



U71Mn钢轨气压焊焊接接头滚动磨损与损伤性能研究

蒋文娟, 向鹏程, 丁昊昊, 王文健, 刘启跃, 郭俊

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

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

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2020014>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

D2车轮钢原始组织对滑动磨损性能的影响

Influences of Microstructure on Sliding Wear Performance of D2 Wheel Steel

摩擦学学报. 2019, 39(4): 479 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018196>

干-水态下圆形硌伤对钢轨材料滚动接触疲劳特性影响

The Effect of Round Defects on Rolling Contact Fatigue Characteristics of Rail Materials under Dry-wet Conditions

摩擦学学报. 2017, 37(4): 544 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2017.04.017>

打磨参数对钢轨打磨磨石磨损与材料去除影响研究

Effects of Grinding Parameters on the Wear of Grinding Stone and Rail Material Removal

摩擦学学报. 2018, 38(3): 327 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018.03.010>

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>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16078/j.tribology.2020014

U71Mn钢轨气压焊焊接接头滚动磨损与损伤性能研究

蒋文娟, 向鹏程, 丁昊昊*, 王文健, 刘启跃, 郭俊

(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U71Mn钢轨气压焊焊接接头上各区域的组织与性能, 并利用MMS-2A轮轨滚动磨损与接触疲劳试验机对焊接接头材料进行试验, 分析了各区域的磨损与损伤特性。结果表明: 焊接接头组织为珠光体, 但晶粒大小及渗碳体形态和大小存在差异。焊缝中珠光体晶粒较小, 渗碳体呈细小片层状及细小颗粒状, 因此硬度高且塑性变形能力强。在 1×10^5 和 2×10^5 循环次数时耐磨性优于母材, 在 3×10^5 循环次数时, 焊缝磨损量大于母材磨损量, 且焊缝表面损伤较母材严重。在焊缝两侧各有1个区域(软化区), 组织为粒状珠光体和少量片层状珠光体, 颗粒大小和片层厚度不均匀, 硬度较小, 磨损量较大, 塑性变形层较厚, 表面损伤最严重。

关键词: U71Mn钢轨; 气压焊; 焊缝; 软化区; 磨损; 损伤

中图分类号: TH117.1

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2020)05-0579-07

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

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

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

Abstract: The structure and properties of the Gas Pressure welding joint of U71Mn rail were studied. The MMS-2A wheel-rail rolling wear and contact fatigue testing machine was used to test the joint material and the parent material. The wear and damage characteristics of the joint and the parent material were studied. The results showed that the microstructure of the joint was pearlite, but the size of grain and the shape and size of cementite were different. The pearlite grain of the weld bead was smaller than that of the parent metal, and the shape of cementite was fine lamellar and fine granular, so the hardness and the plastic deformation ability were higher. At 1×10^5 and 2×10^5 , the wear resistance was better than that of the parent material; at 3×10^5 , the wear loss of the weld bead was larger than that of the parent material, and the surface damage was more serious. On both sides of the weld, there were two areas (softened zones) which were composed of granular cementite and a small amount of lamellar cementite. The grain size and the thickness of the lamellar of cementite were not uniform, so the hardness was the lowest. Moreover, the wear, cracks and plastic deformation were aggravated.

Key words: U71Mn rail; gas pressure welding; weld bead; softened zone; wear; damage

Received 17 January 2020, revised 2 April 2020, accepted 9 April 2020, available online 28 September 2020.

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

The project was supported by the Sichuan Science and Technology Program (2019YFG0289), the National Natural Science Foundation of China (51775455) and Foundation of State Key Laboratory of Traction Power (TPL1906).

四川省重点研发计划项目(2019YFG0289), 国家自然科学基金(51775455)和牵引动力国家重点实验室开放课题(TPL1906)资助。

随全球铁路运输需求的增加,列车轴重、速度以及铁路运量大幅增加,这对铁路结构完整性有了有更加严格的要求,以减少运行故障,提高运输效率.连续焊接钢轨(Continuous welded rails, CWR)可确保钢轨的连续性,改善铁路系统的动态特性,有效保证列车运行安全性和平稳性^[1].

