

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.04.08

焊修次数对 Q450NQR1 耐候钢 MAG 焊对接接头组织和性能的影响

戴忠晨¹, 付宁宁¹, 王鹏飞¹, 丁亚萍¹, 李林瞳², 孟炜丰², 刘范杰², 丁成钢²

1. 中车南京浦镇车辆有限公司, 江苏 南京 210031

2. 大连交通大学 材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116028

摘要: 针对轨道交通装备制造与运维中 Q450NQR1 耐候钢焊接接头的焊修需求, 探究了 MAG 焊修工艺 (1~4 次) 对接头微观组织演变及力学性能的影响。结果表明: 经 1~4 次焊修后, 接头组织类型保持一致, 焊缝区和熔合区主要由先共析铁素体、针状铁素体构成, 同时包含少量珠光体和粒状贝氏体。然而, 过热区晶粒尺寸随焊修次数增加而显著增大。4 次焊修后, 盖面粗晶区晶粒平均等效直径增加了约 20%, 而打底层晶粒平均等效直径增加了约 8%。焊接接头拉伸试验和弯曲试验结果表明, 焊缝具有良好的塑性和韧性。随着焊修次数的增加, 接头的冲击韧性和疲劳强度均有所下降。4 次焊修后, 焊缝区冲击功值降低了约 4.2%, 而热影响区降低了约 40.1%; 疲劳中值强度降低了约 29.0%。焊修过程中叠加的热输入导致过热区晶粒长大, 降低了接头韧性。同时, 焊接热循环对热影响区的反复作用导致晶粒粗化, 进一步降低了接头的冲击韧性和疲劳强度。本研究揭示了焊修次数对 Q450NQR1 耐候钢焊接接头组织和性能的影响规律, 为优化焊修工艺、提升焊接接头可靠性提供了重要的理论依据。

关键词: Q450NQR1 耐候钢; MAG 焊; 对接接头; 焊修; 接头组织及力学性能

中图分类号: TG457.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)04-0056-08

Influence of Welding Repair Times on the Microstructure and Properties of Q450NQR1 Atmospheric Corrosion Resistant Steel MAG Welded Joints

DAI Zhongchen¹, FU Ningning¹, WANG Pengfei¹, DING Yaping¹, LI Lintong², MENG Weifeng²,
LIU Fanjie², DING Chengguo²

1. CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd., Nanjing 210031, China

2. Dalian Jiaotong University, School of Materials Science and Engineering, Dalian 116028, China

Abstract: In response to the welding repair needs of Q450NQR1 atmospheric corrosion resistant steel welded joints in rail transit equipment manufacturing and maintenance, this study investigates the effects of MAG welding repair processes (1~4 times) on the evolution of microstructure and mechanical properties of the joints. The results show that after 1~4 times of welding repair, the types of joint microstructure remain consistent, with the weld zone and fusion zone mainly consisting of pro-eutectoid ferrite and acicular ferrite, and a small amount of pearlite and granular bainite. However, the grain size in the overheated zone increases significantly with the increase in the number of welding repairs. After 4 times of welding repair, the average equivalent diameter of grains in the cover coarse grain zone increased by about 20%, while that in the underbead zone increased by about 8%. Tensile and bend tests of the welded joints indicate that the welds have good plasticity and toughness. With the increase in the number of welding repairs, both the impact toughness and fatigue strength of the joints decrease. After 4 times of welding repair, the impact energy value in the weld zone decreased by about 4.2%, while in the heat affected zone it decreased by about 40.1%; the median fatigue strength decreased by about 29.0%. The accumulated thermal input during the welding repair process leads to grain growth in the overheated zone, reducing the toughness of the

收稿日期: 2025-02-24

作者简介: 戴忠晨 (1979—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事轨道交通车辆焊接技术研究。E-mail: daipeter@163.com。

joints. At the same time, the repeated action of welding thermal cycles on the heat-affected zone causes grain refinement, further reducing the impact toughness and fatigue strength of the joints. This study reveals the influence pattern of the number of welding repairs on the microstructure and properties of Q450NQR1 atmospheric corrosion resistant steel welded joints, providing an important theoretical basis for optimizing welding repair processes and enhancing the reliability of welded joints.

Keywords: Q450NQR1 weathering steel; MAG welding; butt joint; weld repair; joint microstructure and mechanical properties

引用格式:戴忠晨,付宁宁,王鹏飞,等. 焊修次数对 Q450NQR1 耐候钢 MAG 焊对接接头组织和性能的影响[J]. 电焊机,2025,55(4): 56–63.

Citation: DAI Zhongchen, FU Ningning, WANG Pengfei, et al. Influence of Welding Repair Times on the Microstructure and Properties of Q450NQR1 Atmospheric Corrosion Resistant Steel MAG Welded Joints[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(4): 56–63.

