

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.12.08

Hastelloy B3 与 SA-516 Gr70 焊接工艺研究及应用

苑晓刚¹, 曹雪佳², 孙修圣¹

1. 南京宝色股份公司, 江苏 南京 211178
2. 南京市锅炉压力容器检验研究院, 江苏 南京 210019

摘要: 为实现 Hastelloy B3 与 SA-516 Gr70 异种钢间的可靠连接, 本文采用钨极氩弧焊开展相关焊接工艺研究。分别选用 ERNiMo-10、ERNiCrMo-3 及 ER309LMo 三种焊丝进行焊接试验, 并通过射线探伤, 以及拉伸、弯曲、硬度、冲击等试验, 对异种钢焊缝质量、焊接接头的力学性能进行评价。试验结果显示: 三种焊丝均可以得到满足要求的焊接接头。其中, ERNiMo-10 焊接过程稳定, 焊接操作性最佳; ERNiCrMo-3 焊接时虽存在微偏弧现象, 但熔池状态清亮, 且与两侧母材的熔合性最优; ER309LMo 焊接时, 需控制 Hastelloy B3 侧熔合区的成分稀释, 对焊工施焊技能要求最高。三组试件接头的抗拉强度处于 629-646MPa 范围内, 断裂均发生在 SA-516 Gr70 侧母材, 侧向弯曲试样无开口缺陷, 异种钢接头熔合状况良好。为完成酯化进料罐筒体与夹套之间的产品焊接, 综合考量焊材成本及焊接施焊技能要求, 选用 ERNiCrMo-3 焊丝与 ENiCrMo-3 焊条, 采用钨极氩弧焊和焊条电弧焊相结合的方式, 对 12.7mm 厚的 Hastelloy B3 与 SA-516 Gr70 试板进行焊接工艺组合评定。评定结果表明, 试板焊接接头的抗拉强度、弯曲性能以及 SA-516 Gr70 侧热影响区的冲击性能, 均满足承压设备焊接工艺评定的要求, 能够完成酯化进料罐筒体与夹套之间焊接。

关键词: Hastelloy B3; SA-516 Gr70; 异种钢焊接; 焊接工艺; 接头性能

中图分类号: TG457.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2303(2025)12-0050-10

Study and Application of Welding Procedure for Hastelloy B3 and SA-516 Gr70

YUAN Xiaogang¹, CAO Xuejia², SUN Xiusheng¹

1. Nanjing Baose Co., Ltd., Nanjing 211178, China
2. Nanjing Boiler and Pressure Vessel Inspection Institute, Nanjing 210019, China

Abstract: To achieve reliable joining between Hastelloy B3 and SA-516 Gr70 dissimilar steels, this paper conducts research on relevant welding processes using gas tungsten arc welding (GTAW). Welding tests are carried out with three types of welding wires, namely ERNiMo-10, ERNiCrMo-3, and ER309LMo. The quality of the dissimilar steel welds and the mechanical properties of the welded joints are evaluated through X-ray flaw detection, as well as tensile, bending, hardness, and impact tests. The test results show that all three types of welding wires can produce qualified welded joints. Among them, the welding process with ERNiMo-10 is stable, and its welding operability is the best; although there is a slight arc deviation phenomenon when welding with ERNiCrMo-3, the molten pool is clear, and its fusion with the base metals on both sides is the best; when welding with ER309LMo, it is necessary to control the composition dilution in the fusion zone on the Hastelloy B3 side, which has the highest requirement for the welder's operating skills. The tensile strength of the joints of the three groups of specimens ranges from 629 MPa to 646 MPa, and fractures all occur in the base metal on the SA-516 Gr70 side. The lateral bending specimens have no opening defects, indicating good fusion of the dissimilar steel joints. To complete the product welding between the cylinder and jacket of the esterification feed tank, considering the cost of welding materials and the requirements for welding skills comprehensively, ERNiCrMo-3 welding wire and ENiCrMo-3 electrode are selected, and a combined welding process evaluation is carried out on 12.7 mm thick Hastelloy B3 and SA-516 Gr70 test plates using the combination of gas tungsten arc welding and shielded metal arc welding. The evaluation results show that

收稿日期: 2025-05-26 修回日期: 2025-08-22

作者简介: 苑晓刚(1973—), 高级工程师, 主要从事金属材料焊接技术研究工作。E-mail: yuanxg@baose.com。

the tensile strength, bending performance of the welded joints of the test plates, and the impact performance of the heat-affected zone on the SA-516 Gr70 side all meet the requirements of the welding procedure qualification for pressure equipment, which enables the completion of the welding between the cylinder and jacket of the esterification feed tank.

Keywords: Hastelloy B3; SA-516 Gr70; dissimilar steel welding; welding process; joint property

引用格式:苑晓刚,曹雪佳,孙修圣. Hastelloy B3 与 SA-516 Gr70 焊接工艺研究及应用[J]. 电焊机,2025,55(12):50-59.
Citation:YUAN Xiaogang, CAO Xuejia, SUN Xiusheng. Study and Application of Welding Procedure for Hastelloy B3 and SA516 Gr. 70[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(12): 50-59.

