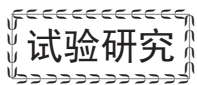


doi: 10.3969/j.issn.1001-4837.2025.08.003



氩弧焊热输入对不锈钢焊缝4.2 K下断裂韧性的影响

夏海鑫¹, 李子昕¹, 付 阳¹, 朱明亮¹, 吕映宾², 张茂龙²

(1. 华东理工大学 机械与动力工程学院, 上海 200237; 2. 上海电气核电设备有限公司, 上海 201306)

摘 要:针对316LN和316LN-Mn两种不锈钢焊缝超低温断裂韧性低的问题,提出通过建立焊接参数-微观组织-断裂韧性的映射关系优化焊接工艺方案。在3种不同热输入条件下制备了2种钢的焊接接头,并在4.2 K超低温下测试了接头焊缝区的断裂韧性。结合硬度、微观组织及断口形貌分析,研究了热输入、晶粒尺寸与断裂韧性之间的关系。结果表明,随着热输入增加,2种接头的焊缝超低温断裂韧性均先升高后降低,而晶粒尺寸逐渐增大。进一步研究发现,焊缝晶粒尺寸存在一个临界过渡区:当晶粒尺寸小于该过渡区时,尺寸越大,断裂韧性越高;当晶粒尺寸大于该过渡区时,则呈现相反趋势。研究可为焊接参数的选取以及通过焊接热输入快速评估焊缝超低温断裂韧性提供参考。

关键词:聚变堆;奥氏体不锈钢;断裂韧性;钨极惰性气体保护焊(GTAW);热输入

中图分类号:TH142;TL351;TG444.74

文献标志码:A

Effect of GTAW heat input on fracture toughness of stainless steel welds at 4.2 K

XIA Haixin¹, LI Zixin¹, FU Yang¹, ZHU Mingliang¹, LÜ Yingbin², ZHANG Maolong²

(1. School of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China;

2. Shanghai Electric Nuclear Power Equipment Co., Ltd., Shanghai 201306, China)

Abstract: To address the low ultra-low temperature fracture toughness of welds in 316LN and 316LN-Mn stainless steels, a method to optimize the welding process by establishing a mapping relationship between welding parameters, microstructure, and fracture toughness was proposed. Welded joints of the two steels were prepared under three different heat input conditions, and the fracture toughness of the weld zone was tested at 4.2 K. The relationship between heat input, grain size, and fracture toughness was investigated through analysis of hardness, microstructure, and fracture morphology. The results show that with increasing heat input, the ultra-low temperature fracture toughness of the welds for both joints first increased and then decreased, while the grain size gradually increased. Further study found a critical transition zone for weld grain size: when the grain size is smaller than this zone, larger grain size leads to higher fracture toughness; when the grain size is larger than this zone, the opposite trend is observed. This research provides a reference for selecting welding parameters and quickly assessing the ultra-low temperature fracture toughness of welds based on welding heat input.

Key words: fusion reactor; austenitic stainless steel; fracture toughness; gas tungsten arc welding (GTAW); heat input

0 引言

核电作为一种高效的清洁能源一直备受关注。预计到2035年,我国核能发电量将占全国电力结构的10%左右;到2060年,这一比例预计将

提升至18%左右^[1]。聚变是当前核电领域重点关注的发电技术,与裂变相比,其效率更高、环境影响更小、燃料资源可持续,且安全性更好,实现可控核聚变的商业化应用一直是科研攻关的重要目标。环向场(toroidal field, TF)线圈是中国聚变

收稿日期:2025-05-19 修回日期:2025-07-11

基金项目:国家自然科学基金项目(52321002)

工程实验堆装置的关键部件之一,为聚变过程提供必要的磁约束环境。该线圈的壳体线圈盒主要采用 316LN 和 316LN-Mn 两种奥氏体不锈钢,这两类材料被认为是核聚变反应堆的理想结构材料之一^[2-8]。由于线圈盒结构复杂、尺寸庞大,其制造需依赖焊接连接,因此焊缝性能的考核尤为重要。然而,焊缝区域通常是结构的薄弱环节,其性能往往低于母材,需要通过优化焊接参数、焊材、保护气等工艺来提升焊缝性能。

断裂韧性是材料抵抗宏观裂纹失稳扩展能力的度量。TF 线圈盒在 4.2 K 超低温下工作,其结构形式复杂,且受焊接缺陷、焊接残余应力等因素影响,焊接部位易因断裂韧性下降而发生失效^[9]。因此,在实际生产中,316LN 和 316LN-Mn 两种母材对应焊接接头的低温断裂韧性备受关注。FU 等^[10]研究了 316LN 与 316LN-Mn 焊接接头显微组织对断裂韧性的影响,发现在 4.2 K 超低温下,微带与晶界位错堆积共同阻碍位错运动,从而降低焊缝断裂韧性,揭示了超低温导致焊缝断裂韧性下降的机理。SAKURAI 等^[11]对 316LN 及其焊接件的研究表明,氮的固溶强化作用使材料在 4.2 K 下表现出良好的强度-韧性平衡;且在 316LN 成分范围内,较高的 Ni、Mn 和 Mo 含量可通过提高层错能来改善低温断裂韧性,这为通过化学成分调控优化焊缝性能提供了思路。XIN 等^[12]通过比较 316LN 焊态与热处理态焊缝的组织与性能,发现热处理后焊缝枝晶粗化、织构强度降低、位错密度下降、晶粒取向改变,导致其 4.2 K 低温断裂韧性降至焊态的 54%,为焊缝热处理工艺优化提供了理论支撑。

虽然针对不锈钢焊缝的断裂韧性及其机理已有较多研究,但在低温条件下,焊接工艺参数的选择仍缺乏明确依据。因此,有必要建立热输入-

微观组织-断裂韧性之间的映射关系,以实现科学、严谨的工艺优化。为此,本文以 316LN 钢和 316LN-Mn 钢两种母材的焊接接头为研究对象,采用不同热输入的钨极惰性气体保护焊(gas tungsten arc welding, GTAW)制备焊接接头,并开展超低温断裂韧性试验,分析热输入、微观组织与断裂韧性之间的关系,从而为提升焊缝超低温断裂韧性、优化 316LN 和 316LN-Mn 钢的 GTAW 工艺参数提供科学依据。

