

# 侧板用HJ58和WL510钢自动焊工艺及焊缝组织与性能研究

靖微<sup>1,2</sup>, 王小伟<sup>3</sup>, 刘书明<sup>1</sup>, 邹文凤<sup>1</sup>, 张旗<sup>2</sup>, 杨岩<sup>1</sup>

(1.中国兵器工业集团江山重工研究院有限公司,湖北襄阳441005;

2.武汉大学材料科学与工程学院,湖北武汉430074;3.北京工业大学机械与能源工程学院,北京100124)

**摘要** 侧板主要由连接梁(HJ58高强度钢)和槽钢(WL510低合金钢)组成,针对手工焊接侧板焊缝质量难以保证、生产效率低的问题。采用正交试验法摸索了侧板的最优自动焊接工艺参数,并对典型焊件的显微组织、断口形貌等进行了表征分析,验证了最优工艺参数对高质量焊接的有效性。结果表明:当焊接速度为19 cm/min、焊接电流为128 A、气体流量为18 L/min、摆幅为1.3 mm时,焊缝成形较好,抗拉强度平均值为 $587.5\pm 2.5$  MPa,弯曲后无裂纹产生;焊缝区柱状晶沿水平方向向外生长,熔合区两侧组织基本相同,为铁素体+珠光体,组织最佳;拉伸断口表面韧窝直径小且深,硬度较为稳定,力学性能最优。

**关键词** 侧板;自动焊接;正交试验;显微组织;力学性能

中图分类号 TG442

文献标志码 A

文章编号 1004-244X(2025)02-0133-06

DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20250107.002

## Study on automatic welding process and microstructure and properties of weld seam of HJ58 and WL510 steels for side plate

JING Wei<sup>1,2</sup>, WANG Xiaowei<sup>3</sup>, LIU Shuming<sup>1</sup>, ZOU Wenfeng<sup>1</sup>, ZHANG Qi<sup>2</sup>, YANG Yan<sup>1</sup>

(1.China Weapons Industry Group Jiangshan Heavy Industry Research Institute Co. Ltd., Xiangyang 441005, China;

2.Materials Science and Engineering, School of Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;

3.College of Mechanical & Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract** The side plate is mainly composed of connecting beams (HJ58 high-strength steel) and channel steels (WL510 low-alloy steel). To address the issues of poor weld quality and low production efficiency in manual welding of side plates, the optimal automatic welding process parameters were explored using the orthogonal test method. The microstructure and fracture morphology of typical welded parts were characterized and analyzed to verify the effectiveness of the optimal process parameters in achieving high-quality welding. The results show that when the welding speed is 19 cm/min, the welding current is 128 A, the gas flow rate is 18 L/min, and the swing amplitude is 1.3 mm, the weld formation is good, with an average tensile strength of  $587.5\pm 2.5$  MPa and no cracks after bending. The columnar crystals in the weld zone grow outward in the horizontal direction, and the microstructure on both sides of the fusion zone is basically the same, being ferrite + pearlite, which is the best microstructure. The tensile fracture surface has small and deep dimples, and the hardness is relatively stable, indicating the best mechanical properties.

**Keywords** side plate; automatic welding; orthogonal test; microstructure; mechanical properties

某产品火箭炮火箭弹储运发射箱主要由箱架、定向器、密封盖等组成,其中侧板是箱架的重要组成部分。侧板结构如图1所示。其结构相对较为简单,主要由连接梁(HJ58高强度钢)和槽钢(WL510低合金钢)焊接而成。现阶段,普遍采用手工焊条电弧焊和二氧化碳气体保护焊接连接梁和槽钢,生产效率较低,焊缝夹渣、气孔、未焊透、咬边等缺陷较多<sup>[1-3]</sup>。同时,受施焊者技能影响,焊缝一致性较差,焊缝质量难以保证,不合格率高。

