

文章编号:1673-2812(2025)02-0229-06

大厚度 DH36-Z35 钢打底焊不清根焊接接头微观组织与力学性能

朱 军^{1,2}, 方晨鹏¹, 连江滨³, 姚秋峰⁴, 叶建明⁴, 罗 伟¹, 窦战国¹

(1. 浙江大学 材料科学与工程学院, 浙江 杭州 310058; 2. 南通泰胜蓝岛海洋工程有限公司, 江苏 启东 226259;
3. 浙江安特磁材股份有限公司, 浙江 诸暨, 311800; 4. 浙江创立汽车空调有限公司, 浙江 龙泉 323700)

【摘要】 本研究采用半自动熔化极气体保护焊打底(焊丝 CHW50C6SM) + 自动埋弧焊 SAW 填充和盖面对正火态 60 mm 厚 DH36-Z35 海工钢对接平焊, 研究打底焊不清根对焊接接头微观组织和力学性能的影响。结果表明: 焊接接头焊缝组织主要为先共析和针状铁素体, 热影响粗晶区组织为板条和粒状贝氏体, 细晶区为等轴铁素体和珠光体。打底焊不清根焊接接头的强度、塑性和 -20°C 冲击韧性与清根接头相当, 满足焊接相关制造要求, 可取消打底焊清根降低生产成本。

【关键词】 海工钢; 不清根焊接; 大厚度; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG444.72 文献标志码: A DOI: 10.14136/j.cnki.issn1673-2812.2025.02.009

Microstructure and Mechanical Properties of Heavy Thickness Steel DH36-Z35 Welded Joint Without Back Chipping

ZHU Jun^{1,2}, FANG Chenpeng¹, LIAN Jiangbin³, YAO Qiufeng⁴, YE Jianming⁴,
LUO Wei¹, DOU Zhanguo¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Nantong Taisheng Blue Island Offshore Co., Ltd., Qidong 226259, China; 3. Zhejiang Ante Magnetic Material Co., Ltd., Zhuji 311800, China;
4. Zhejiang Chuangli Automotive Air Conditioner Co., Ltd., Longquan 323700, China)

【Abstract】 Semi-automatic gas metal arc bottom welding (CHW50C6SM welding wire) + automatic submerged arc fill and cover welding were used to butt flat welding of normalized marine engineering steel DH36-Z35 with 60 mm thickness. The microstructure and mechanical properties of welded joint without back chipping were investigated. The results showed that the weld zone of joint was mainly composed of proeutectoid ferrite and acicular ferrite. The coarse-grained heat affect zone was composed of lath bainite and granular bainite, and the fine-grained zone was composed of ferrite and pearlite. The strength, plasticity and impact toughness at -20°C of the joint without back chipping were equivalent to the joint with back chipping, all of which met the requirements of relevant standards, and the bottom layer welding without back chipping technology can be canceled to reduce production costs.

【Key words】 Ocean engineering steel; Welding without back chipping; Heavy thickness; Microstructure; Mechanical properties

1 前 言

海上风电开发是我国资源可持续利用的重要战略依托^[1-2]。我国近海可利用资源开发已趋近饱和, 海洋风电进一步向深远海进军, 风电承载基础所需海洋工

收稿日期: 2024-04-11; 修订日期: 2024-05-25

基金项目: 浙江大学龙泉创新中心项目(ZDLQ 2022010); 浙江领雁研发攻关计划项目(2022C01149)

作者简介: 朱军(1979—), 男, 正高级工程师, 研究方向: 大承载海工结构与船舶先进制造技术。E-mail: 18051609598@163.com。

通信作者: 窦战国(1999—), 硕士研究生, 研究方向: 金属材料微结构与性能。E-mail: hzlw6050@163.com。

程用钢(海工钢)厚度越来越大,对力学性能提出更高要求^[3]。风电承载基础依靠焊接制成,其焊接制造技术主要包括埋弧焊(submerged arc welding, SAW)、窄间隙焊和气电立焊等^[4-5],尽管窄间隙焊和气电立焊在效率上具有优势,但因其对焊接位置和焊接装备有特殊要求,因而实际应用受到很大制约,在焊接生产中的应用远不及 SAW 广泛。

