doi:10.3969/j.issn.1001-4837.2025.06.003

试验研究

20MnNiMo钢表面TP316L不锈钢堆焊工艺研究及应用

王雪骄
（二重（德阳）重型装备有限公司，四川德阳 618000）

摘 要：针对20MnNiMo钢在特定环境下的耐腐蚀性能不足问题，采用电渣焊（ESW）、药芯焊丝电弧焊（FCAW）和钨极气体保护焊（GTAW）3种工艺，在其表面堆焊TP316L不锈钢层以提高其耐蚀性。通过焊接工艺试验确定了稳定的焊接参数，并对堆焊层进行了化学成分分析、侧弯试验、硬度测试、晶间腐蚀试验及金相组织观察。结果表明，堆焊层化学成分均匀，且符合标准要求（Ni的质量分数为11.0%~15.0%，Cr的质量分数为16.0%~20.0%）；侧弯试验无裂纹产生；硬度值均低于250HV10；晶间腐蚀性能合格；显微组织为均匀的奥氏体基体+少量铁素体。研究证实，ESW，FCAW和GTAW 3种工艺均能满足设备制造要求，ESW采用单层带极堆焊，堆焊层厚度4.0~4.5 mm；FCAW和GTAW堆焊时需采用过渡层TP309L+耐蚀层TP316L双层堆焊，耐蚀层FCAW至少1层，耐蚀层GTAW至少2层，堆焊层总厚度5.0~5.5 mm。该研究为20MnNiMo钢在腐蚀环境中的工程应用提供了可靠的数据支撑和工艺指导，具有重要的工程实践价值。

关键词：20MnNiMo钢；TP316L钢；电渣焊；药芯焊丝电弧焊；钨极气体保护焊
中图分类号：TH142；TG142.33；TG455 **文献标志码：**A

Research and application of TP316L stainless steel cladding process on 20MnNiMo steel surface

WANG Xuejiao
（Erzhong（Deyang） Heavy Equipment Co.，Ltd.，Deyang 618000，China）

Abstract: To address the insufficient corrosion resistance of 20MnNiMo steel in specific environments，three welding processes，electroslag welding（ESW），flux cored arc welding（FCAW），and gas tungsten arc welding（GTAW），were employed to overlay a TP316L stainless steel layer on its surface to improve corrosion resistance. Stable welding parameters were determined through welding process tests，and the cladding layers were subjected to chemical composition analysis，side bend tests，hardness tests，intergranular corrosion tests，and metallographic structure observation. The results indicate that the chemical composition of the cladding layers is uniform and meets standard requirements（Ni mass fraction：11.0% to 15.0%，Cr mass fraction：16.0% to 20.0%）；no cracks were generated in the side bend tests；hardness values were all below 250HV10；intergranular corrosion performance was qualified；and the microstructure consisted of a uniform austenitic matrix with a small amount of ferrite. The study confirms that all three processes，ESW，FCAW，and GTAW，can meet equipment manufacturing requirements. ESW uses single layer strip cladding with a cladding thickness of 4.0 to 4.5 mm；FCAW and GTAW require a two layer cladding of transition layer TP309L and corrosion resistant layer TP316L，with at least one layer for FCAW and at least two layers for GTAW in the corrosion resistant layer，and a total cladding thickness of 5.0 to 5.5 mm. This research provides reliable data support and process guidance for the engineering application of 20MnNiMo steel in corrosive environments，demonstrating significant practical engineering value.

Key words: 20MnNiMo steel；TP316L steel；electroslag welding；flux cored arc welding；gas tungsten arc welding

收稿日期：2025-01-02 修回日期：2025-04-23

0 引言

20MnNiMo钢作为一种高强度、高韧性的合金钢，具有优良的高温强度、抗疲劳强度、抗低温冲击性能[1]，广泛应用于石油、化工、海洋等领域压力容器的制造。但在特定环境下其耐腐蚀性相对较差，易发生腐蚀现象，影响了其使用寿命和安全性。而堆焊作为一种有效的表面改性技术，可以通过在母材表面堆焊一层耐腐蚀、耐磨损的材料来提高其综合性能。目前，对于20MnNiMo钢的焊接及相关性能的研究较多[1-5]，但对于20MnNiMo钢表面的堆焊研究很少。文中研究试验依托某海洋项目设备开展工作，旨在对20MnNiMo钢表面TP316L不锈钢堆焊工艺进行研究，以期获得满足设备制造要求的堆焊层。