近年来,针对低合金钢焊接工艺开展了较多研究,

其中MAGUDEESWARAN等<sup>[4]</sup>研究了不同焊接方法和焊接材料对合金钢焊缝热影响区氢致裂纹的影响,发现采用药芯焊丝电弧焊和奥氏体不锈钢焊丝施焊时,焊缝热影响区的抗裂纹能力提高。HU等<sup>[5]</sup>研究了预热温度对低合金高强度钢焊接接头组织性能和冷裂纹的影响规律。当预热温度为120℃时,焊缝粗晶区具有良好的冲击韧性和抗冷裂纹能力。曹荣华<sup>[6]</sup>通过评价核电站常用的Q390钢焊接性,明确钢材交货状态、选用超低氢型焊材和焊前预热等方法,保证了低合金高强度钢的焊接质量。RIBEIRO等<sup>[7]</sup>研究了激光焊接热输

收稿日期:2024-05-13;修回日期:2024-10-11

第一作者:靖微,男,硕士。E-mail:497495432@qq.com。

通信作者:张旗,男,博士,副教授。E-mail:whzq2014@163.com。

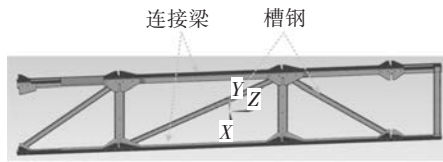


图1 侧板结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of side panel structure

入对高强度钢焊接接头断裂韧性的影响,发现高热输入时焊缝塑性变形大,韧性断裂明显;低热输入时焊缝塑性变形小,脆性断裂特征明显,确定了焊接热输入与焊缝韧性之间的关系。AHONEN等<sup>[8]</sup>研究了400℃焊后热处理对铁素体低合金钢与镍基52合金异种焊接金属界面的局部强度不匹配的影响,发现时效处理对低合金钢热影响区、焊缝的组织均无明显影响。王艳杰等<sup>[9]</sup>研究了中锰钢焊接热循环对粗晶区显微组织、硬度和冲击韧性的影响,在冷却速度 $t_{8/3}$ 为8s时,热影响区中大角度晶界含量最高,冲击韧性相对较好。

尽管国内外诸多学者已对各类低合金钢焊接进行了广泛的研究,但针对侧板自动焊接的参考资料仍然较为匮乏。随着数字技术和人工智能技术的迅猛发展,焊接过程正逐步迈向智能化和精准化,这为侧板实现自动焊接提供了有力的技术支撑和指引。基于此,本文作者针对侧板工件,设计了一套自动化焊接平台。采用正交试验法进行焊接试验,并通过对比焊缝成形质量、显微组织和力学性能等,确定了高质量焊缝的最佳工艺参数。同时,揭示了工艺参数对焊接质量的影响机理。

## 1 试验设计

### 1.1 试验方法

为实现自动化焊接,设计了自动化焊接平台,内部结构如图2a所示。然后按照结构设计图进行焊接平台搭建:德国Phoenix puls数字化逆变焊接电源、KUKA KR5 arc六轴焊接机器人,德国Phoenix DRIVE 4 ROB 2送丝机、BRG-2.VD-DAE清枪剪丝机组成MAG焊系统部分;小型头尾架式变位机、固定侧板夹具构成侧板工装。焊接过程中变位机与机器手臂控制柜之间实时通讯,确保变位机将最佳焊接位置暴露给焊接机器人,规避因焊接可达性问题造成的焊接质量下降。组装完成后的焊接平台如图2b所示。

为了确定所构建的侧板自动化焊接平台在焊接质量上表现最佳的工艺参数,选择焊接速度、焊接电流、保护气体流量和摆焊的摆幅等关键参数作为变量进行正交试验,各焊缝工艺参数如表1所示。焊接完成后,进行焊缝成形质量评价、显微组织表征和显微硬度、拉

