

加氢设备壳体内壁单层带极电渣堆焊技术

李凌, 郭潇潇, 忻红波, 虞世君

(镇海石化建安工程股份有限公司, 浙江 宁波 315200)

摘要: 采用试验与理论相结合的方法, 研究了单层带极电渣堆焊技术在加氢设备壳体内壁堆焊方面的应用。在加氢设备常用的 14Cr1MoR(H) 和 12Cr2Mo1R(H) 材料上进行堆焊试验, 并对试件进行组织和性能分析。结果表明, 在文中焊接工艺参数下, 试件的堆焊厚度达 5~7 mm, 超过国内 4.0~4.5 mm 通用要求; 焊态下的堆焊层表面采用磁性法测定及按 WRC-1992 图测算铁素体含量均达 5~10 FN 范围; 堆焊层表面及以下 3 mm 处的化学成分满足相关高标准规定; 堆焊层截面无未焊透、裂纹及其它线性缺陷; 堆焊层、热影响区和母材中无未回火的马氏体和微观裂纹存在; 堆焊层、热影响区和母材的硬度不超过 235 HV10。堆焊试验结果满足预期要求, 确定了较优的加氢设备壳体内壁单层带极电渣堆焊工艺参数, 为后续产品的研制提供了技术基础, 也为后续单层带极电渣堆焊的研究提供一定的借鉴。

关键词: 堆焊厚度; 耐热钢; 单层带极电渣堆焊; 工艺试验

中图分类号: TG455 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hj.20221227001

Monolayer strip electrode electroslag surfacing technology for inner wall of hydrogenation equipment shell

Li Ling, Guo Xiaoxiao, Xin Hongbo, Yu Shijun

(Zhenhai Petrochemical Jianan Engineering Co., Ltd., Ningbo 315200, Zhejiang, China)

Abstract: The method of combining experiment and theory was adopted to study application of monolayer strip electrode electroslag surfacing technology on inner wall of hydrogenation equipment shell. Surfacing tests were carried out on 14Cr1MoR(H) and 12Cr2Mo1R(H) materials commonly used in hydrogenation equipment, and microstructure and mechanical properties of specimens were analyzed. The results showed that under welding parameters in the paper, surfacing thickness of specimens reached 5~7 mm, which exceeded domestic general requirement of 4.0~4.5 mm. Ferrite content of surfacing layer in the welded state was both in the range of 5~10 FN when it was measured by magnetic method and WRC-1992 diagram. Chemical composition on the surface and below 3 mm of surfacing layer met the relevant high standards. No incomplete penetration, cracks or other linear defects appeared in the cross section of surfacing layer. There were no untempered martensite and micro-cracks in surfacing layer, heat affected zone and base material. Hardness of surfacing layer, heat affected zone and base material did not exceed 235 HV10. Test results of surfacing met the expected requirements and better monolayer strip electrode electroslag surfacing parameters for inner wall of hydrogenation equipment shell was determined, which provided a technical basis for development of subsequent products and a certain reference for subsequent research of monolayer strip electrode electroslag surfacing.

Key words: surfacing thickness, heat resistant steel, monolayer strip electrode electroslag surfacing, process test

0 前言

单层带极堆焊在高效率、低成本方面有着明显的优势, 运用前景广阔, 但单层带极堆焊技术对堆焊

材料和堆焊工艺都有着较高的要求^[1]。目前, 国外单层带极堆焊技术已日趋成熟, 逐渐成为加氢设备壳体内壁堆焊的主流趋势, 国内加氢设备内壁堆焊运用并不多, 通常单层堆焊厚度规定在 4.0~4.5 mm 范

围^[2]。笔者公司承接的某项目要求单层堆焊厚度达 5~7 mm 范围,难度较大。众所周知,随着堆焊厚度的增加,焊道搭接部位越易产生夹渣和未熔合等焊接缺陷;与此同时,堆焊厚度的增大,所需焊接电流较大,熔深加深,稀释率也有所增加,堆焊层铁素体含量会随之提高,因此在保证堆焊层表面铁素体数达 5~10 FN 前提下,提高堆焊层厚度,需要制定较优的焊接工艺参数^[3]。通过理论及试验相结合的方法,在加氢设备常用的 14Cr1MoR(H) 和 12Cr2Mo1R(H)

两种材料上进行堆焊试验,并通过试件的试验分析,确定焊接工艺参数^[4]。

1 工艺试验

1.1 带极堆焊方法及材料选择

综合考虑电弧型与电渣型堆焊方法优缺点,试验选择电渣堆焊^[5]。堆焊试验焊材选用德国伯乐品牌,焊带牌号为 SOUDOTAPE21.11 LNB,焊剂牌号为 RECORD EST122,化学成分分别见表 1 和表 2。焊带

