

DOI: 10. 11973/jxgccl230261

焊接热输入对 0Cr13Ni4Mo 马氏体不锈钢电弧焊接头组织与性能的影响

周新宇, 胡志华, 栾道成, 王正云, 林绍斌
(西华大学材料科学与工程学院, 成都 610039)

摘要: 在不同焊接热输入(9, 13, 17 kJ·cm⁻¹)下对0Cr13Ni4Mo马氏体不锈钢板进行多层多道电弧焊, 研究了焊接热输入对焊接接头显微组织与力学性能的影响。结果表明: 不同焊接热输入下所得焊接接头焊缝和热影响区的组织均为板条马氏体、少量 δ 铁素体和残余奥氏体; 随着焊接热输入的增大, 焊缝和热影响区的板条马氏体变粗大, δ 铁素体含量增多; 不同焊接热输入下焊接接头的抗拉强度和屈服强度分别约为810, 600 MPa, 均高于母材且符合项目规定, 屈强比均小于0.9, 接头的拉伸性能良好, 拉伸后均在母材处断裂; 随着焊接热输入增大, 冲击吸收能量减小, 焊接热输入为9, 13 kJ·cm⁻¹下冲击断口中的韧窝尺寸略大且均匀, 接头的冲击韧性更好; 不同焊接热输入下焊缝的硬度为310~340 HV, 其平均硬度高于热影响区和母材, 随着焊接热输入的增加, 焊缝和热影响区的硬度均略微降低。

关键词: 焊接热输入; 0Cr13Ni4Mo马氏体不锈钢; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG457.11

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2024)09-0038-06

0 引言

能源是社会经济增长和发展的基础, 为了经济的可持续发展, 国家大力发展水电、核电等行业。新建的水电站中800~1 000 MW级特大型水机组转轮主要由上冠、下环和叶片组焊而成, 在运转过程中要承受几十至几百米高水流冲击和泥沙的冲蚀, 因此对接头性能要求非常严格^[1-3]。用作水轮机转轮的材料主要为0Cr13Ni4Mo马氏体不锈钢^[4-6], 常用的焊接工艺包括电弧焊、气体保护焊、钨极气体保护焊和激光焊等^[7]。目前, 有关0Cr13Ni4Mo马氏体不锈钢铸造和热处理工艺的研究很多^[8-10], 但其焊接工艺的研究却较少, 相关研究也主要集中在选择合适的焊接材料以获得与0Cr13Ni4Mo马氏体不锈钢相匹配的化学成分和力学性能、焊接结构的设计以及焊接接头的应力腐蚀行为等方面^[11-12]。0Cr13Ni4Mo马氏体不锈钢在实际工程应用中会出现较多的焊接

问题, 如焊接接头脆化和微裂纹等, 导致产品返修量增大、生产成本提高^[13]。焊接工艺参数会影响焊接接头的质量和性能, 其研究有着重要的意义。焊接热输入则是综合焊接电流、焊接速度、电弧电压的一种参数, 对焊接接头组织与性能有重要影响。因此, 作者对中厚0Cr13Ni4Mo马氏体不锈钢板进行多层多道电弧焊, 研究了不同焊接热输入下焊接接头的显微组织及力学性能, 以期为该材料的水电机组关键部位焊接工艺参数制定提供技术参考。

1 试样制备与试验方法

试验用母材为尺寸300 mm×150 mm×20 mm的0Cr13Ni4Mo马氏体不锈钢板, 处理工艺为锻造→二次正火(1 040 °C+1 010 °C)→二次回火(620 °C+600 °C); 显微组织如图1所示, 为回火马氏体和少量 δ 铁素体, 其抗拉强度和屈服强度分别为780, 580 MPa。焊接材料选用E410NiMo-15焊条, 焊条直径为4.0 mm, 其抗拉强度和屈服强度分别为850, 620 MPa。母材及焊接材料的化学成分如表1所示。采用IGBT型逆变式直流弧焊机对试验钢板进行多层多道焊, 接头所开坡口形式为V形坡口, 坡口角度为60°, 采用单面焊双面成型, 具体的焊接方法如图2所示, 基板预热温度为140 °C, 层

