



核电站主蒸汽管道窄间隙自动焊工艺研究

冯英超

【摘要】 本文通过开展主蒸汽管道窄间隙自动焊工艺试验，开发了自动焊接的工艺参数，掌握了主蒸汽管道自动焊的变形规律，并通过对自动焊与手工焊对比分析及焊接接头性能分析，证明了主蒸汽管道窄间隙自动焊工艺的可行性，且具有显著优势。

关键词： 主蒸汽管道；窄间隙；自动焊；工艺；焊接接头性能

1. 概述

目前，核电站主蒸汽管道安装焊接主要以焊条电弧焊进行，由于主蒸汽管道具有管径粗、管壁厚特点，焊接前还需进行热处理，所以施工时存在工作量大、施工难度大、焊接环境恶劣和质量要求高等问题。而窄间隙自动焊不仅可大幅度地减少坡口横截面积和焊接金属的填充量，而且在适中的焊接热输入的条件下，可以实现高效化焊接。

今后还拟将该技术推广应用到核电站主蒸汽和主给水管道的预制和安装、非核工程厚壁管道预制和现场安装等领域中。

2. 焊接工艺设计及试验过程描述

选用加拿大LIBURDI GT VI自动焊焊机，焊材采用的是ER80S-B2。再根据LIBURDI设备，选用5 kg盘装焊丝($\phi 0.9\text{mm}$)。焊材复验后，其熔敷金属的力学性能试验等各项

数据都满足AFG-VW40-Z0-043和ASME 2007的相关要求。坡口形式最终选用U形坡口，如图1所示。

在焊接过程中，焊接参数之间正确的匹配是保证焊缝质量的关键因素。焊接参数脉冲电流、电压、送丝速度、机头行走速度等之间的匹配关系，将直接影响到焊缝的外观成形和内在质量。

在蒸汽管道窄间隙自动焊工艺试验过程中，应始终保持预热温度($120\sim 160^\circ\text{C}$)，并进行实时监督，先对一些影响较小或不用经常调节的参数进行选择 and 固化，如起弧时间、预热时间、峰值时间、基值时间、预热电流、提前送气时间和滞后送气时间等。最后对影响较大且不易调节的参数进行选择和调节，如焊接电流、电压等。

每焊完一道，对 0° 、 90° 、 180° 、 270° 位置的焊缝进行一次数据测量，包括温度、

焊缝剩余深度和收缩量等，而且焊后还需要进行热处理。如果出现焊缝侧壁熔合不良、焊缝成形不美观或焊缝剩余深度不一致等情况，选取对应规定的工艺参数对焊缝进行再熔合，是否使用填充材料则视情况而定。

3. 焊接工艺开发难点及解决措施

(1) 两侧熔合不良 出现两壁熔合不良的原因主要是焊接参数（关键是电流）与焊缝不能实现良好的匹配：即熔池成形不良，从而使得焊缝（关键是侧壁）存在未熔合的风险。对此需要重点注意以下几个方面：①焊缝根部的宽度是选用焊接参数的关键，所以在根部宽度的测量上

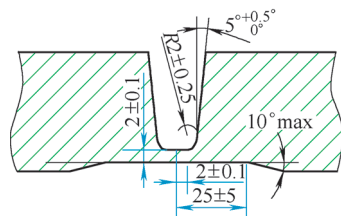


图1 U形坡口

要严格、细心。②如果根部宽度数值没有在一个参数级别上时(1个参数级别是指6.0~7.0mm、7.0~8.0mm),需要慎重的选择、设定参数:一般选择较大工艺参数的下限。③针对管道温度较低的情况,焊接参数的选择、设置也较为关键:一般要选择焊接参数的上限。

(2) 气孔 焊接过程中出现气孔是最为普遍的,探究其产生原因,主要受以下几个方面的因素影响:正面保护气体流量的设置、焊机气路密封性、焊接过程控制、环境因素、人为因素等:

①气体流量的设置:由于气体流量对熔池的成形及周围气体的流动都有较大的影响,所以在焊接过程中,要严格采用工艺指导书所规定的气体流量范围,不许有较大的变动。气体流量偏小时,在下坡位置容易保护不良;若气体流量过大,容易在爬坡位置易出现过火保护。②焊机气路密封性:焊接过程当中,气体要从氩气罐里面出来,经由氩气表、气管、焊机、氩气带等送至焊枪,所以气路密封性是否良好对于焊接质量存在较大的影响,为此焊接前要进行预送气并用肥皂水检测气体接头。③焊接过程控制:焊接过程当中除了氩气罩高度和钨极端部尺寸,熔池缺陷的及时控制及清理也是很重要的。焊接时,氩气罩要尽量贴近坡口端部,钨极尺寸要尽量靠拢标准数值且在焊接过程中要密切关注其变化,焊缝表面缺陷要及时、全面的进行清理。环境因素影响:焊接时,周围的空气流动也会对焊接质量形成一定的影响,且是

气孔形成的主要因素之一,在焊接过程当中要尽量对焊缝周围实行密闭,减少空气的流动;同时对焊接施工人员的走动要进行严格的控制。

(3) 沾钨 焊接过程当中会经常出现沾钨现象,沾钨对于焊接的影响比较麻烦,要采取措施对沾钨进行预防:①弧压的控制:弧压要尽量贴近于设置值,当输机数值与设置数值不一致时,要尽量通过调节的方式给予更正。②弧压的调节:5GT位置焊接时,270°附近是焊接过程中最容易沾钨的区域,由于此位置熔池拉伸的最长、弧压最容易跟踪不稳的区域,所以要密切关注此区域附近熔池的成形,可以适当提高弧压,以避免沾钨。③焊枪偏转角度的控制:焊枪偏转角度关键是相对于焊丝的偏转,其角度为0~3°(偏离焊丝方向)。

(4) 打底焊缝背部发渣问题 在一些管道的打底焊接中,往往会出现背面发黑甚至发渣的现象,这一现象通常出现在点固棒处。主要原因是打底焊接至点固棒处需要熄弧并进行打磨。此时,为了节省气体考虑,操作人员往往将会把背面氩气流量调小,然后用角磨机打磨点固棒,打磨过程中将会有空气进入,打磨完成后,将背面氩气流量开大,未经背面保护腔内空气排尽,就起弧焊接,造成背面保护不良,形成发渣现象。

预控办法:打底焊接过程中需要进行打磨处理的,不要减小背氩流量,且在打磨完成后,尽量多充3min左右的氩气。

4. 焊接接头性能分析

(1) 金相检测 宏观金相检测:试样数量1件,按GB/T226—1991的规定进行酸蚀。将酸蚀后的试样放在4~10倍放大率的放大镜下观察,经检测得出的结论完全符合要求:焊接区域无裂纹、未焊透、气孔、夹渣、未熔合等低倍缺陷,焊缝宏观金相如图2所示。

微观金相检测:试样数量1件,按B/T13298—1991的规定进行酸蚀。在200倍放大率的显微镜下,观察焊缝根部区域、熔敷金属中心区域、熔合线区域、宏观检测显示的可疑区,保证无显微裂纹和影响接头性能的沉淀物。

图3分别为放大200倍的焊缝组织照片,熔合线附近组织照片和热影响区组织照片,由此得出试验结论:焊缝与母材熔合良好,未见显微裂纹及异常组织。

(2) 力学性能试验 首先,横向拉伸试验。焊缝横向拉伸试验取4个试样宽度31mm,厚度25mm,在23℃下进行,其拉伸强度均在575MPa左右,高于相关标准的要求值415MPa,全部满足设计文件的要求;且拉伸试样的断裂位置均在母材,说明焊缝强度高于母材。表1为焊缝横向拉伸试验结果。



