

摩擦学学报

TRIBOLOGY



两种热处理钢轨焊接接头冲击磨损与损伤性能研究

向鹏程, 蒋文娟, 丁昊昊, 王文健, 郭俊, 刘启跃

Investigation on Impact Wear and Damage Properties of Rail Welded Joints after Two Types of Heat-Treatments

XIANG Pengcheng, JIANG Wenjuan, DING Haohao, WANG Wenjian, GUO Jun, LIU Qiyue

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2020142>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

U71Mn钢轨气压焊焊接接头滚动磨损与损伤性能研究

Research on Rolling Wear and Damage Properties of Gas Pressure Welding Joint of U71Mn rail

摩擦学学报. 2020, 40(5): 579 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2020014>

两种激光熔覆涂层对轮轨材料磨损与损伤性能的影响

Effects of Two Laser Cladding Coatings on Wear and Damage Properties of Wheel/Rail Materials

摩擦学学报. 2020, 40(2): 225 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2019105>

等温淬火热处理工艺对Fe-0.5C-2.0Si-2.5Mn钢冲击磨损性能的影响

Effect of Impact Wear on Isothermal Quenching of Fe-0.5C-2.0Si-2.5Mn Steel

摩擦学学报. 2017, 37(1): 52 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2017.01.007>

硬质沙粒对TC4钛合金冲击磨损的损伤行为的研究

Effect of Hard Sand on the Impact Wear Behavior of TC4 Alloy

摩擦学学报. 2018, 38(4): 383 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018.04.002>

两种水基摩擦改性剂对轮轨黏着和损伤性能的影响

Effects of Two Kinds of Water-Based Friction Modifiers on Wheel-Rail Adhesion and Damage

摩擦学学报. 2021, 41(2): 176 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2020109>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16078/j.tribology.2020142

两种热处理钢轨焊接接头冲击磨损与 损伤性能研究

向鹏程, 蒋文娟, 丁昊昊*, 王文健, 郭俊, 刘启跃
(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室 摩擦学研究所, 四川 成都 610031)

摘要: 研究了过共析钢轨焊接接头淬火和正火后不同区域的硬度与微观组织, 利用冲击磨损试验机对不同区域进行冲击试验, 分析了各区域冲击磨损与损伤特性。结果表明: 钢轨焊接接头分为母材区、焊缝区和热影响区。母材区微观组织为片层状珠光体, 焊缝区为珠光体与先共析铁素体且正火后铁素体含量较多, 热影响区淬火后为粒状珠光体而正火后存在少量片层状珠光体。焊接接头不同区域硬度大小为母材区>淬火焊缝区>正火焊缝区>正火热影响区>淬火热影响区。硬度越低的区域, 冲击深度和磨损体积越大。母材区冲击损伤轻微, 表面呈轻微剥落; 焊缝区损伤较严重, 出现明显裂纹且正火后损伤较淬火后严重; 热影响区损伤最为严重且正火后损伤较淬火后略轻微。

关键词: 钢轨焊接接头; 淬火; 正火; 冲击磨损; 冲击损伤

中图分类号: TH117.1

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2021)03-0382-11

Investigation on Impact Wear and Damage Properties of Rail Welded Joints after Two Types of Heat-Treatments

XIANG Pengcheng, JIANG Wenjuan, DING Haohao*, WANG Wenjian, GUO Jun, LIU Qiyue

(Tribology Research Institute, State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University,
Sichuan Chengdu 610031, China)

Abstract: The hardness and microstructures of hypereutectoid rail welded joints after quenching and normalizing were studied. Impact tests were carried out on different rail joint zones using an impact wear tester and the impact wear and damage characteristics of each zone were analyzed. The results showed that rail joints could be divided into base material zone, weld joint zone and heat affected zone. The microstructure of base material zone was lamellar pearlite. The microstructure of the weld joint zone was composed of pearlite and proeutectoid ferrite, while the content of ferrite in normalized joint was larger than that in quenched joint; the microstructure of heat affected zone after quenching was granular pearlite, while there were a few lamellar pearlites in heat affected zone after normalizing. The rank of different zones depending on the hardness from the highest to the lowest was: base material > weld joint after quenching > weld joint after normalizing > heat affected zone after normalizing > heat affected zone quenching. The lower the hardness, the greater the impact depth and wear volume. The impact damage of the base material was slight, and the surface was slightly peeled. The weld joint was damaged severely with obvious cracks, and the damage of normalized weld joint was severer than that of quenched weld joint. The damage of the heat affected zone was the severest and the damage of normalized heat affected zone was slightly less severe than that of quenched heat affected zone.

Key words: rail welded joint; quenching; normalizing; impact wear; impact damage

Received 6 July 2020, revised 10 September 2020, accepted 27 September 2020, available online 28 May 2021.

*Corresponding author. E-mail: haohao.ding@swjtu.edu.cn, Tel: +86-28-87634304.

The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (51975489), Sichuan Science and Technology Program (2019YFG0289) and Fundamental Research Funds for the Central Universities (2682020CX29).

国家自然科学基金项目(51975489), 四川省重点研发项目(2019YFG0289)和中央高校基本科研业务费专项资金(2682020CX29)资助。

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 2019 年底, 我国高速铁路营业里程已达 3.5 万公里, 约占世界总里程的 70%. 高速钢轨的主要损伤形式为滚动接触疲劳, 重载钢轨的主要损伤形式有侧磨、剥离掉块和钢轨压溃^[1-2]. 过共析钢轨因其高硬度和高耐磨性等特性, 可显著提高重载铁路钢轨寿命^[3-4]. 我国无缝钢轨主要的焊接方法是闪光焊, 由于焊接后的几何不规则性以及材料不均匀性, 与钢轨母材相比, 钢轨焊接接头更容易形成损伤, 产生低塌现象, 使列车经过时产生强烈的冲击和振动^[5], 影响列车运行安全与舒适性^[6-7]. 因此需要对闪光焊焊接接头进行焊后热处理, 提高焊接接头的力学与摩擦学性能, 保证钢轨服役可靠性^[8].

实际服役中钢轨焊接接头的受力工况十分复杂, 包括冲滑、剪切和冲击等各种形式, 国内外研究人员对钢轨接头损伤开展了一系列研究. 李金华等^[9]通过现场钢轨焊接接头研究发现: 焊接接头磨损状态与接头硬度分布密切相关, 焊接接头的焊缝及热影响区的软化区相对其他位置磨损更为严重. Godefroid 等^[10]对钢轨焊接接头疲劳裂纹扩展机理进行了研究, 发现钢轨接头的疲劳裂纹多从焊缝处进行脆性扩展, 甚至导致断裂. 谢旭辉等^[11]研究了 U71Mn 钢轨焊缝及母材在滚动接触过程中的磨损演变行为, 与非焊缝区相比, 钢轨焊缝区容易产生损伤. 蒋文娟等^[12-13]研究了 U71Mn 钢轨焊接接头的滚动及冲击损伤行为, 分析了 U71Mn 各组织性能的差异对磨损性能的影响. 王莹莹等^[14]研究了不同热处理时间的 U75V 钢轨焊接接头的冲击损伤行为, 表明电磁感应正火后的闪光焊焊接接头抗冲击能力大幅度提高. 李炜等^[15]研究了闪光焊和铝热焊两种焊接工艺下过共析钢接头冲击磨损性能, 研究表明闪光焊焊接接头的抗冲击性能优于铝热焊焊接接头. Ninshu 等^[16]通过仿真和试验对闪光焊焊接接头的残余应力进行研究, 结果表明闪光焊焊接接头中存在较高的残余应力, 会加速焊接接头的磨损. Desimone 等^[17]通过仿真及试验分析了钢轨焊缝中心

疲劳裂纹扩展行为, 揭示了以剪切力为主要诱因的裂纹扩展规律. 丁韦等^[18]研发了一种超轻型的钢轨焊接接头喷雾淬火设备, 对正火处理后的 PD3 钢轨进行喷雾淬火, 明显提高了焊接接头硬度.