收稿日期: 2023-06-06; 修订日期: 2024-05-27

基金项目: 四川省科技支撑项目(20ZDYF2461, 20ZDZX0042); 攀西试验区第六批项目(高成形性钒钛微合金化超高强汽车板开发及应用); 西华大学重点科研基金资助项目(Z203121); 西华大学校级教育教学改革项目(xjjg2023032)

作者简介: 周新宇(1997—), 男, 湖北十堰人, 助教, 硕士

通信作者: 胡志华副教授

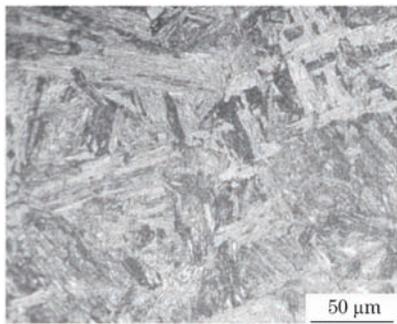


图1 0Cr13Ni4Mo 马氏体不锈钢的显微组织

Fig. 1 Microstructure of 0Cr13Ni4Mo martensitic stainless steel

间温度为200℃,焊接电压为25~27V,焊接电流为150,160,170A,焊接速度为14~18 cm·min⁻¹,参考文献[14]计算得到的焊接热输入分别为9,13,17 kJ·cm⁻¹。

焊接完成后,在焊接接头焊缝和热影响区取样,经磨抛,用100 mL三氯化铁盐酸溶液(40 mL浓盐

酸、10 g三氯化铁和蒸馏水组成)腐蚀后,采用SK-2009型倒置式光学显微镜观察显微组织。采用DX-2500型X射线衍射仪(XRD)对焊缝和热影响区的物相组成进行分析,采用铜靶, K_α射线,工作电压为30 kV,工作电流为10 mA,扫描范围为20°~90°,扫描速率为0.01 (°)·s⁻¹。采用HVS-1000型维氏显微硬度计测焊接接头的硬度,载荷为4.903 N,保载时间为20 s,测试位置为焊缝、热影响区及母材,测试间距为0.5 mm。按照GB/T 2650—2008,在焊接接头上沿焊接方向截取标准V型缺口冲击试样,缺口位于焊缝中心,缺口方向垂直于焊缝表面,在PTM2302型冲击试验机上进行常温(22℃)冲击试验。按照GB/T 2651—2008,以焊缝为中心沿焊接方向截取如图3所示的拉伸试样,采用SHT4305型万能拉伸试验机进行室温拉伸试验,拉伸速度为5 mm·min⁻¹,测4次取平均值。

表1 母材及焊接材料的化学成分

Table 1 Chemical composition of base metal and welding material

材料	质量分数/%							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	S	P
母材	0.030	1.00	0.60	12.00~13.50	3.80~5.00	0.40~1.00	0.008	0.028
焊接材料	0.037	0.80	0.45	12.32	4.17	0.62	0.010	0.025



图2 焊接方法示意

Fig. 2 Schematic of welding method

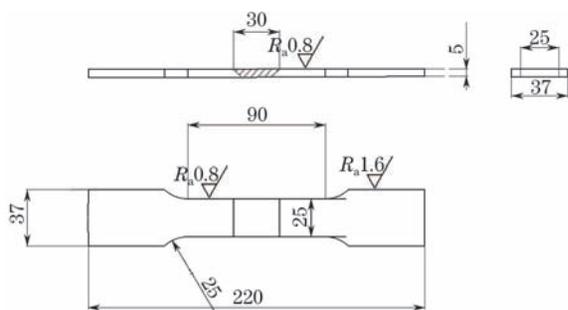


图3 拉伸试样尺寸

Fig. 3 Size of tensile sample

2 试验结果与讨论

2.1 显微组织

由图4可知,当焊接热输入为9 kJ·cm⁻¹时,焊缝和热影响区组织均为板条马氏体、少量δ铁素体和残余奥氏体,且组织均比母材细小。母材与焊接材料中较高含量的铬、钼等合金元素使得δ相区右移,γ-Fe相区左移,奥氏体相区缩小,焊接时组织在高温

