

U71Mn钢闪光-摩擦复合焊接头组织及性能研究

王守明¹, 高振坤², 陈建华³, 丁韦², 许蕊⁴, 刘国庆⁵, 谭锦红²

1. 中国铁道科学研究院 北京 100081

2. 中国铁道科学研究院集团有限公司金属及化学研究所 北京 100081

3. 中国铁路西安局集团有限公司 陕西西安 710018

4. 北京交通大学 北京 100091

5. 中国铁路昆明局集团有限公司 云南昆明 650011

摘要: 闪光焊 (Flash Butt Welding, FBW) 以其高效优良的特性广泛应用于钢轨焊接, 但目前其焊接接头存在灰斑缺陷、焊缝脱碳等问题仍无法彻底解决, 针对该问题开发闪光-摩擦复合焊 (Flash-Friction Hybrid Welding, F-FHW)。通过对U71Mn钢采用F-FHW进行焊接, 并与FBW进行对比, 研究两种焊接方法在显微组织、温度场与性能方面的影响规律。结果表明: F-FHW的焊缝可获得接近母材的金属显微组织; FBW焊缝的晶粒度为1级, 晶粒直径平均约为350 μm , 而F-FHW为2.5级, 晶粒直径平均约为200 μm ; 闪光焊焊接焊缝高温聚集于中心部位, F-FHW焊接温度场高温区分布更均匀; FBW焊缝硬度存在明显的下降且略低于母材, F-FHW接头硬度分布均匀且高于母材。FBW焊缝冲击断面形貌为解理面+少量韧窝, 并发现少量灰斑, F-FHW焊缝冲击断面形貌为解理面且未发现灰斑。

关键词: 闪光-摩擦复合焊; 闪光焊; 显微组织; 温度场; 硬度; 冲击

Research on microstructure and properties of flash-friction hybrid welded joints of U71Mn steel

WANG Shouming¹, GAO Zhenkun², CHEN Jianhua³, DING Wei², XU Rui⁴, LIU Guoqing⁵, TAN Jinhong²

1. China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China

2. Institute of Metals and Chemistry, China Academy of Railway Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100081, China

3. China Railway Xi'an Group Co., Ltd., Xi'an 710018, Shannxi, China

4. Beijing Jiaotong University, Beijing 100091, China

5. China Railway Xi'an Group Co., Ltd., Kunming 650011, Yunnan, China

Abstract: Flash butt welding (FBW) is widely used in rail welding because of its high efficiency and excellent characteristics. However, there are still some problems in the welded joints, such as gray spot defects and weld decarburization, which can not be completely solved. To address this problem, flash-friction hybrid welding (F-FHW) has been developed. In this paper, U71Mn steel was welded by flash-friction hybrid welding, and compared with flash welding, and the influence laws of the two welding methods on the microstructure, temperature field and properties were studied. The results indicate that the weld of F-FHW welding can obtain a metal microstructure close to that of the base metal; The grain size of flash weld is grade 1 with an average grain diameter of about

350 μm , while F-FHW is grade 2.5 with an average grain diameter of about 200 μm . The high temperature of the FBW welding is concentrated in the central area, and the distribution of the high temperature zone in the F-FHW welding temperature field is more uniform; The hardness of FBW shows a significant decrease and is slightly lower than that of the base material, while the hardness distribution of F-FHW joints is uniform and higher than that of the base material. The impact fracture morphology of FBW weld is cleavage plane with a small amount of toughness dimples, and a small amount of gray spots are found. The impact fracture morphology of F-FHW weld is cleavage plane and no gray spots are found.

Keywords: F-FHW; FBW; microstructure; temperature field; hardness; impact

1 序言

高速铁路在便利出行、促进经济发展等方面具有重要作用,而作为其重要组成部分的无缝钢轨,其连接的平顺、安全、稳定性对整体系统至关重要^[1]。目前,保证列车安全、降低维护成本等需求迫切要求改进现有焊接方式,提高焊接接头性能^[2]。

U71Mn钢以耐磨损、高韧性广泛应用于高速铁路。在U71Mn钢轨道焊接领域主要有闪光焊(Flash Butt Welding, FBW)^[3-5]、气压焊^[6, 7]及铝热焊^[8, 9]。其中,FBW自动化程度高,焊接接头性能好,工艺稳定,因此在我国铁路焊接领域应用最广泛^[10]。但丁韦等^[11]发现,FBW接头灰斑对于落锤通过率有重大影响。HU等^[12]发现,FBW接头焊缝铁素体含量增加,硬度梯度增加,接头内应力增大,这归因于焊缝C含量减少;气压焊组织为锻态组织,性能优良,但蒋文娟等^[13]发现,气压焊焊缝两侧存在软化区,该区域磨损严重。铝热焊便携,多用于现场焊,但其晶粒粗大,缺陷较多^[14]。同时,焊接时氧气进入焊缝与其中元素反应形成氧化物,也是焊接缺陷产生的又一原因^[11, 15]。以上焊接缺陷均表明,焊接热输入对于焊接质量至关重要。因此,研究了一种新的焊接方法来调节焊接热输入,达到均匀组

