

DOI:10.11973/jxgcl240160

热输入对低温高锰钢焊接接头组织和性能的影响

郭广飞,任明皓,姜 恒,吴 错,汪志福,章小浒

(合肥通用机械研究院有限公司,合肥 230031)

摘要:采用CHW-SMn埋弧焊丝和配套CHF610焊剂,在不同热输入($12.0, 16.0, 20.0 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$)下对低温高锰钢进行埋弧焊焊接,研究了热输入对接头显微组织和性能的影响。结果表明:不同热输入下焊缝组织均由柱状晶+析出相组成,热影响区组织为奥氏体、少量夹杂物和析出相;随着热输入的增大,热影响区组织粗化,粗晶区宽度增加。随着热输入的增大,焊接接头强度和韧性下降,焊缝显微硬度先降后升,热输入为 $12.0, 16.0 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$ 下焊接接头弯曲后焊缝表面未观察到裂纹,当热输入为 $20.0 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$ 时出现裂纹;不同热输入下接头的拉伸断口和冲击断口均呈韧窝形貌,断裂方式为韧性断裂。当热输入为 $12 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$ 时,焊接接头力学性能较优。

关键词:低温高锰钢;热输入;显微组织;硬度;冲击韧性

中图分类号: TG14; TG115

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2025)03-0094-06

0 引言

液化天然气(LNG)储罐是天然气储备的重要装备,其工作温度为 -163°C ,对罐体材料的低温性能要求极高^[1]。目前,罐体材料主要采用06Ni9DR钢^[2-3],但该钢成本较高。低温高锰钢是通过以锰代镍而开发的新钢种,锰质量分数达23%以上,能在 -163°C 下稳定工作,其加工性能优于镍合金钢,焊接性能优于不锈钢^[4-5],价格更低(仅为镍合金钢和不锈钢的70%~80%),经济性突出,具有良好的应用前景^[6-7],在建造LNG储罐上优势巨大^[8-9]。

针对低温高锰钢焊接,国外早已开发出适用于埋弧焊、氩弧焊及气体保护焊等技术的各种焊材^[10],国内随后也成功开发出LNG高锰钢储罐用焊材^[11],所得焊接接头性能与国外同类焊材焊接接头相当,提高了我国相关焊材的自主保障能力。国内各研究机构采用国内外不同焊材及不同焊接工艺,对低温高锰钢焊接接头的性能开展了研究。杨江^[12]通过热模拟试验研究了低温高锰钢接头热影响区的脆化机理及调控机制,发现导致脆化的关键因素是晶界碳化物的析出。樊晓雨^[13]使用镍基焊材进行高锰钢

的埋弧焊和手工电弧焊,发现V形坡口有利于高锰钢接头的力学性能。郭广飞等^[11]利用国产焊材分别对高锰钢进行埋弧焊、手工电弧焊及熔化极气体保护焊,发现埋弧焊接头的拉伸性能最好,冲击吸收能量优于熔化极气体保护焊接头,与手工电弧焊接头相近。

鉴于埋弧焊在LNG储罐的建造上具有效率高及自动焊参数易调可控等优势,作者对国产新型低温高锰钢进行埋弧焊,研究了热输入对焊接接头组织及性能的影响,拟为LNG储罐的实际生产提供技术支持,推动新型国产低温高锰钢及相应国产焊材在LNG储罐国产化中的应用。

1 试样制备与试验方法

母材为舞阳钢铁有限公司研制的Q400GMDR低温高锰钢,尺寸为 $400 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$,显微组织(见图1)为奥氏体,奥氏体晶粒内部可见

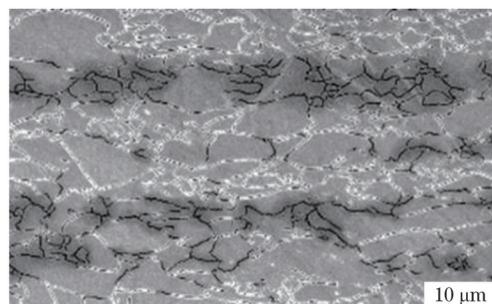


图1 母材的显微组织

Fig. 1 Microstructure of base material

收稿日期: 2024-03-27; 修订日期: 2025-01-02

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFB4003003);安徽省自然科学基金资助项目(2108085ME146);合肥通用机械研究院有限公司博士基金项目(2020011747);中国石油化工股份有限公司高锰钢LNG全容罐研究及工程技术开发项目(324088)

