

# 中国实验快堆堆容器应力强度计算与评定

余华金

(中国原子能科学研究院 快堆工程部, 北京 102413)

**摘要:**概述了中国实验快堆(CEFR)堆容器应力强度的计算与评定过程,重点介绍了在计算与评定中遇到的等效热导率、温度场热应力计算、热冲击计算、套管接管力施加及复杂结构的粗细网格过渡等设计中需解决的问题。计算与评定结果表明:CEFR堆容器的应力强度满足《ASME规范》和《核电厂抗震设计规范》(GB50267-95)要求。

**关键词:**堆容器;ASME规范;应力强度;评定

**中图分类号:** TL351.6

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6931(2003)02-0116-05

## Calculation and Assessment of the Stress Intensity for the Main Vessel in China Experimental Fast Reactor

YU Hua-jin

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-95, Beijing 102413, China)

**Abstract:** The paper is concerned in the calculation and assessment of the stress intensity for main vessel in China experiment fast reactor(CEFR), and introduces stressly the new problems and methods related to the design, such as the assessments of class 1 components and high-temperature vessel, the calculations of the equivalent thermal conductivity, the temperature field and thermal stress, thermal shock, the cannula's load stress, and the gridding transition of the complex structure etc. The calculated results show that the stress intensity of vessel in CEFR meets the requirements of ASME code.

**Key words:** CEFR 'main vessel; ASME code; stress intensity; assessment

堆容器是中国实验快堆(CEFR)的重要部件。CEFR堆容器应力强度的计算与评定依据《ASME规范》<sup>[1]</sup>和《核电厂抗震设计规范》(GB50267-95)<sup>[2]</sup>,采用有限元方法和ANSYS5.4程序,以在设计中解决核安全一级设备和高温设备的评定、温度场热应力计算、热冲击计算、等效热导率、套管接管力施加及复杂

结构的粗细网格过渡等问题。

### 1 结构和材料

堆容器是用不锈钢材料焊制而成的双层壳体,由保护容器、主容器和堆容器支承裙构成。主容器和堆容器支承属于安全一级、抗震类,保护容器属于安全二级、抗震类。主容器支

收稿日期:2002-05-21;修回日期:2002-09-17

作者简介:余华金(1977—),男,安徽全椒人,助理工程师,在读硕士研究生,反应堆结构力学专业

承环以上部分的材料为 316 钢,以下部分、保护容器和堆容器支承的材料均为 304 钢,保温层材料为钢箔结构。

按照 ASME 规范要求,处理氦气层问题应考虑传导、对流、辐射 3 种传热方式的混合换热。在 ANSYS 程序的温度场计算中,辐射传热涉及大量的矩阵运算,3 种传热方式综合在一起,需占用大量内存,如每一模型均按此计算,温度场计算将大量耗时。为此,计算中采用等效热导率方法:将氦气层作为一种实体材料与堆容器同时建模分网,用比较法确定氦气层的等效热导率。采用此热导率计算的温度场应与辐射、传导、对流同时作用的温度场一致。选取一种模型的一个时间点,分别计算有和无氦气层两种情况下的温度场,调节有氦气层模型中氦气层的热导率,直至两种模型计算的温度场一致,此时的热导率值即为氦气层的等效热导率。选取不同模型的不同时间点进行若干次验证,证明该方法是可行的,并将有氦气层模型计算得到的每一个温度场与热工计算的温度场进行比较验证,经热工专家确认后用于力学计算的输入。

堆容器上部模型有和无氦气层时的某一时间点计算所得的两种温度场示于图 1。

## 2 工况和载荷

堆容器强度计算考虑 4 种工况:设计工况、A 级工况、包络工况(包络 B、C、D 级工况)、试验工况。载荷涉及内压、外压、自重、接管力、地震载荷、温度载荷和释热率。

在各种工况均需考虑的载荷中,内压、外压、自重、释热率可直接在模型中施加,地震载荷引起的应力计算与协作单位合作完成,接管力和温度载荷尚待处理。

按 ASME 规范要求,接管力可用接管的管道极限载荷代替。因此,接管力计算的关键在于如何施加接管的管道极限载荷。此前,曾提出了一般接管的管道极限载荷用刚杆模型施加的办法<sup>[3]</sup>,但 CEFR 主容器锥顶盖上的中间热交换器导管将 1 个进口管和 1 个出口管包在 1 个导管内,对于这种接管,如按以前的方法建立刚杆模型就必须直接用导管尺寸来选择管道极限载荷,这样做的结果是,保守的成分大概有好

