



核电厂控制棒驱动机构管座法兰母材缺陷现场修复

胡付成

【摘要】 介绍了某核电项目反应堆压力容器（简称RPV）顶盖组件控制棒驱动管座与控制棒驱动机构（简称CRDM）耐压壳现场焊接后，在水压试验过程中，CRDM管座法兰母材出现渗漏事例，以及进行的原因分析、类似情况现有返修方案的可行性分析及最终修复方案的制定。

关键词： 控制棒驱动机构；水压试验；渗漏；母材；现场；修复

1. 概述

2013年5月，某核电机组RPV顶盖组件5号CRDM管座（坐标：G9）与CRDM耐压壳现场执行CANOPY焊缝焊接后，执行水压试验过程中，发现CRDM管座本体渗漏出水滴（未滴落），实际渗漏位置及渗漏情况如图1~图3所示。

经核查CRDM管座与耐压壳CANOPY焊缝焊接用设计文件，文件中未规定CRDM管座法兰母材的缺陷返修方法；经分析文件中规定的CRDM管座与耐压壳的焊接及焊缝补焊，不适用于CRDM管座母材的返修。

2. 控制棒驱动机构（CRDM）介绍

控制棒驱动机构是反应堆的重要动作部件，通过它的动作带动控制棒组件在堆芯内部进行上下抽插，以实现反应堆的启动、功率调节、停堆及事故工况下的安全控制。CRDM管座与耐压壳



图 1



图 2

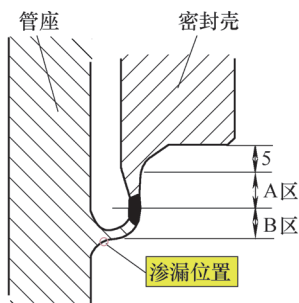


图 3

注：A区：焊缝中心线以上至距耐压壳台肩平面5mm以下的区域
B区：焊缝中心线以下到管边缘的连接区

之间的CANOPY焊缝是构成核岛一回路压力边界的重要组成部分，承担着放射物质屏蔽的安全防护功能。由于该焊缝的焊接不仅是反应堆本体在现场安装过程中的关键工序，也处于核岛设备安装的关键路径上，所以CRDM管座法兰母材渗漏缺陷的返修直接决定着该核电项目后续建设的进度、成本和风险控制。

3. 修复方案的研究

（1）按照现有技术文件要求开展返修的可行性研究 第一，CRDM管座法兰不锈钢材料技术要求。水压试验时驱动管座本体出现渗漏的材料为Z2CN19-10（控氮）不锈钢锻件，设计方编制的《反应堆压力容器CRDM/TC管座法兰不锈钢材料技术要求》中，无锻件返修方面的规定。

第二，CRDM管座与耐压壳CANOPY焊缝焊接用焊接技术文件只规定了CRDM管座与耐压

壳的焊接及焊缝补焊,不适用于CRDM管座母材的返修。

因此,现有技术文件针对CRDM管座法兰母材返修无可供参考的相关规定。

(2) 将CRDM管座法兰整体更换的可行性研究 CRDM管座为镍基合金贯穿件与不锈钢法兰焊接而成,焊前均留有一定加工余量,焊接后通过整体精加工保证图样要求的尺寸公差。同时,CRDM管座与顶盖组件焊接后要求与密封面的垂直度公差为0.08mm/1m,如在贯穿件与法兰焊缝处进行切割更换法兰段,在现场重新焊接后将无法保证相关尺寸公差与几何公差,最终将影响控制棒驱动机构的正常运行。

通过以上分析得出,在安装现场如通过整体更换CRDM管座法兰的方式解决出现的渗漏缺陷,将无法满设计文件的要求。

(3) 国内外类似缺陷修复方法的调研 经调查,当时国内外尚无针对CRDM管座法兰母材缺陷返修的案例。针对邻近区域CRDM管座法兰与耐压壳组焊缝(CANOPY焊缝)部位的缺陷,美国在役电站、我国的岭澳一期和秦山核电站采用了整体堆敷(OVERLAY)的方法;在法国在役电厂PALUEL 3、GOLFECH 1、BUGEY 5等,采用过局部挖补的方法,两种方法各有优劣。