0 引言

随着现代石油化工、海洋工程、核电等领域的快速发展,设备结构材料在极端腐蚀性介质环境下的服役要求日益严苛,为了满足不同工况下的材料需求,降低设备制造成本,将接触腐蚀性介质的部件采用耐蚀合金设计,其余部件采用低合金强度钢承受压力,从而实现性能优化和成本控制^[1-3]。哈氏合金 B3(Hastelloy B3)作为一种低碳型镍-钼耐蚀合金,公称成分为 65Ni-29.5Mo-2Fe-2Cr,因其优异的抗盐酸、硫酸等还原性介质腐蚀能力,被广泛应用于压力容器关键腐蚀部位的制造;而 SA-516 Gr70 作为低合金高强度压力容器用钢,凭借良好的综合力学性能与成本优势,常被选作设备主体结构材料。在实际工程应用中,采用 Hastelloy B3 与 SA-516 Gr70 的异种金属焊接结构成为了特定工况下兼顾设备使用性与经济性的常规选择。

南京宝色股份公司承接的国内某石油化工有限公司 9 万吨/年 MMA 装置脱瓶颈改造项目中,酯化反应阶段的酯化进料罐即采用 Hastelloy B3 与 SA-516 Gr70 异种金属焊接结构设计,对酯化进料罐容器本体采用 Hastelloy B3 制造以满足 16.87% 硫酸、74.91% 甲基丙烯酰胺硫酸盐、3.1% 硫酸氢胺、2.51% 丙酮磺酸盐等工况介质的耐腐蚀要求,而夹套介质为无毒害的低压蒸汽,故采用 SA-516 Gr70 材料设计制造。为确保产品制造质量,掌握 Hastelloy B3 与 SA-516 Gr70 的异种金属焊接要求,本文主要针对其焊接工艺及接头性能进行研究,为该酯化进料罐装置的顺利制造奠定基础。

1 试验材料及焊接性

1.1 试验母材

哈氏合金 B3(Hastelloy B3)在美国 UNS 中编号为 N10675,板材标准符合 ASME BPVC.II.B, SB-333,该材料通过 Mo 元素的增加提高其在还原性介质中的耐腐蚀性,通过 Cr 元素增强其在氧化性环境下的稳定性,通过 Fe、Co 等元素对材料的强度和热稳定性起积极作用,属于一种综合性能出众的耐蚀合金。试验用 Hastelloy B3 板材的化学成分如表 1 所示,力学性能如表 2 所示。

表 1 Hastelloy B3 化学成分(质量分数,%)
Table 1 Chemical composition of Hastelloy B3 (wt. %)

C	Mn	Si	S	P	Cr	Mo
<0.001	0.65	0.03	<0.001	<0.004	1.32	28.2
Ni	Fe	V	W	Co	Ni+Mo	
67.65	1.45	<0.01	<0.1	0.05	95.85	
Al	Nb	Cu	Ta	Ti	Zr	
0.29	<0.05	<0.1	<0.01	<0.01	<0.01	

表 2 Hastelloy B3 的力学性能
Table 2 Mechanical property of Hastelloy B3

温度	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A/% 2IN	HRB
室温	951	493	63	96

SA-516 Gr70 符合 ASME BPVC.II.A, SA-516 标准要求,其化学成分主要为 C、Mn、Si 等,本试验选取的批号材料中还含有少量的 Ni、Cr 等合金,使其具备良好的抗冲击性能、低温稳定性,属于一种中低温服役条件下的压力容器用钢。试验用 SA-516 Gr70 板材的化学成分如表 3 所示,力学性能如表 4 所示。

表 3 SA-516 Gr70 化学成分(质量分数,%)
Table 3 Chemical composition of SA-516 Gr70 (wt. %)

C	Mn	Si	S	P	Cr	Mo	Ni	V	Al	Nb	Cu	Ti
0.14	1.43	0.29	0.002	0.016	0.07	0.019	0.16	0.003	0.044	0.018	0.01	0.002

表4 SA-516 Gr70的力学性能
Table 4 Mechanical property of SA-516 Gr70

温度	Rm/MPa	Rp0.2/MPa	A/% 2IN	HB
室温	535	403	33.5	153

1.2 母材焊接性

Hastelloy B3 与 SA-516 Gr70 两种材料在热物理性能、化学成分以及冶金相容性上差异显著。两种材料的热膨胀系数差异会加剧接头内部热应力,引起焊接变形,且 Hastelloy B3 的热导率明显低于 SA-516 Gr70,焊接时易在 Hastelloy B3 侧产生热量累积,使焊接接头热量分布不均匀,影响焊接接头的质量及可靠性。焊接过程中,SA-516 Gr70 中的碳、锰等元素会向 Hastelloy B3 侧焊缝金属中扩散,C 元素的扩散迁移在 SA-516 Gr70 侧的熔合区形成碳化物,Mn 元素的扩散影响焊缝金属的凝固模式和组织形态,从而影响焊缝金属的化学成分和组织结构,降低接头的耐腐蚀性和热稳定性。

2 试验方法

2.1 焊接坡口确定

Hastelloy B3 焊接试板尺寸为 400 mm×125 mm×12.7 mm,SA-516 Gr70 焊接试板尺寸为 400 mm×125 mm×13 mm,采用机加工方式将 13 mm 厚的 SA-516 Gr70 板加工至与 Hastelloy B3 板厚度近似相当。为减小两种材料热膨胀系数差异造成的热应力变形,拟采用 X 形双面对称坡口结构,正反面交替施焊;为控制两侧熔合区的成分稀释,改善液态熔敷金属在坡口内侧的润湿铺展,采用 65° 的坡口角度。设计的坡口形式及尺寸如图 1 所示,坡口内的 1~8 为焊道施焊次序。

2.2 焊接方法及焊材

异种钢的成分差异会促进焊接时元素的扩散和富集,对异种钢焊接接头不利,有研究采用预堆焊隔离层的方式来实现异种钢的良好焊接^[4-5],但这

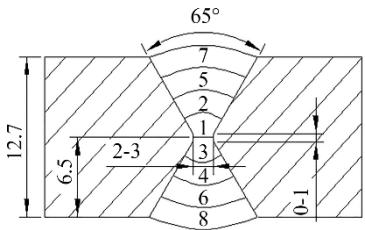


图1 试板焊道次序示意(单位:mm)