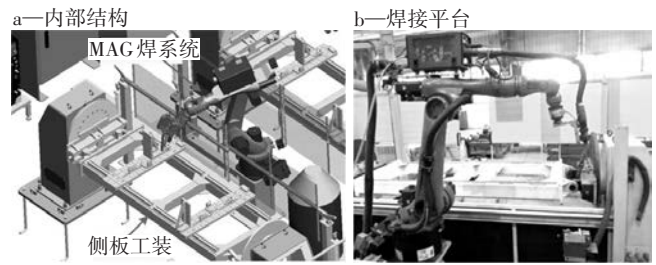


图2 自动焊接平台

Fig.2 Automatic welding platform

表1 因素水平表

Table 1 Factor level table

试样	焊接速度/ ( $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$ )	焊接电流/A	气体流量/ ( $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ )	摆幅/mm
1	1(15)	1(118)	1(12)	1(1.3)
2	1(15)	2(128)	2(15)	2(1.6)
3	1(15)	3(138)	3(18)	3(1.9)
4	2(19)	1(118)	2(15)	3(1.9)
5	2(19)	2(128)	3(18)	1(1.3)
6	2(19)	3(138)	1(12)	2(1.6)
7	3(23)	1(118)	3(18)	2(1.6)
8	3(23)	2(128)	1(12)	3(1.9)
9	3(23)	3(138)	2(15)	1(1.3)

伸力学性能测试。将成形质量、显微组织、力学性能良好焊缝所用的参数作为最佳工艺参数。基于组织与性能试验结果,通过讨论工艺变量对显微组织演变影响,揭示工艺变量对力学性能影响规律,为通过优化工艺参数实现性能高质量焊接提供理论参考。

### 1.2 试验材料选取

选用武汉钢铁集团公司生产的热轧态低合金HJ58钢和WL510钢作为焊接材料。钢板厚度为4mm,HJ58钢化学成分、力学性能、供货状态等符合WJX(RZ15)—2013标准的规范,材料成分见表2。WL510钢化学成分、力学性能、供货状态符合WJX(RZ20)—2001标准的规范,材料成分见表2。焊接填充材料选用四川大西洋焊接材料有限公司生产的实心焊丝,焊丝牌号为ER50—6,焊丝直径为1.2mm,执行标准为GB/T 8110—2008。保护气体用80%Ar+20%CO<sub>2</sub>(体积分数)混合气体。在对焊接位置施焊前,先用砂纸打磨去除表面的氧化层,再用丙酮清洗去除表面残渣和油污等。

表2 焊接材料的化学成分(质量分数/%)

Table 2 Chemical compositions of welding material (mass fraction/%)

板材	WL510	HJ58	板材	WL510	HJ58
C	≤0.13	≤0.18	S	≤0.025	≤0.02
Si	≤0.50	≤0.50	Mo	≤0.050	≤0.30
Mn	≤1.60	≤1.80	Nb+V+Ti	≤0.130	≤0.25
P	≤0.03	≤0.03			

### 1.3 显微组织表征与性能测试

试板采用坡口对接焊,外廓尺寸为390 mm×260 mm×4 mm,坡口角度为35°,钝边为0.5 mm。焊接完成后,使用电火花线切割对焊缝进行取样,分别进行显微组织分析、拉伸测试、弯曲测试和硬度性能测试。取得的试样先在金相磨抛机下打磨至镜面状态,然后用体积分数为4%的硝酸酒精溶液对其进行腐蚀处理,腐蚀时间为10 s。随后,用Observer.A1m蔡司金相显微镜观察焊缝低倍金相组织,再用装有EDS探头的EV018扫描电子显微镜对物相形貌和化学成分进行分析。拉伸性能和弯曲性能测试在UTM5305万能试验机进行,加载速率为1 mm/min,试件尺寸如图3所示。弯曲试验按照GB/T 2653—2008中的要求执行,每组取4个试样进行室温弯曲性能测试,其中2个为面弯,2个为背弯。焊缝显微硬度测试在402MVD显微维氏硬度计上进行,设置加载力为10 N,加载时间为10 s。硬度沿着焊缝截面水平方向测量,每0.5 mm记录1次。最后,用数据分析软件绘制硬度分布折线图。

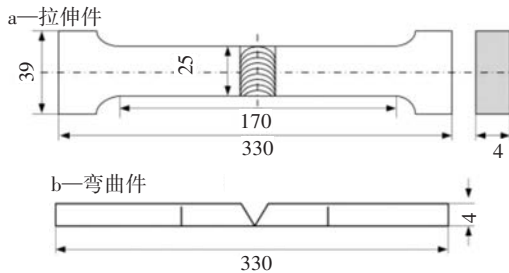


图3 拉伸与弯曲试件图(mm)

Fig.3 Drawing of tensile and bending specimen(mm)