表1 焊带 SOUDOTAPE21.11 LNB 化学成分 (质量分数, %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Nb	N	Fe
0.014	0.3	1.5	0.018	0.003	21.3	0.08	11.2	0.1	0.65	0.042	余量

表2 焊剂 RECORD EST122 化学成分 (质量分数, %)

CaF ₂	SiO ₂	CaO + MgO	K ₂ O + Na ₂ O	Al ₂ O ₃
62.5	6	4.5	2	25

规格为 0.5 mm × 60 mm。

1.2 带极堆焊设备选择

设备试验采用美国 LINCOLN 焊接设备, DC-1500 A 直流平特性电源。

1.3 焊接工艺确定

1.3.1 焊接工艺参数选择

单层带极堆焊焊接参数对堆焊质量有较大影响,试验焊接工艺参数通过焊接试验确定,当焊接电流在 1 100~1 400 A 范围内,单层堆焊厚度可达到 5 mm 以上,焊缝成形质量及堆焊层的铁素体含量控制能得以保证。电弧电压选择在 22~28 V 范围内,焊道成形良好,堆焊时的渣池稳定。焊接速度控制在 140~180 cm/min 时,能够保证达到单层堆焊厚度的最低要求,同时也能保证相邻焊道熔合良好^[6]。

1.3.2 带极伸出长度选择

单层带极堆焊工艺中,带极伸出长度对堆焊层厚度及堆焊质量有直接影响,随着带极伸出长度,电阻热不断增大,钢带熔化速度加快,堆焊层厚度相应增加,但带极伸出长度并不是越长越好,较长的带极伸出长度会导致引弧困难,电弧不稳定等问题。试验通过参考前人经验及试验,决定选用带极伸出长度为 25~45 mm,为有效引弧,堆焊前将焊带端部剪成 110°~130°锥形或 20°~30°尖角。

1.3.3 焊道搭接量选择

焊道搭接量在单层带极堆焊过程中,主要影响堆焊层平直度,当相邻焊道搭接量偏小,可能导致咬边,堆焊层平面度不符合要求等质量问题,当该值偏大,易于产生夹渣缺陷且会造成材料浪费。试验搭接量要求为 6~10 mm。

1.3.4 焊剂覆盖厚度选择

焊剂覆盖厚度选择依据经验,长度约为 35 mm 左右,合适的覆盖厚度可以有效降低堆焊过程中出现的气孔、夹渣等质量缺陷。

1.3.5 铁素体含量的控制

国外加氢设备内壁堆焊 E347 型耐蚀层表面的铁素体要求达 5~10 FN 范围,且规定耐蚀堆焊层的微观组织为奥氏体+少量铁素体双相组织,其主要目的是为了防止热裂纹和抗晶间腐蚀性能,当耐蚀层铁素体含量过高时,在设备在制造过程中的焊后热处理及后续长期服役于高温工况下,会促使 δ 铁素体向 σ 脆性相转变^[7]。堆焊层铁素体含量的控制主要取决于化学成分,同时也受焊接工艺参数及堆焊层的厚度等影响,堆焊层越厚、层间温度越高,堆焊层铁素体比例越高,故堆焊过程中应严格控制层间温度、焊接工艺参数等,确保堆焊层的铁素体数达技术要求。

2 焊接工艺评定试验

2.1 试验过程

母材分别采用 14Cr1MoR(H) 和 12Cr2Mo1R(H) 耐热钢材料,化学成分见表 3。14Cr1MoR(H) 试板规格 400 mm × 300 mm × 30 mm, 12Cr2Mo1R(H) 试板规格

400 mm × 300 mm × 40 mm, 进行了 2 项单层带极电渣堆焊工艺评定试验。14Cr1MoR(H) 预热温度 $T_p \geq 100$ °C, 道间温度 100 ~ 150 °C; 12Cr2Mo1R(H) 预热温度 $T_p \geq 150$ °C, 道间温度 150 ~ 180 °C。堆焊工艺参数见表 4。2 件试板堆焊完毕后立即进行了消氢处理, 14Cr1MoR(H) 为 (690 ± 14) °C × 20 h, 12Cr2Mo1R(H) 为 (690 ± 14) °C × 32 h, 消氢结束后, 对 2 件试板堆焊

