

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.06.13

Q490SD 型钢焊接接头不同埋弧焊工艺微剪试验

赵杰¹, 周友龙¹, 刘佳文¹, 赵博文¹, 付克彬², 刘春明³

1. 西南交通大学 材料科学与工程学院, 四川 成都 610031

2. 中国水利水电第十有限公司, 四川 成都 610031

3. 成都华远电器设备有限公司, 四川 成都 610200

摘要: 双丝埋弧焊具有焊接效率高、焊缝质量好等优点, 广泛应用于大型水电站压力结构的制造。本文采用微型剪切试验, 研究了 Q490SD 钢双丝埋弧焊焊接接头在不同焊接速度 (55 cm/min, 60 cm/min, 65 cm/min, 70 cm/min) 条件下, 抗剪切强度与压入率的问题。研究结果为: 双丝埋弧焊的接头与单丝埋弧焊相同, 塑性比较好, 剪切强度也比较高; 双丝埋弧焊在线能量控制在 28~40 kJ/cm 时, 焊接接头的质量都能达到标准要求; 并且随着焊接速度的提高, 粗晶区的晶粒尺寸从 80.0 μm 细化到 47.6 μm , 晶粒度等级从 4.0 级提高到 5.5 级, 晶粒大小细化与晶粒度的提高, 可以同时提高材料的韧性和塑性; 特别地, 在这种线能量范围内, 焊接速度为 60 cm/min 和 70 cm/min 的焊接接头, 如果能够保持焊接电流和电压的一致性, 质量就比较高。

关键词: 水电站; Q490SD 钢; 双丝埋弧焊; 微型剪切试验; SEM 分析

中图分类号: TG457.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2303(2026)06-0105-07

Micro-Shear Testing of Q490SD Steel Welded Joints Using Different Submerged Arc Welding Processes

ZHAO Jie¹, ZHOU Youlong¹, LIU Jiawen¹, ZHAO Bowen¹, FU Kebin², LIU Chunming³

1. School of Materials Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China

2. Sinohydro Bureau 10 Co., Ltd., Chengdu 610031, China

3. Chengdu Huayuan Electrical Equipment Co., Ltd., Chengdu 610200, China

Abstract: Double-wire submerged arc welding has the advantages of high welding efficiency and good weld quality, and is widely used in the manufacturing of pressure structures in large hydropower stations. This paper uses micro-shear tests to study the shear strength and indentation rate of Q490SD steel double-wire submerged arc welded joints under different welding speeds (55 cm/min, 60 cm/min, 65 cm/min, 70 cm/min). Results show that the welded joints of double-wire submerged arc welding have the same plasticity and higher shear strength as those of single-wire submerged arc welding. When the line energy of double-wire submerged arc welding is controlled between 28 and 40 kJ/cm, the quality of the welded joints can meet the standard requirements. Moreover, as the welding speed increases, the grain size in the coarse-grained zone is refined from 80.0 μm to 47.6 μm , and the grain size is improved from 4.0 to 5.5. The refinement of grain size and the improvement of grain size can simultaneously enhance the toughness and plasticity of the material. Particularly, within this range of line energy, the welded joints with welding speeds of 60 cm/min and 70 cm/min have higher quality if the consistency of welding current and voltage can be maintained.

Keywords: hydropower station; Q490SD steel; dual-wire submerged arc welding; micro shear test; SEM analysis

引用格式: 赵杰, 周友龙, 刘佳文, 等. Q490SD 型钢焊接接头不同埋弧焊工艺微剪试验[J]. 电焊机, 2026, 56(6): 105-111.

Citation: ZHAO Jie, ZHOU Youlong, LIU Jiawen, et al. Micro-Shear Testing of Q490SD Steel Welded Joints Using Different Submerged Arc Welding Processes[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(6): 105-111.

