

# 蒸汽发生器水室隔板的简化 对下部组件等应力的影响

金挺

(深圳中广核工程设计有限公司, 上海 200030)

**摘要:** 蒸汽发生器内部部件较为复杂, 载荷作用下一次侧的力学行为通常会影响到管板上部的部件, 如支撑板和管束。通过对水室隔板的不同简化建立下部组件的轴对称和三维模型, 考察对应力分布及支撑板和管束的影响。研究表明: 轴对称模型能较为准确地得到应力强度分布, 且较为保守。管板在不同模型下的位移差别较大, 从而影响管板上部的支撑板以及管束的力学行为。

**关键词:** 下部组件; 管板; 管束支撑板; 管束; 应力分析

中图分类号: TL351

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2008)S1-0694-06

## Influence on Stress of Lower Assembly With Different Steam Generator Partition Plates Simplification

JIN Ting

(China Nuclear Power Design Company, Ltd. (Shenzhen), Shanghai 200030, China)

**Abstract:** Internal components of steam generator are complex, and the reaction of primary side under loads will influence the components above the tube sheet, such as support plate and tube bundle. The axisymmetric and 3D model of lower assembly with the different simplifications of partition plate were established to study the influence of stress distribution of support plate and tube bundle. The results obtained by axisymmetric model are correct and conservative. Displacements of tube sheet with different models are variant which influence the mechanical property of support plate and tube bundle.

**Key words:** lower assembly; tube sheet; tube support; tube bundle; stress analysis

蒸汽发生器(SG)在核电站中是一重要的主设备,其结构较为复杂,使得在应力分析时对水室隔板采用不同的简化不仅会影响下部组件的应力,且会影响SG拉杆、管束支撑板及U形换热管。本文通过水室隔板的3种不同简化方法建立3种不同的下部组件模型,考察对应力

分布及支撑板和管束的影响。

### 1 SG 下部组件

#### 1.1 下部组件模型

由于重点考察的区域为管板与二次侧壳体、管板与下封头连接处,故建立模型时忽略一

次侧的进、出水接管和人孔,以简化模型。选取一定长度的二次侧壳体,使边界约束几乎不对重点分析部位有影响。在此基础上,对水室隔板采取 3 种不同的简化,考察下部组件的应力强度。3 种模型分别为:忽略水室隔板,建立轴对称模型;将水室隔板等效为集中力,建立轴对称模型;考虑水室隔板,建立三维实体模型。模型示于图 1、2。

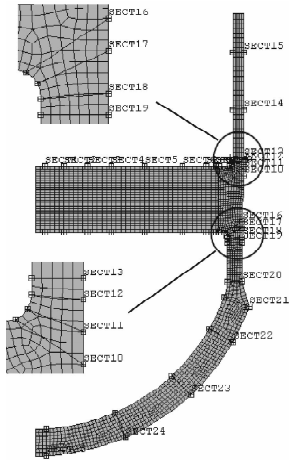


图 1 轴对称模型

Fig. 1 Axisymmetric model

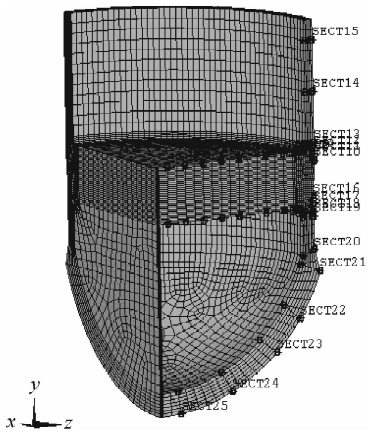


图 2 三维实体模型

Fig. 2 Three-dimensional model

在 3 个模型的相应位置建立 25 个截面,以比较这些截面上的薄膜应力。其中,三维模型的  $zy$  平面和  $xy$  平面(水室隔板所在平面)对应位置分别建立 25 个截面(经计算,这两个平面上的截面结果包络了其余平面)。对于管板孔区,将其等效为几何上连续的实体<sup>[1]</sup>,并由几

何形状得到韧带系数  $\eta=0.2927$ 。进行刚度折算后,得到等效弹性模量和等效泊松比。此区域的结果需修正,方法为用所得结果除以韧带系数  $\eta$ 。模型各部件的材料参数列于表 1。

