



2.25Cr1Mo0.25V 钢制锻焊反应器壳体的焊接制造

王庆国 郭焱霞 董洋

【摘要】 主要介绍2.25Cr1Mo0.25V钢制锻焊反应器壳体的焊接要点，通过焊接工艺评定验证焊材选用、焊前预热、道间温度、后热消氢及焊后热处理的可行性。按合格的焊评报告编制焊接工艺指导焊接产品，取得了成功。

关键词： 2.25Cr1Mo0.25V；锻焊反应器；焊接制造

1. 概述

2013年，我公司设计制造的某锻焊式超临界气化反应器（以下简称反应器）主体基材为2.25Cr1Mo0.25V，其内壁需要整体堆焊Inconel625型镍基合金。由于该设备服役的工况为高温、高压、含氢强腐蚀性介质。所

以，决定该设备安全运行的关键就是壳体基材对接接头和内壁堆焊接头的焊接质量。本文主要论述如何控制该设备壳体基材对接接头的焊接质量。

2. 设备的主要技术指标

反应器主体材质为2.25Cr1Mo0.25V IV级锻件，

内壁整体堆焊Inconel625型镍基合金，设备总长约8m，筒体规格为 $\phi 1\ 000\text{mm} \times (105+6)\text{mm} \times 5\ 175\text{mm}$ ，上下平盖厚度为 $(388+6)\text{mm}$ ，容器类别为Ⅲ类。壳程/盘管设计压力：25MPa/26MPa；壳程/盘管设计温度：500（400）℃/450℃；壳程

牙法或锯齿形运条，焊条摆动时中间过渡要快一些，当到坡口边缘时，应稍作停顿，防止咬边。接头时采用热接法，迅速更换焊条，在前一个熔池前20mm处引燃电弧，电弧引燃后拉到熔池上，电弧稍微拉高一些，让铁液充分熔合，然后正常摆动焊接。

4. 焊接注意事项

（1）打底焊接时应保证正确的焊条角度，尤其过障碍时焊条角度的调整。灭弧时焊接频率一致，燃弧时间要充分，防止根部焊道下坠，避免根部产生内凹或未熔合等缺陷。

（2）填充焊接时应注意每根焊条的收弧，防止弧坑冷缩孔或热裂纹的产生。

（3）在通过障碍时，焊接过程中焊工要实时调整焊接姿势，以保证良好的焊接视线。

（4）应认真清理每一层焊道飞溅及熔渣，焊接过程中保持焊接速度要均匀一致。

5. 结语

采用上述焊接方法和操作要点，焊接试件的外观成形有了很大的提高，保证了焊缝内部质量，经无损检测一次合格率达99.99%以上。培训学员分别在

2013年第十一届工程建设系统焊工技能大赛仰板加障碍获单项第一名，2014年第四十三届世界技能大赛国内选拔赛仰板加障碍获单项第一名。

参考文献：

- [1] 张士相.电焊（初级技能 中级技能 高级技能）[M].北京：中国劳动社会保障出版社，2013.

作者简介：李瑞峰等，大庆油田工程建设公司培训中心。王兴平，中国石油天然气第六建设有限公司。

MW 20170426

/盘管水压试验：立置31.25MPa（卧置31.33MPa）/立置2.5MPa（卧置2.5MPa）；壳程/盘管工作介质：污泥浆、O₂、CH₄、CO₂及H₂等/污泥浆；壳程/盘管焊缝系数：1/1。设备壳程基体材质为2.25Cr1Mo0.25V锻件+堆焊层；设备盘管材质为Inconel625镍基合金，规格为φ60.3mm×3mm。反应器主体结构形式如图1所示。

3. 设备壳体基材及评定用试件的性能指标

反应器壳体基材及评定试件用2.25Cr1Mo0.25V钢为国产的12Cr2Mo1V锻件，其化学成分及力学性能指标符合NB/T47008—2010对12Cr2Mo1V IV（Ⅲ）级锻件的各项规定，如表1、表2所示。采购时，对回火脆化倾向指标都提出了确切的要求。

步冷脆化试验如图2所示，图2中曲线由8个试验温度点组成，分别为-80℃、-60℃、-40℃、-30℃、-10℃、0℃、20℃和40℃。在每个温度下各取3个试样进行夏比冲击试验，共需48个试样，冲击试样要求按工程技术条件，分步冷却脆化试验程序按API RP 934A—2008、HG/T20581—2011及工程技术条件，曲线应平滑完整且有上下平台值。

