

反应堆压力容器贯穿件管座焊接技术及工艺优化

中广核工程有限公司 (广东深圳 518124) 杨志鹏 吴义党 刘鸣宇

【摘要】基于反应堆压力容器(简称RPV)贯穿件管座焊缝的重要性,阐述了镍基合金INCONEL690的组织特性、焊接特点及焊缝质量影响因素,论述了国外某制造商管座焊缝的相关焊接工艺要点。分析了现阶段国内外制造商为保证贯穿件管座焊缝质量所采取的主要工艺措施及其合理性,并提出了改善管座焊接质量和防变形的措施,可为国内设计院、制造商优化焊接技术要求和焊接工艺提供参考。

1. 概述

反应堆压力容器贯穿件管座包括顶盖控制棒驱动机构(CRDM)管座、热电偶管座、排气管管座和下封头中子测量管管座,该焊缝为镍基合金和低合金钢的异种钢焊接接头,属于冷却剂压力边界,与RPV的运行寿命和核安全息息相关。近年来管座镍基合金母材和焊材的焊接性能及质量逐步提高,但国内制造商仍然面临优化焊接工艺及措施、确保该镍基合金角焊缝质量的任务,相关设计院也需要提出更先进的焊接技术条件来保证制造产品的质量。

2. 镍基合金INCONEL690的组织及焊接特性

INCONEL690是一种高镍基合金,由于在各种高温水中表现出很低的腐蚀率和优良的抗应力腐蚀裂纹的性能,还具有高强度、良好的冶金稳定性和加工特性,所以在压水堆核岛主设备中得到广泛应用。该镍基合金为单相奥氏体组织,在基体晶粒内或晶界处分布有碳化物M₂₃C₆颗粒(富Cr碳化物),其主要化学成分如表1所示。

表1 INCONEL690合金化学成分(质量分数)(%)

C	Mn	Si	Ti	S	P	Ni	Cr	Fe
0.014							28	7.00
~	≤0.15	≤0.50	≤0.50	≤0.01	≤0.015	≥58	~	~
0.04							31	11.00

INCONEL690焊条电弧焊形成焊缝的组织为单相奥氏体,隔离层组织为细长柱状晶,方向垂直于熔合线,焊缝区为树枝状晶。由于焊接是一个复杂而又不平衡的熔化结晶过程,镍基合金焊缝中会出现母材中没有的脆性金属间化合物TCP相,如s相、Laves相,这些脆性相会对焊缝金属的力学性能和抗腐蚀性能产生不利影响,并使焊缝热裂纹敏感性增加。

3. RPV贯穿件管座的焊接

由于RPV顶盖或下封头为球面结构,管座焊接要避免焊缝中出现裂纹,防止造成泄漏事故;另外,还应当控制焊接变形,保持控制棒能灵活地提升和下降,因此制定先进科学的镍基合金焊接工艺是解决上述问题的关键。由于管座焊接的共性,下面以国外某制造商CRDM管座焊接工艺为例,论述RPV管座焊接工艺特点。

(1) 贯穿件管座焊缝J形坡口隔离层堆焊 在实施镍基角焊缝焊接前,先在J形坡口上手工堆焊镍基隔离层,如图1所示,并分以下三个阶段实施。

第一,将RPV顶盖调整到合适的堆焊工位(大型变位器),执行J形坡口边缘的不锈钢堆焊(序号①),依次在每一个J形坡口外圆界线上堆焊3圈

本文获得“中国安装协会焊接专业委员会2012年年会暨焊接标准及先进焊接技术研讨会”论文大赛三等奖。

临时焊道。堆焊时调整变位器,将待焊接孔布置到水平位置,实施手工堆焊。

第二,采用专用加工作业对RPV的顶盖进行预热,执行序号②的堆焊,保证最小厚度4mm,堆焊完成后立即进炉消除应力热处理。为了保证从堆焊工位到热处理炉转运过程中,工件温度不低于预热温度,在转运工作开始前,需要把工件加热至220℃左右,热处理炉烘炉至330℃。