该海洋项目设备壳体材料为20MnNiMo钢锻件，所有与介质接触的壳体内表面应堆焊厚度不小于4 mm的TP316L不锈钢堆焊层，堆焊层表面下1.5~2 mm范围内的化学成分应满足表1中要求。

表1 堆焊层化学成分要求

Tab.1 Chemical composition requirements of cladding layer %

化学元素	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
含量	≤0.04	≤2.5	≤1.00	≤0.030	≤0.020	11.0~15.0	16.0~20.0	2.0~3.0	≤0.75

模拟设备制造的最大焊后热处理（Max.PWHT）为（590±10）℃×9_0^{+1} h，最小焊后热处理（Min. PWHT）为（590±10）℃×3_0^{+1} h。在模拟Min.PWHT和Max.PWHT状态下进行硬度试验；在Max.PWHT状态下进行弯曲、晶间腐蚀、微观金相试验。

1 焊接试验

1.1 焊接方法

在满足制造技术要求的前提条件下，结合依托设备结构，尽可能选用堆焊效率高的焊接方法。因此，对于大面积堆焊部位，采用堆焊效率高的电渣焊（ESW）带极堆焊；对于局部焊带不能堆焊的部位及补堆部位，采用焊接效率较高的药芯焊丝电弧焊（FCAW）堆焊；对于小孔内壁，采用钨极气体保护焊（GTAW）堆焊。

1.2 试件材料及规格

试件采用20MnNiMo钢锻件加工制备，试件材料的化学成分见表2。试件材料模拟Max.PWHT和Min.PWHT后的力学性能见表3。

表2 20MnNiMo钢的化学成分

Tab.2 Chemical composition of 20MnNiMo steel %

化学元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
要求值	0.17~0.23	0.15~0.40	1.20~1.50	≤0.012	≤0.005	≤0.30	0.45~0.60
实测值	0.20	0.25	1.31	0.006	0.001	0.18	0.50
化学元素	Ni	V	As	Sn	Sb	Pb	Bi
要求值	0.40~1.00	≤0.050	<0.015	<0.015	<0.010	<0.010	<0.010
实测值	0.43	0.003	0.006	0.003	0.001	0.001	0.001
化学元素	As+Sn+Sb+Pb+Bi		H（0.001‰）	O（0.001‰）	N（0.001‰）	Cu	—
要求值	<0.035		提供数据			≤0.20	—
实测值	0.012		0.6	13	50	0.06	—

表3 20MnNiMo钢的力学性能

Tab.3 Mechanical properties of 20MnNiMo steel

项目	热处理状态	要求值	实测值
R_m/MPa		620~790	672
R_{eL}/MPa	Max.PWHT	≥450	542
A/%		≥16	23.0
KV_2（-20 ℃）/J		≥47	214,229,228
冷弯	Min.PWHT	D=3a，无裂纹	无裂纹
硬度/HBW		提供数据	215,220,222

综合考虑焊接工艺评定试件厚度覆盖和堆焊时试件变形问题，试件的规格：ESW为50 mm×250 mm×400 mm，FCAW为40 mm×250 mm×400 mm，GTAW为5 mm×250 mm×400 mm。

1.3 焊接材料

20MnNiMo钢表面堆焊TP316L不锈钢属于异种金属的焊接，堆焊层熔敷金属的稀释和堆焊层熔合区的塑性对堆焊层的质量至关重要[6]。由于

带极堆焊中电渣焊(ESW)与埋弧焊(SAW)相比,具有熔敷效率高、熔深浅且均匀、成形好,表面质量优良、焊剂消耗低等优点[7-8],故带极堆焊方法选择单层带极ESW堆焊。选择国内某公司的焊材:焊带为EQ309LMo(60 mm×0.5 mm)和配套焊剂,焊带的化学成分如表4所示。

