

文章编号: 0258-0926(2014)04-0031-04; doi: 10.13832/j.jnpe.2014.04.0031

# 蒸汽发生器一次侧人孔螺栓连接结构 三维有限元分析

陈 涛<sup>1</sup>, 陈蓉<sup>1</sup>, 张云波<sup>2</sup>, 路 燕<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 深圳中广核工程设计有限公司, 518124; <sup>2</sup> 环境保护部核与辐射安全中心, 北京, 100082

**摘要:** 采用三维有限元模型, 对核电厂蒸汽发生器一次侧人孔螺栓进行运行工况下的瞬态分析。综合考虑螺栓温度滞后、法兰转角及法兰与垫片嵌合面的弹性接触等因素, 解决螺栓孔及人孔盖与法兰之间的空气传热问题, 实现螺栓预紧模拟及螺栓载荷的动态提取, 较真实地模拟出系统的变形协调性及传热特性, 并根据规范对螺栓密封状态进行验证, 对法兰连接结构及螺栓本身进行疲劳评价。

**关键词:** 蒸汽发生器; 螺栓法兰; 密封分析; 瞬态分析

**中图分类号:** TL353<sup>+</sup>.11 **文献标志码:** A

## 0 引言

蒸汽发生器(SG)一次侧人孔位于 SG 下部, 人孔盖采用螺栓法兰与 SG 下封头连接。此连接结构属于核岛主设备承压边界, 其密封可靠性对保证主系统及核电厂的安全稳定运行具有重大意义。本文对 SG 一次侧人孔进行核电站 40 a 寿命下的瞬态密封分析, 建立三维力学模型与传热的模型, 分析在瞬态温度、压力和螺栓预紧力等载荷作用下, 螺栓连接的可靠性及连接件的应力、变形和密封面状态。

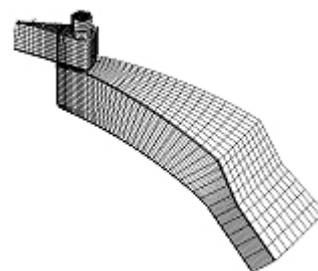
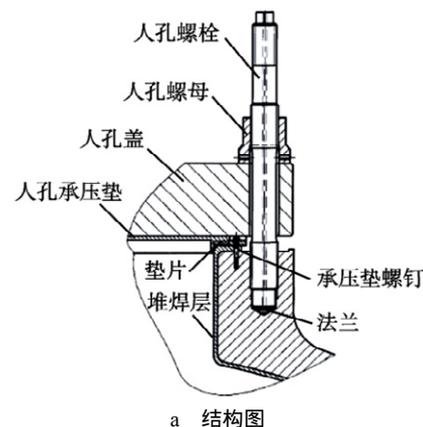
## 1 力学模型

### 1.1 三维有限元模型的建立

SG 一次侧人孔为轴对称结构, 利用 ANSYS 软件建立三维有限元模型(图 1), 在计算的初始时刻通过预紧单元施加螺栓预紧力, 从计算结果中提取每一时间节点的螺栓载荷, 从而实现螺栓力的动态监测。人孔的三维有限元模型如下:

(1) 模型组成: 由于结构、载荷和约束都是轴对称的, 故采用 1/16 模型进行分析。模型由下述单元组成: 蒸汽发生器下封头、堆焊层、法兰、人孔盖、人孔承压垫、螺栓、螺母、垫片。

(2) 单元类型: 螺栓、螺母、人孔盖、法兰和下封头采用 ANSYS 程序的 SOLID185 实体单元。法兰与垫片嵌合面、螺母与顶盖接触面采用



b 有限元模型

图 1 人孔结构及有限元模型

Fig. 1 SG Primary Manway Drawing and Finite Element Model

面-面接触单元, 考虑接触面上的摩擦力, 保证法兰在内压作用下有正确的转角。采用预紧单元及 SLOAD 命令施加预紧力。

(3) 传热模型:认为模型外表面与空气绝热,并考虑模型内表面与冷却剂之间的对流换热。螺栓与螺栓孔之间、人孔盖和法兰之间建立实体网格,用等效导热系数模拟空气传热<sup>[1]</sup>。

(4) 边界约束:在人孔盖中心线处约束其径向和周向位移,在模型两对称面施加对称约束,约束其周向位移。为避免刚体位移,在下封头端面施加环向约束<sup>[2]</sup>。

