

铁道车辆轮轨接触疲劳的影响因素

封亚明, 何柏林

(华东交通大学 机电工程学院, 南昌 330013)

摘要: 随着铁路客货运量的增大和列车速度的提高, 使得高速铁路的轨道必然比普通线路具有更高的安全性、可靠性和平顺性, 为保证轨道结构的这些要求, 轨道各部件的力学性能、使用性能和组成结构的整体性能都比普通轨道部件高, 但在高速铁路轨道上仍然存在很多问题。目前, 轮轨接触疲劳是最常见的轮轨问题, 国内外许多学者对此做了研究。导致机车车辆轮轨接触疲劳的因素有很多, 指出了当下一些常见的轮轨接触疲劳损伤形式, 同时对滚动接触疲劳的影响因素进行了简要分析。为了研究疲劳损伤产生、发展的机理和影响因素, 通过查阅大量资料, 了解了各种常见损伤的产生和发展机理, 并总结了在该领域的研究方向与热点, 同时指出了当下高速铁路建设中存在的技术难题。结合轮轨接触疲劳的失效形式和磨损的特点, 从材料对踏面的影响、高速与重载对轮轨接触疲劳的影响、润滑剂对轮轨裂纹增长的影响等方面, 进一步提出预防和减缓钢轨接触疲劳损伤的具体措施。

关键词: 轮轨接触损伤; 材料; 高速与重载; 润滑剂; 接触疲劳; 裂纹增长

中图分类号: TG405 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)11-0048-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.11.007

Influence Factors of Railway Vehicle Wheel/Rail Contact Fatigue

FENG Ya-ming, HE Bo-lin

(College of Mechanical and Electrical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

ABSTRACT: With the increase of train speed as well as passenger and freight volume, high-speed rail track is inevitably required to provide higher level of security, reliability and smoothness than ordinary lines. In order to guarantee these requirements of track structure, mechanical properties, usability and overall structural performance of the various track components shall be much higher than that of ordinary track components. However, a lot of problems are still present in the high-speed railway track. Currently, wheel/rail contact fatigue is the most common problem in the wheel-rail issues. Many domestic and foreign scholars have made efforts in study such problem. Locomotive wheel/rail contact fatigue is caused by various factors. Some common existing forms of wheel-rail contact fatigue damage were pointed out in this article. Meanwhile, influence factors of the rolling contact fatigue were briefly analyzed. In order to study the fatigue damage generation&development mechanism and influence factors, generation&development mechanism of various common damages were understood by referring to mass data.

收稿日期: 2016-01-22; 修订日期: 2016-05-06

Received: 2016-01-22; Revised: 2016-05-06

基金项目: 江西省自然科学基金(20151BAB206007)

Fund: Supported by the Natural Science Foundation of Jiangxi(20151BAB206007)

作者简介: 封亚明(1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为材料疲劳。

Biography: FENG Ya-Ming(1992—), Male, Master, Research focus: material fatigue.

通讯作者: 何柏林(1962—), 男, 教授, 硕士生导师, 研究方向: 材料强度与断裂。

Corresponding author: HE Bo-lin(1962—), Male, Professor, Master tutor, Research focus: Material strength and fracture.

In addition, the research directions and focuses in this field were introduced and existing technical problems in current high-speed railway construction were put forward as well. By combining failure mode with wear characteristics, specific measures were further put forward to prevent and reduce steel rail contact fatigue from aspects including impact of materials on tread, impact of high speed and heavy load on the wheel/rail contact fatigue, lubricants on wheel/rail crack growth.

KEY WORDS: wheel/rail contact damage; materials; high speed and heavy load; lubricant; contact fatigue; crack growth

高速铁路以其安全、运行速度快和运输能力大等优点在现代交通中占有重要地位。随着列车速度和载荷的增加, 轮轨滚动接触疲劳引起的失效问题也随之成为影响铁路运输安全的重要因素。欧洲对高速铁路系统的研究较早, 但也避免不了重大事故的发生, 据统计, 在提高列车速度和载荷后, 英国铁路断轨事故急剧上升, 为此英国投入了大量资金研究解决方案。2000 年 10 月 17 日, 一辆从伦敦开往利兹的高速列车在 185 km/h 的速度下通过曲线路段时发生出轨事故, 整个列车后 8 节车厢脱轨, 造成非常严重的后果。经相关部门调查获知, 该事故是由于钢轨疲劳引起断裂造成的, 可以判定钢轨裂纹基本上是由于已经存在的损伤引起疲劳裂纹而造成的^[1-5]。

