

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.06.15

耐高温不锈钢316H与铬钼钢F22对接焊接工艺研究

蒋宇晨, 李恩*, 江国焱, 何冰

东方电气(广州)重型机器有限公司, 广东 广州 511455

摘要: 针对高温液态钠介质下SA-336M Gr.F22 Cl.1与SA-182M F316H的异种钢对接接头,从焊接材料选用、焊接坡口结构设计、焊接工艺参数制定等方面对其开展了深入研究,通过选用CHG-1625HRK和ER316H两种不锈钢焊丝作为隔离层堆焊和接头对接填充金属,确定了异种钢对接接头的焊接工艺,并对其接头进行了力学性能和金相组织的研究。结果表明:采用CHG-1625HRK作为隔离层可以将含碳量高的铬钼钢顺利过渡到碳含量低的不锈钢,采用ER316H作为填充金属可以获得组织稳定、性能良好的焊接接头,同时为该工艺在相关项目的接管与安全端对接接头的制造奠定了基础。

关键词: 铬钼钢; CHG-1625HRK; 耐高温不锈钢; 力学性能

中图分类号: TG457.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)06-0112-06

Research on the Welding Process of High Temperature Resistant Stainless Steel 316H and Chromium Molybdenum Steel F22

JIANG Yuchen, LI En*, JIANG Guoyan, HE Bing

Dong Fang (Guang Zhou) Heavy Machinery Co., Ltd., Guangzhou 511455, China

Abstract: In this paper, the dissimilar steel butt joint of SA-336M Gr.F22Cl.1 and SA-182M F316H was studied in depth from the aspects of welding material selection, groove design and welding process parameter formulation. By selecting CHG-1625HRK and ER316H stainless steel welding wires as the filler metal of buttering layer and butt joint, the welding process of dissimilar steel butt joint was then determined, and the mechanical properties and metallography of the joint were studied as well. The results indicate the buttering layer made by CHG-1625HRK could smoothly transition the high-carbon chromium molybdenum steel to the low-carbon stainless steel, and ER316H could be used as the filler metal to achieve a joint with stable structure and prominent performance, meanwhile, it has been laid a foundation for the fabrication of the butt joint of pipe and safety-end for relevant projects.

Keywords: chromium molybdenum steel; CHG-1625HRK; high temperature resistant stainless steel; mechanical property

引用格式: 蒋宇晨, 李恩, 江国焱, 等. 耐高温不锈钢316H与铬钼钢F22对接焊接工艺研究[J]. 电焊机, 2025, 55(6): 112-117.

Citation: JIANG Yuchen, LI En, JIANG Guoyan, et al. Research on the Welding Process of High Temperature Resistant Stainless Steel 316H and Chromium Molybdenum Steel F22[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(6): 112-117.

0 引言

某四代核电堆型蒸汽发生器需要在高温工况下运行,其设备主材为高强度的F22铬钼钢,其壳程承压边界接管需要与耐高温不锈钢安全端进行组

装焊接,由于该处焊缝内侧的工作介质为金属钠,在役运行中的设计压力为2.5 MPa,设计温度为510℃,需要极高的室温性能、高温性能和各项性能的持久性^[1]。现有国内外民用核电设备和常规容器压力边界上,异种钢安全端对接焊缝的运行工况主

收稿日期: 2024-09-03 修回日期: 2025-04-07

作者简介: 蒋宇晨(1991—),女,硕士,高级工程师,主要从事核能相关主设备的焊接及热处理工艺开发。

通讯作者: 李恩(1984—),男,硕士,高级工程师,主要从事核能相关主设备的焊接及热处理工艺开发。E-mail: hfutlien163.com



要为高温蒸汽、轻质油、临氢及硫化氢等,焊接结构通常设计为:采用镍基材料^[2]作为低合金钢侧母材的隔离层,再与不锈钢母材进行对接。然而,本项目设备运行时工作介质为高温液态钠,在该工作介质下镍基材料会发生原子迁移,导致焊接接头性能下降,无法满足预期的设备运行要求。鉴于此,本研究聚焦于F22铬钼钢与316H不锈钢异种钢对接焊缝的连接技术。通过系统研究隔离层焊材的选取、优化焊接工艺方案等,改善两种材料在焊接过程中的差异,抑制有害冶金反应,以获得各项性能(包括力学性能、抗腐蚀性能及持久性能等)均满足设计规范的焊接接头^[3]。该研究成果不仅能为项目制造提供良好的技术支持,也为特殊介质环境下异种钢焊接技术的应用与发展提供重要的理论依据和实践经验。

