

# 考虑瞬态分析的反应堆结构关键间隙优化设计

胡朝威,王庆田,夏欣,李燕,  
何培峰,余志伟,蒋兴钧,王仲辉

(中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室,成都 610041)

**摘要:**反应堆堆内关键间隙设计是反应堆堆内构件结构设计的关键内容。分析了影响堆内构件与压力容器间间隙值的影响因素,针对三种典型间隙,基于通用有限元软件 ANSYS,研究了瞬态工况下反应堆内关键间隙变化,提出了一种新的反应堆内关键间隙优化设计方法。研究成果已成功应用于三代核电华龙一号反应堆内关键间隙的优化设计中,有效提高了反应堆内关键间隙设计的合理性和可靠性。

**关键词:**反应堆结构;瞬态;关键间隙

**本文引用格式:**胡朝威,王庆田,夏欣,等.考虑瞬态分析的反应堆结构关键间隙优化设计[J].兵器装备工程学报,2016(11):146-150.

**Citation format:**HU Chao-wei, WANG Qin-tian, XIA Xin, et al. Optimum Design of Reactor Structure Key Clearances Considering Transients Analysis[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering,2016(11):146-150.

**中图分类号:**TL351+.1

**文献标识码:**A

**文章编号:**2096-2304(2016)11-0146-05

## Optimum Design of Reactor Structure Key Clearances Considering Transients Analysis

HU Chao-wei, WANG Qin-tian, XIA Xin, LI Yan,  
HE Pei-feng, YU Zhi-wei, JIANG Xin-jun, WANG Zhong-hui

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

**Abstract:** Design of reactor structure key clearances is the important part in the reactor internals structure design. This paper analyzed the influence factors on clearance value between reactor internals and pressure vessel. Then, the variations of the reactor structure key clearances under transient conditions had been investigated by using the general finite element analysis software, ANSYS. A new kind of design method of the reactor structure key clearances was offered. The investigation result has successfully been used to the reactor structure key clearances optimum design of HUALONG 1 which is the three-generation advanced nuclear power reactor. The design has reliability and rationality for that the design of reactor structure key clearance has been improved effectively.

**Key words:** reactor structure; transient; key clearance

安装在反应堆压力容器内的堆内构件,用以支承堆芯燃料组件、引导堆内冷却剂流向、输出反应堆内核反应产生的热能。而反应堆压力容器又起到包容堆内构件的重要作用,

因此,众多学者对反应堆结构设计进行了大量工作。廖家麒等<sup>[1]</sup>分析了反应堆压力容器密封性能并进行了结构优化设计。张翟<sup>[2]</sup>和黄磊<sup>[3]</sup>等人均对堆内压紧弹性环进行了优化

**收稿日期:**2016-07-03; **修回日期:**2016-07-30

**作者简介:**胡朝威(1973—),男,硕士,高级工程师,主要从事反应堆结构设计研究;  
王庆田(1982—),男,硕士,高级工程师,主要从事反应堆结构设计研究;  
夏欣(1981—),男,硕士,高级工程师,主要从事反应堆结构设计研究。

设计。

另外,反应堆内部接口众多,反应堆堆内关键间隙设计也是反应堆堆内构件结构设计的关键内容之一。反应堆内间隙设计必须保证冷热态工况下压力容器与堆内构件不发生干涉、堆内构件各零部件不发生干涉,确保堆内构件的正常定位和导向功能,确保反应堆结构正常安装、检查、维修,确保燃料组件得到合适的压紧等<sup>[4-5]</sup>。同时,反应堆结构关键间隙设计还必须满足热工水力要求<sup>[6]</sup>。为了避免压力容器与堆内构件发生干涉,必须确保压力容器与堆内构件间有足够的间隙值,而为了减小反应堆内无效旁流及减小堆内构件与压力容器间在地震及 LOCA 工况下的相互撞击,堆内构件与压力容器间间隙需足够小。但是,国内学者对堆内关键间隙的优化设计还研究较少,且设计时考虑情况也较为简单。姚伟达、谢永诚应用模态叠加法对反应堆堆内构件间隙的动力学问题进行了研究,克服了求解收敛性差等问题<sup>[7]</sup>。于雷、关欣以堆内构件和反应堆压力容器之间的压力容器接管和吊兰筒体接管为例,研究并计算了其在稳定工况下的热态间隙<sup>[8]</sup>。段孟强等建立了压水堆一回路系统热工水力稳态计算模型<sup>[9]</sup>。