不同的焊接方式和热处理工艺都会造成钢轨焊接接头的微观组织及力学性能的差异, 进而对钢轨寿命及服役性能产生影响. 本文作者首先分析了过共析钢轨闪光焊焊接接头通过淬火和正火两种局部热处理后的微观组织, 然后利用冲击试验机对两种钢轨焊接接头不同区域开展冲击试验, 通过分析冲击深度、磨损体积、微观组织和损伤等, 揭示了两种钢轨焊接接头的冲击磨损与损伤特性. 研究结果可为提高钢轨焊接接头服役性能提供理论依据与技术支持.

1 材料及方法

1.1 材料

冲击试验所用试样为淬火和正火后的过共析钢轨闪光焊焊接接头(后文简称淬火焊接接头和正火焊接接头), 过共析钢的化学成分和力学性能列于表 1 中. 两种焊接接头的焊接工艺相同, 仅后续热处理工艺不同. 在本文中通过钢轨焊接接头硬度变化来确定钢轨焊接接头不同区域, 在钢轨焊接接头表面下 5 mm 处中心部位取尺寸大小为 10 mm×10 mm×100 mm 的长条试样(Bar sample), 如图 1 所示. 利用维氏硬度计(MVK-H21, 日本)对长条试样进行硬度测量, 为避免测试误差, 每组试样测试 3 次.

图 2 为淬火和正火焊接接头硬度沿钢轨纵向的变化规律. 可以看出焊接接头可分为焊缝区(Weld joint, WJ)、热影响区(Heat affected zone, HAZ)和母材区(Base material, BM), 其中焊缝区选择焊缝中心位置进行冲击试验, 热影响区选择硬度最低位置进行试验. 母材区硬度约为 415HV_{0.5}, 淬火焊接接头焊缝区(Quenching-WJ)硬度值约为 390HV_{0.5}, 热影响区(Quenching-HAZ)硬度值约为 290HV_{0.5}, 正火焊接接头焊缝区(Normalizing-WJ)硬度约为 350HV_{0.5}, 热影响区(Normalizing-HAZ)硬度约为 305HV_{0.5}, 焊接接头不同区域硬度高低排序如下: 母材区>淬火接头焊缝区>正火接头焊缝区>正火接头热影响区>淬火接头热影响

表 1 过共析钢轨化学成分与力学性能
Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of hypereutectoid rail

Chemical compositions					Mechanical properties		
w(C)/%	w(Si)/%	w(Mn)/%	w(P)/%	w(Cr)/%	Tensile strength, σ_b /MPa	Elongation, δ /%	Hardness, HV _{0.5}
0.91~0.95	0.47~0.51	0.94~0.99	≤0.02	≤0.7	≥1 300	≥8	390~440

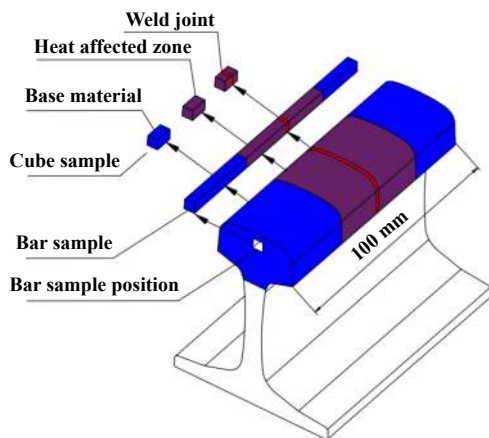


Fig. 1 Sampling schematic diagram

图1 取样示意图

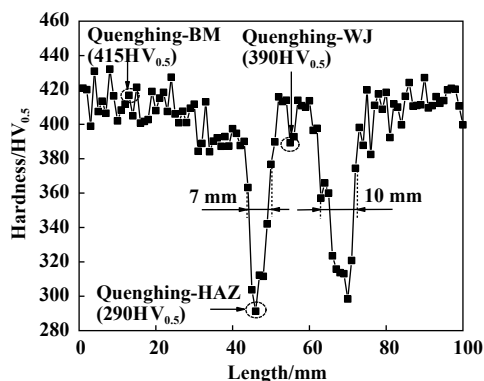
区。此外,热影响区微观组织在焊接过程中生成了粒状珠光体,导致硬度较低,热影响区的宽度根据硬度值确定。淬火焊接接头的单侧热影响区平均宽度约为7~10 mm,正火焊接接头的单侧热影响区平均宽度约为25~30 mm。热影响区的形成和诸多因素有关,包括焊接材料、焊接方式和焊接后热处理工艺等^[19]。本文中试样仅焊接后热处理方式不同,所以两种钢轨接头的热影响区宽度的不同是由后续热处理工艺导致,淬火后热影响区宽度比正火后热影响区宽度更小^[20]。

确定焊接接头不同区域后,在各区域取尺寸为10 mm×10 mm×10 mm块状试样(Cube sample)。将块状试样抛光处理,用4%的硝酸酒精溶液对试样进行腐蚀处理后,利用光学显微镜(OM)和扫描电子显微镜(SEM)对微观组织进行观察,然后再将试样抛光至粗糙度0.2 μm后用于冲击试验。

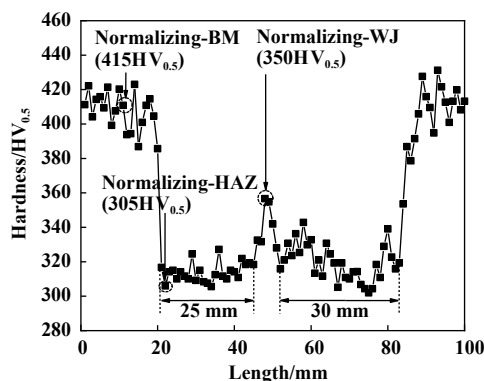
图3为淬火焊接接头母材区(Quenching-BM)、焊缝区(Quenching-WJ)和热影响区(Quenching-HAZ)的光学显微镜和扫描电子显微镜照片,可以看出淬火焊