1 试验方法

试验采用 316LN 和 316LN-Mn 奥氏体不锈钢,其化学成分与力学性能分别如表 1 和表 2 所示。采用 GTAW 制备相应焊接接头,试板尺寸均为 300 mm×150 mm×35 mm,采用 U 形坡口对接焊,焊丝为直径 1.0 mm 的 ER317L 型,坡口具体尺寸见图 1。焊丝选用依据为 ASME BPVC. II .C *Specifications for Welding Rods, Electrodes and Filler Metals*, 型号符合 AWS A5.9/A5.9M *Specification for Bare Stainless Steel Welding Electrodes and Rods* 标准,其熔敷金属的化学成分与力学性能亦列于表 1 和表 2。基于前期研究经验,选取 3 种不同热输入进行比较,相应焊缝的化学成分见表 1,具体焊接工艺参数见表 3,其中最大层间温度用于控制各焊道之间的温度。

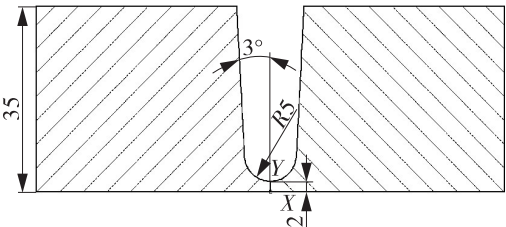


图1 GTAW 焊接坡口尺寸示意

Fig.1 Schematic of weld groove dimensions for GTAW

表 1 奥氏体不锈钢板材及填充焊丝的化学成分

Tab.1 Chemical composition of austenitic stainless steel plate and filler wire %

元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
316LN	0.022	0.420	1.720	0.020	0.002	17.190	13.210	2.640	0.170
316LN-Mn	0.015	0.320	9.680	0.019	<0.003	12.290	12.190	4.790	0.210
ER317L	0.009	0.470	5.100	0.013	0.009	18.870	17.130	4.100	0.180
316LN 焊缝	0.008	0.427	4.910	0.013	0.006	17.880	18.000	4.019	0.116
316LN-Mn 焊缝	0.028	0.417	5.555	0.013	0.007	17.610	18.030	4.187	0.127

表2 4.2 K下奥氏体不锈钢板材及填充焊丝的力学性能
Tab.2 Mechanical properties of austenitic stainless steel plate and filler wire at 4.2 K

项目	屈服强度 $R_{p0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长率 $A/\%$
316LN	1 091	1 556	53.3
316LN-Mn	1 140	1 587	45.9
ER317L	1 237	1 539	22.3

表3 GTAW工艺参数

Tab.3 GTAW process parameters

母材	试样 编号	热输入 $E/(\text{kJ}\cdot\text{mm}^{-1})$	焊道排布	最小预热 温度/ $^{\circ}\text{C}$	最大层间 温度 $T/^{\circ}\text{C}$	氩气 混合比/ $\%$	氩气流量 L/min	焊接方法
316LN	N1	0.86	一层两道	5	60	99.999	15-30	自动氩弧焊
316LN	N2	1.20	一层两道	5	60	99.999	15-30	自动氩弧焊
316LN	N3	1.46	一层两道	5	60	99.999	15-30	自动氩弧焊
316LN-Mn	M1	0.90	一层两道	5	60	99.999	15-30	自动氩弧焊
316LN-Mn	M2	1.20	一层两道	5	60	99.999	15-30	自动氩弧焊
316LN-Mn	M3	1.46	一层两道	5	60	99.999	15-30	自动氩弧焊

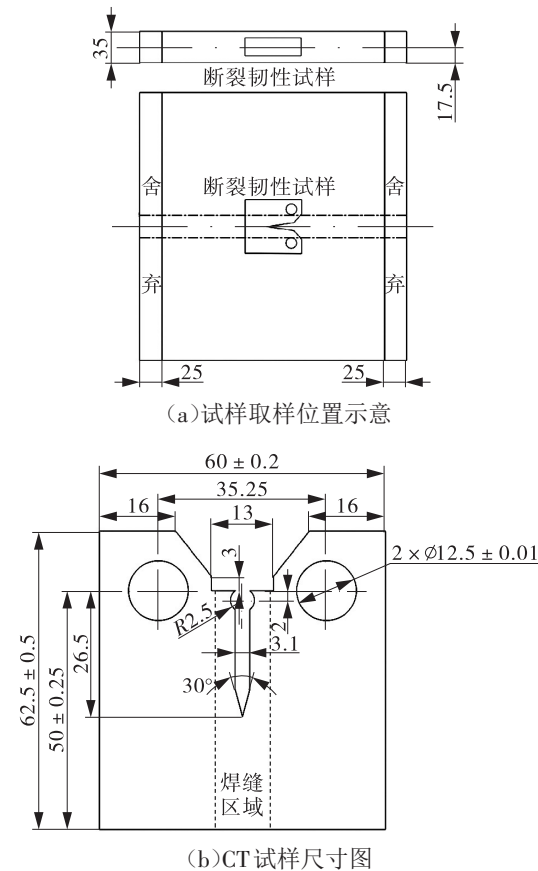


图2 K_{IC} 断裂韧性试样

Fig.2 K_{IC} fracture toughness specimen

试验结束后,对断裂试样进行组织与断口分析。首先对焊接接头进行机械打磨、抛光,再用王水($\text{HCl}:\text{HNO}_3=3:1$)腐蚀约 10~20 s,随后使用

试验选取 2 类母材共 6 块焊接接头试板作为测试对象,依据 JIS Z 2284—1998 *Method of elastic-plastic fracture toughness J_{IC} testing for metallic materials in liquid helium* 标准,在液氦环境(4.2 K)下进行了平面应变断裂韧性 K_{IC} 试验。试样为 25 mm 厚紧凑拉伸标准试样,从试板中部截取,具体取样位置及试样尺寸如图 2 所示。

