

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2024.12.11

双金属复合管侧壁开孔处机械氩弧堆焊 镍基耐腐蚀层的性能研究

张 凯, 程显平*, 田 雷, 刘文婷, 张恒玮

海洋石油工程(青岛)有限公司, 山东 青岛 266520

摘 要: 针对双金属复合管侧壁开孔处因无耐腐蚀层而易发生腐蚀的问题, 采用机械氩弧堆焊的方法在 API 5L X65+625 Clad 管材侧壁制备了 ERNiCrMo-3 镍基耐腐蚀层, 与传统手工氩弧制备的耐腐蚀层的组织和性能进行了对比研究。研究结果显示: 采用机械氩弧堆焊方法具有更高的生产效率、更低的热输入且制备的镍基耐腐蚀层具有良好的成形性、优异的力学性能和耐腐蚀性能, 符合工程设计要求, 可推广应用于石油天然气领域。其中, 机械氩弧制备的镍基耐腐蚀层显微组织较手工堆焊更细小且无金属间化合物、碳化物、氮化物等析出相; 堆焊层、热影响区、基材的平均显微硬度分别为 226 HV、200 HV、179 HV, 较手工氩弧堆焊层硬度低且未见局部硬化区域; 同时耐腐蚀层具有更低的稀释率, 铁元素含量仅为 5.74%, 耐腐蚀当量 PREN 高达 50, 表现出良好耐点蚀能力; ASTM G28-2 (2015) 方法 A 试验条件下晶间腐蚀仅为 0.437 mm/y, 表现出良好的耐晶间腐蚀能力。

关键词: 双金属复合管; 机械氩弧; 堆焊; 晶间腐蚀

中图分类号: TG455 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2024)12-0068-06

Study on the Properties of Ni-based Corrosion Resistant Coating by Mechanical Gas Tungsten Arc Welding Overlayed on Bimetallic Composite Pipe

ZHANG Kai, CHENG Xianping*, TIAN Lei, LIU Wenting, ZHANG Hengwei

Offshore Petroleum Engineering (Qingdao) Co., Ltd., Qingdao 266520, China

Abstract: In order to solve the problem that the side wall of bimetallic composite pipe is easy to corrode without corrosion resistant layer, this paper adopted the method of Mechanical Gas tungsten arc welding to prepare ERNiCrMo-3 Ni-based corrosion resistant layer on the side inner wall of API 5L X65Q+625 Clad pipe and comparative study of manual argon arc corrosion-resistant layer of the preparation of the organization and performance. The results show that mechanical argon arc welding has higher efficiency and lower heat input than manual argon arc welding. The nickel-based cladding layer has good forming, excellent mechanical properties and corrosion resistance. Among them, the mechanical argon arc welding preparation of nickel-based corrosion resistant layer microstructure is finer than the manual cladding and no intermetallic compounds, carbides, nitrides and other precipitation phases; cladding layer, heat-affected zone, the average microhardness of the substrate were 226 HV, 200 HV, 179 HV. Mechanical cladding layer have lower microhardness than manual argon arc cladding layer and did not have local hardening area; At the same time, corrosion-resistant layer has a lower dilution rate, the iron element content is 5.74%, corrosion resistance equivalent PREN up to 50, showing good resistance to pitting corrosion; ASTM G28-2 (2015) method A test conditions of intergranular corrosion is only 0.437 mm/y, showing good resistance to intergranular corrosion performance.

Keywords: Bimetallic composite pipe; Mechanical Gas tungsten arc welding; Overlay; Intergranular corrosion

引用格式: 张凯, 程显平, 田雷, 等. 双金属复合管侧壁开孔处机械氩弧堆焊镍基耐腐蚀层的性能研究[J]. 电焊机, 2024, 54(12): 68-73.

