

不同焊丝对 X65M 管线钢管焊接接头组织与低温冲击韧性的影响

杜健辉^{1,2}, 廖聪¹, 李伟², 施良政²

(1. 岭南师范学院, 广东 湛江 524048; 2. 番禺珠江钢管(珠海)有限公司, 广东 珠海 519050)

摘要: 直缝埋弧焊管作为重要的工程材料,广泛应用于钢结构、流体管道以及基础打桩等工程中。阿尔及利亚客户基于经济效益考虑,要求直缝埋弧焊原材料在不额外添加金属元素 Ni 的情况下,不仅需要满足 API 5L 45th PSL2 规范,还要求在-29 °C 条件下具有较高的冲击韧性。为了获得良好的具有良好低温冲击韧性的 X65M 级别钢材的焊接接头,采用四套不同化学成分的内外焊设计方案,进行 X65M 管线钢焊接工艺试验。利用光学显微镜分析了焊缝和热影响区的宏观组织,通过硬度试验和多温度冲击试验测试了其硬度和韧性。试验结果表明, MnNiTiB, MnMoNiTiB+MnMoTiB 和 MnMoNiTiB 内外焊方案均满足:在-29 °C 条件,要求焊缝中心、热影响区冲击吸收能量单个值 ≥ 49 J,平均值 ≥ 61 J,其中 MnMoNiTiB 方案富余量最大。从经济性上看, MnNiTiB 方案满足技术要求,同时价格在 4 个方案中是最低的。

关键词: 管线钢; 焊丝; 力学性能; 显微组织

中图分类号: TG423;TG445 文献标识码: A doi: [10.12073/j.hj.20220813001](https://doi.org/10.12073/j.hj.20220813001)

Effect of different welding wires on microstructure and low temperature impact toughness of welded joint of X65M steel pipe

Du Jianhui^{1,2}, Liao Cong¹, Li Wei², Shi Liangzheng²

(1. Lingnan Normal University, Zhanjiang 524048, Guangdong, China; 2. Panyu Chu Kong Steel Pipe (Zhuhai) Co., Ltd., Zhuhai 519050, Guangdong, China)

Abstract: As an important engineering material, LSAW pipes are widely used in steel structures, pipelines and pile foundation. Based on economic considerations, Algerian customer required steel sheet raw material to meet not only API 5L 45th PSL2 specification, but also high impact toughness at -29 °C, without additional metal element Ni. In order to obtain welded joint of X65M grade steel with good low temperature impact toughness, four internal and external welding design schemes with different chemical composition were adopted to conduct welding process test on X65M pipeline steel. The macrostructure of weld and heat-affected zone was analysed with optical microscope, and hardness and toughness were tested by hardness tests and multi-temperature impact tests. The test results show that MnNiTiB, MnMoNiTiB+MnMoTiB and MnMoNiTiB internal and external welding programmes meet technical requirements of single welding seam and heat-affected zone with impact energy greater than 49 J and average value greater than 61 J at -29 °C. Among them, MnMoNiTiB scheme has the largest surplus. In terms of economy, the MnNiTiB plan meets technical requirements, and price is the lowest among the four schemes.

Key words: pipeline steel, welding wire, mechanical properties, microstructure

0 前言

在石油和天然气工程中,钢管材料的性能至关

重要,特别是严酷环境下,需要具有高强度、高韧性和耐久性的材料,故材料改进成为钢材制造商及钢管制造商共同努力的目标。在这种背景下,阿尔及

收稿日期: 2022-08-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51705228); 广东省扬帆计划引进创新创业团队专项资助项目(2014YT02C049); 广东省自然科学基金资助项目(2018A030307017)。

利亚客户提出了需要验证 API 5LX65M 钢管^[1]。在阿尔及利亚方的客户技术规格书中,除要求符合 API 5L 45th PSL2 规范外,还对材料的夏比 V 形缺口冲击吸收能量提出了要求:考虑钢管产品服役环境,冲击试验温度为-29 ℃,试样位置为管体母材、焊缝中心、热影响区,试验验收指标为单个值 ≥ 49 J,平均值 ≥ 61 J。基于经济效益考虑,客户在含钼 Mo,不特意添加金属元素镍 Ni 或低 Ni 含量的情况下,保证钢板能满足各项力学性能指标,包括-29 ℃的夏比冲击要求。有鉴于此,文中采用 4 种内外焊匹