但是现场调查发现,在列车长期碾压和冲击下,钢轨焊接接头处易形成伤损、开裂和磨损低塌,使钢轨接头寿命低于钢轨母材.钢轨焊接接头仍旧是无缝线路最薄弱的环节^[2].高新平等^[3]根据在钢轨探伤过程中积累的大量数据,对重伤焊接接头发展规律进行统计分析,观察焊接接头部位损伤的发展过程,发现在车轮载荷作用下,钢轨焊接接头处会产生低塌.这些不同程度的低踏,会使得车辆经过此处时产生巨大的冲击和振动^[4],还会导致较大的钢轨局部塑性变形^[5].李金华^[6]对现场钢轨焊接接头进行监测,焊缝产生低塌的原因是接头区域相对于相邻母材的不均匀磨损.对于钢轨焊接接头而言,除了要求确保焊接接头强度和韧性以防止断轨外,接头与钢轨母材同步磨损也是确保线路状况良好的重要方面^[7].J.F. Peng等^[8]研究了U71MnK和U71MnG两种钢轨闪光焊接头的接触磨损特性.谢旭辉等^[9]对U71MnK钢轨焊缝及母材在滚动接触疲劳条件下进行模拟试验,对比研究了钢轨焊缝及母材在滚动接触过程中的材料磨损演变行为.此外,王莹莹^[10]对钢轨闪光焊机理和灰斑、微裂纹等缺陷产生的原因进行了系统的研究,分析了焊接材料本身对焊接接头的影响.L.B. Godefroid等^[11]对钢轨焊接接头两个案例进行了研究,发现疲劳裂纹都是从焊缝附近开始,并以脆性的方式扩展,导致材料的过早断裂.X.M. Yu等^[12]研究了U71Mn钢轨闪光对焊接头的断裂问题,认为焊接接头为疲劳断裂,断口形貌为解理断裂特征,裂纹来源是钢轨腹板左侧与钢轨头部的连接处由外向内的自由凝固组织.江园^[13]对U71Mn钢轨的电渣焊方法下的焊接性进行了试验研究,电渣焊钢轨焊接接头综合性能较好.H.C. Shi等^[14]通过滚动接触疲劳试验,对激光淬火和激光冲击强化的焊接接头进行了抗磨损和抗疲劳性能研究,发现激光淬火工艺显著改善了钢轨焊接接头的抗磨损性能,但抗疲劳性能变差.激光冲击强化工艺改善了焊接接头的抗磨损和抗疲劳性能.R. Baptista等^[15]以钢轨生产为目标,对S700MC级高强度TMCP钢的焊接性能进行了分析,以建立材料性能与材料微观结构的关联,为新材料开发新材料应用提供依据.

国内外的研究更多集中在焊接接头的缺陷、断裂等问题,钢轨焊接方法以及接头性能优化以及新材料的应用性的研究等方面,但是对于焊接接头区域材料的滚动接触磨损特性的研究还很少,尤其是对气压焊(现场施工的常用方法)的焊接接头的滚动接触磨损特性的研究尚未涉及.因此,本文中通过模拟试验,研究U71Mn钢轨气压焊焊接接头材料滚动磨损和损伤特性,通过对比分析母材及接头各部分区域试样的磨损量、硬度及伤损,了解接头各区域滚动接触磨损特性与母材的差异,期望为钢轨的气压焊焊接工艺的改进提供理论依据.

1 试验部分

1.1 试验方法

试验在MMS-2A型微机控制摩擦磨损试验机上进行,车轮试样与钢轨试样相互滚动接触.试验采用赫兹模拟准则进行^[16].试验中上试样为钢轨试样,下试样为车轮试样,轮轨试样尺寸如图1所示.下试样转速为200 r/min,上下试样滑差为0.91%.试验条件为常温干态,法向力为800 N,循环次数分别是 1×10^5 、 2×10^5 和 3×10^5 .

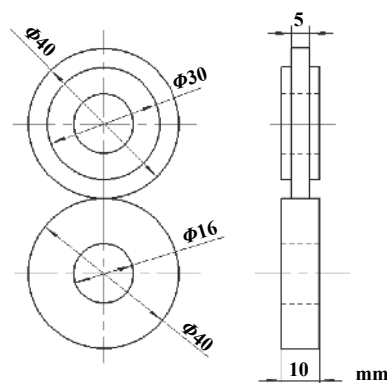


Fig. 1 Schematic of wheel and rail rollers
图1 轮轨试样的尺寸示意图

1.2 试验材料

车轮试样取自CL60车轮踏面处,钢轨试样取自U71Mn钢轨母材及气压焊焊接接头,轮轨材料成分见表1,接头硬度值如图2所示.由于焊接过程,焊接接头组织性能与母材产生差异.图3和图4是母材(Parent metal, PM)、焊缝(Weld Bead, WB)及软化区(Softened Zone, SE)的组织,3个区域均为珠光体组织,但是焊缝和软化区晶界处存在铁素体组织.母材珠光体呈层片状[见图4(a)],层片平行排列,层片间距最大为 $1.07 \mu\text{m}$,最小为 $0.623 \mu\text{m}$.焊缝组织[见图4(b)]是层片状珠光体