织、提高焊接钢轨性能的目的。

本文结合闪光和摩擦焊优点,研发了一种闪光-摩擦复合焊(Flash-Friction Hybrid Welding, F-FHW)试验机。谭锦红等^[16]已研究了顶锻量对F-FHW接头性能的影响。本文将U71Mn钢轨制成小试样,分别采用F-FHW和FBW方法进行焊接,并使用红外热像仪记录焊接过程温度场。在此基础上,研究了F-FHW工艺对焊接接头组织性能的影响规律,以探究F-FHW的可行性。

2 试验设备及方法

试验过程中所用的试样为U71Mn钢轨用钢,沿钢轨纵向切取试样,尺寸规格为100mm $\times$ 14mm $\times$ 14mm。U71Mn钢轨化学成分见表1。

表1 U71Mn钢轨化学成分(质量分数)(%)

C	Si	Mn	P	S	V	Al
0.56~0.75	0.15~0.58	0.70~1.20	≤ 0.025	≤ 0.025	≤ 0.03	≤ 0.004

为比较FBW与F-FHW方法对焊接接头性能的影响,分别采用相同的参数(不包括摩擦速度、摩擦频率)进行试样焊接,焊接参数见表2。

表2 FBW与F-FHW焊接参数

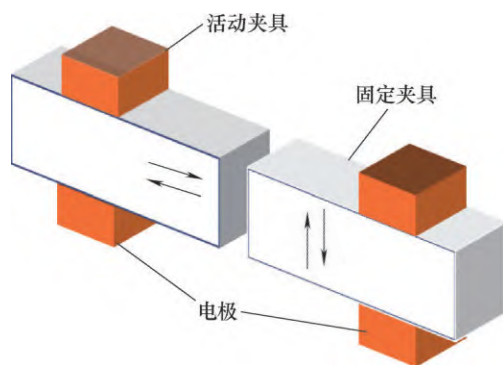
焊接方式	电弧电压/V	前进速度/(mm/s)	后退速度/(mm/s)	顶锻速度/(mm/s)	加热时间/s	顶锻位移/mm	摩擦速度/(mm/s)	摩擦频率/Hz
FBW	5.5	0.4	0.4	10	25	6	0	0
F-FHW	5.5	0.4	0.4	10	25	6	3	0.2

F-FHW焊接试验平台及焊接原理如图1所示。由图1可知,试验机静架执行竖直方向(摩擦方向)的振动运动,动架执行水平方向的前进(包含顶锻)和后退运动。

红外热像仪采用Flir A615,辐射率为0.6。金相腐蚀试剂为4%的硝酸酒精,腐蚀时间4s,利用光学显微镜观察金相微观组织。通过Quanta400扫描电子显微镜(SEM)等观察元素分布。采用FM-



a) 试验平台



b) 焊接原理示意

图1 F-FHW焊接试验平台及焊接原理示意

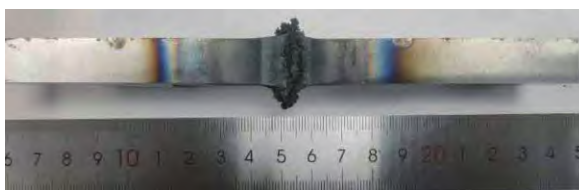
810显微维氏硬度计对焊接接头的硬度进行检测，检测方向垂直于焊缝，检测点的间隔为1mm，载荷为300g (2.94N)，加载时间为10s。冲击试验按GB/T 229—2007《金属材料-夏比摆锤冲击试验方法》和TB/T 1632.1—2014《钢轨焊接 第1部分：通用技术条件》执行，试验温度20℃，试验设备为摆锤式冲击试验机。

3 结果与讨论

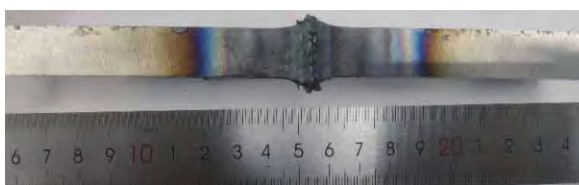
3.1 接头宏观形貌

FBW与F-FHW的焊缝形貌如图2所示。二者焊缝均成形良好，没有未焊合等缺陷，焊缝中间凸起毛刺。不过二者不同的是，图2a中的凸起呈现出沿焊缝张开的“花瓣”形状，图2b中仅略有凸起，没有过多的毛刺。出现该现象的原因是F-FHW在闪光过程中利用端面的摩擦将部分金属熔层排出焊缝，减少了金属熔层在焊缝中的积累，造成顶锻阶段挤出的金属熔层较少。因此，F-FHW在焊接过程中将焊缝中心温度最高的金属熔层排出，保证焊缝内部