第三,热处理后对隔离层进行100%PT,然后执行序号③堆焊,保证最小厚度8mm。焊接完成后进炉消除应力热处理(转运保温要求与第二阶段相同)。

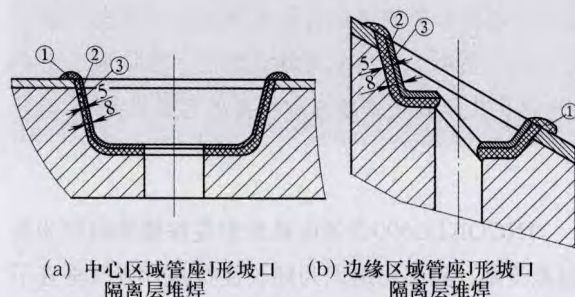


图1 J形坡口隔离层的堆焊

经过工艺评定验证的隔离层焊接参数如表2所示,管座焊缝J形坡口隔离层堆焊应严格按焊接参数要求执行。

表2 隔离层焊接参数

焊序	焊材型号	焊条直径/mm	焊接电流/A	预热/层温/后热
①	E308L	3.2	80~125	无预热及后热,层间温度<250℃
		4	105~165	
②~③	INCONEL152	2.5	40~75	最小预热温度150℃,最高层温为225℃,无后热,直接执行消应力热处理
		3.2	65~110	
		4	85~140	

表3 角焊缝焊接参数

焊序	焊材型号	焊条直径/mm	焊接电流/A	预热/层温/后热
①	INCONEL152	2.5	55~70	预热,层间温度<250℃,不执行消应力热处理
②	INCONEL152	2.5	45~70	
		3.2	75~100	
		4	95~130	

经过焊接工艺评定并考虑工程经验所确定的指导焊接操作的参数,严格执行后可确保获得合格表面质量和内部组织的焊缝。

4. 贯穿件管座焊接工艺措施

(1) 不锈钢焊道 国外某制造商在管座J形坡口隔离层堆焊前,在J形坡口外圆界线上焊接临时焊道,避免出现不锈钢堆焊层308L上堆焊镍基合金的

(2) 镍基角焊缝的焊接 完成隔离层堆焊并加工到图样要求的坡口尺寸后,装配贯穿件管座(液氮冷装),然后进行CRDM管座镍基角焊缝的焊条电弧焊,如图2所示,焊接分为以下两个阶段。

第一,序号①为根部焊道的焊接,通常采用 $\phi 2.5\text{mm}$ 的焊条,焊接过程中需要每三层进行一次PT检测,焊接完成后还要对焊缝表面进行PT检测。

第二,完成根部焊后,进行其余层的焊接(序号②),对于与管座接触的焊道采用 $\phi 2.5\text{mm}$ 焊条,其余可按工艺评定采用其他直径的焊条。多道焊从管座根部向外进行焊接,使焊道自由收缩,降低残余应力水平;底部焊道应对称焊接,使高低处应力分布均匀。

表3列出CRDM管座角焊缝的主要焊接参数,供参考。

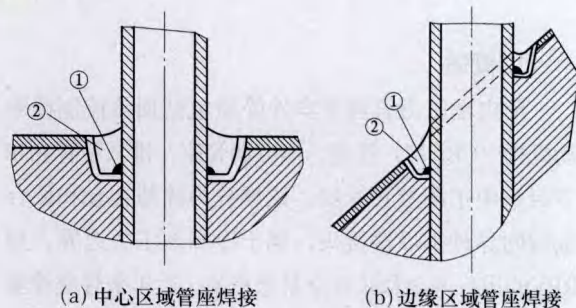


图2 角焊缝的焊接

情况(避免镍基焊材向不锈钢308L堆焊层过渡合金成分),完成管座焊接后,打磨消除该临时焊道。而大部分国内制造商不采用该辅助工艺措施。

(2) 隔离层堆焊时的预热、后热、消除应力热处理 首层隔离层堆焊时,国内部分制造商执行预热操作,完成后直接进炉消应力热处理,而隔离层、其他层则采用冷焊工艺,仅要求保持一定的层