表 1 轮轨材料化学成分(w)

Table 1 Chemical compositions of wheel/rail materials (w)

Materials	C	Si	Mn	P	S
CL60 wheel	0.55~0.65	0.17~0.37	0.50~0.80	0.035	0.040
U71Mn rail	0.71~0.80	0.50~0.80	0.70~1.05	≤0.030	≤0.030

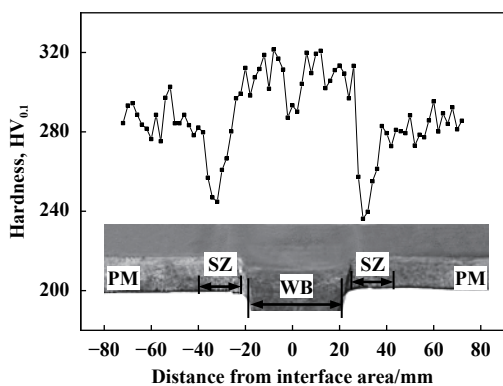


Fig. 2 Longitudinal hardness distribution of the welded joint

图 2 接头硬度的纵向分布

混有少量的细颗粒状珠光体, 层片间距最大为 $0.716\ \mu\text{m}$, 最小为 $0.293\ \mu\text{m}$, 珠光体晶粒小于母材, 边界处可见铁素体组织. 由于焊缝晶粒和片层间距都比母材小,

因此焊缝的硬度高于母材硬度. 大概在焊缝中心两侧 30 mm 的区域硬度远小于母材的硬度, 大致为母材的 80%, 本文将这个区域称为软化区. 软化区组织[见图4(c)]为层片状和颗粒状珠光体, 粒状珠光体比片状珠光体的硬度稍低, 而且此区域材料珠光体层片长度、厚度与层间距都不均匀, 渗碳体颗粒大小也非常不均匀, 因此力学性能比母材差. 由于钢轨气压焊焊接接头各区域性能的不均匀性, 按照3个位置分别取样, 如图5所示.

2 结果与讨论

2.1 滚动磨损行为

图6是母材、焊缝及软化区3个区域的试样分别在3个循环次数下的磨损量, 随着循环次数的增多, 磨损量增大. 对比发现, 软化区在3个循环次数下的磨损量远大于母材和焊缝的磨损量. 焊缝的磨损量在 1×10^5 和 2×10^5 循环时最小, 但是在 3×10^5 循环时, 磨损量明显增大, 超过了母材, 但还是远小于软化区的磨损量. 表明软化区的磨损更严重, 其抗磨损性能较差. 这与试样的硬度(图7中3个区域试样的初始硬度)相关, 硬度越大, 磨损量越小.