ZEISS Axio Imager 2 光学显微镜观察焊缝微观组织。组织观察的取样位置如图 3 中虚线所示(试样尺寸为 15 mm×15 mm×3 mm,WM 为焊缝,BM 为母材)。采用 Wilson Instruments Tukon 2100 B 维氏硬度计(载荷 98 N,保持 5 s)测试焊接接头硬度。利用扫描电子显微镜(ZEISS Gemini 300)观察 K_{IC} 试样的断口形貌,以分析其断裂模式。

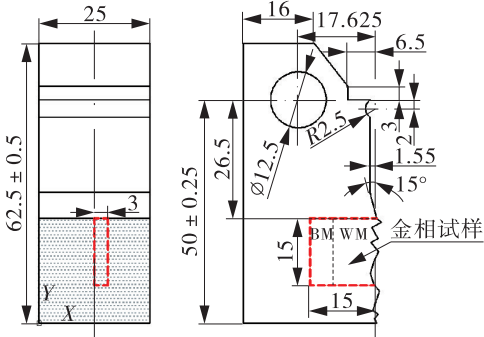


图3 金相试样取样位置示意

Fig.3 Schematic of sampling location for metallographic specimens

2 试验结果

2.1 断裂韧性试验结果

316LN 和 316LN-Mn 奥氏体不锈钢焊接接头在 4.2 K 下的超低温断裂韧性值 K_{IC} 测试结果如表 4 所示。在 4.2 K 下,随着 316LN 焊缝热输入从 0.86 kJ/mm 增至 1.46 kJ/mm,其断裂韧性值 K_{IC} 先升高后降低,并在 1.2 kJ/mm 处达到峰值。热输入对

316LN-Mn焊缝断裂韧性的影响也呈现相同趋势:当热输入从0.9 kJ/mm增加至1.46 kJ/mm时, K_{IC} 同样先升高后降低,峰值也出现在1.2 kJ/mm附近。

表4 热输入对316LN和316LN-Mn奥氏体不锈钢焊接接头 K_{IC} 值的影响

Tab.4 Effect of heat input on K_{IC} values of welded joints of 316LN and 316LN-Mn austenitic stainless steels

热输入 $E/(\text{kJ}\cdot\text{mm}^{-1})$	断裂韧性 $K_{IC}/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$	
	316LN	316LN-Mn
0.86	151	—
0.90	—	80
1.20	234	163
1.46	110	133

2.2 奥氏体不锈钢焊接接头硬度测试

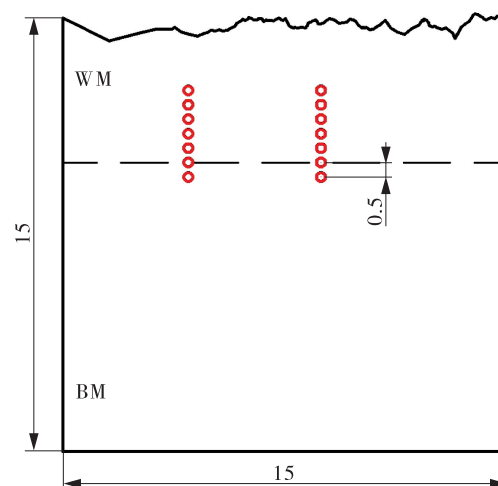
对不同热输入条件下的316LN和316LN-Mn焊接接头进行了显微硬度测试,测试位置分布如图4(a)所示。图中虚线为熔合线,其上方为焊缝,下方为母材;圆圈代表硬度测试点的位置。测试点主要分布在焊缝区域,并涵盖部分热影响区,点间距为0.5 mm。为降低数据的偶然性,在试样上间隔一定距离选取2条硬度测试线,最终结果取2条测试线的平均值。

316LN焊接接头显微硬度测试结果如图4(b)所示。可以看出,随着热输入的增加,316LN接头焊缝和热影响区的硬度均逐渐降低。316LN-Mn焊接接头显微硬度测试结果如图4(c)所示,其变化趋势与316LN接头相似:随着热输入增加,硬度同样呈现逐渐下降的趋势。

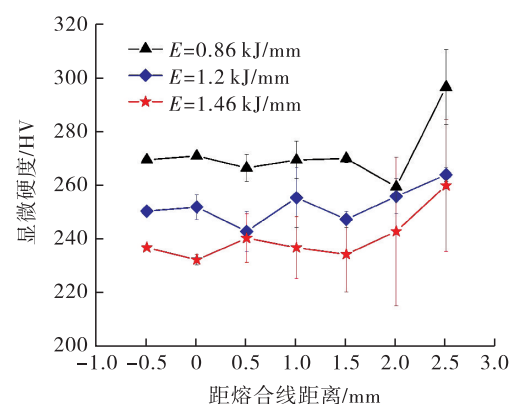
2.3 奥氏体不锈钢焊缝显微组织观察

图5和图6分别为316LN与316LN-Mn焊接接头焊缝区域的微观组织。从图5(a)~(c)中均可观察到多层多道焊留下的焊接热循环弧形痕迹。图5(a)对应热输入0.86 kJ/mm的焊缝微观组织,其主要组织为奥氏体,呈现胞状柱状晶及树枝状柱状晶形态。图5(b)(c)分别对应热输入1.2 kJ/mm和1.46 kJ/mm时的组织,其形貌与0.86 kJ/mm时相似。就晶粒尺寸而言,随着热输入增加,焊缝晶粒尺寸略有增大。

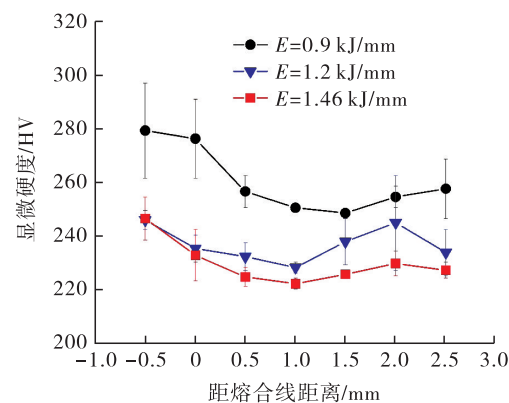
3种热输入下316LN-Mn焊缝的组织形貌如图6(a)~(c)所示。与316LN焊接接头类似,其焊缝微观组织也以奥氏体为主,同样呈现胞状及树枝状柱状晶形态,且晶粒尺寸随热输入增加而略有增大。



