

# 核电厂换料水池底部密封结构密封元件的性能分析

翁娜, 徐峰

(上海核工程研究设计院, 上海 200233)

**摘要:** 目的 研究某核电厂换料水池底部密封结构中密封元件的性能。方法 利用有限元分析软件 ANSYS, 采用超弹单元建立换料水池底部密封结构密封元件的二维轴对称模型, 并运用接触单元模拟密封接触界面进行计算分析。结果 经计算得到换料水池底部密封结构密封元件的预紧力-变形量曲线。结论 计算结果为分析换料水池底部密封结构密封试验的泄漏原因提供了理论依据, 同时也为工程中密封元件预紧力的确定提供了较有价值的参考。

**关键词:** 水池底部密封结构; 密封元件; 有限元; 预紧力; 变形

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2014.02.021

**中图分类号:** TB42; TQ336.4<sup>+</sup>2      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2014)02-0106-06

## Sealing Performance Analysis of Sealing Element in the Floor Sealing Structure of Refueling Pool in Nuclear Power Plant

WENG Na, XU Feng

(Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institute, Shanghai 200233, China)

**ABSTRACT: Objective** To study the sealing performance of the floor sealing structure of the refueling pool in a nuclear power plant. **Methods** An axial-symmetry finite element model of the sealing component using super elastic element was built by ANSYS. Then the contact surface of the sealing structure was simulated by the contact element. **Results** A curve between preloaded force and deformation was calculated. **Conclusion** The results can be used to solve the test leakage problem of the floor sealing structure of refueling pool and could also be used as a reference in getting preloaded force of sealing components.

**KEY WORDS:** floor sealing structure of refueling pool; sealing component; finite element; preloaded fore; deformation

收稿日期: 2013-10-21; 修订日期: 2013-12-15

Received: 2013-10-21; Revised: 2013-12-15

作者简介: 翁娜, (1982-), 女, 湖南株洲人, 工程师, 主要从事反应堆本体设备设计及力学分析工作。

**Biography:** WENG Na (1982-), Female, from Zhuzhou, Hunan, Engineer, Research focus: equipment design and analysis of reactor system.

停堆换料期间,某核电厂的换料水池充满了含硼水以保持反应堆处于冷停堆状态。水池底部密封结构的主要功能是在换料期间对压力容器密封凸台与反应堆一次屏蔽之间的环形缝隙进行密封,从而使换料水池内的含硼水保持水位,并防止发生漏水事故。鉴于密封材料丁腈橡胶在高温应力作用下的老化敏感性<sup>[1]</sup>,在每次换料水池充水前必须更换橡胶密封元件以进行必要的检修,并作密封试验,确保水池底部密封的可靠性。

某核电厂现场进行水池底部密封结构的密封试验时,发现压力容器密封凸台与一次屏蔽之间的环形密封面发生泄漏。笔者针对水池底部密封结构试验失效的可能原因,对水池底部密封结构的密封元件(O形橡胶圈)在外力作用下的形变进行了分析,同时还分析了引起换料水池底部密封结构试验泄漏的其它因素。

O形橡胶圈在预紧力作用下的性能分析属于大变形、非线性接触问题,因而对O形橡胶圈在不同预紧力下的变形及密封接触界面上应力的精确计算在理论上还存在很大困难。目前,工业上大多采用试验获得橡胶类材料的预紧力和压缩量的对应关系。笔者采用大型有限元分析软件ANSYS中的超弹单元建立了O形密封圈二维轴对称模型,分析了在预紧力作用下,水池底部密封结构的密封元件的变形量和接触面上的应力的关系,为分析换料水池底部密封结构密封试验的泄漏原因提供了理论依据。