Fig. 1 Diagram of bead sequence of test plate(Unit:mm)

种方式在工程应用上对焊工施焊技能的要求较高,尤其对中薄板,在坡口面上预堆边质量较难控制,堆焊后还需要进一步加工制备坡口面,工艺过程较繁琐。借鉴国内外对异种金属直接对接焊的研究经验^[6-9],本文研究直接在坡口内对接焊,通过焊接材料的合理选择和焊接手法的控制,实现 Hastelloy B3 与 SA-516 Gr70 异种钢之间的可靠连接,同时达到简化工艺加工过程的目的。

试验采用钨极氩弧焊方式进行。试验 1 采用与 Hastelloy B3 母材相匹配的 ERNiMo-10 型号焊丝,焊丝生产厂家为 HAYNES,直径 2.4 mm,符合 ASME BPVC II.C, SFA-5.14 标准要求,试验 1 标记为 BS2301;试验 2 采用 ERNiCrMo-3 型号焊丝,焊丝生产厂家为哈尔滨威尔焊接有限责任公司,直径 2.4 mm,符合 ASME BPVC II.C, SFA-5.14 标准要求,试验 2 标记为 BS2302;试验 3 采用 ER309LMo 型号焊丝,焊丝生产厂家为北京金威焊材有限公司,直径 2.4 mm,符合 ASME BPVC II.C, SFA-5.9 标准要求,试验 3 标记为 BS2303。各型号焊丝的具体化学成分见表 5。

2.3 保护气体及层间温度

钨极氩弧焊时采用保护气体的作用主要是保护熔池、熔敷金属、钨极不受外围空气的有害影响,为电弧稳定燃烧提供保护氛围。钨极氩弧焊最常用的保护气体为惰性气体氩气,焊接保护时不溶于焊缝金属,也不与任何金属发生化学反应。因氩气保护具有电弧平稳柔和、易控制且穿透性不强等优

表5 焊材的化学成分(质量分数,%)

Table 5 Chemical composition of welding consumables (wt. %)

焊材型号	C	Mn	Si	S	P	Cr	Mo	Ni	Fe	V	W	Co	Al	Nb+Ta	Cu	Ta	Ti	Zr	Others
ERNiMo-10	0.003	0.67	0.01	0.001	0.008	1.89	28	67.08	1.69	<0.01	<0.1	0.04	0.41	<0.05	<0.1	<0.01	<0.01	<0.01	<0.5
ERNiCrMo-3	0.002	0.01	0.03	0.002	0.003	22.67	8.7	64.24	0.14	—	—	—	0.13	3.72	0.01	—	0.3	—	<0.5
ER309LMo	0.021	1.85	0.47	0.001	0.016	23.1	2.08	13.88	Rem	—	—	—	—	—	0.07	—	—	—	—

点,故焊接试验采用纯度达到 99.99% 的 Ar 气进行焊接保护,以减小异种钢之间的化学成分稀释。氩气符合标准 GB/T 4842《氩》,焊枪的保护气体流量为 15 L/min;为达到单面焊双面成型的目的,避免背面打磨清根,在 X 形坡口的背面同时增加 99.99% 纯度的熔池背面保护氩气,气体流量为 20 L/min。

层间温度要兼顾 Hastelloy B3 母材的性能,防

止焊缝及 Hastelloy B3 侧热影响区组织粗大,试板施焊过程中严格控制层、道间温度 $\leq 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2.4 焊接工艺及过程控制

三副试板采用同样的焊接工艺参数进行焊接,按图 1 的焊道次序进行施焊,焊接过程中试板为自由状态,不施加刚性载荷约束,依靠交替对称施焊,减小焊接变形。焊接工艺参数如表 6 所示。

表 6 焊接工艺参数

Table 6 Welding process parameters

焊层	焊接方法	焊接电流/A		电弧电压/V	焊接速度/(cm·min ⁻¹)	保护气流量/(L·min ⁻¹)
		极性	峰值			
点固	GTAW	DCEN.	120-140	13~18	—	15
打底 1	GTAW	DCEN.	120-140	13~18	9~15	15
填充 2-6	GTAW	DCEN.	155-170	13~20	9~15	15
盖面 7-8	GTAW	DCEN.	155-170	13~20	9~15	15

BS2301 施焊过程稳定,采用 ERNiMo-10 进行异种金属间的焊接可焊性很好,焊接过程中液态熔池表面会产生一些细小的浮渣,对焊工视野略有一定影响,随着液态金属的凝固,浮渣析出凝固于焊缝表面,降低了焊缝表面的美观性,此析出物主要为金属氧化物、碳化物或杂质成分,此与氩气保护无关,可能与焊丝本身复杂的合金系统及杂质元素含量有关。

BS2302 采用 ERNiCrMo-3 施焊的焊缝表面呈现银白色,保护效果优异,焊接时略有偏弧现象,需适当调整焊枪角度使钨针较多地指向 Hastelloy B3 侧,以防止 Hastelloy B3 侧坡口出现侧壁熔合不良的情况。