1 工艺开发

1.1 材料特性分析

本项目所涉蒸汽发生器在运行时,冷却介质的出口温度最高可达485℃。在此高温工况下,常用的304类奥氏体不锈钢因耐热性能不足,已无法满足要求。相较而言,316H奥氏体不锈钢通过添加Mo元素,显著提升了耐腐蚀性能;同时,其较高的C含量进一步增强了耐高温性能^[4]。因此,本项目选用牌号为SA-182M 316H(以下简称316H)的不锈钢作为安全端材料,该材料属于奥氏体耐高温不锈钢,因其热导率小、线膨胀系数大^[5]等特性,在高温容器与管道等领域有广泛应用。

设备主材选用铬钼钢2.25Cr-1Mo(SA-387 Gr. 22、SA-336 F22、SA-182 F22),根据ASME标准,其

属于P-No.5A组。该钢种因添加了Cr、Mo等合金元素,属于低合金铬钼钢,具有优异的焊接性能,被广泛运用于炼油设备、大型火电机组以及煤代油生产合成气的加压气化装置中的中高温设备中^[6]。F22铬钼钢和316H奥氏体不锈钢母材的主要化学成分如表1所示。

1.2 隔离层焊材选择与优化

低合金铬钼钢与奥氏体不锈钢焊接时,焊缝及熔合区的组织和力学性能主要取决于焊接材料^[7]。由于本项目设备的工作介质为高温液态钠,直接采用镍基合金作为隔离层可能发生原子迁移导致性能劣化,因此,为克服铬钼钢对焊缝金属的稀释效应、抑制碳化物形成元素的不利影响、确保接头的高温力学性能和综合性能、并提高焊缝金属抗裂纹能力^[7],选用CHG-1625HRK焊材作为F22侧母材的隔离层。该焊材的Cr、Ni成分比约为16:25,C含量为0.08~0.11 wt.%,能很好地将C含量较高的铬钼钢母材顺利过渡至C含量较低的奥氏体不锈钢母材,并与奥氏体不锈钢熔合。同时,为了满足热处理态下的不同温度点的高温强度和室温冲击性能等要求,对焊材的化学成分进行了严格控制与优化。通过调整C含量(可以提高塑韧性,强度容易满足技术指标要求)、Cr含量(提升不锈钢耐腐蚀性及强度)、Ni含量(增加塑性裕度)以及N含量(提高高温强度^[8])等关键元素,可以获得综合性能优异的焊缝接头。CHG-1625HRK主要化学成分见表2。

1.3 加热工装

为了避免铬钼钢侧热影响区形成淬硬组织,在施焊CHG-1625HRK隔离层和ER316H堆焊层前,需对F22铬钼钢待焊区域进行预热,预热温度控制在150~250℃。道间温度应不低于预热温度。焊接

表1 试验材料化学成分(质量分数,%)

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

材料	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	V
F22	0.13	0.42	0.11	0.002	0.006	2.39	0.10	1.04	0.05	0.016	0.030
316H	0.041	1.60	0.38	0.001	0.017	17.15	12.28	2.56	0.06	0.029	0.048

表2 CHG-1625HRK的化学成分(质量分数,%)

Table 2 Chemical composition of CHG-1625HRK (wt. %)

C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	Cu	O	N	Co	Al
0.095	1.52	0.50	0.006	0.010	16.29	26.55	6.00	<0.01	0.002	0.11	0.02	0.010