与外表面温度梯度不会太大。



a) FBW接头



b) F-FHW接头

图2 FBW与F-FHW的焊缝形貌

根据焊接接头受到热输入与机械力影响的大小，将试样分为焊缝区、热影响区及母材区。对焊接试样表面精加工，为方便观察金相，分别在母材区与热影响区截取试样，如图3所示。由图3可看出，FBW焊缝较宽且铁素体条带中间部位略宽，F-FHW的焊缝较窄且焊缝铁素体条带分布均匀。原因是闪光焊顶锻时残留在焊缝中心的金属熔层较多，恢复到室温后形成较宽的焊缝。F-FHW焊接时其金属熔层经摩擦挤出，顶锻时残留较少，因此焊缝较窄且均匀。



a) FBW



b) F-FHW

图3 FBW与F-FHW的金相宏观形貌

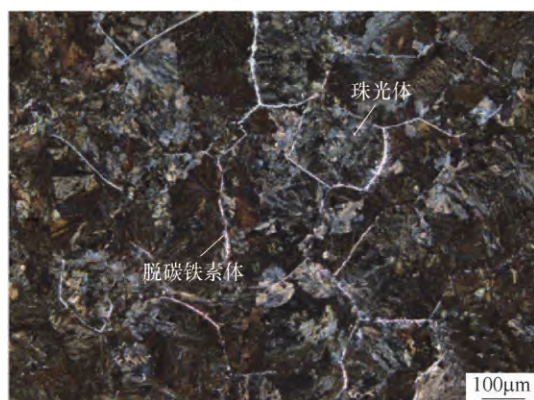
3.2 焊接接头的显微组织

对FBW与F-FHW焊接的显微组织进行观察，如图4、图5所示。由图4a、图5a可知，FBW焊缝组织为珠光体+少量铁素体，F-FHW焊缝组织为珠光体，晶粒呈等轴状。焊缝区由于受到最高的热输入及最大的顶锻力，因此导致其晶粒表现为较粗大的等轴晶。从图4a、图5a可看出，FBW比F-FHW的焊缝区宽约50μm，且晶粒更加粗大。FBW的晶粒度为

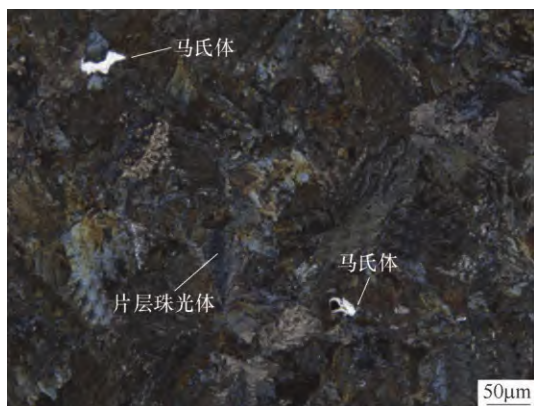
1级，F-FHW为2.5级。同时，FBW铁素体网较为完整，F-FHW焊接的脱碳铁素体网有破碎，并没有形成大量的脱碳铁素体网状组织。原因是F-FHW焊接C元素大量烧损，金属熔层被摩擦排出，剩余的组织保留了大量的C元素，再加上摩擦机械力作用，其元素分布弥散，因此未形成大量脱碳铁素体网。FBW焊缝C元素大量烧损，在焊缝中形成大量的脱碳铁素体。靠近焊缝一侧的热影响区为过热区（见图4b、图5b）。该区域在奥氏体温度区间停留的时

间较长，同时又受到摩擦与顶锻的机械作用，导致延长奥氏体生长与变形，因此室温时形成较大的片层状珠光体组织。值得注意的是，FBW的过热区中形成少量的马氏体组织，而F-FHW未发现。紧靠过热区的热影响区为正火区，该区受到焊接热温度梯度的轻微影响，类似对其进行正火处理，晶粒发生明显细化，且顶锻力影响也较小，组织仍为珠光体（见图4c、图5c）。