列车在高速通过曲线段轨道时, 由于曲线轨道的结构和受力特点不同于直线轨道, 使得外侧钢轨受力增大, 从而导致列车在通过曲线轨道时, 轮轨的磨损和疲劳损伤比直线时的更严重, 接触应力受离心力的影响也会增加, 从而增加疲劳裂纹的扩展^[6-8]。轮轨接触的摩擦副是列车行驶过程中的关键部分, 列车的制动和牵引都是靠轮轨间的作用力才得以实现, 由于轮轨接触面积较小, 轮轨之间的载荷都集中在接触面上, 使钢轨承受纵向和横向的作用力, 在一定的循环次数下, 导致钢轨产生各种各样的伤损, 如压溃、断轨和磨损, 甚至产生轮轨材料疲劳损伤失效, 其中断轨是这些损伤中最严重的, 而产生这些伤损的主要原因是钢轨萌生滚动接触疲劳裂纹^[9-14]。由于轮轨间的循环应力, 导致组织塑性变形能力和疲劳性能降低, 以至于各小裂纹相联贯通, 从而产生初期裂纹, 在一定的损伤累积后, 出现接触疲劳损伤。

国内外许多学者从实验和仿真两个方面对轮轨接触疲劳作用下裂纹萌生机理进行了研究, 但是一般轮轨接触疲劳的研究实验不能完全模拟列车在运行过程中的真实条件, 只能单一地模拟某些影响因

素。因此各国的学者对滚动接触疲劳损伤机理还没有形成统一的结论, 对高速铁路轮轨滚动接触疲劳损伤的研究缺乏系统的研究成果, 在轮轨防损方面也缺乏系统性^[15]。由此可见, 研究如何减轻高速铁路轮轨滚动接触疲劳, 并提出相应的解决措施具有巨大的经济意义与科学价值。本文综述了铁道车辆轮轨接触疲劳一些常见的影响因素, 并探讨了未来轮轨接触问题的高速轮轨防损对策的研究方向。

1 材料对轮轨接触疲劳的影响

轮对的工作方式是在钢轨上做蠕滑运动, 车轮通过一个较小的接触面积将载荷传递给钢轨, 因此轮轨的化学成分、热处理方式等对车轮的接触疲劳性能都有一定的影响。陈水友等人^[16]讨论了车轮材料特性对轮轨磨损与疲劳性能的影响, 并指出车轮组织的主要成分是少量铁素体和珠光体, 铁素体环绕在珠光体晶界附近, 随着碳质量分数的增加, 珠光体所占比例随之增加, 珠光体中的渗碳体片层间距随之减小, 稠密度升高, 因此材料的强度和硬度上升。Rstock 等人^[17]研究了珠光体钢和贝氏体钢的钢轨, 发现钢轨的耐疲劳性能和珠光体硬度等级有很大关系, 而贝氏体硬度则影响不大, 比较同等硬度的珠光体钢轨和贝氏体钢轨, 发现贝氏体钢轨的耐疲劳性更高而耐磨性更低。王文建等人^[18]讨论了在相同材料和不同材料下轮轨对磨产生的轮轨形貌损伤差异, 指出相同钢轨对磨时, 随着车轮材料碳含量的增加, 车轮磨损量降低, 钢轨磨损量略有增加, 但是轮轨总磨损量呈现减小趋势; 车轮和钢轨磨损量与车轮硬度之间存在一定的线性关系。不同车轮材料对磨钢轨时, 轮轨表面损伤形貌具有较大差异。

Takikawa 等人^[19]研究了钢轨曲线段轨头裂纹的模拟试验, 发现表面裂纹的形成受材料硬度的影响。何柏林等人^[20]基于 ANSYS 软件分析了车轮材

料特性对轮轨接触应力的影响,指出车轮材料的弹性模量对轮轨接触应力有明显的影响,最大 Mises 应力随着车轮材料的弹性模量的增加而增加,而车轮材料的泊松比对轮轨接触应力的分布影响不大。曾东方等人^[21-22]研究了成分变化与车轮材料力学性能和轮轨摩擦副滚动接触磨损性能之间的关系,研究表明在常规高速车轮材料中提高强度和抗磨损性能,可以通过提高碳的质量分数来实现,但材料塑韧性下降;在保持材料塑韧性基本不变的前提下,在高速车轮材料中适当地增加 Si 和 Mn 含量,降低 Cr 含量,能大幅度地提高材料强度和抗磨损性能;滚滑条件下,车轮材料应变硬化程度的高低对车轮材料的抗磨损性能影响很小;钢轨材料的磨损率与对应车轮硬度近似呈线性增加关系。纪菲菲等人^[23]研究了微量元素对钢轨性能的影响,研究表明 Nb 元素可以提高钢的强度,同时也可以提高钢的韧性,是一种较理想的合金元素。张向龙等人^[24]使用 MMS-2A 微机控制摩擦磨损试验机对 3 种含碳量不同的车轮材料分别与 U71Mn 热轧钢轨进行匹配试验,研究其磨损与接触疲劳性能并进行微观形貌分析,研究结果表明,轮轨硬度比随着车轮含碳量的提高而增大,而车轮磨损量逐渐降低,与之对应的钢轨磨损量则逐渐增加。