完成后,应对焊接区域进行后热处理以释放焊接应力。为确保堆焊过程中工件温度的均匀性,在接管隔离层堆焊时,采用中频感应加热工装或电加热装置进行预热^[9],通过调整加热工装与坡口边缘的间隙,以及采用调节运行功率或热电偶反馈控制等方式,实现对焊接区域温度的精确控制,如图1所示。



图1 焊接加热工装示意

Fig. 1 Schematic diagram of welding heating fixture

1.4 焊接工艺

采用手工钨极氩弧焊(GTAW)在F22锻管端面依次堆焊 CHG-1625HRK 隔离层和 ER316H 堆焊层,堆焊完成后进行 $690\pm 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的消应力热处理,随后进行异种钢对接焊。主要工艺流程如图2所示,焊接参数见表3。

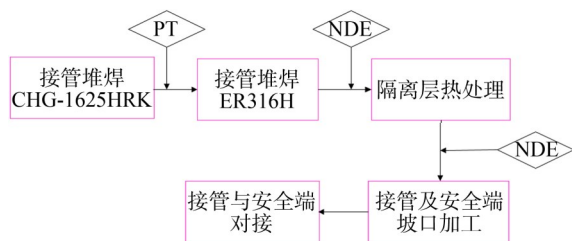


图2 焊接工艺流程

Fig. 2 Welding process flow chart

表3 焊接参数

Table 3 Welding parameter

焊接过程	焊材型号	规格/mm	电流/A
隔离层	CHG-1625HRK	$\varnothing 2.0$	120~220
堆焊层	ER316H	$\varnothing 1.6$	80~180
对接焊缝	ER316H	$\varnothing 1.6$	80~180
焊接过程	电压/V	焊接速度 $/(\text{cm}\cdot\text{min}^{-1})$	热输入 $/(\text{kJ}\cdot\text{mm}^{-1})$
隔离层	10~18	≥ 11.7	≤ 2.03
堆焊层	10~18	≥ 11.1	≤ 1.75
对接焊缝	10~16	≥ 9.6	≤ 1.80

(1)堆焊。堆焊 CHG-1625HRK 隔离层时,水平固定工件,焊接位置为平焊。首层焊接前需预热

至 $\geq 150\text{ }^{\circ}\text{C}$,选用 CHG-1625HRK 氩弧焊丝,保护气体为纯度 $\geq 99.995\%$ 的氩气,焊后需进行后热处理,后热温度 $250\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$,后热时间 $\geq 2\text{ h}$;在隔离层上继续堆焊 ER316H 不锈钢时,同样采用平焊工位,预热温度 $\geq 150\text{ }^{\circ}\text{C}$,选用 ER316H 氩弧焊丝,保护气体为纯度 $\geq 99.995\%$ 氩气,焊后进行后热处理,后热温度 $250\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$,后热时间 $\geq 2\text{ h}$ 。

(2)热处理。根据 ASME 标准规定,P-No.5A 材料任意厚度的焊接接头都需进行焊后热处理,以消除焊接残余应力,降低接头硬度,改善力学性能^[6]。在完成 CHG-1625HRK 和 ER316H 堆焊后,对隔离层进行消应力热处理,热处理保温温度范围为 $690\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(3)对接焊。完成隔离层的热处理后,将带有处理过隔离层的 F22 铬钼钢侧与 316H 不锈钢母材进行对接。此时,焊接热影响区已不再涉及铬钼钢母材,属于同材质(316H)焊接,无需额外预热和焊后热处理,施焊温度不低于室温即可进行焊接^[7]。对接焊缝采用 ER316H 焊丝,与 316H 耐热不锈钢进行对接,保护气体为纯度 $\geq 99.995\%$ 的氩气,焊接过程中需确保焊缝得到充分的气体保护。焊接接头结构示意图如图3所示。

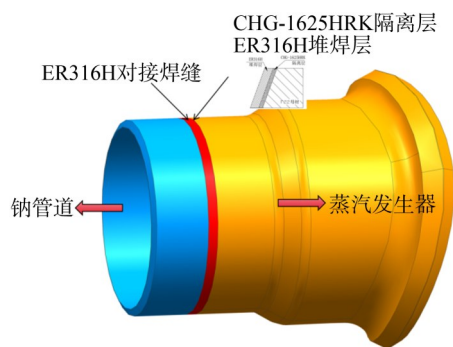


图3 焊接接头结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of welded joint structure

