

维 修 改 造

深水吸力锚关键部件系泊锚耳组焊技术

于本水, 李晓升, 孙金丽, 刘博, 李雄, 武立宪

(海海洋石油工程股份有限公司, 天津 300452)

[摘 要] 吸力锚是深水油气田浮式生产储卸油装置(FPSO)等浮体设施系泊系统的核心装备, 其筒体上关键部件系泊锚耳的可靠性对系泊安全性至关重要。文章以深水吸力锚上ASTM A148 Gr. 90-60铸件系泊锚耳的组焊为例, 通过对材料焊接性分析, 制定合理的接头形式、组焊方式、焊接工艺、无损探伤及热处理工艺等, 确保了系泊锚耳的组焊质量, 满足了系泊载荷要求, 为行业同类型深水系泊吸力锚制造提供借鉴。

[关键词] ASTM A148 Gr. 90-60铸件; 吸力锚; 系泊锚耳; 组焊

随着深水油气田的开发, 吸力锚系泊浮式生产储卸油装置(FPSO)等浮体设施技术得到了广泛应用。使用时, 吸力锚作为桩基结构沉桩海底入泥, 在吸力作用下牢牢固定于海底, 吸力锚筒体中下部安装有系泊锚耳, 并通过锚链与FPSO等浮体设施连接, 从而给其提供安全可靠的固定作用。

我司承揽制造的南海某项目系泊FPSO装置的吸力锚, 系泊布置分3组, 每组4根吸力锚, 共12根吸力锚, 吸力锚入泥深度21m, 系泊半径2570m。南海海况条件恶劣, 吸力锚服役海域水深约350m, 筒体上关键部件系泊锚耳需要承受较大的锚链拉张力, 要求具有良好的抗疲劳荷载能力, 系泊锚耳在筒体上的组焊极易产生严重的焊接缺陷, 影响系泊的安全性。文中以ASTM A148Gr.90-60铸件系泊锚耳的组焊(执行DNV-OS-C401 2021标准)为例, 通过对材料焊接性分析, 制定合理的组焊方式、焊接工艺、无损检测及热处理等措施, 进行严格的过程质量控制, 优质高效的完成了铸件系泊锚耳的安装焊接, 获得了良好的组焊质量和经济效益, 保证了其系泊安全性。

1 设备及材料

1.1 设备简介

吸力锚为一顶端封闭、下端敞开的钢筒, 由筒体、顶盖、系泊锚耳等结构组成, 吸力锚筒体高度22m、内径6.5m, 筒体顶端设有顶盖, 顶盖中心留有抽吸孔, 关键部件系泊锚耳安装在筒体的中下部, 如图1所示。

系泊锚耳设计系泊荷载2500吨, 根据疲劳荷载要求, 通过强度计算分析, 选用ASTM A148



图1 吸力锚

Gr.90-60高强度铸件, 静质量7.06吨, 把手直径395mm, 弧面板四周坡口处厚度100mm, 铸件系泊锚耳外圈与400mm宽、100mm厚的“回”字形DNV-OS-B101 NV E36-Z35钢过渡板连接组焊, 其在筒体上的安装如图2所示。



图2 铸件系泊锚耳在筒体上的安装

作者简介: 于本水(1977-), 男, 山东日照人, 特级技师, 中央企业青年岗位能手, 中国海油集团所属单位技能专家, 主要从事海洋工程水下产品设施的焊接建造工作。

1.2 材料性能

ASTM A148 Gr.90-60铸件系泊锚耳通过砂型铸造而成，交货状态为正火+淬火+回火，NV

E36-Z35钢过渡板执行DNV-OS-B101 2021标准，交货状态为正火。其化学成分见表1、力学性能见表2。

表1 ASTM A148Gr. 90-60铸件与DNV-OS-B101 NV E36-Z35钢的典型化学成分（质量分数）

牌号	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
A148 Gr. 90-60	0.16	0.49	1.42	0.012	0.001	0.07	0.023
NV E36-Z35	0.07	0.30	1.49	0.009	0.002	0.16	0.004
牌号	Ni	Cu	V	Al	Nb	Ti	N
A148 Gr. 90-60	1.12	0.182	0.009	0.020	0.005	0.001	0.006
NV E36-Z35	0.29	0.031	0.059	0.032	0.028	0.002	—