接接头母材区微观组织为均匀的珠光体;焊缝区微观组织为片层状珠光体及少量先共析铁素体,先共析铁素体析出是焊接高温(约为1 200 ℃)造成焊缝附近区域组织脱碳导致^[21],铁素体的增加使该区域硬度降低,因此淬火焊缝区硬度略小于母材区;淬火焊接接头热影响区微观组织为粒状珠光体,这是因为在焊接过程中焊接接头组织奥氏体化,奥氏体晶核长大,而随后的淬火处理时温度较低(约600 ℃),焊接接头组织奥氏体化未能充分进行,渗碳体片层断开破裂,未溶解的残余渗碳体形核并长大形成粒状渗碳体,而在粒状渗碳体周围出现低碳奥氏体,并通过形核和长大转变为铁素体,进而形成粒状珠光体^[22],粒状珠光体是珠光体类组织中最稳定、最平衡的组织,但其强度和硬度均较低,粒状珠光体是造成组织软化的主要原因之一^[23-24]。因此淬火焊接接头热影响区硬度远低于焊缝和母材区。

图4为正火焊接接头母材区(Normalizing-BM)、焊缝区(Normalizing-WJ)、热影响区(Normalizing-HAZ)的光学显微镜和扫描电子显微镜照片。其中,正火焊接接头母材区与淬火焊接接头母材区组织一致,为均匀分布的片层状珠光体。这是因为钢轨焊接接头是对于接头处采用局部热处理,对母材区影响很小。正火焊接接头焊缝组织为珠光体和先共析铁素体,并且先共析铁素体含量比淬火接头焊缝区数量多,珠光体和铁素体尺寸均比淬火焊接接头焊缝小,这是因为正火处理温度(约为900 ℃)较淬火高,后续冷却过程中先从过冷奥氏体中析出铁素体,温度越高,焊缝处铁素体的体积分数越多,珠光体含量越低^[25],较高的铁素体含量使正火焊缝硬度明显降低。正火焊接接头热影响区同样为粒状珠光体,其形成机理与淬火接头热影响区类似。此外,由于正火处理温度较高,正火焊接接



(a) Quenched rail joint



(b) Normalized rail joint

Fig. 2 Hardness of quenched and normalized rail joint

图2 淬火和正火钢轨焊接接头硬度

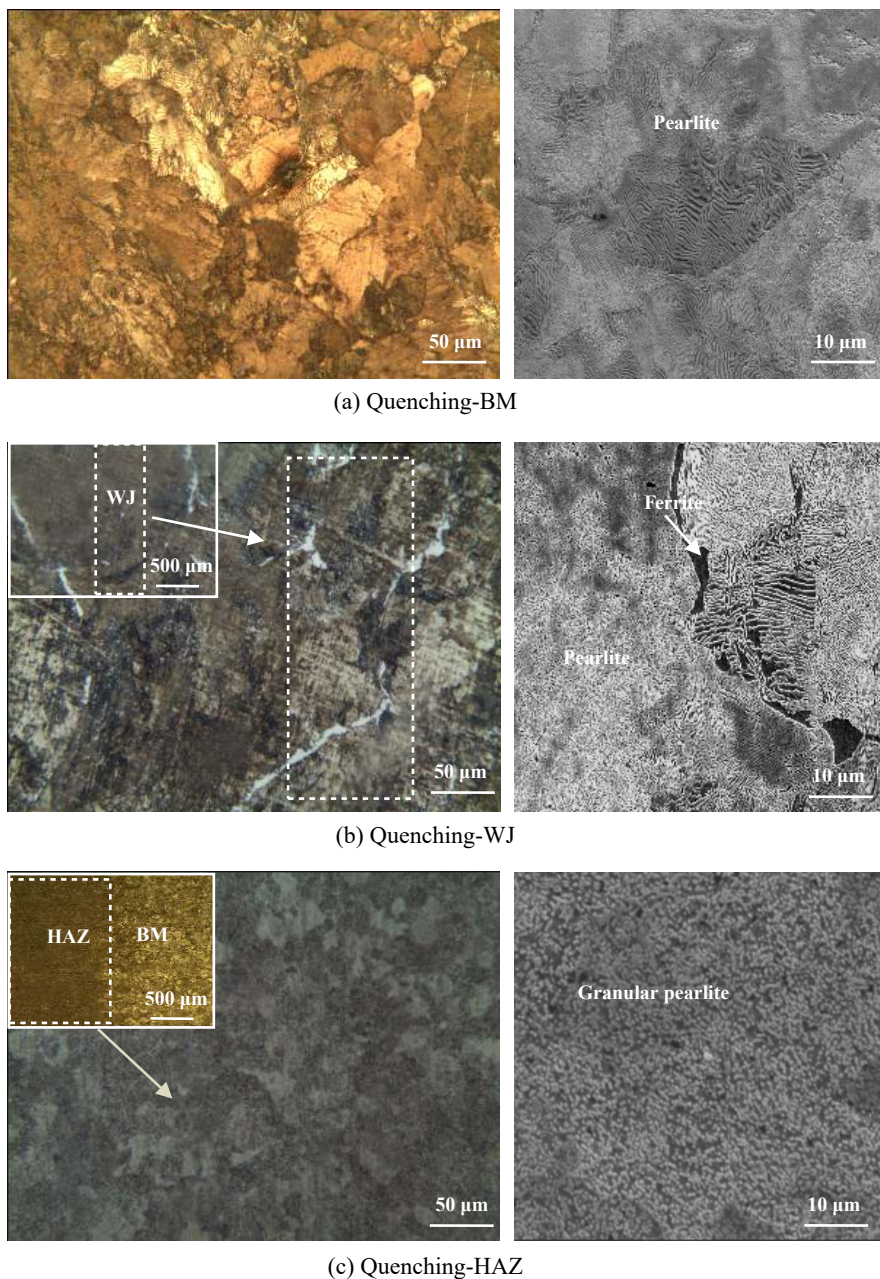


Fig. 3 OM and SEM micrographs of microstructures in different zones of quenching rail joint

图3 淬火焊接接头不同区域微观组织OM与SEM照片

头热影响区组织奥氏体化更为充分,因此在部分位置可观察到片层状珠光体,所以正火焊接接头热影响区硬度略高于淬火焊接接头热影响区。

1.2 试验方法

本文中的冲击试验在自主设计制造的冲击磨损试验机上进行,如图5所示,主要部分包括滑台、气缸、支架、电气柜、夹具、压力传感器和底座等。试验机由空气压缩机为气缸提供冲击动力,利用压力传感器和数据采集卡进行实时冲击载荷采集,试验机最大冲击载荷为600 N,冲击载荷误差为 $\pm 2\%$,冲击频率范围为

0~8 Hz。本试验冲击头为 $\phi 6$ mm的GCr15钢球, GCr15钢球经过淬火和回火处理,硬度约为700~740HV_{0.5}。40 t轴重机车对应轮轨接触应力约为1 200 MPa^[26],考虑到钢轨接头不平顺造成的冲击作用,冲击载荷可达静态载荷的2~4倍^[27],取数值为4,经过赫兹理论计算,对应冲击载荷为402 N。试验参数如下:冲击载荷400 N,冲击频率4 Hz,冲击次数20万次。为保证结果可靠性,所有试验重复2次。试验后利用二维轮廓仪(JB-6C)测量冲击轮廓,利用光学显微镜和扫描电子显微镜对冲击后试样表面及剖面进行微观分析。