表 1 部件的材料属性

Table 1 Material property of each component

部件	弹性模量/MPa	泊松比	温度/℃
下封头	180 700	0.3	343
管板孔区	74 087	0.2	343
管板实心区	180 700	0.3	343
二次侧壳体	183 400	0.3	316

采用有限元分析软件 ANSYS,对轴对称模型采用四边形网格划分,三维实体模型采用 1/4 模型,六面体网格划分。分别在一次侧和二次侧施加压力,与水室隔板作用等效的集中力施加于对称轴上,且平均分配到每个节点。集中力的大小通过如下方法得到:在一次侧、二次侧压差作用下,通过调节加载于轴对称模型上的集中力,使管板中心线上节点的  $U_y$  位移量与三维实体模型一致,此时的集中力即等效在此载荷下的水室隔板作用。

### 1.2 下部组件的结果和讨论

使用 ANSYS 对模型计算并进行后处理,得到模型应力强度分布及各截面的薄膜应力和弯曲应力。模型的应力强度分布示于图 3、4,所有考虑截面上的薄膜应力及一次薄膜+弯曲应力结果示于图 5、6(3D 模型取包络值)。各模型的最大应力强度列于表 2。由图 3、4 可

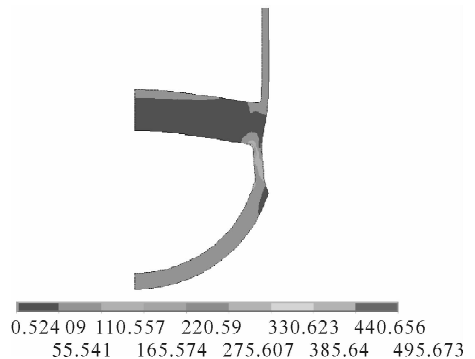


图 3 轴对称模型应力强度分布

Fig. 3 Stress intensity distribution of axisymmetric model

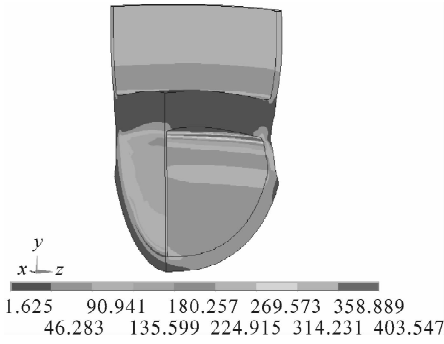


图4 三维模型应力强度分布

Fig. 4 Stress intensity distribution of 3D model

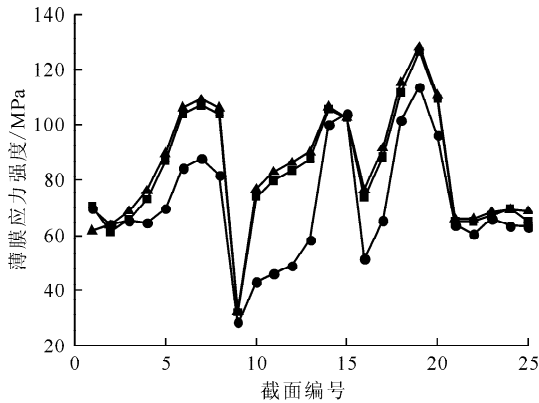


图5 各个截面的薄膜应力

Fig. 5 Membrane stress of each section

▲——轴对称模型; ■——轴对称模型+集中力;  
●——3D模型  $z_y$  和  $x_y$  平面包络值

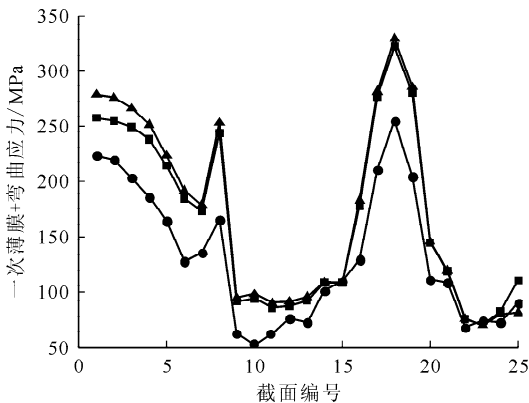


图6 各个截面的一次薄膜+弯曲应力

Fig. 6 Membrane + bending stress of each section

▲——轴对称模型; ■——轴对称模型+集中力;  
●——3D模型  $z_y$  和  $x_y$  平面包络值

知,轴对称模型与三维模型的最大应力强度位置相同,均在管板与下封头连接处。表2中两

表2 不同压差下的应力强度最大值

Table 2 Maximum stress intensity under pressures

压差/ MPa	应力强度最大值/MPa			
	轴对称 模型	轴对称模型+ 集中力	3D模型 $z_y$ 平面	3D模型 $x_y$ 平面
11.5	495.673	486.182	403.547	95.8
7.9	399.146	392.226	333.231	80.342