配方案,包括 H08DG, H08C 及自行研制的 MK65HGX-III 焊丝的不同组合,对 X65M 级别钢材进行焊接工艺试验,研究其对焊接接头的阻止及力学性能的影响,评价工艺试验结果是否符合客户的技术要求及其他要求。

1 试验方法

试用 4 种焊丝匹配方案和 X65M 母管材料进行焊接工艺试验。钢管材料的化学成分见表 1, X65M 采用 0.06C-中 Mn 系列 + 0.4Nb + 0.05Mo。

表1 母管材料的化学成分(质量分数,%)

C	Si	Mn	P	S	Mo	Cr	Nb	Ni
0.062 7	0.218 5	1.440 4	0.012 1	0.001 1	0.052 9	0.20	0.038 5	—
Al _s	Al _l	N	B	Ca	Ti	碳当量 CE_{Irw}	冷裂纹敏感系数 CE_{pcm}	
0.029 4	0.030 9	0.005 2	0.000 1	0.002 3	0.016 9	0.357	0.158	

该钢管材料满足 API 5L 45th PSL2 对 X65M 的要求。可以看到,钢管材料的碳含量和合金含量都较低,结合良好的热机械轧制工艺,可以获得细化的微观组织。

根据母材的化学成分和焊缝低温冲击性能要求,拟定采用了低碳 C 的 MnNiTiB, MnMoNiTiB 和 MnMoTiB 合金系列焊丝,焊丝的化学成分设计详见表 2。

焊丝成分设计选用原则为:①添加 Mn 合金元素

表2 焊丝材料的化学成分(质量分数,%)

设计系列	焊丝牌号	Mn/Si	Si	Mn	Ti	B	Mo	Ni	C	S	P
MnNiTiB	H08DG	27.08	0.065	1.76	0.050 0	0.004 0	—	0.3	0.071	0.005	0.010
MnMoNiTiB	MK65HGX-III(合作开发)	8.71	0.186	1.62	0.058 8	0.004 0	0.370	0.2	0.040	0.001	0.009
MnMoTiB	H08C	12.26	0.128	1.57	0.047 0	0.003 6	0.342	—	0.057	0.002	0.005

可以提高焊缝金属的强度^[2-3];②添加微量元素钛 Ti、硼 B,焊接时容易产生钛元素的氧化物和氮化物,从而抑制先共析铁素体在晶界形核长大,同时为针状铁素体提供形核核心,有利于提高针状铁素体比例^[4];③添加镍 Ni 合金元素,有助于提高焊缝中针状铁素体和细小的粒状贝氏体铁素体的含量,能够增强焊缝金属的强韧性^[5-6];④而添加适量的钼 Mo 合金元素能降低相变温度,推迟多边形和块状铁素体的转变,延迟贝氏体转变,促使针状铁素体转变,并且同时可细化晶粒尺寸,降低韧脆转变温度^[7-8]。

钢管焊接工艺采用内外单层多丝焊,内焊一层

一道三丝焊,外焊一层一道四丝焊,拟定内外焊的方案。

内焊和外焊的前丝采用 DC-1500 数字化直流埋弧焊机,内焊中丝、后丝、外焊的中丝 1、中丝 2 和后丝采用 AC-1500 数字化交流埋弧焊机。

焊接工艺参数见表 3。焊接前,需要把在试样板上开 X 形坡口,装配前坡口及附近应无影响焊接质量的杂物^[9]。装配间隙 ≤ 1.0 mm,错边 ≤ 0.8 mm,在试件的背面首先采用气保焊进行预焊^[10]。

焊接后,分析焊接接头成分,观察其金相微观组织,测定显微硬度和夏比 V 形缺口试验^[11]。

表3 焊接工艺参数

前丝电流 I_1/A	中丝电流 I_2/A	后丝电流 I_3/A	直径 D/mm	焊接速度 $v/(m \cdot \text{min}^{-1})$	试板厚度 d/mm
850 ~ 950	650 ~ 750	550 ~ 650	4.0	1.3 ~ 1.8	19.1

