

文章编号:1673-0062(2017)04-0041-06

EPR 核电堆芯仪表管嘴封头的 装拆工艺与密封试验

罗悻哲, 龚学余*

(南华大学 核科学技术学院, 湖南 衡阳 421001)

摘要:根据 EPR(欧洲压水堆)核电堆芯仪表管嘴封头的结构、功能及验收标准,结合台山核电一期工程建设经验,提出了堆芯仪表管嘴封头装拆工艺,详细阐述了装拆方法及注意事项,并进行密封试验和密封检验措施的有效性实验验证,最后进行试验位置、弹簧压缩量与允许压升数据统计及分析,并在台山核电站工程中进行了装拆工艺的验证。

关键词:EPR; 堆芯; 密封; 试验

中图分类号:TL351+.6 **文献标志码:**B

Assembly and Removal Technology Instrumentation Core Nozzle Closure and Sealing Test in EPR Nuclear Power

LUO Yi-zhe, GONG Xue-yu*

(School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: This thesis presents the assembly and removal technology of instrumentation core nozzle closure through the introduction of the structures, functions and acceptance criteria of instrumentation core nozzle closure in EPR (European pressurized water reactor) nuclear power plant and the construction experiences in Taishan Phase I. This thesis expounds the strict assembly and removal methods and precautions, states the tightness tests and verifies the validity via some measures. Finally, it analyzes the data statistics and test positions, spring compressing values and permissible raise pressure data, and verifies that assembly and removal technology is feasible and correct during Taishan nuclear power plant construction.

key words: EPR; instrumentation core; sealing; test

收稿日期:2017-12-15

作者简介:罗悻哲(1989-),男,硕士研究生,工程师,主要从事研究 CPR1000、EPR 堆型核电站建设技术支持及堆芯设备技术的研究,E-mail:593866880@qq.com.* 通讯作者:龚学余,E-mail:gongxueyu@126.com

0 引言

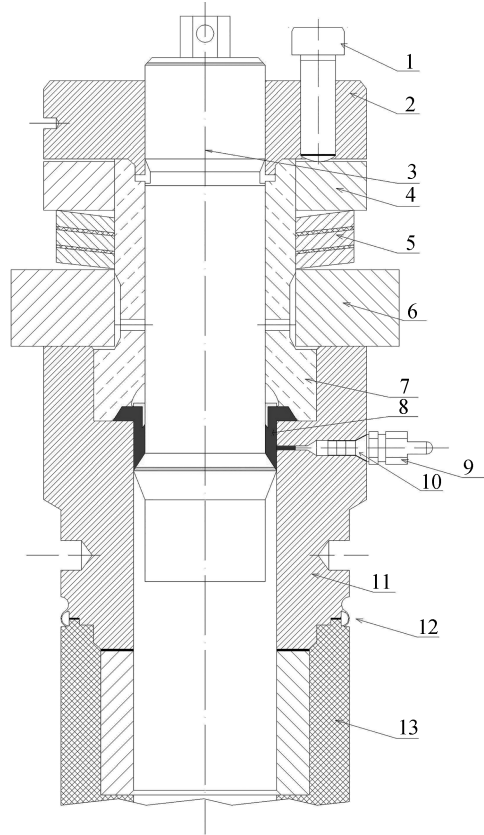
欧洲压水堆(European pressurized water reactor, EPR)属于世界第三代核电技术,采用先进的设计理念,核电站的总体安全水平相比于CPR1000(中国改进型压水堆)核电有了较大提高,其中设计寿命为60 a,单机容量达1 750 MW,其经济性得到充分提升^[1].

为适应世界核电的发展,满足用户的需求,对机械密封的密封性有了更高的要求,低泄漏、高寿命、高品质成为人类追求的宗旨^[2-3].EPR核电压力容器顶盖(以下简称“RPVH”)堆芯仪表管嘴封头(以下简称“管嘴封头”)的装拆与密封真空试验是EPR核电施工过程中关键、精密的施工项目,其密封性的要求严格,对管嘴封头密封的装拆有严格的限制,再加上利用其合理规范的装拆工艺,现场操作实用、简单,且能达到良好的预期密封效果.