收稿日期: 2025-10-30 修回日期: 2025-11-24

作者简介: 赵杰 (2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事材料加工、失效分析、钢结构研究。E-mail: 308646204@qq.com。

通讯作者: 周友龙, 副教授。E-mail: garry1234@163.com。

0 引言

在水力发电系统中,压力钢管发挥着至关重要的作用。随着我国水电建设步伐的加快,特别是大型抽水蓄能电站项目的推进,高水头、大直径及高HD值的压力钢管逐渐成为主流趋势。目前,部分压力钢管承受的水头已达到1 300 m,对应的HD值也超过了5 000 m。这类高性能、大规模的压力钢管对钢材性能提出了更高要求,促进了高强度钢材的应用与发展^[1]。为了保证在高流量条件下的稳定运行,该水电站主要采用了强度等级为600 MPa的专用钢材:Q490SD钢。相较于单丝埋弧焊技术,双丝埋弧焊工艺不仅显著增加了熔深和提高了熔敷效率,还有效减少了焊剂消耗量。更重要的是,这项技术几乎能够使焊接速度翻倍,从而大幅降低了整体焊接成本。由于热源影响以及复杂的物理化学反应,在焊接接头热影响区往往呈现出规则分布形态,并且过热区域相对较小^[2],这使得通过常规性

能测试难以准确评估其特性。为此,本文对焊接处力学性能的测定采用了微型剪切试验,所画出的性能梯度曲线,对整个焊接处各部位的强度、塑性等特点都能有较为直观、准确的表现。

1 试验材料与设备

1.1 试验材料和设备

本研究采用尺寸为350 mm×150 mm×40 mm的Q490SD调质钢板作为试验材料。焊接过程中使用了直径4.0 mm的CHW-S7焊丝,并与CHF101R配合使用氟碱型埋弧焊剂。通过化学分析及直读光谱法对焊材与基体材料进行了成分测定,其结果分别如表1、表2所示。其中,前导焊接设备选用ZDE7-1200HD交直流方波电源,而后续焊接则依赖于ZD7-1600IGBT逆变式多功能电源。此外,还使用了型号为YJJ-A-100的焊剂干燥装置。在进行双丝埋弧焊焊接时,两根焊丝采取串联方式布置。

表1 焊丝及基材的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of welding wire and base material (wt. %)

材料	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Mo	Ti	V
Q490SD	0.07	0.18	1.37	0.002	0.009	0.02	0.26	—	0.12	0.01	≤0.001
CHW-S7	0.095	0.13	1.90	0.004 8	0.008 9	0.042	0.028	0.12	—	—	—

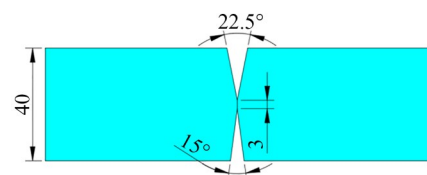
表2 焊剂化学成分(质量分数,%)

Table 2 Chemical composition of flux (wt. %)

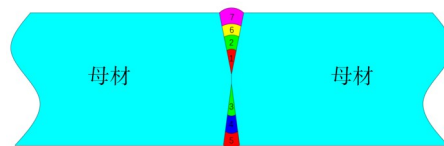
材料	CaO+MgO+CaF ₂ +MnO	SiO ₂	CaF ₂	S	P
CHF101R	54.03	19.68	18.79	0.015	0.029

1.2 焊接参数

本研究选取4组尺寸350 mm×150 mm×40 mm、无间隙且正面坡口角度设为22.5°、背面则为15°,同时设置有3 mm钝边的非对称X型坡口Q490SD调质钢板作为实验对象,采用双丝埋弧焊技术进行焊接处理。整个焊接过程按照先正面施焊两层,随后反面三层,最后再回到正面完成剩余两层的顺序来进行。试板的坡口参数以及焊道如图1所示。具体的焊接参数如表3所示。根据表3可以发现,对于编号分别为1号试板、2号试板、3号试板以及4号试板,各道焊缝所使用的焊接电流与电压均保持一致;焊接速度,则分别设定为55 cm/min、60 cm/min、65 cm/min和70 cm/min。



(a)坡口形式



(b)焊道示意

图1 坡口的类型及焊道示意

Fig. 1 Types of bevels and weld bead diagrams

2 微剪试样性能分析

2.1 试样加工

通过线切割对焊接接头取样,取样方法如图2

表3 焊接工艺参数

Table 3 Welding process parameters

编号	层数	焊接速度/(cm·min ⁻¹)	线能量(kJ·cm ⁻¹)
1号 试板	1#	40	21.86
	2#	55	39.55
	3#	55	39.86
	4#	55	42.15
	5#	55	36.48
	6#	55	39.89
	7#	55	36.89
2号 试板	1#	40	21.86
	2#	60	36.25
	3#	60	36.54
	4#	60	38.64
	5#	60	33.44
	6#	60	35.98
	7#	60	33.82
3号 试板	1#	40	21.86
	2#	65	33.46
	3#	65	33.73
	4#	65	35.67
	5#	65	30.87
	6#	65	33.21
	7#	65	31.22
4号 试板	1#	40	21.86
	2#	70	31.07
	3#	70	31.32
	4#	70	33.12
	5#	70	28.66
	6#	70	30.84
	7#	70	28.99