(a)测试位置分布示意图



(b)316LN焊接接头



(c)316LN-Mn焊接接头

图4 奥氏体不锈钢焊接接头显微硬度测试

Fig.4 Microhardness testing of austenitic stainless steel welded joints

2.4 奥氏体不锈钢焊接接头断口形貌观察

对不同热输入下2种焊接接头的超低温断裂韧性试样断口形貌进行观察。图7示出316LN焊接接头的断口形貌。可以看出,3种条件下的断口均存在大量韧窝,韧窝尺寸分布不均且具有一定深度。随着热输入增加,小尺寸韧窝的数量逐渐增多。

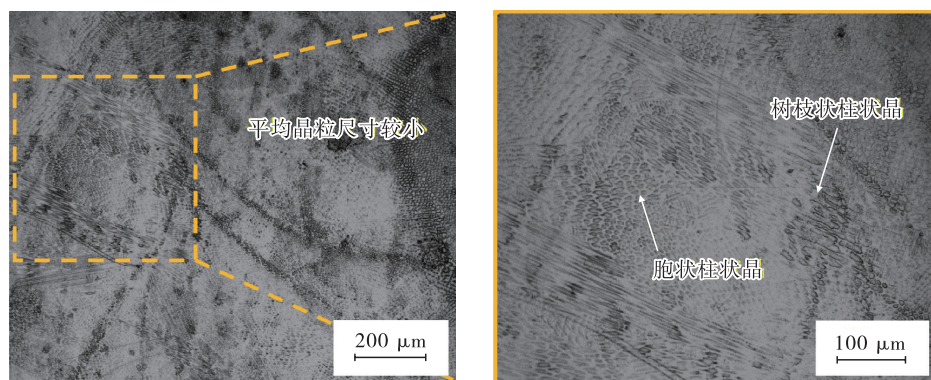
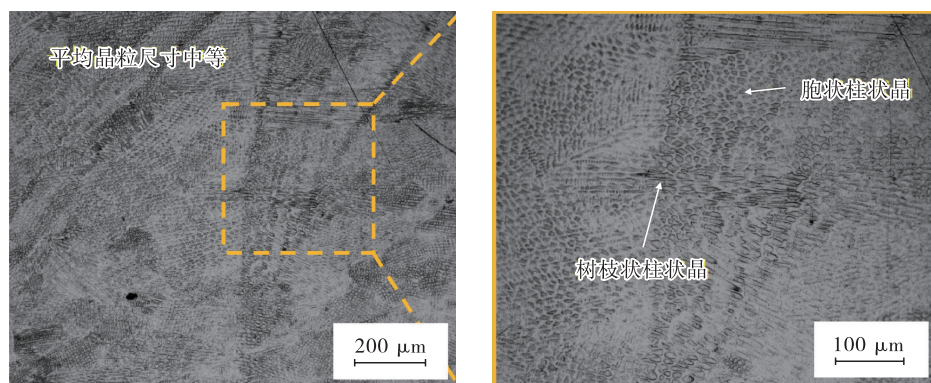
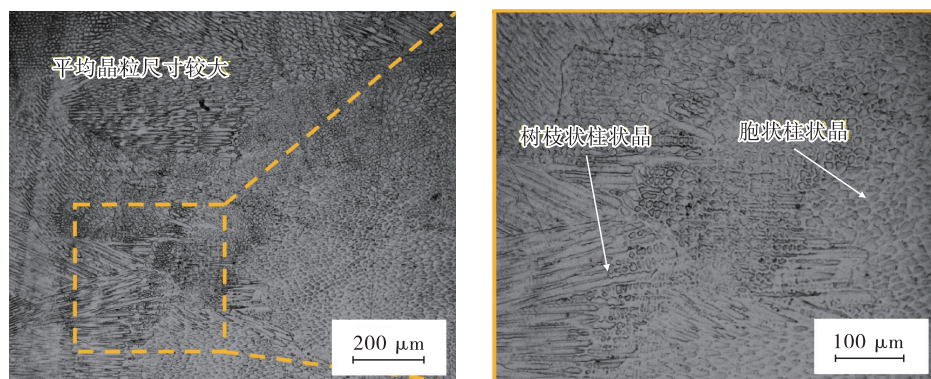
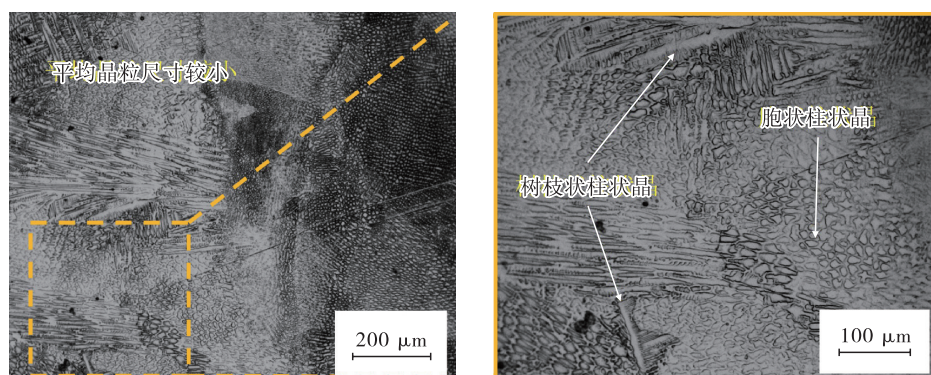
(a) N1, 热输入 $E=0.86$ kJ/mm(b) N2, 热输入 $E=1.20$ kJ/mm(c) N3, 热输入 $E=1.46$ kJ/mm

