

380HB 级别稀土高强热处理钢轨固定 闪光焊接工艺研究

张凤明¹, 梁正伟¹, 张娜¹, 付学义¹, 崔弘², 文浩然¹, 田利明³

- 内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心, 内蒙古包头 014010;
- 内蒙古包钢钢联股份有限公司炼钢厂, 内蒙古包头 014010;
- 包钢中铁轨道有限责任公司, 内蒙古包头 014010)

摘要: 文章采用国内外通用的固定闪光焊机和接头正火热处理设备, 开展了 380HB 级别稀土高强热处理钢轨固定闪光焊接工艺、接头正火工艺研究。通过对比分析不同工艺下接头落锤合格率、灰斑面积及纵断面洛氏硬度, 总结了最优的焊接工艺及接头热处理工艺, 得到的 380HB 级别稀土高强热处理钢轨固定闪光焊接头抗拉强度 R_m 平均值为 1 141 MPa, 断后伸长率 A 平均值为 12.5%, 常温冲击 KU_2 平均值为 16.0 J, 接头硬度比值 H_f/H_p 为 0.92、 H_{f1}/H_p 为 0.84, 接头软化区宽度 $W \leq 15$ mm, 接头力学性能及显微组织均满足标准要求。解决了高强热处理钢轨闪光焊接头硬度偏低及落锤断裂的难题, 使焊接接头与钢轨达到优良的性能匹配, 满足重载铁路对高强热处理钢轨接头耐磨性和平顺性的要求。

关键词: 380HB 级别钢轨; 稀土钢轨; 热处理; 固定闪光焊接

中图分类号: TG40

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2024)06-0070-05

Study on Fixed Flash Welding Process of 380HB Grade High Strength Heat Treated Rare Earth Rail

Zhang Feng-ming¹, Liang Zheng-wei¹, Zhang Na¹,
Fu Xue-yi¹, Cui Hong², Wen Hao-ran¹, Tian Li-ming³

- Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China;
- Steel-making Plant of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China;
- Baotou Steel China Railway Track Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Abstract: In the paper, it is introduced the studies on fixed flash welding process of 380HB grade high strength heat treated rare earth rail and normalizing process of joints are carried out with the common fixed flash welder and heat treatment equipment for normalizing of joints at home and abroad. The optimal welding process and heat treatment process of joints are summarized through comparing and analyzing the qualified rate of drop weight tear test, area of grey-spots and

Rockwell hardness of longitudinal section for joints with different processes. For the joints of fixed flash welding for obtained 380HB grade high strength heat treated rare earth rail, the mean values of tensile strength R_m , elongation after fracture A and impact energy at room temperature KU_2 are 1 141 MPa, 12.5% and 16.0 J respectively, hardness ratios of joints H_f/H_p is 0.92, H_{f1}/H_p is 0.84 as well as width of softened zone for joints $W \leq 15$ mm so that the mechanical properties and microstructure of joints could all meet the standard requirements. As a result, the problems of lower hardness and drop hammer fracture of flash joint for high strength heat treated rail are solved so that the excellent performance matching of welded joints and rail could be achieved, which could meet the requirements of wear resistance and compliance for heavy-haul railway to joints of high strength heat treated rail.

Key words: 380HB grade rail; rare earth rail; heat treatment; fixed flash welding

目前,国内外无缝线路钢轨焊接方法主要分为闪光焊、铝热焊和气压焊三种,相对于其他两种焊接方式,闪光焊接头质量最优,性能最佳,服役稳定,同时铁路线路上闪光焊接头数量也最多,是钢轨重要焊接方式之一,广泛应用于 500 m 长钢轨生产和无缝线路铺设^[1-2]。国内外高强热处理珠光体钢轨都属于高碳、低合金成分体系,各生产厂通过调整碳含量、合金元素含量和热处理工艺,可以得到不同强度、不同硬度级别的钢轨,满足不同线路服役要求^[3]。重载铁路用钢轨碳含量和合金元素含量相对于高速铁路用钢轨较高,从而表现为可焊接性能较差,接头焊接或热处理过程中易出现异常显微组织,且焊后接头强度、硬度较低,在线路服役过程中会出现低接头、马蹄鞍型接头等情况,严重影响接头