所示。所取位置为正面2#焊缝和正面4#焊缝,试样规格为1.6 mm×1.6 mm×50 mm^[3],随后,利用一系列不同粒度(依次为240目、400目、600目、800目及1000目)的砂纸对金相试样实施初步打磨处理,直至达到所需的表面质量。接着,将试样浸入浓度为4%的硝酸酒精溶液中进行腐蚀处理,之后执行微型剪切测试。该测试设定剪切速度为每分钟1 mm,剪切间距同样为1 mm,并且沿着从焊缝中心向基材方向进行剪切操作^[4]。图3展示了微型剪切实验的操作流程示意,而图4提供了剪切力与刀具位移的实际测量数据曲线。

剪切强度 τ_b 的表达式为:

$$\tau_b = \frac{P_{max}}{A_0} \quad (1)$$

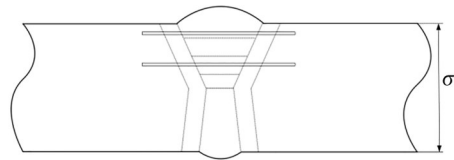


图2 微型剪切试样取样方法

Fig. 2 Sampling method for micro shear specimens

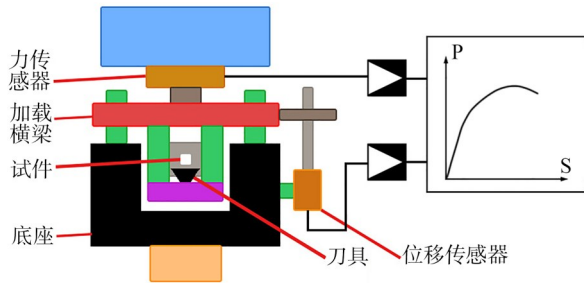


图3 微型剪切试验过程

Fig. 3 Schematic diagram of the micro-shear test process

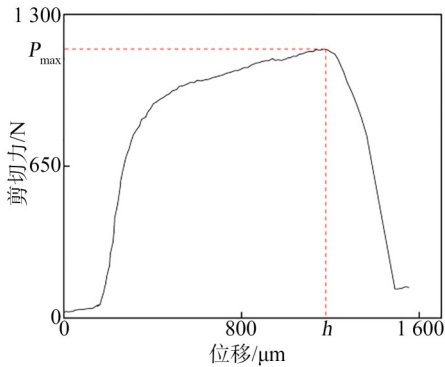


图4 剪切力与刀具位移实测

Fig. 4 Measured graph of shear force and tool displacement

剪切压入率 α 的表达式为:

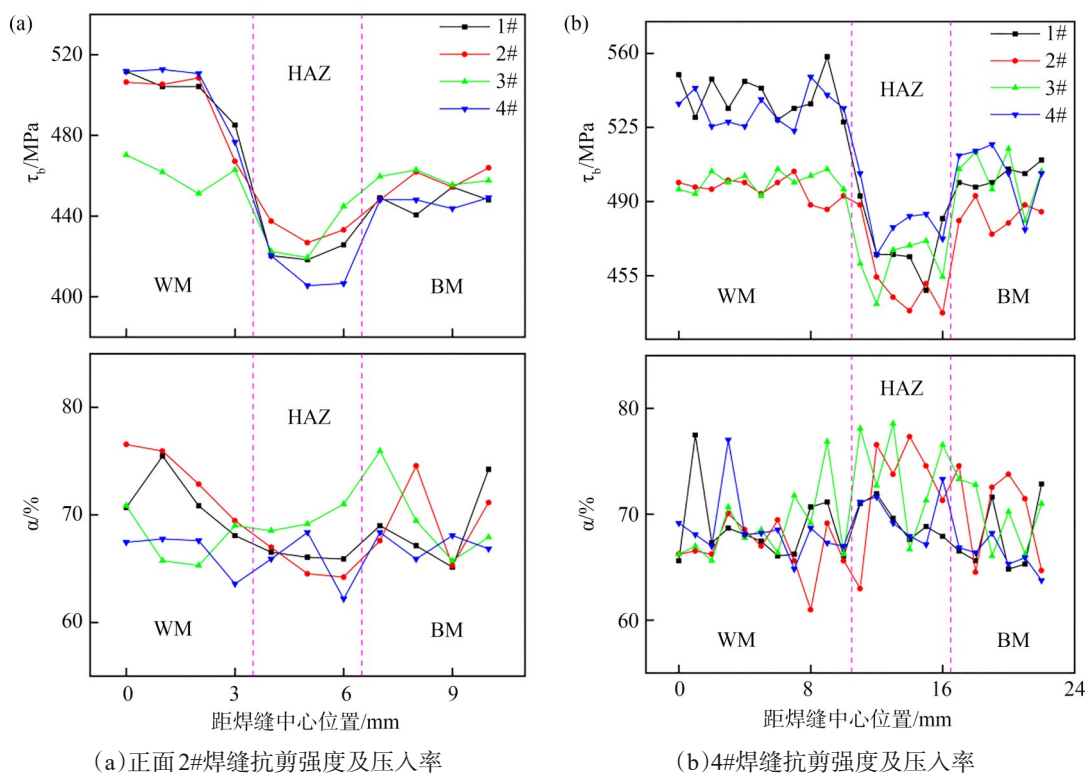
$$\alpha = \frac{A_k}{A_0} \times 100\% = \frac{h}{b} \times 100\% \quad (2)$$

式中 P_{max} 为最大剪切力(单位:N); A_0 为原始截面积(单位: mm²); A_k 为剪切断裂后的最小截面积(单位: mm²); h 为刀具切入深度(单位: mm); b 为原始高度(单位: mm)^[5]。

2.2 不同焊接速度下微型剪切性能分析

图5为焊接速度分别为1号试板55 cm/min、2号试板60 cm/min、3号试板65 cm/min和4号试板70 cm/min的双丝埋弧焊接头对应的微剪试样性能曲线。

从图5可以看到,对于双丝埋弧焊而言,从焊缝中心到母材,抗剪强度总体呈现先降低后升高的趋势,且抗剪强度均较高^[6]。在四种不同的焊接技术



(a) 正面2#焊缝抗剪强度及压入率

(b) 4#焊缝抗剪强度及压入率

图5 微型剪切试验结果在不同的焊接过程中

Fig. 5 Results of micro-shear tests in different welding processes

条件下,焊缝金属(WM)的平均抗剪强度分别为501.3 MPa、496.8 MPa、461.5 MPa及502.9 MPa;热影响区(HAZ)的相应值则为421.5 MPa、432.4 MPa、428.9 MPa和410.8 MPa;而基体材料(BM)的平均抗剪强度依次是448.0 MPa、457.0 MPa、458.9 MPa以及447.2 MPa。当焊接速度为60 cm/min、70 cm/min时,图6、图7为焊缝区域、熔合线、粗晶粒区、细晶粒区以及部分相变区的显微组织特征。

根据图6所示,当焊接速度为60 cm/min时,正面2#焊缝的微观结构主要由先析铁素体、针状铁素体及少量粒状贝氏体构成;粗晶区则呈现出铁素体与珠光体的组合形态,其晶粒尺寸等级达到9.0级,平均截距测量值为14.1 μm ;细晶区同样由铁素体和珠光体组成,但晶粒细化至11.5级,相应的平均截距减小至5.9 μm ;部分相变区域观察到铁素体与微量粒状贝氏体共存的现象,该区域的晶粒度为7.0级,平均截距记录为28.3 μm 。

根据图7所示,当焊接速度为70 cm/min时,2#焊缝的微观结构主要由先析铁素体、针状铁素体及少量粒状贝氏体构成;粗晶区域则表现为铁素体与

珠光体混合相,其晶粒尺寸等级为8.5级,平均截距测量值为16.8 μm ;细晶区同样由铁素体和珠光体组成,但其晶粒度更为精细,达到10.0级,对应的平均截距减小至10.0 μm ;此外,在部分相变区域内观察到了铁素体、珠光体以及少量粒状贝氏体共存的现象,该区域的晶粒度评估为7.5级,而平均截距则增加到了23.8 μm 。