图5 316LN 奥氏体不锈钢焊接接头微观组织

Fig.5 Microstructure of 316LN austenitic stainless steel welded joint

(a) M1, 热输入 $E=0.90$ kJ/mm

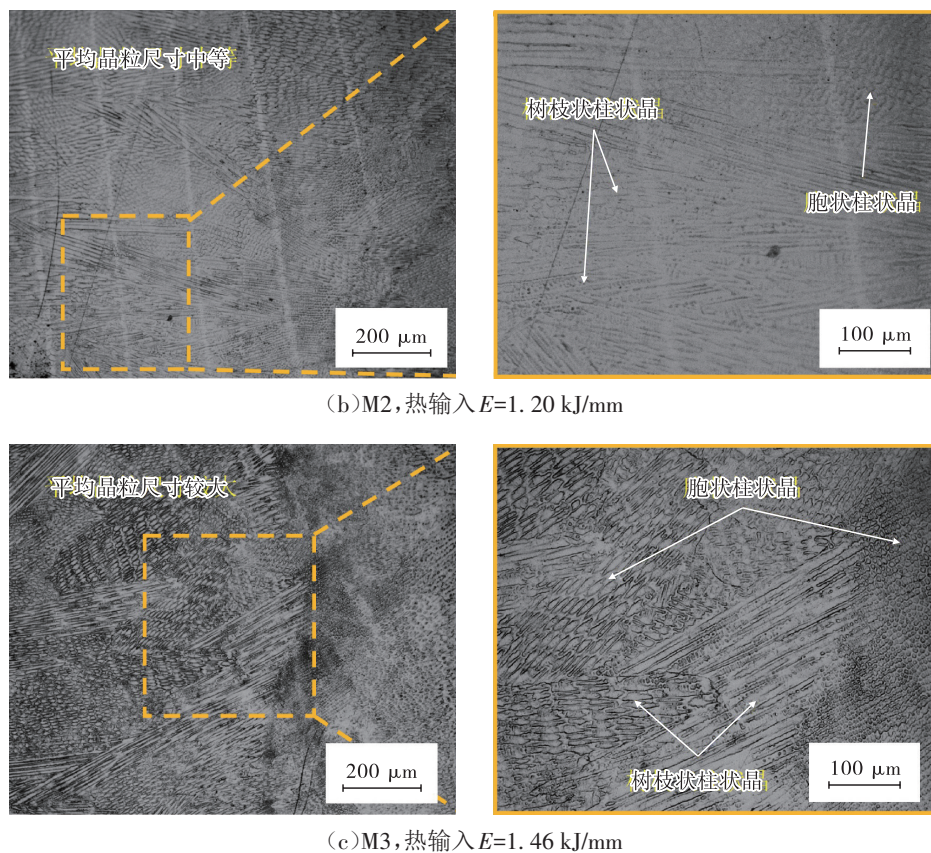


图6 316LN-Mn奥氏体不锈钢焊接接头微观组织

Fig.6 Microstructure of 316LN-Mn austenitic stainless steel welded joint

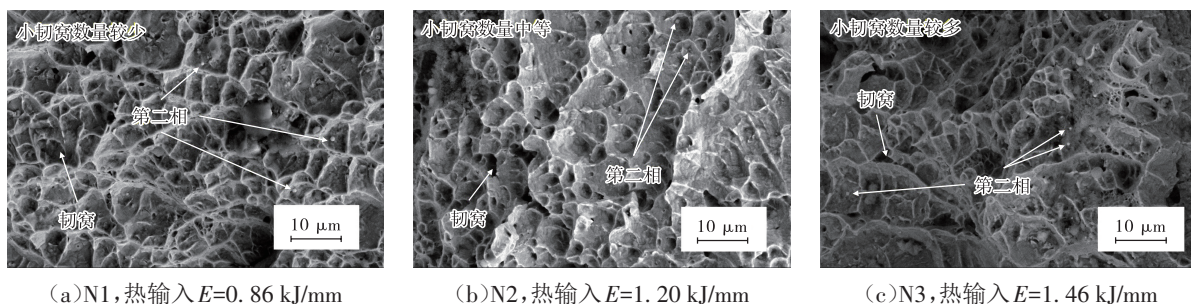


图7 316LN奥氏体不锈钢焊接接头断口形貌

Fig.7 Fracture surface morphology of 316LN austenitic stainless steel welded joint

部分韧窝底部可见球状第二相,经EDS分析判定其主要为碳化物、 σ 相及氧化物,成分结果如表5所示。图8示出316LN-Mn焊接接头的断口形貌,其与316LN断口相似,均呈现典型的韧性断

裂特征,且随着热输入增加,小韧窝数量同样逐渐增多。对韧窝底部球状第二相进行EDS分析,表明其主要为碳化物和氧化物,相应化学成分见表5,断口EDS分析结果如表6所示。

表5 第二相化学成分(原子百分比)

Tab.5 Chemical composition (atomic percentage) of second phase												%
元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Co	N	O	Fe
MC碳化物	36.69	0.29	0.43	0.50	0.66	4.55	3.76	12.81	1.34	—	20.46	18.51
M_3C_2 碳化物	32.34	0.84	3.66	0.07	4.84	13.48	10.50	—	—	—	—	33.78
σ 相	2.39	—	2.67	—	—	25.24	35.42	0.87	—	—	—	33.42
氧化物	—	0.33	0.50	0.39	0.44	2.29	0.44	0.17	—	8.98	83.87	2.59

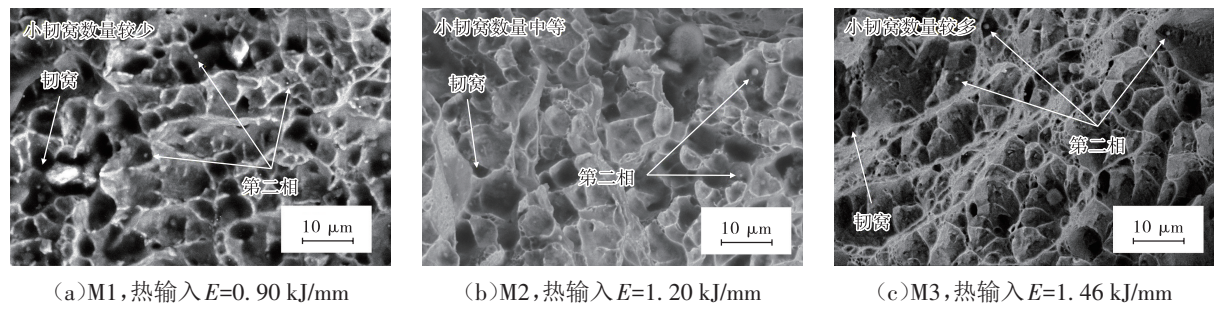


图8 316LN-Mn 奥氏体不锈钢焊接接头断口形貌

Fig.8 Fracture surface morphology of 316LN-Mn austenitic stainless steel welded joint