表2 ASTM A148Gr. 90-60铸件与DNV-OS-B101 NV E36-Z35钢的力学性能

牌号	屈服强度Rp0.2/MPa		抗拉强度Rm/MPa		伸长率A/%		冲击吸收能量AKV/J(-40℃)				
	标准值	实测值	标准值	实测值	标准值	实测值	标准值 / 要求值	实测值			
A148 Gr. 90-60	≥415	442	≥620	646	≥20	26	≥32	T/4	174	204	196
								T/2	103	87	118
NV E36-Z35	≥355	406	490~630	543	≥21	27.5	≥34	T/4	263	271	216
								T/2	189	223	197

1.3 材料焊接性

ASTM A148 Gr.90-60铸件和DNV-OS-B101 NV E36-Z35钢都属于低碳合金钢，根据其化学成分，按照碳当量计算公式 $C_{eq}=C+Mn/6+(Cr+Mo+V)/5+(Cu+Ni)/15(\%)$ ，计算出A148 Gr.90-60铸件的碳当量为0.50%，NV E36-Z35钢的碳当量为0.38%，说明铸件的冷裂倾向较大，焊接性较差。

A148 Gr.90-60系泊铸件锚耳结构复杂，刚性大，铸态组织晶粒粗大，成分偏析严重，并残留相当大的内应力，接头焊接部位容易产生硬化、裂纹等缺陷^[1]。NV E36-Z35钢晶粒细小，组织均匀，具有优良的抗层状撕裂能力和焊接性能。两者在吸力锚筒体上的“口”字形异种钢接头，焊缝厚度大、拘束应力高、焊接位置复杂，焊接时，铸钢的熔点高、收缩量大，接头温度变化不均匀，自由膨胀和收缩受到限制，在焊接接头应力集中区会引起严重的裂纹开裂。