表4 焊带的化学成分

Tab.4 Chemical composition of welding strip %

化学元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
要求值	≤0.030	≤1.00	0.5~2.5	≤0.025	≤0.015	21.0~25.0	9.0~14.0	2.0~3.5	≤0.75
实测值	0.027	0.38	1.92	0.015	0.001 6	21.25	13.39	2.59	0.039

FCAW和GTAW堆焊时,考虑堆焊过程中合金元素的烧损和稀释,为满足整个堆焊层有效厚度的要求,采用双层堆焊:第1层为过渡层,选用Cr,Ni合金元素含量更高的TP309L焊材进行过渡;第2层为耐蚀层,采用与制造要求一致的TP316L焊材进行堆焊。

选择国内某公司的焊材,FCAW:过渡层药芯焊丝E309LT0-1,∅1.6 mm,耐蚀层药芯焊丝E316LT0-1,∅1.6 mm,熔敷金属化学成分如表5所示;GTAW:过渡层焊丝ER309L,∅1.2 mm,耐蚀层焊丝ER316L,∅1.2 mm,焊丝的化学成分如表6所示。

表5 E309LT0-1和E316LT0-1药芯焊丝熔敷金属的化学成分

Tab.5 The chemical composition of deposited metal of E309LT0-1 and E316LT0-1 fluxpcored wire %

化学元素		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
E309LT0-1	要求值	≤0.040	≤1.00	0.5~2.5	≤0.040	≤0.030	22.0~25.0	12.0~14.0	≤0.75	≤0.75
	实测值	0.031	0.49	1.24	0.012	0.002 8	24.31	12.89	0.013	0.000 2
E316LT0-1	要求值	≤0.040	≤1.00	0.5~2.5	≤0.040	≤0.030	17.0~20.0	11.0~14.0	2.0~3.0	≤0.75
	实测值	0.022	0.42	1.28	0.014	0.003 4	18.38	13.01	2.810	0.043

表6 ER309L和ER316L焊丝的化学成分

Tab.6 Chemical composition of ER309L and ER316L welding wires %

化学元素		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
ER309L	要求值	≤0.03	0.30~0.65	1.00~2.50	≤0.025	≤0.020	23.0~25.0	12.0~14.0	≤0.75	≤0.75
	实测值	0.023	0.53	2.33	0.014	0.014	23.22	13.94	0.001 0	0.004 9
ER316L	要求值	≤0.030	0.30~0.65	1.00~2.50	≤0.025	≤0.020	18.0~20.0	11.0~14.0	2.0~3.0	≤0.75
	实测值	0.019	0.54	2.04	0.022	0.016	18.88	11.92	2.18	0.042

1.4 焊接工艺

根据表2可以看出,20MnNiMo钢的碳当量较高,具有较大的淬硬倾向和氢致裂纹敏感性,因此在焊接过程中,需要特别注意防止裂纹的产生。可通过采用预热、控制焊接参数等方法来解决这些问题。较低的预热及层间温度有利于减弱不锈钢堆焊层δ相→σ脆性相的转变倾向,防止晶间腐蚀发生[9],结合20MnNiMo钢焊接时的预热温度和以往堆焊制造经验,单层堆焊和双层堆焊中,过渡层的堆焊预热温度≥125 ℃。为避免因堆焊层温度过高而引起熔敷金属晶粒粗大、不锈钢敏化及易产生热裂纹等问题,焊接过程中,过渡层层间温度控制在125~200 ℃,耐蚀层层间温度<100 ℃。