收稿日期: 2024-09-11 修回日期: 2024-12-06

作者简介: 张 凯(1998—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事金属焊接与表面改性研究。E-mail: zhangkai52@cooec.com.cn。

通讯作者: 程显平(1986—), 男, 学士, 高级工程师, 主要从事金属焊接与表面改性研究。E-mail: chengxp2@cooec.com.cn。

Citation:ZHANG Kai, CHENG Xianping, TIAN Lei, et al. Study on the Properties of Ni-based Corrosion Resistant Coating by Mechanical Gas Tungsten Arc Welding Overlayed on Bimetallic Composite Pipe[J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(12): 68-73.

0 引言

在石油与天然气领域,开采的油气中常含H₂S、CO₂和Cl⁻等强腐蚀性介质,同时传输油气的工艺管线要长期服役于高温、高压环境,容易发生应力腐蚀开裂,安全事故隐患大^[1]。过去此类管线常采用纯碳钢或纯镍基合金材料,但纯碳钢耐腐蚀性能差、纯镍基合金经济性差。为了同时兼顾耐腐蚀性和经济性,油田开发设计开始使用带镍基内衬的双金属复合管,复合管综合耐腐蚀、高强度、经济性等优点于一体,其生产成本通常仅为纯镍基管的1/5~1/2。双金属复合管中内衬厚度通常为1~3 mm,基体视承受压力不同通常为6 mm以上^[2]。

在海洋石油工程建造过程中,双金属复合管侧壁通常需要开孔以安装支管,而开孔处由于缺少镍基耐腐蚀层,一旦服役于高温、高压和高腐蚀性介质的工况下,极易发生应力腐蚀开裂,因此需要在侧壁开孔处制备镍基耐腐蚀层以保证管线的耐腐蚀性能。耿天鸽^[3]等采用手工电弧焊的方法以ENi-CrMo-3作为焊材在SA-516MGr.415材料内壁制备了镍基耐腐蚀层,结果显示,制备的耐腐蚀层成形良好、晶间腐蚀速率仅为0.96 mm/a。张西雷^[4]等采用手工氩弧焊的方法以ENiCrMo-3作为焊材在双金属复合管内壁制备镍基耐腐蚀层,结果显示,耐腐蚀层成形良好、晶间腐蚀速率仅为0.9829 mm/a。目前,海洋石油工程中针对于双金属复合管侧壁开孔处堆焊多为手工氩弧方法,其效率低、稳定性差。为解决这一问题,本文采用机械氩弧堆焊的方法制备镍基耐腐蚀层,并与传统手工氩弧制备的耐腐蚀

层进行对比研究,探究两者显微组织、显微硬度、化学成分和晶间腐蚀性能区别,机械氩弧工艺在石油天然气领域推广应用具有重要意义。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验用基材为API 5L X65+625Clad管材,其外径为323.9 mm,壁厚为17.5 mm碳钢层+3 mm镍基合金耐腐蚀层,其化学成分如表1所示。API 5L X65+625Clad具有高强度、高延伸率和高断裂韧性,其抗拉强度可达570 MPa,延伸率可达20%^[5],因此API 5L X65+625Clad被认为是制造高温高压管道的理想选择。试验用焊材为AWS A5.14 ERNi-CrMo-3焊丝,其主要合金元素为Ni、Cr、Mo、Nb,其化学成分如表2所示。其中,Ni元素具有良好的延展性并与其他金属具有良好的相容性,Cr元素能够在表面形成Cr₂O₃钝化膜以提高耐腐蚀性能,少量的Mo能够增强抗H₂S、Cl⁻腐蚀性能,Nb元素能够提高高温耐腐蚀性能^[6-7]。ERNiCrMo-3作为一种镍基合金,焊接过程中熔池粘稠、流动性差,气体难以从熔池逃逸而容易产生气孔;母材和焊材本身含有P、S,容易产生低熔点共晶体偏聚在晶界处,容易产生热裂纹;堆焊时铁元素稀释至覆层,容易形成镍铁金属间化合物,对覆层的力学性能和耐腐蚀性能造成负面影响。

