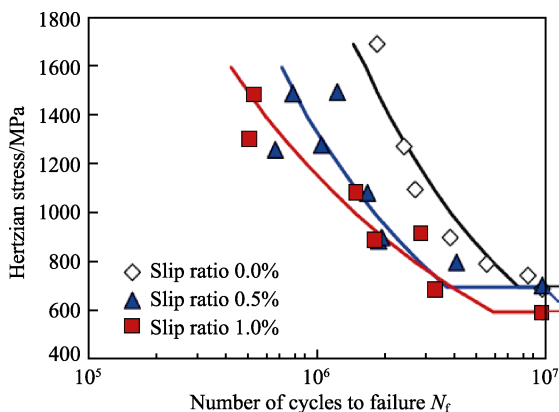


图 6 疲劳寿命与接触应力、滑差的关系^[60]

Fig.6 Relationship among fatigue life, contact stress and slip^[60]

轮轨廓形对轮轨间接触应力状态具有明显影响, 进而影响轮轨滚动接触疲劳损伤^[23]。王玉光等^[15]和陶功权等^[17]分别对 250 km/h 级动车组和 25G 型客车车辆进行跟踪测试, 根据跟踪测量的轮轨廓形等参数, 建立车辆-轨道耦合动力学模型, 来计算不同轮轨廓形匹配下的应力状态, 将此结果带入安定图和损伤函数模型, 进一步预测滚动接触疲劳裂纹的萌生。两者^[15,17]预测的车轮损伤与现场结果相近, 例如轮轨接触点的变动范围与现场车轮疲劳裂纹分布范围一致, 但由于忽略了轮轨廓形在服役过程中的变化过程, 且无法确定磨损与疲劳之间的定量关系, 因此疲劳寿命预测结果与实际寿命存在一定差异。Sakalo 等^[61-62]将轮轨间复杂的多轴应力状态等效为单轴应力状态, 由此建立了滚动接触疲劳寿命与等效接触应力之间的函数关系, 如公式(1)所示, 并进行了试验验证, 如图 7 所示。随着轮轨间接触应力的降低, 车轮疲劳寿命呈现增长趋势。

$$N = C \sigma_{\text{RCF}}^{-m} \quad (1)$$

式中: N 为滚动接触疲劳寿命; σ_{RCF} 为等效应力; C 、 m 为材料相关常数;

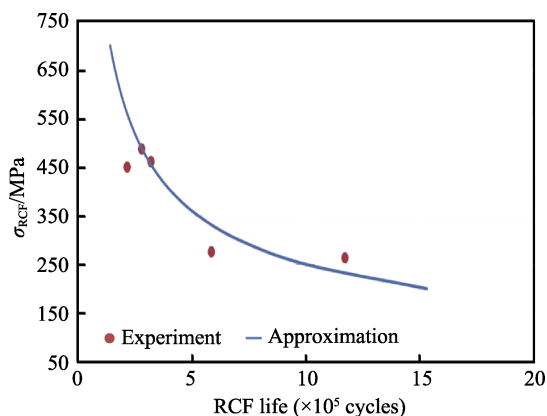


图 7 车轮滚动接触疲劳寿命曲线^[62]

Fig.7 Curve of RCF life for wheel^[62]

轮轨之间的滚滑状态和车轮的踏面制动都会产生大量的热, 引起踏面温升。轮轨接触有限元仿真^[31-35]表明, 热载荷的加入, 会降低车轮材料强度和车轮踏面滚动接触疲劳性能。存在于车轮表面的热裂纹与滚动接触疲劳裂纹连接、贯通, 会形成热机械耦合剥离 (TMS—thermal mechanical shelling), 降低车轮踏面滚动接触疲劳寿命。此外, 当制动热过高时, 会引起踏面材料奥氏体化, 然后迅速冷却产生马氏体白层 (WEL—white etching layer), 马氏体相中的残余应力及白层边缘的应力集中会导致疲劳裂纹的萌生, 加剧疲劳损伤的形成^[63-64]。

