

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.08.12

55 kg级低氢高韧性全位置药芯焊丝的研制与性能评价

信国松¹, 刘晓茹¹, 邹勇², 常朝祥³, 方乃文³, 牛董山钰³

1. 聚力新材料科技(日照)有限公司, 山东 日照 276826

2. 山东大学, 山东 济南 250000

3. 中焊科技发展(哈尔滨)有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150028

摘要: 针对海洋工程、桥梁及低温服役结构用55 kg级低合金高强钢焊接材料的低氢、高韧性和全位置焊接需求, 采用钛碱型渣系和Mn-Si-Ni-Ti-B-RE多元合金体系制备直径1.2 mm的气体保护药芯焊丝, 并通过钢带清洗、药粉分级烘焙和焊丝在线复烘干控制扩散氢含量。测试焊丝工艺性能、熔敷金属成分与力学性能、扩散氢含量、裂纹尖端张开位移(CTOD)和显微组织, 并采用EH460钢板验证接头性能。结果表明, 所制焊丝在平、立、横、仰焊位置下电弧较稳定且脱渣较容易; 熔敷金属抗拉强度为601 MPa, 屈服强度为540 MPa, 断后伸长率为25.0%, -60 °C冲击吸收功为113~120 J, 扩散氢含量为2.90~3.12 mL/100 g, -25 °C CTOD值为0.375~0.451 mm。EH460立焊接头抗拉强度为591~593 MPa, 焊缝和热影响区-40 °C平均冲击吸收功分别为153 J和180 J。焊缝金属以针状铁素体为主, 冲击断口主要呈韧窝形貌。钛碱型渣系配合Ti-B复合微合金化促进了焊缝中针状铁素体的形成, 结合多层降氢工艺实现了低扩散氢与高低温韧性的良好匹配。

关键词: 55 kg级; 低温高韧性; 药芯焊丝; 钛碱型渣系; 针状铁素体

中图分类号: TG422.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)08-0116-07

Development and Performance Evaluation of a 550 MPa-Grade Low-Hydrogen, High-Toughness Flux-Cored Wire for All-Position Welding

XIN Guosong¹, LIU Xiaoru¹, ZOU Yong², CHANG Zhaoxiang³, FANG Naiwen³, NIU Dongshanyu³

1. Juli New Material Technology (Rizhao) Co., Ltd., Rizhao 276826, China

2. Shandong University, Jinan 250000, China

3. China Welding Technology Development (Harbin) Co., Ltd., Harbin 150028, China

Abstract: To meet the requirements of low diffusible hydrogen, high toughness, and all-position weldability for 55 kg-grade low-alloy high-strength steel structures used in offshore engineering, bridges, and low-temperature service, a 1.2 mm-diameter gas-shielded flux-cored wire was developed using a titania-basic slag system and a Mn-Si-Ni-Ti-B-RE multicomponent alloying system. The diffusible hydrogen content was controlled through steel-strip cleaning, flux powder classification baking, and in-line wire redrying. The welding operability, deposited-metal chemical composition and mechanical properties, diffusible hydrogen content, crack tip opening displacement (CTOD), and microstructure were systematically evaluated, and the joint performance was verified using EH460 steel plates. The results show that the developed wire exhibits a stable arc, low spatter, and easy slag removal in the flat, vertical, horizontal, and overhead positions. The deposited metal achieves a tensile strength of 601 MPa, a yield strength of 540 MPa, an elongation after fracture of 25.0%, and an impact absorbed energy of 113-120 J at -60 °C. The diffusible hydrogen content is 2.90-3.12 mL/100 g, and the CTOD value at -25 °C ranges from 0.375 to 0.451 mm. The vertically welded EH460 joints exhibit tensile strengths of 591-593 MPa, with all fractures occurring in the heat-affected zone. The average impact absorbed energies of the weld metal and heat-affected zone at -40 °C are 153 J and 180 J, respectively. The weld metal is predominantly composed of acicular ferrite (volume fraction approxi-

收稿日期: 2026-07-01 修回日期: 2026-07-28

基金项目: 国家自然科学基金(52261044); 泰山产业领军人才工程(2024001)

作者简介: 信国松(1992—), 男, 学士, 高级工程师, 主要从事焊接材料研发及应用研究。E-mail: 18253459198@163.com。

mately 90%-95%), and the impact fracture surfaces are characterized mainly by dimple morphology. The combination of the titania-basic slag system with Ti-B composite microalloying promotes acicular ferrite formation in the weld metal, and the multi-stage hydrogen-reduction process achieves a favorable balance between low diffusible hydrogen and high low-temperature toughness.