图2 焊缝宏观金相

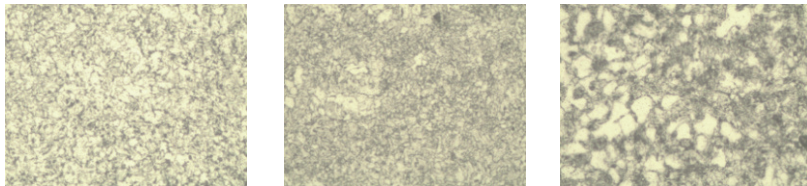


图3 放大200倍的焊缝组织

其次，弯曲试验：弯曲试验是用于测定焊缝接头的完好性和延展性。按照ASME2007版第IX卷QW-160的规定进行弯曲试验，该试验压头尺寸为40mm，弯曲角度为180°，试验温度为24℃。试验结果四个试样均符合要求，无裂纹产生，说明焊缝表面和根部的塑性良好。表2为焊缝弯曲试验结果。

（3）冲击试验 按照ASME2007版第IX卷QW-170的规定开展试验。冲击试验在0℃的条件下进行，在热影响区和焊缝中心处共完成了2组试验，每组取三个试样，试样采用夏比V型缺口，规格为55mm×10mm×10mm。表3为冲击试验结果。

以往的拉伸试验易断于热影响区，这是因为焊接是一个快速加热和冷却的过程，焊接接头在焊接过程中受热不均匀，导致组织粗化，性能不均匀明显。从试验结果中可以看出，拉伸试样的冲击吸收能量最小值均大于相关标准要求值68J，证明焊接接头组织性能良好。由此可见，在该工艺下，可获得综合焊接接头性能优越的焊接接头。

（3）熔敷金属化学成分分析 熔敷金属的力学性能主要取决于微观组织，而熔敷金属组织则由焊丝的化学成分和冷却速度决定。按照GB/T4336—2002

的规定进行，表4为试验分析数据，化学成分试验结果满足技术文件的要求。

5. 结语

通过开展主蒸汽管道窄间隙

自动焊接试验，开发了自动焊接参数，掌握了主蒸汽管道自动焊的变形规律。

主蒸汽管道窄间隙自动焊与核电站建造中传统的手工焊接技术相比，具有焊接过程稳定，可控性强、焊接质量高的显著优点。不仅能够明显缩短焊接工期，提高工程安装效率，降低焊材消耗，而且大幅降低了焊工劳动强度和改善作业环境，优势明显。

表1 焊缝横向拉伸试验结果

试样编号	温度 /℃	宽度 /mm	厚度 /mm	拉伸强度/MPa		破断位置
				要求值	试验值	
01-TT1	23	31	25	415	572	母材
01-TT2					572	母材
01-TT3					575	母材
01-TT4					577	母材

表2 焊缝弯曲试验结果

试样编号	温度/℃	压头直径/mm	弯曲角（°）	检查情况	结论
02-CW1	24	40	侧弯180	未见缺陷	合格
02-CW2				未见缺陷	合格
02-CW3				未见缺陷	合格
02-CW4				未见缺陷	合格

表3 焊接接头冲击试验结果

试样编号	CJ16	CJ17	CJ18	CJ19	CJ20	CJ21
取样位置	热影响区			焊缝		
冲击吸收能量/J	290	290	162	249	294	253
侧向膨胀量/J	2.4	2.5	1.9	2.0	2.1	1.8
	6	2	0	8	4	2
备注	未折断	未折断	折断	折断	折断	折断

表4 焊缝熔敷金属化学成分分析试验数据

分析结果（质量分数，%）							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Ti
0.12	0.67	0.51	0.008	0.002	1.20	0.10	0.004
Mo	Cu	Nb	Co	Al	Zr	V	N+Co+Nb
0.51	0.12	0.003	0.012	0.01	0.003	0.005	0.0151

作者简介：冯英超，核工业工程研究设计有限公司。

MW 20170824