车轮接触疲劳损伤的影响因素主要表现在材料自身以及外部条件。对材料本身而言,可以运用真空熔炼技术在冶金工业中的应用。避免在车轮原材料的生产过程中渗入不利杂质,并且加入一些有利元素来降低渗碳体在材料中的含量,对珠光体-铁素体的硬度比等进行有效控制。在注意这些因素的前提下,利用对车轮表面进行喷丸处理、渗碳、渗氮等方法,并采用适当硬度和韧性的材料可以有针对性地提高车轮的滚动接触疲劳寿命^[25-28]。

2 高速与重载对轮轨接触疲劳的影响

随着我国铁路事业的发展,高速铁路凭借其安全高效、能耗低、对环境影响小等优点在现代交通中占有不可或缺的地位。研究结果表明^[29-30],列车在行驶过程中速度高于 120 km/h 时,车轮与钢轨之间的磨损随着车速和载荷的增加而增加,而且在高速列车的制动过程中,轮轨间会产生大量的摩擦热,这将加剧轮轨间的疲劳、剥离等失效问题。

由于钢轨轨顶内侧轨距角处于重复轮轨载荷作用下,导致接触疲劳裂纹的产生并逐渐扩展,成为钢轨断裂的主要原因之一^[31-34]。滚动接触疲劳损伤类型随着列车运行速度的提高也在不断发生变化,以至于高速列车载荷的大小,运行速度的快慢,直接成为影响接触疲劳损伤的重要因素。

高速对钢轨的损伤主要是轮轨接触疲劳,轮轨接触疲劳是指列车在行驶过程中,钢轨与车轮之间发生反复作用的过程,钢轨表面或次表面将产生微裂纹,随着这个过程的持续,这些微裂纹将会继续扩展,最终导致表面大块剥离,甚至发生断裂^[35]。国内外众多学者分析研究了轮轨接触疲劳的成因,但是对其产生机理的说法不一。Eadie D T^[36]指出轮轨间的滚动接触疲劳损伤大多是由于切向力引起轮轨表面材料塑性流动而产生的。Dubourg M C 等人^[37]认为,滚动接触疲劳裂纹形成的原因主要是因为过载或重载,而这些裂纹的形成也和剪切应力有关。王文建^[38]等人研究了钢轨滚动接触疲劳损伤与磨损之间的作用关系,结果表明铁路钢轨疲劳损伤与磨损之间存在相互竞争与相互制约的关系:当钢轨失效形式为严重磨损时,疲劳损伤较轻;当失效形式为严重疲劳损伤时,磨损相对轻微。钢轨磨损对疲劳裂纹扩展具有抑制和减缓作用,实际中减轻钢轨的疲劳损伤可以通过增加磨损率来达到,提高磨损率也有利于延长钢轨的疲劳裂纹扩展寿命。Ringberg J W^[39]认为,材料的塑性对钢轨表面短裂纹的增长也有很大影响。对于轨道,它主要出现在高负荷和接触面积小的部位,即高铁外轨的曲线部位,这些地方的滚动接触疲劳一般表现为次表面起源型疲劳和表面起源型疲劳。次表面起源型疲劳是指在滚动接触载荷作用下,表面下某一深度开始出现显微裂纹,并向接触表面扩展,最后产生剥离甚至断裂现象。Lundberg 等人^[40]假设位于表面下某一深度处的最大正交剪切应力导致了裂纹的产生,还进一步假设裂纹形成于表面下的晶格位错,由于接触应力引起的组织变化,导致微裂纹的产生,最终由微裂纹扩展、连通并造成疲劳剥落或者断裂,但一般情况下这一过程需要很长时间,即疲劳寿命很长;表面损伤引起的失效形式主要是表面起源型疲劳,表面缺陷对滚动接触疲劳的影响也很大,主要表现在材料缺陷的形状、材料硬度、磨损等,这些缺陷都可作为材料开裂的起始点。

重载对钢轨的损伤主要有侧磨、剥离掉块、钢轨压溃等，这些损伤都伴随着严重的磨损，而磨损对表面疲劳裂纹的形成具有十分重要的影响。钟雯等人^[41]研究了不同材料的表面磨损和疲劳情况，试

验将试样沿垂直滚动方向剖开，在 SEM 下观察剖面与磨痕表面交界处的疲劳裂纹扩展，结果见图 1，证明了在铁路钢轨疲劳损伤与磨损之间表现为相互竞争与相互制约的关系。