4种焊接工艺下的焊缝平均压入率分别为71.3%、73.7%、67.7%和66.6%;HAZ的平均压入率分别为66.2%、65.2%、69.6%和69.8%;母材的平均压入率分别为68.9%、69.6%、69.8%和67.3%。4种焊接方法下焊接接头各区域的平均抗剪强度和压入率见表4。综上,由微型剪切试验结果可知,试验采用的双丝埋弧焊焊接工艺所得的接头性能在具有良好塑性的同时也能具有较高的抗剪强度。

2.3 微型剪切断口试样SEM分析

电子显微镜(SEM)是在不同区域进行微型剪切试样的扫描分析的。试样的右侧展示了刀具留下的痕迹,而左侧则是最终断裂区。为了更详细地观察该区域的特征,对终断区进行了放大处理,其

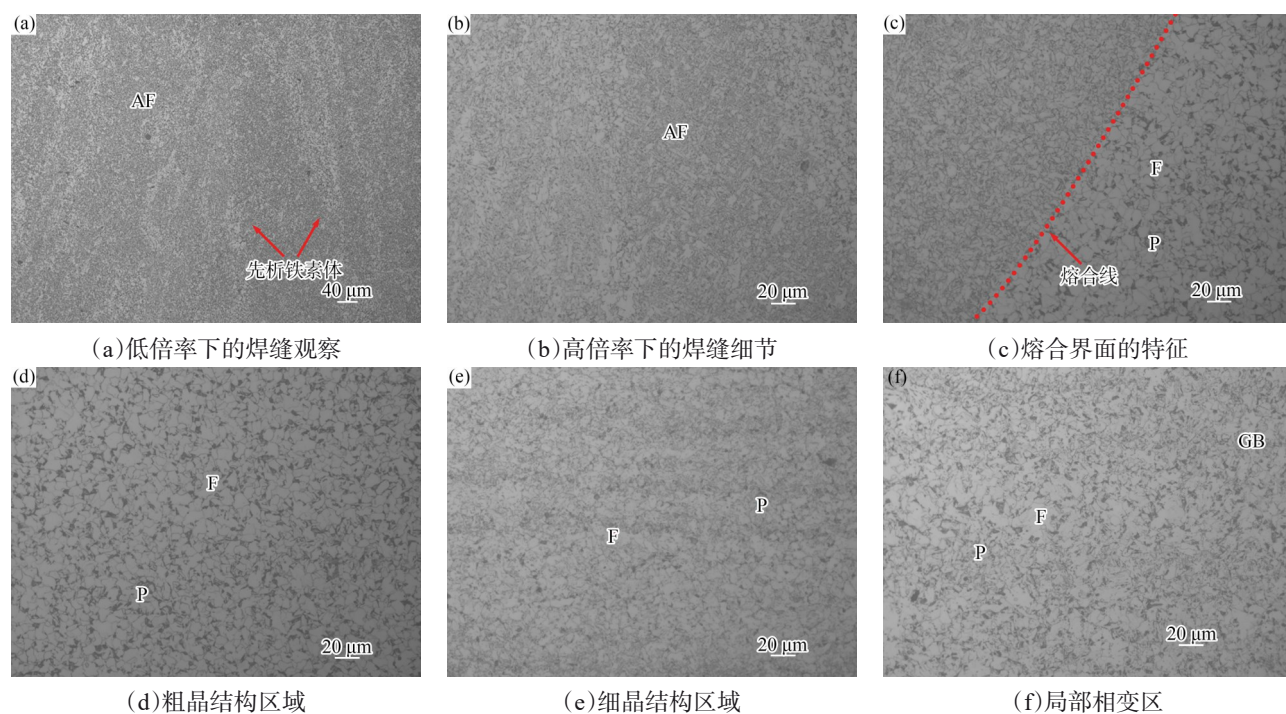


图6 60 cm/min 2#焊缝各区域微观金相

Fig. 6 Microstructure of each area of 2# weld seam at 60 cm/min

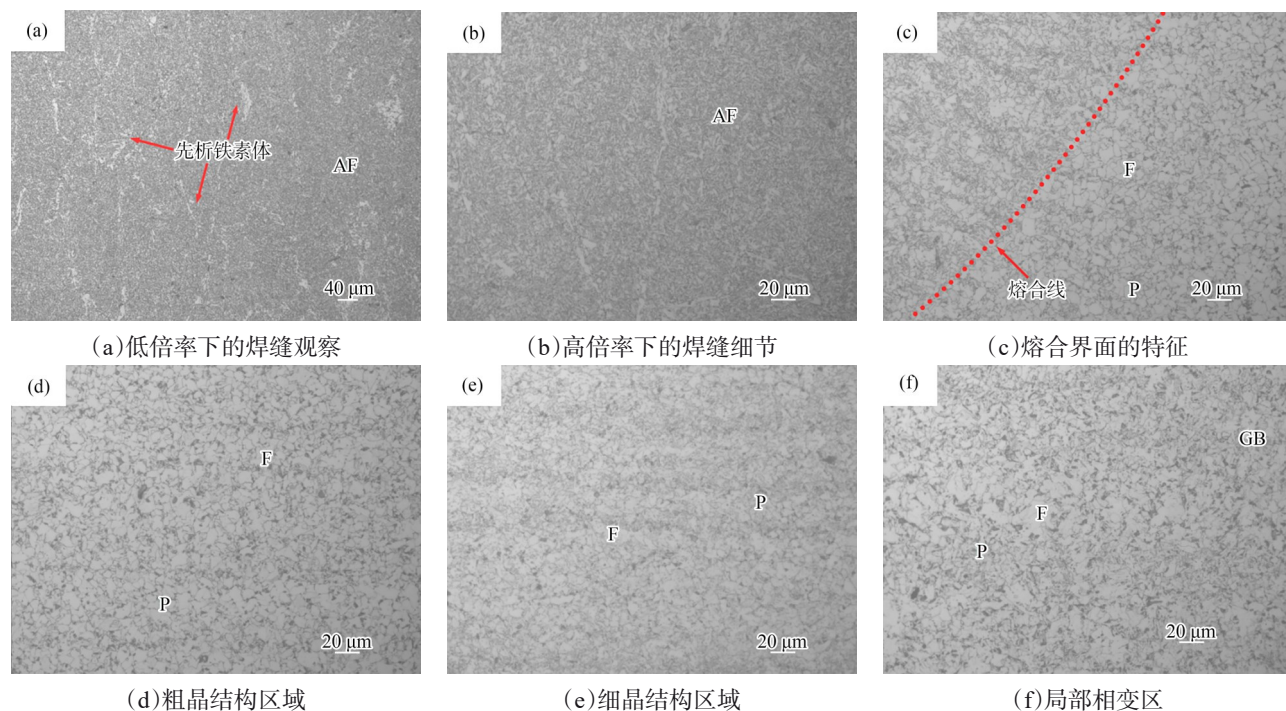


图7 70 cm/min 2#焊缝各区域微观金相

Fig. 7 Microstructure of each area of 2# weld seam at 70 cm/min

放大的形貌图展示于图片右上角。如图8所示,这是SEM测试得出的微缩切口。

正面2#焊缝剪切试样的WM随着焊接速率的

提高,平均剪切强度先是减小后增大,平均剪切压入率先增大后减小,HAZ平均剪切强度先增大后降低,平均剪切压入先减小后增加,BM平均剪切强度