个轴对称模型的应力强度最大值相差不多,图5、6中相同位置的薄膜应力强度与一次薄膜+弯曲应力曲线几乎重叠。可见,以集中力的形式代替水室隔板只会影响管板的中心区域,对管板与壳体的连接区域影响不大。

由表2和图4可知,三维模型的应力强度最大值出现在  $z_y$  平面,数值比轴对称模型小约20%。图5、6中3条曲线的形状走势基本一致,三维模型的曲线几乎均在轴对称模型的下方,可见,轴对称模型分析的正确性且具有保守性。比较三维模型的  $z_y$  平面和  $x_y$  平面,由图4可知,水室隔板对一次侧的影响较大,特别是两个平面上的最大应力强度相差很大,  $z_y$  平面的最大应力强度约为  $x_y$  平面的4倍。而对二次侧,水室隔板的影响则很小,可忽略。因水室隔板的作用,管板与封头连接处的应力值由  $z_y$  平面到  $x_y$  平面逐渐减小。

## 2 SG 支撑板

### 2.1 管板位移的影响

SG管板上端面承受二次侧压力,下端面承受一次侧压力。管板上还焊接4454根U形换热管以及连接14根拉杆,上方还有1层流量分配板和9层管束支撑板。可见,管板的变形对拉杆、支撑板和管束均有影响。文献[2-3]未考虑管板对管板上部部件的影响,本工作在对下部组件分析的基础上继续开展对支撑板和管束的分析。

在不同的模型中,相同载荷作用下管板上端面的位移不同。由于管板竖直方向位移直接传递到拉杆上,故先考察管板与拉杆连接点的位移。3种模型在压差为7.9 MPa的载荷作用下,拉杆与管板的连接处A、B、C、D4点在竖直方向的位移量列于表3。管板与拉杆连接处示意图示于图7。

表 3 载荷为 7.9 MPa 时 A、B、C、D 4 点的位移量  
Table 3 Displacement of point A, B, C, D under pressure 7.9 MPa

位置	坐标(x,z)	3D 模型位移量/mm	轴对称模型+集中力位移量/mm	轴对称模型位移量/mm
A	(576,335.6)	0.46	1.374	1.443
B	(0,664.7)	0.536	1.374	1.443
C	(1 371.5,582.5)	0.032	0.115	0.128
D	(576,1 377.9)	0.03	0.115	0.128

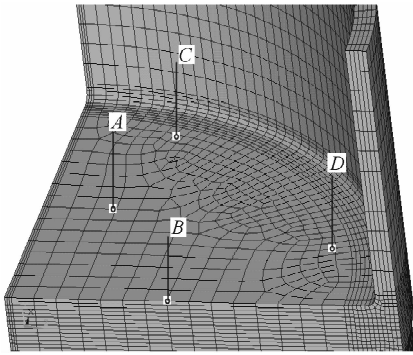


图 7 管板与拉杆连接处示意图

Fig. 7 Tube sheet and tie-rods connection

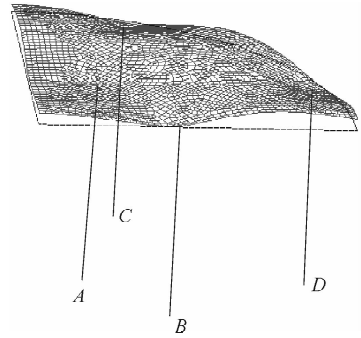


图 8 支撑板与拉杆模型示意图

Fig. 8 Model of support plate and tie-rods

## 2.2 支撑板和拉杆模型

由管板弯曲变形引起的拉杆位移直接传递到支撑板,使支撑板在载荷与拉杆造成的强迫位移共同作用下发生弯曲。当弯曲足够大时,支撑板造成管束发生强迫弯曲。

对支撑板建立 1/4 的支撑板模型,采用 shell63 单元模拟。由于每层拉杆的长度都很接近,所以,4 根拉杆长度均取 968 mm。拉杆采用 beam189 单元模拟,弹性模量为 194 140 MPa,泊松比为 0.3。整体模型示于图 8。