BS2303 采用 ER309LMo 施焊的焊缝表面呈现黄蓝氧化色,主要是因为盖面时层间温度较高,焊接时随着焊枪瓷嘴向前移动,后面凝固的焊缝离开了氩气的保护,焊缝表面与空气直接接触,此时焊缝温度还较高,产生了典型的不锈钢焊缝表面氧化状态。相比 Hastelloy B3 母材,ER309LMo 焊丝的合金含量较低,主要基体为 Fe,在 BS2303 试板焊接时,采用 ER309LMo 焊丝往高合金的 Hastelloy B3 母材坡口上熔覆产生了裂纹,此裂纹主要由冶金的不相容性导致,ER309LMo 焊缝凝固时,Fe 与 Ni 的互溶性有限,形成了低熔点的低熔点共晶组织或者脆性金属间化合物,导致裂纹的产生。通过调整焊枪角度使钨针较多的指向 SA-516 Gr70 侧,减小

Hastelloy B3 侧坡口的熔深,并且焊接时增加 ER309LMo 的填丝量,控制 Hastelloy B3 母材的稀释,从而避免了裂纹的产生。焊接完成后的三副试板实物如图 2 所示。

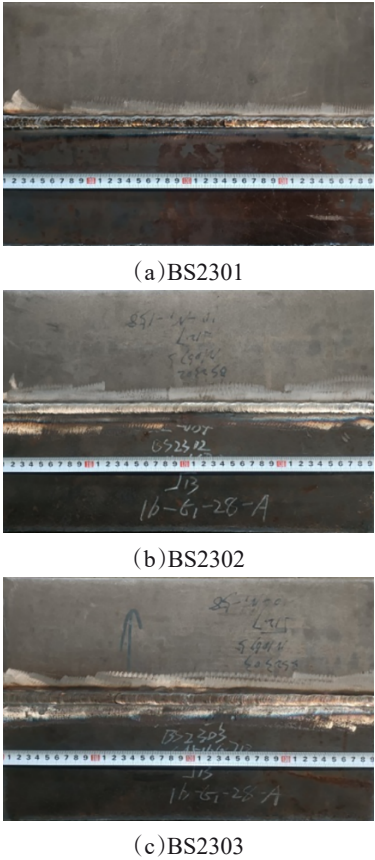


图 2 焊接试板

Fig. 2 welding plate

3 试验结果

3.1 无损检测

三副试板按照NB/T47013—2015 承压设备无损检测要求进行检测。目视检查焊缝表面无裂纹、咬边、气孔等肉眼可见缺陷,焊缝与两侧异种金属之间过渡圆滑,接头成形良好。对焊接接头进行100%渗透检测,结果显示无线性缺陷,满足I级合格;对试板进行100%射线检测,结果显示无裂纹、未熔合、未焊透、条形缺陷等,满足I级合格,射线检测底片如图3所示。

3.2 力学性能检测

对三副试板制取检测试样。每副试板分别制取横向板状拉伸试样2件,横向侧弯试样4件,SA-516 Gr70 侧热影响区冲击试样3件,硬度试样1件。拉伸试样按照GB/T228.1—2021《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》测定焊接接头的抗拉强度,侧弯试样按照GB/T2653—2008《焊接接头弯曲试验方法》测定焊接接头的完好性和塑性,冲击试样按照GB/T229—2020《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》测定SA-516 Gr70 侧热影响区的低温韧

性。室温横向板状拉伸、横向侧弯、冲击等力学性能检测如图4~图6所示。横向板状拉伸和横向侧弯的检测结果见表7,硬度检测结果见图7。

根据检测结果可知,不同焊材条件下焊接完成的三副试板,焊接接头均具有较高的强度和良好的塑性。因为试样母材为两种金属材料牌号,根据NB/T 47014—2023《承压设备焊接工艺评定》的要求,拉伸试样的抗拉强度应不低于两种母材抗拉强度最低值中的较小值,才能判定拉伸试样检测结果合格,Hastelloy B3母材的最小抗拉强度为760 MPa,而SA-516 Gr70母材的抗拉强度为485~620 MPa,6件试样的抗拉强度为629~646 MPa,显著高于SA-516 Gr70母材的最小抗拉强度485 MPa,拉伸试样检测合格。

结合图4中拉伸试样的断裂照片可以发现,6件试样均断裂在熔合线以外的SA-516 Gr70侧母材区域,且断裂试样的颈缩情况显著,呈现典型的塑性断裂特征。但是根据表4可以知道试验用SA-516 Gr70母材质量证明书中的抗拉强度仅为535 MPa,而6件试样的抗拉强度不仅高于535 MPa,而且比SA-516 Gr70标准规定的上限值620 MPa还高,这



图3 RT检测结果

Fig. 3 Pictures of RT results

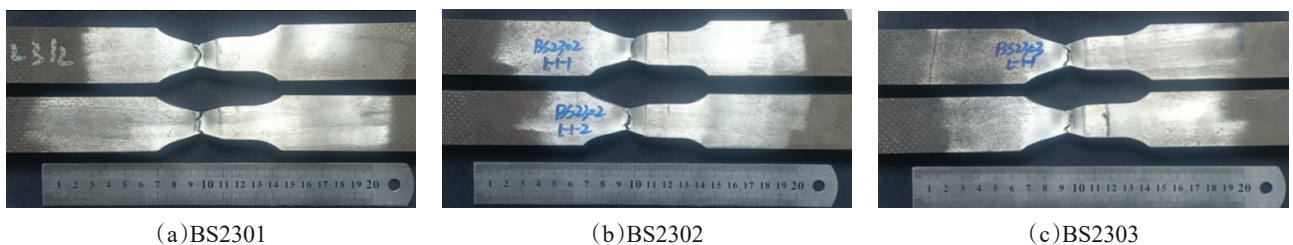


图4 拉伸后的试样

Fig. 4 Specimens images after tensile test

主要与拉伸试样的制备状态有关。原材料测试的抗拉强度通常制备的是圆棒状拉伸试样,且试样按标准有指定的称作标距的平行段长度 L_0 ,通常标样值为 50 mm,而表 7 中的抗拉强度是依照焊接工艺评定制备的板状焊接接头拉伸样,此试样无标距,平行段尺寸是以焊缝边缘为基准向两侧各加 6 mm,