0 引言

Q450NQR1 耐候钢是轨道交通钢制车辆制造的常用材料。在车辆焊接生产制造过程中,焊接工艺不当或制造过程中接头条件的变化,焊接接头经常会产生如气孔、夹杂及未熔合等缺陷。此外,车辆在长期运营过程中,受腐蚀介质及磨损和刮擦的影响,经过一定运行周期后,部件局部不可避免地会出现损伤甚至失效现象。这两种情况对车辆制造的可靠性和运营的安全性构成严重威胁。因此,在生产和维修现场,针对焊接缺陷和部件的局部损伤进行有效的焊修是保障轨道交通正常运行的必要手段。

然而,焊接缺陷的修复过程会对焊缝进行叠加热输入,造成焊接接头近缝区的过热,导致性能上的损伤,返修次数越多,性能上特别是韧性的损伤越大。铁道、压力容器和钢结构标准或者技术资料明确规定,不合格的焊缝同一部位规定的返修次数不超过 2 次^[1-2]。且对钢不合格焊缝的焊修方面,一般多选用既有的普通直流 MAG 焊工艺^[3-9]。由此可

见,优化并确定焊修的工艺,尤其是按既有的、用于生产制造的焊接方法,确定能进行返修的次数,即焊修次数,对轨道交通钢制车辆的制造和维修,具有重要的工程意义。

在此背景下,本文通过焊修次数对 Q450NQR1 耐候钢 MAG 焊对接接头组织和性能的影响的研究,为轨道交通车辆的制造和维修提供必要的试验数据和工程依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料及焊接接头条件

试验母材为 Q450NQR1 耐候钢板,尺寸规格为 300 mm×150 mm×12 mm;焊材选用 TH550-NQ-II (Ø1.2 mm) 焊丝,坡口角度为 60°,焊接间隙 2 mm,钝边 1 mm,进行 Q450NQR1 耐候钢板对接焊。母材和焊丝的化学成分见表 1,力学性能见表 2。保护气体为 80%Ar+20%CO₂ 混合气体(EN ISO14175 M21 型气体),气体流量为 18 L/min。原始态和焊修态的接头条件如图 1 所示。

表 1 Q450NQR1 钢母材和 TH550-NQ-II 焊丝熔敷金属的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of steel Q450NQR1 and TH550-NQ-II deposited metal (wt. %)

材料	C	Si	Mn	S	P	Cu	Cr	Ni
Q450NQR1	≤0.12	≤0.75	≤1.50	≤0.008	≤0.025	0.20~0.55	0.30~1.25	0.12~0.65
TH550-NQ-II	≤0.12	≤0.60	1.20~1.60	≤0.020	≤0.025	0.20~0.50	0.30~0.90	0.20~0.60

表 2 母材和焊丝熔敷金属的力学性能

Table 2 Mechanical properties of steel Q450NQR1 and TH550-NQ-II deposited metal

材料	下屈服强度	抗拉强度	伸长率	冲击功 A_{kv}
	R_{el}/MPa	R_m/MPa	$A_{10}/\%$	(-40 °C)/J
Q450NQR1	≥450	≥550	≥19	≥60
TH550-NQ-II	≥450	≥550	≥22	≥60

对于接头条件,原始态焊缝为 3 层 4 道(见图 1a),焊接热输入分别为: $E_1=7.1 \text{ kJ/cm}$, $E_2=10.7 \text{ kJ/cm}$, $E_3=11.6 \text{ kJ/cm}$, $E_4=10.8 \text{ kJ/cm}$ 。焊修态保留厚度为 5 mm 的根部焊缝(见图 1b),焊修焊道的坡口角度为 60°,焊修焊缝为 2 层 3 道,焊接热输入为 $E_1=10.7 \text{ kJ/cm}$, $E_2=11.6 \text{ kJ/cm}$, $E_3=10.8 \text{ kJ/cm}$ 。对原始态(Z001)、焊

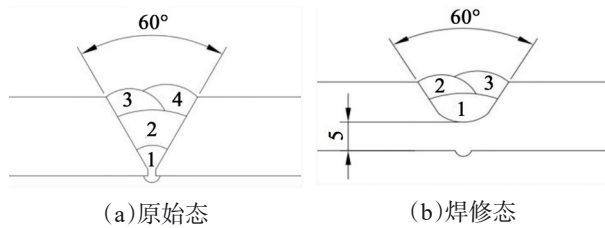


图1 接头条件

Fig. 1 Joint conditions

修1次(Z101)、焊修2次(Z201)、焊修3次(Z301)及焊修4次(Z401)共5种工况进行评定试验和分析。

1.2 试验方法

1.2.1 金相组织分析

采用徕卡LeicaDMi8倒置显微镜,参照EN ISO 17639:2022“焊接接头的宏观和显微检验”标准^[10],进行焊接接头的金相组织观察。腐蚀液为4%硝酸酒精;使用IPP(Image-Pro Plus)软件测量工具,计算焊接接头(打底层、盖面层)粗晶区平均等效直径 D_{ea} (单位: μm),以评价焊补后焊接接头过热粗晶区晶粒长大的倾向及其对接头性能(尤其是低温冲击韧性)的影响。