停留时间较短,冷却速率太快,高温δ铁素体来不及向奥氏体转变从而保留至室温组织中^[15]。当焊接热输入为13 kJ·cm⁻¹时,焊缝和热影响区的组织均为板条马氏体、少量δ铁素体和残余奥氏体,相比焊接热输入为9 kJ·cm⁻¹的组织略显粗大。当焊接热输入为17 kJ·cm⁻¹时,焊缝组织为粗大的马氏体柱状晶、少量δ铁素体和残余奥氏体,热影响区组织为板条马氏体、残余奥氏体和δ铁素体,马氏体呈条束状,但组织致密性较差。3种焊接热输入下焊缝的板条马氏体组织比热影响区细小,但二者均比母材细小,且焊缝和热影响区中都存在少量δ铁素体。随着焊接热输入的增大,焊接接头焊缝和热影响区的板条马氏体组织变粗大,δ铁素体含量增多。热输入的增大会加速原子的扩散速率而促进相变,奥氏体向δ铁素体转变的动力学增强,从而导致δ铁素体含量增加;同时较大的热输入也为δ铁素体的形成提供了更多的时间,因此保留至室温的δ铁素体增多^[16]。

由图5可知,不同焊接热输入下焊接接头焊缝和热影响区均会出现α相(110)、(200)、(211)晶面衍射峰,且衍射峰尖锐,表明晶粒细小。焊缝和热影响区相同晶面指数的衍射峰强度稍有差异,这可能是因

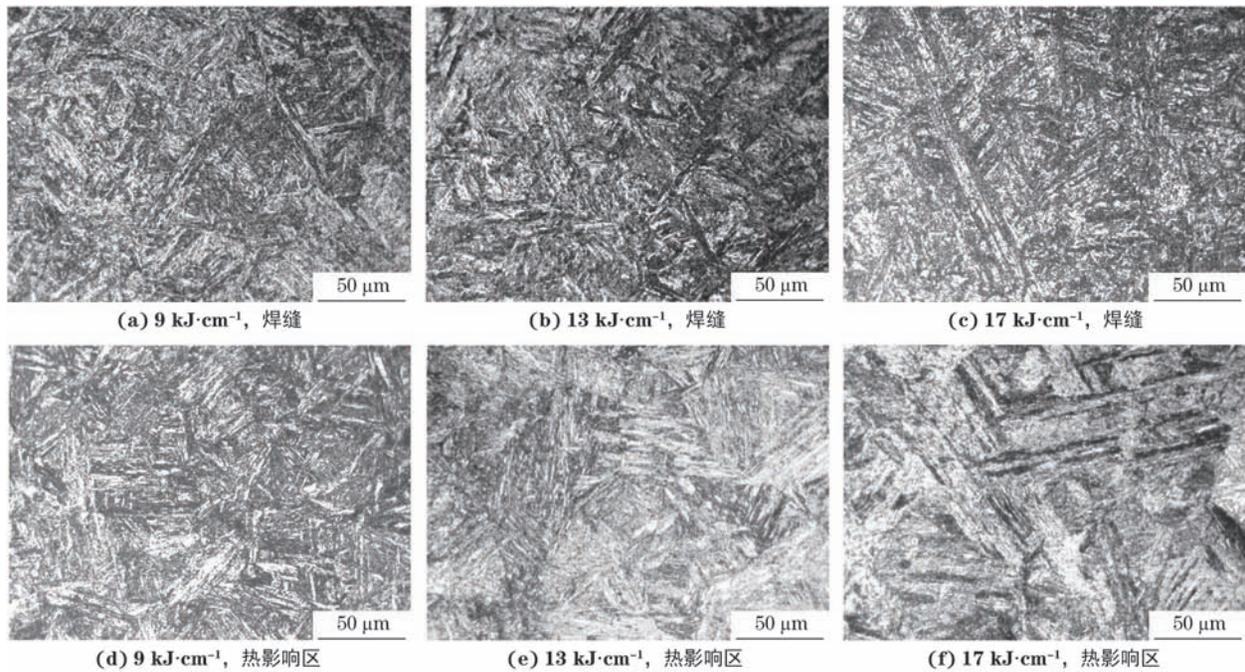


图4 不同焊接热输入下焊接接头不同区域的显微组织

Fig. 4 Microstructures of different areas of welded joints under different welding heat inputs: (a-c) weld and (d-f) heat affected zone