作者简介:郭广飞(1983—),男,安徽蒙城人,高级工程师,博士

黑白相间的带状组织,晶粒大小不均,尺寸分布在20~60 μm ;焊材为四川大西洋焊接材料股份有限公司

司研发的CHW-SMn埋弧焊丝,直径为3.2 mm,配套CHF610焊剂。母材及焊材的化学成分如表1所示。

表1 母材及焊材的化学成分

Table 1 Chemical composition of base material and welding material

材料	质量分数/%											
	C	Si	Mn	Ni	Cr	P	S	Cu	Ti	V	Nb	Fe
Q400GMDR高锰钢	0.42	0.23	24.20	0.05	3.12	0.009	0.004	0.41	0.004	0.03	0.014	余
CHW-SMn埋弧焊丝	0.32	0.45	22.18	3.30	3.10	0.021	0.030					余

焊接前对母材待焊区域进行打磨,直至露出金属光泽,用丙酮清洗油污,备用。采用MZ-1000R型埋弧焊焊机进行多层多道焊接,坡口形式及焊接顺序见图2,热输入分别为12.0, 16.0, 20.0 $\text{kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$, 对应的焊接电流、焊接电压和焊接速度组合见表2,层间温度为80 $^{\circ}\text{C}$ 。

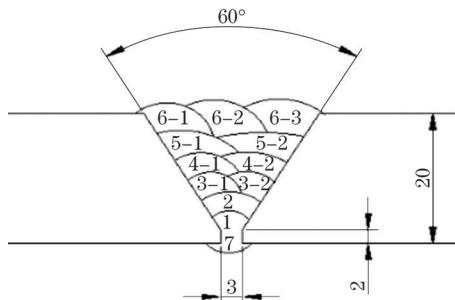


图2 焊接坡口形式及焊接顺序

Fig. 2 Welding groove form and welding sequence

表2 焊接工艺参数

Table 2 Welding process parameters

热输入/ ($\text{kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$)	焊接电流/A	焊接电压/V	焊接速度/ ($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$)
12.0	380	29	55
16.0	400	30	45
20.0	400	30	36

观察焊缝,确认外观质量合格后进行无损检测,在探伤合格的接头上按照NB/T 47016—2023《承压设备产品焊接试件的力学性能检验》要求进行取样,试样经打磨抛光,用体积分数4%硝酸乙醇溶液腐蚀后,采用MV6000型光学显微镜观察显微组织,并对晶粒尺寸进行统计。采用ZEISS SUPRA 40型扫描电子显微镜(SEM)观察微观形貌,并用附带的能量谱仪(EDS)进行微区成分分析。

以焊缝为中心制取如图3所示的拉伸试样,按照GB/T 2651—2023《焊接及相关工艺 试验方法 拉伸试验》,在DDL500型电子万能拉伸试验机上进行拉伸试验,拉伸速度为 $2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$;采用

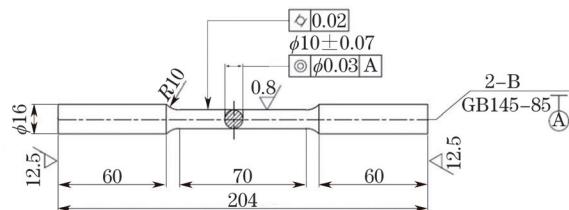


图3 拉伸试样的形状与尺寸

Fig. 3 Shape and size of tensile specimen

SEM观察拉伸断口形貌。以焊缝为中心截取尺寸为 $210 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的弯曲试样,按照GB/T 2653—2008《焊接接头弯曲试验方法》,采用SHT4505型弯曲试验机进行弯曲试验,支辊距离为123 mm,压头直径为80 mm,下压速度为 $20 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。按照GB/T 229—2020《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》,采用JBD-300A型低温冲击试验机在 -196°C 下进行夏比摆锤冲击试验,采用尺寸为 $55 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的夏比V型缺口冲击试样,夏比V型缺口轴线垂直于母材表面,缺口开在焊缝中心位置;采用SEM观察冲击断口形貌。上述试验均测3个平行试样取平均值。按照GB/T 2654—2008《焊接接头硬度试验方法》,采用DVK-1S型维氏硬度计测试表面显微硬度,载荷为1.96 N,保载时间为10 s,从焊缝中心向母材方向每隔0.5 mm取点测试,相同距离处测3个点取平均值。