1.2 试验方法

试验前使用铣床和打磨设备(见图1)去除碳钢层,保留的镍基内衬层呈现台阶形式。试验前使用

重点专题——船舶先进焊接制造技术

表1 试验用复合管主要化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of test substrate (wt. %)

材料	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	P	S	Al	Nb	V	Fe
API 5L X65	0.09	1.12	0.24	0.15	0.17	0.15	0.16	0.011	0.001	0.032	0.021	0.030	余量
625Clad	0.10	0.50	0.50	58	20.0	8.0	—	—	—	0.40	3.15	—	—

表2 试验用焊材化学成分(质量分数,%)

Table 2 Chemical composition of filler metal for testing (wt. %)

C	Mn	Fe	P	S	Si	Cu	Ni	Al	Ti	Cr	Nb+Ta	Mo	Others
0.009	0.07	0.38	0.003	0.001	0.04	0.01	64	0.13	0.22	22.5	3.45	8.8	<0.50

饱和硫酸铜溶液刻蚀以保证台阶处镍基合金表面无碳钢层残余,分别采用手工氩弧和机械氩弧的方法在复合管侧壁开孔处制备镍基合金堆焊层。为避免 ERNiCrMo-3 堆焊层出现裂纹、气孔、未熔合等缺陷,焊接前使用无水乙醇擦拭表面,焊接时保

证焊接电弧高度适中。选用的机械氩弧设备由于不具备相贯线识别跟踪系统,因此需密切关注相贯线处堆焊层的成形性,对于相贯线曲率较大的位置需手工氩弧进行补焊。试件预热温度为 15 ℃,钨极尺寸为 2.4 mm,堆焊过程中主要参数如表 3 所示。

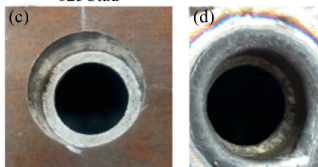
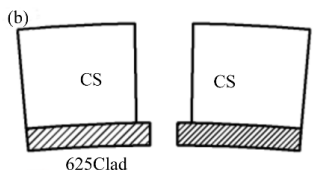
表 3 堆焊过程中的主要参数

Table 3 Parameters of surfacing welding process

方法	焊丝		保护气		焊接电流		电压/V	焊接速度 /(mm·min ⁻¹)	热输入 /(kJ·mm ⁻¹)
	直径/mm	焊接材料	类型	流量/(L·mm ⁻¹)	类型&极性	电流/A			
手工氩弧	2.4	ERNiCrMo-3	Ar	15-25	DCEN	160~190	11~13	80~110	1.0~1.3
机械氩弧	0.9	ERNiCrMo-3	Ar	15-25	DCEN	170~190	11~13	290~300	0.5~0.7



(a)堆焊用FITCO ETRCS设备



(b)侧壁开孔;(c)堆焊前形貌;(d)机械氩弧堆焊后表面形貌

图 1 堆焊设备及堆焊前后的工件形貌

Fig. 1 Surfacing equipment and the appearance of the workpiece before and after surfacing

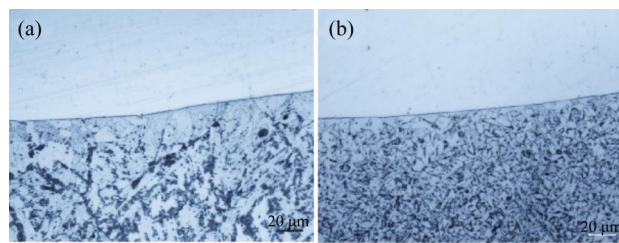
堆焊完成后切取试样进行性能分析。金相试样经打磨、抛光、腐蚀后使用光学显微镜观察焊缝、热影响区和母材的显微组织,母材和热影响区选用 3% 硝酸酒精溶液腐蚀,堆焊层使用王水腐蚀。使用显微硬度计对金相试样进行硬度试验,载荷为 10 kg,加载时间和保载时间为 15 s。晶间腐蚀试验遵循 ASTM G28-2(2015)方法 A 进行,试样在试验前去除碳钢基材并使用 25% HNO_3 +8% HF 在 60 ℃ 温度下加热 30~40 min 酸洗样品表面,而后在 50%