表6 断口第二相EDS与韧窝面积统计结果

Tab.6 EDS analysis of second phase on fracture surface and statistical results of dimple area

项目	母材类型	热输入 $E/(\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1})$	断裂韧性 $K_{IC}/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$	主要第二相类型	单个视场韧窝面积总和/ μm^2
N1	316LN	0.86	151	MC 碳化物	994.423 1
N2	316LN	1.20	234	MC 碳化物、氧化物	1 040.783 0
N3	316LN	1.46	110	σ 相、氧化物	755.802 4
M1	316LN-Mn	0.90	80	MC 碳化物、氧化物	966.100 1
M2	316LN-Mn	1.20	163	氧化物	1 143.789 0
M3	316LN-Mn	1.46	133	MC、 M_3C_2 碳化物	977.477 0

进一步采用 Image Pro Plus 软件对各接头断口 12 个视场的韧窝进行统计,结果见表 6。可以看出,随着断裂韧性值的增加,平均每个视场下的韧窝总面积也相应增大,表明断裂韧性与韧窝面积之间可能存在正相关关系,如图 9 所示。

3 分析与讨论

焊缝力学性能与其微观组织密切相关。结合焊缝微观组织分析结果可见,对于同种母材,随着热输入变化,焊缝组织形貌基本相似,但晶粒尺寸存在一定差异。为此,对 316LN 和 316LN-Mn 焊缝的晶粒尺寸进行了测量,结果如表 7 所示。可以看出,随着热输入增加,同种母材焊缝的晶粒尺寸逐渐增大。同时,图 10 示出热输入与两种焊缝的晶粒尺寸之间呈现明显的线性关系。

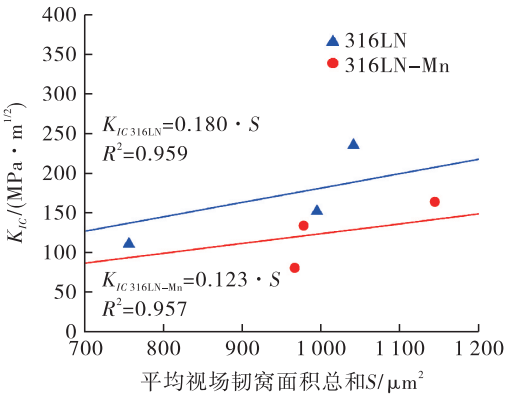


图9 316LN 和 316LN-Mn 奥氏体不锈钢焊接接头焊缝超低温断裂韧性与断口韧窝面积之间的关系

Fig.9 Relationship between ultra-low temperature fracture toughness and fracture surface dimple area of welds in 316LN and 316LN-Mn austenitic stainless steel welded joints

表7 焊缝晶粒尺寸与 $t_{8/5}$ 计算结果

Tab.7 Weld grain size and $t_{8/5}$ calculation results

项目	母材类型	热输入 $E/(\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1})$	断裂韧性 $K_{IC}/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$	平均晶粒尺寸/ μm	$t_{8/5}/\text{s}$
N1	316LN	0.86	151	90.85	2.03
N2	316LN	1.20	234	120.99	3.35
N3	316LN	1.46	110	149.12	4.49
M1	316LN-Mn	0.90	80	107.80	2.17
M2	316LN-Mn	1.20	163	123.67	3.35
M3	316LN-Mn	1.46	133	151.75	4.49

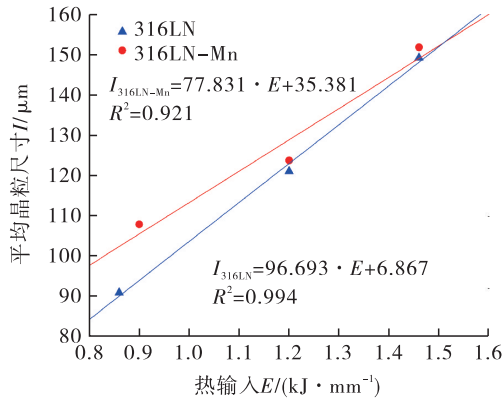


图10 热输入与316LN和316LN-Mn奥氏体不锈钢焊接接头焊缝平均晶粒尺寸的关系

Fig.10 Relationship between heat input and average grain size of welds in 316LN and 316LN-Mn austenitic stainless steel welded joints

为进一步阐明热输入与微观组织之间的关系,采用稻垣道夫^[13]提出的经验公式计算焊接过程中的冷却时间 $t_{8/5}$:

$$t_{8/5} = \frac{KE^n}{\beta(T-T_0)^2 [1 + 2 \arctan(\frac{\delta-\delta_0}{\alpha})/\pi]} \quad (1)$$

式中: $t_{8/5}$ 为冷却时间,s; K 为焊接能量系数,取1.35; E 为热输入,J/cm; n 为焊接热输入指数,取1.5; β 为接头系数,取1; T 为冷却区间特征温度,取600℃; T_0 为被焊件的初始温度,取60℃; δ 为板厚,取35mm; δ_0 为板厚补偿项,取14.6; α 为板厚修正系数,取6。上述参数的选取均依据所采用的焊接方法与接头类型,按相应规则确定^[13],计算结果如表7所示。

可以看出,随着热输入的增加,焊接冷却时间 $t_{8/5}$ 逐渐延长。在焊接过程中,焊缝材料经受高温作用,晶粒长大的驱动力主要源于高温下原子的热运动。温度升高使原子热运动加剧,晶界处的原子更容易迁移和重排,从而促进晶粒长大。因此,焊缝在高温下停留时间越长,晶粒长大程度越显著。随着热输入增加,冷却时间相应延长,即焊缝冷却速度降低,高温停留时间增加,这导致晶粒尺寸增大。此外,热输入增加也会提高焊接过程的热峰值温度。温度升高使原子热运动进一步加剧,晶界原子迁移与重排更加容易,从而使焊缝晶粒进一步长大。

通常情况下,不锈钢的晶粒尺寸越大,其在低温下的断裂韧性越好^[14-16]。然而,这一关系并非随晶粒尺寸增大而始终成立。例如,SOHRABI等^[17]研究了晶粒尺寸在0.5~192 μm范围内对