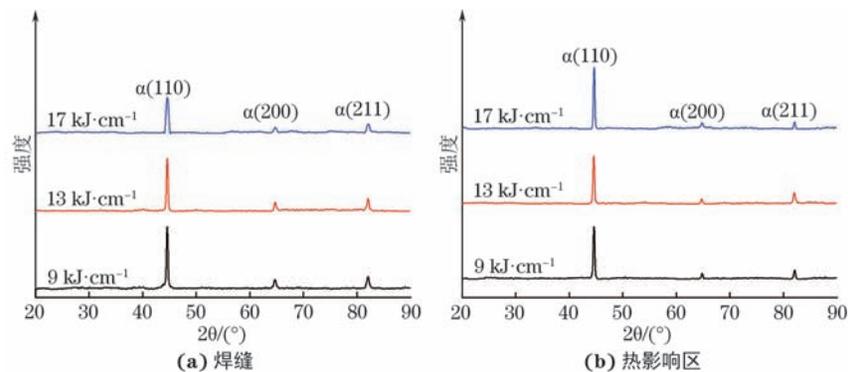


图5 不同焊接热输入下焊接接头不同区域的XRD谱

Fig. 5 XRD spectra of different regions of welded joints under different welding heat inputs: (a) weld and (b) heat affected zone

为在焊接过程中热循环不同导致晶粒大小的不均匀以及晶粒间织构类型和密度的不同^[17]。随着焊接热输入的增大,焊缝的衍射峰半高宽增大,热影响区的衍射峰半高宽变化较小,可知随着焊接热输入的增大,焊缝晶粒尺寸增大,而热影响区晶粒尺寸受焊接热输入的影响较小。

2.2 力学性能

当焊接热输入为9, 13, 17 kJ·cm⁻¹时,焊接接头的抗拉强度分别为811, 810, 815 MPa, 屈服强度分别为601, 602, 600 MPa, 均高于母材且符合项目规定(抗拉强度不低于780 MPa, 屈服强度不低于580 MPa), 屈强比均小于0.9, 接头的拉伸性能良好。拉伸试样断裂位置均为母材, 这是由于焊缝的板条马氏体组织相对细小, 抗拉强度高于母材。当焊接

热输入为9, 13, 17 kJ·cm⁻¹时, 焊接接头的冲击吸收能量分别为44, 42, 36 J, 随着焊接热输入增大而减小, 这是由于随着焊接热输入的增大, 焊缝的组织变粗大, δ铁素体含量增多所致。

由图6可见, 随着距焊缝中心距离的增大, 不同焊接热输入下焊接接头的硬度基本呈先增大后减小的趋势, 硬度在熔合线附近达到最大值, 这是因为靠近熔合线的完全淬火区为过热区, 在焊接过程中大量合金元素溶入奥氏体中形成硬度较高的马氏体^[15]。不同焊接热输入下焊缝、热影响区和母材的平均硬度分别为320, 305, 290 HV。焊缝的板条马氏体组织比热影响区和母材细小, 因此其硬度较高。随着焊接热输入的增加, 焊缝和热影响区的硬度均略微降低。随着焊接热输入的增大, 焊缝和热影响

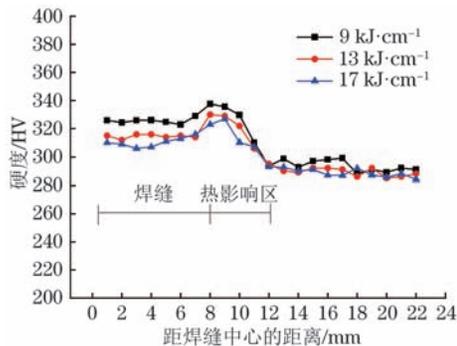


图6 不同焊接热输入下焊接接头的硬度分布曲线

Fig. 6 Distribution curves of hardness of welded joints under different welding heat inputs

区的组织变粗大,因此硬度降低。由于母材和焊接材料的碳含量低,而决定马氏体硬度的因素主要为马氏体的碳含量,因此不同焊接热输入下的焊接接头硬度整体偏低。

2.3 冲击断口形貌

由图7可见,在不同焊接热输入下冲击断口均由少量深的大型韧窝^[18-19]和大量小型等轴韧窝构成,呈典型的韧性断裂特征,说明焊缝具有良好的韧性。相较于 $17\text{ kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$ 焊接热输入下的冲击断口,焊接热输入为 $9, 13\text{ kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$ 下冲击断口中的韧窝尺寸略大且均匀,且 $17\text{ kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$ 焊接热输入下韧窝内部有少量夹杂物,因此焊接热输入为 $9, 13\text{ kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$ 下

