

文章编号 : 0258-0926(2016)05-0078-03; doi: 10.13832/j.jnpe.2016.05.0078

CRDM 管座垂直度变化与可更换性分析

陈海波, 罗 英, 王小彬, 付 强

中国核动力研究设计院核反应堆系统设计重点实验室, 成都, 610041

摘要: 针对现有成熟并广泛采用的控制棒驱动机构 (CRDM) 管座与反应堆压力容器封头连接结构形式及制造工艺, 分析反应堆压力容器水压试验后 CRDM 管座垂直度变大现象及管座受损后的可更换性问题, 基于影响 CRDM 管座垂直度变化及制约管座更换的关键因素, 对管座与封头连接结构进行设计改进, 改进后的连接结构可有效解决垂直度控制难题并降低管座更换难度。

关键词: CRDM 管座; 反应堆压力容器; 垂直度变化; 可更换性; 设计改进

中图分类号: TH49 **文献标志码:** A

Analysis of Uprightness Change and Replaceability of CRDM Nozzle

Chen Haibo, Luo Ying, Wang Xiaobin, Fu Qiang

Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610041, China

Abstract: Based on the design structure and manufacture procedure of the coupling structure of CRDM (Control Rod Drive Mechanism) nozzle to RPV (reactor pressure vessel) closure, which was widely used nowadays, this paper focused on the detailed analysis of nozzle uprightness change after RPV hydraulic pressure and the replaceability of damaged nozzle. Based on the main reasons of nozzle uprightness change and key factor to lower the replaceability of nozzle, an improved design of coupling structure was produced. It was shown that the improved coupling structure could ensure the nozzle uprightness and lower the difficulty to replace the nozzles.

Key words: CRDM nozzle, RPV, Uprightness change, Replaceability, Design improvement

0 引 言

控制棒驱动机构 (CRDM) 是反应堆控制系统和保护系统的执行机构, 通过它带动控制棒组件在堆芯内上下移动, 完成反应堆的启动、功率调节、功率维持、正常停堆和安全停堆。CRDM 管座是支承和固定 CRDM 的主要部件, 其精度、可靠性将直接影响驱动线能否正常执行功能, 因此对 CRDM 管座的形位公差的要求非常严格^[1]。同时, CRDM 管座是反应堆冷却剂压力边界的重要组成部分, 起着封闭放射性物质的屏障作用, 必须保证其结构完整性。一旦管座由于腐蚀或机械损伤等原因失去使用功能, 必须更换。

对大量 CRDM 管座形位公差的检测结果进行统计核查发现: 压力容器水压试验后, 管座相

对封头密封面的垂直度变大甚至超差^[1]。对运行电厂 CRDM 管座受损后处理情况调研发现: 管座替换均采取了更换封头的方式, 未见单独更换管座的案例。

本文对压力容器水压试验后 CRDM 管座垂直度变化原因和限制管座更换的瓶颈因素进行分析, 在此基础上对管座与封头连接结构进行设计改进, 以期解决管座垂直度控制难题, 并使得管座更换具备可行性。

1 CRDM 管座与封头连接结构

CRDM 管座采用焊缝连接的方式实现在反应堆压力容器封头上的固定和密封。CRDM 管座为镍基合金 NC30Fe, 与封头基体材料 16MND5 不

同,故需设置镍基窝预堆边,以避免与封头间的异种金属焊影响封头母材性能^[1],其详细结构如图 1 所示。该结构形式满足规范 RCC-M B3353.3^[2]“第 3 类连接:部分焊透焊缝的角焊接头及单条角焊缝的搭接连接”。