根据文献[10],单层电渣堆焊层厚度在4.5~5.0 mm时,堆焊表面以下3 mm范围内堆焊层化学成分比较均匀。因此,ESW堆焊1层,堆焊层总厚度按照4.0~4.5 mm控制。鉴于技术要求中堆焊层化学成分取样位置在表面下1.5~2.0 mm处,而FCAW一层的堆焊厚度约2.5 mm,同时,考虑堆焊成分稀释的问题,将FCAW工艺设置为堆焊2层:TP309L过渡层1层+TP316L耐蚀层1层,过渡层堆焊厚度为2.0~2.5 mm,耐蚀层堆焊厚度为2.5~3.0 mm,堆焊层总厚度按照5.0~5.5 mm控制,采用99.5%的CO_2气体保护焊接。对于GTAW,一层的堆焊厚度不能达到2.5 mm以上,为保证堆焊层总厚度和堆焊层的有效厚度,将GTAW工艺设置为堆焊3层:TP309L过渡层1层+TP316L耐蚀层2层,每层堆焊厚度为1.5~2.0 mm,堆焊层总厚度按照5.0~5.5 mm控制,采用99.99%的氩气保护焊接。通过焊接试验对工艺参数进行调整和优化,筛选出焊接过程稳定性、焊缝成形美观、焊接工艺性好的规范参数,结合设备制造技术条件和

NB/T 47014—2011《承压设备焊接工艺评定》中的相关要求，进行焊接工艺评定试验。

2 试验结果与分析

2.1 堆焊层厚度测量

从焊态表面测量堆焊层最小厚度：ESW为4.0 mm，满足堆焊层总厚度4.0~4.5 mm的要求；FCAW为5.1 mm，GTAW为5.2 mm，均满足设备制造技术要求中堆焊层总厚度5.0~5.5 mm的要求。

2.2 化学成分分析

焊态下，在堆焊层表面下1.5~2.0 mm范围内取样进行化学成分分析，每种焊接方法取样2处，化学成分检测结果见表7。可以看出，3种焊接方法的堆焊层化学成分均满足技术条件中的要求，且成分适中，不同位置波动小。

表7 堆焊层化学成分

Tab.7 Chemical composition of the cladding layer %

化学元素		C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N
要求值		≤0.040	≤2.50	≤1.00	≤0.030	≤0.020	11.0~15.0	16.0~20.0	2.0~3.0	≤0.75	实测
ESW	试样1	0.026	1.35	0.49	0.016	0.005	12.70	19.67	2.53	0.04	0.05
	试样2	0.026	1.36	0.52	0.016	0.002	12.62	19.57	2.53	0.04	0.05
FCAW	试样1	0.027	1.25	0.47	0.016	0.006	12.93	18.22	2.56	0.01	0.02
	试样2	0.027	1.23	0.46	0.015	0.006	12.89	18.08	2.52	0.01	0.02
GTAW	试样1	0.013	1.99	0.52	0.021	0.013	11.86	18.49	2.15	0.01	0.03
	试样2	0.012	2.00	0.53	0.021	0.013	11.84	18.42	2.15	0.01	0.03

2.3 模拟热处理后的性能

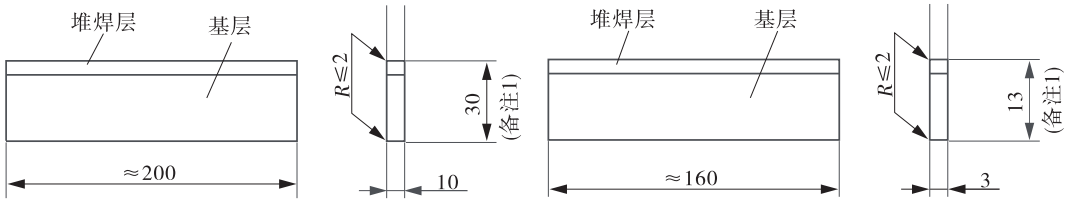
试件模拟Max.PWHT和Min.PWHT后进行性能检测。

（1）剖面检查（Max.PWHT热处理状态）。

在堆焊试件上的焊道搭接处取剖面，经酸洗后用5倍放大镜观察，焊缝搭接处未发现肉眼可见的焊接缺陷。

（2）弯曲试验（Max.PWHT热处理状态）。

采用横向大侧弯2件（试样长轴垂直于堆焊方向）、纵向大侧弯2件（试样长轴平行于堆焊方向），试样尺寸见图1（a）；采用横向小侧弯2件（试样长轴垂直于堆焊方向）、纵向小侧弯2件（试样长轴平行于堆焊方向），试样尺寸见图1（b）[11]。按照弯曲试验要求（$D=4a$，$\alpha=180^\circ$），弯曲试验后在堆焊层和熔合线上均没有裂纹和未融合缺陷，说明堆焊层结合面具有良好的塑性。