传统的堆内关键间隙设计都是针对稳态工况,采用线性化理论公式进行简单计算。这种计算方法比较粗糙,不能精细化反应堆温度场对间隙的影响,不能反映温度和压力瞬态的耦合作用。而基于有限元的分析方法能够有效解决这些问题并且得到众多学者的关注<sup>[10-11]</sup>。例如,张丽屏等采用 ANSYS 有限元软件对反应堆压力容器接管进行了在各载荷作用下的三维应力和疲劳分析<sup>[12]</sup>。

本文采用 ANSYS 通用有限元软件,分析研究在温度和压力瞬态下反应堆结构关键间隙变化情况。提出反应堆内关键间隙优化设计步骤,并将研究结果用于三代核电“华龙一号”反应堆结构关键间隙优化设计,使得反应堆堆内结构关键间隙设计更为合理可靠。

## 1 理论基础

反应堆内压力容器与堆内构件间径向间隙值发生变化的原因有二:

- a) 堆内构件与压力容器存在热胀差;
- b) 压力容器及堆内构件在内压(或压差)作用下,压力容器壁与吊篮筒壁间存在径向位移差。

堆内构件与压力容器间的热胀差如下计算

$$\Delta_1 = \sum_{i=1}^n L_i \alpha_i(T_i)(T_i - T_r) - \sum_{j=1}^m L_j \alpha_j(T_j)(T_j - T_r) \quad (1)$$

压力容器壁与吊篮筒壁间在内压和压差作用下径向位移差如下计算

$$\Delta_2 = 1.33 \left( \frac{p_1 D_1 (D_1 + \kappa_1)}{E_1 \kappa_1} + \frac{(\Delta p) D_2 (D_2 - \kappa_2)}{E_2 \kappa_2} \right) \quad (2)$$

式(1)和式(2)中: $L_i$ (或 $L_j$ )为吊篮筒体(或压力容器)径向尺寸段; $T_i$ (或 $T_j$ )为该尺寸段平均温度; $\alpha_i(T_i)$ (或 $\alpha_j(T_j)$ )为该尺寸段材料在温度 $T_i$ (或 $T_j$ )下热胀系数; $T_r$ 为参考温

度; $p_1$ 为压力容器内压; $\Delta p$ 为吊篮压差; $E_2$ (或 $E_1$ )为堆内构件材料(或压力容器材料)的弹性模量; $D_1$ 为压力容器内径; $D_2$ 为吊篮筒壁外径; $\kappa_1$ 为压力容器壁厚; $\kappa_2$ 为吊篮筒壁厚。

压力容器及吊篮筒体温度场由热传导方程、边界条件及初始条件计算。

热传导方程<sup>[13]</sup>

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (3)$$

式中: $T(x, y, z, t)$ 为压力容器及吊篮筒体温度场; $\alpha = \frac{\lambda}{\rho c}$ (其中 $\lambda$ 为材料的导热系数, $c$ 为材料的比热, $\rho$ 为材料的密度)。

边界条件

$$\left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_s = - \frac{\beta}{\lambda} (T_s - T_c) \quad (4)$$

式中: $\beta$ 为壁面对流传热系数; $T_s$ 壁面温度; $T_c$ 冷却剂温度。

初始条件

$$(T(x, y, z))_{t=0} = C \quad (5)$$

式中: $C$ 为压力容器及吊篮筒体初始温度。

理论上,热态时吊篮组件与压力容器间间隙如下计算

$$\Delta = \Delta_3 + \Delta_2 - \Delta_1 \quad (6)$$

式中: $\Delta_3$ 为反应堆安装时冷态间隙。

由式(1)~式(6)可以看出,影响堆内构件与压力容器间间隙值的因素包括瞬态温度变化速率、对流传热系数、结构几何尺寸、材料的热胀系数、压力容器内压、吊篮筒内外压差等。

反应堆结构尺寸直接影响反应堆内间隙,由于结构主体尺寸不能随意更改,故通过改变反应堆结构主体尺寸进而减小堆内间隙变化难于实现。同样,通过改变堆内构件及压力容器使用环境、堆内流场环境,改变反应堆结构材料进而减小堆内间隙变化也难于实现。最为可行的措施是改变一回路冷却剂的升降温速率。