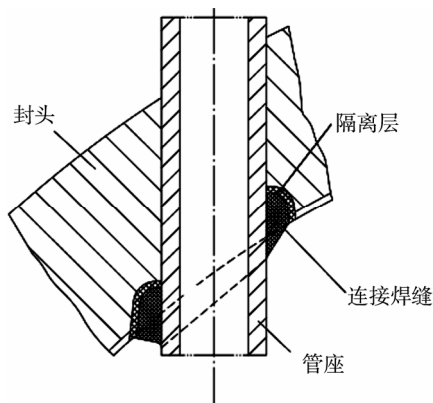


图 1 CRDM 管座与封头连接结构示意图

Fig. 1 Coupling Structure of CRDM Nozzle and Closure

该连接结构的制造步骤如下: 预加工管座管孔和 J 型坡口; 采用 ER Ni-Cr-Fe7 镍基焊丝在 J 型坡口上预堆一定厚度的隔离层; 隔离层经消除应力热处理后,将管座以过盈配合方式冷装到封头上; 用 Ni-Cr-Fe7 镍基焊条填充焊接坡口,焊缝在非预热条件下施焊,焊接后不进行热处理。

2 管座垂直度变化原因分析

CRDM 管座与封头连接焊缝除了密封作用外,还要承受工作介质压力施加给管座的轴向推力,要求该焊缝具有一定承载功能,因此该焊缝焊肉较多,加之坡口形状复杂,焊缝冷却收缩时形成的残余应力较大,有必要对残余应力状态及分布进行研究。通过建立三维热弹塑性有限元计算模型(图 2),并采用分段移动温度热源模型和热力耦合方法,逐道计算焊接应力,得到焊接残余应力场的分布,见图 3。

由图 3 可见,连接焊缝的 y 向(管座轴向)和 z 向(管座环向)应力为 100~400 MPa 的拉应力,且 z 向应力大于 y 向应力。国外 Brust 等人^[3]针对此类连接焊缝进行了应力分析,其计算结果同样表明此类连接焊缝存在较大的拉应力,其峰值甚至可能达到 700 MPa。

由图 1 可见,连接焊缝截面形状不对称,坡

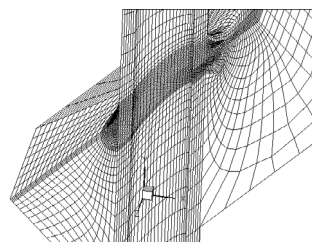


图 2 连接结构有限元模型

Fig. 2 Finite Element Model of Coupling Structure

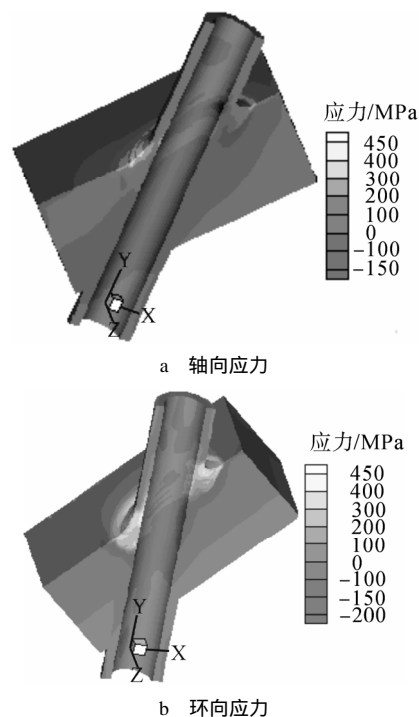


图 3 管座与封头连接焊缝应力分布

Fig. 3 Stress of Weld of CRDM Nozzle to Closure

口高处和低处焊缝在残余拉应力作用下形成偏转力矩,管座呈现向容器中心偏移的趋势。制造厂在焊接过程中采用通水冷却降低热输入量、强力刚性固定管座及控制焊接顺序等措施,能够保证焊接后管座的垂直度满足设计要求。压力容器水压试验过程中,连接焊缝的残余应力在内压作用下重新分布,导致管座偏移。水压试验结束后,管座无法完全恢复到水压试验前的竖直状态,即管座垂直度发生变化。

3 管座可更换性分析

当管座发生不可修复的损伤时,须进行管座更换。管座更换有 2 种方式:在封头上直接对损坏管座进行更换;对包含管座的封头进行整体更换。

由于反应堆长期运行后封头存在较强的感生

放射性，更换操作条件十分恶劣，因此要求更换操作复杂程度尽可能低，操作时间尽可能短，以降低操作人员的受照剂量。直接更换管座的关键步骤为去除及恢复管座与封头连接结构，因此其可实现性及难易程度主要取决于管座与封头连接结构的形式及复杂程度。