平顺性和无缝线路列车运行安全^[4-6]。本文针对重载铁路用 380HB 级别稀土高强热处理钢轨,开展固定闪光焊工艺研究,通过对比分析不同焊接工艺下接头力学性能、显微组织等,确定钢轨最佳的焊接工艺。

1 试验材料及方法

试验用 380HB 级别稀土高强热处理钢轨成分体系以 C、Si、Mn 为主要组成元素,并添加一定量的 Cr、Nb、V、RE 微合金化元素。钢轨生产流程为:铁水脱硫→转炉冶炼→LF 精炼→VD 真空处理→连铸→铸坯缓冷→方坯加热→高压水除鳞→BD1 粗轧→BD2 粗轧→CCS 精轧→在线热处理→百米冷床冷却→矫直→探伤。试验用钢轨常规力学性能、化学成分见表 1。

表 1 试验用钢轨力学性能及化学成分

力学性能			化学成分(质量分数)/%					
抗拉强度 R_m /MPa	断后伸长率 A /%	轨顶面硬度 (HBW)	C	Si	Mn	Cr + Nb + V + RE	P	S
1 359	10.5	392	0.80 ~ 0.82	0.70 ~ 0.80	0.95 ~ 1.10	≥0.55	0.008	0.003

380HB 级别稀土高强热处理钢轨固定闪光焊接试验采用国内外通用的 GAAS80/580 固定闪光焊机、KGPS 接头正火机及相关打磨、探伤设备。接头力学性能检测设备采用 Instron 60 吨电子拉伸试验机、NI750 冲击试验机、LC-200RB 洛氏硬度计,接头显微组织检测设备采用蔡司 observer AIM 光学显微镜。

2 试验结果及分析

2.1 闪光焊接工艺研究

380HB 级别稀土高强热处理钢轨碳含量、合金含量较高,闪光焊接过程中易在热影响区产生异常组织和在融合线位置附近产生灰斑等缺陷,影响接

头质量^[7]。通过调节合理的闪光焊接预热次数、预热电流、顶锻量、熔化末速度、焊接时间等关键技术参数,可改善焊接接头质量,提高落锤合格率,降低焊接产生缺陷几率。钢轨闪光焊接主要调整参数及对应的落锤试验结果见表 2。

对三种焊接工艺下接头进行落锤对比试验,工艺 1 落锤断裂数为 4 支,轨底角宏观断口发现明显灰斑,4 支钢轨断口统计灰斑面积在 3 mm² 至 12 mm² 之间,部分断口单个灰斑面积大于 10 mm²,灰斑总面积大于 20 mm²,超出标准要求;工艺 2 落锤断裂数为 2 支,轨底角宏观断口发现明显灰斑,2 支钢轨断口统计灰斑面积在 2 mm² 至 8 mm² 之间,

断裂位置处灰斑面积未超标;工艺 3 落锤结果全部合格,对全部接头切割后进行第二次落锤,宏观断口

均未发现超标灰斑。图 1 为不同工艺下闪光焊接头落锤断口宏观照片。

表 2 钢轨闪光焊主要调整参数及落锤结果

焊接工艺	预热次数	预热电流 /kA	顶锻量 /mm	熔化末速度 /(mm·s ⁻¹)	焊接时间 /s	落锤断裂数 /支	缺陷形式
工艺 1	8	62.0~64.5	8.0~11.0	1.6~1.9	101~107	4	灰斑
工艺 2	10	62.0~63.5	11.0~13.5	2.1~2.4	109~115	2	灰斑
工艺 3	12	60.5~62.0	14.0~16.0	2.6~2.8	116~121	0	