304L奥氏体不锈钢力学性能的影响,发现室温下奥氏体不锈钢存在一个晶粒尺寸过渡区;当晶粒尺寸超过该区域后,韧性与晶粒尺寸的关系出现显著反常,即随着晶粒尺寸增大,韧性反而下降。其他研究者也报道过类似结论^[18-19]。

因此,对于316LN和316LN-Mn奥氏体不锈钢焊缝,在4.2 K超低温下同样存在类似的晶粒尺寸过渡区。当热输入不高于1.2 kJ/mm时,晶粒尺寸尚未超过该过渡区,随着热输入增加、晶粒尺寸增大,断裂韧性相应提高。然而,当热输入增至1.46 kJ/mm时,晶粒尺寸已超出该过渡区,此时晶粒尺寸与断裂韧性之间的关系发生逆转,从而呈现断裂韧性下降的现象。因此,随着热输入增加,316LN和316LN-Mn奥氏体不锈钢焊缝的超低温断裂韧性呈现先升高后降低的趋势。

结合表7中316LN和316LN-Mn焊缝晶粒尺寸的测量结果,可确定2种奥氏体不锈钢焊缝在超低温下断裂韧性与晶粒尺寸的关系,并推断其晶粒尺寸过渡区的大致范围。对于316LN焊缝,热输入分别为0.86,1.2,1.46 kJ/mm时,对应的平均晶粒尺寸依次为90.85,120.99,149.12 μm。由此可推断,316LN焊缝的晶粒尺寸过渡区约在120 μm附近。类似地,316LN-Mn焊缝的晶粒尺寸过渡区约位于123 μm处。

此外,通过横向对比两种母材接头的超低温断裂韧性可以发现,在相同热输入条件下,316LN焊接接头的断裂韧性普遍高于316LN-Mn焊接接头,2种母材的主要化学成分差异在于Mn含量。对接头进行跨熔合线元素扫描表明,母材与焊缝之间存在Mn元素的偏析,且焊缝化学成分分析结果也显示两种焊缝中Mn元素含量差异较为显著(见表1)。因此,母材中的Mn含量会在一定程度上影响焊缝中的Mn含量。由于Mn元素可能影响第二相的形成与分布^[20-21],故在金相观察中进一步分析了试样的第二相种类、数量及分布情况,结果如表8所示。

可以看出,316LN-Mn接头的第二相种类和数量均多于316LN接头。第二相的存在会在测试过程中引起应力集中并形成缺陷,从而导致316LN-Mn接头的断裂韧性普遍较低。此外,在316LN接头中,第二相主要分布于亚晶内部;而在316LN-Mn接头中,随着Mn含量增加,第二相数量增多,并逐渐出现在亚晶界上。由于晶界、亚晶

界等结构在断裂过程中通过吸收能量来阻碍裂纹扩展,当第二相在亚晶界上形成时,会显著削弱晶界的强度,使裂纹更容易扩展,从而降低材料的断裂韧性。

表8 金相第二相分布情况

Tab.8 Distribution of second phase in microstructure

母材类型	试样编号	第二相种类	第二相数量	第二相分布位置
316LN	N1	M ₃ C ₂	较少	亚晶内部
316LN	N2	M ₇ C ₃ 、Al ₂ O ₃	较少	亚晶内部
316LN	N3	M ₃ C ₂	较少	亚晶内部
316LN-Mn	M1	MC、M ₃ C ₂ 、MC ₂	较多	亚晶晶界与内部
316LN-Mn	M2	M ₃ C ₂ 、MC	较多	亚晶晶界与内部
316LN-Mn	M3	M ₃ C ₂ 、M ₇ C ₃ 、MC、MC ₂ 、M ₃ C	较多	亚晶晶界与内部

4 结论

(1)通过微观表征与焊接热循环分析发现,在焊接过程中,随着热输入的增加,316LN和316LN-Mn焊缝的高温停留时间延长,焊缝晶粒尺寸逐渐增大,硬度相应下降。此外,热输入与焊缝晶粒尺寸之间存在明显的线性关系,从而可通过热输入快速评估焊缝晶粒尺寸的范围。

(2)通过控制变量法研究热输入与超低温断裂韧性的关系发现,随着热输入的增加,316LN和316LN-Mn焊接接头在4.2 K下的焊缝断裂韧性均呈现先升高后降低的趋势,并在热输入为1.2 kJ/mm时达到峰值;对断口韧窝的统计结果表明,韧窝面积与断裂韧性值之间具有正相关关系。

(3)基于焊缝晶粒尺寸测量与超低温断裂韧性分析,发现在4.2 K下,晶粒尺寸对316LN和316LN-Mn两种奥氏体不锈钢焊缝断裂韧性的影响均存在一个过渡区,分别位于120 μm和123 μm附近。该结果可为快速评估焊缝断裂韧性水平及优化焊接工艺提供依据。

(4)通过对比2种母材的元素成分及焊缝超低温断裂韧性可知,母材中Mn元素含量的差异会影响其在焊缝中的含量,进而导致第二相的种类、数量与分布发生变化。与316LN焊缝相比,316LN-Mn焊缝中第二相种类更多、数量更大,并且第二相逐渐在亚晶界上形成,这些因素共同降低了焊缝的超低温断裂韧性。

参考文献:

[1] 刘洋.中国核能行业协会:2035年我国核电占比将达10%[N].机电商报,2024-04-22(A06).

LIU Y. China nuclear energy industry association: Chinese nuclear power will account for 10% in 2035 [N].Machinery & Electronics Business, 2024-04-22 (A06).

[2] GADDAM S, HARIDAS R S, SANABRIA C, et al. Friction stir welding of SS 316 LN and Nitronic 50 jacket sections for application in superconducting fusion magnet systems[J].Materials & Design, 2022, 221:110949.

[3] HUANG J, FANG C, LIU J, et al.Study on molten pool flow and hot cracking of narrow gap laser welding of 316LN stainless steel for fusion reactor[J].Optics & Laser Technology, 2025, 181(Part A):111633.

[4] WANG W J, ZHAO C Y, JIN J, et al.The research on high-strength CICC jackets with YS>1500 MPa at 4.2 K for future fusion applications [J]. Nuclear Materials and Energy, 2023, 36:101474.