$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3\text{-H}_2\text{SO}_4$ 溶液加热至沸腾,试验 120 h,最终测定腐蚀速率。镍基堆焊层化学成分的取样位置为距表面 1 mm 处,同时为保证测定化学成分的准确性,选用湿法分析方法测定元素含量^[8-10]。

2 结果与分析

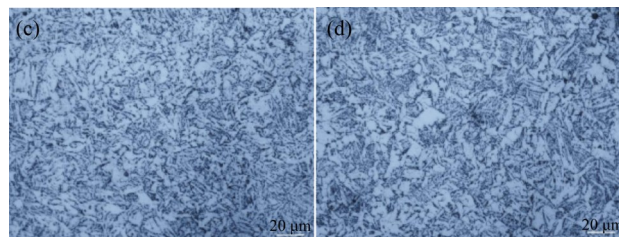
2.1 显微组织

由图 2 可知,手工氩弧和机械氩弧制备的堆焊层均与母材呈冶金结合,熔合线平整光滑,未见裂纹、气孔、未熔合等缺陷,机械氩弧在提升 200% 堆焊效率的同时也能够很好的保证成形性。机械氩弧较手工氩弧堆焊后热影响区处晶粒明显细小且热影响区区域宽度更窄,这是由于手工氩弧堆焊时



(a)手工氩弧热影响区

(b)机械氩弧热影响区



(c)手工氩弧母材

(d)机械氩弧母材

图 2 两种堆焊方法的堆焊层与母材显微组织

Fig. 2 Microstructure of the surfacing layer and the base material in two surfacing methods

热输入明显高于机械氩弧,堆焊过程中热影响区晶粒发生长大。手工氩弧和机械氩弧堆焊后热影响区显微组织基本类似,均为铁素体和珠光体,手工氩弧堆焊热影响区还伴有少量的魏氏组织,这是高的热输入造成的过热组织。两者母材组织均为铁素体和珠光体,且均呈带状分布形式。

由图3可知,制备的镍基耐腐蚀层成形良好,无夹杂、气孔、未熔合等缺陷,镍基耐腐蚀层顶部、中部和根部均未见镍-铁的金属间化合物相、碳化物、氮化物等,这保证了耐腐蚀层良好的塑韧性和耐腐蚀性能。机械氩弧堆焊层显微组织为顶部的等轴树枝晶、中部树枝晶和底部树枝晶,而手工氩弧堆焊镍基耐腐蚀层显微组织为顶部树枝晶、中部树枝晶和底部的胞状晶,手工氩弧堆焊镍基耐腐蚀层显微组织比机械氩弧粗大,这是因为镍基耐腐蚀层在高温温度区域停留时间较长而造成的晶粒长大。

2.2 硬度试验

双金属复合管长期输送含腐蚀介质流体,在腐蚀介质和拉伸应力的共同作用下,即便低浓度的 H_2S 、 CO_2 和 Cl^- 也足以导致敏感材料发生应力腐蚀开裂。由显微组织可知,堆焊层未形成金属间化合物相,具备适宜的强度和韧性指标以及抗腐蚀性能,同时为避免出现局部硬化区域导致发生应力腐蚀开裂,进行显微硬度试验。由表4可知,显微硬度由焊缝至热影响区、母材呈现逐渐下降的趋势,这是由于镍基合金较碳钢具有更高的硬度,而热影响区出现的晶粒粗大使得硬度高于母材。两堆焊层硬度均匀,说明未形成金属间化合物相且未出现明显成分偏析情况。手工氩弧堆焊层、热影响区、基材的平均显微硬度分别为233 HV、213 HV、185 HV;机械氩弧堆焊层、热影响区、基材平均显微硬度分别为226 HV、200 HV、179 HV,手工氩弧堆焊层、热影响区、基材硬度略高于机械氩弧,与显微组织中晶粒尺寸呈现正相关。