Keywords: 55 kg-grade; low-temperature toughness; flux-cored wire; titania-basic slag system; acicular ferrite

引用格式:信国松,刘晓茹,邹勇,等. 55 kg级低氢高韧性全位置药芯焊丝的研制与性能评价[J]. 电焊机, 2026, 56(8): 116-122.

Citation: XIN Guosong, LIU Xiaoru, ZOU Yong, et al. Development and Performance Evaluation of a 550 MPa-Grade Low-Hydrogen, High-Toughness Flux-Cored Wire for All-Position Welding[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(8): 116-122.

0 引言

药芯焊丝作为继焊条、埋弧焊丝和气体保护实心焊丝之后发展起来的一类焊接材料,凭借较好的工艺灵活性和冶金调控能力,已应用于船舶制造、海洋工程、桥梁建设、长输管线及低温储罐等领域^[1-2]。与实心焊丝相比,药芯焊丝内部的粉芯可配置造渣剂、脱氧剂、合金剂和稳弧剂等组元,可在改善电弧和熔滴过渡行为的同时,对焊缝金属成分和夹杂物进行调控。

55 kg级高强度钢焊接材料除需满足强度匹配要求外,还应兼顾低温冲击韧性、扩散氢控制和全位置焊接工艺适应性。国内学者已围绕渣系设计、微合金化和超低氢药芯焊丝开展研究^[3-4],但低温韧性、CTOD断裂韧性及其与焊缝组织之间的关系仍需进一步分析。

本文以55 kg级低温高韧性药芯焊丝为研究对象,采用钛碱型渣系和Mn-Si-Ni-Ti-B-RE多元合金体系,结合钢带清洗、药粉分级烘焙和焊丝在线复烘烘干等降氢措施制备气体保护药芯焊丝。通过焊接工艺性能、熔敷金属力学性能、扩散氢含量、CTOD性能、焊接接头性能及显微组织测试,分析焊丝成分设计、降氢工艺、焊缝组织与低温韧性之间的关系。

1 试验材料与方法

1.1 焊丝设计与制备

(1)渣系设计。根据熔渣的酸碱性和主要组元类型,药芯焊丝渣系可分为钛型、钙型和钛碱型。钛型渣系工艺性较好但熔敷金属纯净度相对受限,钙型渣系具有较强的冶金精炼能力,但电弧稳定性

和全位置适应性相对不足^[2]。本研究选用钛碱型渣系,以TiO₂(金红石)为主要造渣剂,引入CaF₂、MgO和NaF等碱性组分,并以SiO₂、ZrO₂和Al₂O₃调节熔渣物理性能。经正交试验确定的主要渣系组分范围见表1。

表1 钛碱型渣系主要组分及质量分数(质量分数,%)
Table 1 Main components and mass fractions of the titania-basic slag system (wt. %)

金红石 (TiO ₂)	镁粉 (Mg)	氟化钠 (NaF)	锆英砂 (ZrO ₂)	石英 (SiO ₂)	氧化铝 (Al ₂ O ₃)
35~45	1.5~5.0	1.5~3.0	0.5~1.5	0.5~2.0	1~3

(2)合金体系设计。采用Mn-Si-Ni-Ti-B-RE多元合金体系。Mn和Si主要用于脱氧和固溶强化;Ni有利于降低韧脆转变温度并改善低温韧性。结合相关研究,Ti与B复合添加有利于针状铁素体形成,Ti与C、N形成的细小颗粒可作为晶内形核位置,B在奥氏体晶界的偏聚可抑制先共析铁素体形核^[5-8]。稀土元素可参与脱氧、脱硫并改善夹杂物形态。