管嘴封头密封是RPVH接管座堆芯仪表贯穿件与外界的接口模块,此密封一旦失效,会造成放射性物质泄漏及反应堆故障停运^[4].在功能试验前后,RPVH开、关盖前拆除管嘴封头,RPVH关盖后装配管嘴封头.如果操作人员操作正确,则达到密封的目的.如果操作人员操作不当,则存在一定的风险,可能引起一回路压力、介质泄漏,因此需要引起核电站操作、调试和维修人员的高度重视^[5].

1 管嘴封头及其位置分布

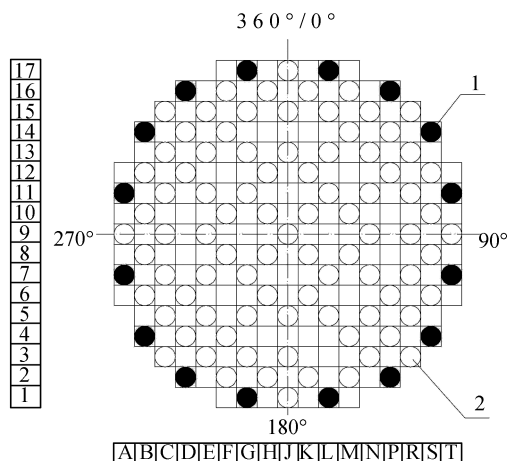
压力容器(以下简称“RPV”)是核电站燃料组件进行反应、贮存的场所,由筒体和半球部分组成^[6].RPV接管座是支撑和密封CRDM、仪表轴的重要部件,其要求直接影响驱动线、仪表是否正常运行^[7].管嘴封头设置在RPVH管嘴接管座上(图1、图2),是给堆芯仪表、RPV、仪表探测器提供防泄漏线路,是一回路压力边界;为保证密封性,要求各部件具有一定的精度、表面粗糙度和清洁度,且为保证管嘴封头单根更换,需要其部件具有良好的互换性^[8].



1—顶丝;2—压板;3—短轴或仪表轴;4—支撑板2;
5—弹簧;6—支撑板1;7—螺纹管嘴;8—密封圈;
9—RT接头螺母;10—RT接头;11—管嘴封头套管;
12—密封焊;13—管嘴接管座

图1 管嘴封头详图

Fig.1 Nozzle closure detail drawing



1—管嘴封头;2—CRDM

图2 分布图

Fig.2 Distribution diagram

2 装拆工艺与密封试验

装拆工艺中弹簧压缩量控制对其密封至关重要,且密封试验是证明装拆工艺有效性的一种方法^[9]。

管嘴套管外壁是能抵抗硬质表面磨损的结构,作为外部与管嘴封头之间的密封通道,以连接内密封圈上、下部的空间,并完成泄漏性试验。螺纹管嘴底部与管嘴套管之间压缩一个密封圈。其外侧使用支撑板做支撑并在上、下支撑板中嵌入弹簧。压板旋入的最终位置取决于短轴(或仪表轴)的内螺纹长度,通过使用 17 mm 内六角旋紧顶丝给支撑板施加一定的预紧力,过程中使用测量装置监测、控制弹簧压缩量,保证短轴(或仪表轴)有向上提升的趋势,起到对密封结构轴向定位的作用,其向上的压力使密封圈产生足够的弹性形变,使嵌入在管嘴封头套管与短轴(或仪表轴)之间的密封圈达到密封效果^[10]。而管嘴封头拆除是按照装配相反的方式,取出密封圈。

堆芯仪表管嘴封头密封试验是一种新型、高效的密封性试验,要求仪器具有高灵敏性和数据采集快、准等特点。为了解真空系统泄漏情况,及时排查系统泄漏点,以提高运行的经济、安全性,密封试验作为一项定期的工作,在检修后运行前进行一次,以检查系统密封性,保证核电站正常高效运行^[11]。

仪器的密封试验是指对仪器自身的密封性检测,称为仪器自检。仪器自检约 3~4 次后,直至数据稳定,再对管嘴封头进行密封试验。若试验不合

格,说明系统密封状态不可接受,需要检查各压力边界是否完整,检查无误继续启动密封试验^[12];核电站检修阶段进行密封试验时,辐射区域内高温、高压、高辐射剂量会对人员生命安全造成危害,为减少人员的辐射吸收剂量及排除接口位置密封泄漏问题,仪器自检前人员应处于非辐射区域内,对仪器和连接线路等接口位置进行检验漏点操作,确保各压力边界完整,才能提高处于辐射区域内试验运行的经济性^[13]。