2 试验结果及分析

2.1 焊缝成分分析

表4是不同焊丝方案焊缝熔敷金属的化学成分分析结果。

2.2 宏观组织分析

由于篇幅原因,文中只通过图1列出N04焊丝方案所焊的X65M管线钢接头的显微组织。

如图1a所示,外焊缝、焊缝根部、内焊缝各区域内的金相组织分布基本均匀较为一致,晶内主要为

表4 焊缝熔敷金属的化学成分(质量分数,%)

序号	位置	焊丝匹配	C	Si	Mn	Cu	Ni	Cr	Ti	Mo	Nb	B	Alt	N
N01 (MnNiTiB)	内	H08DG(3根)	0.06	0.28	1.59	0.03	0.11	0.13	0.016	0.042	0.03	0.0007	0.018	0.0054
	外	H08DG(4根)	0.05	0.28	1.63	0.03	0.15	0.11	0.011	0.034	0.02	0.0008	0.015	0.0049
N02 (MnMoNiTiB+ MnMoTiB)	内	MK65HGX-III(1根)+ H08C(2根)	0.05	0.30	1.59	0.05	0.08	0.14	0.017	0.127	0.03	0.0008	0.02	0.0052
	外	MK65HGX-III(1根)+ H08C(3根)	0.05	0.30	1.58	0.06	0.11	0.12	0.015	0.132	0.02	0.0009	0.018	0.0063
N03 (MnMoNiTiB+ MnMoTiB)	内	MK65HGX-III(2根)+ H08C(1根)	0.05	0.30	1.61	0.05	0.27	0.11	0.014	0.123	0.02	0.0008	0.016	0.0041
	外	MK65HGX-III(2根)+ H08C(2根)	0.05	0.30	1.61	0.05	0.12	0.12	0.013	0.142	0.02	0.0009	0.016	0.0058
N04 (MnMoNiTiB)	内	MK65HGX-III(3根)	0.05	0.30	1.58	0.06	0.05	0.13	0.015	0.140	0.03	0.0008	0.018	0.0057
	外	MK65HGX-III(4根)	0.05	0.32	1.64	0.06	0.05	0.09	0.011	0.187	0.02	0.0011	0.013	0.0069