表4 焊接接头各区域的平均抗剪强度和剪切压入率

Table 4 Shows the average shear strength and shear indentation rate of each area of the welded joint

编号	焊缝平均值		HAZ 平均值		母材平均值	
	抗剪强度/MPa	压入率/%	抗剪强度/MPa	压入率/%	抗剪强度/MPa	压入率/%
1#	501.3	71.3	421.5	66.2	448.0	68.9
2#	496.8	73.7	432.4	65.2	457.0	69.6
3#	461.5	67.7	428.9	69.6	458.9	69.8
4#	502.9	66.6	410.8	65.4	447.2	67.3

先增加后降低,平均剪切压入先增大后减少,BM 剪切压力先增大再减小,平均剪切压入先增加后减小。正面 4#焊缝剪切试样的 WM 平均剪切强度先

下降后上升,平均剪切压入率则先下降后上升再下降,而 HAZ 的平均剪切强度则表现出先下降后上升的趋势。平均剪切压入率初期上升后随即下降,而 BM 的平均剪切强度则呈现出先下降后上升的趋势,平均剪切压入率同样先增加后减少。

对微型剪切试样断口的不同区域进行 SEM 分析,试样右侧为刀痕,试样左侧为终断区,对终断区形貌放大,图片的右上角为终断区形貌放大图,微型剪切断口 SEM 试验结果如图 8 所示。通过 SEM 技术获得的微型剪切断口结果表明,在终断区内,断口表面呈现出典型的韧窝特征。值得注意的是