2 焊接工艺

2.1 焊接接头形式设计

铸件系泊锚耳与过渡板的接头坡口形式设计，遵循提高焊接效率，便于焊缝检验，避免产生焊接缺陷的原则，采用机加工方式制备内大外

小的“X”形50°坡口，根部间隙2~4mm，钝边1~2mm，其接头坡口形式如图3所示。

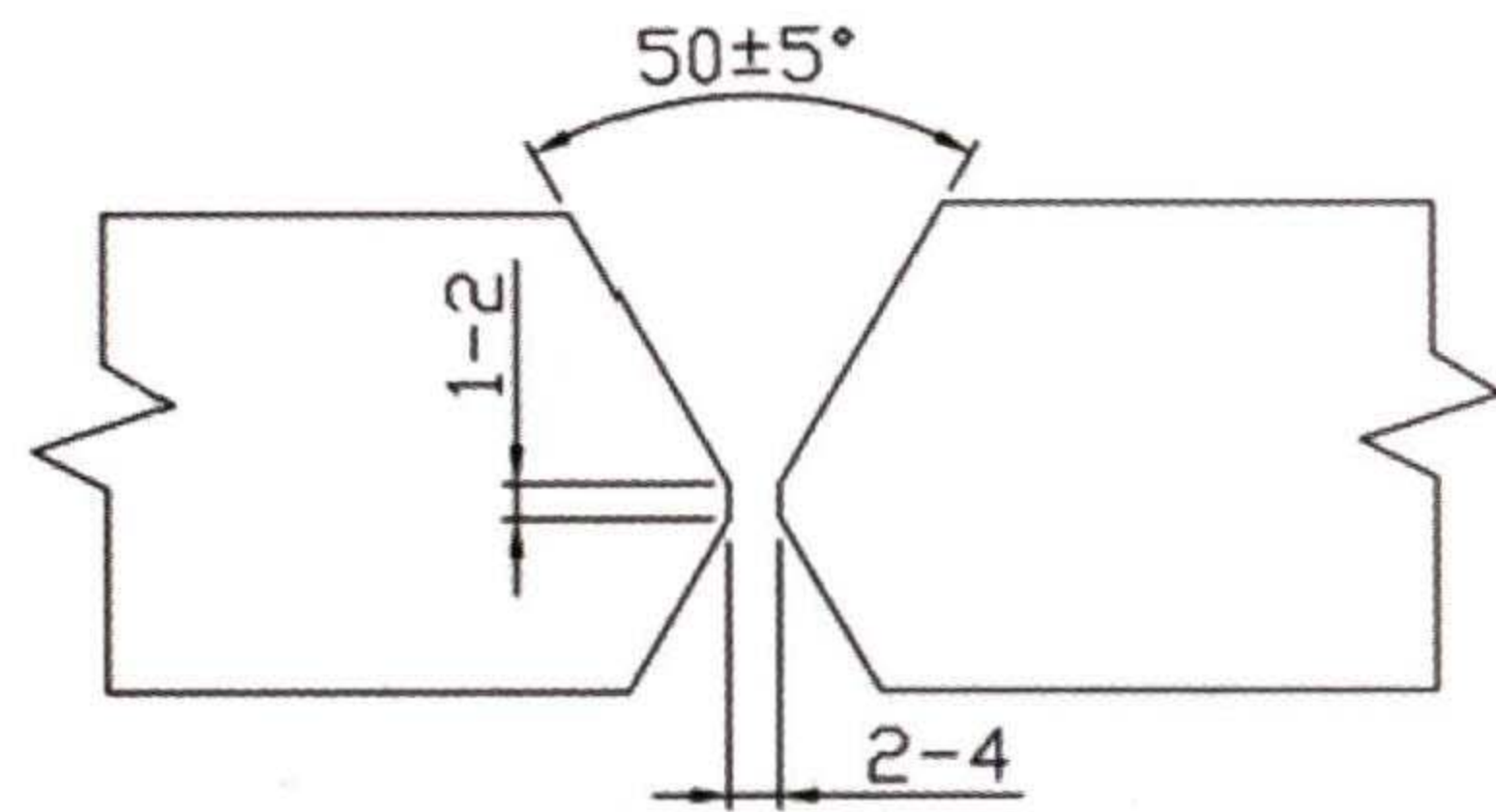


图3 接头坡口形式

2.2 焊接方法及焊接材料

铸件系泊锚耳与过渡板的接头焊缝呈“口”字形，其直缝段的焊接方法采用熔敷效率高的SMAW+SAW、四角弧段的焊接方法采用操控方便的SMAW+FCAW-G。焊接材料为Φ3.2mm的LB-52U封底焊条、Φ4.0mm的T Union SA Ni1/UV C418 TT-M埋弧焊丝及Φ1.2mm的SF-36EA药芯焊丝。

2.3 焊接工艺参数

铸件系泊锚耳与过渡板的焊接接头厚、拘束应力大，焊接工艺参数的合理性对接头质量的影

响较大。考虑施工现场情况,针对不同的焊接方法、焊接材料,进行焊接工艺评定,确定合适的焊接工艺参数。其中FCAW-G焊接时,保护气体采

用混合比为8:2的Ar+CO₂混合气体,气体流量为15-25L/min,表3为不同焊接工艺的典型焊接工艺参数。

表3 不同焊接工艺的典型焊接工艺参数

焊层	焊接方法	焊接材料		焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/(mm·min ⁻¹)	热输入/(kJ·mm ⁻¹)
		牌号	规格/mm				
封底	SMAW	LB-52U	3.2	80-120	18-23	100-160	1.2-2.0
填充/盖面	FCAW-G	SF-36EA	1.2	165-250	22-26	160-300	1.0-2.0
填充/盖面 (或)	SAW	T Union SA Nil/UV C418 TT-M	4.0	480-600	26-33	350-600	1.8-3.0