2 结果与讨论

2.1 拉伸性能

采用微机控制电液伺服液压万能试验机(WAW-1000)对焊接接头、隔离层熔敷金属、对接焊缝熔敷金属进行室温及高温($350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $515\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $530\text{ }^{\circ}\text{C}$)状态下的拉伸性能测试,试验结果

如表4所示。

表4 焊接接头及熔敷金属拉伸性能结果

Table 4 Tensile performance results of welded joints and deposited metals

试验类型	试验温度/℃	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%	Z /%
焊接接头	室温	500	327	—	—
	350	440	270	11.0	68.0
	450	435	255	19.0	78.0
	515	385	245	16.0	85.0
	530	365	230	17.0	85.0
隔离层 熔敷金属	室温	630	457	35.0	69.0
	350	460	340	23.0	69.0
	450	465	330	28.0	61.0
	515	450	310	24.0	57.0
	530	435	315	26.0	62.0
对接焊缝 熔敷金属	室温	585	485	44.0	69.0
	350	465	385	20.0	80.0
	450	445	360	20.0	75.0
	515	430	345	20.0	65.0
	530	425	340	16.0	59.0

所有焊接接头试样均表现为塑性断裂,断裂位置有所差异。350℃高温拉伸的断裂发生于焊缝区域,但其抗拉强度仍高于母材规定的下限值;而在室温及其他高温状态拉伸的断裂位于母材,说明焊缝性能更优。对于熔敷金属,隔离层和对接焊缝在530℃下的抗拉强度均保持在420 MPa以上,屈服强度均高于310 MPa,显示出优良的高温承载能力。综合来看,试样的焊接接头及熔敷金属在拉伸性能方面均能满足设计要求。

2.2 冲击试验

采用金属摆锤式样冲击试验机(ZBC-300A)对焊接接头进行冲击试验,试样尺寸7.5 mm×10 mm×55 mm。在接头不同区域(包括铬钼钢母材、CHG-1625HRK侧热影响区及熔敷金属、ER316H热影响区及熔敷金属、不锈钢热母材)加工了缺口,测试温度设定为13℃和-20℃,测试结果见表5。结果表明,焊接接头6个区域的吸收能量、侧向膨胀量和剪切断面率均达到了相关标准或设计要求,表明焊接接头整体具有较好的低温和常温冲击韧性。

2.3 硬度试验

采用维氏硬度计对焊接接头进行硬度测试,测试区域覆盖铬钼钢母材、铬钼钢热影响区、CHG-1625HRK熔敷金属、ER316H熔敷金属(堆焊层)、

ER316H熔敷金属(对接焊缝)、不锈钢热影响区、不锈钢母材。测试位置包括接头上下表面及厚度 $T/2$ 处,结果如图4所示。分析表明,铬钼钢热影响区及CHG-1625HRK+ER316H堆焊层区域的硬度相对较高,这是因为在堆焊过程中该区域经历了快速加热及冷却循环,形成了细小的金属结晶颗粒,残余应力较大,进而使得热影响区硬度偏高^[10]。

表5 焊接接头、热影响区、熔敷金属冲击性能结果

Table 5 Results of impact properties of welded joints, heat affected zones, and deposited metals

缺口位置	试验温度/℃	吸收能量/J	侧向膨胀量	
			剪切断面率/%	侧向膨胀量/mm
铬钼钢侧	13	286/284/283	80/85/90	2.20/2.04/2.02
母材	-20	293/282/285	90/90/90	1.94/1.82/1.86
CHG-1625HRK	13	257/247/201	50/50/50	1.96/1.86/2.12
侧热影响区	-20	213/210/212	50/50/50	2.20/2.02/2.28
CHG-1625HRK 侧熔敷金属	室温	93/80/82	50/50/50	1.90/1.50/1.48
ER316H 熔敷金属	室温	204/189/212	50/50/50	2.00/1.98/1.74
ER316H 热影响区	室温	251/231/224	50/50/50	1.68/1.64/1.74
不锈钢侧 母材	室温	310/303/300	100/100/100	1.92/1.98/1.92