3.5 第三介质对车轮滚动接触疲劳的影响

第三介质(轮轨间的砂、磨屑、水、油、润滑剂、摩擦改性剂等)对车轮踏面的滚动接触疲劳损伤影响

显著。列车在行驶过程中,通过向轮轨间撒砂,增加粘着系数。但是,当砂粒在轮轨界面碾过时,会在轮轨表面产生应力集中,并留下凹坑,在后续服役过程中,凹坑会进一步发展成为疲劳损伤。通过现场调研发现,撒砂车轮踏面剥离损伤较为严重。对比二氧化硅含量为86%和99%两种机车用砂对车轮损伤的影响发现,提高机车用砂中二氧化硅的含量,有助于减少踏面滚动接触疲劳损伤^[20]。

轮轨间的液体介质对车轮疲劳损伤的影响较为复杂。Makino等^[60]结合试验和仿真结果建立了Hirakawa滚动接触疲劳损伤图,用以预测水态下的滚动接触疲劳损伤,新的预测模型可以准确预测低接触应力状态的车轮表面疲劳损伤,其结果较安定图预测模型更准确。Nia等^[61]通过数值计算发现,轮轨间的润滑剂会改善轮轨间的接触应力状态,使法向力分布更均匀,减少应力集中造成的滚动接触疲劳损伤。但这一结果并没有考虑液体润滑剂在裂纹中的“油楔效应”,即液体进入表面疲劳裂纹中,随着裂纹口在循环滚动过程中闭合,存在于裂纹中的液体在挤压作用下会加速裂纹扩展。Hardwick等^[66]系统地研究了水、油、不同成分的润滑剂、摩擦改性剂对轮轨滚动接触疲劳损伤的影响,水和低黏度的油基润滑剂会加剧轮轨的滚动接触疲劳损伤,降低轮轨的滚动接触疲劳寿命。轮轨间低黏度的液体更易进入车轮表面疲劳裂纹中,在“油楔效应”作用下加剧损伤,因此选择润滑剂、摩擦改性剂时,要考虑对轮轨滚动接触疲劳损伤的影响。

综上所述,车轮踏面滚动接触疲劳损伤的影响因素较为广泛,车轮材料、既有损伤、线路条件、运行参数及第三介质等均对疲劳裂纹有明显影响。目前,常用于减缓踏面滚动接触疲劳损伤的措施包括使用磨耗型踏面车轮,安装高性能防滑器,改变制动方式,优化黏着控制程序,改进车轮镟修工艺等。

4 总结与展望

轮轨滚动接触疲劳一直是铁路行业亟需解决的难题,至今尚未有根本解决的方案,本文对车轮踏面滚动接触疲劳损伤的形成机理、研究方法及影响因素进行了分析,为减缓轮轨疲劳损伤提供了重要的理论参考。

我国铁路分布广泛,遍布平原、山区、高原和沙漠等广阔地域,涵盖了高寒、高温、高湿、风沙等气候条件。我国特有的复杂服役环境对车轮材料的滚动接触疲劳性能影响较大,未来可开展复杂环境下轮轨滚动接触疲劳试验,考虑环境因素对车轮材料性能的影响,研究车轮踏面疲劳损伤机理和损伤转变过程,并据此提出预防和减缓车轮疲劳损伤的方法和措施,为保证我国铁路在复杂服役环境下的可靠运行提供理论支持。

此外,未来可系统开展针对车轮材料的疲劳试验,定量研究裂纹扩展和磨损之间的竞争关系,改进疲劳裂纹扩展模型,为车轮疲劳寿命预测提供数据支撑。

参考文献:

- [1] 周清跃,刘丰收,朱梅,等. 轮轨关系中的硬度匹配研究[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(5): 35-41.
ZHOU Qing-yue, LIU Feng-shou, ZHU Mei, et al. Research on hardness matching in wheel-rail system[J]. China railway science, 2006, 27(5): 35-41.
- [2] 金学松,沈志云. 轮轨滚动接触疲劳问题研究的最新进展[J]. 铁道学报, 2001, 23(2): 92-108.
JIN Xue-song, SHEN Zhi-yun. Rolling contact fatigue of wheel/rail and its advanced research progress[J]. Journal of the China Railway Society, 2001, 23(2): 92-108.
- [3] 金学松,张继业,温泽峰,等. 轮轨滚动接触疲劳现象分析[J]. 机械强度, 2002, 24(2): 250-257.
JIN Xue-song, ZHANG Ji-ye, WEN Ze-feng, et al. Overview of phenomena of rolling contact fatigue of wheel/rail [J]. Journal of mechanical strength, 2002, 24(2): 250-257.
- [4] EKBERG A, ÅKESSON B, KABO E. Wheel/rail rolling contact fatigue-probe, predict, prevent[J]. Wear, 2014, 314: 2-12.
- [5] 封亚明,何柏林. 铁道车辆轮轨滚动接触疲劳的影响因素[J]. 表面技术, 2016, 45(11): 48-54.
FENG Ya-ming, HE Bo-lin. Influence factors of railway vehicle wheel/rail contact fatigue[J]. Surface technology, 2016, 45(11): 48-54.
- [6] TUNNA J, SINCLAIR J, PEREZ J. A review of wheel wear and rolling contact fatigue[J]. Part F: Journal of rail and rapid transit, 2007, 221: 271-289.
- [7] BEVAN A, MOLYNEUX B P, EICKHOFF B, et al. Development and validation of a wheel wear and rolling contact fatigue damage model[J]. Wear, 2013, 307: 100-111.
- [8] BERRY P M, BEVAN A. Wheel surface damage: Relating the position and angle of forces to the observed damage patterns[J]. Vehicle system dynamics, 2012, 50: 335-347.
- [9] ZHAO X, AN B, ZHAO X G, et al. Local rolling contact fatigue and indentations on high-speed railway wheels: Observations and numerical simulations[J]. International journal of fatigue, 2017, 103: 5-16.
- [10] ZHANG G Z, REN R M. Study on typical failure forms and causes of high-speed railway wheels[J]. Engineering failure analysis, 2019, 105: 1287-1295.
- [11] CONG T, HAN J M, HONG Y S, et al. 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.
- [12] EKBERG A, SOTKOVSKI P. Anisotropy and rolling contact fatigue of railway wheels[J]. International journal of fatigue, 2001, 23: 29-43.
- [13] EKBERG A, KABO E. Fatigue of railway wheels and rails under rolling contact and thermal loading-an overview