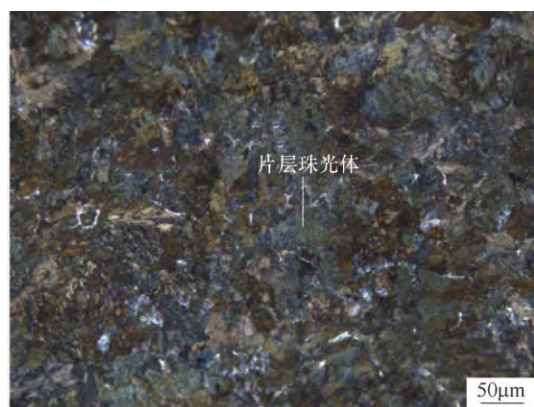
为分析两种焊接方式对焊接接头元素分布的影



a) 焊缝区

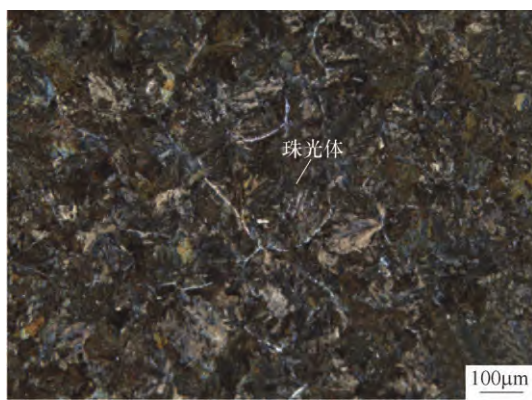


b) 过热区

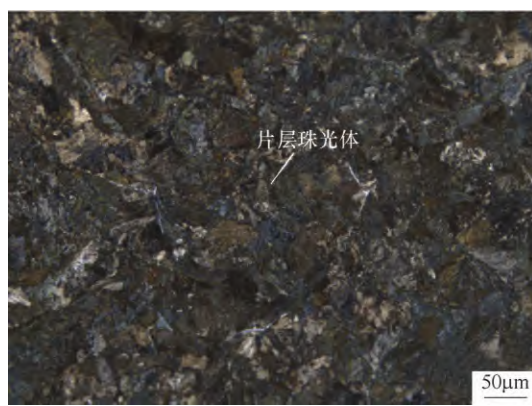


c) 正火区

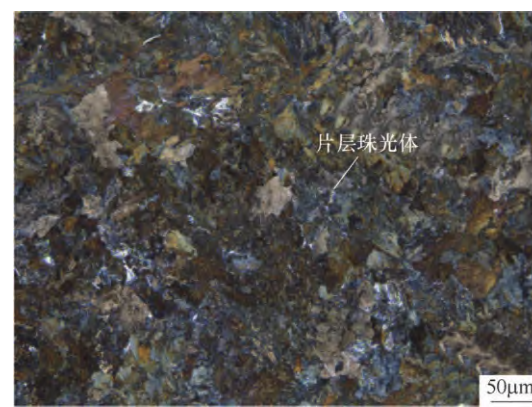
图4 FBW接头微观组织



a) 焊缝区



b) 过热区



c) 正火区

图5 F-FHW接头微观组织

响,沿焊缝的垂直方向(跨过热区-焊缝-过热区)进行EDS线扫描。在两种焊接方式中, Si、Mn、Fe的信号强度变化较为均匀,而C元素的变化有明显不同,如图6所示。F-FHW焊接的接头C含量变化较为均匀,而FBW焊接的接头表现出C含量先降低后增加的趋势。原因是在FBW焊接过程中,焊接端面金属熔层中的C元素与空气反应产生损失, F-FHW焊接通过摩擦将焊接过程中的熔化层排出,顶锻过程中C元素在金属熔层保留较少,因此其C含量的分布较为均匀,未有明显的变化,而FBW焊缝中保留了较多的少碳铁素体,因此其C元素的信号强度有明显的变化。