## 2 结果与分析

### 2.1 正交试验结果分析

按照正交试验方案进行焊接试验,测量各组焊缝的拉伸和弯曲性能,结果如图4所示。计算极差与标准差,结果见表3。

根据焊缝成形质量、抗拉强度和折弯后失效情况,将焊缝连接质量划分成良好、适中和较差3种类别。为了利于分析和减少试验工作量,从这3种类别各选1条焊缝用于组织性能分析,以探明工艺参数对焊接质量的影响。选取5、3、9#焊缝分别作为连接质量良好、

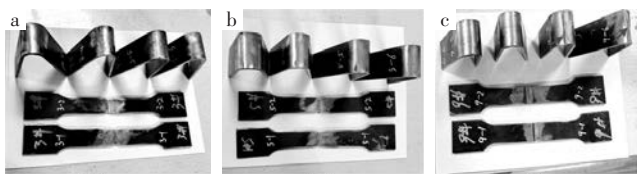


图4 力学性能检测实物

Fig.4 Mechanical properties test physical objects

表3 极差分析计算表

Table 3 Range analysis table

试样号	焊接速度/ (cm·min <sup>-1</sup> )	焊接电流/ A	气体流量/ (L·min <sup>-1</sup> )	摆幅/mm	标准 偏差
1	1(15)	1(118)	1(12)	1(1.3)	15.5
2	1(15)	2(128)	2(15)	2(1.6)	16.0
3	1(15)	3(138)	3(18)	3(1.9)	30.5
4	2(19)	1(118)	2(15)	3(1.9)	14.0
5	2(19)	2(128)	3(18)	1(1.3)	2.5
6	2(19)	3(138)	1(12)	2(1.6)	20.0
7	3(23)	1(118)	3(18)	2(1.6)	9.5
8	3(23)	2(128)	1(12)	3(1.9)	17.5
9	3(23)	3(138)	2(15)	1(1.3)	25.5
T <sub>1</sub>	62.0	39	53.0	43.5	
T <sub>2</sub>	36.5	36	55.5	45.5	
T <sub>3</sub>	52.5	76	42.5	62.0	
1	20.6	13.0	17.6	14.5	
2	12.1	12.0	18.5	15.1	
3	17.5	25.3	14.1	20.6	
R	8.5	13.3	4.4	6.1	

适中和较差类别的典型代表。5#焊缝成形良好,弯曲后无裂纹产生,抗拉强度平均值为587.5±2.5 MPa,焊接质量良好;3#焊缝同样成形良好,弯曲后无裂纹产生,但抗拉强度弱于5#,平均值为571.5±30.5 MPa,焊接质量适中;9#焊缝表面可见咬边和未焊透缺陷,折弯后有裂纹产生,抗拉强度较低,平均值为509.5±25.5 MPa,焊接质量较差。

### 2.2 焊缝组织分析

根据组织与性能内在联系,3、5、9#焊缝性能差异表明形成了不同的焊缝组织。图5为3组焊缝横截面形貌照片。3个焊缝均实现了母材与填充金属的冶金结合,截面表面未见气孔、裂纹等缺陷。对比焊缝间的几何尺寸可以发现,5#焊缝的宽度最大,3#最小,9#介于二者之间。在高度方向上,3#焊缝的高度与5#相等,而9#的高度小于4 mm,表明9#焊缝未能焊透母材。从焊缝熔合线的形状特征可以看出,3#和5#焊缝熔合线被分成上下两段。前者熔合线分界点高度较大,呈直线状;后者分界点高度小,呈曲折形状,这表明5#焊缝与母材具有更大的结合面积。形成这种差异的主要原因在于摆动幅度,较大的摆幅增大了电弧热源的面积,导致热量分布的密度减小,会减弱电弧对母材的挖掘作用及与母材的熔合程度。相反,当摆幅较小时,作用到母材上的热量分布密度增大,每单位面积内的能量更多参与熔化母材,进而形成呈曲折形的熔合线。另一方面,虽然5#和9#焊缝电弧摆动幅度相同,但9#焊缝却存在未焊透的问题。深入分析后发现,9#焊缝的热输