层进行 100%UT + 100%PT 检测, 按 NB/T 47013—2011《承压设备无损检测》I 级合格。分别对 2 块试件在焊态下进行堆焊层的化学成分和铁素体检测试验, 再分别按表 5 热处理工艺参数进行模拟最大焊后热处理, 热处理完成后分别切取硬度试样、金相分析试样、大小侧弯曲试样、截面厚度测量试样及晶间腐蚀试样, 并开展了相关性能试验^[8]。

表3 母材化学成分(质量分数, %)

母材	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Sb	Sn	As	Fe
14Cr1MoR(H)	0.001 4	0.53	0.47	0.004	0.001	1.47	0.18	0.02	0.59	0.001	0.003	0.001	余量
12Cr2Mo1R(H)	0.001 3	0.04	0.59	0.007	0.004	2.42	0.03	0.01	1.04	0.001	0.001	0.002	余量

表4 堆焊工艺参数

电流	焊接电流	电弧电压	堆焊速度	带极伸出长度	焊道塔接量	焊剂厚度
极性	I/A	U/V	$v/(mm \cdot min^{-1})$	l/mm	c/mm	b/mm
DCRP	1 200 ~ 1 400	22 ~ 28	140 ~ 180	25 ~ 45	6 ~ 10	20 ~ 40

表5 热处理工艺参数

堆焊试样	装炉温度 $T/°C$	升温速率 $v_i/(°C \cdot h^{-1})$	保温温度 $T_0/°C$	保温时间 t/h	降温速率 $v_d/(°C \cdot h^{-1})$	冷却方式
14Cr1MoR(H)	300	90 ~ 110	690	20	60 ~ 80	280 ~ 320 °C 以下断电炉冷
12Cr2Mo1R(H)	300	120 ~ 140	690	32	80 ~ 100	280 ~ 320 °C 以下断电炉冷

2.2 试验结果与分析

2.2.1 化学成分及铁素体测算

在焊态下切取试样, 对试板堆焊层表面及表面以下 3 mm 的堆焊层, 采用 ARL-4460 型号光谱分析仪进行化学成分分析, 按 WRC-1992 图进行铁素体数测算^[9]。试验结果见表 6, 其中 A_1, B_1 为堆焊层表面取样, A_2, B_2 为堆焊层下 3 mm 位置处取样。

2.2.2 铁素体测定

在焊态下采用经 AWS 3.2 校准的 MP30 型铁素体测定仪对堆焊层表面进行检测, 检测结果如图 1 所示。通过对图 1 数据进行分析, 可以发现 2 项焊接工艺评定中 3 道堆焊层表面铁素体数测量值均符合要求, 在技术规定的 5 ~ 10 FN。

2.2.3 小侧弯试验

按标准要求, 取垂直和平行于堆焊方向的大、小侧弯试样进行横向和纵向弯曲试验, 14Cr1MoR(H) 试样规格 150 mm × 10 mm × (S + 堆焊) mm, 12Cr2Mo1R(H) 试样规格 80 mm × 13 mm × 3 mm, 其目的是研究包括堆焊层及热影响区在内的受拉面是否存在缺陷, 经

过弯曲试验后发现, 试样均无任何裂纹或开口缺陷, 试验结果详见表 7。

2.2.4 晶间腐蚀试验

按 ASTM A262《Standard practices for detecting susceptibility to intergranular attack in austenitic stainless steels》方法 E 中对堆焊层进行晶间腐蚀试验, 试样经 180°弯曲法评定, 受拉面无任何裂纹, 堆焊层均无晶间腐蚀倾向。

2.2.5 硬度试验

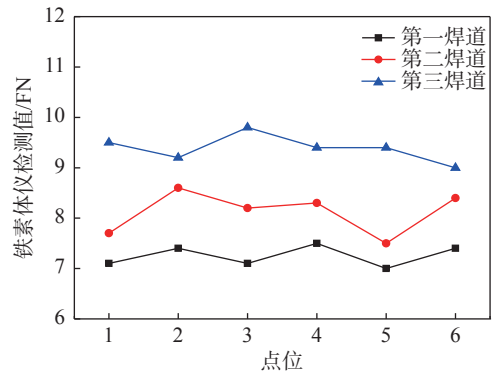
分别从经热处理后的堆焊试件上截面试样, 按图 2 所示的位置进行显微硬度检测。试验结果详见表 8, 硬度检测值均在技术要求的范围内, 其中堆焊层表面硬度 $H_B \leq 234$ HB, 截面显微硬度 $H_V \leq 235$ HV10。