通过三因素三水平正交试验,以-60℃冲击吸收功和针状铁素体体积分数为评价指标,选定钛铁2.0%、硼铁4.0%和稀土合金0.6%的添加量。该配比下,熔敷金属中Ti、B和RE的实际残留质量分数分别约为0.045%、0.004 2%和0.008%。

(3)焊丝制备与降氢工艺。焊丝选用规格为0.9 mm×14 mm的低硫、低磷冷轧带钢作为外皮,其C含量为0.02%~0.04%,S、P含量均不大于0.015%,药粉填充率控制在(14.5±0.3)%。焊丝成型与拉拔工艺流程为:钢带轧制成U形槽→药粉定量填充→闭合成型→连续拉拔减径→在线复烘→表面抛光→层绕。连续拉拔过程中各道次压缩率控制在15%~20%,拉拔速度为8~12 m/s,成品焊丝椭圆度



不大于 0.01 mm。

焊丝中的扩散氢主要来源于钢带表面残留油污、药粉中的结晶水和吸附水,以及储存过程中材料吸湿等。为控制扩散氢含量,对钢带和药粉实施分类预处理^[4]:钢带依次经(80±20)℃超声波碱洗、(85±10)℃清水漂洗及(250±20)℃高温烘干,烘干时间不少于 30 min;金红石、长石等矿物粉料经 950℃保温 360 min 焙烧,钛铁、硼铁等铁合金粉经 150℃保温 120 min 烘焙。烘焙后的药粉立即密封保存,并在相对湿度不大于 30% 的干燥环境中启封和使用。焊丝层绕前进行在线复烘,使焊丝以 10~12 m/s 的速度通过长度为 6 m、管壁温度为 300~350℃的加热管,以进一步降低焊丝中的残余水分和扩散氢含量。

1.2 焊接工艺与试板制备

焊接试板尺寸不小于 400 mm×150 mm×20 mm,材质为 EH460 钢。对接坡口角度为 30°±2°,根部间隙为 16~18 mm,层间温度控制在 100~150℃。保护气体为 100% CO₂,流量为 18~22 L/min。焊接电流为 220~260 A,电压为 26~30 V,焊接速度为 25~35 cm/min,热输入为 12~16 kJ/cm(热效率 η=0.85)。

CTOD 试验用焊接试板尺寸 700 mm×300 mm×95 mm,采用 X 形对接坡口,单边坡口角度 45°,根部间隙 4 mm。采用多层多道立焊,热输入控制在 13~18 kJ/cm,层间温度控制在 130~150℃。焊后经 100% UT 检验合格后截取试样。

1.3 测试方法

熔敷金属化学成分及其强度、塑性指标参照 AWS A5.29/A5.29M:2021 进行对照评价^[9]。其中,C、S 含量采用红外碳硫仪测定,Si、Mn、Ni 和 Mo 含量采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测定,试验方法依据 GB/T 223 系列标准执行。熔敷金属拉伸试验按照 GB/T 228.1—2021 进行,试样标距段直径为 10 mm;冲击试验按照 GB/T 229—2020 进行,采用尺寸为 10 mm×10 mm×55 mm 的 V 形缺口试样,缺口位于焊缝中心,试验温度为 -60℃。

扩散氢含量依据 ISO 3690:2018 进行测定^[10],采用热导法(载气热提取法),试样尺寸为 80 mm×25 mm×12 mm,在 400℃条件下收集 50 min。裂纹尖端张开位移(CTOD)试验按照 ISO 12135:2021 进

行,采用厚度为 95 mm 的三点弯曲试样,试验温度为 -25℃。硬度试验按照 GB/T 4340.1—2024 进行,试验载荷等级为 HV10。

显微组织试样经 4% 硝酸酒精溶液腐蚀后,采用 UMT203i 透反射光学显微镜进行观察;-60℃冲击断口采用 Regulus 8100 扫描电子显微镜进行形貌分析。通过上述测试获得熔敷金属的成分、力学性能、扩散氢含量、断裂韧性及组织特征,用于评价所研制焊丝的综合性能。