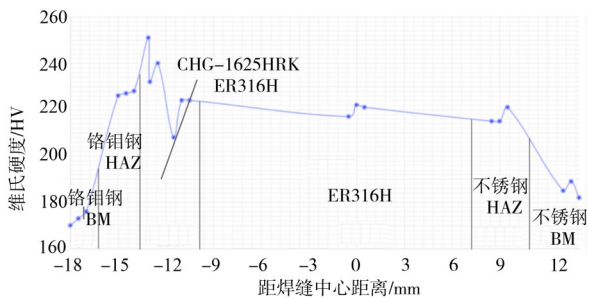


图4 接头硬度试验结果

Fig. 4 Hardness test results of the joint

2.4 金相组织

采用10%草酸水溶液电解腐蚀和10%硝酸水溶液腐蚀制备金相试样。焊接接头堆焊层焊缝、熔合区、母材微观金相组织如图5~7所示。从微观金相图中可以看到,焊缝与母材有清晰的界限,且完全熔合;焊缝金属、熔合区以及热影响区均未发现未熔合、未焊透、裂纹、尺寸超标的气孔和其他有害缺陷,亦无显微裂纹及异常组织存在。

根据图示,隔离层CHG-1625HRK焊缝组织主



要为奥氏体以及微量铁素体,晶粒度约为7级;堆焊层 ER316H 的焊缝组织主要为奥氏体加少量铁素体,结合 CHG-1625HRK 熔敷金属的化学成分,按

照 WRC-2012 图计算出来 Cr 当量约为 22.3, Ni 当量约为 32.6,说明该材料拥有非常优秀的耐腐蚀性,在力学性能方面也有良好的韧性,无低温脆断风险。

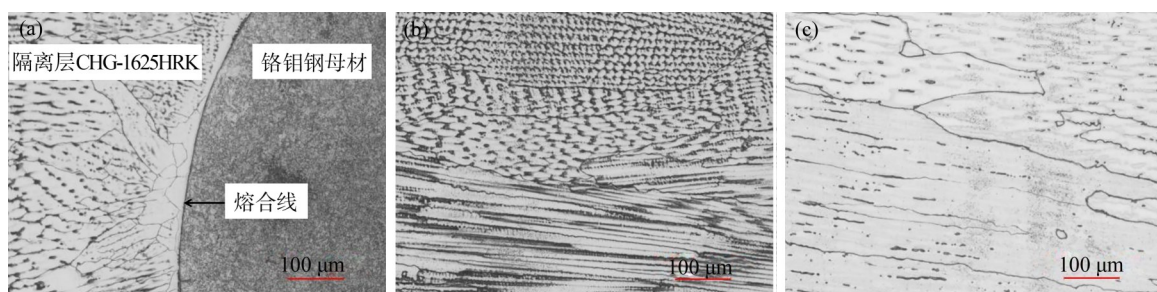


图5 (a)左-隔离层CHG-1625HRK与右-铬钼钢母材F22;(b)隔离层CHG-1625HRK;(c)堆焊层ER316H

Fig. 5 (a) Left-isolation layer CHG-1625HRK and right-chromium molybdenum steel base material F22; (b) Isolation layer CHG-1625HRK; (c) Welding layer ER316H