- [J]. Wear, 2005, 258: 1288-1300.
- [14] DEUCE R. Wheel tread damage—An elementary guide [M]. [S. l.]: Bombardier Inc or its Subsidiaries, 2007.
- [15] 王玉光, 卢纯, 赵鑫, 等. 高速动车组车轮滚动接触疲劳观测与模拟研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(4): 150-157.
WANG Yu-guang, LU Chun, ZHAO Xin, et al. Rolling contact fatigue of Chinese high speed wheels: Observations and simulations[J]. Journal of mechanical engineering, 2018, 54(4): 150-157.
- [16] 卢纯. 高速动车组车轮踏面滚动接触疲劳的萌生机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
LU Chun. A study on rolling contact fatigue of high-speed EMU wheels[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [17] 陶功权, 王衡禹, 赵鑫, 等. 基于轮轨关系的车轮踏面损伤机理研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(18): 24-29.
TAO Gong-quan, WANG Heng-yu, ZHAO Xin, et al. Research on wheel tread damage mechanism based on interaction of wheel and rail[J]. Journal of mechanical engineering, 2013, 49(18): 24-29.
- [18] ENBLOM R, STICHEL S. Industrial implementation of novel procedures for the prediction of railway wheel surface deterioration[J]. Wear, 2011, 271: 203-209.
- [19] DIRKS B, ENBLOM R. Prediction model for wheel profile wear and rolling contact fatigue[J]. Wear, 2011, 271: 210-217.
- [20] DIRKS B, ENBLOM R, BERG M. Prediction of wheel profile wear and crack growth-comparisons with measurements[J]. Wear, 2016, 366-367: 84-94.
- [21] LIU Y F, JIANG T, ZHAO X, et al. On the wheel rolling contact fatigue of high power AC locomotives running in complicated environments[J]. Wear, 2019, 436-437: 202956.
- [22] 李霞, 温泽峰, 金学松. 重载铁路车轮磨耗与滚动接触疲劳研究[J]. 铁道学报, 2011, 33(3): 28-34.
LI Xia, WEN Ze-feng, JIN Xue-song, et al. Investigation into wheel wear and fatigue of heavy-haul railway[J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(3): 28-34.
- [23] KWON S J, LEE D H, SEO J W, et al. Failure analysis for power car wheels based on contact positions and tread slope[J]. Engineering failure analysis, 2017, 80: 1-10.
- [24] 胡军, 赵运磊, 陈珏. 基于 ANSYS 的轮轨滚动接触疲劳裂纹萌生研究[J]. 机械设计与制造, 2013(4): 153-155.
HU Jun, ZHAO Yun-lei, CHEN Jue. Study on fatigue crack initiation for wheel-rail rolling contact based on ANSYS [J]. Machinery design & manufacture, 2013(4): 153-155.
- [25] 魏康, 何柏林, 杨宜景. 基于 ANSYS 的车轮材料特性对轮轨接触应力的影响[J]. 表面技术, 2015, 44(5): 123-128.
WEI Kang, HE Bo-lin, YANG Yi-jing, et al. Effect of wheel material properties on wheel-rail contact stress based on ANSYS[J]. Surface technology, 2015, 44(5): 123-128.
- [26] GUAGLIANO M, VERGANI L. Experimental and numerical analysis of sub-surface cracks in railway wheels[J]. Engineering fracture mechanics, 2005, 72: 255-269.
- [27] 邓永权, 梁红琴, 蔡慧, 等. 考虑车轮材料空洞的高速轮轨接触应力分析[J]. 机械科学与技术, 2016, 35(6): 933-938.
DENG Yong-quan, LIANG Hong-qin, CAI Hui, et al. Stress analysis of high-speed wheel-rail contact with wheel material cavity considered[J]. Mechanical science and technology for aerospace engineering, 2016, 35(6): 933-938.
- [28] PLETZ M, DAVES W, OSSBERGER H. A wheel set/crossing model regarding impact, sliding and deformation-explicit finite element approach[J]. Wear, 2012, 294-295: 446-456.
- [29] 郭伟杰. 高速动车组车轮疲劳裂纹研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2016.
GUO Wei-jie. Research on wheel fatigue crack of high-speed EMU[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016.
- [30] 于荣泉. 车轮踏面滚动接触疲劳损伤研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
YU Rong-quan. Study on rolling contact fatigue of wheel tread[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [31] CAPRIOLI S. Short rolling contact fatigue and thermal cracks under frictional rolling—A comparison through simulations[J]. Engineering fracture mechanics, 2015, 141: 260-273.
- [32] KATO T, KATO H, MAKINO T. Effect of elevated temperature on shelling property of railway wheel steel[J]. Wear, 2016, 366-367: 359-367.
- [33] CHANDAK N, YEDE M, MALVIYA P, et al. Analysis of railway wheel to study crack initiation due to thermal loading and calculating life cycle[J]. Materials today: Proceedings, 2017, 4: 2454-2463.
- [34] ESMAEILI A, WALIA M S, HANDA K, et al. A methodology to predict thermomechanical cracking of railway wheel treads: From experiments to numerical predictions [J]. International journal of fatigue, 2017, 105: 71-85.
- [35] WALIA M S, ESMAEILI A, VERNERSSON T, et al. Thermomechanical capacity of wheel treads at stop braking: A parametric study[J]. International journal of fatigue, 2018, 113: 407-415.
- [36] 刘启跃, 何成刚, 黄育斌, 等. 轮轨疲劳损伤模拟实验研究及展望[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(2): 281-290.
LIU Qi-yue, HE Cheng-gang, HUANG Yu-bin, et al. Research and prospects of simulation experiment on wheel/rail fatigue damage[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(2): 281-290.
- [37] 温鹏, 单际国, 邱志雄, 等. 大功率机车车轮材料微观组织对性能的影响[J]. 金属热处理, 2012, 37(5): 6-10.
WEN Peng, SHAN Ji-guo, QIU Zhi-xiong, et al. Effect of microstructure on properties of high-power locomotive wheel steels[J]. Heat treatment of metals, 2012, 37(5): 6-10.
- [38] 王文健, 汪洪, 刘启跃. 车轮材料对轮轨滚动摩擦磨损行为的影响[J]. 西南交通大学学报, 2013, 45(5): 909-914.
WANG Wen-jian, WANG Hong, LIU Qi-yue. Effect of wheel material on rolling friction and wear behaviors of wheel/rail rollers[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, 45(5): 909-914.