## 1 模型建立及分析

### 1.1 水池底部密封结构描述

水池底部密封结构包括压力容器密封凸台与一

次屏蔽之间的环形密封结构(又称堆坑环缝密封结构,见图1)和核测管吊装孔道圆形法兰盖板式密封结构(见图1II,III)两部分。其中堆坑环缝密封结构是防止换料水池泄漏的主要元件,它由外密封底板、密封环板,“Γ”形架、O形橡胶圈等主要部件构成。外密封底板与换料水池底部钢覆面焊接连接,它和压力容器密封凸台上各有两道环形密封槽,O形橡胶圈放入槽内之后,加盖密封环板,然后由固定在外密封底板上的“Γ”型架螺杆使密封环板均匀地压紧橡胶密封圈来实现密封。换料水池底部密封结构如图1所示;堆坑环缝密封的结构如图2所示;堆坑环缝密封结构及“Γ”型架的布置如图3所示。

堆坑环缝密封结构中,外密封底板和密封环板的材料为304不锈钢,O形橡胶圈的材料为丁腈橡胶,截面直径为18 mm,密封沟槽深12.8 mm,螺杆螺纹为梯形螺纹,其材料为410不锈钢。

堆坑环缝密封结构为静态密封结构,O形橡胶圈在密封沟槽内受到一定的压缩,因压缩而产生一个初始的接触应力,依靠O形橡胶圈所产生的反作用力——回弹力来密封介质,达到密封目的。

### 1.2 模型简化

由于24个“Γ”型架均匀地压在密封环板上,那么:

$$F=24F_i \quad (1)$$

式中: $F$ 为总环板压力; $F_i$ 为每个“Γ”型架的螺杆预紧力。

密封环板下方有4个O形橡胶圈,计算中假定4个橡胶圈受到的压力均匀,那么:

$$P=(F+mg)/4 \quad (2)$$

式中: $P$ 为每个密封圈所受到的总压力; $m$ 为密封环板的质量。

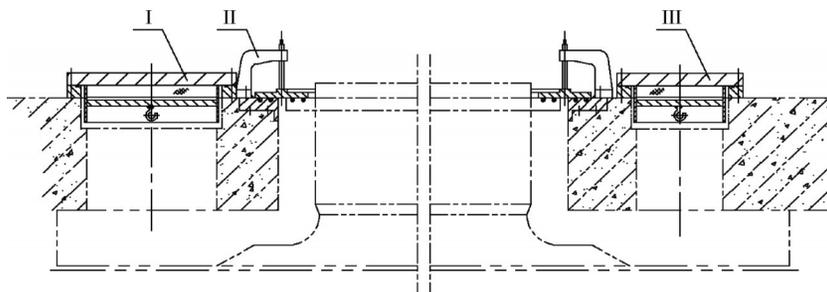


图1 水池底部密封的结构简图

Fig.1 Schematic drawing of floor sealing structure of refueling pool

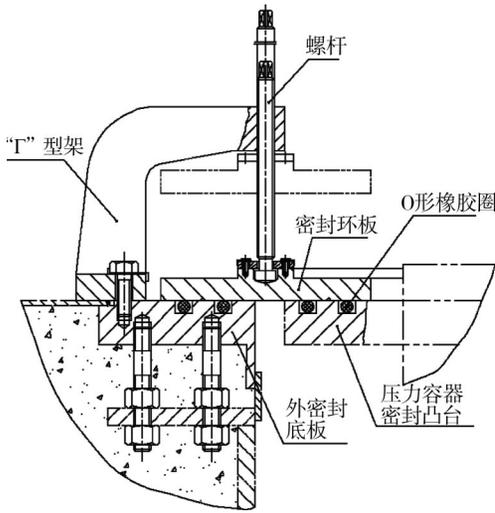


图2 堆坑环缝密封结构

Fig.2 Structure of reactor cavity annulus seal

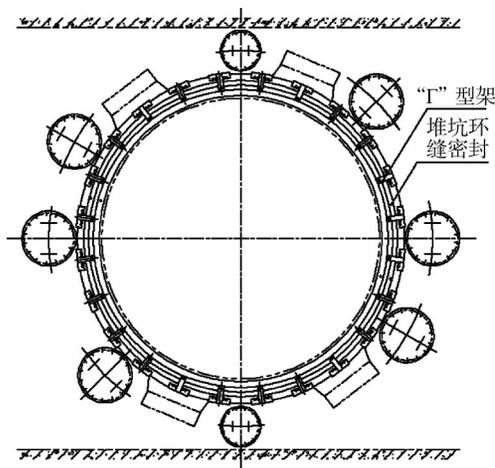


图3 堆坑环缝密封结构的布置

Fig.3 Layout drawing of reactor cavity annulus seal

文中选取其中一个密封圈为研究对象,分析其在总压力作用下的变形情况。

由于O形橡胶圈是环向的且在密封槽内分布均匀,可建立O形橡胶圈的轴对称模型,截面的O形橡胶圈和周围结构的轴对称平面模型如图4所示。

那么在这个平面上给密封环板加载向下的分布力满足:

$$p \cdot \pi d = P = (F + mg) / 4 \tag{3}$$

式中: $p$ 为单位长度上的广义预紧力; $d$ 为O形橡胶圈安装后的密封环内径。

对于橡胶类物理非线性材料常采用 Mooney-Rivlin 模型理论<sup>[2]</sup>,该理论可以较好地描述橡胶类不可压缩超弹性材料在大变形下的应变能密度函数。

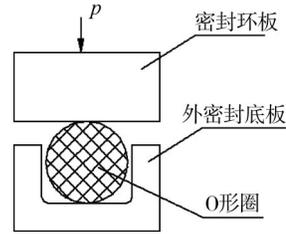


图4 O形橡胶圈和周围结构的轴对称平面模型

Fig.4 Axial-symmetry model of rubber O-ring and interface

根据图4建立O形橡胶圈及周围结构的有限元模型,其中对O形橡胶圈赋予 Mooney-Rivlin 特性,并采用 sweep 和 free 方式对密封圈及密封环板、外密封底板进行网格划分。建立的有限元模型网格如图5所示。

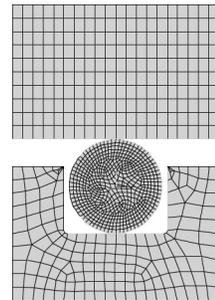


图5 密封圈及周围结构的有限元网格图

Fig.5 FEM model of rubber O-ring and interface

### 1.3 材料参数和边界条件

#### 1.3.1 材料参数

外密封底板和密封环板均为不锈钢材料,其弹性模量为  $2.1 \times 10^{11}$  Pa,泊松比为 0.3<sup>[3]</sup>。O形橡胶圈为丁腈橡胶,其泊松比为 0.499,邵氏硬度为 75。橡胶材料的邵氏硬度和弹性模量之间存在一定的关系<sup>[4]</sup>,即:

$$E = (15.75 + 2.15H_s) / (100 - H_s) \tag{4}$$

式中: $E$ 为弹性模量; $H_s$ 为橡胶的邵氏硬度。

由式(4)得到本模型中O形橡胶圈的弹性模量为 7.08 MPa。

#### 1.3.2 边界条件

实际工程中,当混凝土二次浇灌后,可认为外密封底板固定不动。在此情况下,密封环板只能在上下方向产生位移,并通过压缩O形橡胶圈达到整个结构的密封效果。

在O形橡胶圈没有被压缩前,O形橡胶圈与密封环板的下表面以及外密封底板的槽底均只有点接触;当受到压缩变形后,与密封环板的下表面以及外

密封底板的槽底形成面接触;当O形橡胶圈的变形进一步增大,O形橡胶圈和外密封底板的密封槽内侧面也会有接触。

因此,在增加约束的时候需在四个位置增加“接触”约束条件。四个位置的“接触”约束分别为:1)密封环板和密封圈上圈的接触;2)密封槽底面和密封圈下圈的接触;3)密封槽右面和密封圈右侧的接触;4)密封槽左面和密封圈左侧的接触。