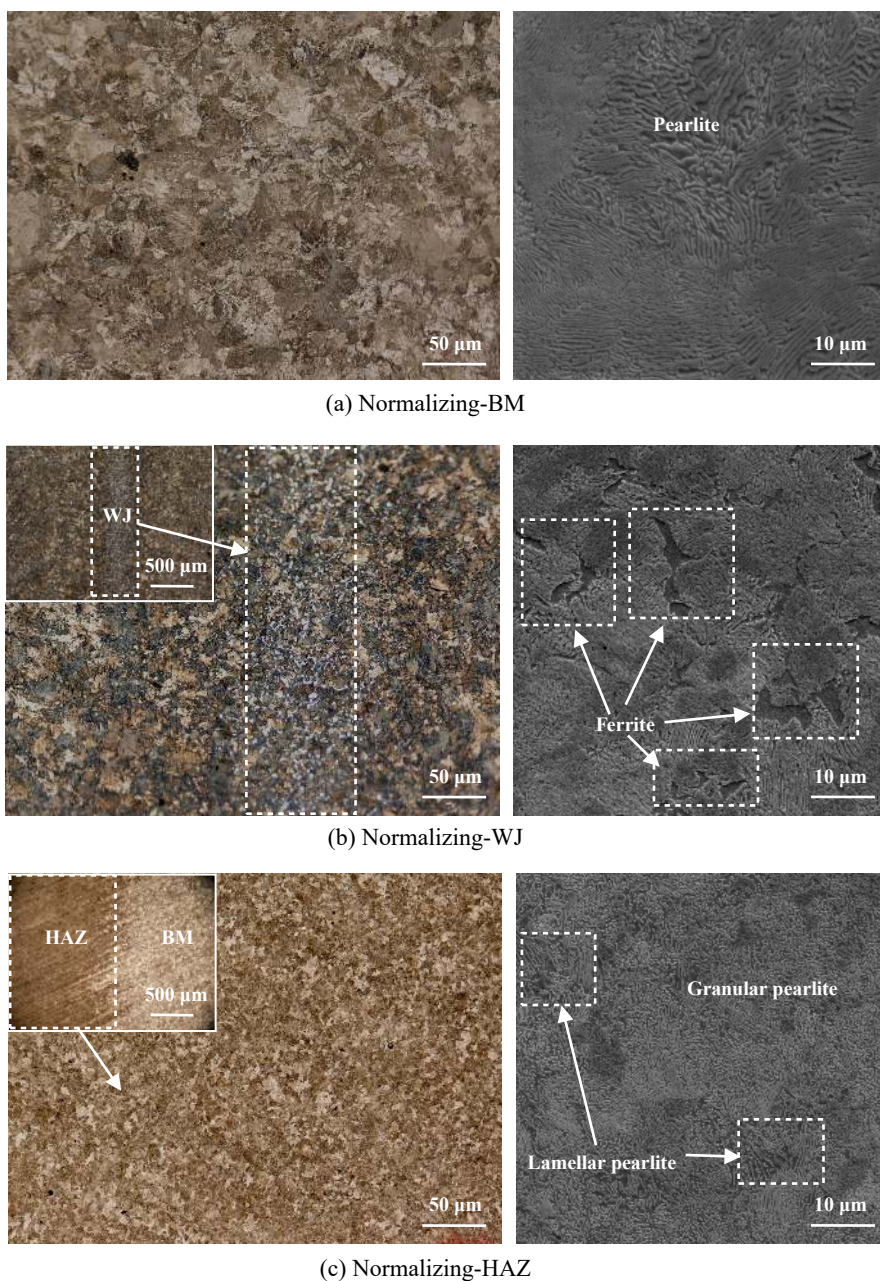


Fig. 4 OM and SEM micrographs of microstructures in different zones of normalizing rail joint

图4 正火焊接接头不同区域微观组织OM与SEM照片

2 结果及讨论

2.1 冲击磨损量

利用轮廓仪对每个冲击坑测量4次, 如图6所示。图7为两种热处理后焊接接头不同区域的冲击坑二维轮廓。可以看出, 热影响区的冲击深度和宽度最大, 焊缝区次之, 母材区最小。淬火焊接接头母材区冲击坑深度约为16 μm , 焊缝区冲击坑深度约为43 μm , 而热影响区冲击坑深度可达153 μm , 约为母材区冲击坑深度的9.6倍。正火焊接接头母材区冲击坑深度约为17 μm , 焊缝区冲击坑深度约为56 μm , 热影响区冲击坑深度

约为120 μm , 约为母材区冲击坑深度的7倍。对比发现, 淬火焊接接头焊缝区冲击坑深度小于正火焊接接头焊缝区, 而淬火焊接接头热影响区冲击坑深度大于正火焊接接头热影响区。此外, 可以观察到冲击坑边缘部分出现材料堆积现象, 硬度最小的热影响区材料堆积现象最明显, 淬火热影响区材料堆积高度达到60 μm 以上。