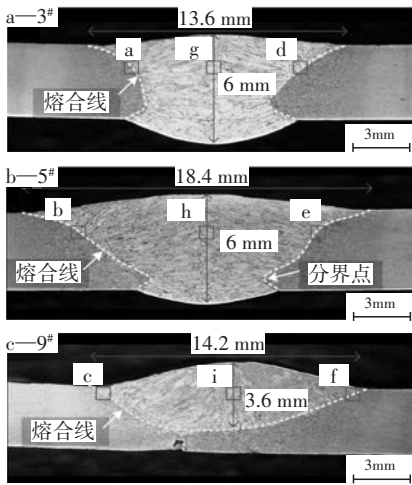


图5 焊缝横截面形貌照片

Fig.5 Weld cross section appearance photos

入明显小于5#焊缝,电弧熔透能力不足。上述试验现象初步表明,电弧摆幅改变热能分布密度,从而影响焊缝与母材结合效果。在制定焊接工艺参数时,必须慎重考虑焊接速度与电流电压之间的匹配关系,过快的焊接速度易导致未焊透。

熔合区是母材与焊缝交界区域,显微组织最为复杂,是评判焊接质量的重要区域。为了进一步研究摆幅和热输入对焊接质量的影响,用金相显微镜观察了3、5、9#焊缝熔合区和焊缝区的显微组织。图5中方框为焊缝观察区域。结果如图6所示。各焊缝的HJ58

侧和WL510侧熔合区显微组织物相组成相同,均为铁素体+珠光体。其中,5#焊缝两侧熔合区中的晶粒分布均匀,多呈柱状,宽边尺寸为20~30 μm;9#两侧的熔合区中晶粒尺寸与5#基本相当,但在该区域存在少量不规则结合,界面参差不齐,因此其综合力学性能弱于5#焊缝。焊缝区的物相组成存在差异。与5#焊缝相比,3#焊缝在冷却过程中针状铁素体从奥氏体中直接析出,并平行地向晶内长大,最终形成了少量的魏氏体组织。魏氏体作为脆硬相,降低了焊缝的冲击韧度和塑性,在载荷作用下容易发生脆性断裂<sup>[10-11]</sup>。而珠光体可以阻止位错的运动,使材料表现出较高的强度和硬度,同时也能延缓裂纹的扩展速度,提高材料的韧性<sup>[12]</sup>。由于5#焊缝中珠光体含量较高,因此力学性能良好。对比3#和5#焊缝的工艺参数可以发现,3#焊缝的热输入和摆幅(138 A, 15 cm/min, 1.9 mm)均高于5#(128 A, 19 cm/min, 1.3 mm),这表明焊接时电弧对3#焊缝的加热宽度大于5#,因而3#焊缝的冷却速率相对较慢。较慢的冷却速率为3#焊缝内魏氏体组织的形成提供了有利条件。

为进一步研究焊缝区元素分布,对5#焊缝特征区域进行了EDS点扫描,结果如图7所示。图7a标注了扫描点的位置,分别为谱图20、21、22。各点扫描结果分别如图7b~d所示。对比各元素含量可以发现,虽然各测量点之间主要是C含量存在差异,但总体元素种

