

文章编号: 0258-0926(2014)02-0118-03

两种不同密封面结构反应堆压力容器的密封性能对比研究

陈 骏, 熊光明, 邓小云

深圳中广核工程设计有限公司, 广东深圳, 518124

摘要: 反应堆压力容器 (RPV) 密封面结构是影响 RPV 密封性能的重要因素。建立 2 种不同密封面结构的 RPV 三维有限元模型, 研究其对 RPV 密封性能的影响, 并得到上、下法兰轴向分离量以及主螺栓载荷等分析评价 RPV 密封性能的关键指标, 同时, 对比分析 2 种密封面结构形式的安全裕量, 为优化 RPV 密封面结构设计提供理论依据。

关键词: 反应堆压力容器 (RPV); 密封面结构; 密封分析; 安全裕量; 对比研究

中图分类号: TL351⁺.6 **文献标志码:** A

0 引言

核电厂的反应堆压力容器 (RPV) 长期在高温、高压、强辐照环境中服役, 为了防止放射性物质泄漏, 保证反应堆安全可靠运行, 必须进行 RPV 的密封性能分析。

对于 RPV 螺栓法兰联结结构的设计及分析, 国内外学者做了大量的研究和实验工作^[1]。日本三菱重工应用 ANSYS 软件对 RPV 进行了二维有限元密封分析; 熊光明、段远刚等对中国改进型三环路压水堆 (CPR1000) RPV 的密封性能进行数值模拟技术研究^[2]; George 和 Leon 进行了密封件试验, 得到了密封件的最大应变、回弹量、接触面性质等试验结果^[3]。

影响 RPV 密封效果的主要结构参数有螺栓圆直径、密封环沟槽位置、沟槽尺寸以及密封面结构等。目前, 国内外关于 RPV 密封分析的研究工作, 主要集中在分析方法和技术手段改进上, 对于不同密封面结构对密封性能的影响分析却鲜有提及。本文针对 2 种不同的密封面结构形式, 采用三维有限元分析方法, 开展了 RPV 上、下法兰轴向分离量、主螺栓载荷等方面的对比研究, 为 RPV 密封结构的优化设计奠定基础。

1 密封面结构设计

RPV 主要由筒体和顶盖部分组成, 通过主螺

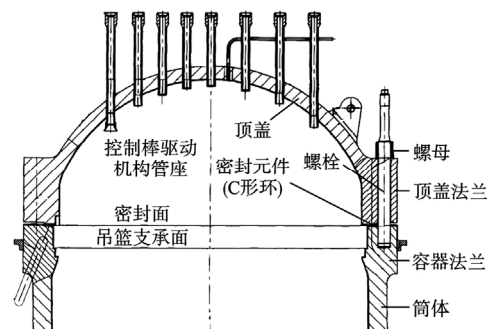


图 1 反应堆压力容器密封结构

Fig. 1 Reactor Pressure Vessel Sealing Structure

栓连接为一体并采用双置“C”形环进行密封, 见图 1。在某些工况下, RPV 顶盖法兰和容器法兰会发生相对转动, 使密封面间产生滑移和轴向分离, 该分离量的大小取决于转动的支点与密封环的距离。为了减少分离量, 提高 RPV 密封可靠性, 在设计密封结构时, 通常采用以下 2 种结构形式的密封面:

(1) 台阶式密封面: 在顶盖法兰密封面外侧加工一台阶 (外密封环处), 顶盖法兰密封面与容器法兰密封面不接触 (有一定间隙), 使支点内移, 降低密封环处的分离量 (图 2)。

(2) 倾角式密封面: 在顶盖法兰密封面外侧加工一个倾角为 α 的斜面, α 角应根据法兰连接系统分析确定。这样能在保持预紧力不变时减小

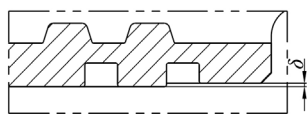


图 2 台阶式密封面
Fig. 2 Step Seal Surface

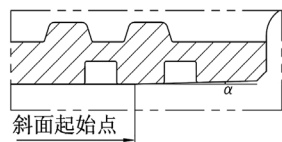


图 3 倾角式密封面
Fig. 3 Inclination Seal Surface

密封分离量，更有利于密封（图 3）。

2 两种密封面结构的 RPV 密封分析

2.1 分析模型

将 RPV 顶盖上控制棒驱动机构管座开孔区等效为无孔区，考虑到结构与载荷的对称性，取包含半根螺栓的结构建立三维有限元分析模型，密封元件（C 形环）用非线性弹簧进行模拟，结构分析与热分析采用的网格一致，但不考虑空气单元，2 种模型仅密封面结构处存在差异，台阶式按照图 2 所示结构建立模型，倾角式按照图 3 所示结构建立模型，总体模型见图 4。

2.2 分析条件设置

为了便于对比研究，2 种分析模型采用了相同的条件设置，考虑了 RPV 承受的载荷及载荷组合，包括螺栓预紧载荷、瞬态压力载荷、瞬态热载荷及机械载荷等。本文采用间接法计算，先进行热分析，再进行结构分析。