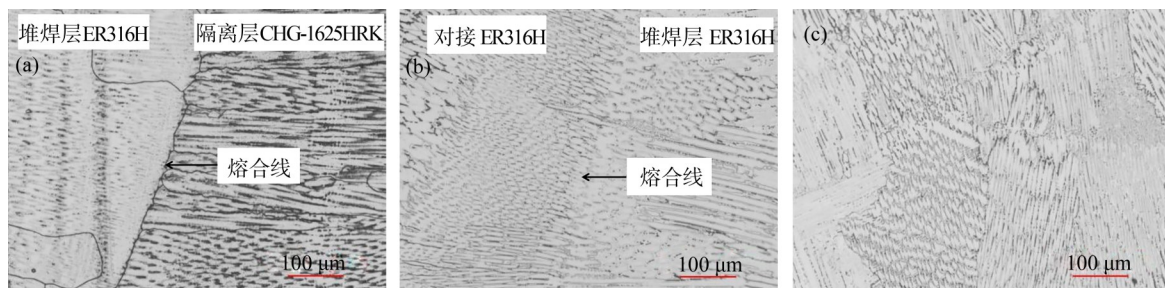


图6 (a)左-堆焊层ER316H与右-隔离层CHG-1625HRK;(b)左-对接ER316H与右-堆焊层ER316H;(c)对接焊缝ER316H

Fig. 6 (a) Left-weld overlay ER316H and right-isolation layer CHG-1625HRK; (b) Left-docking ER316H and right-weld overlay ER316H; (c) Butt weld ER316H

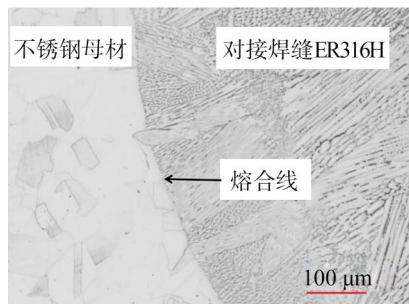


图7 左-不锈钢母材与右-对接焊缝ER316H

Fig. 7 Left-stainless steel base material and right-butt weld ER316H

2.5 高温持久性能

依据 ASEMT E139 标准对焊接接头进行 530 °C 高温持久性能测试,135 MPa 应力下试样的最长时间超过 12 000 h。通过与 ASME 规范第 5 分册给出的 2.25Cr-1Mo 钢在 550 °C 下的最小断裂曲线进行对比,在相同断裂时间下,本试验测得的断裂应力远高于 ASME 规范给出的下限值,本工艺制备的焊接接头具有较好的高温持久性能。图 8 给出了断裂应力和断裂时间的拟合公式 $\sigma = -22.95 \ln(t) + 352.41$,

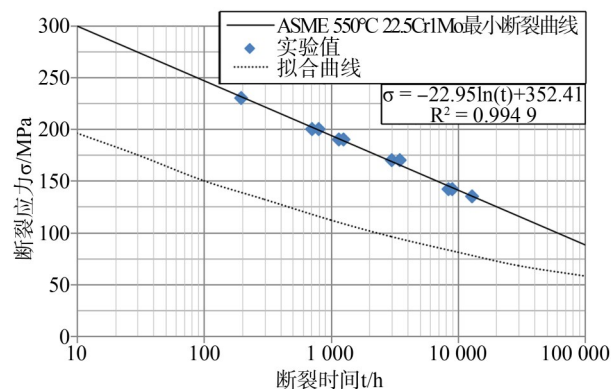


图8 高温持久断裂应力与断裂时间的关系

Fig. 8 The relationship between high-temperature persistent fracture stress and fracture time

相关系数 $R^2=0.9949$, 拟合效果较好。

3 结论

本研究针对高温液态钠介质下铬钼钢 F22 与耐热不锈钢 316H 的异种钢焊接问题,通过理论分析、

材料选择、工艺参数优化和试验验证,成功开发了一套完整、可靠的焊接工艺。主要结论如下:

(1)采用CHG-1625HRK+ER316H作为隔离层焊材,成功解决了两侧母材材质不同化学成分的过渡,避免了Ni原子的迁移,且接头性能满足高温液态钠长期使用工况,各项技术指标满足设计要求。

(2)隔离层焊缝堆焊后及时进行消应力热处理,可以消除铬钼钢F22带隔离层焊缝金属及铬钼钢母材热影响区的残余应力,同时完成组织转变,改善接头性能。

(3)该焊接工艺获得的异种钢接头具有良好的室温及高温拉伸强度、良好的塑韧性和冲击性能,且高温持久试验结果表明其断裂应力远高于ASME要求,满足高温液态钠介质长期使用工况的需求。

