

某铁路钢轨伤损及其形成机理研究

杨大巍¹, 邓 勇¹, 董雪娇^{1,2}, 赵吉中³

(1. 攀钢集团研究院有限公司, 钒钛资源综合利用国家重点实验室, 四川 攀枝花 617000; 2. 四川攀研检测技术有限公司, 四川 攀枝花 617000; 3. 西南交通大学力学与航空航天学院, 四川 成都 610031)

摘 要: 钢轨伤损制约着轮轨接触稳定, 影响行车安全。针对某铁路钢轨在线服役中产生的伤损, 采用 Axio Observer 5m 金相显微镜、Empyrean 型 X 射线衍射仪、Sigma 500 型扫描电镜、FALCON 500 显微硬度计进行多方位检验, 基于有限元仿真技术重现了车轮异常启动状况下的钢轨接触部位瞬时温度场分布。分析结果表明: 该钢轨伤损属于典型擦伤, 伤损深度超过 2 mm, 钢轨伤损部位随着踏面深度的增加, 马氏体含量逐渐减少, 残余奥氏体含量逐渐增多, 导致其对应的显微硬度值逐渐降低。残余奥氏体被马氏体组织包围, 增加微裂纹继续扩展的阻力, 钝化裂纹尖端, 在轮轨表层剪切应力共同作用下, 为微裂纹扩展提供通道, 诱导微裂纹横向扩展, 最终导致钢轨擦伤区域剥离破坏。计算机仿真结果与实际伤损特征基本吻合。

关键词: 钢轨; 剥离破坏; 马氏体; 微裂纹; 有限元模拟

中图分类号: TF76, U213.4

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2022)04-0184-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2022.04.028

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听
语
音
与
作
者
互
动
聊
科
研

Analysis on typical rail damage of high speed railway

Yang Dawei¹, Deng Yong¹, Dong Xuejiao^{1,2}, Zhao Jizhong³

(1. Pangang Group Research Institute Co., Ltd., State Key Laboratory for Comprehensive Utilization of Vanadium and Titanium Resources, Panzhihua 617000, Sichuan, China; 2. Sichuan Panyan Testing Technology Co., Ltd., Panzhihua 617000, Sichuan, China; 3. School of Mechanics and Aerospace Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: Rail damage restricts the stable contact between wheel and rail and affects the driving safety. Regarding the damage of a railway rail in on-line service, the multi-directional inspections had been carried out by using Axio observer 5m metallographic microscope, Empyrean X-ray diffractometer, sigma 500 scanning electron microscope and Falcon 500 microhardness tester. Based on the finite element simulation technology, the instantaneous temperature field distribution of the rail contact part under the abnormal starting condition of the wheel was reproduced. The analysis results show that the rail damage is a typical scratch with a damage depth of more than 2 mm. With the increase of tread depth, the volume fraction of martensite gradually decreases and the volume fraction of retained austenite gradually increases, so that the corresponding microhardness value gradually decreases. The retained austenite is surrounded by martensite structure, which increases the resistance to the continuous propagation of microcracks and passivates the crack tip. Under the joint action of wheel rail surface shear stress, it provides a channel for microcrack propagation, induces microcrack transverse propagation, and finally leads to peeling failure in rail scratch area. The computer simulation results are agreement with the actual damage characteristics.

Key words: rail, debonding failure, martensite, microcrack, finite element simulation

收稿日期: 2021-05-18

基金项目: 四川省科技计划资助项目 (2020ZDZX0011)。

作者简介: 杨大巍 (1989—), 男, 陕西富平人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事金属材料基础研究工作, E-mail: 875368174@qq.com。