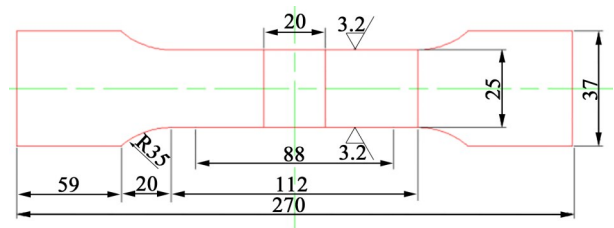
1.2.2 力学性能测试

(1)拉伸试验。参考EN ISO 4136:2022《金属材料焊缝的破坏性试验—横向拉伸试验》标准^[11],使用WDW-300E微机控制电子式万能试验机,对原始态及4次焊修合计5种工况的标准试样进行拉伸试验,拉伸加载速度为2 mm/s,以评价焊接接头的抗拉强度。拉伸试样的形状和尺寸如图2a所示。

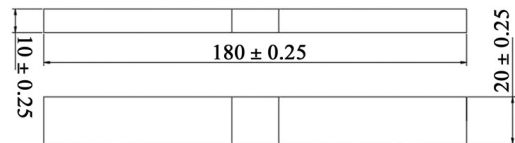
(2)弯曲试验。参照EN ISO 5173:2016《金属材料焊缝的有损检验—弯曲试验》标准^[12],使用WDW-300E微机控制电子式万能试验机,进行焊接接头的面弯和背弯试验,以评价接头的塑性。弯曲试样形状和尺寸如图2b所示。

(3)冲击试验。参照EN ISO 9016:2022《金属材料焊接的破坏性试验—冲击试验》标准^[13],在焊缝处和热影响区各准备3个冲击测试样品,如图3所示,采用JB-W300A型冲击试验机,在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下对焊缝区和热影响区进行冲击试验。冲击试样的形状和尺寸如图3所示。

(4)疲劳试验。使用QBG-200型高频疲劳试验机,参照GB/T 13816:1992《焊接接头脉动拉伸疲劳



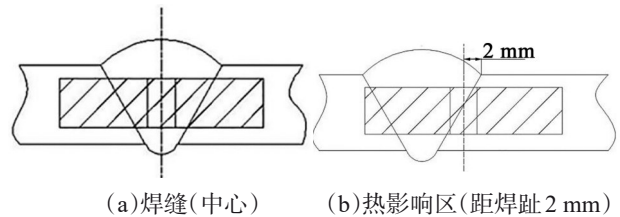
(a)拉伸试样



(b)弯曲试样

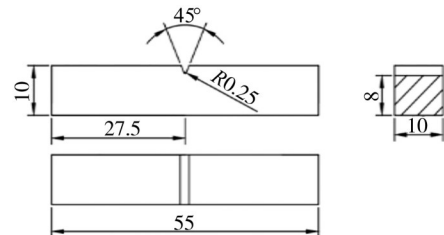
图2 拉伸、弯曲试样的形状和尺寸

Fig. 2 Shape and dimensions of tensile and bending test samples



(a)焊缝(中心)

(b)热影响区(距焊趾2 mm)



(c)冲击试样形状和尺寸

图3 冲击试验取样及试样形状和尺寸

Fig. 3 Sampling and specimen shape and size for impact test

试验方法》标准^[14],进行焊接接头的脉动拉伸疲劳试验,利用最小二乘法原理拟合 $S-N$ 曲线,得出名义应力范围 $\Delta\sigma$ 与疲劳循环寿命 N 之间的指数形式的 $S-N$ 曲线表达式^[15],求得疲劳中值强度 $\Delta\sigma_{10}^7$,以评价焊修后接头的疲劳可靠性。应力比 $R=0.1$,指定循环寿命 1×10^7 次。疲劳试样形状和尺寸如图4所示。

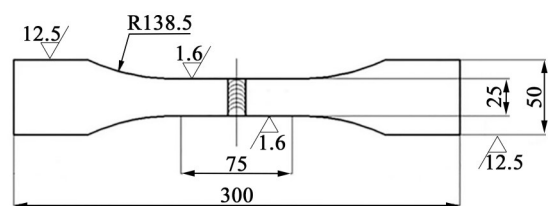


图4 疲劳试样形状和尺寸

Fig. 4 Fatigue Test Sample Shape and Size

3 试验结果与分析

3.1 焊接接头的金相组织

焊缝、熔合区的金相组织如图5所示。经1~4次焊修后,原始态和焊修态接头的组织类型相同,焊缝区和熔合区主要由先共析铁素体(GBF)、针状铁素体(AF)构成,同时包含少量的珠光体(P)和粒状贝氏体(B_G)组成。值得注意的是,与原始态相比,焊修后,打底层与填充层交界的焊缝区域存在一个明显的“过热区”,该区域原始态尺寸较小,宽度约为270 μm (见图5e),晶粒尺寸较为粗大,且大小尺寸不均匀(见图5a、5b、5e),随着焊修次数的增加,该过热区的晶粒逐渐增大(见表3),且过热区的尺

