



基于风电筒体环焊缝返修试验 工艺研究

冯健 高丽彬

【摘要】 本文对大直径大厚板管桩筒体对接环缝的返修工艺进行了研究，结果表明合理设置焊前预热与焊接后热极为重要，特别是焊接后热可有效控制横向裂纹的产生。不预热、预热50℃、150℃，不进行后热均出现不同程度的横向裂纹；不预热、预热50℃、150℃，返修焊后增加后热均未发现横向裂纹。

关键词： 焊接返修；横向裂纹；预热；后热

1. 概述

目前大厚板焊接的主要方法是采用开X形坡口，正面焊接，背面清根，再背面焊接，焊后通过磁粉探伤检测MT、超声波探伤检测UT、射线探伤RT等对焊缝进行检测，若出现裂纹、夹渣、气孔及未熔合等焊接缺陷，则需对该焊接缺陷区域按照相应标准进行碳弧气刨或机械方法去除后再进行补焊，即返修焊。

返修焊一般采用焊条电弧焊或CO₂气体保护焊进行。由于返修焊缝区域拘束度、焊接热循环等条件较为复杂，极易产生焊接裂纹。如：返修焊附近区域的原焊缝金属被多次重熔，导致的组织粗化；返修焊缝的冷却速率较大，致使焊缝中的氢不易逸出；返修焊缝区域的拘束度较大等，这些因素都导致了返修焊横向裂纹的产生。

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，通过调整焊前预热、焊接后热等工艺条件，最终获得一种大厚板高强钢返修焊横向裂纹的控制方法。

2. 试验材料与方法

为与实际生产中返修焊接应力状态相同，该返修试验是在大型管桩筒体上进行，板厚60mm，直径5 000mm，如图1所示。筒体材质为S355NL，筒体

原环缝为埋弧焊焊接，焊材为CHW—S3(φ4.8mm)+CHF101。原母材及埋弧焊焊缝金属化学成分如表1所示。

返修焊接试验过程如下：

- ①在已完成焊接的筒体中对原埋弧焊缝表面打磨（见图2）。
- ②在打磨原焊缝表面进行碳刨槽，碳刨槽尺寸约为：40mm（深）×36mm（宽）×220mm（长），如图3所示。
- ③碳刨槽



图1 返修焊接试验筒体



图2 原焊缝打磨

表1 试验金属化学成分（质量分数）（%）

元素	C	Si	Mn	Ni	Cr	Cu	Nb	Ti	V	Ceq
筒体母材	0.13	0.36	1.56	0.12	0.058	0.029	0.034	0.02	0.031	0.42
原埋弧焊	0.058	0.25	1.50	<0.02	0.026	0.027	<0.02	<0.02	<0.02	0.32



图3 碳刨槽长度与宽度

打磨完毕后，进行火焰烘干，防止水汽引起的氢致裂纹及气孔。

④碳刨槽MT干磁粉探伤检测合格后，按照相应参数完成焊接试验，返修焊接方法为CO₂药芯焊丝气体保护焊（FCAW），焊材为Supercord 71H， ϕ 1.4mm，根据预热及后热参数的不同，分别进行6组焊接试验。6组焊接试验的预热、层间温度、热输入及后热参数如表2所示。

3. 试验结果与分析

返修焊接完成72h后，进行返修焊缝的UT探伤，探伤结果如表3所示。

返修焊焊缝成形如图4所示。为进一步验证UT探伤结果，将试样沿焊缝中心（A-A）切割取样，如图5所示。试样截取后，经研磨抛光和4%硝酸酒精腐蚀后，进行宏观断面及裂纹观察。裂纹观察结果与UT探伤结果基本相符，如图6所示。T1试样出现7处约45° 横向裂纹（可见长度分别为：30 mm，20 mm，15 mm，5 mm，5 mm，4 mm，2mm），T2试样出现7处约45° 横向裂纹（可见长度分别为：39 mm，28 mm，16 mm，14 mm，12 mm，9 mm，9mm），T3试样出现两处约45° 横向裂纹（可见长度分别为：19 mm，14mm），所有可见裂纹均

为约斜45° 横向裂纹。T4、T5、T6号试样断面均未出现横向裂纹。

对比T1、T2、T3试样结果可知，随着预热温度的升高，从室温提高到150℃，裂纹尺寸相应减小并且裂纹数量减少。预热可以使焊缝的冷却速度下降，有利于扩散氢的逸出和减少残余应力，虽然预热温度提高，对抑制横向裂纹产生有好处，但此处并不能完全控制裂纹产生。

分别对比试样T1和T4，T2和T5，T3和T6，可以看出，相同焊接条件下，增加后热工艺（后热230~315℃，保温2h，缓冷），可以避免裂纹产生。

横向裂纹的产生与焊缝的扩散氢含量及分布、焊缝的拘束应力状态以及材料的淬硬倾向组织三个因素有关。根据以上试验与结论，可知控制横向裂纹的方法有：①焊剂烘干是影响扩散氢的主要因素，必须严格控制，否

表2 返修焊试验参数

试验编号	试验内容			
	预热/℃	层温控制/℃	热输入/kJ·mm ⁻¹	焊后处理
T1	室温	≤230	2.7~3.3	自然冷却
T2	50	50~230	2.7~3.3	自然冷却
T3	150	150~230	2.7~3.3	自然冷却
T4	室温	≤230	2.7~3.3	后热：230~315℃，2h缓冷
T5	50	50~230	2.7~3.3	后热：230~315℃，2h缓冷
T6	150	150~230	2.7~3.3	后热：230~315℃，2h缓冷

表3 焊后UT探伤检测结果

编号	UT探伤（72h）	UT检测方式	
	缺陷深度/mm	D扫查	E扫查
T1	13~35	5处横向缺陷	无缺陷
T2	16~34	5处横向缺陷	无缺陷
T3	7~28	2处横向缺陷	无缺陷
T4	无缺陷	无缺陷	无缺陷
T5	无缺陷	无缺陷	无缺陷
T6	无缺陷	无缺陷	无缺陷

注：UT探伤1处缺陷表示1个缺陷区域。



图4 返修焊焊缝成形

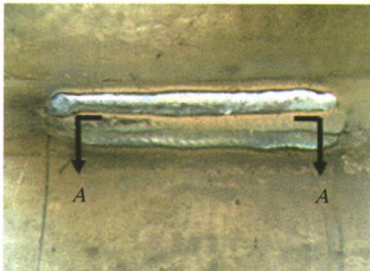


图5 沿焊缝中心A-A切割取样

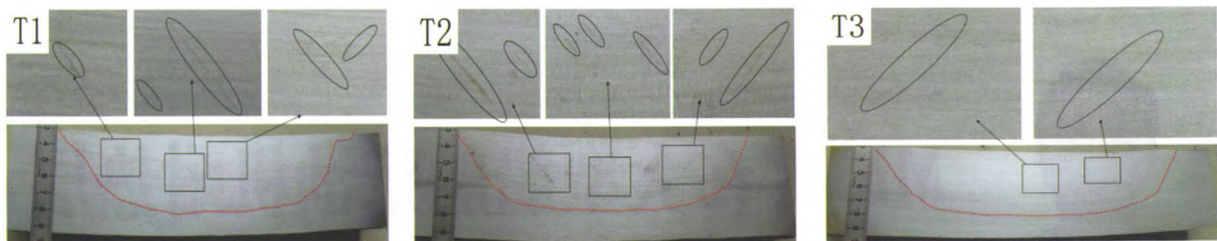


图6 焊缝纵向宏观断面及裂纹形貌

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