## 2 反应堆结构关键间隙优化设计

### 2.1 反应堆内关键间隙优化设计步骤

1) 确定分析模型。反应堆结构堆内关键间隙包括冷态、热稳态关键间隙和瞬态关键间隙。选择冷态间隙较小,而热胀影响较大的间隙进行分析研究。经过筛选,对于压水反应堆,反应堆内关键间隙主要包括吊篮出口管嘴与压力容器出口接管底部凸台间的间隙、吊篮法兰和上支法兰与压力容器法兰间间隙、径向支承键与径向支承块间径向间隙。分析模型包括压力容器、吊篮、吊篮出口管嘴及径向支承键,分析模型为二维轴对称模型,吊篮出口管嘴和径向支承键为非轴对称结构,分析采用等效轴对称模型。

2) 确定分析边界条件。针对具体情况,确定分析边界条件。边界条件包括温度、压力瞬态。压水反应堆分析温度瞬态选择温度变化最激烈的升、降温瞬态,压力瞬态为与温度瞬态对应的内压瞬态。分析用对流传热系数采用无量纲准数关系式计算,计算时必须考虑温度、压力瞬态的影响。

3) 结合稳态及瞬态分析结果,优化设计反应堆内关键间隙。间隙设计的原则:冷态堆内构件易于吊装,热稳态工况堆内构件与压力容器间不能出现干涉,热瞬态工况下堆内构件与压力容器间的瞬态、局部干涉载荷不能导致堆内构件应力强度超过规范要求,正常运行工况需满足热工水力要求。

## 2.2 反应堆内关键间隙优化设计

如前所述,反应堆内关键间隙主要包括:吊篮法兰和上支法兰与压力容器法兰间间隙、吊篮出口管嘴与压力容器出口接管底部凸台间的间隙、径向支承键与径向支承块间径向间隙。

### 1) 吊篮法兰和上支法兰与压力容器法兰间间隙

吊篮法兰和上支法兰与压力容器法兰间间隙设计原则:在满足瞬态工况下吊篮法兰(及上支承法兰)与压力容器法兰无干涉情况下,尽量减小冷态间隙,以便减小事故情况下堆内构件法兰对压力容器法兰的冲击,同时间隙的设计必须有利于堆内构件吊装。

冷态工况,吊篮法兰及上支法兰与压力容器法兰间最小间隙为

$$\delta_1 = \Delta_4 + \frac{\phi_1}{2} + \frac{\phi_2}{2} + \frac{\phi_3}{2} + \frac{\phi_4}{2} \quad (7)$$

式中: $\Delta_4$ 为吊篮法兰与压力容器法兰间的瞬态间隙变化幅度,与升降温速率有关; $\phi_1$ 为吊篮法兰外圆相对于吊篮筒体轴线同轴度公差; $\phi_2$ 为吊篮出口管嘴外端面所在圆弧相对于吊篮筒体轴线同轴度公差; $\phi_3$ 为压力容器吊篮支承台阶面外圆相对于压力容器筒体轴线同轴度公差; $\phi_4$ 为压力容器出口接管底部凸台端面所在圆弧相对于压力容器筒体轴线同轴度公差。

### 2) 吊篮出口管嘴与压力容器出口接管底部凸台间的间隙

吊篮出口管嘴与压力容器出口接管底部凸台间的间隙设计原则:在瞬态工况下吊篮出口管嘴与压力容器出口接管底部凸台间干涉载荷满足规范对堆内构件应力强度要求的情况下,尽量减小冷态间隙,从而控制热稳态间隙,确保堆内无效旁流最少;间隙的设计不能影响堆内构件吊装。

冷态工况,吊篮出口管嘴与压力容器出口接管底部凸台间的最小间隙为

$$\delta_2 = \Delta_5 + t_1 + t_2 - \Delta_6 \quad (8)$$

式中: $\Delta_5$ 为吊篮出口管嘴与压力容器出口接管底部凸台间的瞬态间隙变化幅度,与升降温速率有关; $\Delta_6$ 为吊篮出口管嘴与压力容器出口接管底部凸台间最大允许干涉量,在此干涉量下吊篮筒体和吊篮管嘴达到了极限承载力; $t_1$ 为吊篮出口管嘴圆柱度; $t_2$ 为压力容器出口接管底部凸台内端面圆柱度。

### 3) 径向支承键与径向支承块间径向间隙

径向支承键与径向支承块间径向间隙设计原则:在满足瞬态工况下径向支承键与径向支承块无干涉情况下,尽量减小冷态间隙,从而控制热稳态间隙,以便减小事故工况下径向支承键对径向支承块的冲击。