目前国内外海上风电承载基础以屈服强度 R_{eH} 355 MPa 级海工钢为主,如导管架、塔架和管桩,材质多用耐蚀性良好的 DH36 海工钢(包括 Z25 和 Z35)。DH36 熔化焊焊接性良好,但大厚板焊接时,焊接拘束度大会导致很大的焊接应力,焊接质量控制难度成倍增加,为减弱焊接应力的不利影响,焊接生产中通常进行焊前预热和焊后热处理^[6-7]。此外,大厚板对接焊时,为确保根部良好的熔透性以及焊接缺陷和力学性能控制,SAW 多与半自动熔化极气体保护焊(gas metal arc welding, GMAW)等组合,为保证焊接坡口质量及清除渗碳层(渗碳层对塑性和韧性不利),GMAW 打底焊后需要对焊接坡口进行碳弧气刨清根和打磨处理,因此,中厚及大厚高强海工钢传统焊接技术通常包括焊前预热、打底焊清根和焊后热处理,生产周期长,生产效率较低,研发打底焊无清根的高效焊接技术很有意义。尽管已有部分中厚板不清根焊接工艺的报道^[8-12],但不清根工艺对焊接接头微观组织和力学性能的影响有待进一步研究。本研究对 60 mm 厚正火态 DH36-Z35 海工钢对接平焊,半自动 GMAW 打底+自动 SAW 填充和盖面(焊丝 CHW-S3,焊剂 CHF101),重点研究打底焊不清根-接头微观组织-力学性能的内在关联,弥补开发大型海工承载结构短流程焊接技术的理论空白。

2 实验材料与 方法

2.1 实验材料

本研究母材为舞钢生产的 DH36-Z35 海工钢,厚度 60 mm,正火态,其主要化学成分和力学性能均符合 GB/T 712-2022《船舶及海洋工程用结构钢》,如表 1、2 所示。半自动混合气体熔化极保护焊 GMAW (80% CO₂ + 20% Ar) 打底,埋弧自动焊 SAW 填充和盖面,GMAW 焊丝直径 Φ 1.2 mm,大西洋 CHW50C6SM;SAW 焊丝直径 Φ 4.0 mm,大西洋 CHW-S3,焊剂大西洋 CHF101,焊丝化学成分如表 3 所示。

2.2 焊接工艺及实验设备

焊接实验采用标准试板,尺寸为 700 mm ×

表 1 DH36-Z35 化学成分

Table 1 Chemical composition of DH36-Z35 wt%

Elements	C	Mn	Si	V	Al	Nb	Ti	P	S	Fe
Content	0.14	1.51	0.4	0.057	0.028	0.02	0.014	0.015	0.007	Allowance

表 2 DH36-Z35 力学性能

Table 2 Mechanical properties of DH36-Z35

Material grades	R_{eH} /MPa	R_m /MPa	A/%	A_{KV2} /J (-20 °C)
DH36-Z35	438	535	21	205

表 3 焊丝化学成分

Table 3 Chemical composition of welding wire wt%

Material grades	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Cu	Fe
CHW50C6SM	0.075	1.45	0.88	0.015	0.013	0.021	0.02	0.2	Allowance
CHWS3	0.076	1.58	0.05	0.013	0.011	0.01	0.01	0.04	ance

200 mm × 60 mm,焊接坡口为带 2 mm 钝边非对称 X 坡口,见图 1,对接接头 GMAW(打底)+SAW(填充和盖面)双面多层多道平焊,GMAW 打底,焊前进行 70 °C 预热,焊接层间温度 200 °C。采用 BZ-WPS-1 焊接工艺,直流反接,焊接规范参数详见表 4,其中 1[#] 试板打底焊后不清焊根,2[#] 打底焊后采用碳弧气刨清根和机械打磨清理。

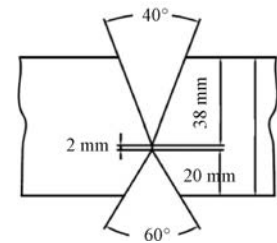


图 1 焊接坡口

Fig. 1 Welding groove diagram

表 4 BZ-WPS-1 焊接规范参数

Table 4 Welding parameters of BZ-WPS-1

Welding process	Weld passes/ Weld layers	Current/ V	Voltage/ A	Welding speed/ (mm·min ⁻¹)	Heat input/ (KJ·cm ⁻¹)
SAW	2 (root)	33	720	360	39.6
	3 (fill)	33	760	380	39.6
	4 (cap)	33	650	410	31.39
GMAW	1 (seal)	33.5	380	340	22.47
	2' (root)	29	710	410	30.13
	2' (fill)	32	740	390	36.43
	3' (cap)	33	680	400	33.66