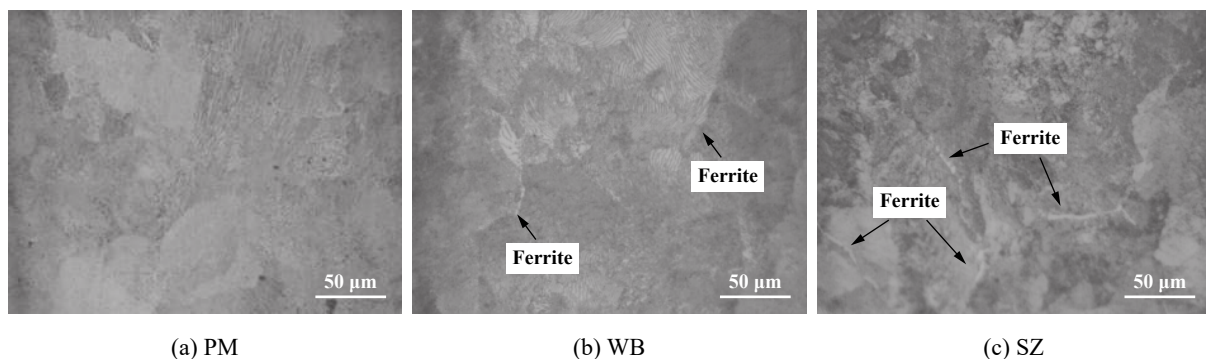


Fig. 3 OM photograph of welded joint Microstructures

图 3 接头组织的OM

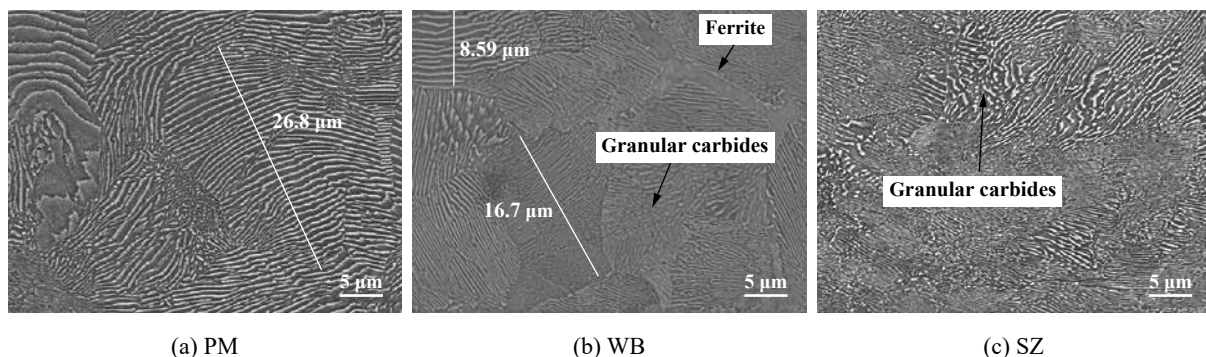


Fig. 4 SEM photograph of welded joint Microstructures

图 4 接头组织的SEM

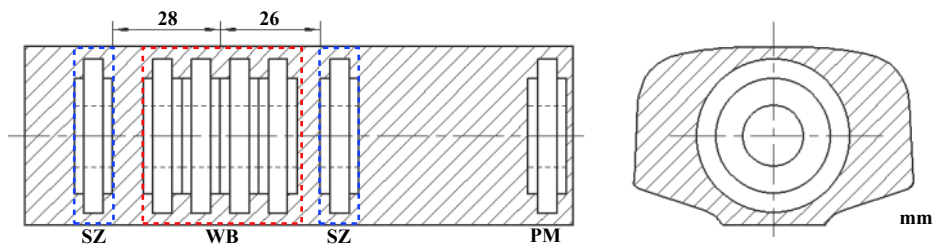


Fig. 5 Sampling schematic

图5 焊缝和软化区试样的取样位置示意图

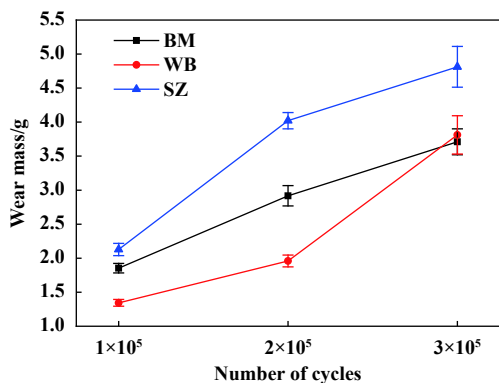


Fig. 6 Wear mass of rails

图6 钢轨的磨损量

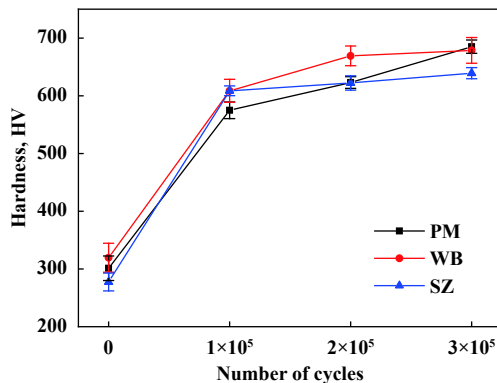


Fig. 7 The hardness value of welded joint

图7 试验前后钢轨试样的硬度

图7是试验前后3个区域的试样的硬度. 随着循环次数的增加, 硬度值均逐渐增大. 焊缝和软化区的硬度到达某个值后, 硬度值变化不大, 逐渐趋于平稳, 而母材的硬度一直随着循环次数的变化不断提高. 初始状态下, 软化区的硬度最小, 焊缝的硬度最大, 在 3×10^5 循环时, 软化区的硬度依然最小, 而母材的硬度超过了焊缝.