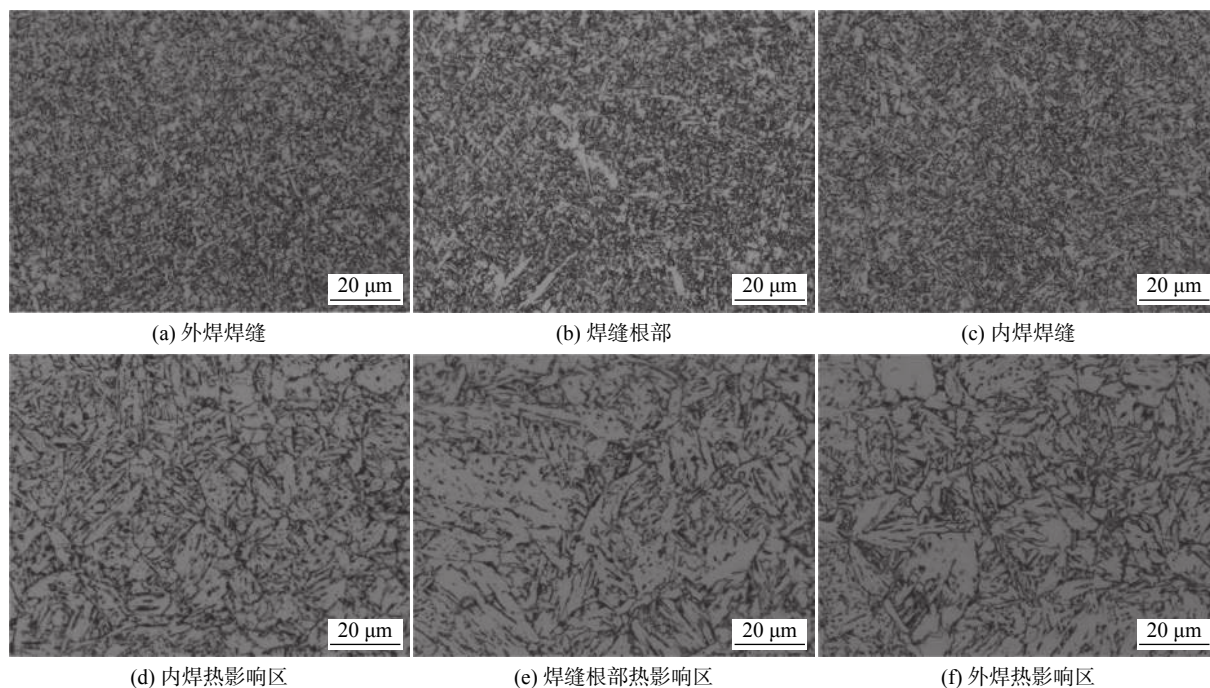


图1 N04焊丝的焊缝和热影响区(粗晶区)的显微组织

细小的针状铁素体(AF)组织,在局部区域存在多边形铁素体(PF)和准多边形铁素体(QF)组织,以及少

量的珠光体(P)组织。焊缝金属中AF含量可达70%~85%,PF和QF含量约为5%~10%,剩余部分为P。

其中针状铁素体主要以多位向、相互交错分布,犹如筐篮的编织结构,其晶界呈现大角度界面,有利于提高微裂纹扩展阻力,使焊缝具有良好的低温强韧性^[12]。

对于外焊缝、焊缝根部、内焊缝3个区域,焊缝根部区域的组织均匀性稍差,主要是由于处于中部,在前后内外焊接时,属于二次加热区域,会造成一定的物相偏析(不排除有成分偏差的可能性),再其次其处于焊缝中心,二次加热,冷却速度相对内外焊缝降温较慢,会促成晶粒长大,所以其晶粒与内外焊缝相比会偏大^[13]。内焊缝的组织均匀性最好,主要是受外焊缝焊接时加热温度的影响有“退火”功能,其组织更均匀。

如图1b所示,内焊、外焊、焊缝根部3个位置的热影响区,晶界内主要为多边形铁素体(PF)和准多边形铁素体(QF)组织,并以无序界面的多边形和不规则的粗大块状存在,呈现网状分布。在局部区域

出现了少量的层片状形态的珠光体,且原始晶界中出现的M-A岛状组织。这种铁素体+珠光体的组织形式,致使热影响区性能恶化。

内焊、外焊、焊缝根部3个位置的热影响区区域相比较而言,内焊热影响区组织均匀性相对较好,原始奥氏体晶粒度大小相对较小,主要是由于焊接热输入小。而外焊、焊缝根部热影响区因为属于高热输入或二次加热区域,导致热影响区性能下降。

2.3 硬度试验

根据技术要求,参照ASTM E384—2011e1标准《材料的努氏和维氏硬度标准试验方法》^[14]。焊接接头按图2标识的点进行取样,数据图2所示,可以看到,焊缝中心的热影响区硬度最高,热影响区的硬度最低,最大硬度为232 HV10,最小硬度为188 HV10,均满足阿尔及利亚市场的客户技术要求最大允许硬度不超过250 HV10的要求。