2 试验结果与讨论

2.1 显微组织

由图4可知,不同热输入下焊接接头的焊缝组织均为柱状晶+析出相。当热输入为 $12.0 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$ 时,析出相细小,主要呈球状弥散分布在奥氏体晶界处;当热输入为 $16.0 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$ 时,近熔合线附近焊缝区的析出相颗粒较大;当热输入为 $20.0 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$ 时,焊缝及热影响区均出现白色析出相。

由图5可知:经过多重焊接热循环,热影响区粗晶区晶粒与母材相比明显长大,并且随着热输入增

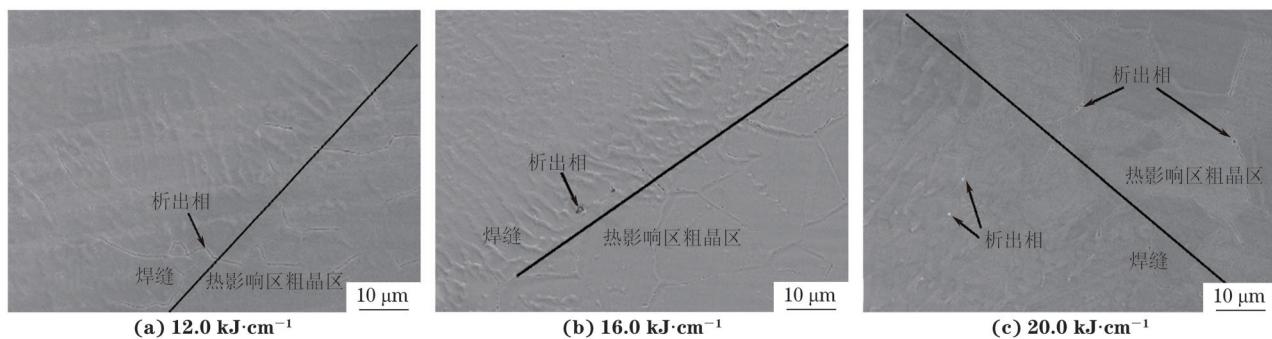


图 4 不同热输入下焊接接头的显微组织

Fig. 4 Microstructure of welded joints under different heat inputs

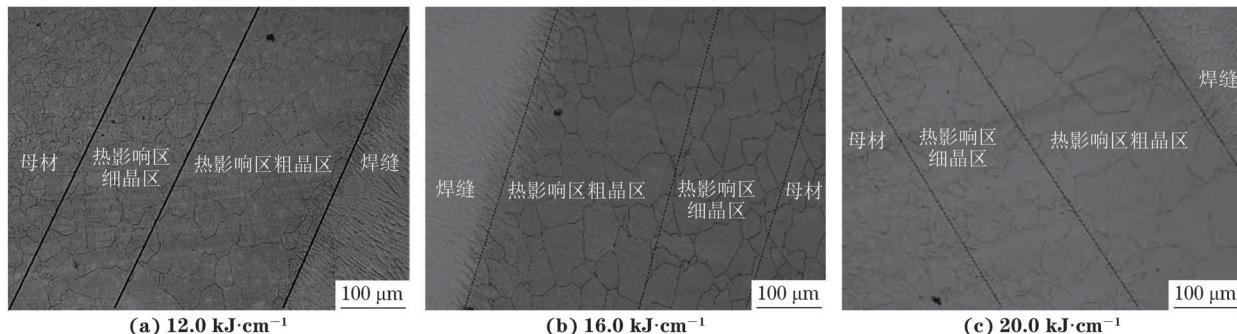


图 5 不同热输入下焊接接头热影响区的显微组织

Fig. 5 Microstructure of heat affected zone of welded joints under different heat inputs

大而增大, 热影响区组织仍为奥氏体组织; 不同热输入下的热影响区粗晶区可见少量黑色夹杂物; 随着热输入增大, 热影响区粗晶区变宽, 从约 300 μm 增大到 600 μm 以上。

由图 6 可知: 当热输入为 12.0 $\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$ 时, 热影