2.2 表面损伤行为分析

图8为3个区域试样分别在3个循环下表面损伤SEM照片, 3个区域试样表面均可见明显的疲劳裂纹. 在 1×10^5 循环下焊缝表面裂纹[见图8(b)]较母材[见图8(a)]短小, 但是数量较多, 而软化区的表面裂纹[见图8(c)]长度最长, 数量最少. 在 2×10^5 循环下, 母材、软化区表面的裂纹[见图8(d)(e)(f)]均有数量增多, 焊缝表面裂纹数量减少, 但长度增大. 总体来说, 在这两个循环下, 3个区域表面裂纹均表现为薄片状的起皮. 在 3×10^5 循环下, 发现3个区域的表面表面损伤[见图8(g)(h)(j)]差异较大, 焊缝和软化区表面损伤较母材严重, 尤其是软化区. 母材表面的裂纹[见图8(g)]随着循环次数的增多变化不大, 依旧比较细小, 但是数量增多, 相对密度增大, 裂纹之间间距减小. 焊缝和软化区表面裂纹[见图8(h)(j)]长度远大于母材, 但相对数量较母材少. 裂纹的扩展到一定深度后折断, 形成片层状脱

落, 从折断的区域可以发现, 软化区和焊缝的裂纹较母材更深入, 尤其是软化区的裂纹相比焊缝裂纹扩展的深度更深.

图9为试样在 3×10^5 循环下纵剖面裂纹OM照片. 母材试样表面出现细小的裂纹, 裂纹以小角度向内并大致平行于表面的方向扩展, 然后并转向表面扩展至从表面脱落, 形成细小的薄片. 焊缝试样表面裂纹为多层状, 既有从表面开裂, 逐渐向内部扩展的裂纹[见图9(b)中点1], 也存在从次表面直接形成开裂, 并各自逐渐长大直至相贯穿的裂纹[见图9(b)中点2]. 软化区试样表面形成多层裂纹, 裂纹的长度和深度远大于母材和焊缝, 这与图8显示的结果完全一致. 相较于焊缝的多层状的裂纹, 软化区的裂纹层数更多, 层厚度更薄. 由此可见, 在软化区的疲劳损伤比焊缝和母材更加严重, 焊缝的疲劳损伤也比母材严重. 已有的研究表明, 钢轨在气压焊过程中, 会产生脱碳现象(钢的含碳量减少的现象), 碳质量分数从原始的0.78%减少至0.54%^[17], 碳含量的下降焊缝位置材料碳元素不足, 晶粒周围形成大量的铁素体组织, 导致钢轨力学性能下降, 成为裂纹的起源^[17-18]. 而在本试验中, 在焊缝组织中发现了晶粒周围分布的铁素体组织, 如图3(b)和图4(b)所示, 从而加重了焊缝表面的疲劳损伤. 结合图8、图9, 这也很好地解释了磨损量的变化, 软化区无