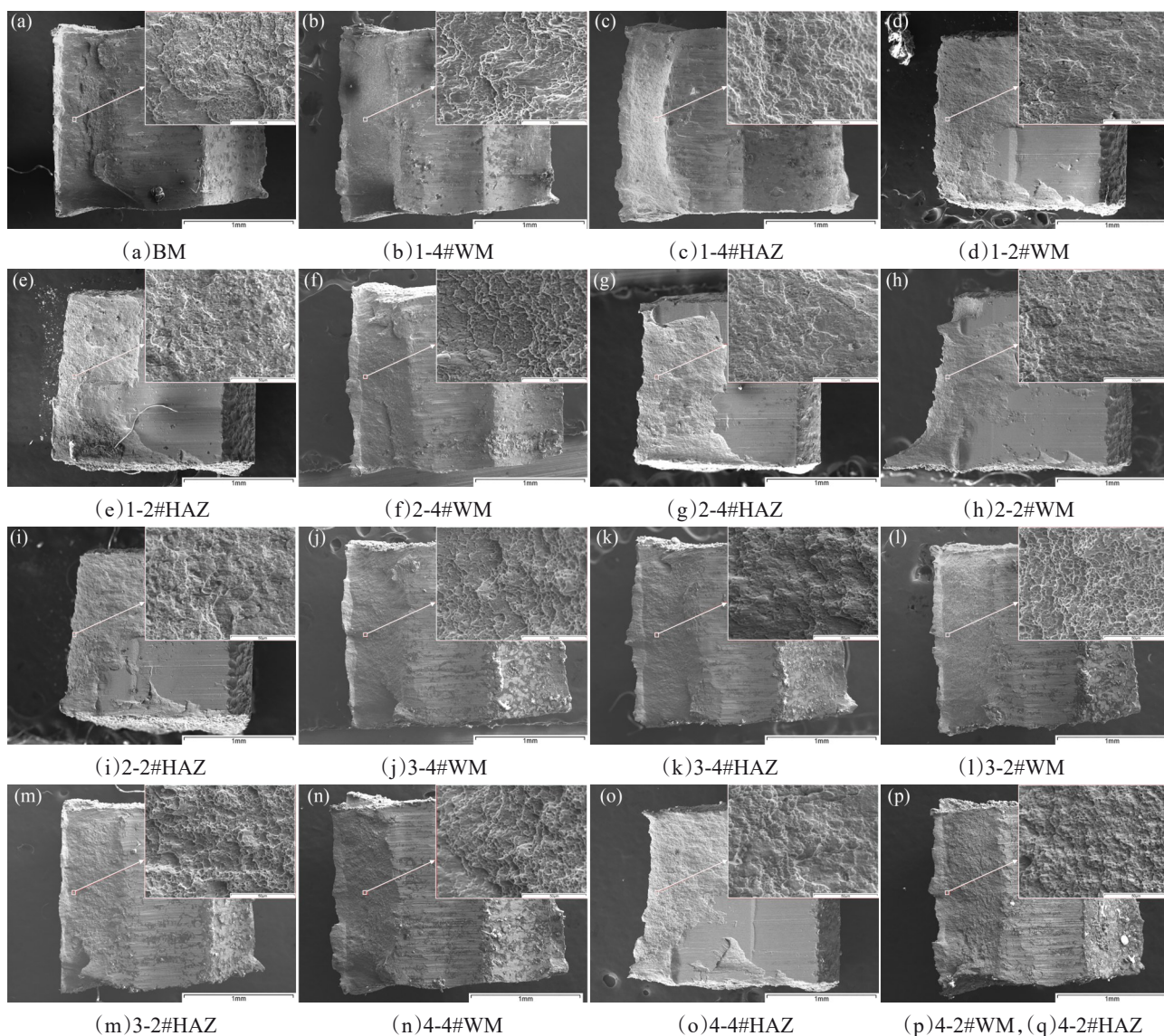


图8 微型剪切断口 SEM

Fig. 8 SEM of micro-shear fracture surface

焊缝(WM)中的韧窝尺寸大于热影响区(HAZ)。这一发现解释了为什么热影响区的平均剪切强度低于焊缝材料的现象。

3 结论

(1)随着双丝埋弧焊焊接速度的逐渐提高,观察到焊接处各部位的抗剪强度与剪切压入率的变化规律一致,即呈现先降后升的趋势。其中平均抗剪强度最低的是HAZ,最小的是在粗晶区靠近熔接线的地方。打底焊缝的抗剪强度比母材明显要高,2#、3#焊缝和母材的抗剪强度差不多。剪切压入率在HAZ区波动最大,在接近中间强度较高的细晶区时,剪切压入率降低,这是各焊层HAZ的最大波动。但焊缝平均剪切压入率高,HAZ和母材的差异也不大,直观地反映了焊缝的各个微区塑性好。

(2)双丝埋弧焊在线能量控制在28~40 kJ/cm时,焊缝质量均能达到标准要求,而在控制焊缝电流电压在线能量范围一致时,焊缝速度60 cm/min、70 cm/min的焊缝质量更高。

(3)焊缝区域的组织是先分析受焊接冷却速率调控的铁素体、针状铁素体和少量粒状贝氏体的形成,SEM表明针状铁素体倾向于放射生长,其核心是以混合为形核,焊接速度的提高使得混合的数量减少。根据单一的焊接方式,可将热影响区域分为粗晶区、细晶区和部分相变区,按多层或多道焊接可分为未变再热区、过临界再热区和亚临界后热区以及亚临界。正面2#焊缝受3#、4#焊缝热输入的影响,未变再热区和过临界再热区以板条状贝氏体和珠光体组织,过临界再热区以铁素体和珠光体组织,亚临界再热区以铁素体和少量粒状贝氏体组织,经临界再热区以珠光体正面4#焊缝视同单道焊,粗晶区为板条状贝氏体和珠光体,细晶区为板条状贝氏体、珠光体和少量粒状贝氏体,部分相变区为铁素体和少量粒状贝氏体,其特点是将铁素体和少量粒状贝氏体结合在一起,并将其结合在一起随焊接速度提高,粗晶区晶粒尺寸从80.0 μm 细化至47.6 μm ,晶粒度由4.0提升至5.5。

(4)在Q490SD钢管的水电站焊接制造过程中,双丝埋弧焊连接件不仅保持了良好的延展性,还展现出较高的抗剪切强度,相较于单丝埋弧焊具有更优的性能。此外,双丝埋弧焊接技术由于其熔深更深的特性,能够在降低焊剂使用量的同时,有效降低所需堆叠的焊缝层数,从而显著提高生产效率,降低焊接成本,其速度几乎是单丝埋弧焊接速度的两倍。

参考文献:

- [1] 辜家明. 水电站 $R_m \geq 800\text{MPa}$ 高强度岔管焊接工艺[J]. 电焊机, 2012, 42(2): 11-15.