响区粗晶区的晶粒尺寸较小, 晶界之间存在细小白色颗粒状析出相; 当热输入为 16.0 $\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$ 时, 热影响区粗晶区晶粒明显长大, 晶界析出相呈棒状, 晶粒及晶界上存在夹杂物脱落留下的凹坑; 当热输入为 20.0 $\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$ 时, 晶界析出相增多。

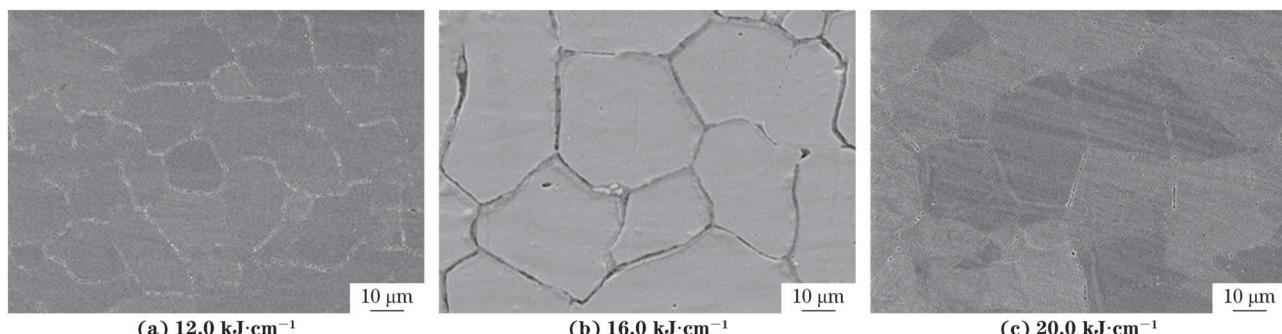


图 6 不同热输入下焊接接头热影响区粗晶区的 SEM 形貌

Fig. 6 SEM morphology of coarse grain heat-affected zone of welded joints under different heat inputs

2.2 拉伸性能

不同热输入下的焊接接头均在焊缝处拉伸断裂。由表 3 可知, 随着热输入增大, 焊接接头的屈服强度、抗拉强度及断面收缩率降低, 即强度和韧性均下降。由图 7 可知: 不同热输入下焊接接头的拉伸缺口均存在尺寸不一的韧窝, 断裂方式均为韧性断裂; 随着热输入的增大, 韧窝变小, 深度变浅, 焊接接头

的韧性降低。

2.3 弯曲性能

由图 8 可知, 热输入为 12.0, 16.0 $\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$ 的焊接接头试样在弯曲后, 其焊缝表面未产生裂纹, 当热输入为 20.0 $\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$ 时, 弯曲后焊缝表面出现长度约 5 mm 的裂纹, 这一长度超过了 NB/T 47016—2023《承压设备产品焊接试件的力学性能检验》的

表3 不同热输入下焊接接头的常温拉伸性能

Table 3 Tensile properties of welded joints under different heat inputs at room temperature

热输入/ (kJ·cm ⁻¹)	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断面收缩率/%
12.0	535	864	49.7
16.0	458	775	31.4
20.0	448	697	29.9

允许值(3 mm)。可见较大的热输入对该接头的弯曲性能造成了不利影响。

2.4 冲击韧性

当热输入为 12.0, 16.0, 20.0 kJ·cm⁻¹ 时, 焊接

接头在 -196 °C 下的平均冲击吸收功分别为 100.0, 82.0, 84.7 J, 均低于母材的 174 J。由图 9 可知, 不同热输入下焊接接头冲击断口中的韧窝清晰可见, 断裂方式均为韧性断裂。当热输入为 12.0 kJ·cm⁻¹ 时, 韧窝大且深, 尺寸不一, 边缘清晰; 当热输入为 16.0, 20.0 kJ·cm⁻¹ 时, 韧窝小且浅, 少量韧窝底部存在微小的孔洞, 断口出现河流状花纹^[14-16]。冲击断口的微观形貌与其冲击吸收功结果吻合。

2.5 显微硬度

由图 10 可知, 焊接接头显微硬度最高值出现在热影响区细晶区, 最低值出现在焊缝中心附近。焊缝显微硬度随着热输入增大呈先降后升趋势。当热输入为 12.0 kJ·cm⁻¹ 时, 接头热影响区细晶区的