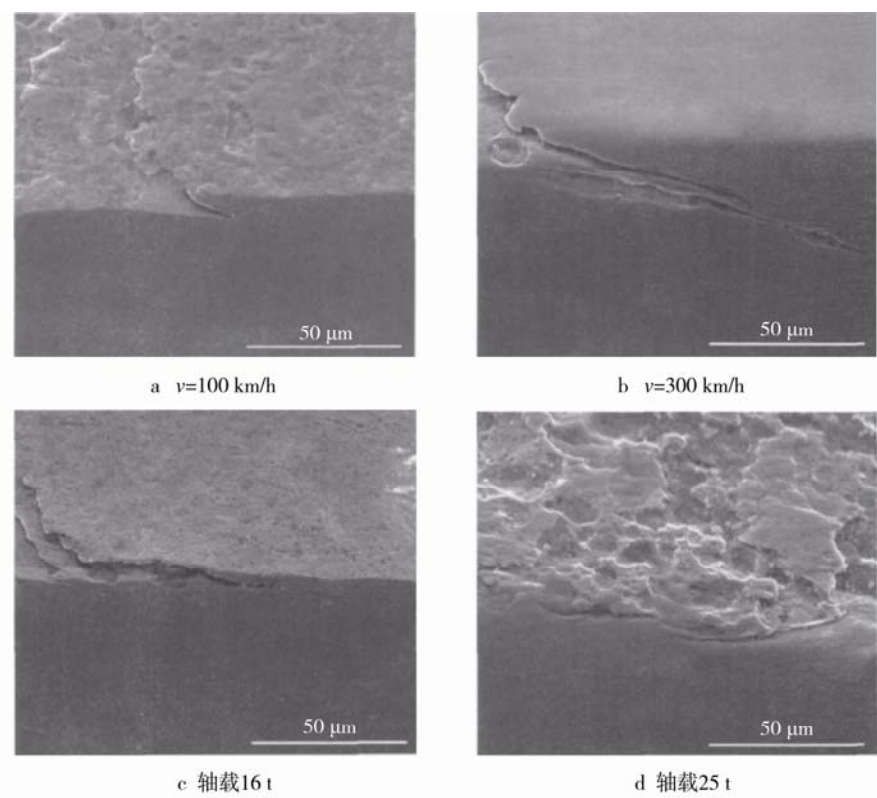


图 1 钢轨试样疲劳裂纹 SEM 照片
Fig.1 SEM micrographs of fatigue cracks at rail specimens

所以在选择钢轨材料时应考虑重载和高速等问题。在重载条件下，一般从减轻钢轨侧磨及钢轨波磨的形成等方面考虑，选用强度高、抗压溃性和耐磨性强的钢轨材料。而对于高速钢轨材料的选择，应考虑减轻高速铁路钢轨的疲劳损伤，要求钢轨材料的韧性较大，材质具有较好的抗疲劳性能。张伟等人^[42]在研究钢轨滚动接触疲劳的基础上提出了从改善工作状况、优化轮轨型面和提高轮轨强度等方面来减缓滚动接触疲劳。

3 润滑剂对轮轨接触疲劳的影响

表面裂纹扩展有不同的机理，但大多强调裂纹扩展的润滑量。润滑的范围很宽，包括所有可能进入裂缝的流体问题，如水、油脂、石油等。

Fernandez Rico J E 等人^[43—45]研究了在系统中存在润滑剂对滚动接触疲劳寿命的影响，试验结

果表明：润滑剂对滚动接触疲劳寿命的影响很大，在同一种油系列中，润滑油的黏度越高，滚动疲劳寿命也越高。边疆等人^[46]讨论了润滑剂对轮轨摩擦与磨损的影响，指出在轮轨系统中存在润滑油、二硫化钼锂基脂等润滑剂，系统的疲劳寿命明显升高，润滑剂使轮轨系统的摩擦因数大幅降低，并且可以保持摩擦因数稳定。但对表面已经存在裂纹的钢轨来说，轮轨间存在润滑剂的危害性更大。在车轮反复作用于钢轨的情况下，润滑剂易进入表面裂纹的缝隙之间，在润滑剂的挤压作用下，将会加速裂纹的扩展^[47]。Bower^[48]认为裂纹通常发生在材料表面，并在有摩擦力及润滑条件存在的状态下，裂纹形成之后，在第三介质的影响下，会受到介质对裂纹的进一步挤压，使得裂纹加剧扩展。刘园等人^[49]研究了液体渗入钢轨表面裂纹对铁路造成的影响，研究表明在轮轨中使用润滑剂可以降低钢轨的磨损率，在某些方