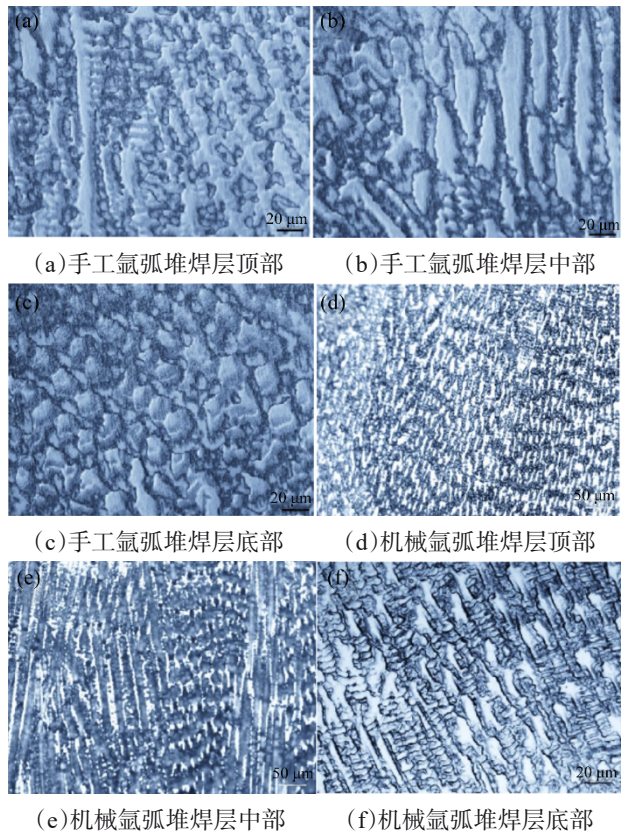


图3 堆焊的镍基耐腐蚀层微观形貌

Fig. 3 Microscopic morphology of the prepared nickel-based corrosion-resistant layer

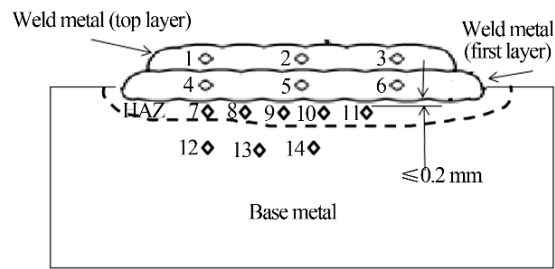


图4 堆焊层硬度试验取样位置

Fig. 4 Specimen position for hardness test

2.3 化学成分分析

双金属复合管在堆焊过程中,母材熔化稀释至镍基耐腐蚀层中,而当Fe稀释过多时,镍基耐腐蚀层容易发生腐蚀。镍基耐腐蚀层中铁元素含量小

表4 堆焊层硬度试验结果(HV)

Table 4 Hardness test results (HV)

堆焊方法	WM						HAZ					BM		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
手工氩弧	231	243	247	221	227	230	218	211	212	209	217	179	188	188
机械氩弧	243	222	232	222	223	211	198	200	207	198	196	182	168	186

于 10%,且耐点蚀当量大于 45 时^[8],材料具备良好的耐点蚀能力,且耐点蚀当量越大抗点蚀能力越强。手工氩弧和机械氩弧堆焊耐腐蚀层化学成分如表 5 所示,耐腐蚀层均富含 Cr、Mo、Ni 元素,Cr 元素能够在表面形成 Cr_2O_3 以提高镍基合金耐蚀性能,少量的 Mo 能够增强抗 H_2S 、 Cl^- 腐蚀性能。两种方