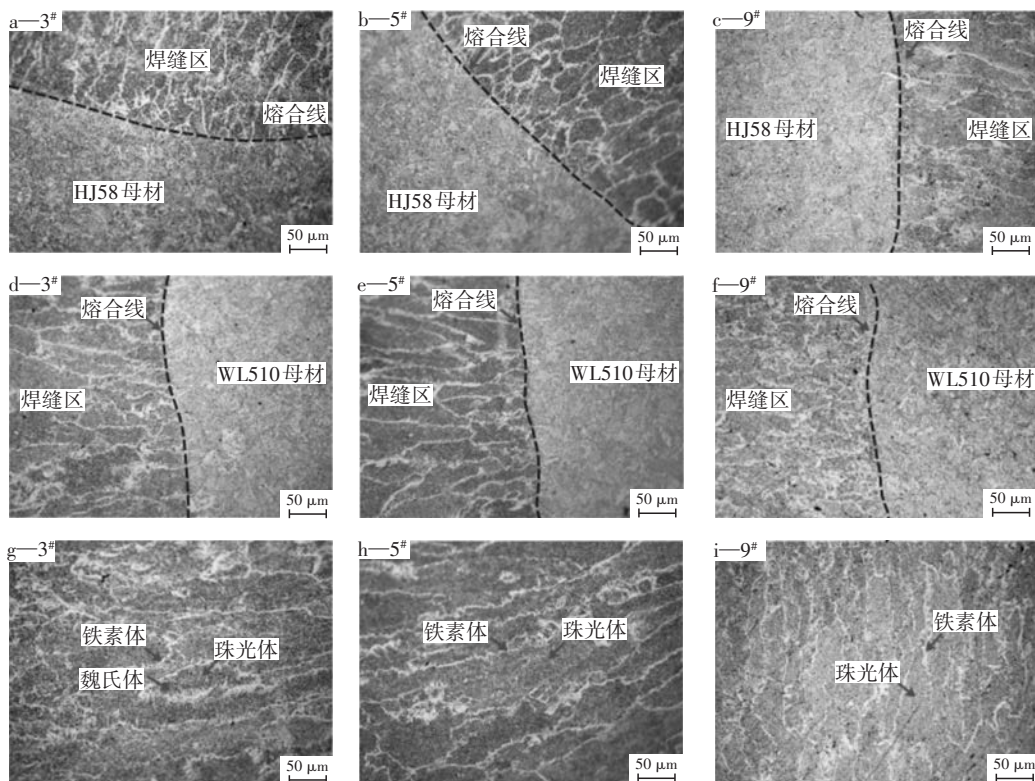


图6 熔合区和焊缝区显微组织图

Fig.6 Microstructure of fusion zone and weld zone

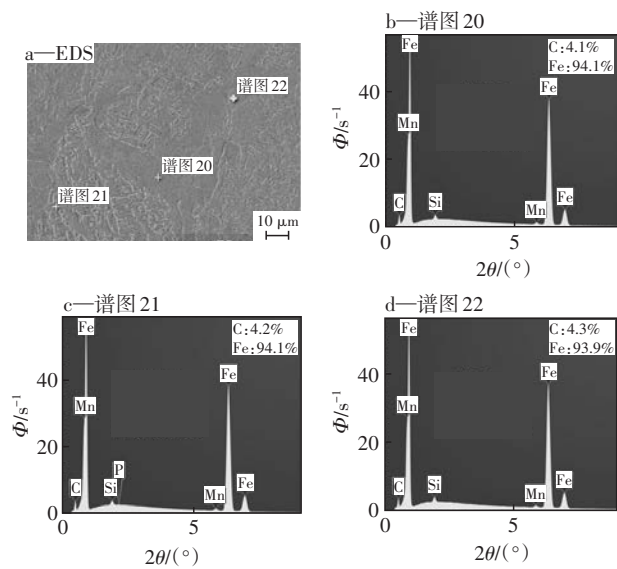


图7 5#焊缝区元素分布图

Fig.7 Distribution of elements in 5# weld zone

类及含量与填充金属基本一致。从另一个角度看,焊缝区物相种类差异也可以归因于C含量的差异。这意味着C含量影响了这些物相的特性和行为。

### 2.3 性能分析

测量焊缝横截面硬度以确定焊缝性能薄弱区。3、5、9#焊缝横截面显微硬度分布如图8所示。这三组焊缝显微硬度变化趋势基本相同,均是热影响区(HAZ)硬度高,母材和焊缝区硬度较低,且焊缝右侧母材硬度高于左侧。与3、9#焊缝区硬度相比,5#焊缝区的硬度分布较为稳定,未出现明显的硬度波动。这说明5#焊缝区组织的均匀性高于3、9#焊缝,这与前面焊缝区的组织观察结果一致。此外,还可以发现,焊缝区硬度与右侧母材硬度相同,约为240HV<sub>0.5</sub>;而焊缝左侧母材硬度最低,约为220HV<sub>0.5</sub>。3#和9#的焊缝区硬度波动较大及左侧母材的低硬度可能是造成焊缝在拉伸载荷作用下率先失效的主要原因。