第一,整体堆敷(OVERLAY)方案:方案是在CANOPY焊缝区域焊后的原始状态下,不进行缺陷的预处理(如缺陷清除),直接采用自动焊对

焊缝区域进行整体堆焊,堆焊形成3mm以上的镍基合金覆盖层。在役运行的反应堆压力容器因受空间和辐射防护的限制,一般采用该方法对CANOPY焊缝区域进行修复,目前美国WSI已掌握该技术。

该方案的优点:①采用自动焊设备实施堆焊,设备可达性范围广,不会因空间限制而使部分管座无法进行焊接。②因整体进行堆焊,无需进行原母材或焊缝缺陷的分析和处理工作。③该方案在美国在役运行设备有应用业绩,在我国的岭澳一期和秦山核电站也有应用业绩。

该方案的缺点:①返修过程中无法清除缺陷,缺陷风险仍然存在,后续需对缺陷继续进行跟踪和检测,但实施困难。②整体堆焊后CANOPY焊缝部位加厚,降低膨胀功能,可能造成螺纹咬死。③焊接量较大,焊接缺陷产生的几率增加,焊接缺陷难以避免,且焊接缺陷产生后无法检测和消除,造成新的质量和安全隐患。④因CANOPY焊缝部位金属厚度较薄,仅为2mm,焊接过程中无法对受热影响的背面金属进行气体保护。

第二,局部补焊方案:该方案是对缺陷区域进行探伤检查,确定缺陷的具体形状、大小及走向,并将缺陷全部清除,缺陷清除后通过补焊的方式将缺陷清除区域修复至原尺寸状态。尚未运行的机组,且缺陷位置属于手工焊可达区域,可采用该方法进行修复。

该方案的优点:①缺陷可以完全清除:打磨去除缺陷的过

程,可以比较准确的确定缺陷(泄漏毛细通道)的走向,如果缺陷全部在焊唇部位,可以把缺陷全部去除。②焊接量小,操作过程简单且能够保证焊接质量。③补焊后不影响CANOPY焊缝的整体使用功能。④在焊接过程中,可以实现CANOPY焊缝金属的背面气体保护。

该方案的缺点:①应用案例相对较少,无成熟经验可借鉴。②对焊工自身技能要求高,对施焊者的依赖性高,质量风险较大。

总体结论:两种方法各有优缺点,就某核电机组顶盖组件5号管座缺陷的具体情况而言,采用局部补焊方法进行处理的可实施性更强,也更利于电站后续的正常运营。

4. 修复方案的制定

(1) 确定补焊修复的理论基础 根据欧标EN 10222-1(1998)用于压力目的的钢锻件第1部分:自由锻的锻件一般要求,此标准适用于EN 10222-5(2000)用于压力目的的钢锻件第5部分:奥氏体及奥氏体-铁素体不锈钢,EN 10222-1(1998)锻件一般要求8.2段落中8.2.2(表面缺陷的去除)规定:表面缺陷可通过磨削或打磨的方式去除,剩余厚度应满足厚度公差要求,且产生的压力不致引起表面的咬边。若剩余厚度不满足最小厚度要求,报采购方同意后方可进行修补。8.2.3中规定:若焊接修补缺陷采购方同意后,应通过磨削或打磨的方式去除较大区域,进行焊接修补及平整,实施的焊接操作应满足EN 287-

1, EN288-1, EN288-2, EN288-3的要求。

鉴于当前阶段CRDM管座已经形成产品零件,对于部件,根据RCC-M S7610规范的规定是可以进行补焊。

同时, RCC-M标准与EN标准均属于法国标准, RCC-M标准大部分内容是参照EN标准进行编制, EN标准允许锻件(母材)补焊操作,可以推测RCC-M标准对于母材补焊应该是不禁止的。

(2) 确认实施补焊的客观条件 经现场实地查看缺陷(渗漏部位)的具体位置,发现缺陷位于5号管座CANOPY焊缝坡口R部, $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 方位区域内(面向6号管座,稍微偏向17号管座), 6号管座的上方有一处稍大的空间。当时附近的17号、33号等共计12支驱动管座没有装焊CRDM耐压壳,空间上满足手工焊可达区域,如图4、图5所示。

(3) 实施修复方案的必要前提 第一,查找母材渗漏的原因:事件发生后,根据事件现象进行的初步分析,认为渗漏的原因是材料的基体上存在毛细通道,毛细通道的产生存在六种可能途径,如图6所示:①基体中存在微裂纹在水压试验应力作用下扩