2 试验结果与分析

2.1 焊接工艺性能

所制焊丝在平焊、立焊、横焊和仰焊位置下的工艺性测试结果见表 2。各焊接位置下电弧较稳定,飞溅较小,熔渣覆盖较均匀且脱渣较容易;焊缝表面连续,未观察到明显咬边、焊瘤和未熔合等表面缺欠,如图 1、图 2 所示。

表 2 焊接工艺性测试结果

Table 2 Results of welding operability tests

类型	焊接方式	电弧稳定性	飞溅情况	脱渣情况	焊缝成形
试验 焊丝	平焊	稳定	小	容易	良好
	立焊	稳定	小	容易	良好
	横焊	稳定	小	容易	良好
	仰焊	稳定	小	容易	良好



图 1 平焊焊缝成形

Fig. 1 Weld appearance in flat position

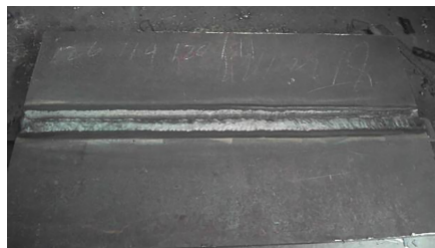


图 2 立焊焊缝成形

Fig. 2 Weld appearance in vertical position

2.2 熔敷金属化学成分与力学性能

熔敷金属化学成分如表 3 所示。C、S、P 的质量分数分别为 0.049%、0.006% 和 0.011%, 均低于相应标准上限; Mn、Ni 的质量分数分别为 1.31%、1.48%。各元素实测值均符合 AWS A5.29/A5.29M: 2021 的相应要求。较低的 C、S 和 P 含量以及适量的 Mn 和 Ni, 为熔敷金属获得良好的强度和低温韧性提供了成分基础。

表 3 熔敷金属化学成分(质量分数, %)

Table 3 Chemical composition of the deposited metal (wt. %)							
项目	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo
标准范围	≤0.12	≤0.8	≤1.75	≤0.03	≤0.03	1.00~2.00	≤0.35
实测值	0.049	0.34	1.31	0.011	0.006	1.48	0.007

熔敷金属拉伸和冲击试验结果如表 4 所示。抗拉强度为 601 MPa, 屈服强度为 540 MPa, 断后伸长率为 25.0%; -60 °C 下 3 个冲击试样的吸收功分别为 117 J、120 J 和 113 J, 结果均高于本文采用的 27 J 判定值。

表 4 熔敷金属力学性能

Table 4 Mechanical properties of the deposited metal					
项目	抗拉强度	屈服强度	延伸率	V 形缺口冲击吸收功	
	/MPa	/MPa	/%	温度/°C	吸收功/J
标准范围	550~690	≥470	≥22	-60	≥27
实测值	601	540	25.0	-60	117/120/113

2.3 扩散氢含量与 CTOD 性能

扩散氢含量测试结果如表 5 所示。本试验焊丝在 20 °C、60% RH 环境条件下的扩散氢含量为 2.90~3.12 mL/100 g, 平均值为 3.03 mL/100 g; 同期对比测试的同型号进口药芯焊丝扩散氢含量为 3.93~4.26 mL/100 g, 平均值为 4.11 mL/100 g。两种焊丝的扩散氢含量均满足不大于 5 mL/100 g 的指标要求, 其中本试验焊丝的平均扩散氢含量较进口药芯焊丝降低约 26.1%。结果表明, 钢带清洗、药粉分级烘焙及焊丝在线复烘干等措施能够有效控制熔敷金属中的扩散氢含量。

表 5 熔敷金属扩散氢含量

Table 5 Diffusible hydrogen content of the deposited metal		
编号	环境条件	扩散氢(mL/100 g)
指标		≤5
本试验焊丝	20°C, 60% RH	3.08/2.90/3.12
进口焊材		4.13/3.93/4.26