4. 焊材的性能指标

针对2.25Cr1Mo0.25V钢的母材特点、使用工况及相关焊接经验，我公司在采购焊材时对熔敷金属的性能指标提出了具体要求，并且指定采购进口焊材。焊材的化学成分及力学性能满足ASME II卷C篇SFA—

5.5M（5.28M）对E9015—G（ER90S—G）的规定及工程要求。重点对热处理后熔敷金属的室温拉伸强度、室温屈服强度、高温屈服强度、室温断后伸长率、室温断面收缩率、-30℃低温冲击吸收能量、硬度（HBW）及回火脆化倾向评定（步冷）试验等方面做了明确规定。另外，对焊态下熔敷金属中的扩散氢均提出了采购要求（气相色谱法≤5mL/100g），同时保证其他关键化学成分与母材的相近性（如Cr、Mo、V、P、S及X系数按照壳体基材锻件要求执行； $w_{Mn}+w_{Si} \leq 1.20\%$ ）。待焊材进厂后，我公司按上述技术要求进行复验，合格后方可发放使用。

5. 工艺评定试验

该反应器为锻焊结构，筒体（2节）没有纵焊缝，壳体基材及端部主要受压焊缝为三道环缝。我公司首次使用该级别的材料制造化工设备，由于该设备直径小，焊接量不大及保证焊接质量，所以对壳体及接管基材采用

焊条电弧焊与手工钨极氩弧焊。针对该设备预设的焊接方法，我公司依据NB/T47014、工程技术条件及相关焊接经验制定焊接工艺评定试验方案（见表3）和相应预焊接工艺规程，用以指导试件的焊接。

根据焊接的工艺评定试件，在焊态下进行100%RT（AB）检测均达到NB/T47013.2 II级的要求，其评定试件焊接接头的力学性能试验结果与试件母材的力学性能要求值相比，均满足NB/T47014及工程要求（见表4）。针对短周期评定方案1的回火脆化倾向评定（步冷脆化）试验结果均满足基材的要求指标。依据以上各项数据形成的2项焊接工艺评定报告（PQR）可以完全覆盖本设备壳体及接管法兰基材所有需要评定的焊缝。

根据形成的PQR和公司的生产能力，编制了适合本工程的焊接工艺规程（WPS）以指导生产，其焊接参数如表5所示。

在设备壳体基材焊接过程

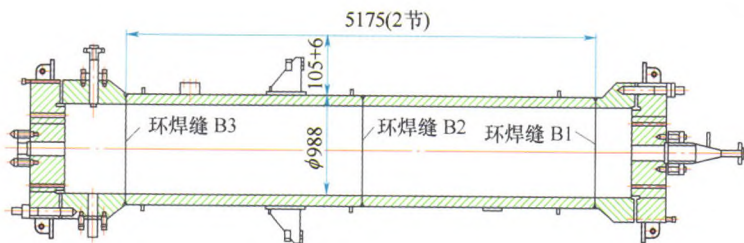
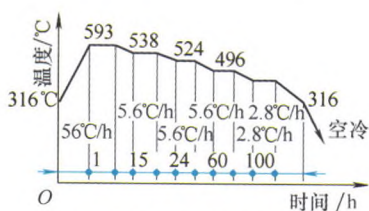
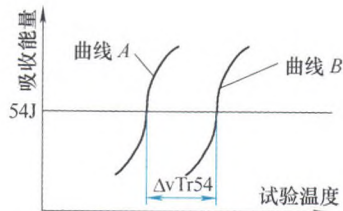


图1 超临界气化反应器



(a)分步冷却脆化试验程序



(b)曲线A(B)步冷前(后)冲击吸收能量与试验温度的关系曲线

图2 步冷脆化试验

中要注意以下几点：①焊前清理坡口面及边缘50mm范围内的铁锈、油污等杂质。②焊前焊条烘干350℃/1h，放入恒温箱100℃，使用时放入保温桶。③预热：180~200℃（加热位置：坡口两侧150mm；测温点：加热背面坡口两侧75mm）。④控制温度梯度及冷却速度：焊接制造过程中，为了减少焊接区域与周围基材之间的温度差（也称为温度梯度），在加热位置以外500mm范围内采用耐高温石棉毡进行保温；另外，将焊接部件两端安放简易的耐火工装阻挡空气对流。这两项措施在保证质量的同时，将大大降低能源的消耗，节约成本。⑤道间温度：180~300℃（道间温度不低于预热温度）。⑥严格按焊接工艺执行，控制热输入，减小过热区宽度。⑦层间锤击，打底及盖面层除外。⑧后热消氢：300~350℃/4h（焊接过程中除不可抗力外不许中断，中断及焊后及时消氢）。⑨焊后热处理对2.25Cr1MoV钢制容器的质量非常关键，其升温速度、保温时间以及冷却速度要严格执行。