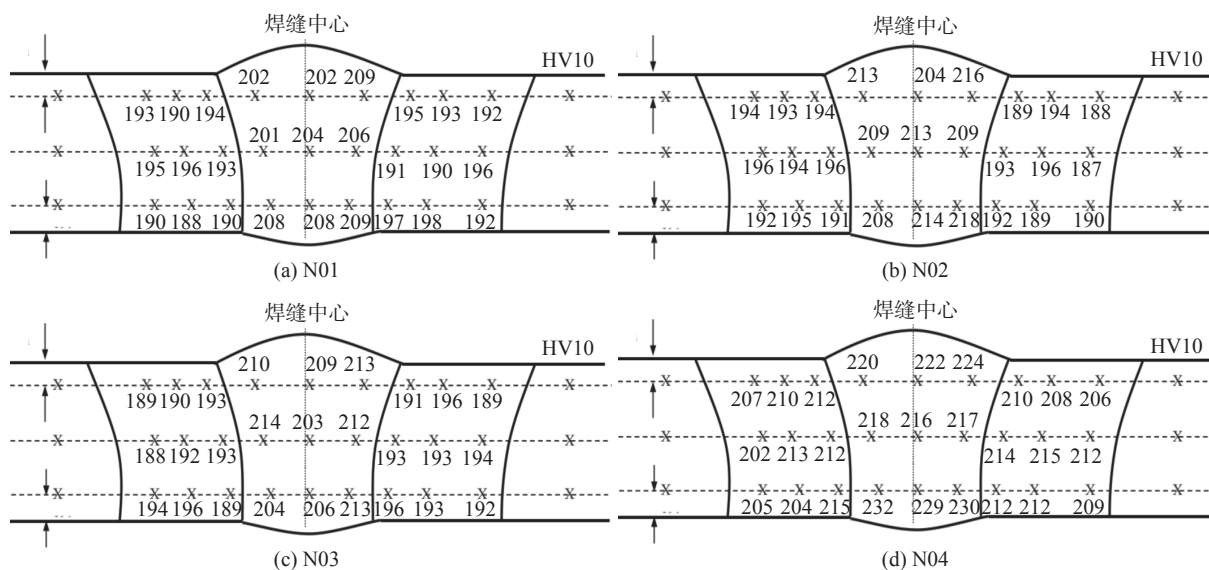


图2 不同焊丝的焊接接头硬度分布

2.4 夏比冲击试验

如图3所示,从4种焊丝焊接的焊缝接头中,截取焊缝和热影响区制作夏比V形缺口试样,每种焊丝测试5个试样,分别是20, 0, -29, -40, -60℃。参照ASTM A370—2012a标准《钢产品机械性能试验的方法与定义》,对热影响区和焊缝处取试样,在JBD-30D低温冲击机上进行多个温度的夏比冲击试验^[15]。

根据对焊缝和热影响区冲击验收值:在-29℃条件,没有规定塑性剪切面积值,只要求单个大于49J,平均值大于61J,见表5。从4套焊丝匹配方案中可

以看出,N03的焊缝冲击没有通过技术要求,其他均可满足技术要求。不含Mo钢板匹配的4种基本的焊丝合金成分的夏比冲击试验过渡曲线可知,N04(MnMoNiTiB)合金系保证了较大体积分数的细晶针状铁素体和低的氮含量,所以N04合金系和N02和N03(MnMoNi+MnMoTiB)合金系接近上平台区(常温区间)韧性值比N01(MnNiTiB)合金系高,转变温度也更低,N02和N03(MnMoNi+MnMoTiB)组合合金系在低温波动较大。从经济性上看,N01方案满足技术要求,同时价格在4个方案中是最低的。

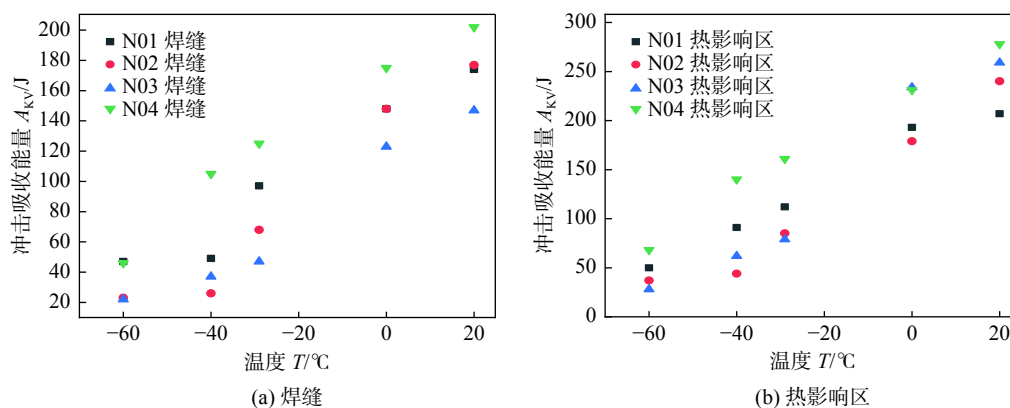


图3 焊接接头的夏比冲击试验结果

表5 -29 °C 冲击试验结果

位置	试样尺寸 (mm × mm × mm)	温度 T/°C	冲击吸收能量 A_{kv}/J									
			技术要求		N01		N02		N03		N04	
			平均值	试样值	平均值	试样值	平均值	试样值	平均值	试样值	平均值	试样值
焊缝	55 × 10 × 10	-29	61	49	97	98, 98, 96	68	52, 72, 80	47	36, 45, 60	125	140, 120, 116
热影响区	55 × 10 × 10	-29	61	49	112	103, 113, 120	85	89, 81, 85	79	72, 88, 76	161	181, 157, 145