(4)现有研究主要解决了异种钢对接接头的隔离层选型的问题,同时聚焦接头的短时力学性能,该技术在核电装备领域的广泛应用还面临着一系列的挑战。这些挑战包括但不限于接头长期服役性能与失效机理研究、在极端工况下的安全验证问题、智能制造工艺工程化突破等方面的问题。

尽管该焊接工艺未来还存在许多优化的方向,但本研究成功解决了某四代核电堆型蒸汽发生器耐高温不锈钢316H与铬钼钢F22的对接焊,该技术的成功应用也为相关设备的制造提供了可靠的技术支撑。

参考文献:

- [1] 但军,李恩,蒋宇晨,等. CFR600型示范快堆蒸汽发生器关键焊接技术[J]. 东方电气评论, 2023, 37(02): 27-30.
DAN J, LI E, JIANG Y C, et al. Key Welding Technology of CFR600 Demonstration Fast Breeder Reactor Steam Generator[J]. Dongfang Electric Review, 2023, 37(02): 27-30.
- [2] 高殿宝,李志杰. 核反应堆压力容器安全端焊接方法[J]. 一重技术, 2011(06): 36-38.
GAO D B, LI Z J. Nuclear Reactor Pressure Vessel Safety End Welding Method[J]. Yichong Technology, 2011(06): 36-38.
- [3] 李恩,蒋宇晨,刘远彬,等. 一种用于高温液态钠介质下的铬钼钢与耐热不锈钢的焊接方法: ZL202110410523.3[P]. 2022-11-22.
- [4] 赵玉,刘建兴. 钠快冷反应堆用316H奥氏体不锈钢高温拉伸试验及评测[J]. 甘肃冶金, 2022, 44(05): 71-74.
ZHAO Y, LIU J X. High-temperature tensile test and evaluation of 316H austenitic stainless steel for sodium fast cooling reactor[J]. Gansu Metallurgy, 2022, 44(05): 71-74.
- [5] 肖瑞旺,高俊根,刘开理,等. 核电站安注箱瓜瓣封头焊接裂纹的成因与控制措施[J]. 电焊机, 2021, 51(11): 114-117.
XIAO R W, GAO J G, LIU K L, et al. Causes and Control Measures of Welding Cracks in the Melon Seal Head of Nuclear Power Plant Safety Injection Box[J]. Electric Welding Machine, 2021, 51(11): 114-117.
- [6] 禹小伟. 铬钼钢承压设备焊后热处理工艺的探讨[J]. 压力容器, 2007(09): 48-51.
YU X W. Exploration of Post-Weld Heat Treatment Process for Chromium-Molybdenum Steel Pressure Equipment[J]. Pressure Vessels, 2007(09): 48-51.
- [7] 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 Process of Dissimilar Steel Joints for Pressure Vessels[J]. Boiler Technology, 2022, 53(05): 46-51.
- [8] 刘天增,李具仓,潘吉祥,等. 氮对07Cr18Ni11Nb不锈钢组织和性能影响[J]. 甘肃冶金, 2024, 46(03): 106-110.
LIU T Z, LI J C, PAN J X, et al. The effect of nitrogen on the structure and properties of 07Cr18Ni11Nb stainless steel[J]. Gansu Metallurgy, 2024, 46(03): 106-110.
- [9] 汪彬,程显平,吕增,等. 电阻加热和感应加热在海洋工程钢结构焊接中的应用对比[J]. 金属加工(热加工), 2018(04): 60-63.
WANG B, CHEN X P, LV Z, et al. Comparison of Resistance Heating and Induction Heating in the Welding of Offshore Engineering Steel Structures[J]. Metal Processing (Hot Processing), 2018(04): 60-63.
- [10] 赵虎庆,杨有福,俞禄沅,等. SA-336 F11 CL.2与SA-765 Gr.II异种钢对接焊工艺研究[J]. 石油化工设备, 2024, 53(03): 24-32.
ZHAO H Q, YANG Y F, YU L Y, et al. Research on Butt Welding Process of SA-336 F11 CL.2 and SA-765 Gr.II Dissimilar Steels[J]. Petroleum and Chemical Equipment, 2024, 53(03): 24-32.