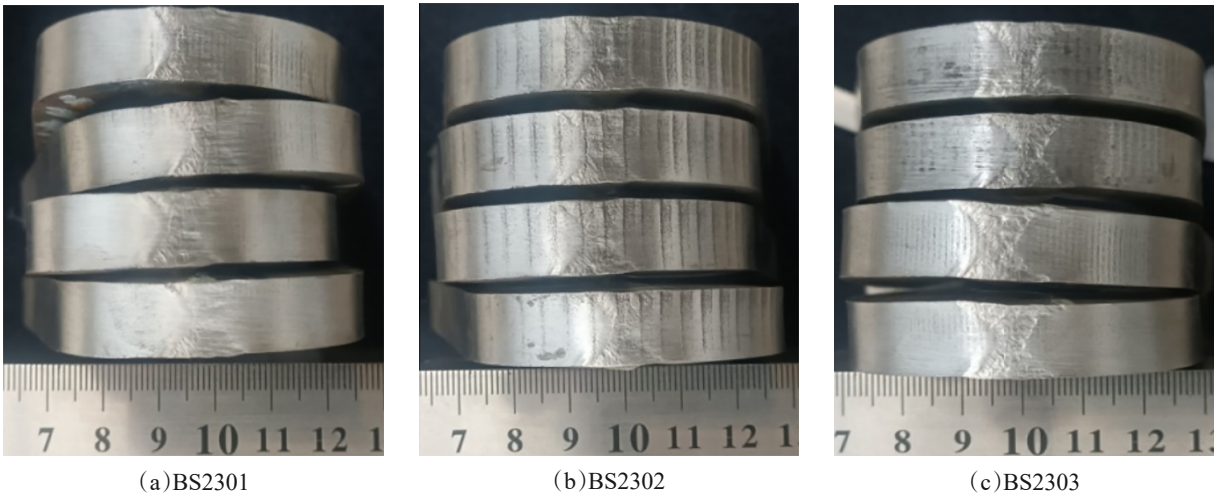


图 5 弯曲试样

Fig. 5 Specimens image after bending test

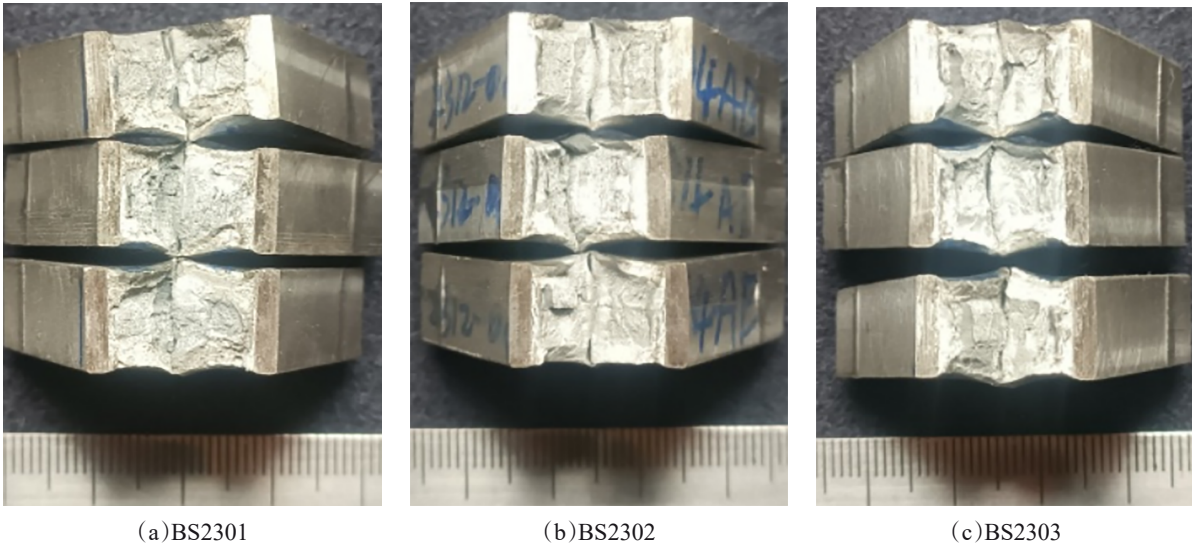


图 6 冲击试样

Fig. 6 Specimens image after impact test

表 7 试板拉伸及弯曲试验结果

Table 7 Tensile Bending test results of test coupon

试板编号	拉伸试验			弯曲试验 $D=40\text{ mm}, \alpha=180^\circ$		
	试样编号	抗拉强度/MPa	断裂位置及性质	试样编号	类型	结果
BS2301	L-1-1	646	Gr70 侧母材/塑性	W-1-1~4	侧弯	合格,无开口缺陷
	L-1-2	637	Gr70 侧母材/塑性			
BS2302	L-2-1	629	Gr70 侧母材/塑性	W-2-1~4	侧弯	合格,无开口缺陷
	L-2-2	635	Gr70 侧母材/塑性			
BS2303	L-3-1	635	Gr70 侧母材/塑性	W-3-1~4	侧弯	合格,无开口缺陷
	L-3-2	640	Gr70 侧母材/塑性			