寸(宽度)逐渐增加,4次焊修后,其宽度约为460 μm (见图5f),这是焊修热循环叠加作用的结果。

焊接热影响区过热粗晶区的金相组织如图6所示。粗晶区主要由晶内细条状铁素体(IGF)、少量珠光体(P)和粒状贝氏体(B_G)组成,晶粒粗大且不均匀。随着焊修次数的增加,粗晶区的晶粒尺寸逐渐增大,与原始态相比,经4次焊修后,盖面粗晶区晶粒平均等效直径 D_{EA} 增加了约20%,达到了37.32 μm 。5种工况打底、盖面粗晶区平均晶粒等效直径 D_{EA} 的IPP测量、计算结果如表3所示。

焊接缺陷的修复过程对焊缝进行的叠加热输入,必然造成焊接接头近缝区过热,促使过热区晶粒长大,导致性能上的损伤,尤其是低温冲击韧性,

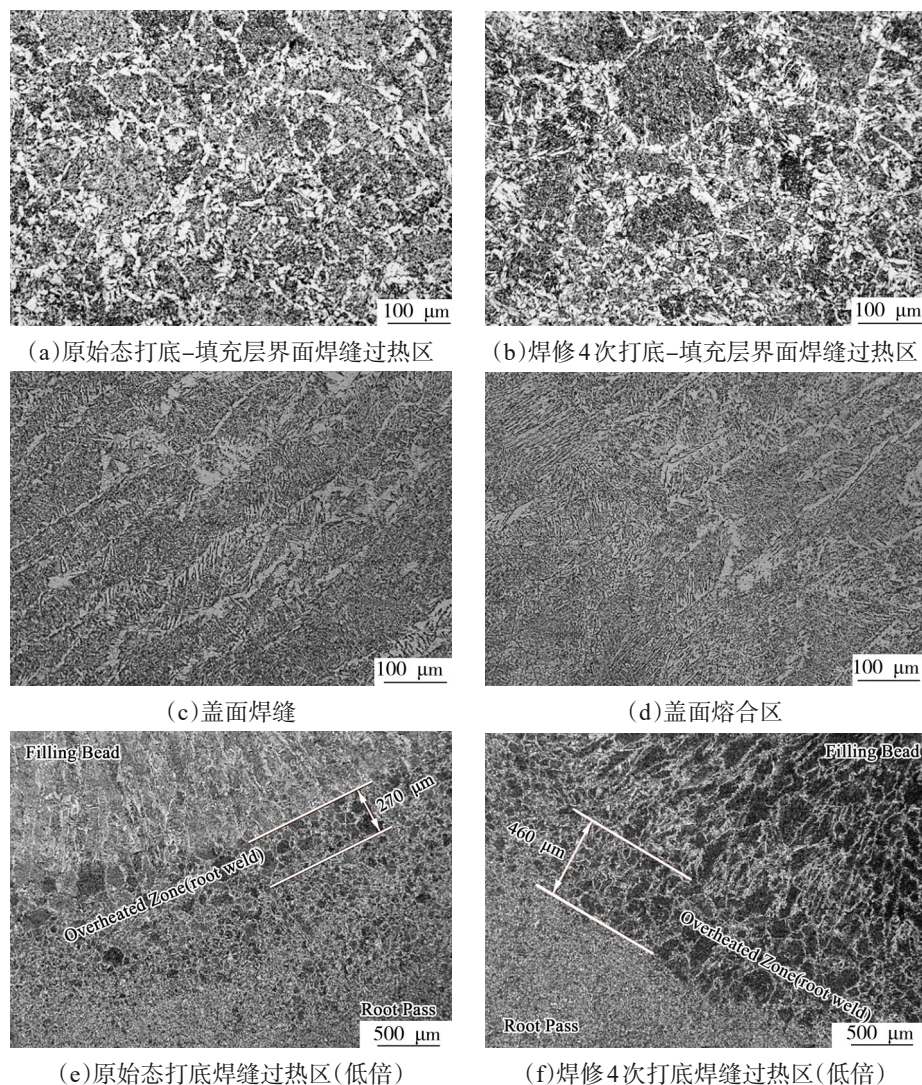


图5 焊缝、熔合区的金相组织

Fig. 5 Microstructure of weld & fusion zone

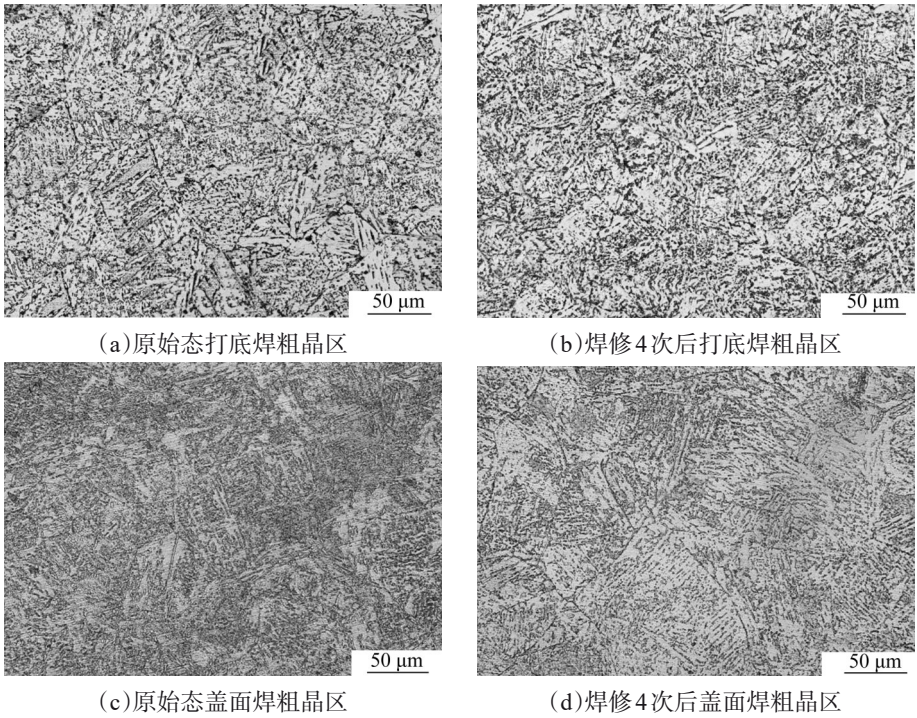


图6 粗晶区的金相组织及晶粒尺寸

Fig. 6 Microstructure & grain size of coarse grained region

表3 五种工况打底、盖面接头粗晶区及打底焊缝粗晶区晶粒平均等效直径 D_{EA}

Table 3 Average equivalent diameter of coarse grained region grain under five working conditions			
位置/工况	打底(接头) / μm	盖面(接头) / μm	打底(焊缝) 粗晶区/ μm
Z001 原始态	34.25	31.04	45.9
Z101 焊修1	34.50	32.29	55.87
Z201 焊修2	34.57	33.93	59.51
Z301 焊修3	36.76	34.08	68.94
Z401 焊修4	36.86	37.32	73.15

返修(焊修)的次数越多,过热区晶粒长大倾向越明显。与原始态相比,经4次焊修后,盖面粗晶区晶粒平均等效直径 D_{EA} 增加约20%,达到37.32 μm ,打底粗晶区晶粒平均等效直径 D_{EA} 增加约8%,达到36.86 μm ;与原始态相比,打底焊缝的“过热粗晶区”晶粒平均等效直径 D_{EA} 增加约59%,达到了73.15 μm 。