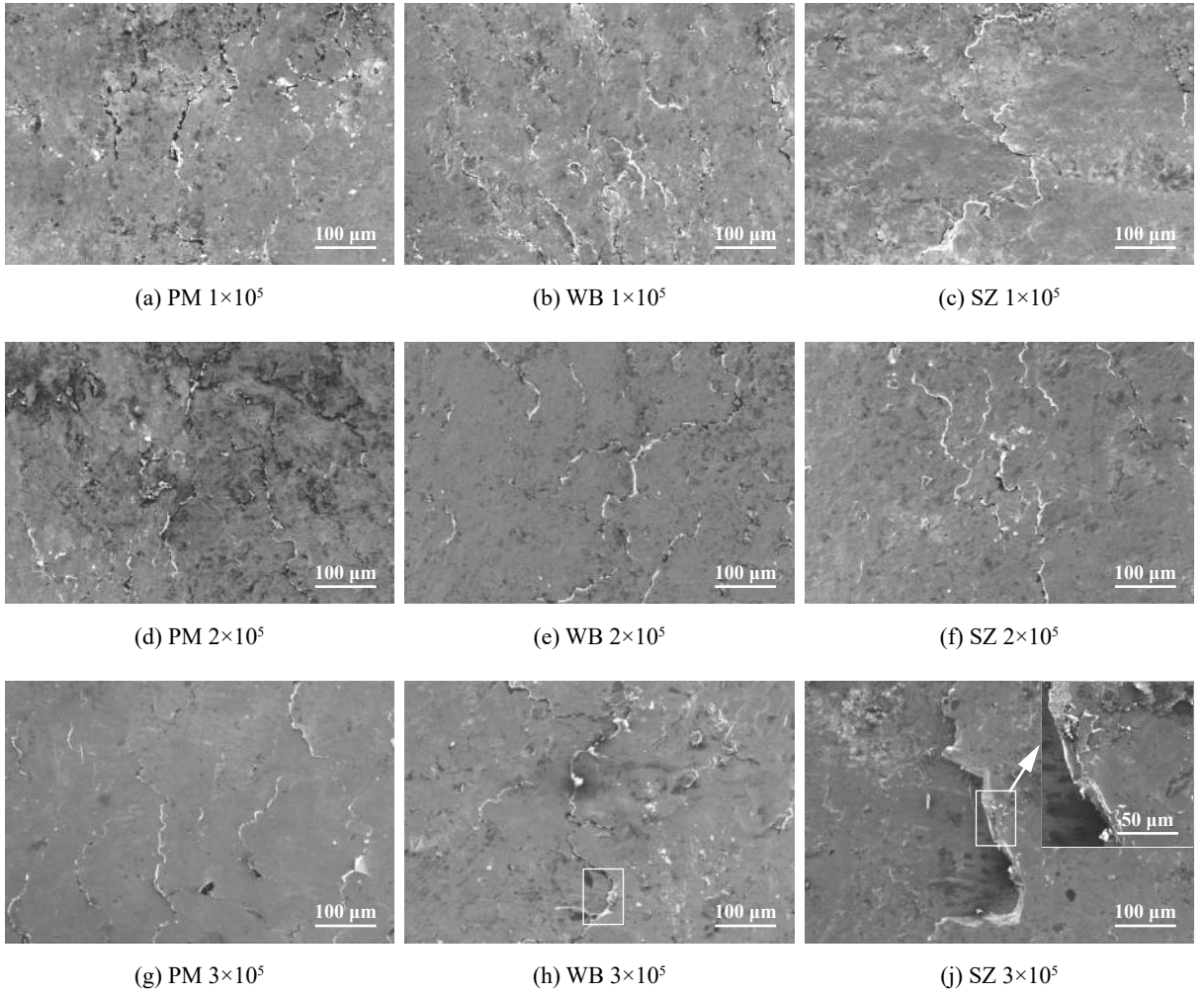


Fig. 8 SEM photographs of surface damage of rail specimens

图 8 钢轨试样表面损伤SEM照片

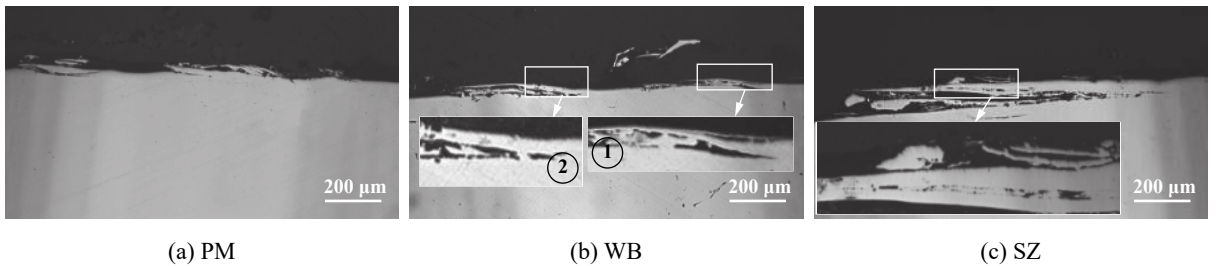


Fig. 9 OM photographs of surface cracks on cross sections of rail specimens under 3×10^5 cycles

图 9 钢轨试样在 3×10^5 循环下剖面裂纹OM照片

论从硬度还是抗疲劳性都小于母材和焊缝,因此磨损量最大.焊缝在较小循环次数下,由于硬度比母材大,磨损量也比母材小,但是到 3×10^5 循环,焊缝表面裂纹深度增大,表面脱落层厚度增大,导致磨损量比母材大.

图10是试样在 3×10^5 循环下塑性变形的OM照片.3个区域的试样都产生了明显的塑性变形.母材的塑性变形层厚度大约为168 μm ,焊缝的塑性变形厚度约

为191 μm ,而软化区的塑性变形厚度最大,约为205 μm .结合图9和图10发现,塑性变形层厚的疲劳损伤更严重.因此,可以说疲劳损伤的程度与表面层塑性变形密切相关,在循环载荷作用下,塑性变形累积到一定程度,在表层或者次表层形成裂纹,在应力作用下,裂纹会进一步扩展最终剥落.