冷态工况,径向支承键与径向支承块间径向最小间隙为

$$\delta_3 = \Delta_7 \quad (9)$$

式中: $\Delta_7$ 为径向支承键与径向支承块间径向间隙变化幅度,与升降温速率有关。

## 3 华龙一号反应堆关键间隙优化设计

### 3.1 分析模型

分析有限元模型如图1所示,边界条件见图2。分析模型为二维轴对称模型,模型含吊篮筒体、压力容器壳体、吊篮出口管嘴及压力容器出口接管、径向支承键及径向支承块。

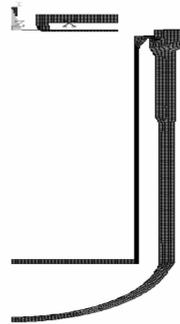


图1 分析有限元模型

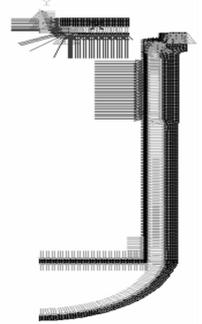


图2 分析边界条件

### 3.2 材料性能参数

反应堆压力容器材料为16MND5,压力容器内壁堆焊层材料为308L+309L,吊篮组件材料为Z2CN19-10(控氮)。各材料的部分物性参数分别如表1及表2所示。

表1 16MND5 材料物性参数

温度/°C	20	50	100	150	200	250	300	350
热导率/( $10^{-3} \cdot W \cdot mm^{-1} \cdot K^{-1}$ )	37.7	38.6	39.9	40.5	40.5	40.2	39.5	38.7
比热/J/(kg · K)	447	460	484	504	524	547	567	590
热膨胀系数/( $10^{-6} \cdot K^{-1}$ )	11.22	11.45	11.79	12.14	12.47	12.78	13.08	13.40
弹性模量/( $10^3 \cdot MPa$ )	204	203	200	197	193	189	185	180
密度/( $g \cdot cm^{-3}$ )					7.8			
泊松比					0.3			

表2 308L+309L及Z2CN19-10(控氮)材料物性参数

温度/°C	20	50	100	150	200	250	300	350
热导率/( $10^{-3} \cdot \text{W} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	14.7	15.2	15.8	16.7	17.2	18.0	18.6	19.3
比热/ $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	456	474	494	519	527	540	544	550
热膨胀系数/( $10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$ )	16.40	16.54	16.80	17.04	17.20	17.50	17.70	17.90
弹性模量/( $10^3 \cdot \text{MPa}$ )	197	195	191.5	187.5	184	180	176.5	172
密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	7.9							
泊松比	0.3							

### 3.3 分析压力及温度输入

分析模型边界条件如图2所示,压力容器内表面施加压力(或压力瞬态),压力容器内表面及吊篮筒各部位施加相应温度(或温度瞬态)及对流传热系数<sup>[1-11]</sup>。由于在正常运行及瞬态运行时吊篮筒内外压差小,其对堆内间隙的影响可以忽略。

反应堆关键间隙分析输入包括:

1) 一回路冷却剂升温瞬态、压力瞬态

a) 一回路冷却剂升温压力及温度瞬态

一回路冷却剂升温瞬态分为三个阶段:

第一阶段:在2.3 MPa的冷却剂压力下,一回路冷却剂由冷态温度(2~60°C)线性升温至177°C;

第二阶段:一回路冷却剂在2.3 MPa、177°C的恒压、恒温工况下建立稳压器气腔,此阶段耗时约2.4 h;

第三阶段:一回路冷却剂由177°C线性升温至291.7°C,压力由2.3 MPa近似线性升至15.5 MPa,压力升至15.5 MPa所用的时间比温度升至291.7°C所用的时间约少0.4 h。

本文研究了以下升温瞬态下堆内关键间隙变化情况:

- 第一阶段升温速率55°C/h,第三阶段40°C/h;
- 第一阶段升温速率40°C/h,第三阶段35°C/h;
- 第一阶段升温速率28°C/h,第三阶段30°C/h;
- 第一阶段升温速率19°C/h,第三阶段21°C/h。

b) 一回路冷却剂降温瞬态

温度瞬态:

第一阶段:一回路冷却剂由291°C线性降温(55°C/h)至120°C;