结合管座与封头连接结构的制造过程可知，进行管座更换，首先应去除大厚度、形状复杂的连接焊缝。连接焊缝去除时不得伤及隔离层。若隔离层损伤，需进行补焊，补焊后还需进行消除应力热处理（保温温度约 610℃），将使工件产生不可接受的变形。因此，现场修理条件下，去除连接焊缝的难度极大。此外，现场检修条件下，连接焊缝重新焊接过程难以采取制造阶段的防变形措施，管座垂直度较难保证。即便完成了焊缝焊接，在后续水压试验过程中，焊缝残余应力的重新分布仍有可能引起管座垂直度超差。

综上，由于 CRDM 管座与封头间的焊缝连接结构具有焊接坡口形状复杂、焊接量大的特点，导致焊缝的去处及重新焊接难度大、耗费的操作时间长，且更换后的管座垂直度较难保证，直接对管座进行更换的方案基本不具备可行性。

由此，尽管封头更换方案的经济代价及时间成本较大，还可能因封头与容器本体的对中性的变化而对驱动线的运行造成不利影响，但目前仍是唯一可行的更换方案。

4 改进后的连接结构

由前述分析可知，现有连接结构采用焊缝连接的结构特性带来了管座垂直度不易控制及难以更换的问题。因此，连接结构的改进思路是尽量减小焊接量及焊缝形状复杂程度。基于此，提出了“螺纹连接+密封焊”的新型连接结构。该结构详见图 4。

由图 4 可见，管座与封头新型连接结构由压套、防转销及密封堆焊层组成。压套安装于封头内表面管孔下端。压套与管座以螺纹相连接，以传递内压作用于管座的轴向推力。压套上端面与封头接触。为防止压套转动，压套下端与封头间设置防转销。压套下端覆盖密封堆焊层，以密封管座与封头。该密封堆焊层不承受轴向推力，仅起密封及耐蚀的作用，因此厚度需求较小。

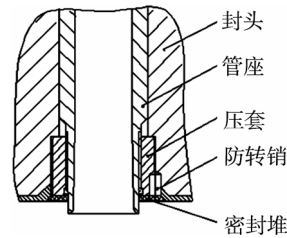


图 4 管座与封头新型连接结构示意图

Fig. 4 New Coupling Structure of CRDM Nozzle and Closure

与现有焊缝连接结构相比，改进后的连接结构不存在大厚度及形状复杂的焊缝，显著降低了连接结构中的残余应力，因此密封焊缝的焊接及水压试验均不会引发管座的垂直度发生明显偏差。由于密封堆焊层厚度小，形状规整，易于去除及重新堆焊，压套可借助常规操作工具较方便地旋出及重新安装，管座可利用液氮冷却取出或安装，可见采用“螺纹连接+密封焊”的新型连接结构可以较为便捷地实现管座更换。

5 结论

(1) CRDM 管座与封头传统连接结构采用焊缝连接方式，具有焊接坡口形状复杂、焊接量大的特点，焊缝存在较大的残余拉应力，导致压力容器水压试验后管座垂直度变化量较大。

(2) CRDM 管座与封头传统连接结构的焊缝去处及重新焊接难度大、耗费的操作时间长，且更换后的管座垂直度较难保证，导致运行后的管座更换基本不具备可行性。

(3) “螺纹连接+密封焊”的新型连接结构简化了焊缝形状，降低了焊接量，焊缝残余应力较小，可有效提高管座垂直度的控制精度，并显著降低管座更换难度。

参考文献：

- [1] 王小彬, 李玉光, 罗英, 等. 反应堆压力容器 CRDM 管座设计改进[J]. 核动力工程. 2015, 36(4): 103-106.
- [2] AFCEN, RCC-M. 压水堆核岛机械设备设计和建造规则 (2000 版+2002 补遗) [S]. 2002.
- [3] Brust F W, Zhang T, Shim D J, et al. Summary report on evaluation of fabrication related indications in reactor upper head penetrations to U.S. nuclear regulatory commission[R]. 2011.

(责任编辑：张祚豪)