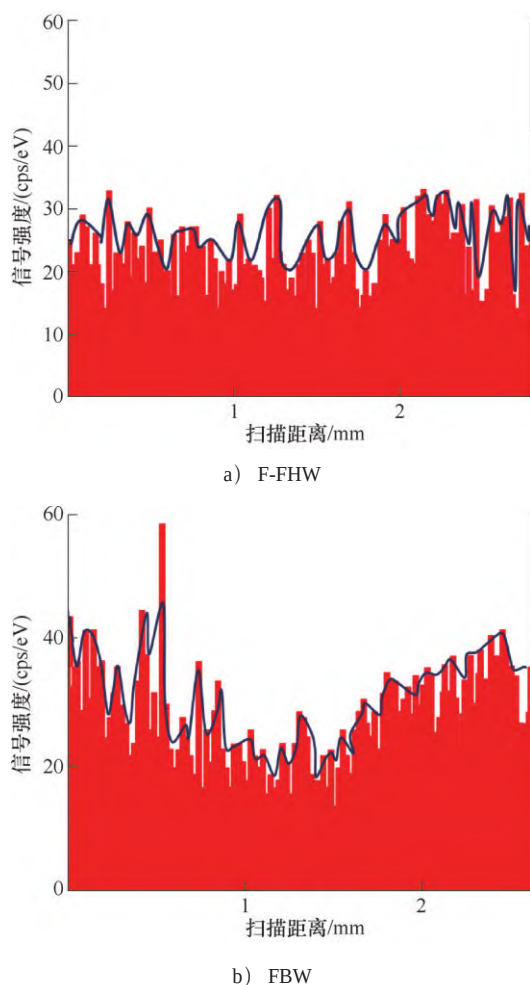


图6 C元素的EDS线扫描结果

3.3 焊接过程的温度场

温度场对于焊缝的晶粒度有直接影响,为进一步分析焊缝中心形成晶粒大小的原因,利用红外热像仪对焊接过程进行拍摄,得到焊接接头的温度场。FBW及F-FHW焊接过程的最关键部分在顶锻前

的阶段,为此进行顶锻前后的温度场对比。以图7所示的焊缝中心为坐标原点,绘制温度云图,如图8所示。从图8a、b可看出,FBW焊接试样中心部位的表面温度较四周的温度要高, U71Mn钢轨熔点约为1500℃,其表面中心区域接近熔化,顶锻后其高温区略向竖直方向伸长,并且接头整体温度迅速降低,其蓝色温度区域迅速增加。

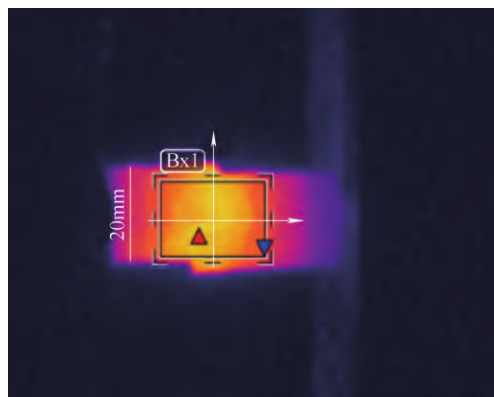


图7 温度场坐标轴

从图8c、d可看出, F-FHW焊接的接头焊缝处温度分布较为均匀,上下区域均存在高温区域,且高温区温度比FBW更高。顶锻后其温度区域变化不明显,说明顶锻未对温度场有明显的改变。综合对比, F-FHW焊接接头的温度场相较于FBW焊接的温度场在焊缝周围更加均匀,并且表面温度也更高。顶锻后,温度场改变更小,这对获得成形良好的焊接接头创造了有利条件。原因是FBW焊接过程中高温区集中于试样中心,表面温度相对较低。F-FHW由于摩擦作用将过高的金属熔层排出端面,使中心温度不至于过高,且同时将热力输入到外表面,因此温度分布更均匀。因其中心温度相对较低,所以其晶粒相对FBW更小。

3.4 接头显微硬度

分别对FBW与F-FHW焊接接头进行硬度检测,接头的显微硬度如图9所示。由图9可知,焊缝两侧硬度高于母材。FBW接头的硬度整体呈“M”形对称分布,低值点位于焊缝处,约为250HV,比F-FHW焊缝低50HV,焊缝区的硬度显著降低。F-FHW焊缝区硬度最低点为300HV,与周围过热区硬度差值在20HV左右,接头硬度过渡相对比较平滑。原因是F-FHW在焊接过程中端面做摩擦运动,排出金属熔层,焊缝组织脱碳铁素体较少,且组织