0 引言

随着我国铁路运输高速化、重载化进程的推进,轮轨服役环境日益严苛,钢轨表面各类伤损也越来越严重。据统计,我国每年轮轨更换和维修费用高达80多亿人民币,由轮轨突发性破坏造成列车脱轨事故的损失更是无法统计^[1]。研究发现,当列车在异常启动或紧急制动状况下,当牵引力和制动力超过了粘着力时,车轮和钢轨接触面间容易发生打滑或者纯滑动现象,该状况会导致轮轨出现较高的接触温升,温升达到一定时会使车轮和钢轨材料产生相变,从而导致轮轨表面产生裂纹,造成钢轨表面的擦伤和剥离破坏^[2-3]。还有学者认为,擦伤白层组织为纳米晶体心四方(BCT)马氏体及铁素体,不含面心立方(FCC)的奥氏体,并排除了白层中的马氏体是热作用机制下的产物,白层组织中纳米结构和渗碳体结构的溶解则进一步说明了塑性变形机制才是形成白层及白层中马氏体的驱动力,即揭示了滚动摩擦白层的形成是依靠塑性变形机制进行的^[4]。一般地,紧急制动造成的钢轨伤损是在钢轨踏面出现沿行车方向的长条形擦痕,而异常启动造成的钢轨伤损特征是在钢轨踏面形成椭圆形的擦伤疤^[5]。

轮轨摩擦热具有瞬时性、不可测性等特征,无形间提高了相关性研究难度,针对这一特征,研究学者通过引入计算机仿真技术,重现了轮轨异常接触中的热响应,仿真手段的介入对该领域的高效精准研究得到了国内外专家学者们的一致认可。吴磊、温泽峰等^[6]基于有限元法和非稳态传热方程,建立了车轮在钢轨上原地打滑时轮轨摩擦热分析模型,分析了车轮打滑速度对钢轨接触斑附近温度场的影响;苏航、潘涛等^[7]将有限元热力耦合-温度场分析与材料相变特征的试验研究相结合,研究了高速度、大载荷条件下的轮/轨摩擦热影响区的相变过程,并探讨了材料对这一过程的影响;刘海波等^[8]分析了城轨列车在踏面制动方式下车轮踏面热疲劳裂纹产生的机理,并建立了车轮制动过程瞬态温度场三维有限元模型;王海新等^[9]建立模拟轮轨滑动接触的热弹塑性有限元三维模型,以滑动速度为例研究机械荷载作用下对流换热系数对接触区的温度、接触斑的大小以及最大等效应力等轮轨接触特性的影响;王伟等^[10]通过应用大型有限元软件ANSYS建立车轮在钢轨上滑动和滚动过程的有限元模型,在轮轨接触区利用接触单元法来建立接触,通过直接耦合

法求解轮轨间的摩擦生热,详细分析了接触区内的瞬时温度场、应力场、剪应力和接触区的接触压力分布特征,以及最高温升和应力的变化趋势。针对轮轨摩擦热损伤方面的研究,学者们大多引入了有限元仿真技术,其中大多数研究对象仅局限在车轮材料,而针对钢轨材料热损伤有限元模拟研究则鲜有报道。同时,轮轨热损伤仿真研究中,大多数模型仅为二维热传导,其仅仅考虑到热源的上下传递,忽视了热传导的三维性,以及轮轨实际接触斑对传热特性的影响等。

为深入研究钢轨伤损的形成机理,笔者针对某城际铁路出站口直线段服役的60 kg/m U71 Mn钢轨所出现的轨头踏面伤损,开展了多重理化检测,对其伤损原因进行了分析,借助有限元技术建立三维轮轨热机耦合模型,重现了车辆异常起步状况下的钢轨接触区域温度特性,结合试验钢轨材料的CCT曲线,探明了钢轨伤损的形成机理,并针对伤损原因提出了建议。

1 试验材料及方法

通过对伤损钢轨宏观形貌分析,该钢轨试样表面存在不规则椭圆形凹疤,一侧弧角存在多个掉块形成的凹坑,弧内可见粗糙的擦伤痕,伤损区域长度为31 mm,宽度为17 mm,钢轨轨头伤损宏观形貌如图1所示。在钢轨伤损部位沿轧制方向取金相试样,在磨样机和抛光机上磨制、抛光,采用4%硝酸酒精腐蚀抛光面,在Axio Observer 5m金相显微镜下进行金相组织观察,在Empyrean型X射线衍射仪下进行微区物相分析,在Sigma 500型扫描电镜下对钢轨材料的微观组织结构进行观察,在FALCON 500显微硬度计下进行显微硬度分析。