面减缓了裂纹的扩展,但是当润滑剂渗入裂纹面间后,可能会促进裂纹的扩展,在相应的钢轨管理维修时,应综合考虑这两方面的因素。

王步康等人^[50]讨论了润滑剂对表面微观裂纹尖端及接触区域的影响,指出只要裂纹中存在润滑剂,就会对裂纹的应力强度因子产生影响,并会提高应力强度因子,但影响程度有差异,水的影响最大,矿物油次之,油脂的影响最小。颀敏杰等人^[51]讨论了润滑剂对金属接触疲劳寿命的影响,指出润滑剂对金属接触疲劳寿命的影响表现出一定的规律性:润滑剂的摩擦系数和磨斑直径越小,则润滑性能、抗磨性能越好,其抗疲劳性能也越好。刘启跃等人^[52]分析了高速与重载铁路钢轨损伤与预防技术差异,指出高速钢轨尽量不要采用轮轨润滑技术预防损伤,应采取轮轨旋修的方式消除和抑制轨面损伤。由此可见,润滑剂是滚动疲劳寿命中的一个重要影响因素,合理地使用润滑剂可以大大提高轮轨的疲劳寿命。

4 曲率半径对轮轨接触疲劳的影响

列车驶过曲线路段时,列车车轮外侧将会对曲线外轨形成冲击角,导致列车在通过曲线路段时轮轨的疲劳性能比直线路段更差,这使得钢轨的滚动接触疲劳更容易出现在曲线外侧的轨头踏面以及轨顶角处,根据裂纹出现的位置以及裂纹的走向,大致可以把钢轨破坏形式分为麻点剥落、剥离和断裂^[15]。麻点剥落也叫点蚀破坏,通常出现在表面接触应力较小或者摩擦力较大的地方,但深度一般都在0.2 mm以下,传统的打磨方法可以有效地减轻这种破坏。当裂纹产生以后,随着循环应力的持续,裂纹进一步扩展,导致裂纹贯穿成块而剥离。陈明韬^[53]在研究钢轨滚动磨损模拟试验中指出,在曲率半径较小时,车轮表面出现的压溃现象容易发展为剥离掉块。当裂纹走向与轨面成大角度时,裂纹不断深入钢轨表面,以至于形成纵向水平裂纹扩展,造成钢轨断裂。何成刚等人^[54]研究了曲率半径对轮轨接触疲劳的影响,实验表明,曲率半径越小,车轮试样的疲劳裂纹扩展越快,并且裂纹在循环应力的作用下更容易向下扩展,从而形成钢轨断裂。如何避免裂纹朝纵向扩展是一个重要的问题,这直接关系到铁路行车的安全。

5 总结

随着列车速度的提升,载重的增加,轮轨之间面临的问题也越来越多。本文列举了一些常见的铁道车辆钢轨的损伤形式,有些问题甚至还没有被触及,如气候的影响、腐蚀和疲劳的相互作用等。轮轨损伤问题一直都是国内外学者研究的热点,但是大多数对轮轨防损的研究还停留在损伤影响因素的分析和数值预测方面,因此后续工作可以研究高速下轮轨接触区材料的变化,科学地认识发生损伤的机理,从而找到减轻滚动接触疲劳的方法,着手于研究高速轮轨防损的机理和特点,在此基础上提出应力腐蚀、轮轨硬度匹配等其他轮轨接触问题的高速轮轨防损对策。

参考文献:

- [1] 黄文轩. 润滑剂添加剂应用指南[M]. 北京: 中国石化出版社, 2003.
HUANG Wen-xuan. Lubricant Additive Application Guide[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2003.
- [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 Its Advanced Research Progress[J]. Journal of the China Railway Society, 2001, 23(2): 92—108.
- [3] BERNASCOIN A, FILIPPINI M, FOLETTI S, et al. Multiaxial Fatigue of a Railway Wheel Steel under Non-proportional Loading[J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28(5-6): 663—672.
- [4] DONZELLA G, FACCOLI M, MAZZ A, et al. Progressive Damage Assessment in the Near-surface Layer of Railway Wheel-rail Couple under Cyclic Contact[J]. Wear, 2011, 271(1): 408—416.
- [5] TARAF M, OUSSOUADDI O, ZEGHOUL A et al. Numerical Analysis for Predicting the Rolling Contact Fatigue Crack Initiation in a Railway Wheel Steel[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2010, 43(3): 585—593.
- [6] 钟雯, 王文健, 胡家杰, 等. 曲率半径对钢轨滚动接触疲劳性能的影响[J]. 西南交通大学学报, 2009, 44(2): 254—257.
ZHONG Wen, WANG Wen-jian, HU Jia-jie. Effect of Curve Radius on Rolling Contact Fatigue Properties of Rails[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2009, 44(2): 254—257.
- [7] BEMASCONI A, DAVOLI P, FILIPPINI M, et al. An Integrated Approach to Rolling Contact Sub-surface Fatigue Assessment of Railway Wheels[J]. Wear, 2005, 258: 973—980.
- [8] 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): 256—261.
HE Cheng-gang, ZHOU Gui-yuan, WANG Juan, et al.