## 2 O形橡胶圈性能分析

### 2.1 广义预紧力与变形量关系

采用有限元软件 ANSYS 计算 O 形橡胶圈在预紧力作用下的变形量。在密封环板的上表面加载单位

长度的广义预紧力,从 0 N/mm 开始,每增加 1 N/mm 计算一次变形量,得到广义预紧力和 O 形橡胶圈的变形量曲线,如图 6 所示。

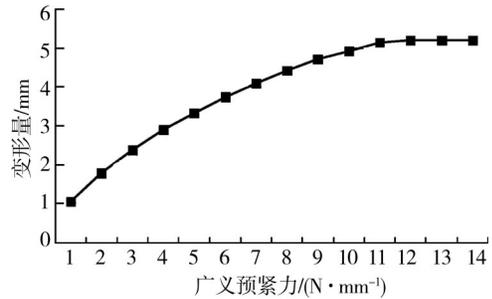


图6 广义预紧力与变形量关系曲线

Fig.6 The relation curve between generalized preload and deformation

随着广义预紧力的递增,图7描述了O形橡胶圈的变形过程。

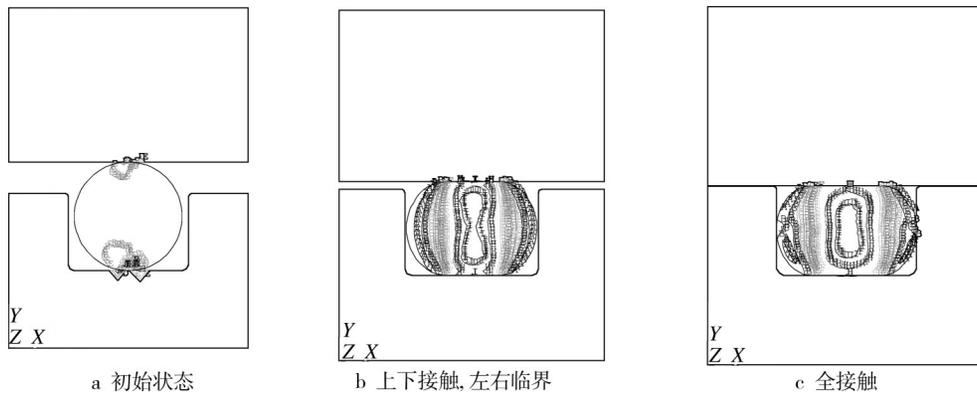


图7 O形橡胶圈的变形过程示意

Fig.7 Deformation process of rubber O-ring

当O形橡胶圈的压缩变形量约为5 mm时,O形橡胶圈和周围结构的应力分布如图8所示。从图8中可看出,应力分布是对称的。其中,O形橡胶圈与周围结构的接触压应力随接触面积的增大而增大。

由图6和图7可知,接触压应力越大,O形橡胶圈的压缩变形量和接触面积越大,产生的密封力也就越大,满足自密封作用的特性。然而接触压应力的增加将加速橡胶材料的应力衰减(又称松弛),从而造成刚度下降<sup>[5]</sup>,O形橡胶圈的残余变形量将减少,导致回弹量降低,当超过一定的压缩量时,O形橡胶圈将会出现永久的塑性变形,使密封失效。因此,为防止此情况的发生,根据工程实践经验,O形橡胶圈允许的最大压缩量在静态密封中约为30%<sup>[6]</sup>。文中的结构设计中最大压缩变形量为28.9%,满足此要求。