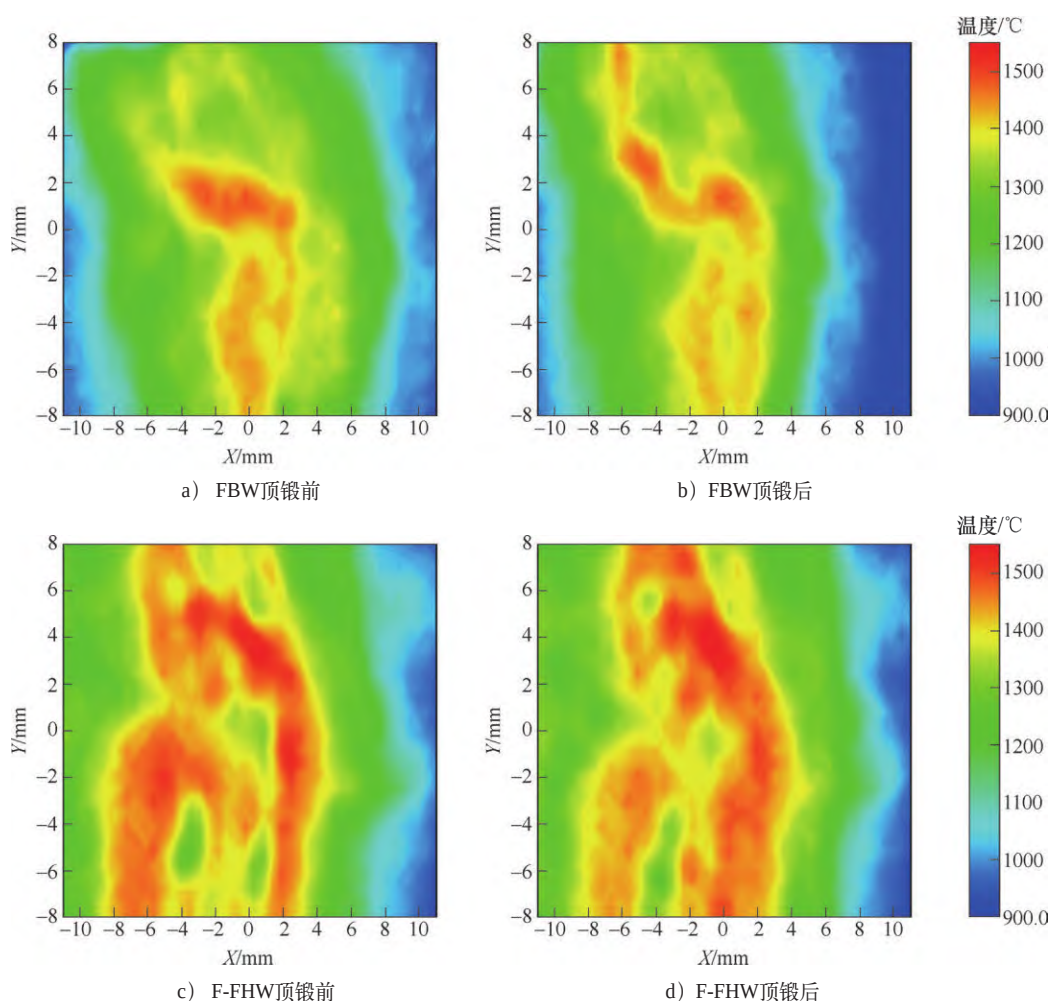


图8 FBW和F-FHW顶锻前后温度场

晶粒较细，均匀性更高，因此其硬度降低较小。硬度最高点均出现在过热区，FBW焊接的硬度最高值达到430HV，F-FHW焊接的最高硬度在380HV左右。原因是该区域受热输入影响严重，冷速快，

造成C元素偏析，因此硬度较高。而且在FBW焊接过程中过热区有针状马氏体生成，造成硬度显著增加。

3.5 接头冲击性能

分别对两种焊接接头进行冲击试验，F-FHW接头3个试样平均冲击吸收能量为5.1J，FBW则为4.2J，前者冲击吸收能量比后者略高，原因是F-FHW接头的焊缝晶粒度更高，组织较为均匀。两种焊接方式接头的冲击断口如图10所示。由图10可知，二者均表现出脆性断裂特征。F-FHW接头冲击断口形貌主要为河流花样，是典型的解理断裂形貌特征（见图10a）。FBW接头断口形貌表现出大部分为解理，以及少量韧窝（见图10b）。该情况表明，FBW焊缝有铁素体存在，冲击断裂穿越铁素体区域形成韧窝状形貌，F-FHW焊缝含铁素体较少，断口形貌未发现韧窝。在FBW断口出现了非金属夹杂物，对其进行EDS能谱检测，结果如图10c所示。