备注1：当试件（含堆焊层）厚度小于试样宽度标注尺寸时，试样宽度为试件（含堆焊层）厚度。

（a）大侧弯试样 （b）小侧弯试样

图1 大、小侧弯试样尺寸

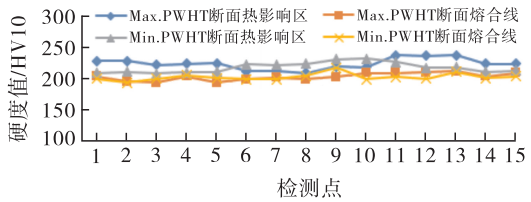
Fig.1 Dimensions of large and small side bend specimens

（3）晶间腐蚀试验（Max.PWHT热处理状态）。

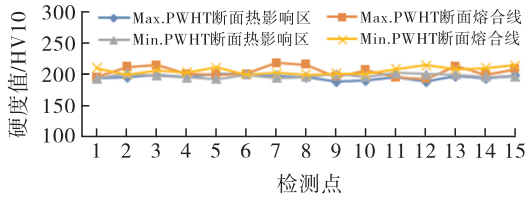
将堆焊层表面磨平，向下取厚度2 mm试样进行晶间腐蚀试验，试样尺寸80 mm×20 mm×2 mm，共2件。按照GB/T 4334—2020《金属和合金的腐蚀 奥氏体及铁素体-奥氏体（双相）不锈钢晶间腐蚀试验方法》中方法E进行不锈钢硫酸-硫酸铜抗晶间腐蚀试验。所有试样经弯曲180°后，在10倍放大镜下观察弯曲试样的外表面，均未发现因晶间腐蚀而产生的裂纹。

（4）硬度测量（Min.PWHT和Max.PWHT热处理状态）。

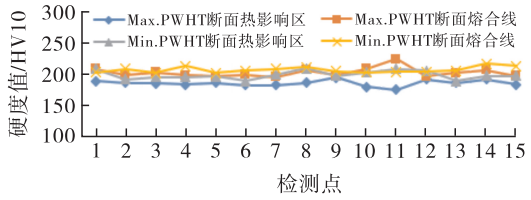
按GB/T 4340.1—2009《金属材料 维氏硬度试验 第1部分：试验方法》的要求，在堆焊试件的横截面上取样，硬度测试包括熔合线和热影响区，每区测量3处，每处测试5点。3种焊接方法在Min.PWHT和Max.PWHT状态下的检测结果见图2，硬度值均小于250HV10。3种方法的堆焊试件横截面熔合线和热影响区硬度测量值差距不大。



(a)ESW 断面硬度



(b)FCAW 断面硬度



(c)GTAW 断面硬度

图2 堆焊层硬度检测数据

Fig.2 Cladding layer hardness test data

(5)微观金相组织分析(Max.PWHT 热处理状态)。

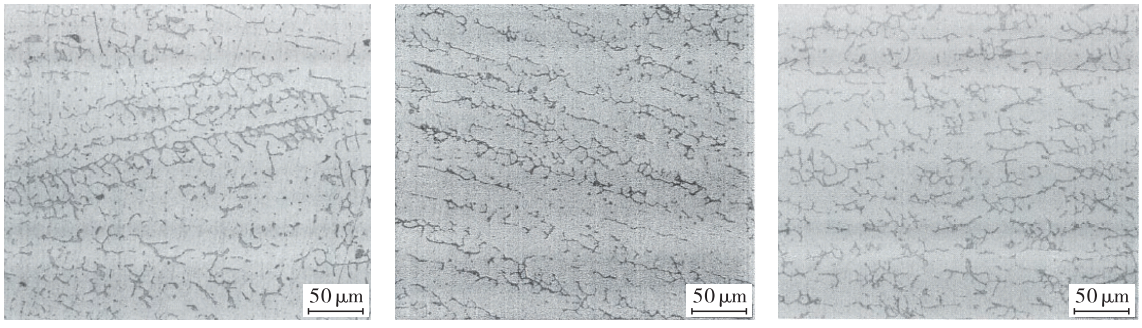
在堆焊层表面及以下 2.0 mm 深度位置取样进行微观金相组织分析,其结果见图3。金相组织为均匀的奥氏体+少量铁素体双向组织。满足技术条件要求:堆焊层表面及以下 2 mm 深度以内金相组织为均匀的奥氏体+铁素体双向组织。