图1 钢轨伤损宏观形貌

Fig. 1 Macroscopic appearance of rail damage

2 结果与分析

2.1 化学成分与拉伸性能

在伤损钢轨试样上取样进行材料化学成分和拉

伸性能分析, 结果见表 1, 参考《TB/T 2344—2012 43 kg/m ~ 75 kg/m 钢轨订货技术条件》对 U71 Mn 钢轨化学成分和拉伸性能的规定, 伤损钢轨化学成

分和拉伸性能均符合 TB/T 2344—2012 43 kg/m ~ 75 kg/m 标准要求。

表 1 化学成分和拉伸性能
Table 1 Chemical compositions and tensile properties of rail steel

项目	化学成分/%							屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
	C	Si	Mn	P	S	V	Al			
钢轨试样	0.71	0.46	0.99	0.011	0.008	0.020	0.002	540	935	15.5
标准要求	0.65 ~ 0.76	0.15 ~ 0.58	0.70 ~ 1.20	≤0.025	≤0.025	≤0.030	≤0.004		≥880	≥10

2.2 金相组织分析

在伤损钢轨上沿轧制方向取金相试样, 取样位置如图 2 所示。制样后在 OM 下观察钢轨伤损部位金相组织, 如图 3 所示, 分析认为钢轨伤损部位具备典型马氏体白层特征, 马氏体层较厚, 达到 2 mm 以上。为精细化研究马氏体层内的组织分布情况, 沿马氏体层厚度方向选取 4 个位置进行精细化组织表征, 具体见图 3 标记。

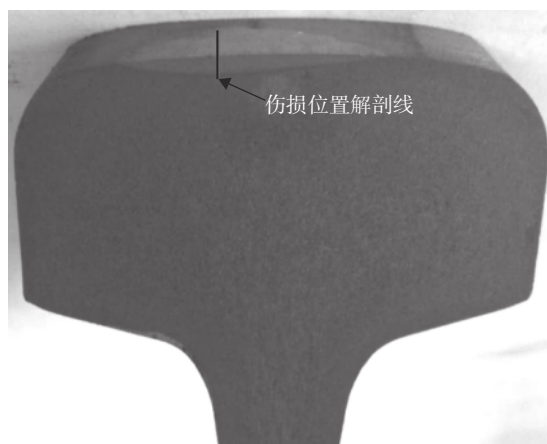


图 2 伤损钢轨金相取样位置

Fig. 2 Metallographic sampling location of damaged rail

在 OM、SEM 下对上述 4 处位置依次观察, 分析发现距离踏面位置最近的 A 位置的针状马氏体含量最高, 随着距踏面深度的增加(B→D), 马氏体块及含量逐渐减少, 如图 4 所示。与此同时, 随着距踏面深度的增加, 图中“黑色”区域含量越来越多, 为分析该区域的组织类别, 采用 XRD 进行物相分析, 结果如图 5 所示, 分析认为表层组织为马氏体和残余奥氏体, 其中检测位置马氏体含量为 85.4%、残

余奥氏体含量为 14.6%, 过冷奥氏体极速冷却转变过程中由 γ -Fe 转变成 α -Fe 和未转变 γ -Fe, 结合 SEM 高倍数下显示结果, 该“黑色”区域为不规则的残余奥氏体。综上分析认为, 钢轨表面组织奥氏体化后以超高冷速向马氏体转变时, 由于温降过快, 导致沿晶界转变的马氏体组织未充分完成转变, 同时转变完成的马氏体因体积膨胀, 产生一定量的压应力, 使剩余的奥氏体在转变时需要先克服转变界面压应力, 从而阻碍奥氏体继续转变, 最终形成如图 4 所示的不规则的残余奥氏体被马氏体包围的组织状态。残余奥氏体和马氏体的共存将对钢轨损伤层组织结构的完整性和均一性产生影响。