图8中给出了不同区域冲击磨损体积, 冲击磨损体积与磨损深度规律一致。热影响区冲击磨损体积最大, 且淬火后较正火后冲击磨损体积更大; 焊缝区冲

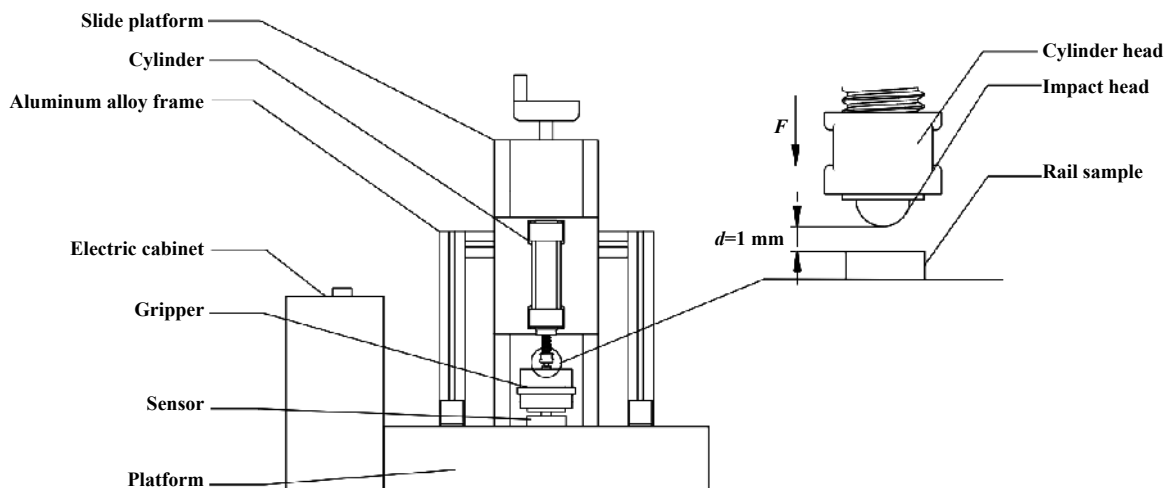


Fig. 5 Schematic diagram of impact wear testing machine

图5 冲击磨损试验机结构图

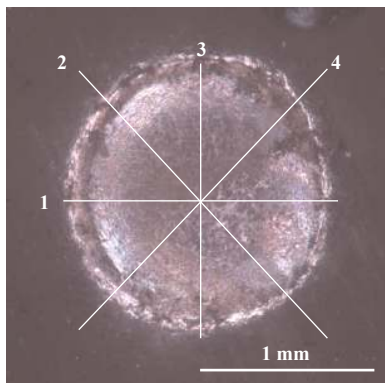


Fig. 6 Diagram of impact crater profile measurement

图6 冲击坑轮廓测量示意图

击磨损体积较小, 且淬火后冲击磨损体积较正火后小, 母材区冲击磨损体积最小。

图9给出了不同区域冲击坑深度和冲击磨损体积与其硬度的关系, 随硬度的增加, 冲击磨损深度和体

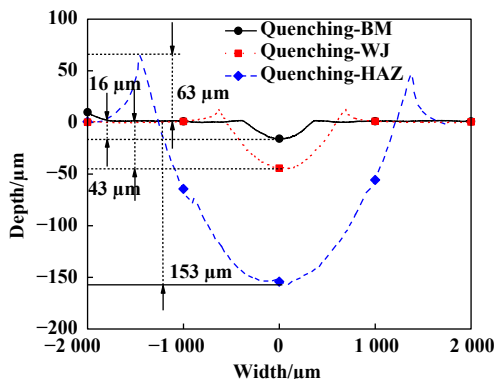
积降低, 且当硬度小于 $350\text{HV}_{0.5}$ 时, 降低趋势明显; 当硬度大于 $350\text{HV}_{0.5}$ 时, 降低趋势减弱。

2.2 冲击后GCr15钢球表面损伤

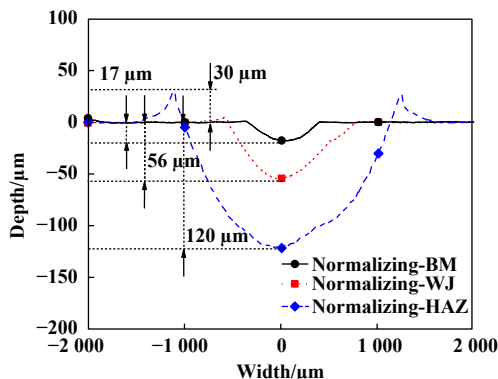
图10为冲击钢轨母材试验后GCr15钢球表面损伤SEM照片, 因为钢球硬度较大($700\sim 740\text{HV}_{0.5}$), 表面损伤轻微。此外, 钢球磨痕中心部位损伤比边缘部位损伤更为轻微, 因为边缘部位受垂向应力较小, 但冲击过程中因试样弹塑性变形导致的切向微动更加明显, 因此钢球边缘部位损伤略微严重。因为GCr15钢球硬度明显高于钢轨焊接接头与母材硬度($290\sim 415\text{HV}_{0.5}$), 在冲击钢轨焊接接头不同区域后GCr15钢球损伤差异不明显。

2.3 冲击后焊接接头表面与剖面损伤

图11为淬火焊接接头不同区域冲击试验后表面和剖面损伤形貌, 可以发现, 母材区磨痕损伤最轻, 表面仅出现少量剥落, 剖面未观察到明显裂纹。因为母



(a) Quenched rail joint



(b) Normalized rail joint

Fig. 7 Impact profiles of different zones of quenched and normalized rail joints

图7 淬火与正火焊接接头不同区域冲击坑轮廓

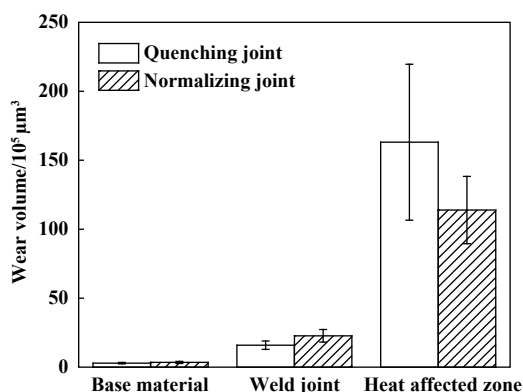


Fig. 8 Impact wear volumes of different zones of quenched and normalized rail joints

图8 淬火与正火焊接接头不同区域冲击磨损体积

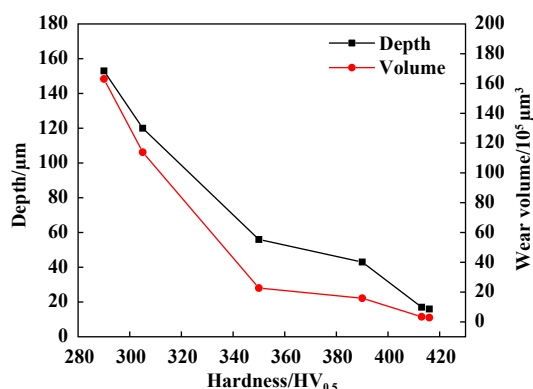


Fig. 9 Relationships of impact crater depth and volume and hardness

图9 焊接接头硬度与冲击坑深度和体积的关系

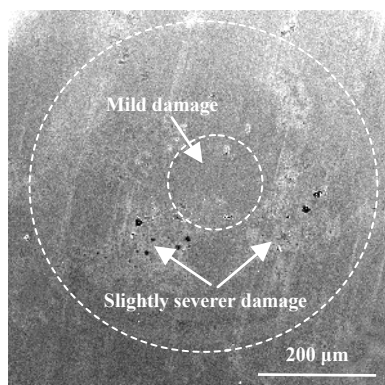


Fig. 10 SEM micrographs of damages of GCr15 ball

图10 GCr15钢球损伤SEM照片

材区硬度高,抵抗冲击能力较强。焊缝区损伤比母材区严重,表面出现明显裂纹[图11(c)],同时其剖面有小块材料剥落现象。热影响区表面和剖面出现严重剥落损伤和明显的裂纹。同时发现试样磨痕的中心部位损伤比边缘部位损伤更为轻微[图11(e)],这是因为冲击过程中中心区域主要受垂向力作用,而边缘区域受

垂向力和切向力共同作用,冲击试验中亚表层区域切应力对冲击磨损的影响大于正应力的影响^[28-29]。根据剥层磨损理论,剥层磨损由亚表层的位错引起,随着剪切变形的增加,亚表层产生位错堆积,随后形成裂纹并扩展^[30]。

图12为正火焊接接头不同区域冲击试验后表面和剖面损伤形貌,可以看出,正火焊接接头母材区磨痕最轻,表面有少量材料剥落,剖面未发现明显裂纹,这与淬火焊接接头母材区损伤基本一致。正火焊接接头焊缝区表面可见明显的裂纹[图12(c)],剖面也可观察到明显的多层裂纹,损伤程度大于淬火焊接接头焊缝区,这与正火焊接接头焊缝处的铁素体含量较高有关,铁素体含量的提升降低了组织硬度,使正火焊接接头焊缝处的抗冲击能力变弱。正火焊接接头热影响区试样损伤严重[图12(e)],表面与剖面出现明显裂纹。对比淬火焊接接头热影响区,正火接头热影响区冲击损伤略微轻微,这是由正火接头热影响区硬度大于淬火接头热影响区导致。此外,正火焊接接头热影响区的损伤程度略大于正火焊接接头焊缝区[图12(c-f)]。