第二阶段:一回路冷却剂由120°C线性降温(40°C/h)至60°C。

压力瞬态:一回路冷却剂由15.5 MPa降至2.3 MPa,历时2.25 h;经过4.4 h,压力陡降至0。

2) 稳态参数

稳态运行时一回路冷却剂压力15.5 MPa,压力容器入口水温度为292.2°C,出口水温度为327.8°C。

3) 对流传热系数

吊篮内表面传热系数: $50 \times 10^3 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$

下降环腔传热系数: $12.64 \times 10^3 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$

下封头内表面传热系数: $16.1 \times 10^3 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$

### 3.4 分析结果

不同的一回路冷却剂升温速率下反应堆内部关键间隙瞬态见图3~图5所示,一回路冷却剂降温瞬态过程中吊篮筒体与压力容器壁间间隙瞬态见图6所示。

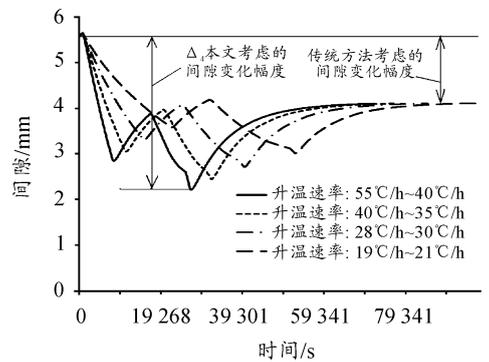


图3 吊篮法兰与压力容器法兰间间隙瞬态

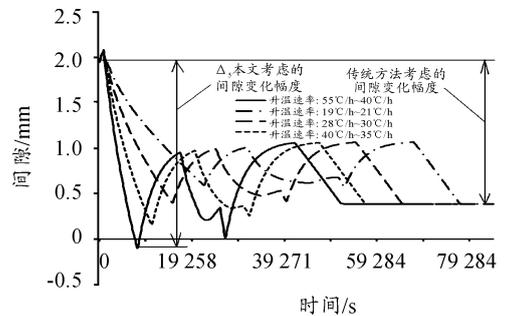


图4 吊篮出口管嘴与压力容器出口接管凸台间间隙瞬态

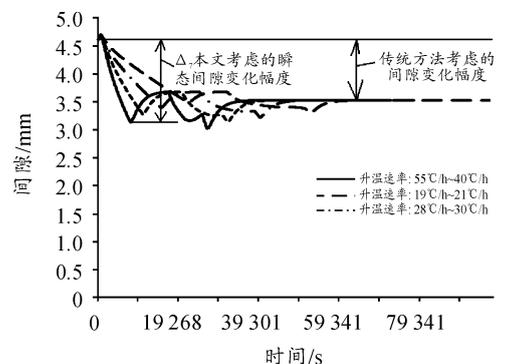


图5 径向支承键与压力容器径向支承块间间隙瞬态

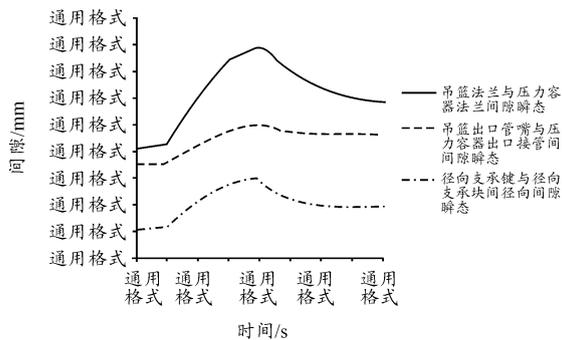


图6 一回路冷却剂降温瞬态过程中吊篮筒体与压力容器筒壁间间隙瞬态

由图3~图6可以看出:

1) 在一回路系统升降温瞬态过程中反应堆内关键间隙将发生变化,间隙为时间的函数。

2) 反应堆内关键间隙变化幅度( $\Delta_4$ 、 $\Delta_5$ 、 $\Delta_7$ )随着升温速率的增加而增大。

### 3.5 反应堆内关键间隙优化设计

将不同升温速率下计算所得关键间隙变化幅度( $\Delta_4$ 、 $\Delta_5$ 、 $\Delta_7$ )代入式(7)~式(9),即可优化设计反应堆内关键间隙( $\delta_1$ 、 $\delta_2$ 、 $\delta_3$ )。