2.2 焊接接头的力学性能结果与分析

2.2.1 拉伸试验

5种工况接头的拉伸试验结果如表4所示。焊接接头拉伸试样断裂为韧性断裂,断裂位置均在远离焊缝的母材处,且断裂呈45°方向切断。原始态、焊修第4次拉伸试验后试样的形貌如图7所示。

表4 焊接接头拉伸试验结果

Table 4 Tensile test results of welded joint

编号/工况	试件尺寸 /mm×mm	拉伸载荷/kN	抗拉强度 /MPa	平均抗拉强度/MPa	断裂位置	断裂性质
1/Z001	25.1×9.1	136.5	598	593.5	母材	韧性断裂
	25×9.2	135.5	589			
2/Z101	25×9.1	135.9	597	596	母材	韧性断裂
	25.1×9.1	135.9	595			
3/Z201	25.1×9.1	135.2	592	594.5	母材	韧性断裂
	25.1×9.2	137.8	597			
4/Z301	24.9×9.1	133.4	589	591.5	母材	韧性断裂
	25.1×9.1	135.7	594			
5/Z401	25×9.1	132.2	581	587.5	母材	韧性断裂
	25.1×9.0	134.2	594			

2.2.2 弯曲性能试验

5种工况接头的面弯和背弯试验结果表明,当弯曲角度为180°(已达到最大弯曲角度,试样从夹具底部弹出)时(见图8b、8d),面弯和背弯试样受拉面均未出现裂纹(见图8a、8c),表明5种工况焊缝塑性、焊缝与母材熔合良好。原始态和焊修第4次试验的弯曲试验后试样的形貌如图8所示。

2.2.3 冲击试验

试验结果表明,经过焊修后,热影响区与焊缝

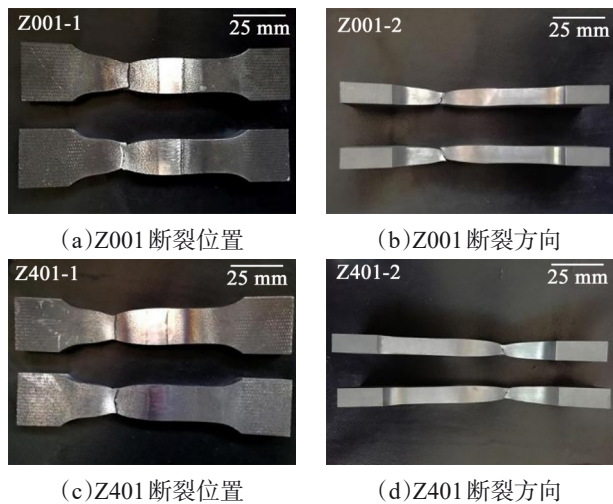


图 7 原始态、焊补第 4 次接头拉伸试样的断裂位置和方向
Fig. 7 Fracture location and direction of the fourth weld repair & as welded joint sample by tensile test