法制备的镍基耐腐蚀层的耐点蚀当量均为 50,耐点蚀能力相当;机械氩弧堆焊制备的镍基耐腐蚀层 Fe 元素含量为 5.74%,明显少于手工氩弧的 9.92%,这得益于机械氩弧堆焊的高效率和低的热输入,堆焊过程中母材的稀释率更低,使得机械氩弧堆焊制备的镍基耐腐蚀层具有更好的耐点蚀能力。

表 5 镍基耐腐蚀层化学成分(质量分数,%)

Table 5 Chemical composition of Ni-based corrosion resistant layer (wt. %)

方法	C	Mn	Fe	P	S	Si	Cu	Ni
要求	≤0.10	≤0.50	≤10	≤0.02	≤0.015	≤0.50	≤0.50	≥58.0
手工氩弧	0.02	0.10	9.92	<0.01	<0.02	0.048	0.087	54.89
机械氩弧	0.01	0.15	5.74	<0.01	<0.002	0.026	0.093	60.99
方法	Al	Ti	Cr	Nb	Ta	Mo	N	PREN
要求	≤0.40	0.40	20.0~23.0	Nb+Ta: 3.15~4.15		8.0~10.0	—	≥45
手工氩弧	0.14	0.19	22.58	3.60	<0.01	8.51	—	50
机械氩弧	0.15	0.21	21.12	3.35	<0.01	8.58	0.0086	50

2.4 晶间腐蚀试验

由表 6 晶间腐蚀试验结果可知,机械氩弧和手工氩弧堆焊制备的镍基耐腐蚀层均表现出了良好的耐晶间腐蚀性能,但机械氩弧的晶间腐蚀效率 0.437 mm/y 明显小于手工氩弧的 0.698 mm/y。镍基耐腐蚀层在高温高压的工况条件下具有晶间腐蚀倾向,这是由于高温环境下晶格间隙增大且氧的扩散速率增加,导致晶间腐蚀速率增加;高压环境增加了氧流量,导致晶间腐蚀速率增加;镍基耐腐蚀层堆焊过程中处于敏化温度区间位置处容易析出碳化铬造成晶间贫铬,手工氩弧堆焊过程中母材稀释率过大使得铁含量过多,这导致手工氩弧堆焊制备的镍基耐腐蚀层晶间腐蚀速率高于机械氩弧。

表 6 镍基耐腐蚀层晶间腐蚀试验结果

Table 6 Results of intergranular corrosion test

试样编号	试样尺寸	试验时间	腐蚀速率/(mm/y)	
			要求	结果
手工氩弧	30×20×2	120	≤0.914	0.698
机械氩弧	30×20×2	120		0.437

3 结论与展望

3.1 结论

本文分别采用机械氩弧和手工氩弧两种方法在 API 5L X65+625Clad 管材侧壁开孔处制备了 ER-NiCrMo-3 耐蚀覆层,并对耐蚀覆层进行了显微组

织、显微硬度、化学成分及晶间腐蚀试验,获得了以下结论:

(1)机械氩弧制备的镍基耐腐蚀层不仅具有良好的成形性,且具有更高的堆焊效率,效率约为手工氩弧的 3~4 倍,热输入仅为手工氩弧的 0.4~0.6。

(2)机械氩弧制备的镍基耐腐蚀层与母材呈冶金结合,熔合线平整光滑,未见裂纹、气孔、未熔合等缺陷。堆焊层显微组织较手工堆焊更细小且无金属间化合物相、碳化物、氮化物等析出相。

(3)机械氩弧堆焊的镍基耐腐蚀层堆焊层、热影响区、基材平均显微硬度分别为 226 HV、200 HV、179 HV,较手工氩弧堆焊硬度低且未见局部硬化区域。

(4)机械氩弧堆焊制备的耐腐蚀层具有更低的稀释率,铁元素含量仅为 5.74%,耐腐蚀当量 PREN 高达 50,表现出良好耐点蚀能力。

(5)机械氩弧堆焊制备的耐腐蚀层具有优良的耐晶间腐蚀能力,ASTM G28-2(2015)方法 A 试验条件下晶间腐蚀仅为 0.437 mm/y。

使用机械氩弧制备的镍基耐腐蚀层具有良好的成形性,优异的力学性能和耐腐蚀性能,符合工程设计要求。不仅可推广应用于在石油天然气领域,还可应用于大规模堆焊生产双金属复合管。