2.2.6 金相组织分析试验

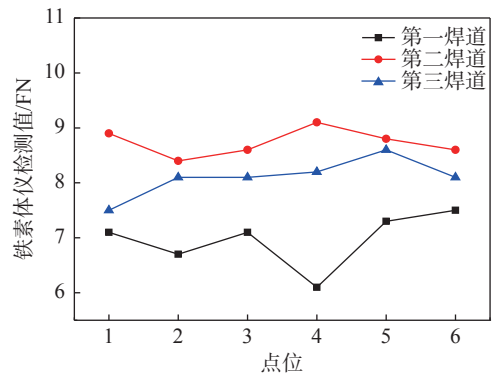
表 9 列出了上述焊接工艺评定的堆焊焊接接头金相分析结果, 可以看出金相组织符合相关技术要求。其中, 14Cr1MoR(H) 堆焊试样的金相组织如图 3 所示, 12Cr2Mo1R(H) 堆焊试样的金相组织如图 4 所示。

表6 堆焊层表面及以下 3 mm 处化学成分 (质量分数, %) 及铁素体数 (FN)

元素	14Cr1MoR(H)		12Cr2Mo1R(H)		要求值
	A ₁	A ₂	B ₁	B ₂	
C	0.031	0.036	0.030	0.032	≤0.05
Si	0.52	0.51	0.37	0.47	≤0.65
Mn	1.27	1.21	1.23	1.31	0.5 ~ 2.5
P	0.017	0.016	0.013	0.013	≤0.03
S	0.002	0.002	0.001	0.003	≤0.02
Cr	20.21	19.04	19.69	20.01	17 ~ 21
Mo	0.06	0.09	0.12	0.09	≤0.75
Ni	10.98	10.32	10.22	10.68	9 ~ 12
Cu	0.04	0.04	0.03	0.03	≤0.2
Nb+Ta	0.55	0.52	0.65	0.53	10C ~ 1.1
N	0.08	0.05	0.04	0.037	5 ~ 10
FN	7.5	6.4	8.5	8.9	5 ~ 10



(a) 14Cr1MoR (H)



(b) 12Cr2Mo1R (H)

图1 堆焊层表面铁素体含量

表7 弯曲试验结果

堆焊试样	大弯曲 N ₁ /件		小弯曲 N ₂ /件		弯曲试验参数			试验结果
	横向	纵向	横向	纵向	弯轴直径 D/mm	支座距离 L/mm	弯曲角度 α/(°)	
14Cr1MoR(H)	2	2	2	2	40	63	180	完好
12Cr2Mo1R(H)	2	2	2	2	40	63	180	完好

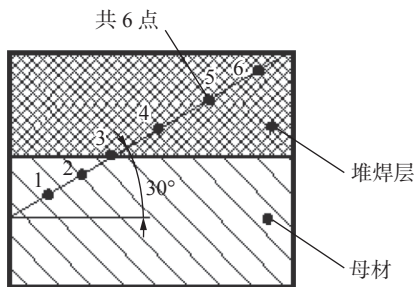


图2 试样显微硬度试验位置示意图

14Cr1MoR(H) 及 12Cr2Mo1R(H) 堆焊试样的金相组织分布是极为相似的, 堆焊层主要由枝晶状铁素体及奥氏体组成, 同时伴有弥散分布的少量碳化物, 枝晶状铁素体是在堆焊的过程中焊材快速冷却后形

成的, 易于引发裂纹等缺陷, 因此需要对试件进行进一步的解剖检测; 母材及过渡区主要由索氏体及粒状贝氏体组成, 二者的形成都是在堆焊过程中母材经过堆焊过程中的加热及快速冷却后形成的, 提高了母材及热影响区的强度。

2.2.7 解剖检测及厚度测量

采用 5 倍放大镜对试件横截面进行剖面检查, 堆焊层、热影响区内未发现裂纹、未熔合及其它线性缺陷。采用带刻度的游标卡尺对堆焊层进行厚度测量, 结果见表 10, 堆焊层厚度均大于技术要求的最低值 5 mm。

2.3 氢剥离试验

为了模拟堆焊层在服役条件下抗氢剥离的能力, 按照 ASME G146《Standard practice for evaluation of

表8 热处理后堆焊层硬度试验结果

堆焊试样	堆焊层表面布氏硬度 H_B/ HB	堆焊层截面显微硬度 $H_V/HV10$					
		1点	2点	3点	4点	5点	6点
14Cr1MoR(H)	147, 154, 152, 150	184	186	185	190	192	192
12Cr2Mo1R(H)	132, 141, 138, 131	175	176	182	197	202	182