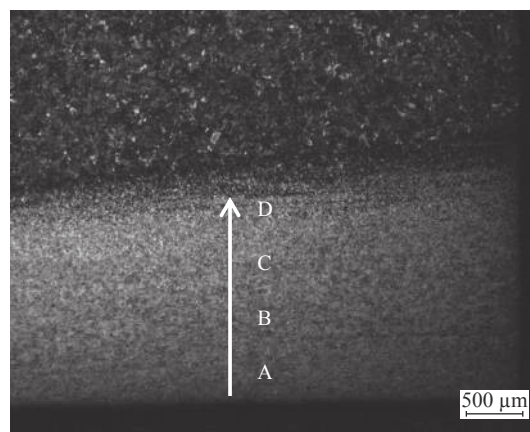


图 3 OM 下的钢轨伤损部位金相组织

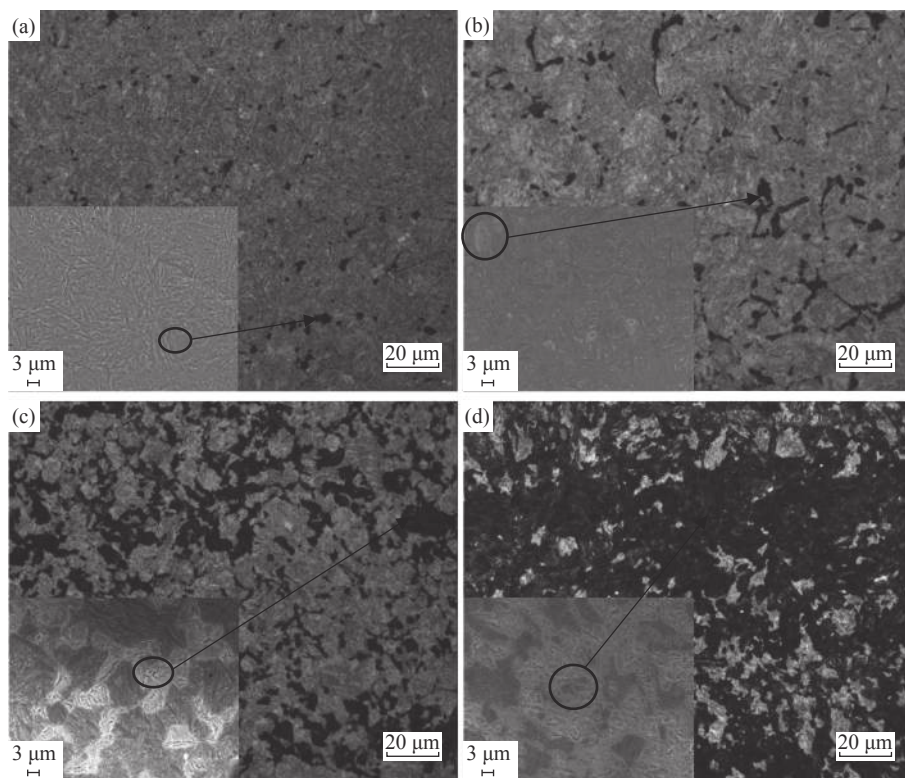
Fig. 3 Metallographic structure of rail damaged site under OM

2.3 显微硬度分析

为分析研究钢轨伤损位置的硬度分布特征, 在伤损位置每隔 0.3 mm 测量显微硬度 ($HV_{0.1}$), 共采集 6 点, 具体硬度值测量分布如图 6 所示。显微硬度结果显示, 随着距离踏面深度的增加, 伤损部位显