焊接接头的冲击吸收能量更高,冲击韧性更好。韧窝的形成主要与焊缝的微观结构有关,虽然不同焊接热输入下焊缝的晶粒尺寸和分布不同,但其组织主要由细小的板条马氏体组成,这些细小且均匀分布的板条马氏体能够提高材料的塑性和韧性,从而发生微孔聚集型断裂而形成韧窝。

3 结论

(1) 0Cr13Ni4Mo 马氏体不锈钢焊接接头焊缝和热影响区的组织均为板条马氏体、少量 δ 铁素体和残余奥氏体。焊缝中的板条马氏体组织比热影响区细小,二者均比母材细小。随着焊接热输入的增大,焊缝和热影响区的板条马氏体组织变粗大, δ 铁素体含量增多。

(2) 不同焊接热输入下焊接接头的抗拉强度和屈服强度分别约为 $810, 600\text{ MPa}$,均高于母材且符合项目规定,屈强比均小于 0.9 ,接头的拉伸性能良好,在拉伸后均在母材处断裂。随着焊接热输入增大,冲击吸收能量减小,焊接热输入为 $9, 13\text{ kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$ 下冲击断口中的韧窝尺寸略大且均匀,冲击韧性更好。不同焊接热输入下焊缝的硬度在 $310\sim 340\text{ HV}$,其平均硬度高于热影响区和母材,随着焊接热输入的增加,焊缝和热影响区的硬度均略微降低。

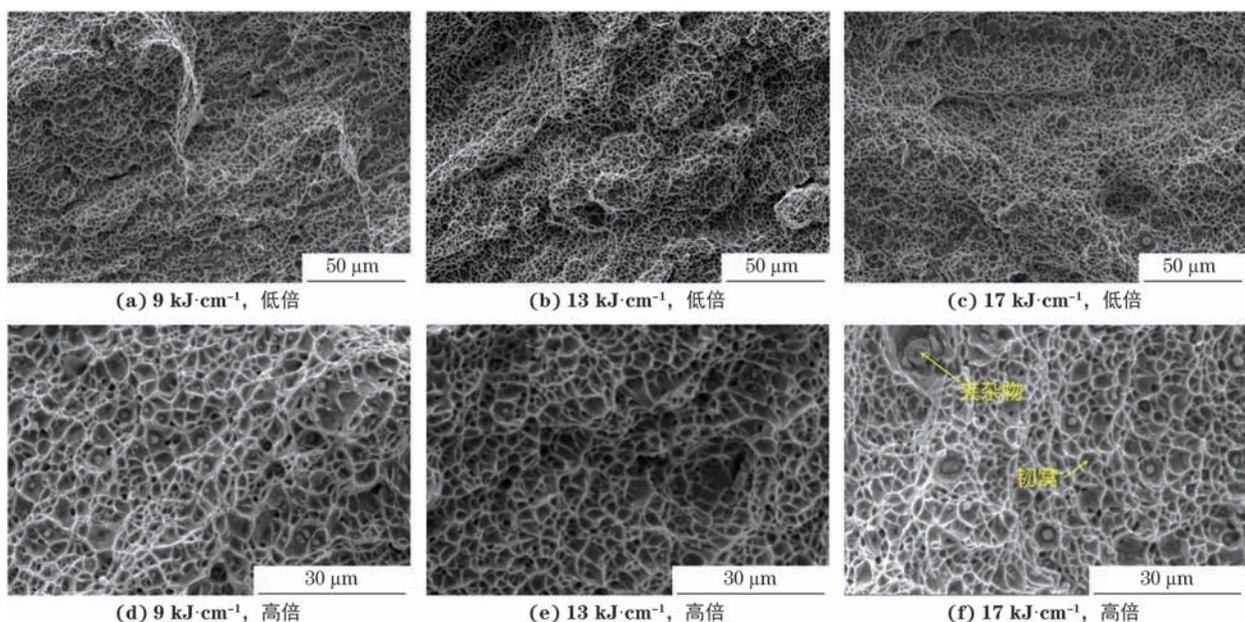


图7 不同焊接热输入下焊接接头的冲击断口微观形貌

Fig. 7 Impact fracture micromorphology of welded joints under different welding heat inputs:

(a-c) at low magnification and (d-f) at high magnification

参考文献:

[1] 张洪生,付晓虎,张苏星. ZG04Cr13Ni4Mo 马氏体不锈

钢力学性能研究[J]. 一重技术, 2018(1): 43-47.