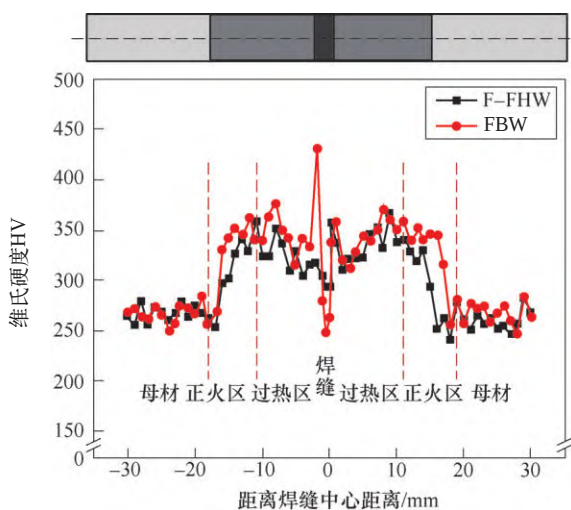
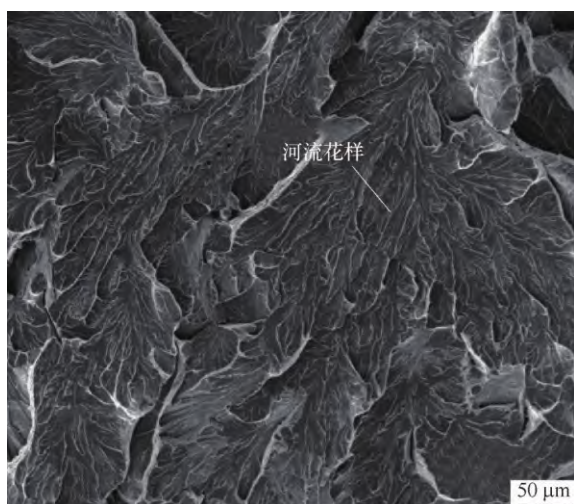
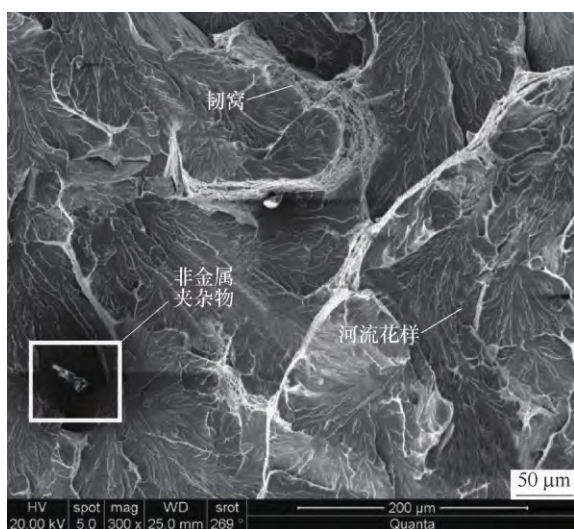


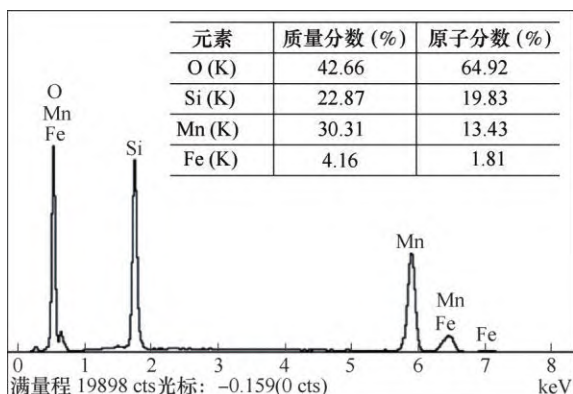
图9 FBW与F-FHW接头显微硬度



a) F-FHW焊接接头冲击断口



b) FBW焊接接头冲击断口



c) EDS能谱

图10 两种焊接方式接头的冲击断口

结果表明,该夹杂物含大量O、Mn、Si元素,为硅酸盐类夹杂物,因此可以确定为灰斑。形成原因是空气中的 O_2 进入焊缝,与钢轨中的Mn、Si元素发生

反应,顶锻后滞留于焊缝中。F-FHW断口未发现灰斑,可归因于闪光摩擦可以将焊接过程中因过梁电爆而产生的火坑填平,避免 O_2 进入其中发生反应,顶锻后滞留于焊缝中。

4 结束语

1) F-FHW获得的焊接接头C含量较高,焊缝的铁素体含量降低,焊缝晶粒直径平均约为 $200\mu m$,晶粒度为2.5级,晶粒较小,焊缝宽度为 $400\mu m$,焊接过程焊缝温度更均匀,提高了焊接接头性能。

2) F-FHW焊缝硬度较高,为300HV,周围过热区的硬度为320HV,相差较小,保证了硬度变化的均匀性。FBW焊缝硬度为250HV,明显较前者降低,与周围过热区320HV的硬度相差较大。

3) F-FHW接头冲击吸收能量为5.1J,比FBW的4.2J略大,F-FHW接头焊缝冲击断口形貌为解理面,断口未发现灰斑。FBW断口形貌为解理面及少量韧窝,而且断口存在灰斑。

参考文献:

- [1] BĚSINOVIĆ N. Resilience in railway transport systems: A literature review and research agenda[J]. Transport Reviews, 2020, 40 (4) : 457-478.
- [2] 张琪,李力,宋宏图,等.无缝线路钢轨焊接技术发展现状及趋势[J].热加工工艺,2017,6 (3) : 10-12.
- [3] 王秀菊,李琪.有轨电车合金钢道岔与钢轨闪光焊接技术[J].金属加工(热加工),2022 (12) : 57-59.
- [4] 王东,涂占宽,彭鹏,等.重载铁路U78CrVH钢轨闪光焊接头轨头核伤缺陷分析[J].铁道建筑,2023,63 (9) : 15-18.
- [5] 王莹莹.钢轨闪光焊灰斑缺陷的形成过程[J].铁道建筑,2020,60 (11) : 136-139.
- [6] 张铭达.U71Mn钢轨的焊接过热敏感性分析[J].铁道建筑,2018,58 (8) : 118-121.
- [7] 于雪梅,冯立超.U71Mn钢轨气压焊接头断裂分析[J].热加工工艺,2013,42 (19) : 215-217,220.
- [8] 许鑫,罗国伟,杨其全,等.我国普速线路钢轨伤损及服役安全影响因素分析[J/OL].铁道科学与工程学报,2024: 1-10[2024-12-07]. <https://doi.org/10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20241046>.
- [9] 赵波.定位分析法在钢轨铝热焊焊缝伤损判别中的