6. 焊后检测

（1）反应器壳体基材3道环缝焊后无损检测结果满足100%RT（AB）的Ⅱ级要求以及100%UT（B）与100%MT的Ⅰ级要求，均一次合格；焊后热处理（705±14）℃/8h及水压试验后无损检测结果满足100%UT（B）及100%MT的Ⅰ级要求，均达到了设计指标。表明该设备母材、焊材匹配合理，工艺焊接性能良好。

表1 12Cr2Mo1V锻件的化学成分（质量分数）（%）

元素	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Cu	Nb	Ti	V	B	P	S
熔炼分析	0.15	0.10	0.30 ~ 0.60	2.0 ~ 2.5	0.90 ~ 1.10	0.25	0.25	0.07	0.03	0.25 ~ 0.35	0.002	0.012	0.010
成品分析	0.15	0.10	0.27 ~ 0.63	1.9 ~ 2.6	0.85 ~ 1.15	0.25	0.25	0.07	0.03	0.25 ~ 0.35	0.002	0.012	0.010

表2 12Cr2Mo1V锻件的力学性能

评定试件及本体牌号	试件厚度/mm	拉伸试验					冲击试验	硬度试验
		抗拉强度/MPa	室温屈服强度/MPa	高温屈服强度(500℃)/MPa	室温断后伸长率(%)	室温断面收缩率(%)	冲击吸收能量(-30℃)/J	布氏硬度HBW
12Cr2Mo1V锻件	42	590~760	≥420	≥325	≥17	≥45	60	147~240
		模拟焊后热处理：（705±14）℃/8h（26h）						

表3 工艺评定试验方案

方案编号	焊接方法	试板厚度/mm	焊材牌号 (日本神钢)	焊材型号 (SFA—5.28/5.5)	焊接位置	预热温度、 道间温度	焊后 热处理	步冷 试验
1	GTAW	42	焊丝： TG—S2CMH	焊丝： ER90S—G	3G (向上)	180~200℃； 180~300℃	Min.PWHT： (705±14) ℃/8h	是
2	SMAW		焊条： C M — A106HD	焊条： E9015—G			Max.PWHT： (705±14) ℃/26h	否
试件母材：12Cr2Mo1V，Ⅲ级锻件；规格：42mm×900mm×400mm（3组）								

表4 工艺评定试验结果

方案 编号	拉伸 试验 /MPa	取样 位置	高温 屈服 (500℃) /MPa	冲击试验		热输入 /kJ·cm ⁻¹	硬度HBW
				焊缝 (-30℃) /J	热影响区 (-30℃) /J		焊缝、热影响区 (各2点)
1	676/687	T/2	517	143/142/152	265/258/260	30	上：212/212；197/201
		T/4	563	134/138/182	266/290/290		中：223/217；217/217
2	657/652						下：201/197；197/212
		T/2	516	130/128/134	264/244/273		上：197/192；197/197
							中：212/207；217/212
		T/4	548	150/138/179	264/256/263		下：192/192；197/192

弯曲试验按D=3a；180° 均合格

表5 焊接参数

焊接方法	焊接层数	焊材牌号及规格/mm	焊接位置	预热、道温/℃	电弧电压/V	焊接电流/A	焊接速度/cm·min ⁻¹	焊后热处理
GTAW	1	ER90S—G/φ2.4	1G	180~200 180~300	10~14	100~130	7~9	(705±14) ℃/8h
SMAW	2~3	E9015—G/φ4			20~24	140~170	12~16	
	其他	E9015—G/φ5			22~26	170~200	14~18	