母材、焊缝及软化区的塑性变形层厚度不同与组织差异有关.珠光体是铁素体和渗碳体的混合,铁素

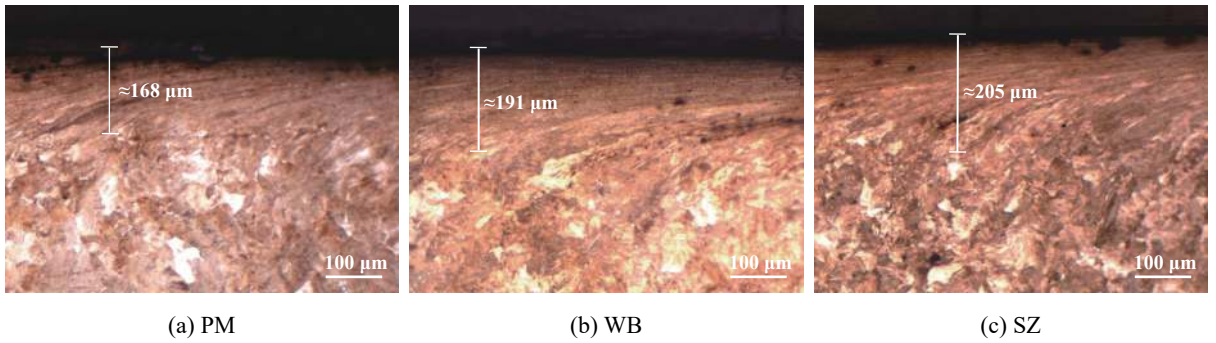


Fig. 10 OM micrographs of plastic deformation of rail specimens under 3×10^5 cycles

图10 钢轨试样在 3×10^5 循环下塑性变形OM照片

体塑性好, 渗碳体硬而脆. 母材的渗碳体片层较厚 [见图4(a)], 塑性变形主要集中在铁素体中^[19]. 焊缝渗碳体片层很薄 [见图4(b)], 渗碳体片可产生一定的塑性变形, 也可以产生弯曲, 另外, 焊缝中的渗碳体是不连续的, 片层状铁素体并未完全被渗碳体所隔离, 因此焊缝的塑性增大. 软化区的渗碳体 [见图4(c)] 部分以颗粒状分布在铁素体基体上, 当外力作用时, 铁素体会产生滑移, 发生变形, 但是颗粒状渗碳体没有阻碍变形的能力, 只能随着铁素体滑移, 因此塑性比母材和焊缝好.

综上所述, 由于焊接过程使钢轨焊接接头的组织与性能发生改变, 与母材存在很大差异. 软化区渗碳体呈大小不均匀的颗粒状, 使软化区硬度小, 塑性强, 因此, 磨损量大, 塑性变形层厚, 疲劳裂纹的长度和深度大. 焊缝晶粒较母材小, 珠光体片层间距较小, 因此有较高的硬度, 磨损量小. 薄片且不连续的渗碳体, 使焊缝的塑性变形较母材大, 表面的疲劳损伤比母材严重.

3 结论

a. 气压焊焊接接头组织为珠光体, 但是位置不同, 珠光体形貌不同, 硬度不同. 焊缝区域是细小的片层状珠光体加少量的细小颗粒状珠光体, 该区域硬度值高于母材. 在焊缝两侧各有1个区域, 组织为粒状珠光体和少量片层状珠光体, 颗粒大小不均匀, 片层厚度不均匀, 其硬度小于母材和焊缝.

b. 随着循环次数的增多, 3个区域试样磨损量增大. 3个循环次数下, 软化区的磨损量最大, 焊缝的磨损量在 1×10^5 和 2×10^5 时最小, 但在 3×10^5 时, 焊缝的磨损量大于母材的磨损量.

c. 从表面损伤状况来看, 3个区域试样表面均产生了裂纹. 在 1×10^5 和 2×10^5 循环次数时, 软化区及焊缝

的表面疲劳损伤与母材差异较小, 而在 3×10^5 循环下, 软化区的裂纹长度和深度大于焊缝和母材, 而焊缝的裂纹长度和深度大于又大于母材. 表面损伤与塑性变形层的厚度有关, 变形层厚度越大, 疲劳裂纹的长度和深度越大. 而变形层的厚度是由组织决定的, 焊接接头上不均匀的组织导致塑性变形的能力不同.