3 焊接施工

3.1 焊前清理

焊前清除坡口及边缘两侧的油污、铁锈和其他有害杂质,25mm范围内打磨至金属光泽。观察坡口母材是否完好,是否有夹杂、分层、裂纹等。焊接过程中,清除前道焊缝表面的熔渣和缺陷。

3.2 组对及焊接时机

A148 Gr.90-60铸件系泊锚耳与NV E36-Z35钢过渡板形状不规则且尺寸较大^[2],为保证接头组对质量和施工便捷性,组对采用预制方式完成(图4)。铸件系泊锚耳与过渡板组对装配时严格按照标准和设计要求控制对口错边量,不允许强力组装。定位焊焊缝出现裂纹或其他缺陷时,应予以清除,并移位再焊。

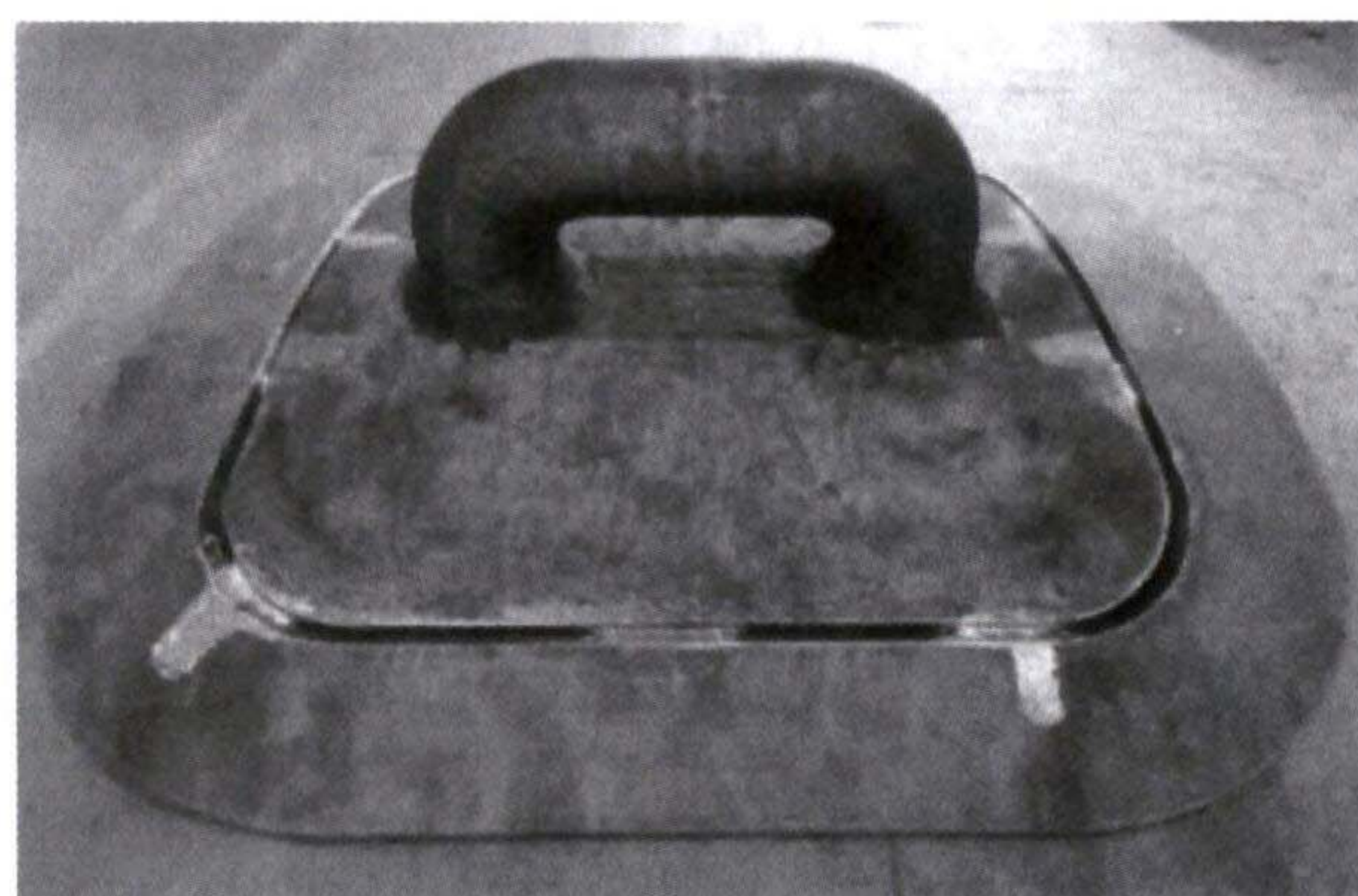
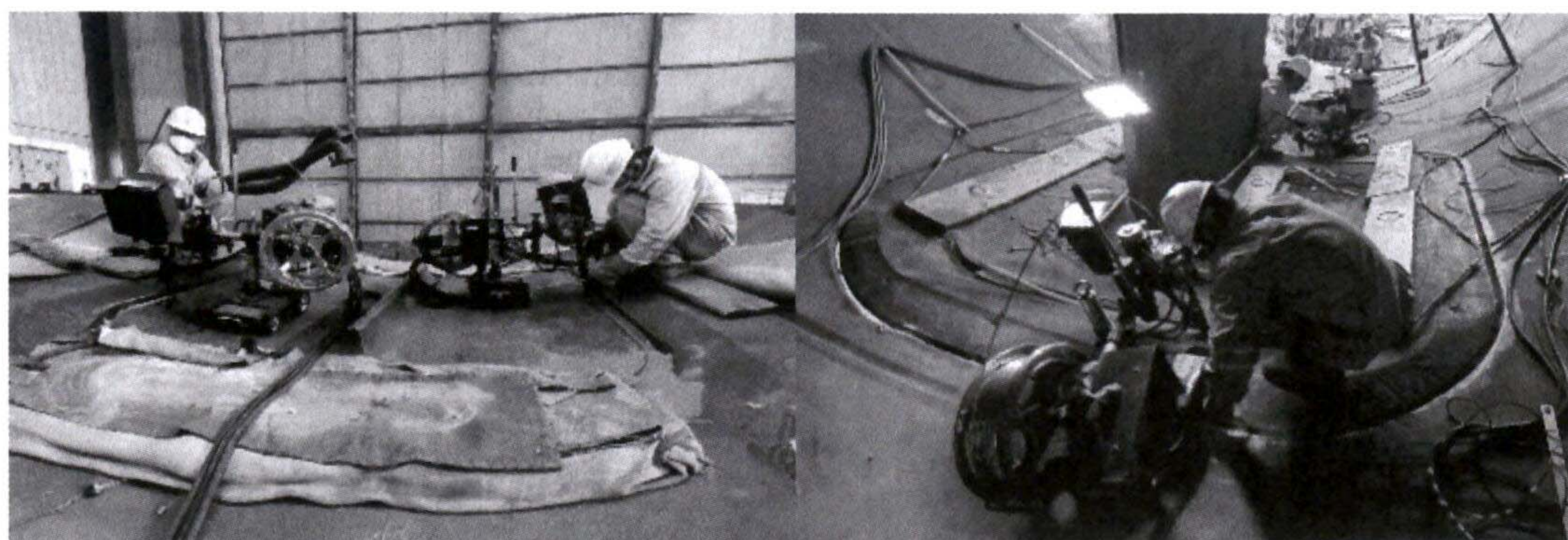