GU J M. Welding Technology of High-Strength Steel Turnout Pipes with $R_m \geq 800\text{MPa}$ in Hydropower Stations[J]. Electric Welding Machine, 2012, 42(2): 11-15.
- [2] 雷斌隆, 王元良. 微型剪切试验法及基于焊接技术中的应用[J]. 西南交通大学学报, 1990(01): 14-20.
LEI B L, WANG Y L. Micro-shear test method and its application in Welding technology[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1990(01): 14-20.
- [3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 50766—2012 水电水利工程压力钢管制作安装及验收规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [4] 雷斌隆, 王元良. 焊接接头微型剪切试验[J]. 西南交通大学学报, 1992, 1(1): 7-11.
LEI B L, WANG Y L. Micro-shear test of welded joints[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1992, 1(1): 7-11.
- [5] 刘杨, 周友龙, 陈昊宇, 等. 不同埋弧焊工艺N610CF钢焊接接头的微型剪切试验[J]. 焊接技术, 2024, 53(04): 50-53.
LIU Y, ZHOU Y L, CHEN H Y, et al. Micro-shear test of N610CF Steel Welded Joints with Different Submerged Arc Welding processes[J]. Welding Technology, 2024, 53(04): 50-53.
- [6] 蔡淑娟, 朱亮, 张忠发. 双孔微剪切评定焊接接头的局部强度[J]. 焊接学报, 2016, 37(4): 43-46.
CAI S J, ZHU L, ZHANG Z F. Evaluation of local strength of welded joints by double-hole microshear[J]. Transactions of the China Welding Society, 2016, 37(4): 43-46.