- versity, 2013, 45(5): 909-914.
- [39] 王文健, 刘启跃. 轮轨滚动接触疲劳与磨损耦合关系及预防措施研究[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(4): 137-139.
WANG Wen-jian, LIU Qi-yue. Study on the coupling relationship between the rolling contact fatigue and the wear of wheel-rail and prevention measures[J]. China railway science, 2009, 30(4): 137-139.
- [40] 陈水友, 刘吉华, 郭俊, 等. 车轮材料对轮轨磨损与疲劳性能影响的研究[J]. 摩擦学学报, 2015, 35(5): 531-537.
CHEN Shui-you, LIU Ji-hua, GUO Jun, et al. Effect of wheel material characteristics on wear and fatigue property of wheel-rail[J]. Tribology, 2015, 35(5): 531-537.
- [41] SCIAMMARELLA C A, CHEN R J S, GALLO P, et al. Experimental evaluation of rolling contact fatigue in railroad wheels[J]. International journal of fatigue, 2016, 91: 158-170.
- [42] CANTINI S, CERVELLO S. The competitive role of wear and RCF: Full scale experimental assessment of artificial and natural defects in rail way wheel treads[J]. Wear, 2016, 366-367: 325-337.
- [43] 潘涛, 李丽, 马跃, 等. 抗剥离车轮钢的合金设计及 Si 元素对抗剥离性能的影响[J]. 钢铁, 2009, 44(8): 67-71.
PAN Tao, LI Li, MA Yue, et al. Chemistry design of spalling-resistant wheel steels and the effect of Si addition on spalling resistance[J]. Iron and steel, 2009, 44(8): 67-71.
- [44] ZENG D F, LU L T, GONG Y H, et al. Optimization of strength and toughness of railway wheel steel by alloy design[J]. Materials and design, 2016, 92: 998-1006.
- [45] ZENG D F, LU L T, GONG Y H, et al. Influence of solid solution strengthening on spalling behavior of railway wheel steel[J]. Wear, 2017, 372-373: 158-168.
- [46] 郑春雷, 张福成, 吕博, 等. 无碳化物贝氏体钢的滚动接触疲劳磨损行为[J]. 机械工程学报, 2018, 54(4): 176-185.
ZHENG Chun-lei, ZHANG Fu-cheng, LV Bo, et al. Rolling contact fatigue wear behavior of carbide-free bainitic steel[J]. Journal of mechanical engineering, 2018, 54(4): 176-185.
- [47] GAO B, TAN Z, LIU Z, et al. Influence of non-uniform microstructure on rolling contact fatigue behavior of high-speed wheel steels[J]. Engineering failure analysis, 2019, 100: 485-491.
- [48] ZHAO X J, GUO J, LIU Q Y, et al. Effect of spherical dents on microstructure evolution and rolling contact fatigue of wheel/rail materials[J]. Tribology international, 2018, 127: 520-532.
- [49] CHEN Y Z, HE C G, ZHAO X J, et al. The influence of wheel flats formed from different braking conditions on rolling contact fatigue of railway wheel[J]. Engineering failure analysis, 2018, 93: 183-199.
- [50] KARTTUNEN K, KABO E, EKBERG A. Numerical assessment of the influence of worn wheel tread geometry on rail and wheel deterioration[J]. Wear, 2014, 317: 77-91.
- [51] 何成刚, 周桂源, 王娟, 等. 曲率半径对车轮滚动接触疲劳性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2014, 34(3): 256-261.
HE Cheng-gang, ZHOU Gui-yuan, WANG Juan, et al. Effect of curve radius of rail on rolling contact fatigue properties of wheel steel[J]. Tribology, 2014, 34(3): 256-261.