焊前将坡口两侧 100 mm 范围内铁锈、油污等清理干净,半自动混合气体 GMAW 打底焊 1 层共 1 道,SAW 正面填充及盖面 3 层共熔敷 9 道:填充第 1 层熔敷 2 道,第 2 层时熔敷 3 道,盖面焊接 1 层熔敷 4 道;背面焊接 3 层共熔敷 8 道:填充第 1 层熔敷 2 道,第 2 层及盖面 1 层各熔敷 3 道。

参照 NB/T 47014—2023《承压设备焊接工艺评定》评价焊接工艺质量(力学性能),焊接接头拉伸试验按照 GB/T 228.1—2021《金属材料拉伸试验第一部分:室温试验方法》进行。弯曲试样设计了标准态(机加工时试样表面粗糙度需要满足要求)和焊接态(焊后对接头不作任何处理)两种,按照 GB/T 2653—2008《焊接接头弯曲试验方法》进行标准和更严苛条件下两级试验。焊接接头冲击试验按照 GB/T 229—2020《金属材料拉伸试验 夏比摆锤冲击试验方法》进行。力学性能试验设备为华越 WDW-50M 微机控制电子万能试验机(拉伸、弯曲)和 JB-W300Y 低温全自动冲击试验机(冲击)。

微观测试主要包括焊接接头(焊缝、热影响区 HAZ 和母材)物相、显微组织和力学性能试样断口的观察与表征,测试设备为光学显微镜(OM, Leica DM2700)、扫描电镜(SEM, JSM-IT210)和 X 射线衍射仪(XRD, Bruker D8 Advance)。

3 实验结果与分析

3.1 焊接接头力学性能测试分析

由表 5~7 可知,所有焊接接头抗拉强度 R_m 均高于正火态母材,且拉伸断裂部位均位于母材,表明焊接接头未出现软化。拉伸、弯曲和 $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 低温冲击试验结果均高于 NB/T 47014—2023 规定值,说明 1[#] 和 2[#] 焊接试板的焊接材料和焊接工艺设计合理,可以满足焊接产品制造要求。

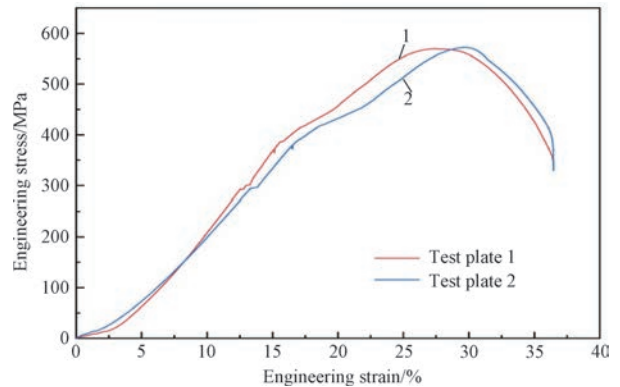


图 2 拉伸试验应力-应变曲线

Fig. 2 Tensile test stress and strain curves

表 5 焊接试板拉伸试验结果

Table 5 Results of tensile tests

Test plate No.	Sample No.	R_{eH}/MPa		R_m/MPa		Yield-to-strength ratio		A/%		Break location
		Mean	Mean	Mean	Mean	Mean	Mean	Mean	Mean	
1	1-1	435		556		0.78		36.5		base metal
	1-2	421	435	545	552	0.77	0.79	36.5	36	
	1-3	458		555		0.83		35		
	1-4	427		550		0.78		36		
2	2-1	451		559		0.81		38.5		base metal
	2-2	441	446	559	563	0.79	0.79	34.5	36.4	
	2-3	443		565		0.78		35.5		
	2-4	450		567		0.79		37		

表 6 焊接试板弯曲试验结果

Table 6 Results of bending tests

Test plate No.	Sample No.	Thickness/mm	Bend head diameter/mm	$\alpha/(\text{ }^\circ)$	Note
1	1-1		48 (standard value)	180	No opening defects
	1-2		48	180	
	1-3	10	40	180	
	Upper 1-4		40 (standard value)	180	
	Bottom 1-4		30	180	
2	2-1		48 (standard value)	180	1 opening defect with, 1.2 mm
	2-2		40	180	No opening defects
	2-3	10	40	180	
	Upper 2-4		40 (standard value)	180	
	Bottom 2-4		30	180	

Note: The welded joint was equally divided into 2 bending samples along the thickness direction, marked upper and bottom respectively; (2) Standard value of bend head diameter was the value specified in the relevant standard.