[5] SHENG S L, QIAO Y X, ZHAI R Z, et al.Processing map and dynamic recrystallization behaviours of 316LN-Mn austenitic stainless steel[J].International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2023, 30(12):2386-2396.

[6] 张毅,张威,尹鹏,等.热机疲劳加载后316L拉伸性能与剩余疲劳寿命预测方法[J].压力容器,2023, 40(5):8-18.

ZHANG Y, ZHANG W, YIN P, et al. Tensile properties and remaining fatigue life prediction method of 316L after thermo-mechanical fatigue loading[J].Pressure Vessel Technology, 2023, 40(5): 8-18.

[7] 刘闯,臧家林,张福海,等.核电主蒸汽阀站中电磁先导阀的动态响应仿真研究[J].机电工程,2024, 41(5):894-900.

LIU C, ZANG J L, ZHANG F H, et al.Simulation on

- dynamic response of solenoid pilot valve in main steam valve set of nuclear power plant[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2024, 41(5): 894–900.
- [8] 万益恒,薛金山,张大勇,等.基于KPCA的核电厂隔膜压缩机缸盖螺栓松动故障诊断研究[J]. *流体机械*, 2024, 52(11): 87–96.
- WAN Y H, XUE J S, ZHANG D Y, et al. Research on bolts fault diagnosis of diaphragm compressor cylinder head in nuclear power plant based on KPCA[J]. *Fluid Machinery*, 2024, 52(11): 87–96.
- [9] 裴冲,王东坡,邓彩艳,等.不同焊接位置海洋平台用钢焊缝金属低温断裂韧性[J]. *焊接学报*, 2016, 37(3): 111–114.
- PEI C, WANG D P, DENG C Y, et al. Low temperature fracture toughness of welding metal of offshore platform steel in different welding positions [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2016, 37(3): 111–114.
- [10] FU Y, LIU Q, LV Y B, et al. Microstructural and chemical dependences of fracture toughness in stainless steel welds at 4.2 K[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2024, 305: 110207.
- [11] SAKURAI T, UMEZAWA O, ONO Y. Strength and fracture toughness of type 304 and 316 austenitic stainless steels at 4.2 K[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2024, 1302(1): 012002.
- [12] XIN J J, FANG C, HUANG C J, et al. Correlation between microstructure evolution and cryogenic fracture toughness in aging ITER-grade 316LN weldments[J]. *Cryogenics*, 2018, 96: 144–150.
- [13] 杜则裕. *焊接冶金学——基本原理*[M]. 北京:机械工业出版社, 2018.
- DU Z Y. *Welding Metallurgy—Fundamentals* [M]. Beijing: China Machine Press, 2018.
- [14] 曹陆军,周玉成,孙世豪,等.超低温压力容器用钢研究现状[J]. *特殊钢*, 2025, 46(2): 1–10.
- CAO L J, ZHOU Y C, SUN S H, et al. Research status of ultra-low temperature pressure vessel steel [J]. *Special Steel*, 2025, 46(2): 1–10.
- [15] 杨乘东,茹祥塘,唐伟宝.核岛主设备不锈钢带极埋弧堆焊剥离机理分析[J]. *压力容器*, 2023, 40(6): 22–26.
- YANG C D, RU X K, TANG W B. Disbonding mechanism analysis of stainless steel cladding by submerged arc welding with band-electrode [J]. *Pressure Vessel Technology*, 2023, 40(6): 22–26.
- [16] WEISS K P, KRASKOWSKI A, KOUKOLÍKOVÁ M, et al. Mechanical properties after thermomechanical processing of cryogenic high-strength materials for magnet application [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2021, 168: 112599.
- [17] SOHRABI M J, MIRAZDEH H, SADEGHPOUR S, et al. Grain size dependent mechanical behavior and TRIP effect in a metastable austenitic stainless steel [J]. *International Journal of Plasticity*, 2023, 160: 103502.
- [18] NOHARA K, ONO Y, OHASHI N. Composition and grain size dependencies of strain-induced martensitic transformation in metastable austenitic stainless steels [J]. *Tetsu to Hagane*, 1977, 63(5): 772–782.
- [19] NAGHIZADEH M, MIRZADEH H. Effects of grain size on mechanical properties and work-hardening behavior of AISI 304 austenitic stainless steel [J]. *Steel Research International*, 2019, 90(10): 1900153.
- [20] 陈尹泽,杜雪岩. Mn 元素对 20Cr–18Ni–6Mo 奥氏体不锈钢力学性能的影响[J]. *中国铸造装备与技术*, 2009(6): 26–28.
- CHEN Y Z, DU X Y. Effects of Mn on mechanics properties of 20Cr–18Ni–6Mo austenitic stainless steel [J]. *China Foundry Machinery & Technology*, 2009(6): 26–28.
- [21] 王东波,高站起,魏炜,等. Mn 对电弧增材 N50 组织与低温性能的影响[J]. *低温与超导*, 2024, 52(10): 49–55.
- WANG D B, GAO Z Q, WEI W, et al. Effect of Mn on the microstructure and cryogenic mechanical properties of N50 stainless steel fabricated by TIG additive manufacturing [J]. *Cryogenics & Superconductivity*, 2024, 52(10): 49–55.

作者简介:夏海鑫(2001),男,硕士研究生,主要从事核电奥氏体不锈钢低温断裂韧性性能研究,通信地址:200237上海市徐汇区梅陇路130号华东理工大学, E-mail: 2990790917@qq.com。

通信作者:朱明亮(1984),男,教授,主要研究方向为机械结构疲劳与断裂,通信地址:200237上海市徐汇区梅陇路130号华东理工大学, E-mail: mlzhu@ecust.edu.cn。

本文引用格式:

夏海鑫,李子昕,付阳,等.氩弧焊热输入对不锈钢焊缝4.2 K下断裂韧性的影响[J]. *压力容器*, 2025, 42(8): 14–23.

XIA Haixin, LI Zixin, FU Yang, et al. Effect of GTAW heat input on fracture toughness of stainless steel welds at 4.2 K[J]. *Pressure Vessel Technology*, 2025, 42(8): 14–23.