3 数据统计及分析

试验测试条件需满足一级工作区要求,即工作区域内对气体进行清洁干燥,人员应穿着白色连体服、手套和鞋套工作;为更好的说明装拆工艺的有效性,首先明确、分析工艺——密封试验验收标准,然后对工艺主要参数——试验位置、试验阶段、 \bar{x} (弹簧平均压缩量)、 ΔP (允许压升)进行统计、分析,并得到相应的结论;主要统计参数见表 1、表 2。

表 1 试验参数值

符号	基本量	设计值
$P_{\text{test}}/\text{Pa}$	绝对测试压力	$\leq 1\ 000$
$V_{\text{test}}/\text{dm}^3$	测试体积(管嘴封头)	6.00×10^{-3}
$L/(\text{Pa} \cdot \text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	可接受泄漏率	0.1
t/s	测试时间	300
$\Delta P/\text{Pa}$	允许压升	≤ 300
V_{g}/dm^3	真空室容积	0.286
$V_{\text{line}}/\text{dm}^3$	连接线路的容积	约 0.102

表 2 \bar{x} 、 ΔP 数据值

Table 2 \bar{x} 、 ΔP data

位置	\bar{x}/mm			$\Delta P/\text{Pa}$		
	1#机组冷试前	2#机组冷试前	1#机组热试前	1#机组冷试前	2#机组冷试前	1#机组热试前
L17	0.98	0.98	1.00	83.4	166.9	261.6
P16	0.99	1.00	1.00	96.7	215.1	201.4
S14	0.96	1.00	0.99	100.4	231.4	223.2
T11	0.99	1.00	0.99	82.8	272.3	241.1
T7	0.97	0.99	—	90.2	174.7	—
S4	1.01	1.01	—	75.3	203.7	—
P2	0.99	0.99	—	76.3	177.2	—
L1	0.98	1.01	1.01	71.7	152.7	276.8
G1	1.01	1.00	0.98	99.5	196.1	210.4
D2	1.00	1.01	0.98	90.7	230.6	281.8
B4	1.00	1.02	1.01	87.5	225.3	239.8
A7	1.01	1.09	—	77.4	213.1	—

续表

位置	\bar{x}/mm			$\Delta P/\text{Pa}$		
	1#机组冷试前	2#机组冷试前	1#机组热试前	1#机组冷试前	2#机组冷试前	1#机组热试前
A11	1.01	1.01	—	90.6	187.4	—
B14	0.97	1.00	—	69.7	164.9	—
D16	0.98	0.99	—	100.6	200.4	—
G17	1.00	0.99	—	90.3	198.6	—

3.1 密封试验参数统计及分析

试验参数来自 AREVA (阿海珐) 设计文件, 为更好的说明试验参数和计算流程, 通过公式 $\Delta P = L \cdot t/V$ 推倒 ΔP 的数值与设计值不一致的问题, 进行了合理、有效的分析并提出工程验收标准。

泄漏率公式: $L = \Delta P \cdot V/t$, 转换得 $\Delta P = L \cdot t/V$, 其中 $V = V_{\text{test}} + V_{\text{line}} + V_g$, 经计算: V 约 0.394 dm^3 , ΔP 约 76 Pa , 与表 1 中 ΔP 最大值 300 Pa 不一致。

原因分析: 由于 L 是以测量管嘴封头中心为基准, 是作为系统设计的要求 (试验装置内部结构、试验方法的选定等) 决定 ΔP . 而 ΔP 是通过 L, V_{test} 和 t 来计算, 主要与 V_{test} 有关系, 在过程中除管嘴封头内的泄漏, 另外少数泄漏来自仪器及连接线路之间, 这取决于设计与不同密封测试状态下应考虑到密封性试验的评估因素之一 (室温、湿度等). 所以, 实际的 ΔP 以 “ 300 Pa + 试验仪器及连接线路的泄漏量” 为准, 且 L 只是设计要求, 并非安装标准, 现场应采用 ΔP 作为验收标准。

试验装置不能直接用于 ΔP 的测定, 而先对仪器与连接线路进行设备自身的密封性测试, 即仪器自检; “仪器自检过程中产生的压升值” 与 “对管嘴封头进行密封试验过程中仪器及连接线路产生的压升值” 可认为两者是相等的, 所以仪器自检产生的压升就是试验仪器及连接线路之间产生的压升, 也是试验仪器及连接线路的泄漏量; 此试验结果加上 300 Pa 得出 ΔP 标准; 而在测试中自检值相对于 300 Pa 较小, 所以以 300 Pa 为标准值, 更方便操作执行。