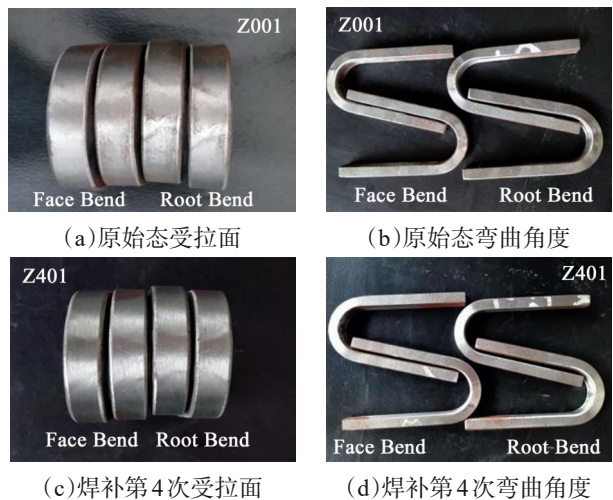


图 8 弯曲试验后试样的形貌
Fig. 8 Appearance of the sample after bending test

区的冲击韧性随着焊修次数增加而下降,焊缝区冲击韧性略有下降,而热影响区冲击韧性下降较为明显。与原始态(Z001)相比,Z401 工况焊缝区下降约 4.2%(95 J→91 J),热影响区下降约 40.1%(117 J→70 J)。其原因在于,每次的焊修去除大部分的焊缝金属(只保留原始态 5 mm 厚的根部焊缝,见图 1b),焊修的热循环只对打底焊缝过热区有不利的影响,使该区域的晶粒尺寸、过热区宽度逐渐增大,但对整体焊缝的冲击韧性影响较小;而热影响区在焊接热循环的反复作用下,粗晶区晶粒呈长大的趋势(见表 3),对热影响区整体冲击韧性影响较大。5 种工况下接头的低温(−40 °C)冲击试验结果如表 5 所示,值

得注意的是,无论焊缝还是热影响区,−40 °C 的低温冲击功值均高于 Q450NQR1 母材及 TH550-NQ-II 熔敷金属标准规定的下限值 60 J。

表 5 焊接接头冲击吸收功
Table 5 Impact value of welded joint

编号/工况	位置	−40 °C 冲击功 A_{KV}/J			
		单个值		平均值	
Z001/原始态	焊缝	90	95	101	95
	热影响区	120	116	114	117
Z101/焊补 1 次	焊缝	88	96	100	94
	热影响区	104	75	96	91
Z201/焊补 2 次	焊缝	100	98	84	94
	热影响区	108	72	88	91
Z301/焊补 3 次	焊缝	98	81	95	92
	热影响区	96	66	78	80
Z401/焊补 4 次	焊缝	90	96	88	91
	热影响区	75	63	73	70

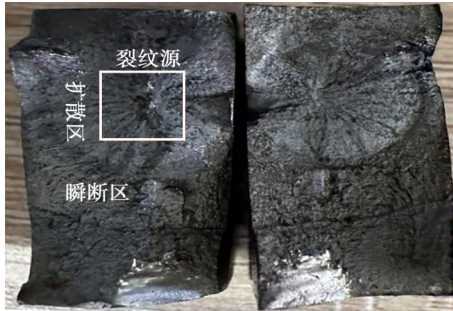
2.2.4 焊接接头的疲劳试验结果与分析
5 种工况的疲劳中值强度 $\Delta\sigma_{10}^7$ 见表 6。

表 6 焊接接头的中值疲劳强度
Table 6 Median fatigue strength of welded joints

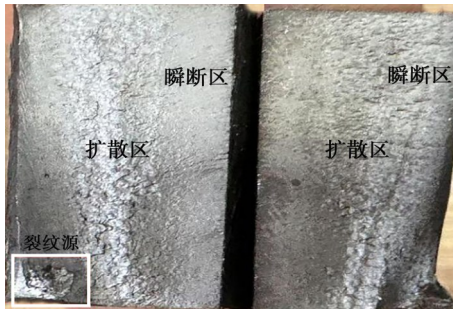
编号/工况	疲劳极限 $\Delta\sigma_{10}^7/MPa$
Z001	305.1
Z101	291.4
Z201	250.7
Z301	237.4
Z401	216.7

由表可见,在相同的接头条件(坡口角度、焊接间隙)下,从 Z001 工况到 Z401 工况,疲劳中值强度逐渐降低,其中 Z401 工况接头的疲劳中值强度最低,为 216.7 MPa,相对于 Z001 工况降低约 29%。

对于同种工况,疲劳试件断裂位置在焊缝区或热影响区,断裂位置不同,其断口形貌亦不同,宏观断口形貌如图 9 所示,裂纹源、裂纹扩展区及瞬断区形貌清晰可见,通过 SEM 断口观察,可进一步分析其疲劳断裂特征。通过 SEM 观察,焊缝疲劳试样断裂特征为,裂纹源区呈现暗色特征且断面平坦,放射状河流条纹自裂纹源呈辐射状向外延伸(见图 10a、10b),裂纹源可能为焊接夹杂缺陷(见图 10a)。裂纹扩展第一阶段主要表现为具有显著方向性的撕裂棱结构,其间分布着离散的疲劳辉纹,局部区域伴有少量二次裂纹,断口表面呈现微米级起伏台阶(见图 10b)。