ZHANG H S, FU X H, ZHANG S X. Mechanical property test of ZG04Cr13Ni4Mo martensitic stainless

- steel[J]. CFHI Technology, 2018(1): 43-47.
- [2] YANG T, XUE S, ZHENG L X, et al. Crack investigation of martensitic stainless steel turbine blade in thermal power plant[J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 127: 105553.
- [3] 王治宇, 许海刚, 宋红梅. 04Cr13Ni5Mo 超级马氏体不锈钢焊接性能研究[J]. 宝钢技术, 2016(4): 21-25.
WANG Z Y, XU H G, SONG H M. Research on weldability of super martensitic stainless steel 04Cr13Ni5Mo[J]. Baosteel Technology, 2016(4): 21-25.
- [4] 史顺望, 刘波, 穆磊, 等. 焊后低温热处理对马氏体不锈钢组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2020, 45(12): 136-139.
SHI S W, LIU B, MU L, et al. Effect of low temperature heat treatment after welding on microstructure and properties of martensitic stainless steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2020, 45(12): 136-139.
- [5] 李照国, 王珂, 纪显彬, 等. 回火温度对00Cr13Ni5Mo 超级马氏体不锈钢组织及性能的影响[J]. 金属热处理, 2021, 46(5): 95-99.
LI Z G, WANG K, JI X B, et al. Effect of tempering temperature on microstructure and properties of 00Cr13Ni5Mo super martensitic stainless steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2021, 46(5): 95-99.
- [6] LIU W J, LI J, LI S H, et al. Effect of nitrogen on the hot deformation behavior of 0.4C-13Cr martensitic stainless steel[J]. Steel Research International, 2021, 92(8): 2100020.
- [7] 陈裕川. 新型超级马氏体不锈钢的焊接[J]. 现代焊接, 2010(2): 14-20.
CHEN Y C. Welding of new super martensitic stainless steel[J]. Modern Welding, 2010(2): 14-20.
- [8] 于丽萍, 刘晓禹. 热处理对0Cr13Ni4Mo 马氏体不锈钢组织和性能的影响[J]. 一重技术, 2005(4): 29-30.
YU L P, LIU X Y. Effect of heat treatment on microstructure and properties of 0Cr13Ni4Mo martensitic stainless steel[J]. CFHI Technology, 2005(4): 29-30.
- [9] 周彤, 卫心宏. ZG06Cr13Ni4Mo 马氏体不锈钢叶片热处理工艺研究[J]. 铸造设备与工艺, 2017(3): 32-34.
ZHOU T, WEI X H. Heat treatment process of ZG06Cr13Ni4Mo martensitic stainless steel blade[J]. Foundry Equipment & Technology, 2017(3): 32-34.
- [10] 董方奇, 杨百勋, 李益民, 等. 超级马氏体不锈钢 00Cr13Ni4Mo 力学性能与抗磨蚀性能试验[J]. 热力发电, 2016, 45(3): 110-115.
DONG F Q, YANG B X, LI Y M, et al. Mechanical properties and anti-abrasion performance of 00Cr13Ni4Mo super martensitic stainless steel[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(3): 110-115.
- [11] 曹阳. 超级马氏体不锈钢04Cr13Ni5Mo焊接性能研究[J]. 四川水力发电, 2021, 40(5): 59-61.
CAO Y. Study on the welding performance of super martensite stainless steel 04Cr13Ni5Mo[J]. Sichuan Water Power, 2021, 40(5): 59-61.
- [12] WANG G F, JIAO S J, CHEN Bo, et al. Research progress on impact toughness of supermartensitic stainless steel[J]. Welding & Joining, 2024(5): 51-57.
- [13] 郭宏侠, 陆善平. 0Cr13Ni5Mo 类低碳马氏体不锈钢焊接技术[J]. 焊接技术, 2010, 39(11): 22-24.
GUO H X, LU S P. Welding technology of 0Cr13Ni5Mo low carbon martensitic stainless steel[J]. Welding Technology, 2010, 39(11): 22-24.
- [14] AMRAEI M, AHOLA A, AFKHAMI S, et al. Effects of heat input on the mechanical properties of butt-welded high and ultra-high strength steels[J]. Engineering Structures, 2019, 198: 109460.
- [15] 杨晶晶. 水轮机用0Cr13Ni5Mo 不锈钢焊接工艺研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
YANG J J. Study on 0Cr13Ni5Mo stainless steel welding process for hydroturbine[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [16] 蒋勇, 郭栖利, 梁晨, 等. 焊接热输入对低碳贝氏体金属粉芯焊丝(0Cr13Ni5Mo)熔敷金属组织和力学性能的影响[J]. 电焊机, 2021, 51(6): 32-40.
JIANG Y, GUO X L, LIANG C, et al. Effect of welding heat input on microstructure and mechanical properties of deposited metal for a low carbon bainite metal powder cored wire (0Cr13Ni5Mo) [J]. Electric Welding Machine, 2021, 51(6): 32-40.
- [17] 侯树成, 周勇, 刘云, 等. 连续油管管材及焊接热影响区显微组织分析[J]. 焊管, 2019, 42(3): 16-22.
HOU S C, ZHOU Y, LIU Y, et al. Microstructure analysis of coiled-tubing pipe and welding HAZ[J]. Welded Pipe and Tube, 2019, 42(3): 16-22.
- [18] 周昶, 黄乐庆, 韩承良, 等. 焊接热输入对S420ML 钢焊接接头组织及断裂韧性的影响[J]. 上海金属, 2023, 45(6): 12-18.
ZHOU C, HUANG L Q, HAN C L, et al. Effect of welding heat input on microstructure and fracture toughness of welded joint of S420ML steel[J]. Shanghai Metals, 2023, 45(6): 12-18.
- [19] 徐春华, 谢淑贤, 王海瑞, 等. 焊接热输入对超低碳贝氏体钢热影响区CGHAZ组织性能影响[J]. 电焊机,