(5) 施加的载荷:在下封头、法兰及人孔承压内表面施加瞬态压力和温度载荷,垫片有效承压面积以内区域可能与法兰表面不接触,同样需施加上述载荷。

## 1.2 模型验证

实际工程中,人孔关闭时螺栓残余预紧位移一般为 0.25 mm,对应预紧力为  $3.70 \times 10^6$  N。为了验证所建模型的正确性,在力学模型上施加同样预紧位移,计算得到的对应螺栓载荷为  $3.65 \times 10^6$  N,表明模型分析结果与实际结构相符。

热瞬态密封分析的难点之一在于热物性量难以精确确定,热接触边界热阻无法给出,影响计算的准确性<sup>[3]</sup>。选取 7 个点,分布于螺栓 3 个典型截面的内、外侧及圆心位置。将三维分析获得的螺栓温度随时间变化曲线与结构内表面瞬态温度变化曲线进行比较。比较后可见螺栓温度滞后变化情况:螺栓下端温度滞后于上端温度,同一截面外侧温度滞后于内侧温度,轴向各圆心点温度基本是同一截面上内、外侧温度的平均值。据此认为模型传热特性合理,热力学属性数据可用于模型热分析。

## 2 结构的力学分析

对于人孔螺栓连接结构,既要考虑螺栓连接的可靠性即密封性,又要考虑连接件的疲劳强度问题。下面分别对其进行分析。

### 2.1 密封分析

螺栓力变化是封头和筒体变形、法兰转动及螺栓弯曲综合作用的结果。由于接触状态受螺栓力控制,需要对螺栓力进行动态检测<sup>[3]</sup>。

通过计算螺栓载荷比  $R=S_{inf}/S_0$  来验证结构的密封性能。其中,  $S_{inf}$  是保守施加最小预紧位移时螺栓载荷;  $S_0=0.25\pi G^2 P+2\pi b G m P$  为 ASME 规范<sup>[4]</sup>附录 XI 中“设计工况下的螺栓载荷”,为保证密封所需要的最小螺栓载荷;  $G$  为垫片有效承压内

径  $b$  为垫片接触宽度  $m$  为垫片系数  $P$  为内压。

在模型上仅施加温度载荷。结果显示:螺栓载荷随着温度的上升而变大,随着温度的降低而变小,其变化速率与升降温速率正相关,温度保持阶段(恒温),螺栓载荷逐渐下降。同样仅施加内压载荷,分析螺栓力随压力变化情况。内压升高螺栓力(轴向)变小,内压降低螺栓力变大,两者基本呈线性比例关系。

考虑电厂运行及假设事件的 45 个瞬态,包括升温、冷却、水压试验以及维修时开关人孔盖后的螺栓预紧。采用间接耦合法,将热分析结果与机械载荷耦合进行结构分析。根据各时间节点的螺栓载荷,计算各瞬态下的最小螺栓载荷比  $R_{min}$ 。结果最小的 5 个瞬态下  $R_{min}$  值均大于 1(表 1),结构的密封性可以得到保证。

表 1  $R_{min}$  最小的 5 个瞬态下螺栓载荷变化  
Table 1 Change of Bolt Load under Five Transients

瞬态序号	时间/s	温度/ /	压力/ /MPa	$S_{inf}$ / /MN	$S_0$ / /MN	$R_{min}$
1	610	280	17.01	3.986	3.319	1.201
2	366	265	16.15	3.820	3.165	1.207
3	1438	290	16.12	3.878	3.158	1.228
4	0.02	60	21.88	5.254	4.213	1.247
5	950	286	16.03	3.986	3.141	1.269

### 2.2 疲劳分析

2.2.1 连接法兰的疲劳分析 依据 RCC-M 规范<sup>[5]</sup>,连接件的一次+二次应力幅值  $S_n < 3S_m$ 。其中,  $S_m$  为材料的基本许用应力强度,取值为  $S_m = 184$  MPa; 疲劳累积使用系数  $U_1 < 1$ 。

在瞬态温度、压力载荷和螺栓预紧力(保守地取公差上限)作用下,利用 ANSYS 软件 Fatigue 模块进行疲劳分析。使用雨流计数法得到随机载荷历程对应的多个应力幅值,然后用 Miner 线性累积损伤理论将对应上述应力幅值的使用系数(应力幅值出现次数与许用循环次数的比值)求和,得到各评价位置的疲劳累积使用系数  $U_1$ 。对计算结果进行线性化处理,共选取 20 条路径进行评价。最大值结果见表 2,可见所有截面上应力幅值小于  $3S_m$ ,疲劳累积使用系数  $U_1 < 1$ ,连接件疲劳强度满足规范要求。