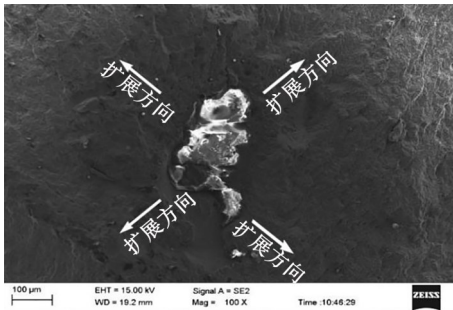
(a) Z401-7(焊缝断裂, 疲劳循环寿命316万次)



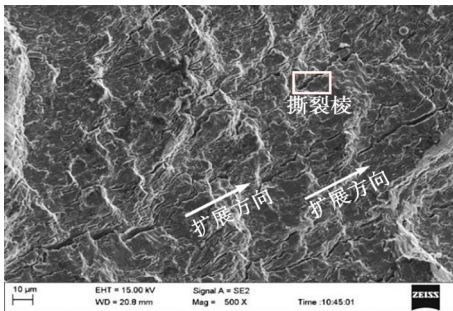
(b) Z401-8(HAZ断裂, 疲劳循环寿命789万次)

图9 Z401工况疲劳试样断口宏观形貌

Fig. 9 Macroscopic morphology of fatigue fracture of the sample Z401



(a) Z401-7 裂纹萌生区

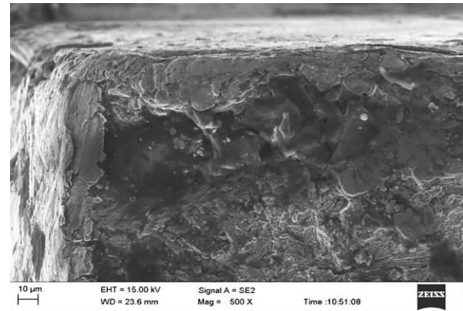


(b) Z401-7 裂纹扩展区

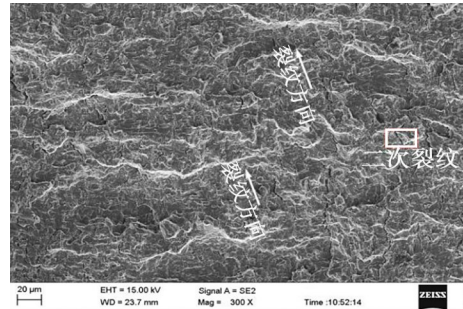
图10 Z401-7试样的疲劳断口SEM形貌(焊缝断裂)

Fig. 10 Fatigue fracture SEM morphology of the sample Z401-7(weld)

热影响区焊接接头疲劳试样断裂特征为: 裂纹萌生于热影响区粗晶区的熔合线附近(见图11a), 此处可见典型的多源疲劳特征; 裂纹源区表面呈现镜面光泽, 应为裂纹萌生初期在交变载荷作用下,



(a) Z401-8 裂纹萌生区



(b) Z401-8 裂纹扩展区

图11 Z401-8试样的疲劳断口SEM形貌(HAZ断裂)

Fig. 11 Fatigue fracture SEM morphology of the sample Z401-8(HAZ)

匹配断面反复开合、摩擦局部所致, HAZ过热粗晶区与焊缝区交界的熔合区, 由于晶粒粗化而形成的组织损伤, 可能是形成疲劳开裂的内因。在裂纹第一扩展区可观察到显著的各向异性特征(见图11b), 垂直于焊接方向呈现连续分布的疲劳辉纹; 平行于焊接方向则出现断续解理台阶及沿柱状晶界的二次裂纹。

4 结论与展望

(1) 经1~4次焊修后, 接头的组织类型相同, 焊缝和熔合区的微观组织结构主要为先共析铁素体(G_{BF}), 一定量的针状铁素体(AF), 同时存在少数的珠光体(P)和粒型贝氏体(B_G); 过热区为晶内细条状铁素体(IGF)、少量珠光体(P)和粒状贝氏体(B_G), 晶粒粗大且不均匀, 焊修使过热区的晶粒尺寸增加, 与原始态相比, 经4次焊修后, 盖面粗晶区晶粒平均等效直径 D_{EA} 增加约20%, 达到 $37.32 \mu m$, 打底粗晶区晶粒平均等效直径 D_{EA} 增加约8%, 达到了 $36.86 \mu m$ 。