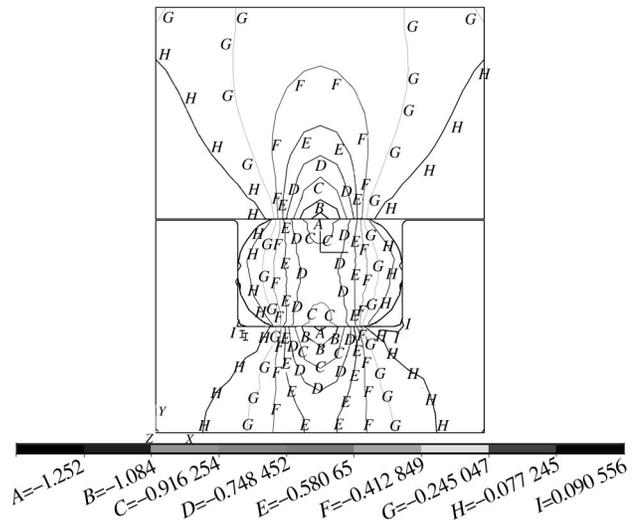


图8 O形橡胶圈和周围结构的应力分布

Fig.8 Stress distribution of rubber O-ring and interface

## 2.2 预紧力与变形量关系

根据有限元分析结果,得到表1中广义预紧力与变形量的关系。再根据式(1)–(3),得到表1每个“Γ”型架的螺杆预紧力。

表1 计算结果数据  
Table 1 The results of calculation

广义预紧力/(N·mm <sup>-1</sup> )	变形量/mm	预紧力/N
1	1.053	2085.1
2	1.777	4424.4
3	2.368	6763.7
4	2.889	9103.0
5	3.330	11 442.3
6	3.741	13 781.6
7	4.094	16 120.9
8	4.425	18 460.2
9	4.710	20 799.5
10	4.926	23 138.8
11	5.132	25 478.0
12	5.2	27 817.3
13	5.2	30 156.6
14	5.2	32 495.9

根据表1,得到每个“Γ”型架的螺杆预紧力与变形量的关系曲线,如图9所示。

## 2.3 在介质压力作用下O形橡胶圈的变形

当反应堆停堆换料时,换料水池充满换料水。当水池底部密封结构在现场安装后,应根据其安装技术条件进行密封试验,具体要求为:用空气或其它不可燃气体作本装置的密封试验介质,试验压力为0.2 MPa,保压30 min,压力应保持不变。

保守选取密封试验压力0.2 MPa为介质压力,加载在O形橡胶圈的有限元模型一侧上。以O形橡胶圈预紧力为2085.1 N(广义预紧力为1 N/mm)时为例,计算得到密封圈的压缩变形量为0.77 mm,其变形量和应力分布如图9所示。

从以上计算结果可知,在有侧压并在同样载荷

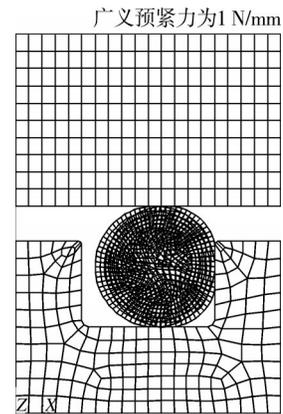


图9 变形图

Fig. 9 Deformation pattern

条件下,O形橡胶圈的压缩变形量比没有侧压时小,即:有介质压力条件下密封圈的刚度会增加。因此,欲达到与无介质压力条件下相同的O形橡胶圈压缩量,应增加螺杆预紧力以增加接触压应力。

## 2.4 其它因素对密封的影响

根据安装技术条件和设备结构图纸规定,密封环板和外密封底板的平行度偏差最大可达2.8 mm。上下两密封面的平行度偏差将导致四个O形橡胶圈在环向位置受力不均匀,从而会影响堆坑环缝密封结构部分位置的密封效果。

根据安装规程和质保大纲的要求,在试验前应对各O形橡胶圈的预紧力进行测量并记录测量结果,并根据测量结果估计密封圈在这些位置的变形量,从而验证密封所需的O形橡胶圈压缩变形量是否充裕。而现场并没有进行相关测量工作,导致密封圈泄漏后无法开展与预紧力相关的失效分析。

## 3 结论

针对某核电厂在进行换料水池底部密封结构的密封试验时发生泄漏的情况,利用有限元分析软件ANSYS,采用超弹单元建立换料水池底部密封结构密封元件的二维轴对称模型,并运用接触单元模拟密封接触界面,经计算得到水池底部密封结构密封元件的预紧力-变形量曲线,为分析换料水池底部密封结构密封试验的泄漏原因提供了理论依据,同时还分析了引起换料水池底部密封结构试验泄漏的部