对比3种焊接方法,ESW 晶粒相对粗大,柱状晶发达;FCAW 晶粒较细小,呈等轴晶或树枝晶形态;GTAW 晶粒最为细小,呈细小等轴晶或胞状晶形态。这是由于焊接热输入及熔池保护方式的不同,致使熔池冷却速度和晶粒生长条件不同而造成的。ESW 热输入最高,熔池冷却速度慢,晶粒有足够时间生长,形成较为粗大的柱状晶组织;FCAW 次之,药芯焊丝中的造气剂和造渣剂形成保护气氛,电弧稳定性较好,熔池冷却速度相对较快,抑制了晶粒的过度生长,晶粒较为细小;GTAW 最低,电弧集中,熔池冷却速度快,晶粒来不及长大即被"冻结"。

综合上述检验结果可以看出,试验采用的堆焊工艺能获得化学成分和性能均满足设备制造要求的堆焊层,也验证了堆焊工艺的正确性,具备在产品上应用的条件。

3 生产应用

经过前期的焊接工艺性试验,在合格的堆焊工艺评定支撑下,将上述堆焊工艺在产品内壁进行堆焊应用。结果表明,产品堆焊层成型情况良好,表面平整。产品堆焊厚度:ESW 为 4.3~5.0 mm;FCAW 为 5.3~5.6 mm;GTAW 为 5.2~5.3 mm。在产品堆焊层表面下 1.5~2.0 mm 范围内取样进行化学成分检测,各元素值均满足制造技术条件要求,且堆焊层经 100%PT 和 100%UT 检测,均满足Ⅰ级合格要求,应用效果良好。



(a)ESW (b)FCAW (c)GTAW

图3 微观金相组织 200×

Fig.3 Microstructure 200×

4 结论

(1)在 20MnNiMo 钢上堆焊不锈钢时的单层及过渡层时预热温度≥125 ℃,层间温度控制为 125~200 ℃。

(2)ESW,FCAW 和 GTAW 3 种焊接方法在 20MnNiMo 钢试件上堆焊后,堆焊层成型情况良好,表面平整,化学成分、力学性能和耐腐蚀性能均满足设备制造要求。其中,单层带极 ESW 堆焊层厚度 4.0~4.5 mm;焊丝堆焊时需采用过渡层

TP309L+耐蚀层TP316L双层堆焊，耐蚀层FCAW至少1层，耐蚀层GTAW至少2层，堆焊层总厚度满足5.0~5.5 mm要求。

（3）通过对20MnNiMo钢表面TP316L不锈钢堆焊工艺研究及成功应用案例，为该材料的工程应用提供了数据支持和实践指导。

参考文献：

[1] 王强，麻永林，陈重毅，等.焊接热输入对厚壁20MnNiMo钢焊缝性能的影响[J].山西冶金，2016，39(6)：1-4.
WANG Q，MA Y L，CHEN Z Y，et al.Effect of welding heat input on properties of weld seam of thick 20MnNiMo steel[J].Shanxi Metallurgy，2016，39(6)：1-4.

[2] 陈重毅，麻永林，邢淑清，等.焊接热输入对特厚板20MnNiMo焊接残余应力的影响[J].材料热处理学报，2013，34(1)：76-80.
CHEN Z Y，MA Y L，XING S Q，et al. Effect of welding heat input on welding residual stress in submerged-arc welds of thick plate 20MnNiMo joints [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment，2013，34(1)：76-80.