- Affect the Contact Fatigue Performance of the Radius of Curvature of the Scroll Wheel[J]. Tribology 2014 (34): 256—261.
- [9] RINGSBERG J W, LOO MORREY M, JOSEFSON B L, et al. Prediction of Fatigue Crack Initiation for Rolling Contact Fatigue[J]. International Journal of Fatigue, 2000, 22(3): 205.
- [10] 刘学文, 邹定强, 邢丽贤, 等. 钢轨踏面斜裂纹损伤原因及对策的研究[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(2): 82.
LIU Xue-wen, ZOU Ding-qiang, XING Li-xian, et al. Cause of Rail Tread Oblique Crack and Countermeasure[J]. China Railway Science, 2004, 25(2): 82.
- [11] JIANG Yan-yao. A Fatigue Criterion for General Multiaxial Loading[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2000, 23(1): 19.
- [12] CANNON D, PRADIER H. Rail Rolling Contact Fatigue Research by the European Rail Research Institute[J]. Wear, 1996, 191(1-2): 1—13.
- [13] 钟雯. 钢轨的损伤机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011
ZHONG Wen. Experimental Investigation of Rail Damage Mechanism[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [14] 丁昊昊, 王文健, 郭俊, 等. 轴重对轮轨材料滚动磨损与损伤行为影响[J]. 材料工程, 2015(10): 35—41.
DING Hao-hao, WANG Wen-jian, GUO Jun, et al. Axle Load of the Rolling Wheel and Rail Wear and Material Damage Behavior[J]. Materials Engineering, 2015 (10): 35—41.
- [15] 肖乾, 方骏. 铁道车辆轮轨滚动接触疲劳裂纹研究综述[J]. 华东交通大学学报, 2015(32): 16—21.
XIAO Qian, FANG Jun. Railway Vehicle Wheel/Rail Rolling Contact Fatigue Crack Research Review[J]. Journal of East China Jiaotong university, 2015(32): 16—21.
- [16] 陈水友, 刘吉华. 车轮材料特性对轮轨磨损与疲劳性能影响的研究[J]. 摩擦学学报, 2015(35): 532—533.
CHEN Shui-you, LIU Ji-hua. The Influence of Material Properties on the Wheel/Rail Wear and Fatigue Performance Study[J]. Journal of Tribology, 2015(35): 532—533.
- [17] STOCK R, PIPPAN R. RCF and Wear in Theory and Practice-The Influence of Rail Grade on Wear and RCF[J]. Wear, 2011(271): 125—133.
- [18] 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, 48(5): 910—914.
WANG Wen-jian, WANG Hong, LIU Qi-yue. Wheel Material Impact on the Wheel/Rail Rolling Friction and Wear Behavior[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, 48(5): 910—914.
- [19] Takikawa M, Iriya Y. Laboratory Simulations with Twin-disc Machine on Head Check[J]. Wear, 2008, 265(9): 1300—1308.
- [20] 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—127.
WEI Kang, HE Bo-lin, YANG Yi-jing. Wheel Material Properties Based on ANSYS Influence on Wheel/Rail Contact Stress[J]. Surface Technology, 2015, 44(5): 123—127.
- [21] 曾东方, 鲁连涛, 张远彬. 高速轮轨材料匹配的滚动接触磨损性能[J]. 机械工程学报, 2013(9): 183—189.
ZENG Dong-fang, LU Lian-tao, ZHANG Yuan-bin. High Speed Wheel/Rail Rolling Contact Material Matching the Wear Performance[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013(9): 183—189.
- [22] 曾东方, 鲁连涛, 张远彬. 合金含量对高速车轮材料滚动接触磨损性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2012(3): 599—605.
ZENG Dong-fang, LU Lian-tao, ZHANG Yuan-bin. Alloy Content on the Properties of High-speed Wheel Material Rolling Contact Wear Effect[J]. Journal of tribology, 2012(3): 599—605.
- [23] 纪菲菲. 添加微量合金元素的钢轨钢的性能与研究[J]. 济南大学学报, 2001, 15(4): 364—365.
JI Fei-fei. Add Trace Alloy Elements of the Performance of the Rail Steel and the Research[J]. Journal of Jinan university, 2001, 15(4): 364—365.
- [24] 张向龙, 钟雯, 蒋文娟. 轮轨材料匹配摩擦学试验研究[J]. 润滑与密封, 2011(36): 20—23.
ZHANG Xiang-long, ZHONG Wen, JIANG Wen-juan. The Wheel/Rail Material Matching Tribology Experiment Research[J]. Lubrication and Sealing, 2011(36): 20—23.
- [25] 胡团结, 王志. 材料对铁道车辆车轮踏面接触疲劳的影响[J]. 科技展望, 2015(24): 87—89.
HU Tuan-jie, WANG Zhi. Material Contact Fatigue of Wheel Tread of Railway Vehicles Influence[J]. Science and Technology, 2015(24): 87—89.
- [26] 林丽, 李国禄. 基体表面异质材料滚动接触疲劳性能与失效机理的研究进展[J]. 表面技术, 2015, 44(3): 111—117.
LIN Li, LI Guo-lu. Research Progress Heterogeneous Material Substrate Surface Rolling Contact Fatigue Behavior and Failure Mechanism[J]. Surface Technology, 2015, 44(3): 111—117.
- [27] 钟雯, 赵雪芹, 王文建, 等. PD3 与 U71Mn 钢轨疲劳裂纹扩展特性研究[J]. 中国机械工程, 2008, 19(14): 1740—1743.
ZHONG Wen, ZHAO Xue-qin, WANG Wen-jian, et al. Study on Growth Behavior of Fatigue Crack of PD3 and U71Mn Rail[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(14): 1740—1743.
- [28] 刘启跃, 周仲荣. 受制动滚动钢摩擦副的摩擦特性研究[J]. 机械工程学报, 2003, 39(7): 55—67.
LIU Qi-yue, ZHOU Zhong-rong. Investigation of Friction Characteristic of Steels under Rolling Sliding Contion[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(7): 55—67.
- [29] 沈志云. 轮轨接触力学研究的最新进展[J]. 中国铁道科学, 2001, 22(2): 1—14.
SHEN Zhi-yun. The Latest Progress in the Study of Wheel/Rail Contact Mechanics[J]. China Railway Science, 2001, 22(2): 1—14.
- [30] 张斌. 铁路车轮、轮箍踏面剥离的类型及形成机理[J]. 中国铁道科学, 2001, 22(2): 73—78.