平行段尺寸较短,影响到在试样拉伸时整个焊接接头的变形过程,造成检测结果普遍高于母材强度,为正常现象。

为考察异种钢接头塑性及X形坡口根部和上下表面在受拉变形情况下的熔合情况,对三组16件弯曲试样进行侧弯检测。弯心直径按照4倍试样厚度设置为40 mm,将试样分别进行180°侧弯检测。观察图5中各试样的受拉面,焊缝、热影响区包括两侧的熔合线,任意方向上均无开口型缺陷,上下表面的棱角处即使应力集中,也并未出现棱边开裂,由此可见即使Hastelloy B3和SA-516 Gr70异种钢接头两侧的强度差异巨大,但通过试验用的三种焊丝焊接形成的过渡接头具有良好的塑性,连接可靠。

国内使用的压力容器对碳钢材料提出有冲击韧性的要求,至少需满足设计温度条件下冲击韧性不得低于母材的最低要求。参照国内Q345R压力容器用钢板,即通常需要满足-20℃下,冲击功大于等于41J。依照NB/T47014-2023承压设备焊接工艺评定制备SA-516 Gr70侧热影响区冲击试样,试样尺寸10 mm×10 mm×55 mm,冲击试验温度-20℃。BS2301试板3件冲击试样的冲击功KV2分别为92 J、152 J、103 J;BS2302试板3件冲击试样的冲击功KV2分别为113 J、127 J、92 J,BS2303试板3件冲击试样的冲击功KV2分别为158 J、140 J、159 J,每组试样冲击功均显著高于承压设备焊接工艺评定≥24 J的要求,且同样远高于国内同等级别使用钢材Q345R板的41J母材标准。从图6的冲击试样宏观断口形貌上看,断口凹凸不平,纤维区占比较大,最后断裂区存在一定的剪切唇,观察断口边缘有明显的收缩或翘曲,在断裂时发生了较为显著的塑性变形,与冲击功的测试值相符,说明焊接工艺参数制定合理,焊接热输入及层道间温度过程控制较好,焊接接头具有良好的韧性。

采用单点测定工艺对焊接接头进行维氏硬度(HV10)检测,测量结果见图7。从测量结果可以看出,Hastelloy B3和SA-516 Gr70母材区(BM)相对均匀,Hastelloy B3的BM硬度值在210~227 HV10之间,SA-516 Gr70的BM硬度值在156~169 HV10之间,BS2301~BS2303三副试板采用的为同一批号的母材,三组试样的母材硬度测量值相差不大,性

能一致性较好。Hastelloy B3侧热影响区(HAZ)硬度值在254~265之间,三组试样差异很小,说明不同焊丝施焊在Hastelloy B3侧的稀释率较小,仅是焊接热循环作用引起了热影响区组织变化,体现出硬度值升高。三组试样焊缝区的硬度差异明显,受焊丝本身影响较大,采用ERNiMo-10焊丝施焊的焊缝硬度最高,为240~252 HV10,采用ERNiCrMo-3焊丝施焊的焊缝硬度次之,在214~220 HV10之间,采用ER309LMo焊丝施焊的焊缝硬度最低,在184~192 HV10之间。BS2302和BS2303试样在SA516 Gr70侧HAZ硬度相当,为164~181 HV10,BS2301在SA516 Gr70侧HAZ硬度稍高,为196~207 HV10。从整体上看,硬度检测从Hastelloy B3侧HAZ向SA-516 Gr70母材呈现出台阶状下降,呈现出过渡趋势,对异种钢焊接接头有利。

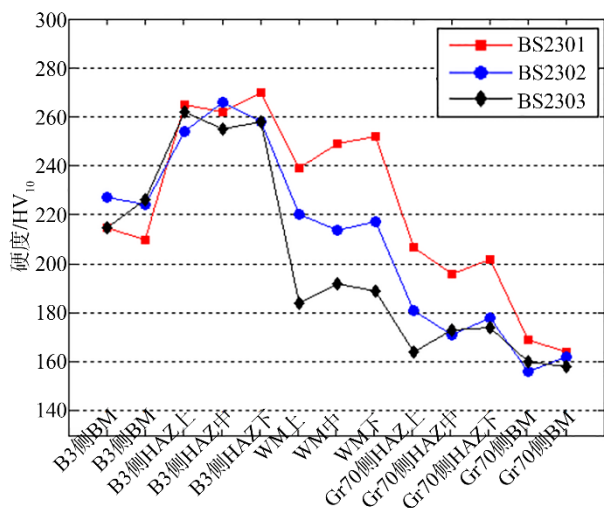


图7 焊接接头硬度分布曲线

Fig. 7 Hardness test results of welded joint

4 产品制造

酯化进料罐是酯化反应阶段的核心设备,其兼具耐腐蚀性、混合效率、安全性等工艺作用。图8为酯化进料罐的结构示意图,容器本体的工作温度在135~155℃,工作压力为0.025MPa,采用Hastelloy B3材料制造,夹套的工作温度为260℃,工作压力为0.6 MPa,采用SA516 Gr70材料制造,设备无焊后热处理要求。图8中的E1和E2两处的焊缝即为Hastelloy B3和SA-516 Gr70的异种钢焊接接头,酯化