微硬度值逐渐降低, 距离踏面 0.3 mm 处平均硬度值达 1 011, 距离踏面 0.6、0.9、1.2、1.5、1.8 mm 处

平均硬度值依次为 998、965、821、570、535, 显微硬度值变化同马氏体变化趋势基本吻合。



(a)、(b)、(c)、(d) 分布对应图3中取样位置 A、B、C、D

图4 马氏体层内部精细化组织分布

Fig. 4 The fine structure distribution in martensite layer

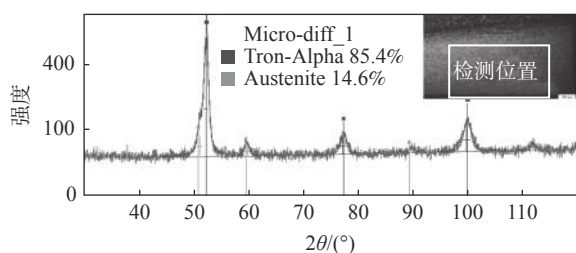


图5 XRD 物相分析谱图

Fig. 5 XRD phase analysis

2.4 裂纹失效分析

钢轨损伤部位的圆弧过渡区出现不同程度的剥离破坏, 为探明剥离区裂纹微观形貌和形成机制, 笔者在伤损部位沿钢轨轧制方向取金相试样, 图7为试样伤损部位裂纹形貌, 观察发现该系列裂纹由平行于车轮行驶方向的主裂纹与多条次生微细裂纹组成。为细致化研究微裂纹形貌, 选取如图7所示的4段裂纹尖端在 SEM 下进行形貌观察, 结果如图8所示。可以看出, 4处微裂纹扩展路径中均伴随有

形貌各异的残余奥氏体。分析认为, 残余奥氏体是一种韧性第二相, 其硬度值远低于马氏体组织, 并镶嵌在马氏体组织中间, 由于钢轨踏面受到车轮载荷碾压, 其表层马氏体组织易萌生浅层微裂纹, 在轮轨次表面的剪切应力作用下, 该微裂纹向钢轨踏面内部扩展。因残余奥氏体具有松弛裂纹尖端应力峰的作用, 当微裂纹尖端在脆相中扩展遇到软相残余奥氏体后, 增加了微裂纹继续扩展的阻力, 使裂纹尖端变得钝化。另一方面, 软相残余奥氏体对裂纹尖端的扩展具有引导性, 为微裂纹横向扩展提供通道, 从而诱导微裂纹沿平行于行车方向扩展, 最终导致钢轨擦伤区域剥离破坏。