由图 2 的 1[#] 和 2[#] 焊接试板拉伸应力-应变曲线可知,两者拉伸形变行为变化趋势一致。由表 5 可知,2[#] R_{eH} 和 R_m 平均值分别为 446 MPa 和 563 MPa,强度高于 1[#],但差异很小。除强度外,屈服比(R_{eH}/R_m)

也是评价力学性能的重要指标,屈服比越低说明接头抵抗塑性失稳导致结构断裂的能力越强^[13],1[#] 和 2[#] 屈服比相同,均为 0.79。另外,1[#] 和 2[#] 断后伸长率 A 相差不大,均高于正火态母材规定的 21%,表 6 显示,

表 7 焊接试板冲击试验结果

Table 7 Results of impact tests

Test plate No.	Sample No.	Notch depth/mm	Notch position	$A_{KV2}/(-20\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{J}^{-1})$	
					Mean
1	1-1	2	Upper weld	37	112
	1-2		Middle weld	161	
	1-3		Bottom weld	139	
	1-4		Upper HAZ	128	
	1-5		Middle HAZ	256	
	1-6		Bottom HAZ	248	
2	2-1	2	Upper weld	135	115
	2-2		Middle weld	91	
	2-3		Bottom weld	119	
	2-4		Upper HAZ	173	
	2-5		Middle HAZ	240	
	2-6		Bottom HAZ	244	

1# 和 2# 焊接接头塑性优异,两者差异不大。由表 7 可知,1# 和 2# 焊缝 A_{KV2} 分别为 112 J 和 115 J,HAZ A_{KV2} 分别为 211 J 和 219 J,二者低温冲击韧性差异很小,1# 和 2# HAZ $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冲击功 A_{KV2} 明显高于焊缝。从数据平均值分析,两副焊接接头强度、塑性和低温冲击韧性差异不大,说明采用 BZ-WPS-1 焊接工艺,打底焊是否清根对焊接接头综合力学性能影响很小,

因此可取消打底焊清根,以缩短焊接制造周期,提高焊接效率和降低成本。

3.2 断口分析

由图 3 可知,1# 和 2# 拉伸试样断口都出现大量韧窝和纤维状撕裂棱,表明断裂方式为韧性断裂,这与前述拉伸试样均具有良好的强度和塑性结果相吻合。由图 4(a)、(b)可知,1# 和 2# 焊缝断口韧窝特征明显,断裂方式均为韧性断裂;而由图 4(c)、(d)可知两副焊接接头 HAZ 断口也以韧窝为主,但相较于焊缝断口而言,HAZ 断口韧窝尺寸更大,对应的冲击功 A_{KV2} 更高,以上断口分析结论与冲击试验结果一致。

3.3 焊接接头微观组织观察分析

XRD 分析结果表明 1# 和 2# 焊接接头打底、填充和盖面焊层物相均为 $\alpha\text{-Fe}$,两者无明显差异。由图 5(a)、(b)可知,1# 和 2# 盖面焊缝均由少量先共析铁素体 PF 和大量针状铁素体 AF 构成,一些研究表明^[14-17],AF 因其“互锁交织”状的特殊结构,能有效地阻碍位错运动和抑制裂纹扩展,使焊接接头具有高强度、高硬度和高韧性,是比较理想的焊缝组织。