展而形成贯穿毛细通道。②基体中存在超大尺寸非金属夹杂物在水压试验应力作用下,夹杂物与基体之间产生微裂纹,进而扩展形成贯穿毛细通道。③基体中存在微小气孔,在水压试验应力作用下,气孔位置发生基体材料开裂,形成毛细通道。④基体中的奥氏体组织和铁素体组织,在水压试验应力作用下发生相对滑移开裂,在局部形成微裂纹毛细通道。⑤锻件内存在夹渣物,水压试验应力作用下发生夹渣物与基体材料的开裂,形成毛细通道。⑥上述潜在因素的综合影响(部分或全部的组合),在水压试验应力作用下,最终形成贯穿毛细通道。

第二,在G9管座渗漏部位缺陷的实际清除过程中,对缺陷

清除处进行了仔细观察并拍照,当清至0.5mm深时目视检查可见清晰的点状(针孔状)缺陷,后续每清除0.5mm深均进行仔细观察,每次目视检查均可见清晰的点状(针孔状)缺陷,缺陷处比较光滑且有氧化色,基本平行于母材轴线方向,缺陷性质初步判定为针状气孔。

通过以上过程的验证, G9号管座现场打压后渗漏的原因主要是由于锻件中微小气孔的存在,使材料基体内部形成毛细通道,该通道处于“CANOPY”焊缝的特殊位置,水压试验时,在一定压力作用下缺陷扩展,最终产生贯穿整个薄壁厚度的毛细通道。

(4) 制定补焊的方法和工艺 根据渗漏点在5号CRDM管座法兰上的具体位置,及5号



图 4

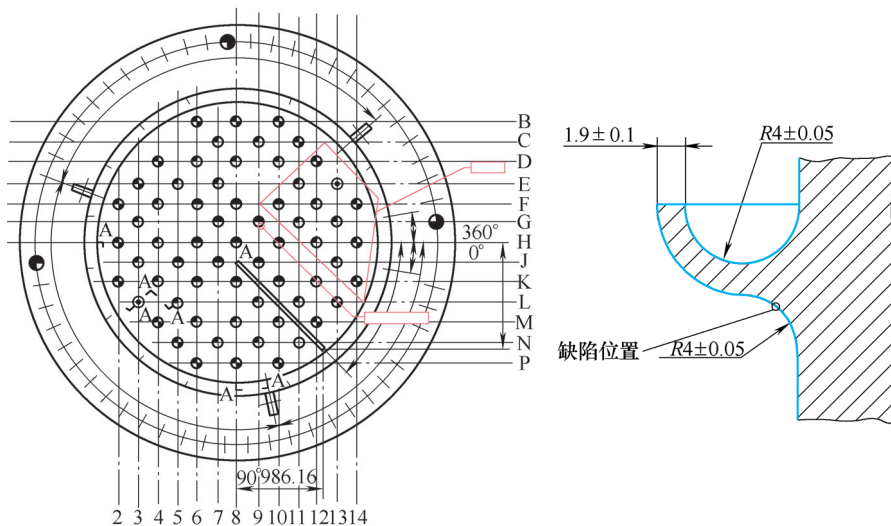


图 5

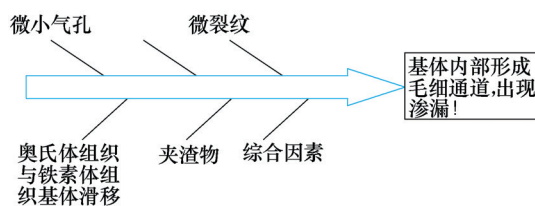


图 6

CRDM管座周边空间情况,属手工焊可达区域,可以采取手工钨极惰性气体保护焊(TIG)开展后续返修方法的制定工作。具体如下:

第一,按照RCC-M规范S7600中S7610规定:“所有补焊操作:在焊缝上、在产品上或零件上,所有补焊应满足与产品焊缝相同的各项要求。”和RCC-M S3520-CANOPY型和OMEGA型焊缝的相关要求,并结合RCC-M S3111“产品焊缝的补焊的规定:补焊所采用的焊接工艺必须按照S3110进行评定”,制定焊接工艺的评定方式和内容。