3 基于 ABAQUS 的轮轨异常启动温度场特征分析

ABAQUS 作为大型通用有限元分析软件, 其解决问题的范围涵盖了从简单的线性分析到复杂的非

线性分析全过程, 相比较其他有限元软件, 该软件在三维接触分析中表现出明显优势。由于轮轨滚动接

触分析属于典型的非线性问题, 笔者遂采用 ABAQUS 软件开展轮轨三维滚动接触有限元分析。

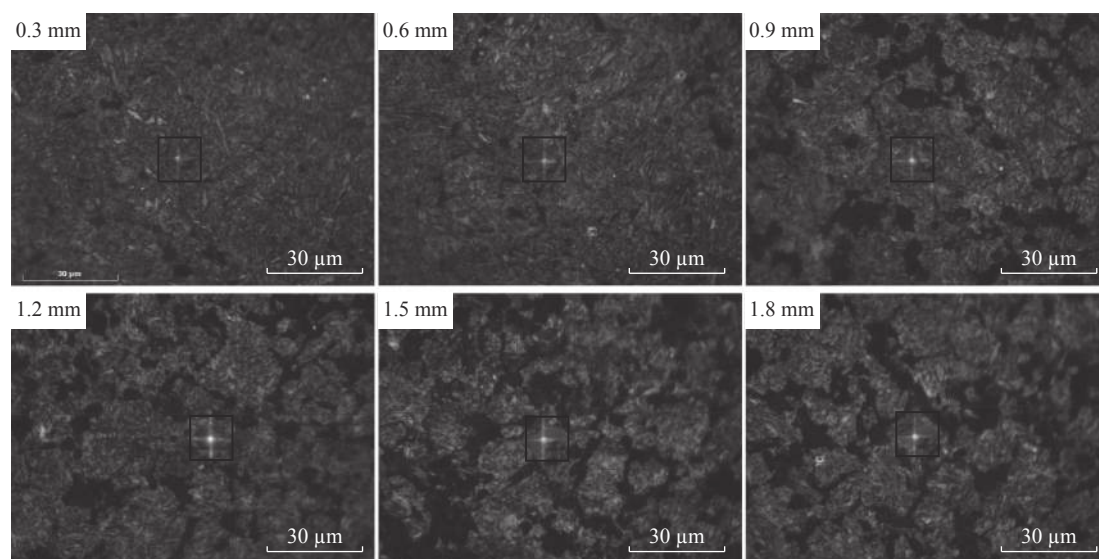


图 6 显微硬度采集点分布

Fig. 6 Microhardness collection point distribution

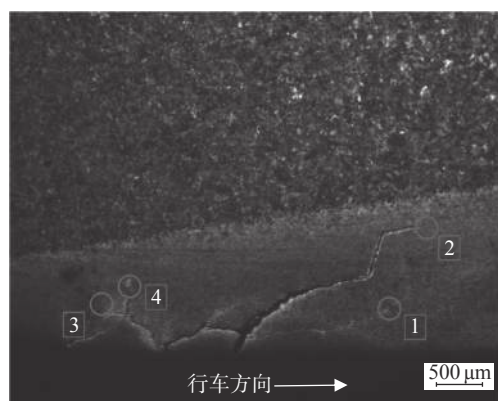


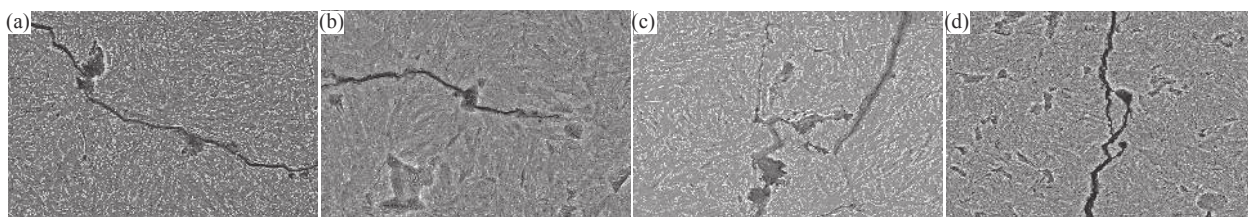
图 7 OM 下的伤损部位裂纹形貌

Fig. 7 The crack morphology of damaged site under OM

3.1 三维轮轨滚动接触热-机耦合有限元模型建立

结合上述分析结果, 该钢轨伤损形式属于典型擦伤, 该类型伤损产生的原因是车辆的异常打滑, 轮

轨粘着力骤降, 轮轨瞬时剧烈摩擦, 在大的接触应力下使轮轨接触区域迅速升温, 直至局部完全奥氏体化, 最后快冷形成马氏体。为重现马氏体形成过程中钢轨接触斑附近的温度场变化特征, 笔者通过调研钢轨服役中的边界条件, 基于 ABAQUS 软件结合线路实际建立轮轨三维滚动接触热-机耦合有限元模型, 重现车轮异常启动状况下钢轨接触区域摩擦制热、瞬时温度场分布等热响应, 实现钢轨擦伤过程可视化。考虑到计算成本, 简化钢轨模型, 并在钢轨表层 5 mm 范围内实现网格细化, 模型材料属性均随温度变化, 轮轨接触采用“硬”接触, 主面选择车轮接触面, 从面为钢轨踏面, 车速约定为 120 km/h, 异常启动分析步设置为瞬时 2 s, 摩擦系数设置为 0.3, 环境温度约定为 25℃, 网格化的三维轮轨滚动接触热-机耦合有限元模型如图 9 所示。



(a) 示图 1, 裂纹尖端; (b) 示图 2, 裂纹尖端; (c) 示图 3, 裂纹尖端; (d) 示图 4, 裂纹尖端

图 8 钢轨伤损处微裂纹尖端形貌

Fig. 8 Microcrack tip morphology of rail damage

3.2 异常启动下的钢轨接触区域温度场响应

由于轮轨打滑状况下车轮与钢轨传热大部分依赖热传导,且本算例仅开展定性分析,约定模型传热仅分析轮轨间的热传导,热辐射和热对流暂不考虑。计算得到的钢轨接触区域温度场分布如图10所示,分析认为,车辆异常启动条件下钢轨接触区域迅速升温,越接近轨头部位温升速率越高,温度峰值可达1 000 ℃以上,超过了钢轨材料奥氏体化温度。同时从仿真结果发现,随着距钢轨踏面深度的增加,温度逐渐降低,具体如图11所示。当钢轨瞬时温度达到奥氏体化温度以后,由于轮轨接触斑面积较小,导致接触区温度迅速降至室温,完成奥氏体向马氏体转变。图12为JMatPro软件计算得到的U71Mn