图4 铸件锚耳与过渡板预制组对

预制组对焊缝的焊接时机,分为先焊接后筒体上安装(图5a)和先筒体上安装再焊接(图5b)两种方式。从保证焊接质量和提高焊接效率的角度,考虑天气、预热、便捷施焊等因素的影响,优先采用车间内预制焊接。



(a) 车间预制焊接

(b) 现场安装后焊接

图5 铸件锚耳与过渡板接头的焊接时机

3.3 焊前预热及层间温度

接头焊前需要进行均匀预热,考虑到接头厚度、结构拘束度及材料特性等因素,预热范围增

加至坡口两侧各不小于150mm,预热温度不小于150℃,层间温度不超过210℃,加热方式采用中频电磁加热(图6)或电阻加热。

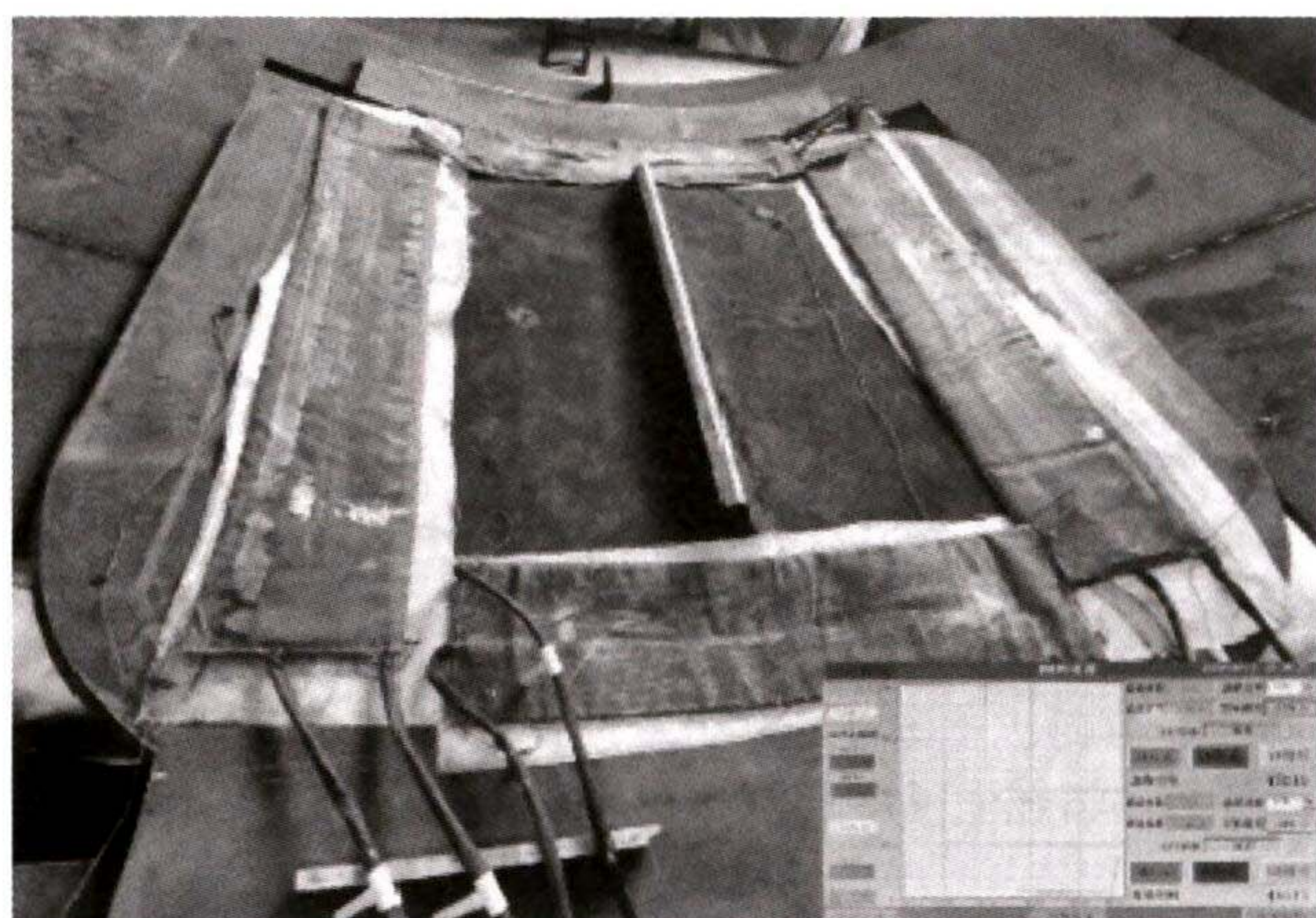


图6 中频电磁加热

3.4 焊接顺序

铸件系泊锚耳与过渡板的接头焊接，按照先内侧后外侧的顺序施焊。内、外侧焊接时均先焊接直缝段焊缝，后焊四角弧段焊缝。

3.5 质量控制要求

(1) 采用预制焊接方式时，及时调整工装和工件，使焊道位于易施焊的位置；

(2) 室外安装后施焊时，应进行防风、防雨雪等措施，特别是FCAW-G焊接时；

(3) 严格做好焊前预热和焊接过程的层间温度控制，焊后对焊缝进行保温缓冷，避免产生裂纹等焊接缺陷；

(4) 焊接时严格按照WPS施焊，控制焊接线能量，采取多道快速焊法；

(5) 焊接过程要做好防变形措施，采用合理的焊接顺序，必要时可采用刚性固定；

(6) 焊接过程尽量一次性连续完成，如确需中断焊接，只有在完成封底焊并连续焊完1/3焊缝厚度才允许中断，以防止温度梯度变化太大，在拘束应力的作用下接头焊缝产生开裂，中断焊接后应用保温材料包裹焊缝部位缓慢冷却，重新焊接需要预热至WPS规定的温度；

(7) 焊后对焊缝表面进行圆滑过渡打磨，特别是要消除焊趾部位的咬边等开口缺陷，以提高焊接接头的抗疲劳性能^[3]。

4 焊后热处理

A148 Gr.90-60铸件系泊锚耳与NV E36-Z35钢过渡板的接头厚度100mm，材料冷裂倾向大、接头拘束度高，焊后存在着较大的焊接残余应力，进行焊后热处理能有效消除由于焊接所产生的应