热分析载荷及边界条件设置：顶盖、顶盖法兰、容器筒体、容器法兰与冷却剂接触的表面施加对流载荷，加载升温、降温瞬态下冷却剂温度曲线；考虑了上下法兰密封面之间、垫片与螺栓和顶盖法兰之间的接触传热；在螺栓与顶盖法兰

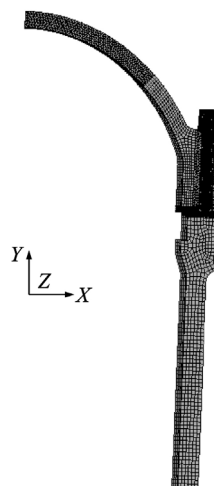


图 4 反应堆压力容器密封分析模型
Fig. 4 Sealing Analysis Models of Reactor Pressure Vessel

之间设置空气单元模拟传热；RPV 外壁面采用绝热处理。

结构分析载荷及边界条件设置：热分析计算所得瞬态温度以体载荷形式施加于结构单元上，并同时施加瞬态压力载荷、机械载荷等。

采用 ANSYS 中的预紧单元 PRETS179 模拟 RPV 主螺栓的整个预紧及升温、降温过程。

对存在接触非线性的区域，包括垫片与螺母、垫片与顶盖法兰、顶盖法兰密封面与筒体法兰密封面、密封元件与上下法兰密封面之间等，采用分析程序中的接触单元实现真实的接触模拟，并考虑了接触面之间的摩擦。

2.3 计算结果及对比

根据上述设置的分析条件，分别对 2 种密封面结构 RPV 密封性能进行了分析，通过计算及结果后处理，得到了评价 RPV 密封性能的关键指标，包括内、外密封环处上下法兰轴向分离量、主螺栓最大应力和最大平均应力，见表 1。

表 1 计算结果及对比
Table 1 Results and Comparative Analysis

参数名称	密封结构		评价基准值	密封结构安全裕量		安全裕量对比
	台阶式	倾角式		台阶式	倾角式	
内环轴向分离量/mm	0.077	0.051	0.2	61.5%	74.5%	13%
外环轴向分离量/mm	-0.067	-0.11	0.2	—	—	—
主螺栓最大应力/MPa	470	459	720	34.7%	36.3%	1.6%
主螺栓最大平均应力/MPa	392	382	480	18.3%	20.4%	2.1%

注：安全裕量 = 1 - 计算结果/评价准则；安全裕量对比 = 倾角式密封结构安全裕量 - 台阶式密封结构安全裕量

3 结 论

(1) 分别对台阶式、倾角式这 2 种不同密封面结构 RPV 进行了三维有限元密封分析,得到了用于 RPV 密封性能分析评价的上下法兰轴向分离量、主螺栓载荷等主要指标。

(2) 在 RPV 其它结构参数及载荷条件一致的情况下,采用倾角式密封面的密封安全裕量均大于台阶式密封面结构,其中最为关键的内环轴向分离量裕量提高了 13%,增加了 RPV 密封性能的可靠性。

(3) 在进行 RPV 设计时,可采用倾角式密封

面优化 RPV 密封结构。

参考文献:

- [1] 曲家棣,盛贤科,窦一康,等. 300 MW 核电站反应堆压力容器密封性能综合研究[M]. 北京: 原子能出版社, 1989.
- [2] 熊光明, 邓小云, 段远刚, 等. CPR1000 反应堆压力容器密封性能模拟技术研究[J]. 核技术, 2013, 36(4): 040606(1)-(6).
- [3] George F Peleon. An overview of the US PVRC Research Program on Bolted Flanged Connections. Pressure Vessel Technology Vol. 1 Design & Analysis [M]. New York: Pergamon Press, 1988.

Comparative Study on Two Different Seal surface Structure for Reactor Pressure Vessel Sealing Behavior

Chen Jun , Xiong Guangming , Deng Xiaoyun

China Nuclear Power Design Company, LTD (SHENZHEN), Shenzhen, Guangdong, 518124, China

Abstract: The seal surface structure is very important to reactor pressure vessel (RPV) sealing behavior. In this paper, two 3-D RPV sealing analysis finite models have been established with different seal surface structures, in order to study the influence of two structures. The separation of RPV upper and lower flanges, bolt loads and etc. are obtained, which are used to evaluate the sealing behavior of the RPV. Meanwhile, the comparative analysis of safety margin of two seal surface structural had been done, which provides the theoretical basis for RPV seal structure design optimization.

Key words: Reactor pressure vessel, Seal surface structure, Sealing analysis, Safety margin, Comparative study

作者简介:

陈 骏 (1964—), 女, 研究员级高级工程师。1990 年毕业于重庆大学工程机械专业, 获硕士学位。现从事核电厂核岛主设备设计及研发工作。

熊光明 (1984—), 男, 工程师。2007 年毕业于哈尔滨工程大学工程力学专业, 获学士学位。现从事核电厂反应堆结构力学研究工作。

邓小云 (1967—), 男, 高级工程师。1993 年毕业于成都科技大学 (现四川大学) 铸造专业, 获硕士学位。现从事核电反应堆材料工程研究工作。

(责任编辑: 刘 君)