间温度，隔离层堆焊完成后进炉消除应力热处理。而国外制造商的工艺则要求隔离层堆焊全过程进行预热，并且保持高于预热温度的层间温度（例如，150~220℃），焊接完成后执行后热，之后再行消除应力热处理。

(3) 水冷工装的使用 相关文献表明,提高冷却速度有利于组织的细化,一定程度上有利于热裂纹敏感性的降低。此外,熔池尾部焊缝金属局部快冷可有效减少焊接热裂纹,对减少应力和变形也有好处;熔池两侧基体金属强冷可减少产生焊接裂纹的应力和变形,并能阻止近缝区晶粒长大和脆性断裂。

目前,国内部分制造商已经尝试采用优化冷却速度的水冷装备(如通过管座内部通入循环水的水冷工装来加快冷却速度),以期通过提高焊缝冷却速度来改善焊缝金属组织,从而降低镍基合金焊缝热裂纹的产生几率。与之相比,国外制造商往往通过严格控制热输入量、合理布置焊道等措施来避免产生超标热裂纹。

(4) 镍基角焊缝热处理工艺 考虑镍基合金的焊接特性和敏化温度范围(碳化物析出), 通常不对镍基角焊缝进行消应力热处理。但也有例外, 国外某制造商依据其工程经验, 就专门针对下底圆中子测量管座角焊缝进行了约1h的消应力热处理(595~620℃)。

(5) 防变形工装的使用 管座与封头焊接后的平行度及位置度要求非常严格(尤其是CRDM管座), 防变形工艺是需要重点关注的质量影响因素。

例如,使用专用工装(见图2)固定管座,并采取对称焊接,以及控制热输入量等辅助措施,最终达到防变形的目的,但这种工艺的局限性在于焊接残余应力较大。而国外某制造商采用的防变形措施包括:①采用小直径焊条及小热输入和小截面焊道,降低热输入。②采用合理的焊接顺序,底部焊道对称焊接,多道焊从管座根部向外进行焊接,使焊道自由收缩,残余应力降低到最低限度。③局部变形较大时,采用专用工具轻轻敲击后调整施焊顺序和位置。

5. 结语

通过论述国外制造商所采用的贯穿件管座焊接工艺,比较分析国内外保证镍基角焊缝质量的工艺

措施的特点可以看出,以下的工艺措施可以改善其焊缝的质量。

(1) 贯穿件管座J形坡口堆焊辅助不锈钢焊道, 有利于控制异种钢交界处的合金元素含量的稳定性, 从而保证异种钢交界部位熔敷金属的质量。

(2) 参考某工程项目RPV接管堆焊出现的问题,针对待堆焊区域结构复杂、应力较大的特点,建议隔离层的焊接全部采取预热方式,如果条件允许,不进行后热,而是直接保温进炉进行消除应力热处理。

(3) 建议在管座与封头的角焊缝时采用相关冷却工装, 以提高焊后冷却速度。

(4) 借鉴国内已经积累的工程经验和试验分析,多数设计院和制造商倾向于最终热处理后再进行镍基角焊缝的焊接。

(5) 从业主方规避运行时管座焊缝热裂纹扩展甚至泄露风险的立场出发, 不建议采取强力措施 (如防变形工装) 来保证焊后的位置度和平行度, 应通过反复工艺试验制定可行的防变形工艺。

(6)从J形坡口设计方面优化贯穿件管座焊接工艺,例如AP1000的CRDM管座坡口角度早期为 15° ,优化后为 5° ,坡口根部的过渡区采用圆弧过渡。**MW** (20120820)

国内首台焊接机器人 能跑50m/min

与传统的激光焊接不同，它是“手臂”灵活的机器人，结合高性能的光纤激光器，激光束可以任意偏转，部件表面的任一位置都能方便加工。能跑50m/min，比普通设备快3倍，再复杂的角度也能焊接，定位精度可达0.02mm。这是华工科技展台推出的国内首台万瓦级三维远程激光焊接系统。

据了解，它焊一次奥迪Q5的门槛，只需要1min，而传统激光焊需3min左右。这台机器人价格约为600万元，不到国外同类产品价格的一半。目前，该设备已应用于奥迪Q5、A6等高端车型的制造中。

（中国机器人网）