- [52] ZHOU G Y, HE C G, WEN G, et al. Fatigue damage mechanism of railway wheels under lateral forces[J]. Tribology international, 2015, 9: 160-169.
- [53] HE C G, HUANG Y B, MA L, et al. Experimental investigation on the effect of tangential force on wear and rolling contact fatigue behaviors of wheel material[J]. Tribology international, 2015, 92: 307-316.
- [54] NIELSEN J C O, EKBERG A. Acceptance criterion for rail roughness level spectrum based on assessment of rolling contact fatigue and rolling noise[J]. Wear, 2011, 271: 319-327.
- [55] EKBERG A, KABO E, NIELSEN J C O, et al. Subsurface initiated rolling contact fatigue of railway wheels as generated by rail corrugation[J]. International journal of solids and structures, 2007, 44: 7975-7987.
- [56] HE C G, GUO J, LIU Q Y, et al. Experimental investigation on the effect of operating speeds on wear and rolling contact fatigue damage of wheel materials[J]. Wear, 2016, 364-365: 257-269.
- [57] HUANG Y B, SHI L B, ZHAO X J, et al. On the formation and damage mechanism of rolling contact fatigue surface cracks of wheel/rail under the dry condition[J]. Wear, 2018, 400-401: 62-73.
- [58] ZAKHAROV S M, GORYACHEVA I G. Rolling contact fatigue defects in freight car wheels[J]. Wear, 2005, 258: 1142-1147.
- [59] MA L, HE C G, ZHAO X J, et al. Study on wear and rolling contact fatigue behaviors of wheel/rail materials under different slip ratio conditions[J]. Wear, 2016, 366-367: 13-26.
- [60] MAKINO T, KATO T, HIRAKAWA K. The effect of slip ratio on the rolling contact fatigue property of railway wheel steel[J]. International journal of fatigue, 2012, 36: 68-79.
- [61] SAKALO V, SAKALO A, TOMASHEVSKIY S, et al. Computer modelling of process of accumulation of rolling contact fatigue damage in railway wheels[J]. International journal of fatigue, 2018, 111: 7-15.
- [62] SAKALO V, SAKALO A, RODILOV A, et al. Computer modeling of processes of wear and accumulation of rolling contact fatigue damage in railway wheels using combined criterion[J]. Wear, 2019, 10: 432-433.
- [63] AHLSTROM J. Residual stresses generated by repeated local heating events-modelling of possible mechanisms for crack initiation[J]. Wear, 2016, 366-367: 180-187.
- [64] KATO T, SUGETA A, NAKAYAMA E. Investigation of influence of white layer geometry on spalling property in railway wheel steel[J]. Wear, 2011, 271: 400-407.
- [65] NIA S H, CASANUEVA C, STICHEL S. Prediction of RCF and wear evolution of iron-ore locomotive wheels[J]. Wear, 2015, 338-339: 62-72.
- [66] HARDWICK C, LEWIS R, STOCK R. The effects of friction management materials on rail with pre-existing RCF surface damage[J]. Wear, 2017, 384-385: 50-60.