2.2.2 螺栓的校核 螺栓的校核准则为:螺杆、螺纹部位由轴向力  $S$ 、弯矩  $M$ 、剪力  $H$  引起的薄膜应力小于  $2S_m$ ,最大薄膜+弯曲应力小于  $3S_m$ 。瞬态最高温度和预紧工况(室温)下,  $S_m$  的值分别

表 2 连接件疲劳分析结果

Table 2 Fatigue Analysis Results of Joint Structure

零件	评价位置	$S_n$ /MPa	$U_1$
人孔盖	螺栓孔内壁	255.50	0.00933
法兰和上封头	法兰与封头连接处	277.72	0.07255
法兰和上封头	法兰与封头连接处	264.51	0.07778

为204.8 MPa和241.3 MPa；螺栓表面疲劳累积使用系数小于1。

薄膜应力  $S_i = \sqrt{\sigma_S^2 + 4\tau_H^2}$ 。其中， $\sigma_S$  为S产生的应力； $\tau_H$  为H产生的应力。薄膜+弯曲应力计算公式根据评价位置不同而不同。螺栓的评价位置见图2，左侧为容器内侧。

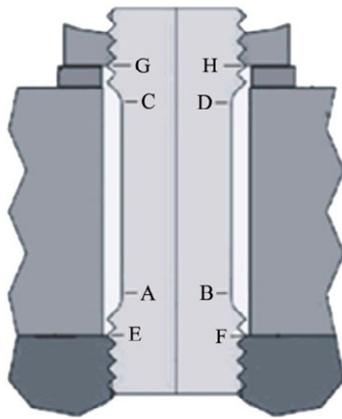


图 2 螺栓疲劳评价位置图

Fig. 2 Diagram of Fatigue Analysis Location of the Bolt

图 2 中 A、B、C、D 处的薄膜+弯曲应力( $S_A$ 、 $S_B$ 、 $S_C$ 、 $S_D$ ) 由下述公式计算：

$$S_A = \sqrt{(\sigma_S - \sigma_M - \sigma_H)^2 + 4\tau_H^2}$$

$$S_B = \sqrt{(\sigma_S + \sigma_M + \sigma_H)^2 + 4\tau_H^2}$$

$$S_C = \sqrt{(\sigma_S - \sigma_M)^2 + 4\tau_H^2}$$

$$S_D = \sqrt{(\sigma_S + \sigma_M)^2 + 4\tau_H^2}$$

$$\sigma_S = \frac{4S}{n\pi(D^2 - d^2)} ; \tau_H = \frac{4H}{n\pi(D^2 - d^2)}$$

由弯矩M产生的应力： $\sigma_M = \frac{32DM}{n\pi(D^4 - d^4)}$ 。

式中， $n$ 为螺栓个数； $D$ 为螺杆直径； $d$ 为螺杆孔直径； $l$ 为H到所评价位置的力矩。载荷H还产生一个额外的弯矩  $M' = -lH$ 。M' 与弯矩M叠加产生额外的应力如下：

$$\sigma_H = \frac{-32DM'}{n\pi(D^4 - d^4)}$$

瞬态分析之后得到各点瞬态最大薄膜应力、薄膜+弯曲应力，结果见表3。

除考虑上述瞬态工况，还需考虑螺栓拉伸达最大伸长量时是否满足以上两准则。螺栓最大伸长量为0.90 mm，对应预紧力为 $9.94 \times 10^6$  N。采用同样公式校核薄膜应力、最大薄膜+弯曲应力。

对受力区域进行疲劳分析，应力集中系数取4，参考RCC-M附录图Z14.3疲劳曲线进行评价， $U_1$  最大值位于点E处。

螺纹部位由S、M、H产生的平均应力可以通过截面积比进行修正。由于螺杆部位的截面积比螺纹部位小，则螺纹部位可以被螺杆部位的计算结果所包络，即同样满意规范要求。

表 3 螺栓疲劳分析结果

Tab. 3 Fatigue Analysis Results of Bolt

螺杆部位最大值	瞬态工况	预紧工况
$S_I$ /MPa	345.50	475.7
$S_A$ /MPa	475.59	679.4
$S_B$ /MPa	322.01	505.3
$S_C$ /MPa	331.22	584.8
$S_D$ /MPa	464.54	581.3
$U_1$	—	—
螺纹部位最大值	瞬态工况	预紧工况
$S_I$ /MPa	修正计算	修正计算
$S_E$ /MPa	482.14	646.4
$S_F$ /MPa	315.86	479.9
$S_G$ /MPa	327.47	562.9
$S_H$ /MPa	473.21	568.5
$U_1$	0.5234	—