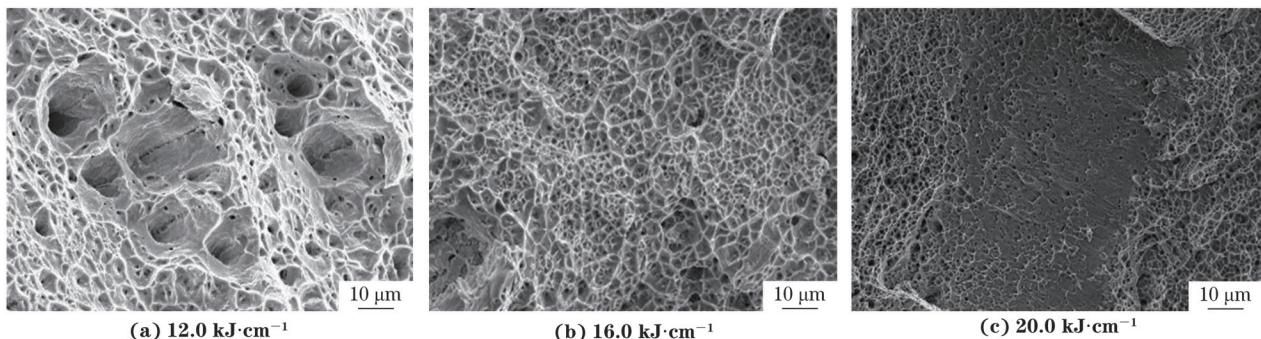


图 7 不同热输入下焊接接头的拉伸断口形貌

Fig. 7 Tensile fracture morphology of welded joints under different heat inputs

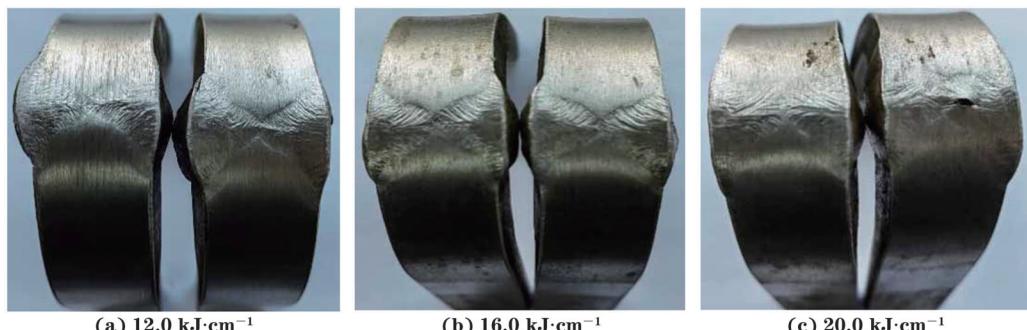


图 8 弯曲试验后不同热输入焊接接头的宏观形貌

Fig. 8 Micromorphology of welded joints under different heat inputs after bending tests

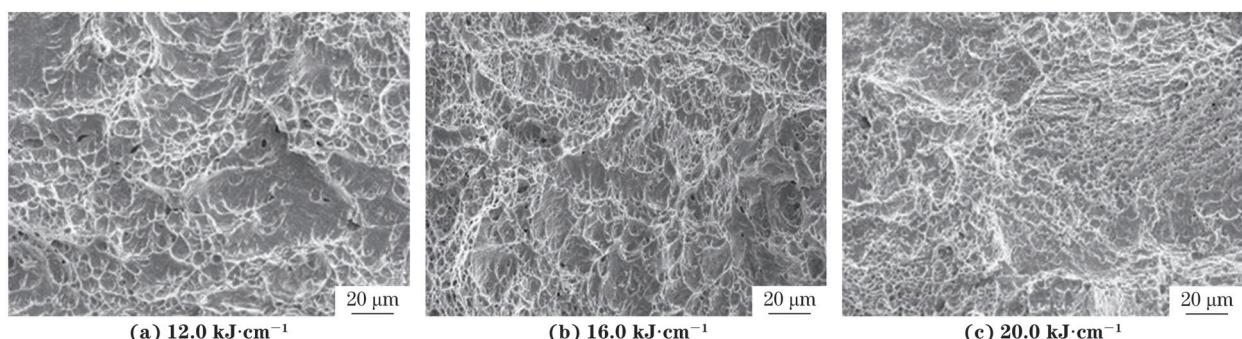


图 9 -196 °C 冲击后不同热输入焊接接头的冲击断口形貌

Fig. 9 Impact fracture morphology of welded joints under different heat inputs after impact at -196 °C