前期研究结果^[12]发现:冲击试验初期,钢轨焊接接头损伤以黏着磨损为主,此阶段钢轨焊接接头损伤形式主要为材料剥落;随着冲击试验循环次数的增加,钢轨焊接接头的损伤进入过渡阶段,其磨损形式为黏着磨损和疲劳磨损共同存在,此阶段损伤形式为材料剥落和疲劳裂纹共存;随着循环次数进一步增加,钢轨焊接接头进入疲劳损伤阶段,此阶段钢轨焊接接头损伤形式以疲劳裂纹为主。结合钢轨焊接接头损伤行为(图11~12)发现:钢轨焊接接头母材区冲击磨损以剥落形式为主,处于黏着磨损状态;淬火焊接接头焊缝和正火焊接接头焊缝所处磨损阶段不同,淬火焊接接头焊缝主要损伤形式为剥落和裂纹,处于过渡阶段,正火焊接接头焊缝主要损伤形式为疲劳裂纹,处于疲劳损伤阶段;而淬火接头热影响区和正火接头热影响区损伤形式均以疲劳裂纹为主,处于疲劳损伤阶段。

对比焊接接头不同区域冲击损伤、冲击磨损量与硬度发现:硬度越高,冲击磨损量越小、损伤越轻微;硬度越低,冲击磨损量越大、损伤越严重。热处理可以明显改变钢轨焊接接头的微观组织和硬度,淬火后焊缝处的铁素体含量小于正火后焊缝铁素体含量,因而淬火后焊缝处硬度较正火后高,其冲击磨损与损伤较轻;而正火后热影响区存在片层状珠光体,其硬度略大于淬火后热影响区,其冲击磨损与损伤较为轻微。

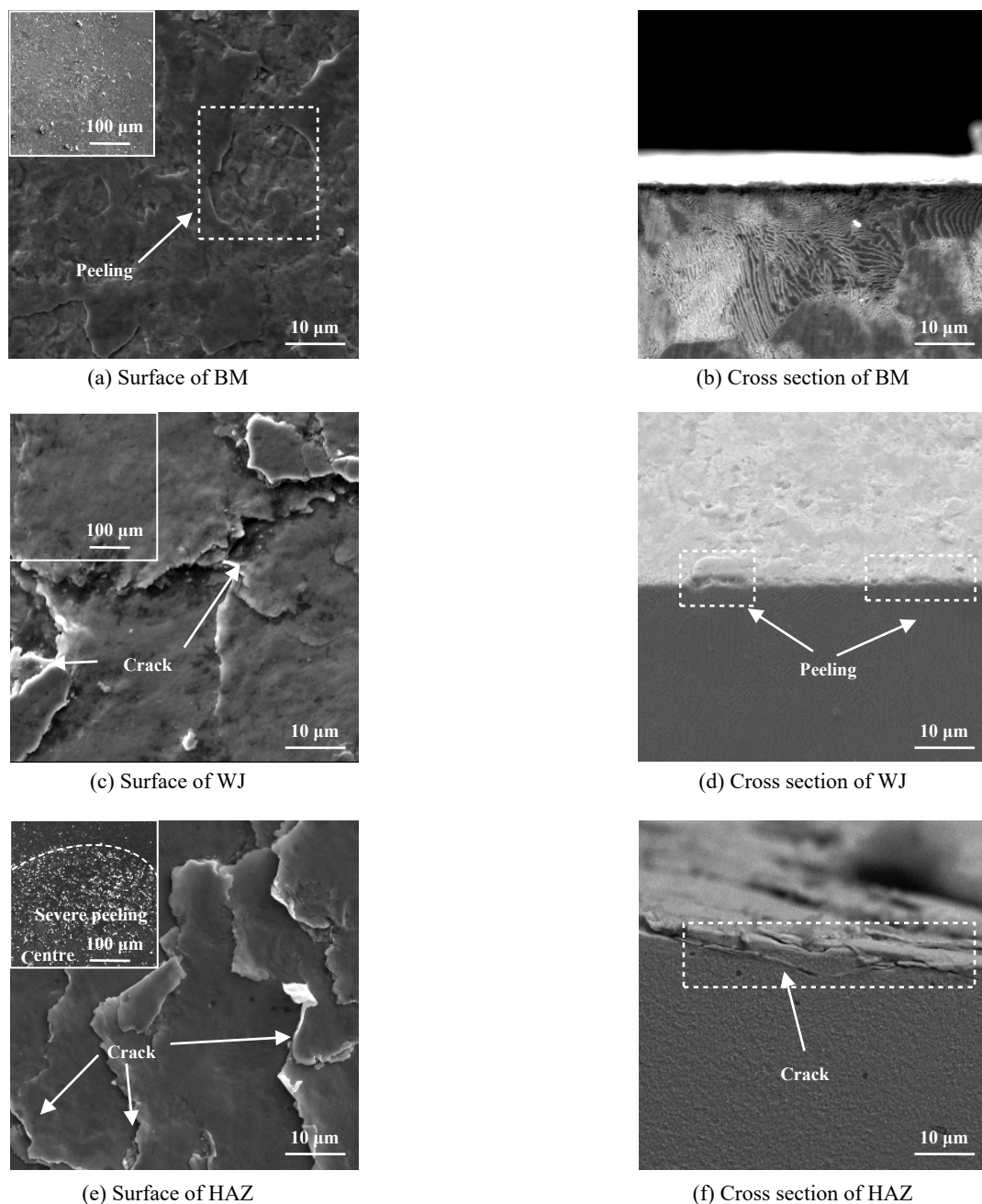


Fig. 11 SEM micrographs of damages in different zones of quenched rail joint

图 11 淬火焊接接头不同区域表面与剖面损伤SEM照片

3 结论

a. 淬火和正火处理后钢轨焊接接头各区域硬度大小依次为母材区>淬火接头焊缝区>正火接头焊缝区>正火接头热影响区>淬火接头热影响区。

b. 钢轨焊接接头不同区域热处理后微观组织不同, 母材区微观组织为片层状珠光体; 焊缝区微观组织为珠光体与先共析铁素体, 且正火后先共析铁素体含量较淬火后多; 淬火后热影响区微观组织为粒状珠光体, 而正火后热影响区由粒状珠光体和少量片层状

珠光体组成。

c. 淬火与正火焊接接头不同区域冲击深度与冲击磨损体积大小依次为母材区<淬火接头焊缝区<正火接头焊缝区<正火接头热影响区<淬火接头热影响区。冲击磨损深度和体积随硬度增加而降低, 且当硬度小于 $350\text{HV}_{0.5}$ 时, 降低趋势明显; 当硬度大于 $350\text{HV}_{0.5}$ 时, 降低趋势减弱。