3.2 装拆工艺数据统计及分析

表 2 和图 3~图 6 数据来自台山核电一期工程冷态功能试验 (cold functional test/CFT) 及热态功能试验 (hot functional test/HFT); 表 2 统计了各试验阶段、试验位置、 \bar{x} 、 ΔP 数据值, 图 3~图 6 给出了 \bar{x} 、 ΔP 的柱形、点位分布. 试验共有 16 组试验位置, 试验阶段: 1#机组冷、热试和 2#机组冷试; 其中设计值 \bar{x} : $(1.0 \pm 0.1) \text{ mm}$, $\Delta P \leq 300 \text{ Pa}$; 由于 1#机组热试前进行水位测量、震动试验的影响, 此阶段只有 8 组试验数据。

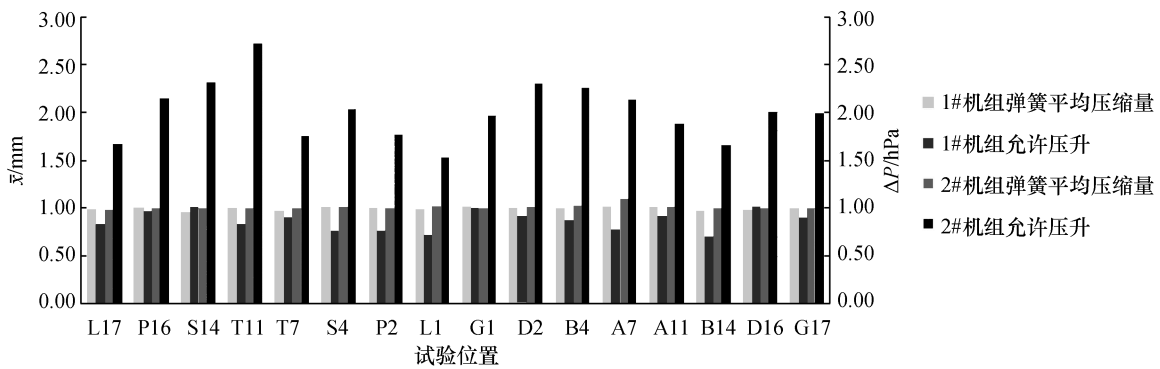


图 3 1#、2#机组冷试前 \bar{x} 、 ΔP 柱形分布

Fig.3 \bar{x} 、 ΔP column distribution before CFT in Unit 1 and 2

此工艺是使用顶丝对弹簧施加一定的作用力, 通过 \bar{x} 监测最终弹簧压缩量, 后续为验证此操作的有效性, 通过 ΔP 监测密封区域内的泄漏量, 最终在冷、热试中验证其密封性; 通过试验位置、

试验阶段、 \bar{x} 、 ΔP 之间的对比, 做出了以下结论:

- 1) 由表 2 可知, 1#、2#机组冷、热试 \bar{x} 、 ΔP 均在标准范围内;
- 2) 由表 2, 1#机组冷试前 \bar{x} 平均值: 0.99 mm ,

$\max(\bar{x}) = 1.01 \text{ mm}$ (S4、A7、A11), $\min(\bar{x}) = 0.96 \text{ mm}$ (S14); 2#机组冷试前 \bar{x} 平均值: 1.01 mm , $\max(\bar{x}) = 1.09 \text{ mm}$ (A7), $\min(\bar{x}) = 0.98 \text{ mm}$ (L17); 1#机组热试前 \bar{x} 平均值: 1.00 mm , $\max(\bar{x}) = 1.01 \text{ mm}$ (L1、B4), $\min(\bar{x}) = 0.98 \text{ mm}$ (G1、D2);

结合图 3 可知: (1) 可认为各机组各位置 \bar{x} 相等情况下, 说明压缩量与试验位置无线性关系; (2) ΔP 与试验位置无线性关系; (3) 2#机组冷试前 ΔP 总体比 1#机组冷试前高。

分析 ΔP 数值提高的原因, 有以下三点: (1) 1#、2#机组密封试验分别于 2014、2016 年进行, 期间相隔 2 年多, 仪器内压力传感器和管组长久使