第二,开展同材质、同结构形式的模拟补焊试验:利用CRDM管座法兰端的余料,加工成与产品一致的结构形式,并模拟实体产品当前状态和周围空间位置情况,采用打磨方式去除假想缺陷,去除缺陷深度分为2mm、2.5mm、3mm、贯通四种情况,最大清除区域为 $\phi 6\text{mm}$;同时手工电钻钻出 $\leq \phi 3\text{mm}$ 排气孔。采用带氩气保护的手工TIG焊接工艺,使用ER308L焊丝进行模拟补焊试验。

补焊试验完成后,对补焊部位(含排气孔补焊部位)进行无损检测及破坏性检测。无损检测采用VT及PT,VT主要检查焊缝背面余高、焊缝与周边母材熔合情况,PT检测以所检区域无任何显示为验收标准。经过60余处挖补部位的补焊操作和验证,焊缝最终成形后背部余高不超过0.5mm,与周边母材过渡圆滑,如图7所示。

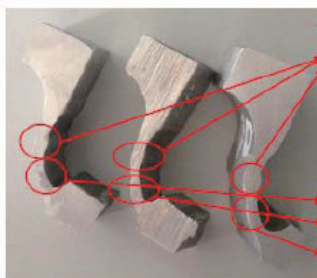
第三,进行焊接工艺的基础

评定:焊接工艺基础评定按照RCC-M S3000进行,仅评定方法,不考虑厚度覆盖范围,主要用于进行焊缝性能的验证工作。

基础工艺评定按照RCC-M S3300奥氏体和奥氏体-铁素体不锈钢的对接焊进行,选用与产品同牌号(Z2CN19-10(控氮)奥氏体不锈钢锻件)母材,厚度20mm,焊接方法采用手工TIG焊,焊材为瑞典Sandvik生产的19.9.XL $\phi 0.9\text{mm}$ 焊丝,保护气体采用99.99%的纯氩(Ar)气,焊接位置为横焊位。试件焊接完成后进行PT、RT检测及力学性能检测。



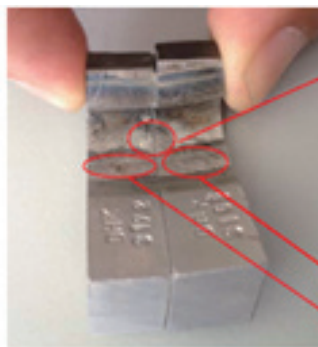
图 7



CRDM管座与
耐压壳自动焊
成形状态

CRDM管座母
材手工挖补焊
成形状态

图 8



CRDM管座母材
排气孔手工补
焊成形状态

CRDM管座耐压
壳自动焊成形
状态



图 9

对焊接件进行解剖并检测,各项性能和力学性能检测项目合格。同时从排气孔和挖补区域的补焊后的成形情况来看,内部余高较小且与周边母材过渡圆滑,如图8~图10所示。

第四,开展焊工资质考证:针对现场返修部位的实际情况,参照HAF603附件3特殊情况中的例3——特殊的密封焊缝的相关要求,专门进行了焊工考证工作,取得资质。证书编号:HYHK034-12,项目代号:HWS T GW VI 02 t2 D163.58 PC ss nb Z3,项目编号:HYHK034135。

(5) 缺陷返修的现场实施
由于该渗漏缺陷的手工清除和补焊工艺为世界首例,在完成国家核安全局(NNSA)委托的专业机构对返修资料提出的2批次43个问题单,共1700多页的汇报资料后,2013年9月12日NNSA同意该返修方案,2013年9月16日