表9 金相组织分析试验结果

检测部位	14Cr1MoR(H)	12Cr2Mo1R(H)
堆焊层	奥氏体 + 枝晶状铁素体 + 弥散分布的碳化物	奥氏体 + 枝晶状铁素体 + 弥散分布的碳化物
热影响区	索氏体 + 少量粒状贝氏体	索氏体 + 少量粒状贝氏体
母材	索氏体 + 少量粒状贝氏体	索氏体 + 少量粒状贝氏体 + 少量铁素体
补充	均无回火马氏体和微裂纹	均无回火马氏体和微裂纹

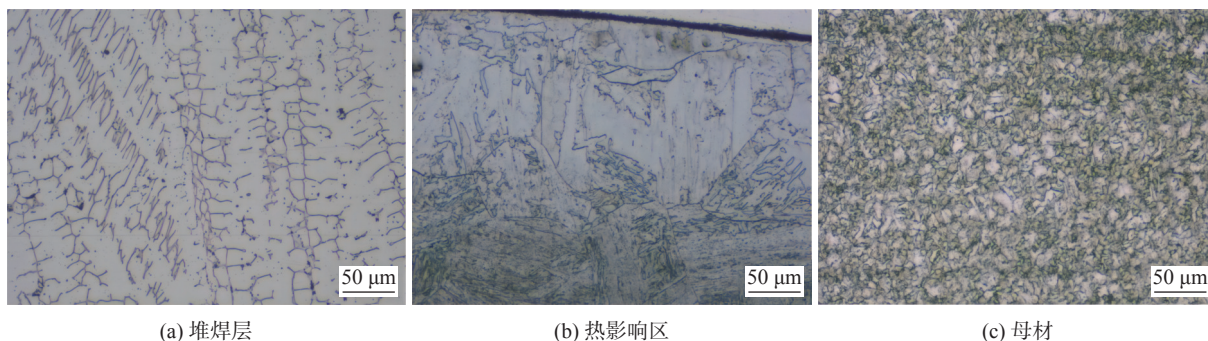


图3 14Cr1MoR(H) 堆焊试样的金相组织

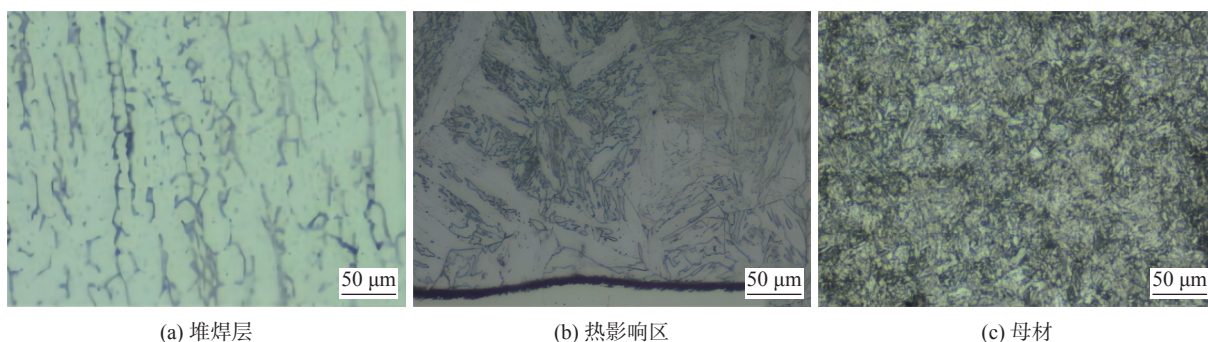


图4 12Cr2Mo1R(H) 堆焊试样的金相组织

表10 堆焊层宏观截面厚度检测结果

堆焊试样	堆焊层厚度	技术要求值
	B_1/mm	B_2/mm
14Cr1MoR(H)	5.50 ~ 6.59	5 ~ 7
12Cr2Mo1R(H)	5.48 ~ 6.49	5 ~ 7

in high-pressure, high-temperature refinery hydrogen service》标准对2件试样分别进行了堆焊层的氢剥离试验,试验条件为试验温度:480℃;试验压力:18.0MPa;循环次数:2次;每次循环充氢保压时间:48h;冷却速度:第一循环 $v_c \geq 150$ ℃/h,第二循环 $v_c \geq 300$ ℃/h,充氢试验完成后分别在出炉48h和7d后进行超声波检查,均未发现剥离现象,试验结果表明:2件试样的堆焊层抗氢剥离试验满足要求^[10]。

disbonding of bimetallic stainless alloy/steel plate for use

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.