由于支撑板浸没于水中,考虑到水的附带效应,支撑板质量需作等效。本文采取较为简化且偏保守的方法计算支撑板的等效质量<sup>[4]</sup>。支撑板外围是连续实体,弹性模量  $E=194\ 140$  MPa,泊松比为 0.3。支撑板内部开有很多梅花孔,整体上不连续。为便于计算,将其等效为连续实体,等效方法与管板相同。等效后的弹性模量为 18 618 MPa,泊松比为 0.032。

将拉杆的下端固支,上端点预先施加由管板变形引起的位移。支撑板的两条对称线作对称约束,外围边线约束  $U_x$ 、 $U_y$  方向。将所有载

荷等效为压差施加于支撑板,并考虑不同层次的支撑板和拉杆的相互作用,计算支撑板的最大转角。

根据以往的计算经验,第 1~5 层支撑板的转角通常较小,因此,本文重点考察第 6~9 层的支撑板。由表 3 可知,轴对称模型(无集中力)与三维实体模型管板的竖直方向位移相差最大,因此,本文比较这两种模型引起的位移对支撑板的影响。

## 2.3 支撑板结果与讨论

将每层支撑板得到的偏转角度  $\text{rot } x$ 、 $\text{rot } y$  分量等效为偏转角度  $\alpha$ ,即  $\alpha = \sqrt{\text{rot}^2 x + \text{rot}^2 y}$ 。第 6~9 层的支撑板偏转角度最大值处的分量列于表 4,不同强迫位移引起的偏转角最大值示于图 9,典型的支撑板偏转角度分布示于图 10。

图 10 表明,由于拉杆的作用使支撑板在拉杆处的变形最小,不过变形梯度也最剧烈。在拉杆 C 和 D 处支撑板的转角相对于周围形成 2 个波峰,通常 D 处的数值比 C 处的略大。

对比 2D 和 3D 模型引起的结果(图 9),由于 2D 模型管板在 4 个拉杆处的位移较大,从

表4 第6~9层偏转角最大值处的分量  
Table 4 Components of maximum rotation  
at 6-9 level support plates

支撑板 编号	与轴对称模型相关的偏转角		与3D模型相关的偏转角	
	rot x/rad	rot y/rad	rot x/rad	rot y/rad
6	-0.009 369	0.002 189	-0.008 238	0.001 778
7	-0.010 889	0.002 489	-0.009 758	0.002 079
8	-0.012 205	0.002 747	-0.011 073	0.002 336
9	-0.013 234	0.002 946	-0.012 058	0.002 847

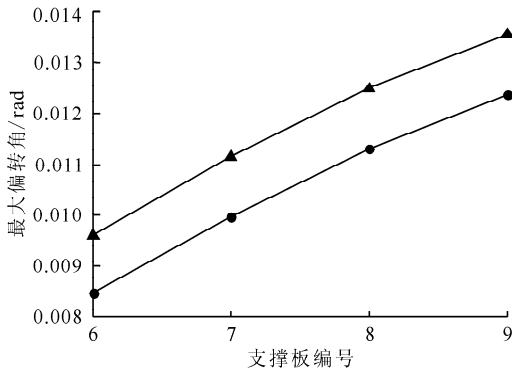


图9 与轴对称和三维模型相关的最大偏转角  
Fig. 9 Maximum rotation  
with axisymmetric & 3D model

▲——与轴对称模型相关; ●——与3D模型相关

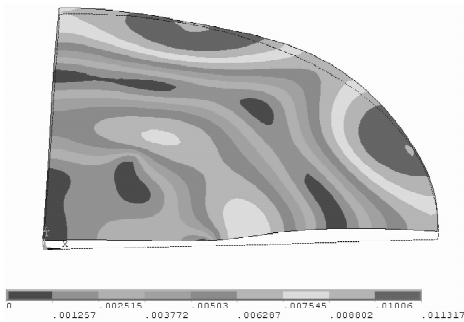


图10 某层支撑板的偏转角度分布  
Fig. 10 Rotation distribution of one support plate

而使得每层支撑板转角的最大值大于3D模型引起的结果。

### 3 SG管束

#### 3.1 管束模型

当支撑板某个位置的转角过大时,会引起管束的弯折。本文保守地认为支撑板的转角完全传递给管束,计算在此条件下管束的最大应力

值。由于U形管对称于水室隔板,因此,建立1/2模型进行分析,采用beam189单元模拟。343℃时,U形管弹性模量 $E=199\ 348\ \text{MPa}$ ,泊松比为0.3。