分其它因素,为换料水池底部密封结构试验泄漏的原因分析提供参考依据。

#### 参考文献:

- [1] 熊英,付宝强,郭少云,等.丁腈橡胶应力加速老化行为的研究[J].装备环境工程,2012,9(3):52—55.  
XIONG Ying, FU Bao-qiang, GUO Shao-yun, et al. Study of Stress Accelerated Aging Behavior of Sulfured Nitrile-butadiene Rubber [J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(3):52—55.
- [2] 王伟,赵树高.橡胶O形密封圈的非线性有限元分析[J].润滑与密封,2005,170(4):106—107.  
WANG Wei, ZHAO Shu-gao. Nonlinear Finite Element Analysis of Rubber O-sealing Ring [J]. Lubrication Engineering, 2005, 170(4): 106—107.
- [3] 成大先.机械设计手册[M].北京:化学工业出版社,2003.  
CHENG Da-xian. Handbook of Mechanical Design [M], Beijing: Chemical Industry Press, 2003.
- [4] 计时鸣,徐亚敏,金明生,等.软固结磨粒气压砂轮的力学分析[J].中国机械工程,2012,23(19):2366—2372.  
JI Shi-ming, XU Ya-min, JIN Ming-sheng, et al. Mechanical Analysis of Pressure Grinding Wheel with soft Abrasive Consolidation [J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23 (19): 2366—2372.
- [5] 陈国定,HAISER H, HASS W,等. O形密封圈的有限元力学分析[J].机械科学与技术,2000,19(5):740—742.  
CHEN Guo-ding, HAISER H, HAAS W, et al. Analysis of Elastomeric O-ring Seals Using the Finite Element Method [J]. Mechanical Science and Technology, 2000, 19 (5): 740—742.
- [6] 彭兵,肖凤亮,李翔宇.橡胶密封制品[M].北京:化学工业出版社,2009.  
PENG Bing, XIAO Feng-liang, LI Xiang-yu. Rubber Sealing Product [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009.
- [7] 关文锦,杜群贵.真空环境中O形密封圈泄漏分析[J].机械设计与制造,2013(4):66—69.  
GUAN Wen-jin, Du Qun-gui. Leakage Analysis of the O-ring Seal Used in Vacuum [J]. Machinery Design & Manufacture, 2013(4):66—69.
- [13] 高健,王政荣,杨雅清.战时军用物资储备布局仿真研究[J].物流技术,2007,26(7):118—120.  
GAO Jian, WANG Zheng-rong, YANG Ya-qing. Simulation of Military Materials Depot Layout at Wartime [J]. Logistics Technology, 2007, 26(7):118—120.
- [14] 钱继锋,路学成,石磊,等.交通枢纽与军事物流基地建设探讨[J].物流技术,2010,29(17):114—115.  
QIAN Ji-feng, LU Xue-cheng, SHI Lei, et al. Study on the Relationship Between Traffic Hubs and the Construction of Military Logistics Bases [J]. Logistics Technology, 2010, 29 (17): 114—115.
- [15] 张易,李良春,罗龙均,等.基于物流场理论的高原高寒物流研究[J].包装工程,2012,33(7):118—121.  
ZHANG Yi, LI Liang-chun, LUO Long-jun, et al. Research of Cold High Plateau Logistics Based on Logistics Field Theory [J]. Packaging Engineering, 2012, 33 (7) : 118—121.
- [16] 赵吉敏,王丰,肖育,等.现代军事物流体系研究[J].包装工程,2009,30(9):76—79.  
ZHAO Ji-min, WANG Feng, XIAO Yu, et al. Research on Modern Military Logistics System [J]. Packaging Engineering, 2009, 30(9):76—79.
- [17] 施建荣,张燕,丰利军.民用产品与非研发产品的保障性研究[J].装备环境工程,2010,7(4):90—92.  
SHI Jian-rong, ZHANG Yan, FENG Li-jun. Supportability of Commercial and Non-developmental Item [J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(4):90—92.

(上接第97页)