力，降低焊缝的显微硬度，改善焊接接头的组织性能^[4]。考虑吸力锚整体结构及现场施工情况，对焊接接头进行局部去应力热处理，热处理时，为保证热处理的效果和质量，升降温速率要适宜，保温时间应适当延长，保温温度为 $585 \pm 5^\circ\text{C}$ ，保温时间3.5小时，获得了良好的热处理效果。

5 无损检测

A148 Gr.90-60铸件系泊锚耳与NV E36-Z35钢过渡板的接头焊缝具有延迟裂纹倾向，需要在焊接完成24小时之后进行无损探伤，检测方法的选择和实施时机对设备制造工期影响很大。考虑公司检验能力和项目工期，在焊后及热处理后按照标准和设计要求进行相应的MT、UT无损探伤，检测结果均满足要求。

6 结论

通过对项目中12个吸力锚上的ASTM A148 Gr.90-60铸件系泊锚耳与DNV-OS-B101NV E36-Z35钢过渡板的异种钢接头组焊施工验证，结论如下：

(1) 优先采用预制焊接后再安装到吸力锚筒体上的组焊方式，可以达到提高施工效率、提升焊接质量的效果。

(2) 接头焊接采用连续性焊接完成，同时做好焊前预热和焊接过程的层间温度控制，对降低焊接接头裂纹的产生能够起到关键作用。

(3) 接头焊缝的直缝段和四角弧段分别采用SMAW+SAW和SMAW+FCAW-G焊接方法，可以最大限度的提高焊接效率和焊接质量。

(4) 焊后去应力热处理能够有效消除焊接过程所产生的应力，可以改善焊接接头的组织性能，对提升系泊锚耳节点的抗疲劳性能至关重要。

◆参考文献

- [1]沈阳晨, 魏建军. 铸钢件焊接及缺陷修复[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [2]吕志军, 闵详军, 靳伟亮, 等. ASTM A148 Gr90-60铸钢件与API 2Y Gr60钢的焊接工艺[J]. 焊接技术, 2020, 49(8): 59-61.
- [3]沈楠楠, 王松涛, 王振华, 等. 不同类型S420超高强钢焊接接头的疲劳性能对比研究[J]. 焊接技术, 2021, 50(9): 66-68.
- [4]周大坤, 张世鑫, 王雨, 等. 气冷式压力容器用钢13MnNiMoR钢焊接工艺研究[J]. 化工设备与管道, 2015, 52(4):13-16.