2021, 51(2): 37-40.

XU C H, XIE S X, WANG H R, et al. Effect of welding heat input on microstructure and properties of CGHAZ

of ultra-low carbon bainitic steel[J]. Electric Welding Machine, 2021, 51(2): 37-40.

Effect of Welding Heat Input on Microstructure and Properties of 0Cr13Ni4Mo Martensitic Stainless Steel Arc Welded Joint

ZHOU Xinyu, HU Zhihua, LUAN Daocheng, WANG Zhengyun, LIN Shaobin

(School of Materials Science and Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China)

Abstract: Multi-layer and multi-pass arc welding was conducted on 0Cr13Ni4Mo martensitic stainless steel plates under different welding heat inputs (9, 13, 17 kJ · cm⁻¹), and the effect of welding heat input on the microstructure and mechanical properties of the welded joints was studied. The result show that the microstructures of welded joints under different welding heat inputs were all composed of lath martensite, a small amount of δ ferrite and residual austenite. With the increase of welding heat input, the lath martensitic structure of the weld and the heat-affected zone became coarse, and the δ ferrite content increased. Under different welding heat inputs, the tensile strength and yield strength of the welded joints were approximately 810, 600 MPa, respectively, which were higher than those of the base metal and complied with the project specification. The yield ratio was less than 0.9. The joints had good tensile properties, and fractured at the base metal after tension. With the increase of welding heat input, the impact absorption energy decreased. When the welding heat inputs were 9, 13 kJ · cm⁻¹, the size of the dimples in the impact fracture was slightly larger and more uniform, indicating the better impact toughness of the joint. The hardness of the weld under different welding heat inputs was 310–340 HV, and the average hardness was higher than that of the heat affected zone and base metal. With increasing welding heat input, the hardness of the weld and the heat affected zone slightly decreased.

Key words: welding heat input; 0Cr13Ni4Mo martensitic stainless steel; microstructure; mechanical property