参考文献

- [1] Tu Guijun. Dynamic response of wheel-rail system to rail weld irregularity [D]. Chendu: Southwest Jiaotong University, 2012 (in Chinese) [涂贵军. 钢轨焊接接头不平顺激励下的轮轨动力响应分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2012].
- [2] N Frank. New rail could solve rolling contact fatigue[J]. International railway journal and rapid transit review, 2003, 43(5): 49-50.
- [3] Gao Xinping, Xi Niansheng, Dao Wenhui. Cause analysis and countermeasure of low collapse of rail welded joint[J]. Railway Engineering, 2007, (12): 88-90 (in Chinese) [高新平, 习年生, 高文会. 钢轨焊接接头低塌的原因分析与对策[J]. 铁道建筑, 2007, (12): 88-90]. doi: 10.3969/j.issn.1003-1995.2007.12.032.
- [4] 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].
- [5] Xiao Gangwen. Study on rail weld defect [D]. Chendu: Southwest Jiaotong University, 2006 (in Chinese) [肖广文. 钢轨焊接接头伤损分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2006].
- [6] 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].
- [7] Ding Wei, Li Li, Li Jinhua, Hu Yutang. Wear characteristics and countermeasures of rail welded joint for heavy haul railway[J]. Railway Engineering, 2012(11): 119-123 (in Chinese) [丁韦, 李力, 李金华, 胡玉堂. 重载铁路钢轨焊接接头磨损特征研究[J]. 铁道建

- 筑, 2012(11): 119–123]. doi: [10.3969/j.issn.1003-1995.2012.11.38](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-1995.2012.11.38).
- [8] J F Peng, X H Xie, W J Song, et al. Wear properties of two U71MnK and U71MnG rail steel welds during rolling contact fatigue[J]. *International Journal of Modern Physics B*, 2019, 33(1): 1940041-1–10.
- [9] Xie Xuehui, Yu Qingyuan, Li Wei, Peng Jinfang, Zhu Minghao. Wear property of U71MnK rail weld under rolling contact[J]. *Tribology*, 2015, 35(3): 315–321 (in Chinese) [谢旭辉, 于卿源, 李炜, 彭金方, 朱旻昊. 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].
- [10] Wang Yingying. Research on formation mechanism of flat spots and micro-crack defects in rail welded joints [D]. *China Academy of Railway Sciences*, 2018 (in Chinese) [王莹莹. 钢轨闪光焊接头灰斑和微裂纹缺陷形成机理研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2018].
- [11] L B Godefroid, G L Faria, L C Cândido, et al. Failure analysis of recurrent cases of fatigue fracture in flash butt welded rails[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2015, 58: 407–416.
- [12] X M Yu, L C Feng, S J Qin, et al. Fracture analysis of U71Mn rail flash-butt welding joint[J]. *Case Studies in Engineering Failure Analysis*, 2015, 4: 20–25. doi: [10.1016/j.csefa.2015.05.001](https://doi.org/10.1016/j.csefa.2015.05.001).
- [13] Jiang Yuan. Study on the electroslag welding process and joint performance of U71Mn rail [D]. *Huazhong University of Science & Technology*, 2019 (in Chinese) [江园. U71Mn 钢轨电渣焊接工艺与接头性能研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019].
- [14] H C Shi, L B Shi, H H Ding, et al. Influence of laser strengthening techniques on anti-wear and anti-fatigue properties of rail welding joint[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2019, 101: 72–85. doi: [10.1016/j.engfailanal.2019.03.012](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.03.012).
- [15] R Baptista, T Santos, J Marques, et al. Fatigue behavior and microstructural characterization of a high strength steel for welded railway rails[J]. *International Journal of Fatigue*, 2018, 117: 1–8. doi: [10.1016/j.ijfatigue.2018.07.032](https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2018.07.032).
- [16] Wang Wenjian, Guo Jun, Liu Qiyue. Effect of contact stress on rolling friction and wear behavior of wheel-rail materials[J]. *Tribology*, 2011, 31(4): 352–356 (in Chinese) [王文健, 郭俊, 刘启跃. 接触应力对轮轨材料滚动摩擦磨损性能影响[J]. *摩擦学学报*, 2011, 31(4): 352–356].
- [17] 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, (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, (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).
- [18] He Shaoping, Wang Dezhi, Chen Shiliang. Microstructure fracture of rail joint after gas pressure welding[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2003, 28(1): 77–79 (in Chinese) [何少平, 王德志, 陈仕良. 钢轨气压焊接头断裂的组织研究[J]. *金属热处理*, 2003, 28(1): 77–79]. doi: [10.3969/j.issn.0254-6051.2003.01.027](https://doi.org/10.3969/j.issn.0254-6051.2003.01.027).
- [19] Chen Shuiyou, Liu Jihua, Guo Jun, et al. Effect of wheel material characteristics on wear and fatigue property of wheel-rail[J]. *Tribology*, 2015, 34(5): 531–537 (in Chinese) [陈水友, 刘吉华, 郭俊, 等. 车轮材料特性对轮轨磨损与疲劳性能的影响的研究[J]. *摩擦学学报*, 2015, 34(5): 531–537].