进料罐筒体与夹套的具体链接结构形式如图 9 所示。

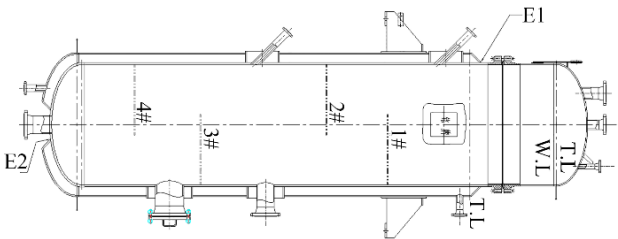


图 8 酯化进料罐结构
Fig. 8 Structure of esterification feed tank

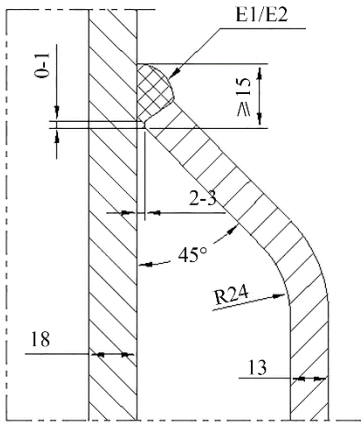


图 9 筒体与夹套连接结构(单位:mm)
Fig. 9 Connection structure of E1/E2(Unit:mm)

根据国内压力容器的制造要求,产品焊接前应按照 NB/T47014—2023 承压设备焊接工艺评定的要求对焊接接头进行评定。上文中 BS2301~BS2303 的试验方案均采用的是钨极氩弧焊进行试板的焊接,考虑到酯化进料罐筒体与夹套结构焊接量较大,单独采用钨极氩弧焊进行 E1 和 E2 焊缝的焊接,效率上难以满足生产制造的需求,拟采用钨极氩弧焊打底配合焊条电弧焊填充盖面的方式进行夹套与筒体的产品焊接,故采用极氩弧焊+焊条电弧焊的组合工艺进行焊接工艺评定,焊材采用 ERNiCrMo-3 焊丝和 ENiCrMo-3 焊条,组合焊接工艺评

定的编号为 BS2304。

BS2301~BS2303 选择的三种焊丝虽然均可满足 Hastelloy B3 和 SA-516 Gr70 的异种钢焊接接头的性能要求,但是 ERNiMo-10 为进口焊材且价格较高,市场价约为 1 100~1 300 元/kg,采购周期和成本较高;ER309LMo 虽然价格相对较低,国内供货也方便,但焊接过程对焊工的施焊技能要求较高,容易在 Hastelloy B3 侧产生焊接裂纹,而且产品焊缝 E1 和 E2 仅进行表面渗透检测,难以发现内部质量隐患,质量风险较大;而 ERNiCrMo-3 焊材国内各知名焊材厂家几乎均有生产,且使用经验丰富,市场价格约为 200~280 元/kg,采购周期和成本均可控。综合考虑成本、质量、采购周期等因素,选择 ERNiCrMo-3/ENiCrMo-3 焊材进行酯化进料罐夹套与筒体的产品焊接方案最优。

按表 8 的焊接工艺参数,采用钨极氩弧焊和焊条电弧焊组合工艺评定的试板如图 10 所示。焊后试板严格按照 NB/T47014—2023 承压设备焊接工艺评定进行了外观检查、射线检测、拉伸试验、弯曲试验、SA-516 Gr70 侧热影响区冲击试验。检测结果显示:外观检查合格,射线检测按照 NB/T47013.2—2015 达到 I 级合格,射线检测底片见图 11;组合焊接工艺评定的两件拉伸试样抗拉强度为 627 MPa、635 MPa,并且呈塑性断裂于 SA-516 Gr70 侧母材;四件侧弯试样均无任何开口缺陷;三件 SA-516 Gr70 侧热影响区冲击试样在 -20 ℃低温下冲击功分别为 82J/160J/104J。对照各项力学性能检测的结果,均符合 NB/T47014—2023 承压设备焊接工艺评定的要求,BS2404 组合焊接工艺评定结果合格。

BS2404 组合焊接工艺评定完成后,按表 8 的焊接工艺制定了 E1 和 E2 焊缝的专用焊接工艺规程(WPS),指导现场进行酯化进料罐 E1 和 E2 焊缝的焊接。焊接完成后的 E1 和 E2 外观如图 12 所示。

表 8 焊接工艺参数

Table 8 Welding process parameters

焊层	焊接方法	填充金属		焊接电流/A		电弧电压/V	焊接速度 /(cm·min ⁻¹)	保护气流量 /(L·min ⁻¹)
		型号	规格/mm	极性	峰值			
点固	GTAW	ERNiCrMo-3	2.4	DCEN.	120~140	13~18	—	12~18
打底	GTAW	ERNiCrMo-3	2.4	DCEN.	120~140	13~18	6~15	12~18
填充	SMAW	ENiCrMo-3	4.0	DCEP.	130~145	22~28	15~24	—
盖面	SMAW	ENiCrMo-3	4.0	DCEP.	135~150	22~28	15~24	—

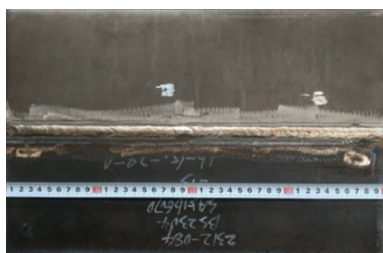


图 10 BS2304 焊接工艺评定试板

Fig. 10 BS2304 PQR plate

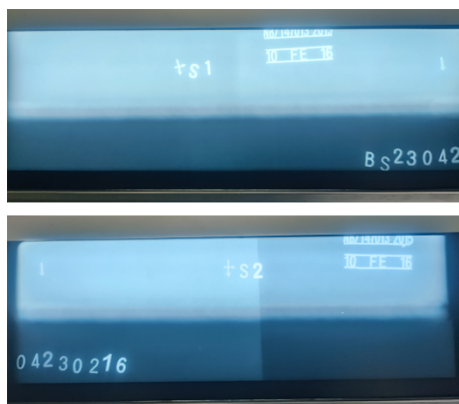


图 11 焊接工艺评定试板 RT 检测结果

Fig. 11 Pictures of PQR plate RT results

两道 Hastelloy B3 和 SA-516 Gr70 的异种钢连接焊缝按照 NB/T47013.5—2015《承压设备无损检测 第 5 部分:渗透检测》,结果为 I 级合格。按照设计图样要求对夹套进行了卧式水压试验,压力 1.25 MPa,保压时间 30 min,结果显示夹套无渗漏,无可见变形,水压试验结论为合格。最终完成的酯化进料罐产品如图 13 所示。