在扩散氢含量满足指标要求的基础上, 进一步采用 CTOD 试验评价熔敷金属在低温条件下的抗脆断能力。CTOD 试板焊接现场和加工后的试样分别如图 3、图 4 所示, 试验结果见表 6。在 -25 °C 下, 三个试样的 CTOD 值分别为 0.433 mm、0.451 mm 和 0.375 mm, 平均值为 0.420 mm, 均高于 0.15 mm 的设计指标, 表明采用本试验焊丝获得的熔敷金属具有较好的低温抗脆断性能。

表 6 CTOD 试验结果

Table 6 CTOD test results			
项目	温度/°C	母材材质	CTOD 值 δ/mm
本试验焊丝	-25	EH460/95 mm 厚	0.433/0.451/0.375



图 3 CTOD 试板焊接

Fig. 3 Welding of the CTOD test plate

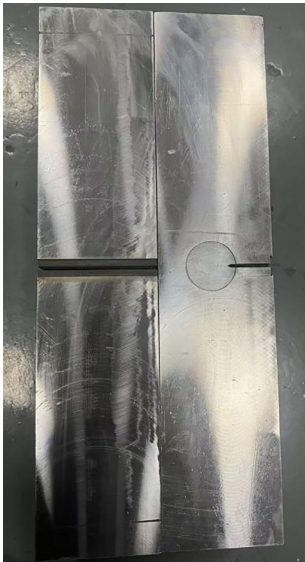


图 4 CTOD 试样

Fig. 4 CTOD specimen

2.4 焊接接头性能

2.4.1 拉伸、弯曲与冲击性能

两件拉伸试样的抗拉强度分别为 593 MPa 和 591 MPa,断裂位置均位于热影响区;4 件侧弯试样的弯曲表面均未发现裂纹。在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下,焊缝中心的冲击吸收功分别为 149 J、141 J 和 168 J,平均值为 153 J;热影响区的冲击吸收功分别为 168 J、188 J 和 183 J,平均值为 180 J,均高于 47 J 的设计要求。接头拉伸、侧弯和冲击试验结果见表 7。

表 7 焊接接头力学性能试验结果

Table 7 Mechanical properties of the welded joint

项目	抗拉强度 /MPa	断裂 位置	弯曲试验 (侧弯) $d=4a, 180^{\circ}$	($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$) KV ₂ /J 焊缝中心	($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$) KV ₂ /J 热影响区
本试验 焊丝	593/591	热影 响区	四件合格	149/141/168	168/188/183

2.4.2 硬度

在后焊面下方 2 mm 处对焊缝、熔合线和热影响区进行 HV10 硬度测试,结果见表 8。焊缝和热影响区硬度分别为 192~210 HV10 和 183~198 HV10,熔合线硬度为 221 HV10,接头最高硬度为 221 HV10,未表现出明显的异常硬化倾向。

表 8 焊接接头硬度(母材:EH460, HV10)

Table 8 Hardness of the EH460 welded joint (HV10)

项目	焊材 规格	焊接 位置	试验位置	焊缝	熔合 线	热影响 区	硬度 最大值
本试验 焊丝	1.2 mm	立焊	后焊面下 2 mm	204/ 210/192	221	198/ 187/183	221

2.4.3 角焊缝性能

角焊缝采用立向上位置焊接,焊脚尺寸 8.0 mm,最大凸度为 1.5 mm,最大焊脚差为 2.0 mm。目视检查未发现咬边、焊瘤、夹渣、裂纹和表面气孔等缺陷;纵向剖开后,断裂表面未发现裂纹、气孔和夹渣,焊缝根部未见未熔合,结果见表 9。