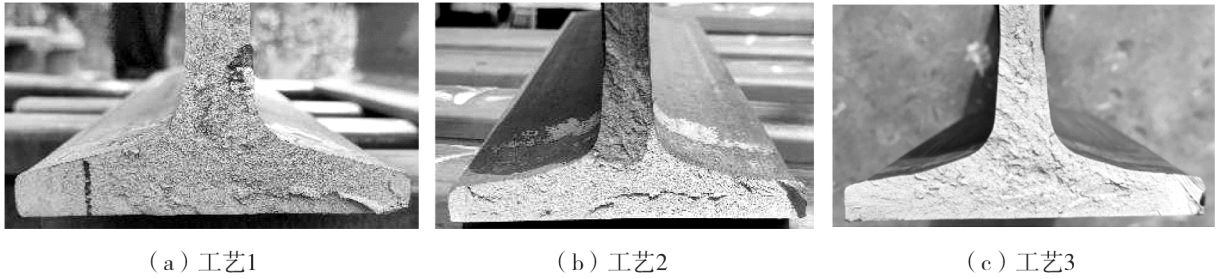


图 1 不同工艺下闪光焊接头落锤断口宏观照片

2.2 接头热处理工艺研究

固定闪光焊接头在焊态下晶粒粗大,力学性能差,无法满足重载线路服役要求。对焊态接头进行正火热处理,可使接头显微组织明显细化,有效地改善接头的力学性能^[8]。本试验 380HB 级别稀土高

强热处理钢轨接头正火热处理采用双频感应正火加热和接头喷风方式进行。对不同热处理工艺下接头力学性能和显微组织对比分析,得到最佳的接头正火工艺。钢轨接头不同正火热处理工艺见表 3。

表 3 380HB 级别稀土高强度热处理钢轨接头正火热处理工艺

工艺	接头正火加热工艺			接头喷风工艺		终冷温度/℃
	低频加热温度/℃	高频加热温度/℃	加热时间/s	喷风压力/MPa	喷风时间/s	
工艺 1	800~810	880~900	145~160	0.20~0.28	130~140	450~500
工艺 2	840~850	900~920	145~160	0.25~0.30	130~140	450~500
工艺 3	840~850	890~910	145~160	0.35~0.40	120~130	350~400

依据 TB/T 1632.2—2014《钢轨焊接 第 2 部分:闪光焊接》标准^[9],对经工艺 1、工艺 2、工艺 3 正火热处理的闪光焊接头进行轨头纵断面洛氏硬度对比

分析,380HB 级别稀土高强度热处理钢轨接头纵断面洛氏硬度应满足 $H_J \geq 0.90 H_P$, $H_{J1} \geq 0.80 H_P$, $W \leq 20$ mm, 试验结果见表 4 及图 2、图 3、图 4。

表 4 不同正火工艺下接头纵断面洛氏硬度试验结果

工艺	母材硬度平均值 H_P (HRC)	焊接接头硬度 平均值 H_J (HRC)	焊接接头软点硬度 平均值 H_{J1} (HRC)	H_J/H_P	H_{J1}/H_P	软化区宽度 W /mm
工艺 1	40.60	35.70	32.20	0.88	0.79	25,26
工艺 2	39.80	34.50	31.50	0.87	0.79	33,35
工艺 3	39.50	36.30	33.10	0.92	0.84	13,15