(2) 无论原始态, 还是焊修态(1~4次), 焊接接头拉伸试验断裂的位置均在靠近母材或者远离焊

缝的母材处,且断裂多呈45°方向切断,且面弯及背弯试验中,试样的弯曲角度为180°时,在弯曲受拉面无裂纹,焊缝均呈现了良好的塑性。

(3)经过焊修后,热影响区与焊缝区的低温(-40℃)冲击韧性随着焊修次数增加而下降,焊缝冲击韧性略有下降,热影响区的冲击韧性下降较大,与原始态相比,焊修4次的焊缝区-40℃冲击功值降低约为4.2%,其热影响区的降低约40.1%;无论焊缝还是热影响区,-40℃的低温冲击功值均高于Q450NQR1耐候钢母材及TH550-NQ-II熔敷金属标准规定的下限值60 J。

(4)由原始态到焊修态(1~4次),疲劳中值强度逐渐降低,其中焊修4次后的接头疲劳中值强度最低,为216.7 MPa。相对于原始态(305.1 MPa),疲劳中值强度下降了约29.0%。

(5)为提升Q450NQR1耐候钢焊修后接头的可靠性,减少不合格焊缝的焊修次数,建议如下:①优化原始接头设计,如适当减小焊接坡口角度等;②焊修时选用低应力、小变形及高可靠性的焊修方法,如高速脉冲MAG焊等。

参考文献:

- [1] 国家市场监督管理总局、国家标准化管理委员会. 压力容器 第一部分:通用要求,GB/T 150.1-150.4:2024[S]. 2024.
- [2] 武永寿,梁景恒,韩晓辉,等. 高强度耐候钢Q355对接接头多次焊修力学行为研究[J]. 兵器材料科学与工程,2020,43(1):87-90.
LIANG Y S, LIANG J H, HAN X H, et al. Research on the Mechanical Behavior of Multiple Weld Repairs for High-Strength Weathering Steel Q355 Butt Joints[J]. Armament Materials Science and Engineering, 2020, 43(1):87-90.
- [3] 黄科伟,陈斌. 客车转向架构架裂纹焊修工艺的改进[J]. 轨道交通装备与技术,2013(03):33-34.
HUANG K W, CHEN B. Improvement of Crack Repair Process for Passenger Car Bogie Frame[J]. Rail Transit Equipment and Technology, 2013(03):33-34.
- [4] 王志杰. 焊补对SMA490BW钢焊接接头疲劳行为的影响[D]. 河北:石家庄铁道大学, 2014.
WANG Z J. The Impact of Weld Patching on the Fatigue Behavior of SMA490BW Steel Welded Joints[D]. Hebei: Shijiazhuang Tiedao University, 2014.
- [5] 孙志鹏,张林儒,李志强. 转向架构架焊接修复性能研究[J]. 电焊机,2021,51(02):60-62+69.
SUN Z P, ZHANG L R, LI Z Q. Research on Welding Repair Performance of Bogie Frame[J]. Electric Welding Machine, 2021, 51(02):60-62+69.
- [6] 李永军. 空调客车转向架构架裂纹焊修工艺[J]. 机械制造文摘(焊接分册),2016(3):24-26.
LI Y J. Crack Repair Process for Air-Conditioned Bus Bogie Frame[J]. Mechanical Manufacturing Digest (Welding Section), 2016(3):24-26.
- [7] 常力,宫平,于传颖,等. 多次返修焊对S355J2W+N钢焊接接头中值疲劳寿命的影响[J]. 机车车辆工艺, 2014(3):32-33.
CHANG L, GONG P, YU C Y, et al. The Impact of Multiple Repairs on the Median Fatigue Life of S355J2W+N Steel Welded Joints[J]. Locomotive and Rolling Stock Technology, 2014(3):32-33.
- [8] 明阳,贾永方,王名锦,等. 多次返修次数对SA-533GrBCL1钢焊接接头组织和性能的影响[J]. 电焊机,2022,52(07):116-120.
YANG M, JIA Y F, WANG S J, et al. The Impact of Multiple Repairs on the Microstructure and Properties of SA-533GrBCL1 Steel Welded Joints[J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(07):116-120.
- [9] 杨杰,汪勇,王小锋,等. 多次返修对钢结构Q345B材质接头组织与性能的影响[J]. 工程质量,2018,36(11):15-18.
YANG J, WANG Y, WANG X F, et al. The Impact of Multiple Repairs on the Microstructure and Properties of Q345B Steel Joints[J]. Engineering Quality, 2018, 36(11):15-18.
- [10] 欧洲标准化委员会. 焊接接头的宏观和微观检验:EN ISO 17639:2022[S]. 2022.
- [11] 欧洲标准化委员会. 焊接接头的横向拉伸试验:EN ISO 4136:2022[S]. 2022.
- [12] 欧洲标准化委员会. EN ISO 5173:2016,焊接接头的弯曲试验[S]. 2016.
- [13] 欧洲标准化委员会. EN ISO 9016:2022,焊接接头的冲击试验[S]. 2022.
- [14] 国家技术监督局. 焊接接头脉动拉伸疲劳试验方法:GB/T 13816:1992[S]. 1992.
- [15] 张亚军. S-N疲劳曲线的数学表达式处理方法探讨[J]. 理化检验-物理分册, 2007,43(11):563-565.
ZHANG Y J. Discussion on the Mathematical Expression of S-N Fatigue Curves[J]. Physical Inspection-Physical Section, 2007, 43(11):563-565.