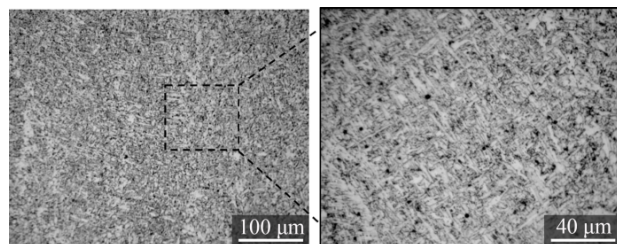
表 9 角焊缝试验结果

Table 9 Fillet weld test results

项目	焊接 位置	焊脚 尺寸 /mm	最大 凸度 /mm	最大焊 脚差 /mm	不良缺陷	目测检查
本试验 焊丝	立向上	8.0	1.5	2.0	无咬边焊瘤、 夹渣、裂纹和 表面气孔等 不良缺陷	无裂纹、气 孔、夹渣,焊 缝根部无未 熔合

2.5 显微组织及断口分析

焊缝金属显微组织如图 5 所示,主要由细小针状铁素体组成,并含少量粒状贝氏体和细珠光体。针状铁素体呈细长针状或竹叶状交错分布,长度 5~15 μm ,宽度 1~3 μm ;采用网格交点法估算其体积分数约为 90%~95%。原奥氏体晶界附近未见明显粗大先共析铁素体。结合相关研究推测, Ti、B 等元素的添加可能有利于抑制晶界铁素体形成并促进晶内针状铁素体形核^[5-8]。



(a)低倍组织

(b)局部放大

图 5 焊缝金属显微组织及框选区域局部放大

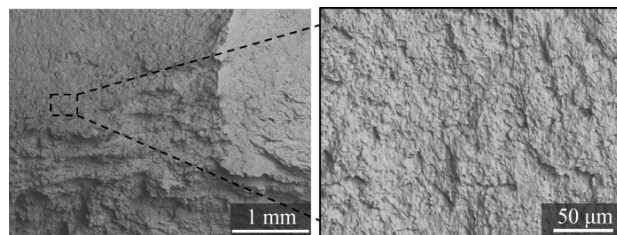
Fig. 5 Microstructure of the weld metal and enlarged view of the boxed region

结合相关研究,针状铁素体交错分布及其晶界特征可使解理裂纹扩展路径发生偏转,有利于提高冲击吸收能^[7-8,11]。需注意的是,本文未对位错密度和 M-A 组元进行定量表征,因此其对韧性的作用仍需进一步验证。

$-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冲击断口的宏观形貌呈纤维状。如图 6 的 SEM 结果所示,断口表面以等轴韧窝为主,韧窝直径约为 1~5 μm ,局部可见撕裂棱和剪切韧窝;在所观察区域内未见明显解理台阶、河流花样或沿晶断裂特征,与 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冲击吸收功结果相对应。

2.6 组织与性能关系分析

熔敷金属的强度和低温韧性与合金元素的综



(a)低倍断口形貌

(b)框选区域局部韧窝形貌

图 6 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冲击断口低倍及局部放大 SEM 形貌

Fig. 6 Low-magnification and locally enlarged SEM morphologies of the impact fracture at $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$





合作用及焊缝组织特征密切相关。结合熔敷金属化学成分、显微组织观察结果和已有研究^[7-8]可知,Mn和Ni在焊缝金属中主要起脱氧、固溶强化和调节相变行为的作用。其中,Mn和Ni能够降低奥氏体向铁素体转变的温度,增加相变过冷度,有利于细化焊缝组织;Ni还能够改善铁素体基体的低温塑性,对提高低温冲击韧性具有积极作用^[6]。

Ti和B的复合添加可能与针状铁素体的形成有关。Ti与N结合形成的细小TiN颗粒可为针状铁素体提供晶内非均质形核位置,而B在奥氏体晶界处的偏聚能够在一定程度上抑制先共析铁素体沿晶界析出,使铁素体转变更多地发生在晶内^[5,8]。由图5、图6可见,熔敷金属中针状铁素体呈交错分布,这种组织能够细化有效晶粒尺寸并使裂纹扩展路径发生偏转,从而增加裂纹扩展阻力,有利于改善焊缝金属的低温韧性。

RE元素可能通过参与脱氧、脱硫反应以及改变夹杂物的尺寸和形态,对针状铁素体形核产生一定影响。细小弥散的夹杂物可作为针状铁素体的潜在形核核心,同时较为圆整的夹杂物形态也有利于减小局部应力集中。然而,本文未对夹杂物的成分、尺寸和形貌进行定量表征,因此RE元素的具体作用仍需通过进一步试验加以验证。