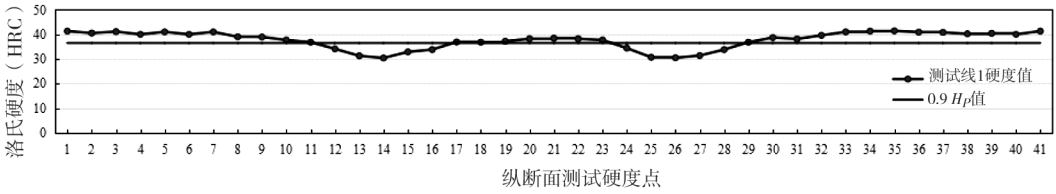


图 2 工艺 1 接头纵断面洛氏硬度曲线图

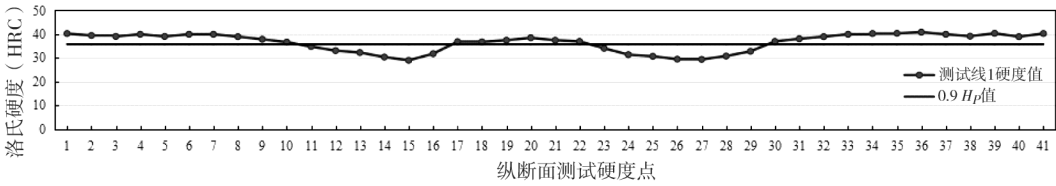


图 3 工艺 2 接头纵断面洛氏硬度曲线图

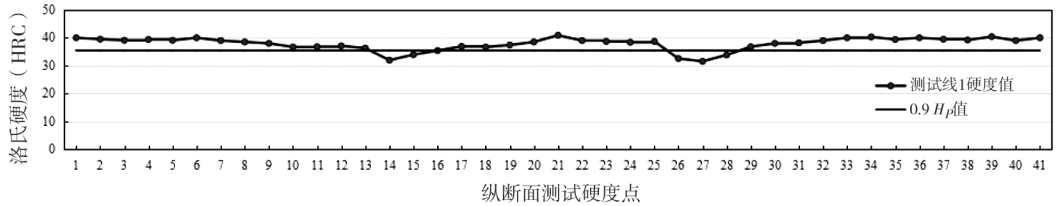


图 4 工艺 3 接头纵断面洛氏硬度曲线图

由表 4 可知,经工艺 1、工艺 2 热处理的焊接接头硬度平均值与母材硬度平均值比值 H_j/H_p 均小于 0.90,焊接接头软点硬度平均值与母材硬度平均值比值 H_{j1}/H_p 均小于 0.80,接头软化区宽度 W 均大于 20 mm,不满足标准要求。经工艺 3 热处理的焊接接

头 $H_j/H_p \geq 0.92, H_{j1}/H_p \geq 0.84, W \leq 15$ mm, 接头硬度、软化区宽度均满足标准要求。

依据 TB/T 1632.1—2014《钢轨焊接 第 1 部分:通用技术条件》标准^[10],对经工艺 3 热处理的焊接接头进行拉伸、冲击性能检验,试验结果见表 5、表 6。

表 5 热处理工艺 3 接头拉伸性能及标准要求

性能	拉伸试样位置									平均值	标准要求
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
抗拉强度 R_m/MPa	1 137	1 122	1 151	1 117	1 120	1 111	1 188	1 160	1 159	1 141	≥ 980
断后伸长率 $A/\%$	13.5	13.0	12.5	11.0	12.5	12.5	11.5	12.5	13.5	12.5	≥ 6.0

表 6 热处理工艺 3 接头冲击性能及标准要求

性能	冲击试样位置														平均值	标准要求
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
常温冲击 KU_2/J	20.2	16.4	14.0	22.8	12.3	13.9	11.5	10.6	12.8	10.0	11.4	14.7	27.9	25.3	16.0	≥ 6.5

由表5、表6可知,焊态下的380HB级别稀土高强热处理钢轨闪光焊接头,采用工艺3正火热处理钢轨接头拉伸性能、冲击性能均满足标准要求,经工艺3热处理的接头与母材达到优良的性能匹配。