用, 可能出现元件老化, 传感器压力测试不稳定, 管线间接头、卡环密封能力下降等问题, 但此问题不影响系统密封, 未超出密封阈值, 仍然能保证正常运行; (2) 仪器使用期间, 真空泵、压力传感器、压力表未拆卸, 只对压力传感器和压力表进行校验, 其数据在设计范围内; 但随着时间推移, 系统自检值提升, ΔP 相对增加; (3) 2#机组密封圈制造精度不及 1#机组, 使 2#机组密封效果不及 1#机组, 最终使 2#机组 ΔP 比 1#机组偏高;

3) 图 4 描述了 1#机组冷、热试前各试验位置 \bar{x} 、 ΔP 点位分布, 结合表 2 可知: (1) 1#机组热试前 ΔP 总体比冷试前高, 原因: 同 2) 中 (3) 原因相似。

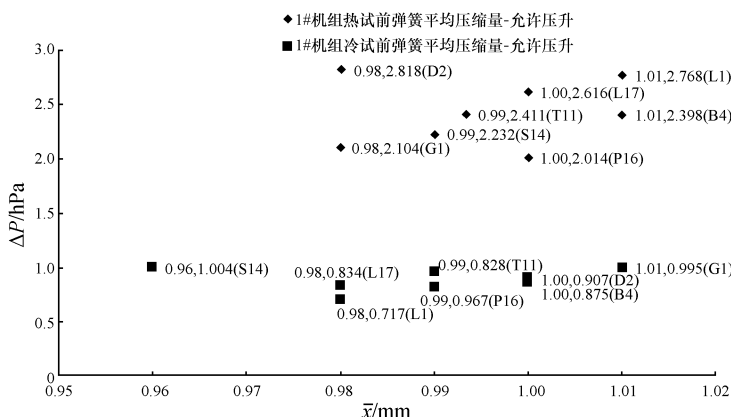


图 4 1#机组冷、热试前 \bar{x} 、 ΔP 点位分布

Fig.4 \bar{x} 、 ΔP point distribution before CFT and HFT in Unit 1

(2) 随着机组冷、热试的推进, 部分试验位置上 \bar{x} 随着 ΔP 增加而减少, 如: D2、G1, 其余试验位置是线性增长; 则可认为 1#机组冷、热试前在同试验位置上 \bar{x} 与 ΔP 无线性关系;

4) 图 5、6 给出了 1#、2#机组冷试前各试验位置 \bar{x} 、 ΔP 点位分布, 由图可知: \bar{x} 与 ΔP 并无线性递增、减的趋势, 说明 1#、2#机组冷试前 \bar{x} 与 ΔP 无线性关系。

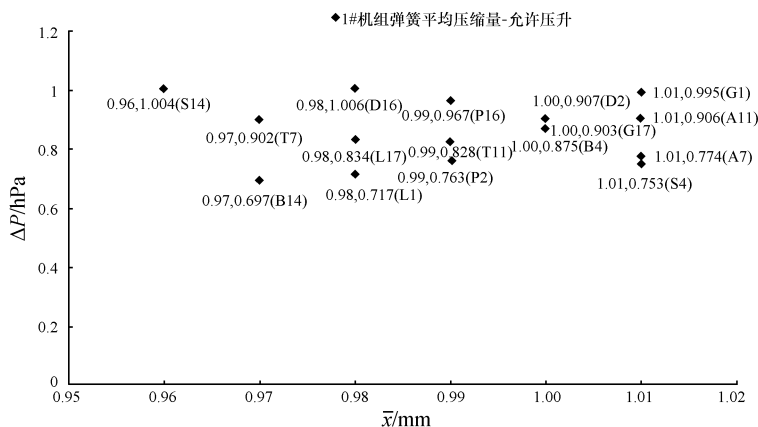
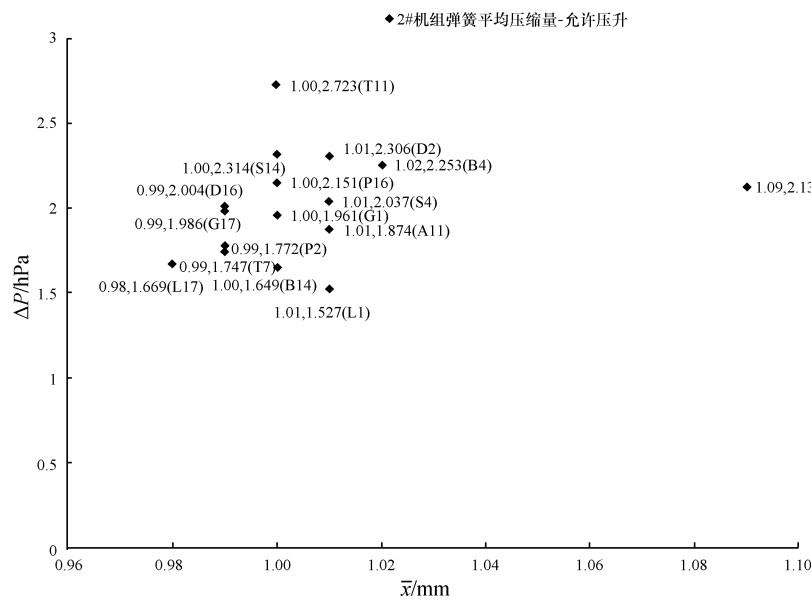