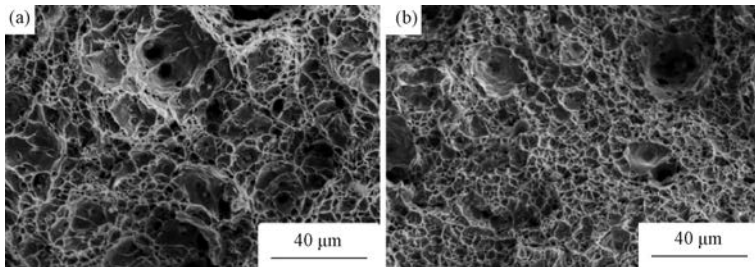


图 3 拉伸断口的 SEM 照片 (a) 1# ;(b) 2#

Fig. 3 SEM images of tensile fracture (a) 1# ; (b) 2#

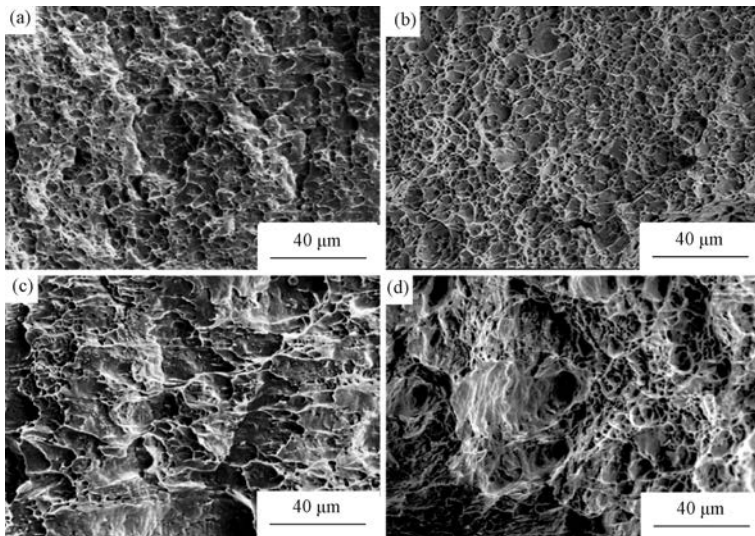


图 4 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冲击断口 SEM 照片焊缝 (a) 1# 和 (b) 2# ; HAZ (c) 1# 和 (d) 2#

Fig. 4 SEM images of impact fracture at $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ weld zone (a) 1# and (b) 2# ; HAZ (c) 1# and (d) 2#

由图 5(c)、(d)可知,填充焊缝主要由 PF、AF、侧板条铁素体 FSP 和 M-A 组元构成,相较于盖面层而言,焊缝析出相类型和比例明显改变,这主要是由于大厚度多层(道)焊层间预热和正火热处理改变降低了焊后冷却速度,PF 和 FSP 相变温度较高,含量升

高,而 AF 相变温度较低,因而含量降低。由图 5(e)、(f)可知,1[#] 和 2[#] 打底层焊缝由细小等轴铁素体 F 和 AF 构成,二者并无明显差异。综合以上分析结论来看,打底焊清根与不清根对焊缝析出相类型和比例的影响不大。