综合来看,在本文试验条件下,Mn、Ni、Ti、B和RE的复合添加有利于形成以针状铁素体为主的焊缝组织,而钢带清洗、药粉烘焙和焊丝复烘干等措施降低了熔敷金属中的扩散氢含量。组织调控与低氢控制的共同作用,使熔敷金属获得了601 MPa的抗拉强度和113~120 J的-60℃冲击吸收功,并表现出较好的强韧性匹配。

3 结论

(1)采用钛碱型渣系和Mn-Si-Ni-Ti-B-RE多元合金体系制备了直径1.2 mm的55 kg级低氢高韧性药芯焊丝。通过钢带清洗、药粉分级烘焙和焊丝在线复烘干的多层降氢工艺,将熔敷金属扩散氢含量控制在2.90~3.12 mL/100 g,较同型号进口焊丝降低约26.3%。所制焊丝在平、立、横、仰四种焊接位置下均表现出稳定的电弧和良好的脱渣性。

(2)熔敷金属抗拉强度为601 MPa,屈服强度为540 MPa,断后伸长率为25.0%,-60℃冲击吸收功为113~120 J,扩散氢含量为2.90~3.12 mL/100 g,-25℃CTOD值为0.375~0.451 mm,表现出较好的强度、塑性、低温韧性和低氢性能。焊缝金属主要由针状铁素体组成,其体积分数约为90%~95%,并含少量粒状贝氏体和珠光体;-60℃冲击断口以韧窝形貌为主,未见明显解理或沿晶断裂特征。以针状铁素体为主的细化交错组织与熔敷金属较高的低温冲击韧性相对应。

(3)采用所制焊丝焊接20 mm厚EH460钢板,立焊接头抗拉强度为591~593 MPa,断裂均位于热影响区,4件侧弯试样弯曲表面均未发现裂纹。-40℃时,焊缝中心和热影响区的平均冲击吸收功分别为153 J和180 J;接头硬度为183~221 HV10,未表现出明显的异常硬化倾向。角焊缝试验未发现裂纹、气孔、夹渣及未熔合等缺欠。

(4)钛碱型渣系配合Ti-B复合微合金化促进了焊缝中针状铁素体的形核与细化,镍元素的加入改善了铁素体基体的低温塑性,二者共同作用实现了熔敷金属高强韧性与低扩散氢的匹配。

参考文献:

- [1] 李风波,潘川,杨文华,等.海洋工程用高强度焊接技术研究现状及发展趋势[J].金属加工(热加工),2021(8):35-38.
LI F B, PAN C, YANG W H, et al. Research status and development trend of welding technology for high-strength steel in offshore engineering [J]. MW Metal Forming, 2021(8): 35-38.
- [2] 武晓刚,王金生,马丽,等.药芯焊丝气保焊对深水导管架高强度S420焊缝金属微观组织和横向裂纹的影响[J].电焊机,2025,55(5):107-114.
WU X G, WANG J S, MA L, et al. Effect of flux-cored wire gas-shielded welding on microstructure and transverse cracks of weld metal in S420 high-strength steel for deepwater jackets [J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(5): 107-114.
- [3] 刘东,贾波,汪涛,等.一种50 kg级细晶粒钢超低氢药芯焊丝的研制[J].焊接技术,2024,53(3):81-84.
LIU D, JIA B, WANG T, et al. Development of an ultra-low-hydrogen flux-cored welding wire for 50 kg-grade fine-grained steel [J]. Welding Technology,