## 4 结论

1) 反应堆内间隙设计是反应堆堆内构件设计的重要内容。传统设计反应堆压力容器与堆内构件间的间隙时,都是采用简单的线性热胀法计算堆内构件与压力容器间的热胀差,这种方法仅考虑了冷态和热稳态堆内构件与压力容器间热胀差,设计方法比较粗糙。本研究提供了一个优化设计反应堆内关键间隙的新的思路和方法,此方法充分考虑了堆内构件与压力容器间间隙变化的瞬态过程,且充分考虑了温度瞬态和压力瞬态的耦合作用,设计方法更为合理可靠,既能确保堆内构件应力水平满足规范要求,又能充分降低堆内无效漏流。

2) 由于反应堆压力容器筒体与吊篮筒体传热面积的差异、反应堆内部各腔室对流传热系数不同以及反应堆结构各部位尺寸存在的差异,在一回路冷却剂升温瞬态过程中,吊篮筒体与压力容器筒壁间存在温差,吊篮筒壁温度高于压力容器筒壁温度,吊篮法兰部位温差最大,径向支承系统部位最小,并且随着一回路系统升温速率的减小,温差相应减小。同样的原因,在一回路冷却剂降温阶段,吊篮筒体与压力容器筒壁间存在温差,吊篮筒壁温度低于压力容器筒壁温度,吊篮法兰部位温差最大,径向支承系统部位最小。

3) 由于在一回路冷却剂升温瞬态过程中吊篮筒体与压力容器筒壁间存在温差,以及堆内构件所用奥氏体不锈钢与压力容器所用低合金钢在热胀系数方面存在的差异,相比于冷态安装间隙,热态时反应堆内部压力容器与堆内构件间间隙将减小。此间隙减小的幅度与一回路冷却剂升温速率有关,增加升温速率,间隙减小的幅度将增加。由于吊篮出口

管嘴与压力容器出口接管凸台间间隙较小,当一回路冷却剂升温速率超过一定值后,吊篮出口管嘴与压力容器出口接管凸台会发生瞬态干涉,产生干涉载荷,间隙设计必须确保此干涉载荷不会使堆内构件应力强度超过规范要求。相比于热稳态间隙,在系统降温瞬态过程中,压力容器与堆内构件间间隙有增大的趋势。

4) 减小安装时吊篮出口管嘴与压力容器出口接管底部凸台间的冷态间隙,其热稳态间隙将随之减小,这可降低正常运行时反应堆内部无效漏流;但是,在一定的升温速率下,吊篮出口管嘴与压力容器出口接管底部凸台间过小的冷态间隙可能会造成吊篮筒体与压力容器间过大的瞬态干涉载荷。如果在减小冷态间隙时,适当降低一回路冷却剂升温速率,此矛盾将被克服。

5) 由于吊篮法兰与压力容器法兰间以及径向支承键与径向支承块间径向安装间隙较大,热瞬态过程中吊篮筒体与压力容器筒体不会在此两个位置发生干涉。

## 参考文献:

- [1] 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(6):13-15.
- [2] 张翟.压紧弹性环的设计方案优化分析[C]//第17届全国反应堆结构力学会议论文集.出版地不详:[出版单位不详],2012.
- [3] 黄磊,丁宗华.CAP1400堆内构件压紧弹性环的优化设计[J].机械工程师,2015(6):123-125.
- [4] 郭国伟.核反应堆工程设计[M].北京:原子能出版社,1997.
- [5] 孙中宁.核动力设备[M].哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2003.
- [6] 赵兆颐,朱瑞安.反应堆热工流体力学[M].北京:清华大学出版社,1992.
- [7] 姚伟达,谢永诚.模态叠加法在解间隙动力问题中的应用[C]//全国反应堆结构力学会议论文集.出版地不详:[出版单位不详],1998.
- [8] 于雷,关欣.反应堆压力容器与堆内构件接管的热态间隙计算[J].科技创新与应用,2015(15):101-101.
- [9] 段孟强,陈五星,季晨龙.压水堆一回路系统热工水力稳态计算模型的建立[J].四川兵工学报,2013,34(12):132-134.
- [10] 刘家磊,蔡琦,张杨伟,等.稳压器在船用核反应堆舱室散热的模拟研究[J].四川兵工学报,2013,34(11):48-51.
- [11] 左巧林,秋穗正,王明军.恰希玛核电厂压力容器各关键部位在PTS瞬态下的温度场研究[J].原子能科学技术,2016,50(05):829-834.
- [12] 张丽屏,杜娟,刘文进.反应堆压力容器接管三维有限元分析[J].东方电气评论,2012,26(4):62-67.
- [13] 徐芝纶.弹性力学[M].北京:高等教育出版社,2006.