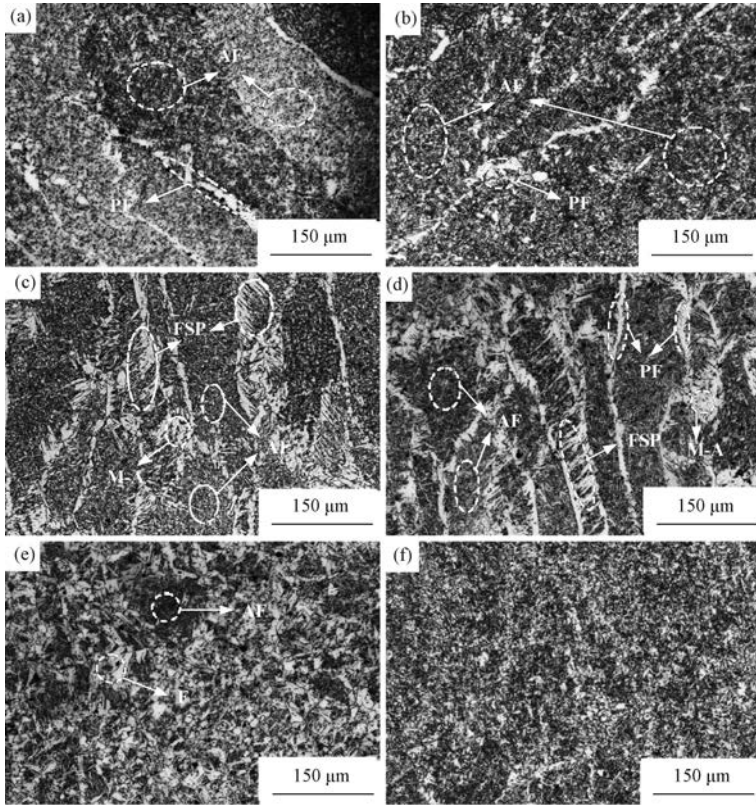


图 5 焊缝微观组织盖面层 (a) 1[#] 和(b) 2[#];填充层 (c) 1[#] 和(d) 2[#];打底层 (e) 1[#] 和(f) 2[#]
Fig. 5 Microstructure of weld zone cover welding layer (a) 1[#] and (b) 2[#]; fill welding layer (c) 1[#] and (d) 2[#]; bottom welding layer (e) 1[#] and (f) 2[#]

由图 6 可知,1[#] 和 2[#] CGHAZ 均由板条贝氏体 LB、粒状贝氏体 GB、M-A 组元和少量 P 构成,原奥氏体晶界明显,晶粒尺寸较大,两者没有明显差异,LB 板条束具有大量高密度位错,能对原奥氏体晶粒进行有效分割。此外,点状 M-A 组元也能有效抑制裂纹扩展,二者共同作用提高了 HAZ 冲击韧性,分析结论与冲击试验结果相吻合。由图 7 可知,1[#] 和 2[#] IGHAZ

主要由无碳贝氏体 B、GB、F 和 P 构成,二者差异不大,而 FGHAZ 均由细小的等轴 F 和 P 构成,晶粒细小且分布均匀,细晶强化作用有效提高焊接接头 HAZ 的综合力学性能,这也是 HAZ -20 °C A_{KV2} 很高的另一个重要原因。综合以上分析结果来看,1[#] 和 2[#] HAZ 析出相类型和比例差异很小,说明打底层清根与不清根对焊接接头 HAZ 微观组织影响不大。

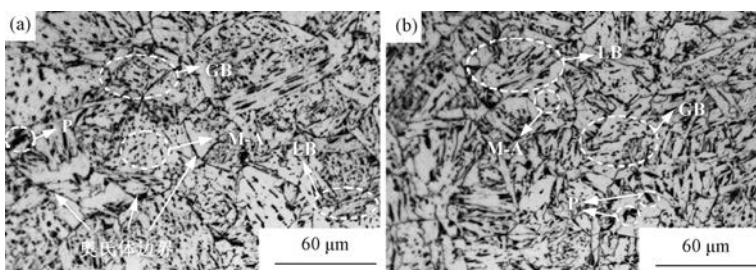


图 6 热影响区粗晶区微观组织 (a) 1[#]; (b) 2[#]

Fig. 6 Microstructure of CGHAZ (a) 1[#]; (b) 2[#]

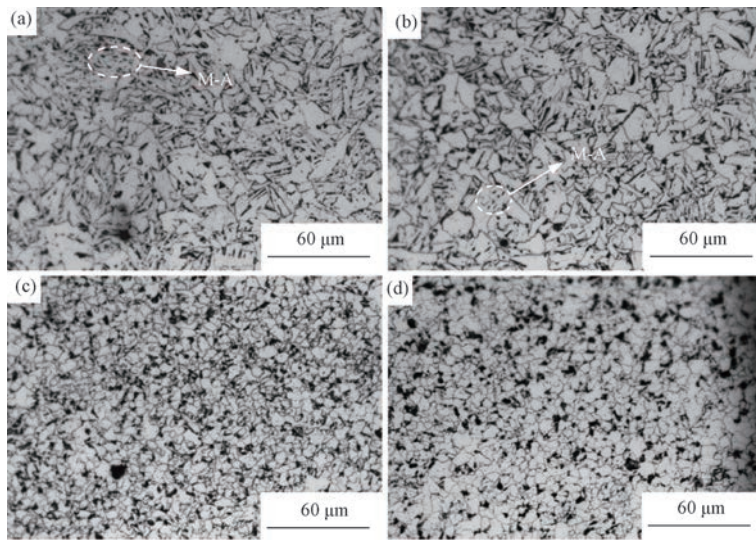


图7 热影响区中间临界区和细晶区微观组织中间:临界区 (a) 1[#]和(b) 2[#];细晶区 (c) 1[#]和(d) 2[#]
Fig. 7 Microstructure of ICHAZ and FGHAZ: ICHAZ (a) 1[#] and (b) 2[#];FGHAZ (c) 1[#] and (d) 2[#]