钢轨 CCT 曲线,结合图10,钢轨接触区域奥氏体化层厚度达到2 mm,这与案例伤损钢轨马氏体厚度高度吻合。

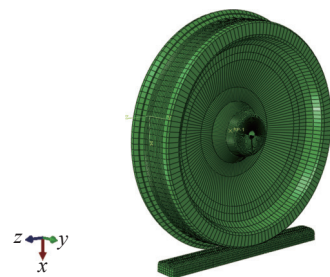


图9 网格化的轮轨滚动接触热-机耦合有限元模型

Fig. 9 Meshed thermo-mechanical coupling finite element model of wheel-rail rolling contact

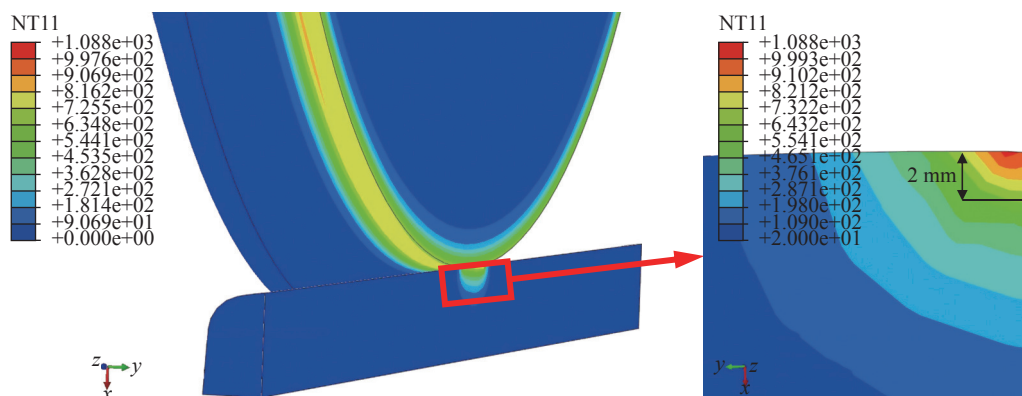


图10 钢轨接触区域瞬态温度场分布

Fig. 10 Distribution of transient temperature field in rail contact area

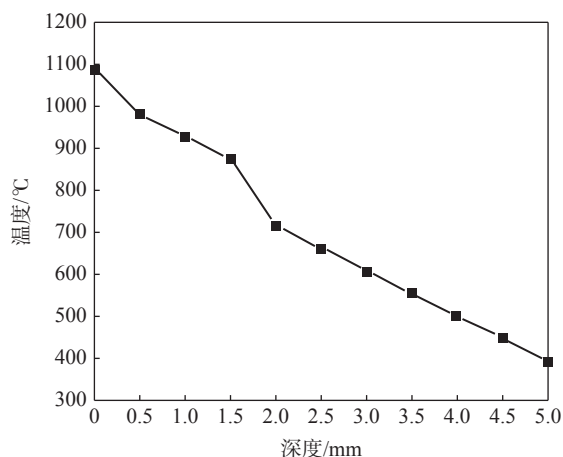


图11 钢轨接触部位温度随深度变化曲线

Fig. 11 Temperature curve of rail contact area with depth

4 结论和建议

1) 伤损钢轨材料化学成分和拉伸性能均满足《TB/T 2344—2012 43 kg/m ~ 75 kg/m 钢轨订货技术条件》要求。

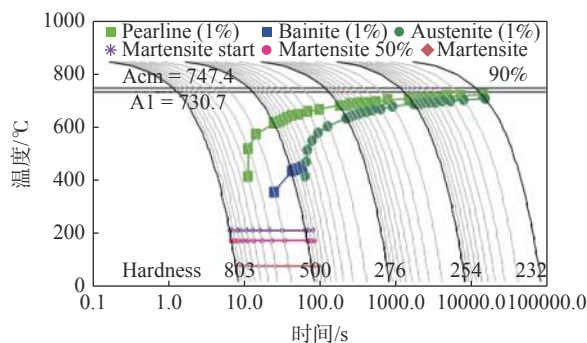


图12 JMatPro 软件计算的 CCT 曲线

Fig. 12 CCT curve calculated by JMatPro software

2) 该钢轨伤损属于典型擦伤,擦伤深度超过2 mm,伤损部位随着踏面深度的增加,马氏体块及含量逐渐减少,残余奥氏体含量逐渐增多,导致其对应的显微硬度值逐渐降低。

3) 钢轨伤损的形成是由于剧烈的摩擦热导致钢轨接触斑一定深度范围完全奥氏体化,伴随高低温的热传导迅速完成马氏体转变;残余奥氏体被马氏体组织包围,增加微裂纹继续扩展的阻力,钝化裂纹