3 结论

(1) 采用4种不同化学成分的焊丝对X65M管线钢进行焊接试验, 其中N01, N02, N04均为满足: 在-29 °C条件, 要求焊缝中心、热影响区冲击吸收能量单个值 ≥ 49 J, 平均值 ≥ 61 J, 其中N04方案富余量最大。从经济性上看, N01方案满足技术要求, 同时价格在4个方案中是最低的。

(2) 文中含钼Mo的X65M钢板匹配的4种焊丝方案中, MnNiTiB合金系的低温冲击性能好于组合式的MnMoNiTiB + MnMoTiB合金系和MnMoNiTiB系。

参考文献

[1] 李少坡, 麻庆申, 李家鼎, 等. Nb-Ni系X70管线钢基础参数研究[J]. 轧钢, 2009, 26(5): 5-8.
 [2] Al Jabr H M, Speer J G, Matlock D K, et al. Anisotropy of mechanical properties of API-X70 spiral welded pipe steels[J]. *Materials Science Forum*, 2013, 753: 538-541.
 [3] Kushnarev A V, Shekhovtsov E V, Kapustina E S, et al. Production of pipe steel of strength classes X80 and X70[J]. *Steel in Translation*, 2008, 38(6): 490-491.
 [4] 董利明, 杨莉, 戴军, 等. Mn、Ni、Mo含量对K65热煨弯管焊缝组织转变和低温韧性的影响[J]. 金属学报, 2017, 53(6): 657-668.
 [5] 张楠, 陈延清, 徐晓宁, 等. X80管线钢Cu-Ni含量及热输入

对CGHAZ冲击离散性的影响[J]. 焊接学报, 2016, 37(9): 119-124.
 [6] 王学林, 董利明, 杨玮玮, 等. Mn/Ni/Mo配比对K65管线钢焊缝金属组织与力学性能的影响[J]. 金属学报, 2016, 52(6): 649-660.
 [7] 孙强, 段英新, 苏衍福, 等. X65钢管焊接工艺分析及质量控制[J]. 电焊机, 2021, 51(3): 100-102.
 [8] 刘旭彪, 高世一, 夏铭. X65管线钢管闪光对焊温度场数值模拟[J]. 热加工工艺, 2018, 47(17): 196-200.
 [9] 赵朋成, 刘振伟, 王璐璐, 等. X65管线钢管闪光对焊工艺参数对焊接接头力学性能和缺陷的影响[J]. *材料导报*, 2017, 31(20): 87-91.
 [10] 房卫萍, 高世一, 徐望辉, 等. X65管线钢管闪光焊接接头组织及低温冲击韧性的研究[J]. 热加工工艺, 2017, 46(13): 37-40.
 [11] 任景辉, 付彦宏, 陈小伟, 等. X65钢级 $\phi 762$ mm × 28.6/30.2 mm海底直缝埋弧焊管[J]. *石油科技论坛*, 2013, 32(6): 55-57.
 [12] 石平, 虞玮, 杨建军, 等. X65钢管施工焊口六点钟位置焊接裂纹原因分析和对策[J]. 天然气与石油, 2009, 27(4): 44-46.
 [13] 杨耀彬, 刘云, 田小江, 等. 2205/X65复合管焊接工艺及焊接接头组织性能研究[J]. *钢管*, 2018, 47(5): 14-18.
 [14] 王波. X65MS钢级 $\phi 914$ mm × 19.8 mm耐蚀管线的开发与生产[J]. 焊管, 2017, 40(4): 37-40.