[3] 迟露鑫，陈重毅，麻永林，等.焊后热处理对特厚板20MnNiMo焊接残余应力的影响[J].材料热处理学报，2012，33(4)：96-99.
CHI L X，CHEN Z Y，MA Y L，et al. Effect of post-weld heat treatment on residual stress in submerged-arc welds of 20MnNiMo steel heavy plate [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment，2012，33(4)：96-99.

[4] 张显辉，焦伟，谭长瑛.20MnNiMo钢焊接热影响区的组织和韧性及其氢致裂纹特征[J].焊接学报，2000，21(1)：9-12.
ZHANG X H，JIAO W，TAN C Y. HAZ structure，toughness and characteristics to hydrogen-induced cracking(HIC) of steel 20MnNiMo[J].Transactions of the China Welding Institution，2000，21(1)：9-12.

[5] 张显辉，焦伟，谭长瑛.20MnNiMo钢焊接氢致裂纹特征(Ⅱ)[J].焊接学报，2002，23(3)：23-25.
ZHANG X H，JIAO W，TAN C Y. Hydrogen-induced cracking feature of steel 20MnNiMo (Ⅱ) [J]. Transactions of the China Welding Institution，2002，23(3)：23-25.

[6] 刘玉华.CO_2药芯焊丝气保焊(FCAW)在加氢反应器接管内壁不锈钢堆焊中的应用[J].金属加工(热加工)，2009(12)：25-29.
LIU Y H. Application of CO_2 flux-cored wire arc welding (FCAW) in stainless steel surfacing on the inner wall of hydrogenation reactor nozzle [J]. MW Metal Forming，2009(12)：25-29.

[7] 王晖球，王雪骄，叶小松.国产不锈钢双电渣堆焊材料在加钒钢加氢反应器上的应用[J].大型铸锻件，2021(5)：28-31.
WANG H Q，WANG X J，YE X S. Application of domestic stainless steel double-layer electro-slag surfacing on the vanadium steel hydrogenation reactor [J].Heavy Casting and Forging，2021(5)：28-31.

[8] 邢卓.管板带极电渣堆焊双相不锈钢工艺[J].压力容器，2024，41(11)：74-84.
XING Z. Overview of surfacing duplex stainless steel on tubesheets by electroslag strip welding[J].Pressure Vessel Technology，2024，41(11)：74-84.

[9] 陈志林，刘应虎.90 mm宽带极堆焊奥氏体不锈钢的化学成分及铁素体FN分析[J].压力容器，2011，28(11)：41-46.
CHEN Z L，LIU Y H. Chemical elements and ferrite number analysis of austenitic stainless steel surfacing process with 90 mm strip electrode [J]. Pressure Vessel Technology，2011，28(11)：41-46.

[10] 王雪骄，范阳阳，晏君文，等.2.25Cr-1Mo-0.25V钢上国产焊材单层带极电渣堆焊工艺研究[J].大型铸锻件，2023(5)：32-36.
WANG X J，FAN Y Y，YAN J W，et al.The technology study of single-layer ESW cladding on 2.25Cr-1Mo-0.25V steel surface using domestic welding materials [J]. Heavy Casting and Forging，2023(5)：32-36.

[11] 王雪骄，王迎君，晏君文，等.加氢反应器E309L过渡层经PWHT后堆焊或焊接E347对基体材料的影响[J].压力容器，2016，33(3)：61-68.
WANG X J，WANG Y J，YAN J W，et al.Influence of welding or cladding E347 on E309L transition layer after PWHT to substrate material in hydrogenation reactor[J].Pressure Vessel Technology，2016，33(3)：61-68.

作者简介：王雪骄(1978)，女，正高级工程师，主要从事压力容器焊接制造技术的研究与开发工作，通信地址：618000四川省德阳市二重(德阳)重型装备有限公司重型压力容器及核电技术研究所，E-mail：NN791H528@163.com。

本文引用格式：
王雪骄.20MnNiMo钢表面TP316L不锈钢堆焊工艺研究及应用[J].压力容器，2025，42(6)：19-24.
WANG Xuejiao.Research and application of TP316L stainless steel cladding process on 20MnNiMo steel surface[J].Pressure Vessel Technology，2025，42(6)：19-24.