尖端;在轮轨表层剪切应力共同作用下,为微裂纹扩展提供通道,诱导微裂纹横向扩展,最终导致钢轨擦伤区域剥离破坏。

4)计算机仿真结果重现了车轮启动打滑状态下钢轨接触斑附近温度场分析,模拟出的钢轨奥氏体

化深度与案例中的马氏体层厚度基本吻合。

5)建议加强列车空转发生时防空转系统同机车撒砂系统协调配合,共同抑制车轮空转;机车操作人员应熟悉车站附近线路状况,并避免大电流启动;擦伤钢轨应及时进行打磨处理,防止伤损恶化。

参考文献

- [1] Jin Xuesong, Zhang Jiye, Wen Zefeng, *et al.* Overview of phenomena of rolling contact fatigue of wheel/rail[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2002, 24(2): 250–257.
(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.)
- [2] Pal S, Valente C, Daniel W, *et al.* Metallurgical and physical understanding of rail squat initiation and propagation[J]. *Wear*, 2012, 284: 30–42.
- [3] Sarvesh Pal, William J T Daniel, Carlos H G Valente, *et al.* Surface damage on new AS60 rail caused by wheel slip[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2012, (22): 152–165.
- [4] Zhou Y, Peng J F, Luo Z P, *et al.* Phase and microstructural evolution in white etching layer of a pearlitic steel during rolling-sliding friction[J]. *Wear*, 2016, (362-363): 8–17.
- [5] Deng Yong, Deng Jianhui. Reason analysis on defects in high-speed railway rail[J]. *PTCA (Part A:Phys. Test)*, 2013, (11): 766–769.
(邓勇, 邓建辉. 某高速铁路钢轨伤损原因分析[J]. *理化检验(物理分册)*, 2013, (11): 766–769.)
- [6] Wu Lei, Wen Zefeng, Jin Xuesong. Wheel/rail frictional temperature analysis under wheel rolling[J]. *Engineering Mechanics*, 2007, 24(10): 150–155.
(吴磊, 温泽峰, 金学松. 车轮原地打滑时轮轨接触界面摩擦温升分析[J]. *工程力学*, 2007, 24(10): 150–155.)
- [7] Su Hang, Pan Tao, Yang Caifu, *et al.* The friction heat induced phase transformation and spalling mechanism of train wheel steel[C]// *Collection of Excellent Papers in 2004 Academic Activities of China Railway Society*. Beijing: China Railway Society, 2005.
(苏航, 潘涛, 杨才福, 等. 车轮钢摩擦热致相变及损伤机理研究[C]// 中国铁道学会2004年度学术活动优秀论文评奖论文集. 北京: 中国铁道学会, 2005.)
- [8] Liu Haibo, Li Yanlei, Shi Qilong. Thermal stress simulation analysis of urban rail transit vehicles tread braking[J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2012, (1): 49–51.
(刘海波, 厉砚磊, 石启龙. 城市轨道交通车辆踏面制动热应力仿真分析[J]. *机械工程与自动化*, 2012, (1): 49–51.)
- [9] Wang Haixin, Wu Yaping, Liu Zheng. Influence analysis of coefficients of convective heat transfer on the characteristic of wheel/rail sliding contact[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2018, 15(2): 336–342.
(王海新, 吴亚平, 刘振. 对流换热系数对轮轨滑动接触特性的影响分析[J]. *铁道科学与工程学报*, 2018, 15(2): 336–342.)
- [10] Wang Wei. Analysis of the frictional heating of wheel-rail based on ANSYS[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
(王伟. 基于ANSYS的轮轨摩擦生热分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.)

编辑 杨冬梅