- 2024, 53(3):81-84.
- [4] 刘丽媛, 张智, 杨立军, 等. 超低氢高韧性无缝药芯焊丝 TME711NiSF 的研制[J]. 焊接学报, 2015, 36(12): 109-112.
- LIU L Y, ZHANG Z, YANG L J, et al. Development of TME711NiSF seamless flux-cored wire with super-low hydrogen and high toughness[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(12): 109-112.
- [5] 刘政军, 武丹, 苏允海. B 元素对药芯焊丝焊缝金属针状铁素体形成的影响[J]. 焊接学报, 2018, 39(12): 19-24.
- LIU Z J, WU D, SU Y H. Effect of boron element on formation of acicular ferrite in weld metal with flux-cored wire[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(12): 19-24.
- [6] YANG L J, WANG H C, ZHANG Z, et al. Effect of Mn and Ni on microstructure and impact toughness of submerged arc weld metals[J]. Transactions of Tianjin University, 2015, 21(6): 562-566.
- [7] JORGE J C F, DE SOUZA L F G, MENDES M C, et al. Microstructure characterization and its relationship with impact toughness of C-Mn and high-strength low-alloy steel weld metals: A review[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 10: 471-501.
- [8] LODER D, MICHELIC S K, BERNHARD C. Acicular ferrite formation and its influencing factors: A review[J]. Journal of Materials Science Research, 2017, 6(1): 24-43.
- [9] American Welding Society. AWS A5.29/A5.29M: 2021 Specification for low-alloy steel electrodes for flux cored arc welding[S]. Miami: American Welding Society, 2021.
- [10] International Organization for Standardization. ISO 3690: 2018 Welding and allied processes—Determination of hydrogen content in arc weld metal[S]. Geneva: ISO, 2018.
- [11] WANG X, YANG Z B, DU L Z. Research on the microstructure and properties of a flux-cored wire gas-shielded welded joint of A710 low-alloy high-strength steel[J]. Crystals, 2023, 13(3): 484.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>

上接第 31 页

- [J]. Industrial Construction, 2020, 50(8): 38-42.
- [65] 马自强, 杨汉民, 吴建. 金属粉芯焊丝富氩气体保护焊在钻头中的应用[J]. 武汉理工大学学报, 2002, 24(9): 66-68.
- MA Z Q, YANG H M, WU J. Application of Metal-Cored Wire Argon-Rich Gas Shielded Welding in Drill Bits[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2002, 24(9): 66-68.
- [66] Treutler K, Lorenz S, Hamje J, et al. Wire and arc additive manufacturing of a CoCrFeMoNiV complex concentrated alloy using metal-cored wire—process, properties, and wear resistance[J]. Applied Sciences, 2022, 12(13): 6308.
- [67] Lin Z, Song K, Yu X. A review on wire and arc additive manufacturing of titanium alloy[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 70: 24-45.
- [68] Liu Y, Du A, Zhou G, et al. Metal Powder and Wire Additive Manufacturing Technology [C]//E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2020, 213: 01020.
- [69] Yi H, Jia L, Ding J, et al. Achieving material diversity in wire arc additive manufacturing: leaping from alloys to composites via wire innovation[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2024, 194: 104103.
- [70] 贺定勇, 蒋建敏, 周正, 等. 粉芯丝材在表面与再制造技术中的应用[J]. 电焊机, 2012, 42(5): 12-14.
- HE D Y, JIANG J M, ZHOU Z, et al. Application of flux cored wire in surface and remanufacturing technology[J]. Electric Welding Machine, 2012, 42(5): 12-14.
- [71] 许立宝, 张健, 李仕臣, 等. 冷轧工作辊堆焊修复气保护粉芯焊丝的研制[J]. 焊接, 2020(9): 52-56.
- XU L B, ZHANG J, LI S C, et al. Development of Gas-Shielded Flux-Cored Wire for Surfacing Repair of Cold Rolling Work Rolls[J]. Welding & Joining, 2020(9): 52-56.
- [72] Ivanov O, Prysyazhnyuk P, Lutsak D, et al. Improvement of abrasion resistance of production equipment wear parts by hardfacing with flux-cored wires containing boron carbide/metal powder reaction mixtures[J]. Management Systems in Production Engineering, 2020, 28(3): 178-183.
- [73] Lin Z, Goulas C, Ya W, et al. Microstructure and mechanical properties of medium carbon steel deposits obtained via wire and arc additive manufacturing using metal-cored wire[J]. Metals, 2019, 9(6): 673.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>