本文重点考察弯曲较大部位的应力,因此,模型较为简化。将U形管下端固支,U形管最上端作对称约束。第1~5层支撑板对应位置约束 $U_x$ 、 $U_y$ 和 $U_z$ 自由度,第6~9层支撑板对应位置按表4中的支撑板最大偏转角作为输入条件,作强迫偏转。计算结果示于图11、12。

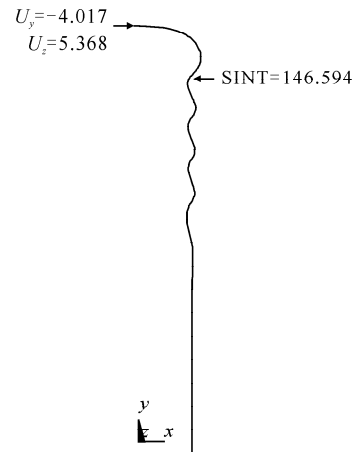


图11 轴对称模型相关的管束应力强度最大值  
Fig. 11 Maximum stress intensity  
with axisymmetric model

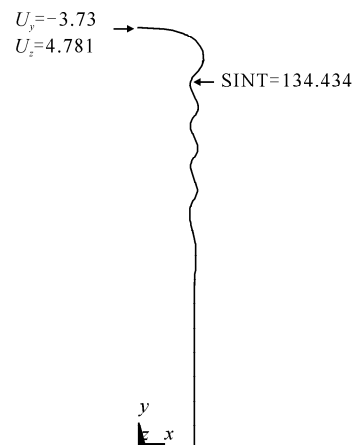


图12 三维模型相关的管束应力强度最大值  
Fig. 12 Maximum stress intensity with 3D model

#### 3.2 管束结果和讨论

图11、12显示轴对称模型相关的管束应力强度最大值、管束对称点的变形量均比三维模

型相关的大,两者相差 10%左右。可见,轴对称与三维实体模型管板的位移量差别会影响支撑板和管束的最大应力值以及变形量。

#### 4 结论

通过对水室隔板的不同简化建立 3 种不同的 SG 下部组件模型,分析 3 种不同模型对下部组件应力的影响。同时考虑到管板的变形对其上方部件的影响,本文着重比较了轴对称(无集中力)和三维实体模型对支撑板和管束的影响,得到如下结论。

1) 轴对称模型与三维实体模型的应力强度分布一致,所考察的截面薄膜应力与薄膜+弯曲应力走势相同。轴对称模型得到的结果偏保守,工程上可用轴对称模型对下部组件做应力分析。

2) 在相同载荷下,轴对称的管板位移量为三维实体模型的 3~4 倍。管板位移量的不同影响支撑板的最大偏转角相差 10%左右,引起管束在弯曲作用下的最大应力强度也相差 10%左右。轴对称模型对支撑板和管束的分析同样是偏保守的,进一步论证了轴对称模型的可行性。

本文对支撑板和管束的计算只是粗略的分析,下一步工作将综合下部组件、管束和支撑板建立三维实体模型,从整体上考虑下部组件对支撑板和管束的影响。

#### 参考文献:

- [1] SLOT T. Stress analysis of thick perforated plates [M]. [S. l.]: Technomic Publication, 1972: 161-175.
- [2] 徐定耿,叶维娟,王柏松. 核电站蒸汽发生器一次侧整体及管板三位有限元应力分析[R]. 北京:原子能出版社,1988.
- [3] 周昌玉,施南庚,戴树和. 秦山核电站蒸汽发生器一次侧的有限元应力分析[J]. 南京化工学院学报,1992,14(2):41-48.  
ZHOU Changyu, SHI Nangeng, DAI Shuhe. The finite element stress analysis of the primary part of steam generator at Qinshan Nuclear Power Station[J]. Journal of Nanjing Institute of Chemical Technology, 1992, 14(2): 41-48(in Chinese).
- [4] AMBILI M. Effect of finite fluid depth on the hydroelastic vibrations of circular and annular plates [J]. Journal of Sound and Vibration, 1996, 193(4): 909-925.