图9为3、5、9#拉伸试件断裂宏观图。3#试件断于WL510钢融合线区,5、9#试件断于焊缝区。

通过分析断口表面形貌,可以推断出样件的断裂方式、机理等。图10为3、5、9#焊缝断口表面形貌。可

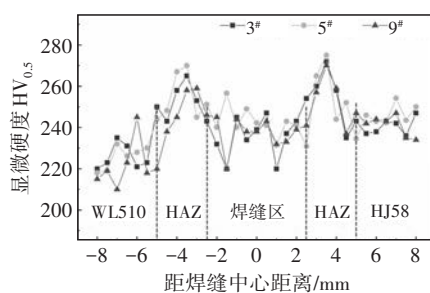


图8 焊接接头显微硬度分布图

Fig.8 Microhardness distribution of welded joint

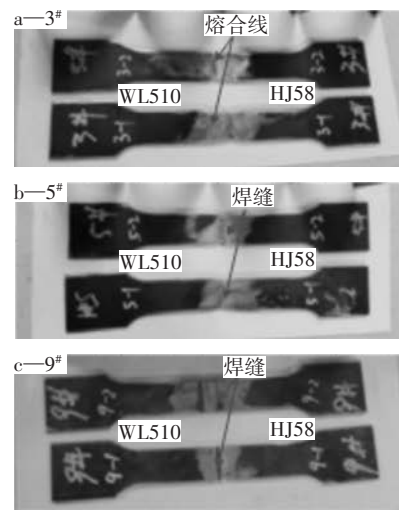


图9 拉伸试件宏观图

Fig.9 Macroscopic drawing of tensile specimens

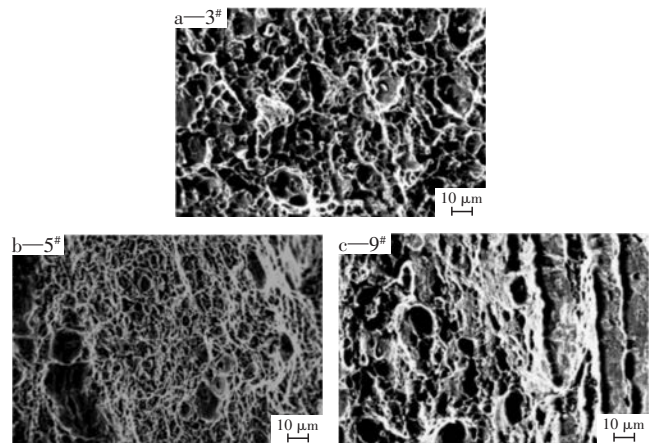


图10 拉伸试件断口形貌图

Fig.10 Tensile specimen fracture topography

以发现,5#接头断口表面有大量直径较小、深度较大的韧窝分布;3#接头表面虽然也有韧窝分布,但尺寸相对较大,韧窝深度也较5#接头浅,局部区域可见破碎颗粒;9#接头的断口表面韧窝特征较不明显,主要呈现光滑的平面,表现出典型的脆性断裂。此外,观察9#接头的断口形貌,发现这些光滑的平面具有明显的指向性,其方向与之前观察到的铁素体生长方向一致。表明,垂直拉伸载荷方向生长的铁素体会降低材料的拉伸性能。断口表面韧窝的数量、尺寸反映了材料的塑性和强度。从接头断口表面的韧窝特征对比结果可以看出,5#接头断口表面韧窝分布最为密集,直径较小,深度较深。这表明5#接头具有良好的塑性,断裂过程较均匀。

## 3 结论

1) 用搭建的自动化焊接平台进行了侧板焊接,当焊接速度为19 cm/min、焊接电流为128 A、气体流量为

18 L/min、摆幅为 1.3 mm 时,焊缝表面无缺陷,弯曲过程中无裂纹,抗拉强度为  $587.5 \pm 2.5$  MPa,性能最好,为最佳自动焊接工艺参数组合。

2) 焊接热输入和电弧摆幅对焊缝与母材熔合程度和焊缝显微组织影响较大。增大电弧摆幅会引起热量分布密度减小,导致焊缝与母材熔合程度降低。热输入小会引起未焊透和结合不良焊接缺陷,焊缝抗拉强度较低。