(下转第64页)

3 结论

(1)通过制作堆焊试样,对堆焊试样进行相应的理化分析及理论验证,确定了一种较优的用于14Cr1MoR(H)和12Cr2Mo1R(H)材质加氢设备内壁单层带极电渣堆焊工艺,且在该焊接工艺参数下堆焊厚度达5~7 mm,铁素体含量为5~10 FN,化学成分、金相组织及微观裂纹情况等达到项目高标准预期,为后续相关方面的研究提供了一定的借鉴。

(2)以实际生产项目为研究基础,通过理论与试验相结合的方法,探究了加氢设备内壁单层带极电渣堆焊技术及工艺,掌握了符合国外高标准技术要求的单层带极电渣堆焊工艺,填补了公司在相关技术领域的空白,对提高生产效率及缩短设备的制造周期和降低成本有着重要的意义。

参考文献

- [1] 韩波,徐锴,郭泉,等. Inconel 690带极电渣堆焊熔敷金属力学性能[J]. 焊接, 2018(6): 43-47.
- [2] 刘艳,马小兵,王军杰,等. 加氢精制反应器制造中的单层带极电渣堆焊技术[J]. 化工机械, 2020, 47(3): 393-396.
- [3] Yazar K U, Pawar S, Park K S, et al. Effect of process parameters on the clad morphology, microstructure, microtexture, and hardness of single layer 316L stainless steel

during direct energy deposition[J]. *Materials Characterization*, 2022, 191: 112148.

- [4] 徐锴,冯伟,邹力维,等. 工艺参数对带极单层电渣堆焊层成分、成形及性能的影响[J]. 焊接, 2019(12): 32-36.
- [5] 周振丰. 金属熔焊原理及工艺[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [6] 张璞临. 加氢反应器带极堆焊的质量控制[J]. 压力容器, 1999, 16(4): 49-54.
- [7] 吕锋杰. 加氢反应器堆焊层铁素体含量及其测定[J]. 特种设备安全技术, 2009(1): 36-38.
- [8] 张利尧. 加氢反应器单层带极电渣堆焊及堆焊层性能研究[D]. 兰州: 兰州理工大学硕士学位论文, 2017.
- [9] 陈龙,陈明健,张海波. 加氢反应器凸台堆焊层铁素体含量测定与分析[J]. 石油化工设备技术, 2018, 39(2): 18-20, 25.
- [10] 杜兵,贾玉力,饶清鹏. 加氢反应器不锈钢堆焊熔合区氢剥离行为的分析[J]. 焊接学报, 2013, 34(1): 1-3.

第一作者: 李凌,工程师;主要从事焊接工艺、焊接材料、焊接自动化装备、压力容器制造工艺及工程项目管理等方面的研究;lil@izpje.com。

通信作者: 郭潇潇,硕士,工程师;主要从事焊接自动化技术、焊接CAE仿真分析及压力容器制造工艺等方面的研究;18340359319@163.com。

(编辑:王龙权)

本文引用格式:

李凌,郭潇潇,忻红波,等. 加氢设备壳体内壁单层带极电渣堆焊技术[J]. 焊接, 2023(9): 59-64.

Li Ling, Guo Xiaoxiao, Xin Hongbo, et al. Monolayer strip electrode electroslag surfacing technology for inner wall of hydrogenation equipment shell[J]. *Welding & Joining*, 2023(9): 59-64.

(上接第58页)

- [15] 曹能. 管线钢管纤维素焊条高速环焊接头韧性分析[J]. 宝钢技术, 2016(2): 17-20.

化、机械设计与分析、机器视觉方面的科研工作; leoduba@qq.com。

通信作者: 廖聪,博士;主要从事车辆动力学及电子控制、智能汽车、电动汽车、先进刀具技术及微纳材料等研究;624285475@qq.com。

(编辑:曲畅)

第一作者: 杜健辉,博士,高级工程师;主要从事焊接自动

本文引用格式:

杜健辉,廖聪,李伟,等. 不同焊丝对X65M管线钢管焊接接头组织与低温冲击韧性的影响[J]. 焊接, 2023(9): 54-58, 64.

Du Jianhui, Liao Cong, Li Wei, et al. Effect of different welding wires on microstructure and low temperature impact toughness of welded joint of X65M steel pipe[J]. *Welding & Joining*, 2023(9): 54-58, 64.