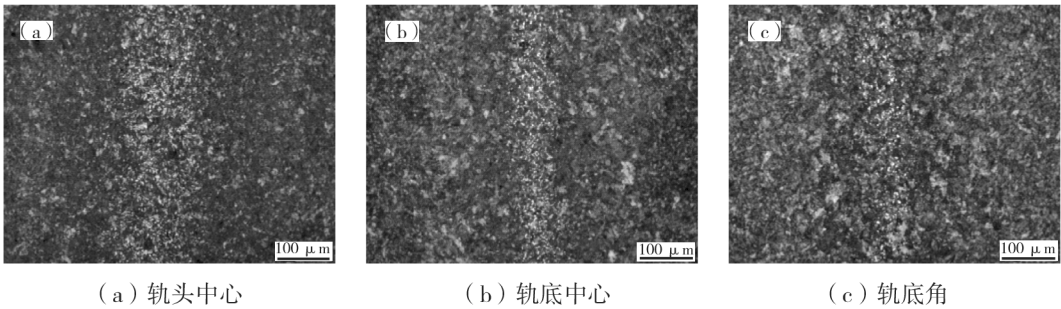


图5 接头不同位置显微组织

由图5可知,经工艺3热处理钢轨接头的轨头、轨底位置显微组织均为珠光体和少量铁素体,焊接区域不存在马氏体、贝氏体等有害组织,接头显微组织满足标准要求。

3 结论

(1) 380HB级别稀土高强热处理钢轨采用GAAS80/580固定闪光焊机进行钢轨焊接,焊接预热次数为12次,预热电流控制在60.5~62.0 kA,顶锻量控制在14.0~16.0 mm,熔化末速度控制在2.6~2.8 mm/s,焊接时间控制在116~121 s,基于以上焊接工艺,接头落锤结果全部合格,落锤断口未发现灰斑。

(2) 380HB级别稀土高强热处理钢轨采用KGPS接头正火机进行热处理,接头正火加热工艺为:低频感应加热至840~850℃,高频感应加热至890~910℃,加热时间控制在145~160 s;接头喷风工艺为:喷风压力控制在0.35~0.40 MPa,喷风总时间控制在120~130 s,喷风终冷温度控制在350~400℃。

(3) 基于以上钢轨固定闪光焊焊接工艺,380HB级别稀土高强热处理钢轨闪光焊接头抗拉强度 R_m 平均值为1 141 MPa,断后伸长率 A 平均值为12.5%,常温冲击功 KU_2 平均值为16.0 J,接头硬度平均值与母材硬度平均值比值 H_f/H_p 为0.92,接头软点硬度平均值与母材硬度平均值比值 H_{f1}/H_p 为0.84,接头软化区宽度 $W \leq 15$ mm;接头轨头、轨底位置显微组织均为珠光体和少量铁素体,不存在马氏体、贝氏体等有

害组织。接头力学性能、显微组织均满足标准要求。

参 考 文 献

- [1] 王刚,王宇红. 浅谈无缝线路钢轨现场焊接技术工艺[J]. 内蒙古科技与经济,2021(24): 88-89.
- [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,2017,46(3):10-12.
- [3] 车军,郑韶先,苏程. 国内钢轨焊接的现状与发展趋势[J]. 焊接,2011(10):33-35,70.
- [4] 陆鑫,李大东,王若愚,等. 高强度热处理钢轨闪光焊接头断裂原因分析[J]. 铁道建筑,2020,60(1):116-119.
- [5] 俞喆,蒋明,张倩,等. U71Mn钢轨闪光焊接头马氏体组织成因及处理措施[J]. 金属热处理,2023,48(6):270-277.
- [6] 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.
- [7] 黄华刚,王克争,何方殿,等. 闪光对焊接头金相组织、性能和工艺关系的研究[J]. 焊接,2000(11):11-13.
- [8] 林森. 钢轨焊接接头强韧化正火技术研究[D]. 成都:西南交通大学,2016.
- [9] TB/T 1632.2—2014,钢轨焊接 第2部分:闪光焊接[S].
- [10] TB/T 1632.1—2014,钢轨焊接 第1部分:通用技术条件[S].