3) 焊缝组织主要为铁素体和粒状珠光体。当热输入较大且电弧摆幅较大时将导致焊缝中生成魏氏体组织,降低焊缝的抗拉强度。

#### 4 参考文献

- [1] 汪小锋,刘宏,唐小波. 焊接方法对Q235钢焊接接头缺陷、组织和力学性能的影响[J]. 材料热处理学报,2021,42(7): 150-159.  
WANG Xiaofeng, LIU Hong, TANG Xiaobo. Effect of welding methods on defects, microstructure and mechanical properties of Q235 steel welded joints[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2021, 42(7): 150-159. (in Chinese)
- [2] 马汉勇,邹文凤,靖微. CO<sub>2</sub>气体保护焊研究现状[J]. 热加工工艺,2025(1):1-5.  
MA Hanyong, ZOU Wenfeng, JING Wei. Research status of CO<sub>2</sub> gas shielded welding[J]. Hot Working Technology, 2025 (1): 1-5. (in Chinese)
- [3] 胡丹,吕波,王静静,等. 焊缝表面缺陷激光视觉传感HOG-SVM的检测方法[J]. 焊接学报,2023,44(1):57-62.  
HU Dan, LÜ Bo, WANG Jingjing, et al. Detection method of weld surface defects based on laser vision sensing and HOG-SVM[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2023, 44(1): 57-62. (in Chinese)
- [4] MAGUDEESWARAN G, BALASUBRAMANIAN V, REDDY G M. Hydrogen induced cold cracking studies on armour grade high strength, quenched and tempered steel weldments[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33(7): 1897-1908.
- [5] HU L, HUANG J, LI Z, et al. Effects of preheating temperature on cold cracks, microstructures and properties of high power laser hybrid welded 10Ni3CrMoV steel[J]. Materials & Design, 2011, 32(4): 1931-1939.
- [6] 曹荣华. 特厚Q390NBZ35钢板焊接工艺[J]. 焊接技术, 2022, 51(6): 66-70.  
CAO Ronghua. Welding process for ultra-thick Q390NBZ35 steel plate[J]. Welding Technology, 2022, 51(6): 66-70. (in Chinese)
- [7] RIBEIRO H V, BAPTISTA C, LIMA M, et al. Effect of laser welding heat input on fatigue crack growth and CTOD fracture toughness of HSLA steel joints[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 11: 801-810.
- [8] AHONEN M, MOUGINOT R, SARIKKA T, et al. Effect of thermal ageing at 400 °C on the microstructure of ferrite-austenite interface of nickel-base alloy narrow-gap dissimilar metal weld[J]. Metals - Open Access Metallurgy Journal, 2020, 10(3): 421.
- [9] 王艳杰,赵琳,彭云,等. 中锰汽车钢焊接热影响区组织与韧性[J]. 机械工程学报,2022,58(24):84-93.  
WANG Yanjie, ZHAO Lin, PENG Yun, et al. Microstructure and toughness of the heat-affected zone of medium manganese automotive steel welds[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(24): 84-93. (in Chinese)
- [10] 黄庆春. 埋弧堆焊和激光熔覆复合工艺的数值模拟与实验研究[D]. 鞍山:辽宁科技大学,2021.  
HUANG Qingchun. Numerical simulation and experimental study of the combined process of submerged arc surfacing and laser cladding[D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning, 2021. (in Chinese)
- [11] 郑韶先,李晔楠,史伟,等. 超窄间隙焊接Q235/1Cr18Ni9Ti异种钢接头组织及力学性能[J]. 焊接学报,2019,40(8): 38-43.  
ZHENG Shaoxian, LI Yenan, SHI Wei, et al. Microstructure and mechanical properties of ultra-narrow gap welded Q235/1Cr18Ni9Ti dissimilar steel joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(8): 38-43. (in Chinese)
- [12] 苏俊齐,张伟,马金哲,等. 风电铸件球墨铸铁材料的发展现状与趋势[J]. 铸造技术,2023,44(12): 1144-1151.  
SU Junqi, ZHANG Wei, MA Jinzhe, et al. Development status and trends of ductile iron materials for wind power castings[J]. Foundry Technology, 2023, 44(12): 1144-1151. (in Chinese)