5 结论

(1)以 12.7 mm 厚的 Hastelloy B3 与 SA-516 Gr.70 为试验对象,采用三种焊丝 ERNiMo-10、ERNiCrMo-3、ER309LMO 进行镍与钢的异种金属焊接,按文中拟定的工艺参数及操作要求,均可实现 Hastelloy B3 与 SA-516 Gr.70 异种金属的有效连接,焊接接头抗拉强度高于 SA-516 Gr.70 侧母材,焊接接头的塑、韧性优异。

(2)采用 ER309LMO 焊丝进行 Hastelloy B3 与 SA-516 Gr.70 的异种钢焊接时,容易在高合金成分的 Hastelloy B3 侧产生裂纹,需通过焊接手法的控制和焊丝填充量的增加,减少高合金侧化学成分的



图 12 E1、E2 焊缝外观

Fig. 12 E1 and E2 weld seam



图 13 酯化进料罐成品

Fig. 13 Picture of esterification feed tank

稀释,即减少 Hastelloy B3 侧镍向不锈钢焊缝中的熔入,保证焊接接头质量。

(3)选择 ERNiCrMo-3 和 ENiCrMo-3 焊材,采用钨极氩弧焊和焊条电弧焊的组合焊接工艺对 Hastelloy B3 与 SA-516 Gr.70 试板进行评定,焊接工艺评定试板的接头性能按照 NB/T47014—2023《承压设备焊接工艺评定准则》判定合格。

(4)依照组合焊接工艺评定的焊接工艺参数制定的焊接工艺规程指导了现场酯化进料管夹套与筒体坡口角接头的焊接,异种钢焊缝经过无损检测合格,酯化进料管夹套经过 1.25 MPa 卧式水压试验无泄漏,最终顺利完成酯化进管的制造。

参考文献:

- [1] 崔跃双. 管式加热炉用 TP347H 与 P5 炉管异种钢 GTAW 焊接工艺研究[J]. 电焊机, 2024, 54(03): 146-151.
CUI Y S. Research on GTAW Welding Technology for the Dissimilar Steels TP347H and P5 Furnace Tubes in Tubular Heaters[J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(03):146-151.

- [2] 李洋, 徐睦忠, 刘自刚, 等. 镍基合金与不锈钢异种焊接接头全位置自动 TIG 焊接工艺研究[J]. 电焊机, 2025, 55(03): 82–87.
LI Y, XU M Z, LIU Z G, et al. Study on All-position Automatic TIG Welding Technology for Dissimilar Joints of Nickel-based Alloy and Stainless Steel [J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(03): 82–87.
- [3] 王鹏春, 吴琼, 黄正凤. 核电异种钢内坡口镍基焊缝全位置对接焊技术研究[J]. 压力容器, 2023, 40(09): 16–22.
WANG P C, WU Q, HUANG Z F. Research on all-position butt welding technology for internal groove nickel base welds of dissimilar steels for nuclear power application [J]. Pressure Vessel Technology, 2023, 40(09): 16–22.
- [4] 樊佳伟, 李卓轩, 吴昊盛, 等. 碳化物析出对 ENiCrFe-3 预边堆焊异种钢焊缝力学性能影响的数值模拟[J]. 焊接学报, 2023, 44(06): 67–73+133.
FAN J W, LI Z X, WU H S, et al. Numerical study of the effect of carbide precipitation on the mechanical properties of ENiCrFe-3 pre-edge welded dissimilar steel welds[J]. Transactions of The China Welding Institution, 2023, 44(06): 67–73+133.
- [5] 傅育文, 方森, 崔凤清. 压力容器异种钢接头焊接工艺研究[J]. 锅炉技术, 2022, 53(05): 46–51.
FU Y W, FANG S, CUI F Q. Research on Welding Technology of Dissimilar Metal Joints for Pressure Vessel[J]. Boiler Technology, 2022, 53(05): 46–51.
- [6] Sreenivasulu B, Rajyalakshmi G. Microstructural and Mechanical Characterization of Welded Joints between Stainless Steel and Hastelloy Made Using Pulsed Current Gas Tungsten Arc Welding [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2022, 32(3): 1076–1088.
- [7] Sunder S S S, Dewangan S. Critical Analysis into Mechanical Properties and Microstructure of Dissimilar Welded Joint Between Stainless Steel-304 and Inconel-718 [J]. Journal of The Institution of Engineers (India): Series D, 2023, 105(2): 853–861.
- [8] Kourdani A, Derakhshandeh-Haghighi R. Evaluating the properties of dissimilar metal welding between Inconel 625 and 316L stainless steel by applying different welding methods and consumables [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2018, 49(4): 1231–1243.
- [9] Salarvand V, Ahmadian F, Torabpour M, et al. Microstructure, mechanical properties, and corrosion resistance of dissimilar weld joints between SS304 and Inconel 600 welded using gas tungsten arc welding [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2024, 212(PB): 105356–105356.