d. 焊接接头母材区冲击损伤轻微, 表面出现轻微剥落; 焊缝区损伤较为严重, 表面出现明显裂纹, 正火后焊缝损伤较淬火后严重; 热影响区损伤最为严重,

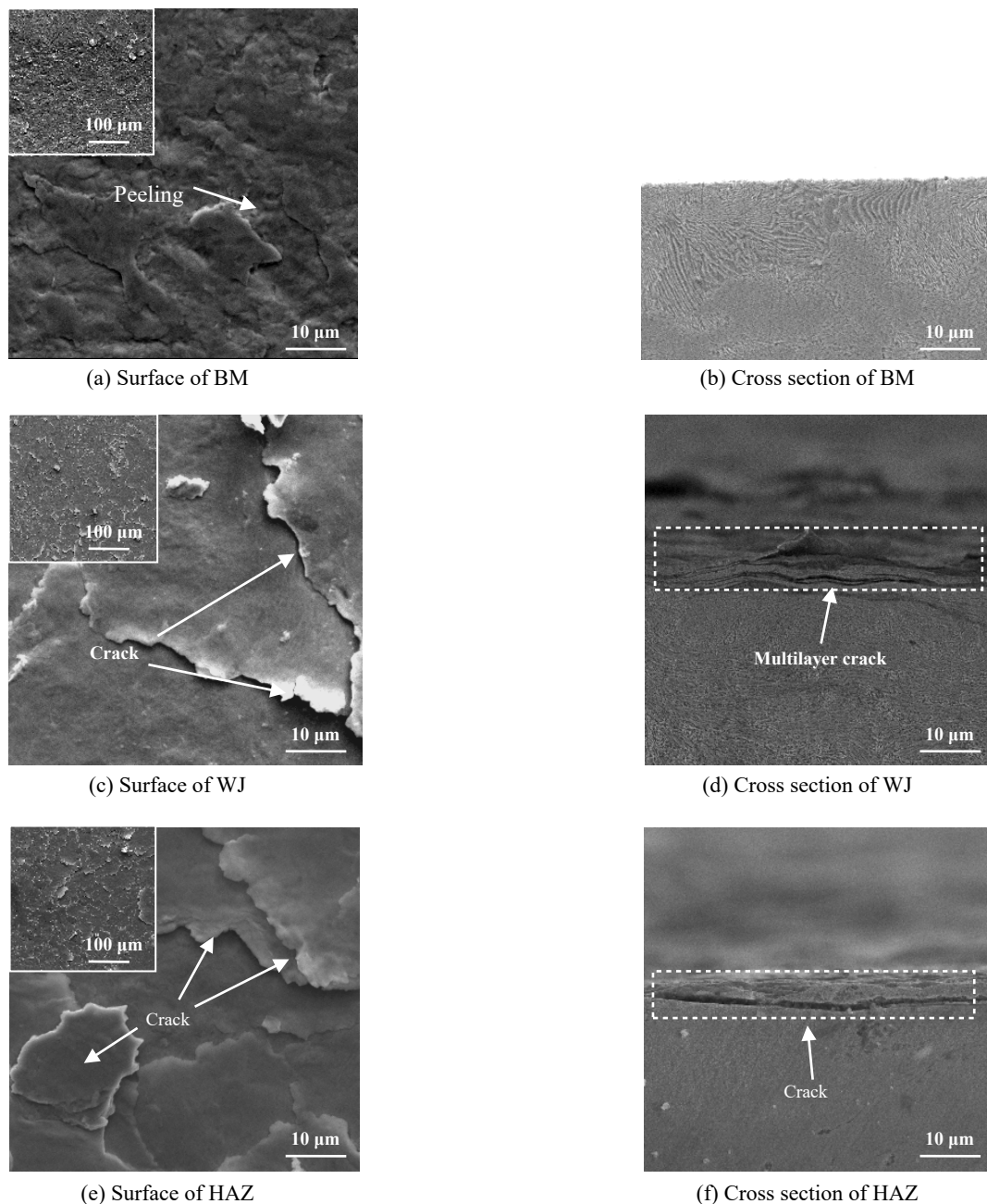


Fig. 12 SEM micrographs of damages in different zones of normalized rail joint

图 12 正火焊接接头不同区域表面与剖面损伤SEM照片

表面和剖面均出现明显裂纹,且正火后损伤较淬火后略轻微。淬火与正火焊接接头不同区域冲击损伤程度与硬度密切相关,硬度越低的区域,冲击损伤越严重。

参考文献

- [1] Wang Yanpeng, Ding Haohao, Zou Qiang, et al. Research progress on rolling contact fatigue of railway wheel treads[J]. Surface Technology, 2020, 49(5): 120–128 (in Chinese) [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]. doi: [10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.05.015](https://doi.org/10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.05.015).
- [2] Feng Yaming, He Bolin. Influence factors of railway vehicle wheel/rail contact fatigue[J]. Surface Technology, 2016, 45(11): 48–54 (in Chinese) [封亚明, 何柏林. 铁道车辆轮轨接触疲劳的影响因素[J]. 表面技术, 2016, 45(11): 48–54]. doi: [10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.11.007](https://doi.org/10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.11.007).
- [3] Zhang Yinhua, Li Chuang, Zhou Qingyue, et al. Test study on hypereutectoid rail for heavy haul railway in China[J]. China Railway Science, 2013, 34(6): 1–7 (in Chinese) [张银花, 李闯, 周清跃, 等. 我国重载铁路用过共析钢轨的试验研究[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(6): 1–7]. doi: [10.3969/j.issn.1001-4632.2013.06.01](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-4632.2013.06.01).
- [4] Zhao Xi. Research on flash welding quality of new rail used in