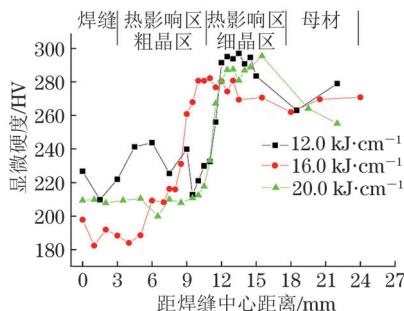


图 10 不同热输入下焊接接头的显微硬度分布

Fig. 10 Microhardness distribution of welded joints under different heat inputs

硬度分布在290~300 HV, 当热输入增大到16.0, 20.0 $\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$ 时, 热影响区细晶区的硬度分布在280~290 HV。

综上所述, 当热输入为12 $\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$ 时, 焊接接头的强度、韧性、硬度及抗冲击能力较优, 力学性能较好。

3 结 论

(1) 不同热输入下低温高锰钢焊接接头的焊缝组织均为柱状晶+析出相, 热影响区组织为奥氏体+少量夹杂物+析出相。随着热输入的增大, 热影响区粗晶区组织粗化, 粗晶区宽度增加。

(2) 随着热输入的增大, 低温高锰钢焊接接头的强度和韧性下降, 焊缝显微硬度先降后升。热输入为12.0, 16.0 $\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$ 的焊接接头弯曲后, 其焊缝表面未发现裂纹, 热输入为20.0 $\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$ 时出现5 mm长的裂纹。

(3) 不同热输入下的焊接接头均在焊缝区发生拉伸断裂, 拉伸断口和冲击断口均为韧窝形貌, 断裂方式为韧性断裂。当热输入为12 $\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$ 时, 焊接接头力学性能较好。

参考文献:

- [1] 郭鹰, 杨尚玉, 周聪, 等. LNG储罐用9Ni钢-196 °C焊缝断裂韧性及断口分析[J]. 压力容器, 2022, 39(11): 9-15.
GUO Y, YANG S Y, ZHOU C, et al. Fracture toughness and fracture analysis of 9Ni steel weld at -196 °C for LNG storage tank[J]. Pressure Vessel Technology, 2022, 39(11): 9-15.
- [2] 郭伟, 蔡艳, 华学明. LNG用低温高锰钢及其焊接技术发展[J]. 电焊机, 2020, 50(11): 7-11.
GUO W, CAI Y, HUA X M. Development of low-temperature high manganese steel and its welding technology in LNG field[J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(11): 7-11.
- [3] 孟亮, 王红鸿, 陈亚魁, 等. LNG用高锰钢熔敷金属低温冲击韧性研究[J]. 电焊机, 2020, 50(11): 120-123.
MENG L, WANG H H, CHEN Y K, et al. Research on cryogenic impact toughness of dep-osited metals of high manganese steel for LNG[J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(11): 120-123.
- [4] 徐浩, 刘建华, 刘洪波, 等. 高锰奥氏体低温钢发展现状、成分设计及热处理焊接工艺分析[J]. 特殊钢, 2024, 45(2): 8-17.
XU H, LIU J H, LIU H B, et al. Composition design and heat treatment welding process analysis of high-manganese austenitic cryogenic steel[J]. Special Steel, 2024, 45(2): 8-17.
- [5] 孙淑侠. LNG低温高锰奥氏体钢材料应用研究概述[J]. 武汉船舶职业技术学院学报, 2021, 20(4): 144-148.
SUN S X. Application of LNG low temperature high manganese austenitic steel[J]. Journal of Wuhan Institute of Shipbuilding Technology, 2021, 20(4): 144-148.
- [6] SEGAWA H, NAKA T, WADA K, et al. Synthesis of laminated composites of alumina and nickel oxides by AC anodization and electrodeposition[J]. Surface and Coatings Technology, 2017, 310: 93-97.
- [7] CURTZE S, KUOKKALA V T. Dependence of tensile deformation behavior of TWIP steels on stacking fault energy, temperature and strain rate[J]. Acta Materialia, 2010, 58(15): 5129-5141.
- [8] KOYAMA M, SAWAGUCHI T, LEE T, et al. Work hardening associated with ϵ -martensitic transformation, deformation twinning and dynamic strain aging in Fe-17Mn-0.6C and Fe-17Mn-0.8C TWIP steels[J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528(24): 7310-7316.
- [9] 冯伟, 于庭祥, 陈波, 等. LNG储罐用低温高锰钢埋弧焊材料组织和性能研究[J]. 压力容器, 2023, 40(5): 1-7.
FENG W, YU T X, CHEN B, et al. Study on the microstructure and properties of low temperature high manganese steel submerged arc welding materials for LNG storage tanks[J]. Pressure Vessel Technology, 2023, 40(5): 1-7.
- [10] 李帅. LNG储罐用高锰钢焊接接头组织与力学性能研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2020.
LI S. Microstructure and mechanical properties of high manganese steel welded joints for LNG storage