4 结 论

本研究采用 60 mm 厚正火态 DH36-Z35 钢板对接平焊,焊接坡口为带钝边非对称 X 坡口,用半自动混合气体 GMAW 打底(80% CO₂ + 20% Ar,焊丝 CHW50C6SM)+自动 SAW 填充及盖面(焊丝 CHW-S3,焊剂 CHF101),焊接接头焊缝组织主要为先共析和针状铁素体,热影响粗晶区组织为板条和粒状贝氏体,细晶区为等轴铁素体和珠光体,打底焊清根与不清根对焊接接头微观组织影响很小。

打底焊清根和不清根焊接接头抗拉强度 R_m 均高于正火态母材,表明焊接接头未出现软化。

打底焊不清根焊接接头强度、塑性和 -20 °C 低温冲击韧性 with 清根接头相当,屈强比皆为 0.79,均满足 NB/T 47014-2023,打底焊可取消清根工序,提高焊接效率。

参 考 文 献

[1] JIJ Y, CHI Y H, YIN X M. The blue treasure of hydrogen energy: a research of offshore wind power industry policy in China[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 62: 99-108.

[2] CHEN Y H, LIN H Y. Overview of the development of offshore wind power generation in China [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 53: 102766.

[3] LI Y C, ZHU W J, SUN L L, et al. Correlation between welding structure and corrosion behavior of high strength low alloy (HSLA) ship steel in Cl⁻-containing solutions [J]. International Journal of Electrochemical Science, 2023, 18(10): 100295.

[4] 王佳骥, 林三宝, 蔡笑宇, 等. EH40 船板钢厚板焊接技术研究

现状[J]. 机械制造文摘(焊接分册), 2020(6): 1-6.

[5] 陈峯, 王凯, 江泽新, 等. 船用高强度钢焊接技术的研究现状与展望[J]. 精密成形工程, 2020, 12(4): 65-75.

[6] ANINDA R K, KAROBI S M, SHARIAR R, et al. Effect of post-weld heat treatment on mechanical properties and microstructure in electric arc welded mild steel joints [J]. Journal of Engineering Research, 2024, 12(2): 210-215.

[7] PARK M, KANG M, PARK G-W, et al. The effects of post weld heat treatment for welded high-Mn austenitic steels using the submerged arc welding method [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 18: 4497-4512.

[8] 孙科, 朱庆祥, 胡相伟, 等. 厚板不清根焊接工艺的研究及应用 [J]. 金属加工(热加工), 2017(S1): 34-36.

[9] 毛小飞, 徐少华, 黄以会, 等. 风电塔架 Q345E-Z35 厚板不清根 GMAW+SAW 焊接工艺 [J]. 焊管, 2016, 39(11): 18-22.

[10] 盛凯, 刘长虹, 郭云飞, 等. 海工船舶厚板 Y 型坡口不清根高效焊接新技术 [J]. 造船技术, 2014 (6): 41-45.

[11] 吴召波, 解凤奇, 安付健. 一种中厚板 X 型坡口不清根焊接工艺: CN104493342A [P]. 2015-04-08.

[12] 那雪冬. 一种用于风机塔架筒节的不清根焊接工艺: CN113231721B [P]. 2021-11-26.

[13] LI X H, LIU Y C, GAN K F, et al. Acquiring a low yield ratio well synchronized with enhanced strength of HSLA pipeline steels through adjusting multiple-phase microstructures [J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 785: 139350.

[14] 姚浩, 任强, 张立峰. 低合金高强度钢中针状铁素体控制的综述 [J]. 炼钢, 2022, 38(2): 1-10.

[15] SHAO Y, LIU C X, YAN Z S, et al. Formation mechanism and control methods of acicular ferrite in HSLA steels: a review [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2018, 34(5): 737-744.

[16] ABSON D J. Acicular ferrite and bainite in C-Mn and low-alloy steel arc weld metals [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2018, 23(8): 635-648.

[17] LODER D, MICHELIC S K, BERNHARD C. Acicular ferrite formation and its influencing factors-a review [J]. Journal of Materials Science Research, 2017, 6(17): 24-43.