- heavy-duty lines[J]. Electric Welding Machine, 2018, 48(5): 69–75 (in Chinese) [赵曦. 重载线路用新型钢轨闪光焊质量研究[J]. 电焊机, 2018, 48(5): 69–75].
- [5] Xu Xiaodi. Time-frequency feature extraction and dynamic diagnosis method for track short-wave defects[D]. China Academy of Railway Sciences, 2019(in Chinese) [徐晓迪. 轨道短波病害时频特征提取和动态诊断方法研究[D].北京: 中国铁道科学研究院, 2019].
- [6] Shi Haochuan. The effect of laser surface strengthening on wear and damage properties of rail welding joints[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019 (in Chinese) [施浩川. 激光表面强化对钢轨焊接接头磨损与损伤性能影响[D]. 成都: 西南交通大学, 2019].
- [7] Li Zili, Zhao Xin, Esvelde C, et al. An investigation into the causes of squats—Correlation analysis and numerical modeling[J]. Wear, 2008, 265(9–10): 1349–1355. doi: [10.1016/j.wear.2008.02.037](https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.02.037).
- [8] Song Tian, Xia Bin, Chen Xiaolin. Application and analysis of post-weld heat treatment method for rail[J]. Practical Electronics, 2014, (3): 206–207 (in Chinese) [宋甜, 夏彬, 陈晓琳. 钢轨焊后热处理方法的应用与分析[J]. 电子制作, 2014, (3): 206–207]. doi: [10.16589/j.cnki.cn11-3571/tn.2014.03.209](https://doi.org/10.16589/j.cnki.cn11-3571/tn.2014.03.209).
- [9] Li Jinhua. Research on rail welded joint's wear of heavy haul railway[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2012(in Chinese) [李金华. 重载线钢轨焊接接头磨损研究[D].北京: 中国铁道科学研究院, 2012].
- [10] Godefroid L B, Faria G L, Cândido L C, et al. Failure analysis of recurrent cases of fatigue fracture in flash butt welded rails[J]. Engineering Failure Analysis, 2015, 58: 407–416. doi: [10.1016/j.engfailanal.2015.05.022](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.05.022).
- [11] Xie Xuhui, Yu Qingyuan, Li Wei, et al. Wear property of U₇₁MnK rail weld under rolling contact[J]. Tribology, 2015, 35(3): 315–321 (in Chinese) [谢旭辉, 于卿源, 李伟, 等. U₇₁MnK钢轨焊缝滚动接触磨损性能研究[J]. 摩擦学学报, 2015, 35(3): 315–321]. doi: [10.16078/j.tribology.2015.03.011](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2015.03.011).
- [12] Jiang W J, Liu C, He C G, et al. Investigation on impact wear and damage mechanism of railway rail weld joint and rail materials[J]. Wear, 2017, 376–377: 1938–1946. doi: [10.1016/j.wear.2017.02.035](https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.02.035).
- [13] Jiang Wenjuan, Xiang Pengcheng, Ding Hao hao, et al. Research on rolling wear and damage properties of gas pressure welding joint of U71Mn rail[J]. Tribology, 2020, 40(5): 24–30 (in Chinese) [蒋文娟, 向鹏程, 丁昊昊, 等. U71Mn钢轨气压焊焊接接头滚动磨损与损伤性能研究[J]. 摩擦学学报, 2020, 40(5): 24–30]. doi: [10.16078/j.tribology.2020014](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2020014).
- [14] Wang Yingying, Li Li, Song Hongtu, et al. Study on induction heat treatment device and technology of rail mobile flash butt welding[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(3): 120–125 (in Chinese) [王莹莹, 李力, 宋宏图, 等. 钢轨移动闪光焊感应热处理装置及工艺研究[J]. 铁道学报, 2018, 40(3): 120–125]. doi: [10.3969/j.issn.1001-8360.2018.03.018](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-8360.2018.03.018).
- [15] Li Wei, Song Weijun, Dai An, et al. Impact wear properties of hypereutectic rail welded joints produced by two kinds of welding processes[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2021, 56(2): 403–410 (in Chinese) [李伟, 宋伟军, 戴安, 等. 两种焊接工艺下过共析钢轨接头的冲击磨损性能[J]. 西南交通大学学报, 2021, 56(2): 403–410].
- [16] Ma Ninshu, Cai Zhipeng, Huang Hui, et al. Investigation of welding residual stress in flash-butt joint of U₇₁Mn rail steel by numerical simulation and experiment[J]. Materials & Design, 2015, 88: 1296–1309. doi: [10.1016/j.matdes.2015.08.124](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.08.124).
- [17] Desimone H, Beretta S. Mechanisms of mixed mode fatigue crack propagation at rail butt-welds[J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28(5–6): 635–642. doi: [10.1016/j.ijfatigue.2005.07.044](https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2005.07.044).
- [18] Ding Wei, Gao Wenhui, Wang Guishan, et al. Research and application of spray quenching on PD3 quenching rail welding Joints[J]. Railway Engineering, 2004, 44(12): 38–39 (in Chinese) [丁韦, 高文会, 王贵山, 等. PD3淬火钢轨焊接接头线上喷雾淬火方法的研究与应用[J]. 铁道建筑, 2004, 44(12): 38–39]. doi: [10.3969/j.issn.1003-1995.2004.12.015](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-1995.2004.12.015).
- [19] Huang Dan. Study on new rail flash welding process and properties of welded joints[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019 (in Chinese) [黄丹. 新型钢轨闪光焊工艺及焊接接头的性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019].
- [20] Wang Zirui. Research on surface-hardening device and technology of the mobile rail welded joint[J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2011, 10(2): 142–145 (in Chinese) [王子儒. 移动式钢轨焊接接头表面硬化装置及工艺的研究[J]. 材料与冶金学报, 2011, 10(2): 142–145]. doi: [10.14186/j.cnki.1671-6620.2011.02.003](https://doi.org/10.14186/j.cnki.1671-6620.2011.02.003).
- [21] Li Jinhua, Li Li, Ding Wei, et al. Damage analysis of gas pressure welding rail joints of heavy haul railway and its prevention countermeasures[J]. Railway Engineering, 2016, 56(11): 124–128 (in Chinese) [李金华, 李力, 丁韦, 等. 重载线钢轨气压焊接头损伤分析与预防对策[J]. 铁道建筑, 2016, 56(11): 124–128]. doi: [10.3969/j.issn.1003-1995.2016.11.33](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-1995.2016.11.33).
- [22] Qi Zhengfeng. Principles of metal heat treatment[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1987: 52–53(in Chinese) [戚正风. 金属热处理原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987: 52–53].
- [23] Zhang Jianguo, Jing Xionggang. TTT & CCT curve and microstructure analysis of U₇₅V rail after induction heat treatment[J]. Hot Working Technology, 2010, 39(8): 168–170, 113 (in Chinese) [张建国, 敬雄刚. U₇₅V钢轨TTT曲线、CCT曲线及感应热处理的显微组织分析[J]. 热加工工艺, 2010, 39(8): 168–170, 113]. doi: [10.14158/j.cnki.1001-3814.2010.08.013](https://doi.org/10.14158/j.cnki.1001-3814.2010.08.013).
- [24] Xu Xin. Study on post-welding heat treatment process to refine the rail base grain size of welded U71Mn rail joints[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2016(in Chinese) [许鑫. 细化U71Mn钢轨焊接接头轨底晶粒度的焊后热处理工艺研究[D].北京: 中国铁道科学研究院, 2016].
- [25] Deng Hanzhong, Meng Xiangfeng. Effects of normalizing on microstructure and mechanical properties of 15MnTi steel welded

- seam[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(10): 202–204, 207 (in Chinese) [邓汉忠, 孟祥锋. 正火工艺对15MnTi钢焊缝组织与性能的影响[J]. 热加工工艺, 2013, 42(10): 202–204, 207]. doi: [10.14158/j.cnki.1001-3814.2013.10.058](https://doi.org/10.14158/j.cnki.1001-3814.2013.10.058).
- [26] Yang Chunlei, Li Fu, Fu Maohai, et al. Research on the matching relationship between the axle load and running speed of heavy haul freight train[J]. China Railway Science, 2012, 33(3): 92–97 (in Chinese) [杨春雷, 李芾, 付茂海, 等. 重载货车轴重与速度匹配关系研究[J]. 中国铁道科学, 2012, 33(3): 92–97]. doi: [10.3969/j.issn.1001-4632.2012.03.15](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-4632.2012.03.15).
- [27] Song Weijun. Study on impact wear performance of welded joints of hypereutectoid steel rail[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019(in Chinese) [宋伟军. 过共析钢轨焊接接头冲击磨损性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019].
- [28] Rice S L. Reciprocating impact wear testing apparatus[J]. Wear, 1977, 45(1): 85–95. doi: [10.1016/0043-1648\(77\)90104-1](https://doi.org/10.1016/0043-1648(77)90104-1).
- [29] Rice S L, Nowotny H, Wayne S F. Formation of subsurface zones in impact wear[J]. A S L E Transactions, 1981, 24(2): 264–268. doi: [10.1080/05698198108983020](https://doi.org/10.1080/05698198108983020).
- [30] Suh N P. An overview of the delamination theory of wear[J]. Wear, 1977, 44(1): 1–16. doi: [10.1016/0043-1648\(77\)90081-3](https://doi.org/10.1016/0043-1648(77)90081-3).