图 5 1#机组冷试前 \bar{x} 、 ΔP 点位分布

Fig.5 \bar{x} 、 ΔP point distribution before CFT in Unit 1

图6 2#机组冷试前 \bar{x} 、 ΔP 点位分布Fig.6 \bar{x} 、 ΔP point distribution before CFT in Unit 2

4 结论

EPR 核电堆芯仪表管嘴封头密封由于所处位置和结构特性较严格,对其机械密封结构的拆卸和安装都有严格限制.EPR 核电堆芯仪表管嘴封头结构紧凑、性能良好、实用,因此能达到良好的密封效果.在工艺技术方面拥有其合理规范的装拆工艺,管嘴封头真空试验是继传统的 CPR 堆型中利用水压试验来检验密封性的一种新型密封性检验方法,该方法操作简单,安全性高,能更好的维护设备内部结构的清洁.对此,本文针对性的探究了管嘴封头的结构特性、密封试验方法,通过这些有效地控制人为因素带来的风险,可以大大缩短调试和维修的施工工期,有效的提高施工效率,保证质量安全.

针对 L 、 ΔP 做出分析,最终以 ΔP 为验收标准;针对试验位置、试验阶段、 \bar{x} 和 ΔP 进行实测、数据统计及分析,最终得到相关结论:1) 1#、2#机组冷、热试 \bar{x} 和 ΔP 均满足设计标准;2) \bar{x} 、 ΔP 分别与试验位置无线性关系;3) 随着时间推延, ΔP 逐渐增大,且满足设计标准;4) 1#机组冷、热试之间和 1#、2#机组冷试前对比, \bar{x} 与 ΔP 无线性关系;5) 在 1#机组冷、热试和 2#机组冷试中未发生泄漏,证明了工艺有效性.

参考文献:

- [1] 韩向臻,攸国顺,孙微.第三代反应堆 AP1000 和 EPR 的堆芯核设计[J].中国科技信息,2013,25(3):50,53.
- [2] 李婷婷.机械密封的发展历程及研究动向[J].科技风,2015,28(21):48.
- [3] 刘曦泽.浅谈密封装置在石化行业的应用[J].广州化工,2015,43(1):29-30,45.
- [4] 王玉明,黄伟峰,李永健.核电站一回路用机械密封[J].摩擦学学报,2011,31(4):408-416.
- [5] 王培源.AP1000 核电机组 Quickloc 机械密封的结构和拆装工艺[J].华电技术,2014,36(4):65-68,76,80.
- [6] 蒋严军.核电厂反应堆压力容器顶盖开关的过程控制[J].中国核电,2013,6(2):148-152.
- [7] 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.
- [8] 廖家麒,贺寅彪.反应堆压力容器密封性能分析及结构优化设计[J].机械工程师,2013,45(6):13-15.
- [9] 谢林君,任欣.高温高压容器封头安装中螺柱应力试验[J].核动力工程,2011,32(3):122-126.
- [10] 李涛.堆芯热电偶密封结构失效机理分析[J].中国核电,2013,6(3):275-279.
- [11] 白逢.直接空冷机组真空严密性试验结果准确性分析[J].华电技术,2015,37(9):44-47,50,79.
- [12] 宋政池.抽真空装置在核电厂一回路中的应用[J].核动力工程,2015,36(S1):163-165.
- [13] 吴恒刚,王忠熬.350 MW 机组真空系统严密性差的原因分析与处理[J].华电技术,2013,35(11):82-83,99.