- ZHANG Bin. Railway Wheel, Tire Tread Types and Formation Mechanism of the Stripping[J]. China Railway Science, 2001, 22 (2): 73—78.
- [31] 马允先. 钢轨接触疲劳裂纹的产生与防治[J]. 上海铁道科技, 2002(4): 41.
- MA Yun-xian. Rail contact Fatigue Cracks and Prevention [J]. Journal of Shanghai Railway Science and Technology, 2002(4): 41
- [32] 曹世豪, 江晓禹, 文良华. 轴重和摩擦力对轮轨接触疲劳的影响[J]. 表面技术, 2013(6): 10—14.
- CAO Shi-hao, JIANG Xiao-yun, WEN Liang-hua. Influence on Axle Load and Friction Wheel Rail Contact Fatigue[J]. Surface Technology, 2013(6): 10—14.
- [33] GARRIDO M A. Influence of the Deposition Techniques on the Mechanical Properties and Microstructure of NiCrBSi Coatings[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008(204): 304—312.
- [34] JUNJI M, SASAK Y, EUKUHARA S I, et al. Surface Modification of Cr3C2-NiCr Cermet Coatings by Direct-diode Laser[J]. Technical Note, 2006(80): 1400—1405.
- [35] 陈颜堂, 刘冬雨, 方鸿生. 钢轨钢的滚动接触疲劳[J]. 钢铁研究学报, 2000, 12(5): 50—54.
- CHEN Yan-don, LIU Dong-yu, FANG Hong-sheng. Rolling Contact Fatigue of Rail Steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2000, 12(5): 50—54.
- [36] EADIE D T, ELVIDGE D, OLDFKNOW K, et al. The Effects of Top of Rail Friction Modifier on Wear and Rolling Contact Fatigue: Full-scale Rail-wheel Test Rig Evaluation, Analysis and Modelling[J]. Wear, 2008, 265 (9/10): 1222—1230.
- [37] DUBOURG M C, VILLECHAISE B. Analysis of Multiple Fatigues Cracks-part I Theory[J]. ASME, Journal of Tribology, 1992, 144: 455—461.
- [38] 王文健, 郭俊, 刘启跃. 磨损对钢轨滚动接触疲劳损伤的影响[J]. 机械工程材料, 2010(34): 17—20.
- WANG Wen-jian, GUO Jun, LIU Qi-yue. Wear Influence on Rail Rolling Contact Fatigue Damage[J]. Journal of Mechanical Engineering Materials, 2010(34): 17—20.
- [39] RINGBERG J W. Shear Made Growth of Short Surface-breaking RCF Cracks[J]. Wear, 2005, 258: 955—963.
- [40] 梁华, 郭浩, 王煜哲. 滚动轴承接触疲劳失效的分析方法[J]. 轴承, 2015, 9: 26—29.
- LIANG Hua, GUO Hao, WANG Yu-zhe. The Analysis Method of the Rolling Bearing Contact Fatigue Failure[J]. Bearing, 2015, 9: 26—29.
- [41] 钟雯, 董霖, 王宇. 高速与重载铁路的疲劳磨损对比研究[J]. 摩擦学学报, 2012, 32(1): 99—100.
- ZHONG Wen, DONG Lin, WANG Yu. Comparative Study on the Fatigue Wear of High-speed and Heavy-load Railway[J]. Journal of Tribology, 2012, 32(1): 99—100.
- [42] 张伟, 郭俊, 刘启跃. 钢轨滚动接触疲劳研究[J]. 润滑与密封, 2005(6): 195—199.
- ZHANG Wei, GUO Jun, LIU Qi-yue. Rail Rolling Contact Fatigue Study[J]. Lubrication and Sealing, 2005(6): 195—199.