- tanks[D]. Dongying: China University of Petroleum (Huadong), 2020.
- [11] 郭广飞, 章小浒, 任明皓, 等. 焊接工艺对LNG储罐用高锰钢焊接接头组织和性能的影响[J]. 压力容器, 2024, 41(5): 29-35.
- GUO G F, ZHANG X H, REN M H, et al. The effect of welding processes on the microstructure and properties of welded joints of high manganese steel for LNG storage tanks[J]. Pressure Vessel Technology, 2024, 41(5): 29-35.
- [12] 杨江. 低温高锰钢焊接热影响区组织演变与力学性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- YANG J. Microstructural evolution and mechanical properties in heat-affected zone of cryogenic high-Mn steel[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.
- [13] 樊晓雨. LNG储罐用高锰钢焊接工艺与焊接接头组织特征及性能研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2022.
- FAN X Y. Study on welding process, microstructure and properties of high manganese steel joints used in LNG tanks[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2022.
- [14] 曾道平, 安同邦, 郑韶先, 等. 热输入对船用440 MPa级低合金高强度钢焊缝组织及性能的影响[J]. 焊接学报, 2023, 44(8): 74-82.
- ZENG D P, AN T B, ZHENG S X, et al. Effect of heat input on microstructure and properties of weld seam of marine 440 MPa grade HSLA steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2023, 44(8): 74-82.
- [15] 陈亚魁, 王红鸿, 孟亮, 等. 超低温高锰钢埋弧焊焊缝金属微观组织及冲击韧性分析[J]. 武汉科技大学学报, 2020, 43(5): 321-325.
- CHEN Y K, WANG H H, MENG L, et al. Microstructure and impact toughness of submerged-arc deposited metal for cryogenic high manganese steel[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2020, 43(5): 321-325.
- [16] 王玉辉. 高锰奥氏体钢的微观组织调控及室温和低温力学性能[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2018.
- WANG Y H. Microstructural control for enhancing the mechanical properties of high Mn austenitic steel at ambient and cryogenic temperatures[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2018.

Effect of Heat Input on Microstructure and Properties of Welded Joint of Low Temperature High Manganese Steel

GUO Guangfei, REN Minghao, JIANG Heng, WU Kai, WANG Zhifu, ZHANG Xiaohu

(Hefei General Machinery Research Institute Co., Ltd., Hefei 230031, China)

Abstract: With CHW-SMn submerged arc welding wire and CHF610 flux, low temperature high manganese steel was welded by submerged arc welding under different heat inputs ($12.0, 16.0, 20.0 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$). The effect of heat input on the microstructure and properties of the joint was studied. The results show that under different heat inputs, the weld microstructures were all composed of columnar crystal + precipitate, and the microstructures of the heat affected zone were austenite with a small amount of inclusions and precipitates. With the increase of heat input, the microstructure of the heat affected zone was coarsened and the width of the coarse-grained zone increased. With the increase of heat input, the strength and toughness of the welded joint decreased, and the microhardness of the weld decreased first and then increased. When the heat input was $12.0 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$ and $16.0 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$, no cracks were observed on the weld surface of the welded joint after bending, but cracks appeared when the heat input was $20.0 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$. The tensile and impact fracture of the joints under different heat inputs showed dimple morphology, and the fracture modes were all ductile fracture. When the heat input was $12.0 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$, the mechanical properties of the welded joint were relatively good.

Key words: low temperature high manganese steel; heat input; microstructure; hardness; impact toughness