注： $S_E$ 、 $S_F$ 、 $S_G$ 、 $S_H$ 为E、F、G、H的薄膜+弯曲应力。

综上，螺栓瞬态工况下平均应力小于 $2S_m$ ，最大应力小于 $3S_m$ ，预紧工况下平均应力小于 $2S_m$ ，最大应力小于 $3S_m$ ，疲劳累积使用系数 $U_1$ 小于1，螺栓满足法国核岛设备设计建造协会RCC-M规范要求。

### 3 结束语

采用三维有限元模型对核电厂 SG 一次侧人孔螺栓及其连接结构进行瞬态密封分析。综合考虑了螺栓温度滞后、法兰转角及法兰与垫片嵌合面的弹塑性接触等关键因素，从结构和热分析两方面对模型进行验证，对螺栓力对温度和压力载荷的敏感性进行了探索。由分析可知其密封性可

以得到保证,螺栓及其连接件的疲劳强度满足规范要求。

工程实践中螺栓往往偏保守设计,同时考虑螺栓及其连接结构的三维整体性,综合考虑了整个连接系统的变形协调性及传热特性,本文的计算方法有效降低简化模型在等效时导致的误差,计算结果更符合实际,可用于SG、稳压器人孔及其他类似结构的密封分析。其结果对螺栓选取及结构设计具有参考价值,对试验、安装等工程问题具有指导意义。

螺栓的校核还可以采用积分的方式计算评价截面上的应力,本文保守采用公式计算。

#### 参考文献

- [1] 周先军,仇性启,张兵,等.螺栓法兰接头瞬态温度三维有限元分析[J].润滑与密封, Vol132: 6, 64-67, 2007. 06.
- [2] 王定标,姜逢章,雷风林,等.活节螺栓法兰垫片连接系统有限元分析与结构改进[J].机械设计与制造, 2011., Vol134: 1,3 2-34.
- [3] 曲家棣,盛贤科,窦一康,等.300MW核电站反应堆压力容器密封性能综合研究[R].中国核科技报告 CNIC-00331.中国核情报中心.1989.
- [4] ASME Boiler and pressure vessel code[S]. 2004.
- [5] RCC-M. Design and construction rules for mechanical components of PWR nuclear islands[S]. Edition June 2000, 1<sup>st</sup> modification + addendum 2002.

## Three-Dimensional Finite Element Analysis for Bolted Flange Joint Structure of Primary Manway of Steam Generator

Chen Tao, Chen Rong, Zhang Yunbo, Lu Yan

1 China Nuclear Power Design Company, Ltd, Shenzhen, 518124, China ;

2 Nuclear and Radiation Safety Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing, 100082, China

**Abstract:** Three-dimensional finite element model for bolted flange joint structure of primary manway of steam generator was built considering temperature lag of the bolt, turning angle of the flange and contact between gasket and the flange, nut and the cover. Transient analysis was carried out under normal and upset conditions. Problem of air heat transfer in the bolt hole and between the cover and the flange were solved. Bolt pretension load was applied, and the change of the bolt load was obtained along with the time. Mechanical and heat characteristics of the joint structure was simulated. Leaktightness was validated and fatigue stress and displacement of the joint structure were estimated according to regulations.

**Keywords:** Steam generator; Bolted flange; Leaktightness validation; Transient analysis

#### 作者简介:

陈涛(1981—),女,工程师。2006年毕业于大连理工大学机械电子工程专业,获硕士学位。现从事反应堆结构力学分析工作。

陈蓉(1985—),女,工程师。2010年毕业于西安交通大学工程力学专业,获硕士学位。现从事反应堆结构力学分析工作。

张云波(1982—),男,工程师。2008年毕业于华北电力大学控制理论与控制工程专业,获硕士学位。现从事核电厂安全审评工作。

(责任编辑:王中强)