- [43] FERNANDEZ R, HERNANDEZ B, GARCIA C. Rolling Contact Fatigue in Lubricated Contacts[J]. Tribology International, 2003, 36: 35—40.
- [44] TANTEI P S, BHATTACHARYA A K, RAMASESHA S K. Synthesis and Properties of MoSi₂ Based Engineering Ceramics[J]. Chem Sci, 2001, 113(5): 633—649.
- [45] ZHANG Hou-an, LIU Xin-yu, CHEN Ping, et al. Dry Friction and Wear Properties of Intermetallic MoSi₂[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2001, 11(60): 916—919.
- [46] 边疆, 蒋文娟, 王彩芸. 润滑剂对轮轨摩擦与磨损的影响[J]. 润滑与密封, 2012, 37(4): 70—72.
- BIAN Jiang, JIANG Wen-juan, WANG Cai-yun. Lubricant Effect on Friction and Wear of Wheel and Rail[J]. Lubrication and Sealing, 2012, 37(4): 70—72.
- [47] CANNON D F, PRADIER H. Rail Rolling Contact Fatigue Research by the European Rail Research Institute[J]. Wear, 1996, 191: 1—13.
- [48] BOWER A F. The Influence of Crack Face Friction and Trapped Fluid on Surface Initiated Rolling Contact Fatigue Cracks[J]. ASME Journal of Tribology, 1988, 110: 704—711.
- [49] 刘园. 液体对轮轨滚动接触疲劳作用下的钢轨表面裂纹扩展机理的影响[J]. 上海海事大学学报, 2011(32): 65—69.
- LIU Yuan. Liquid under the Action of the Wheel/Rail Rolling Contact Fatigue of Rail Surface Crack Growth Mechanism of the Effect of [J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2011(32): 65—69.
- [50] 王步康, 董光能, 谢友柏. 润滑材料特性对接触疲劳裂纹的影响[J]. 润滑与密封, 2002, 6(2): 4—5.
- WANG Bu-kang, DONG Guang-neng, XIE You-bo. Characteristics of Lubricating Materials on Contact Fatigue Crack[J]. Lubrication and Sealing, 2002, 6(2): 4—5.
- [51] 颜敏杰, 朱文静, 蒲晓琴. 润滑油及添加剂对金属接触疲劳寿命的影响[J]. 石油商技, 2011, 1(8): 44—47.
- JIE Min-jie, ZHU Wen-jing, PU Xiao-qin. Lubricating Oil and Additives on the Influence of the Contact Fatigue Life of Metal[J]. Journal of Oilman, 2011, 1(8): 44—47.
- [52] 刘启越, 王文建, 周仲荣. 高速与重载铁路钢轨损伤及预防技术差异研究[J]. 润滑与密封, 2007, 32(11): 12—14.
- LIU Qi-yue, WANG Wen-jian, ZHOU Zhong-rong. High Speed Difference with Overloaded Railway Rail Damage and Prevention Technology Research[J]. Lubrication and Sealing, 2007, 32(11): 12—14.
- [53] 陈明韬. 钢轨滚动磨损模拟试验与计算分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- CHEN Ming-tao. Simulation Experiment and Calculation Analysis of Rolling Wear of Rail Steel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.
- [54] 何成刚, 周桂源, 王娟. 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—361.
- HE Cheng-Gang, ZHOU Gui-yuan, WANG Juan. Effect of Curve Radius of Rail on Rolling Contact Fatigue Properties of Wheel Steel[J]. Tribology, 2014, 34(3): 256—361.