（下转第53页）

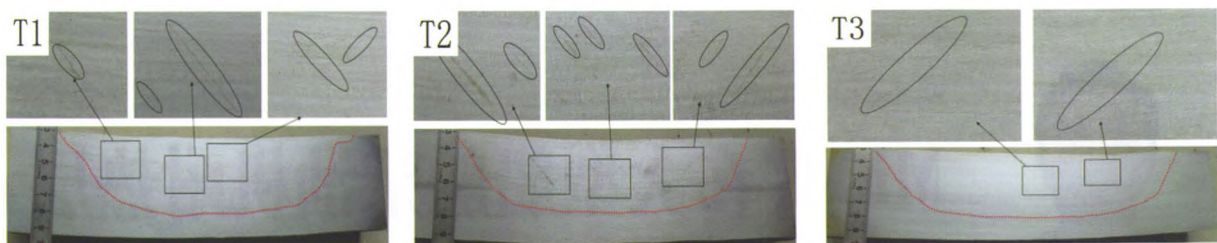


图6 焊缝纵向宏观断面及裂纹形貌

则，易产生横向裂纹。②焊接热输入和层间温度对焊缝组织影响很大，热输入过大，易产生脆性的魏氏组织，也必须严格控制。③对于大厚板焊接，需合理设置焊前预热与焊接后热，特别是焊接后热可有效控制横向裂纹的产生。④拘束应力对产生横向裂纹的扩展是关键驱动因素，合理安排焊接顺序、定位、装夹等，以及采取分段焊、焊后热处理等

措施可减小应力。

4. 结语

本文通过不同预热温度以及后热情况的一系列对比试验，研究返修焊横向裂纹产生的原因，通过采取焊前预热、焊接后热等工艺措施，最终获得一种大厚板高强钢返修焊横向裂纹的控制方法。

目前该研究成果已应用于我司承制的多个风力发电管桩项

目，如龙源大丰风力发电、蒋家沙风力发电及德国风力发电等，作为风电管桩焊缝的焊接返修的指导工艺，确保了焊接返修质量及实施进度，并得到了LR、ABS、TUV等多家监理公司的认可及高度评价。

作者简介：冯健、高丽彬，上海振华重工（集团）股份有限公司。

MW 20170427

（上接第50页）

（2）反应器壳体基材环焊缝的产品焊接试件（模拟鉴证环）与所代表部位同炉热处理后，其力学性能试验的各项指标均达到了表2的要求值。另外，本设备现已在用户现场安全运行近三年，售后回访以及用户反馈都没有出现壳体基材焊接质量的问题。证明该设备壳体基材的焊接质量在高温、高压及含氢强腐蚀性介质中的使用焊接性是安全可靠的。

7. 结语

通过设备焊后的各项性能检测，说明本工程的焊材选用、焊前预热、道间温度、后热消氢及焊后热处理选用是合理可行的。通过该反应器壳体基材焊接制造的成功，认为2.25Cr1Mo0.25V钢制锻焊及板焊

容器在焊接制造过程中应着重考虑以下几方面。

（1）母材及其匹配的焊材在采购时，要根据相关标准及工程技术条件对化学成分、力学性能及回火脆化倾向指标提出具体的要求。

（2）焊接工艺要采用多层多道焊并严格控制道间温度，后焊道（层）的回火作用，可细化晶粒，提高冲击韧性；在保证焊接质量的前提下，提高焊接速度可极大地控制焊接热输入；根据工艺评定的要求，焊条电弧焊热输入 $\leq 30\text{kJ/cm}$ 。

（3）要严格按照工艺要求控制焊前预热、道间温度、后热消氢及最终焊后热处理，尤其是最终焊后热处理，此过程不仅消除整体焊接应力、结构应力，更

重要的是通过最终热处理可以获得最佳的母材、焊缝抗回火脆化性能和综合力学性能。这些热作用对于2.25Cr1Mo0.25V钢制容器的质量至关重要。

（4）API RP 934A—2008规定：2.25Cr1Mo0.25V钢焊前预热区域为坡口及其两侧各一倍板厚（且 $\leq 100\text{mm}$ ）的范围，这个规定有待于推敲。从质量的角度考虑，最好的预热方式是整体预热，兼顾经济性及工艺的可行性，预热区域定为坡口与其两侧各三倍板厚（且 $\geq 150\text{mm}$ ）的范围，比较合理。

作者简介：王庆国等，中航黎明锦西化工机械（集团）有限责任公司。

MW 20170426