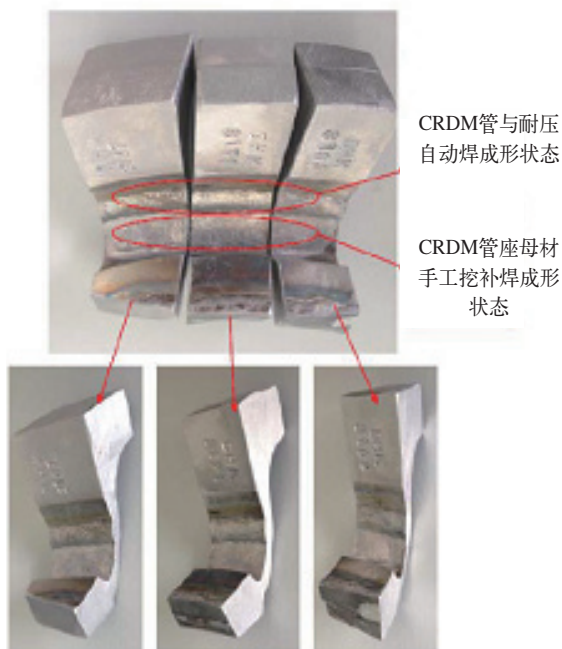


图 10

开始现场返修，2013年9月17日现场返修完成。

返修工程如下：

第一，缺陷清理：对渗漏区域重新进行PT检测，确认缺陷的具体位置，采用电动旋转锉清除缺陷，每清除0.5mm进行PT检测，在缺陷清除过程中发现缺陷方向一直没有变化；沿着缺陷走向清除缺陷至贯通。

第二，打磨排气孔：根据5号管座周边空间情况和临近管座的分布情况，在与缺陷夹角90°的焊缝部位使用电钻钻出 $\phi 3\text{mm}$ 的排气孔。在打磨或钻孔过程中，随时测量深度，在打磨或钻至1.7mm左右时，将磨屑或钻屑清理干净，采用凿穿的方式贯通，这样可避免最终磨屑或钻屑进入内部。排气孔钻通瞬间，缺陷部位有水喷出。

第三，加热干燥：采用履带式加热器对管座进行加热干燥处理，加热器采用数字显示温

控柜控制。工件外壁敷热电偶测温，控制加热温度 $\leq 170^\circ\text{C}$ ，干燥过程中通氩气辅助干燥。干燥处理2h后采用玻璃片放置在排气孔及缺陷清除部位进行检查，发现无任何水汽凝结。

第四，补焊前检查：①对缺陷清除打磨区域按照RCCM MC7100目视检查合格。②按照RCCM F6300标

准A1级检查A准则2进行清洁度检查合格。③打磨区域进行尺寸检查合格。④通过预置的排气孔进行内部充氩气保护，充气时间 $>120\text{min}$ 。

第五，手工TIG补焊：取证焊工参照模拟试验结果，按照评定合格的焊接工艺，采用手工TIG焊方法进行缺陷位置补焊，焊接位置为横焊位，分层焊满缺陷凹坑。焊接时注意与周边母材的熔合情况，无咬边、熔合不良等缺陷存在。每焊接一层后打磨去掉1/3焊道，PT探伤合格，直至焊满整个凹坑，焊后余高为1~2mm。焊接完成后采用TIG焊自熔并填充少量金属的方法将排气孔熔合。

CRDM管座法兰补焊完成后，焊接一个与产品相同结构形式、相同挖补深度的见证件，用于解剖后开展各项性能检测。

第六，补焊后检查：目视检测补焊部位（包括排气孔），无

咬边、外部余高正常。

采用电动旋转锉清除补焊表面余高，清除后焊道略高于母材表面0.2~0.3mm，采用金相砂纸去除剩余焊道余高，与周边母材圆滑过渡，以满足探伤要求。

对补焊部位（包括排气孔）及周边5mm范围进行100%PT检测，无任何缺陷显示，结果合格。

对返修后的CRDM管座法兰与耐压壳整体重新进行水压试验验证，水压试验合格。对补焊部位（包括排气孔补焊部位）及周边5mm范围内母材进行100%PT检测，无任何缺陷显示，结果合格。

5. 结语

后续核电项目现场安装阶段出现的类似缺陷，可参照本修复方案，结合现场CRDM管座与耐压壳完成焊接的整体情况和渗漏部位在CRDM管座的具体方位及周边空间情况，对修复方案进行适应性优化，以保证修复工作的实施效果。

对于后续项目CRDM管座原材料采购，建议重点关注原材料中的非金属夹杂物含量和晶粒度的控制，从源头上避免类似缺陷的出现。同时提高对母材的无损检测要求，如将原液体渗透检查的渗透时间由20min延长为120min，增加对缺陷的检测和识别能力，尽可能提前发现问题，尽早处理，尽量降低后期发现对核电项目现场安装调试阶段的不利影响。

作者简介：胡付成，中广核工程有限公司 MW 20160922