3.2 展望

本文通过采用机械氩弧的方法制备堆焊层具

有较高的生产效率,但使用的焊接设备在堆焊至相贯线处容易出现成形性差的现象,设备仅能实现小曲率相贯线的机械化焊接,生产中对于大曲率相贯线处仍需要手工氩弧进行补焊。未来,为了提高生产效率,可以通过结合相贯线的空间曲线特征并优化焊枪轨迹控制系统实现大曲率相贯线机械化焊接^[11]。

参考文献:

- [1] 刘阳. UNS8825 复合管堆焊工艺及耐蚀[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020.
LIU Y. UNS8825 composite pipe surfacing welding technology and corrosion resistance[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2020.
- [2] 寇建峰, 赵洪元. 管口堆焊复合管焊接工艺研究[J]. 天然气与石油, 2018(36)1: 18-22.
KOU J F, ZHAO H Y. Research on welding technology of surfacing welded composite pipe[J]. Natural Gas & Oil, 2018(36)1: 18-22.
- [3] 耿亚鸽, 白天祥, 于成科. 基于 ASME 规范的镍基合金耐蚀堆焊工艺评定[J]. 化工机械, 2022, 49(3): 540-543.
GENG Y G, BAI T Y. Process evaluation for corrosion resistance surfacing of nickel-based alloys based on ASME code[J]. Chemical Machinery, 2022, 49(3): 540-543.
- [4] 张西雷, 薛慧, 闫光宁. 双金属复合管内堆焊工艺[J]. 焊接, 2018(12): 48-50.
ZHANG X L, XUE H, YAN G N. Bimetallic composite pipe surfacing technology[J]. Welding & Joining, 2018(12): 48-50.
- [5] 张健阳. X65-Inconel 625 冶金复合管焊接接头的晶间腐蚀性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.
ZHANG J Y. Study on intergranular corrosion properties of welded joint of X65-Inconel 625 metallurgical composite pipe[D]. Tianjin: Tianjin University, 2019.
- [6] 唐雪. ERNiCrMo-3 焊丝熔敷金属组织及蠕变行为研究[D]. 上海: 中国科学院大学, 2021.
TANG X. Study on Microstructure and creep Behavior of Metal deposited with ERNiCrMo-3 Welding Wire [D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences, 2021.
- [7] 雷治刚, 夏天东, 王晓军. ERNiCrMo-3 焊丝组织性能及内部结构研究[J]. 电焊机, 2024, 54(07): 38-45.
LEI ZH G, XIA T D, WANG X J. Study on microstructure and internal texture of welding wire [J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(07): 38-45.
- [8] TANG X. The American Society of Mechanical Engineers. 2021 ASME Boiler&Pressure Vessel Code IX Qualification Standard for Welding, Brazing, and Fusing Procedures; Welders; Brazers; and Welding, Brazing, and Fusing Operators; 2021 [S]. New York: The American Society of Mechanical Engineers, 2021.
- [9] NACE MR0175. Sulfide Stress Cracking Resistant Metallic Materials for Oilfield Equipment[S]. 2003.
- [10] ASTM G28-02. Standard Test Methods of Detecting Susceptibility to Intergranular Corrosion in Wrought, Nickel-Rich, Chromium-Bearing Alloys[S]. 2015.
- [11] 王军, 邵超祥, 张亮, 等. 焊接机器人运动学仿真及控制系统研究[J]. 电焊机, 2023, 53(09): 29-36.
WANG J, SHAO CH X, ZHANG L, et al. Research on Kinematics Simulation and Control System of Welding Robot [J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(09): 29-36.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>