(下转第78页)

结合的方式，很好地解决了因装配精度低而引起的焊接难题，同时与人工相比，机器人在多焊接位置焊接时更加稳定可靠。现车体总成机器人自动化焊接已实现批量生产，产品焊接质量较手工焊大幅提升，同时达到以下效果。

1) 稳定并提升了焊接质量。有效控制大型结构件的焊接变形，实现工件焊后尺寸的高度一致。该技术克服各类不利环境因素对产品质量的干扰，保证焊接始终在规范、合理的工艺条件下进行，对稳定焊接质量意义重大。同时，其节拍的一致性保障了生产节点，为公司的计划性生产与排产提供有力支撑。去除不稳定因素后，焊接一次性合格率大幅提高，减少返工时间，节省了时间、人工和材料成本。

2) 改善了工人的劳动环境。车体总成自动化焊接系统将原本的人工焊接转变为机器人自动焊接。工人无需反复移位焊接，也不用频繁转换PB、PC、PD、PG等不同焊接姿态。并且，自动化焊接工位与原组焊工位分离，降低了工人暴露在高温、烟尘、弧光及高处等危险环境的风险，有效避免焊接弧光对作业人员的伤害，极大地提高了生产过程的安全性，改善了工人的劳动条件。

3) 提高劳动生产效率，降低生产节拍。车体总成自动化焊接系统通过配置的触觉式气嘴传感系统和激光实时跟踪系统，可以通过机器人实现焊接过程的自动纠偏和调整；通过配置的实时观察系统

实现了一人同时监控两台机械手，作业人员减少了50%，且生产节拍可控。

4) 推动工艺水平的提升。焊接机器人的使用，推动了装配质量的提升，质量控制前移，能够在根本上控制缺陷的产生。首先，根据焊装工序出现的问题，调整下料和成形工序的工艺尺寸，并形成统一要求后固化、执行，为保证后续焊接装配工序的精度奠定基础；其次，对焊接装配工序制订了规范，规定了定位焊的位置、长度等，确保各项参数均不会对后面的自动焊接工序产生较大影响。

5) 产品通用性强。车体总成自动化焊接系统配有高效柔性电动刚性假台车，其采用通用底座+柔性模块化托架的方式，实现了不同产品的快速换型及上下料，并调用相应的焊接程序，可实现自动化焊接。

参考文献：

- [1] 刘丹，郑博方，王帅，等. 机器人焊接关键技术及应用[J]. 金属加工（热加工），2020（2）：41-44.
- [2] 陆建卫. 焊接机器人在焊接技术应用中的关键技术分析[J]. 内燃机与配件，2024（3）：57-59.
- [3] 杨湘键，金希红，曾燕军，等. 神华大功率交流传动电力机车车体设计[J]. 电力机车与城轨车辆，2015（5）：7-12.

MW 20241218

（上接第73页）

- 应用[J]. 中国铁路，2023（6）：66-71.
- [10] 宋宏图. 钢轨交流闪光焊接过程过梁爆破特征分析[J]. 焊接学报，2018，39（3）：120-123，134.
 - [11] 丁韦，李力，赵国，等. 钢轨闪光焊灰斑缺陷形成原因及预防方法[J]. 铁道建筑，2018，58（10）：128-131.
 - [12] HU J, ZHANG Q, YANG Q, et al. Cause analysis of surface cracks in flash butt welding joint of high manganese steel frog[J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 154: 107683.
 - [13] 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]. 摩擦学报，2020，40（5）：579-585.

- [14] 张玉华，李澳，胡伟平. 钢轨铝热焊焊缝材料与母材力学性能对比分析[J]. 高速铁路新材料，2023，2（2）：79-84.
- [15] 赵国. 基于过梁爆破特征定量分析的交流闪光焊研究[D]. 北京：中国铁道科学研究院，2024.
- [16] 谭锦红，张新平，曹姗姗，等. U71Mn钢闪光-摩擦复合焊接接头组织性能[J]. 焊接学报，2024，45（9）：62-68.

MW 20241229