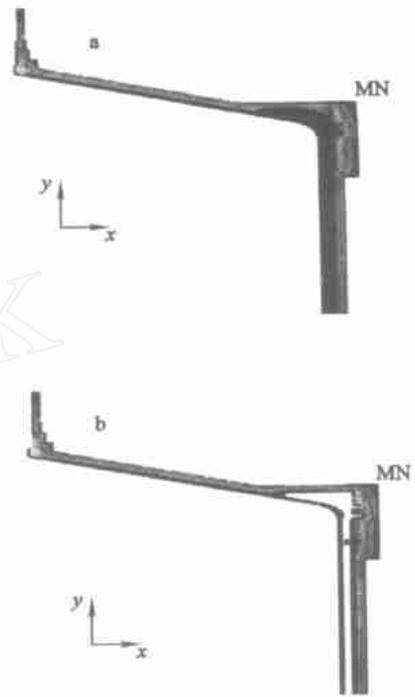


图 1 堆容器上部模型计算所得某一时间点的两种温度场  
Fig. 1 The temperature field of two upside models for the main vessel  
a——有氦气层;b——无氦气层

几倍而肯定不能通过评定,但若用进口管和出口管尺寸来选择管道极限载荷,结果又是不保守的。于是,在刚杆模型的基础上提出了对称刚杆模型:将刚杆沿导管上平面对称过去,在对称刚杆的上端同时施加进口管和出口管的管道极限载荷。刚杆模型和对称刚杆模型示于图 2。这样,既符合规范对管道极限载荷施加的要求,又满足计算上保守而又不过于保守的条件。

对于温度载荷,此前计算的设备很少涉及,核二、三级设备通常不要求考虑温度变化,一般反映在材料参数中。CEFR 堆容器属于核安全一级设备,必须考虑温度变化和热应力。堆容器模型众多,结构复杂,需要计算的时间点多,每一模型均有几万个网格、几十万节点。针对这一情况,采取跨专业协作共同计算温度场,即由热工计算人员提供温度场计算边界条件,利用力学程序与热工程序同时计算温度场,在力学计算的温度场得到热工确认的情况下,力学人员直接输入自己的温度场计算热应力,以此作为目前尚无热工和力学接口程序的替代办法。

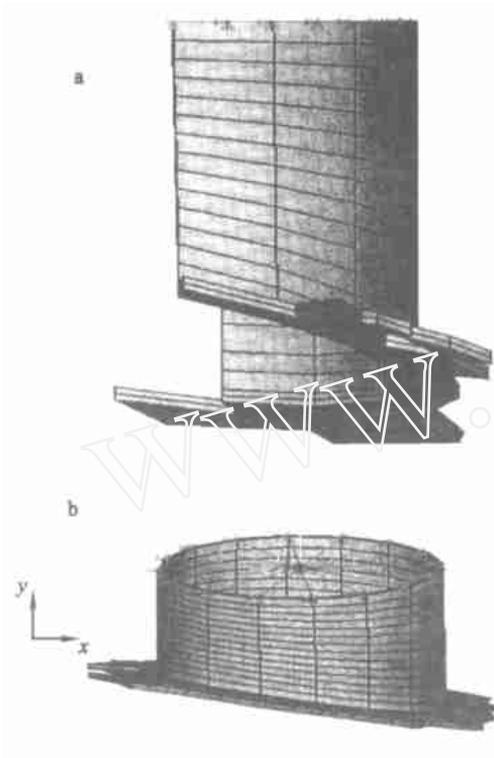


图2 刚杆模型(a)和对称刚杆模型(b)

Fig. 2 The firm rod model(a) and the symmetry firm rod model(b)

### 3 计算和评定

#### 3.1 建模和计算

根据堆容器结构上所具有的对称性和载荷特性,将整个堆容器简化为6个部分模型。

##### 1) 轴对称模型

根据堆容器结构上的对称性和工况、载荷特性,分别建立堆容器上、下部的轴对称模型,用以计算对称条件下不同工况各时间点的温度分布、热应力、内压和重量载荷产生的应力等。堆容器上部轴对称模型可参考图1,堆容器下部的轴对称模型示于图3。

##### 2) 锥顶盖三维元模型

锥顶盖上布有较多的管道系统,结构复杂,因此,建立锥顶盖的三维实体模型,以计算锥顶盖及其上接管的温度场和各载荷引起的应力。

对锥顶盖,建立了3个部分的三维模型:二分之一锥顶盖模型(图4a,模型1),近似四分之一锥顶盖模型(图4b,模型2);提升机导管区域的锥顶盖模型(图5a,模型3)。若仅用模型1计算,面对锥顶盖的结构特性,网格数不能满足

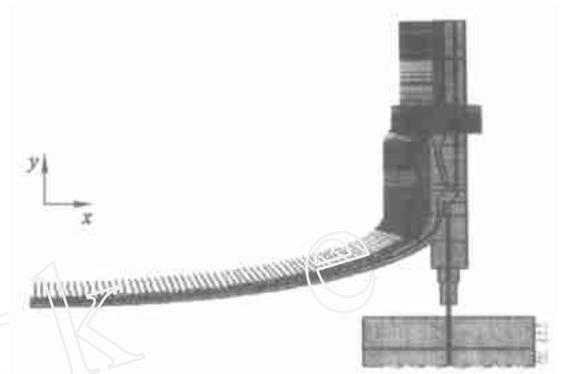


图3 堆容器下部模型

Fig. 3 The down model for the main vessel

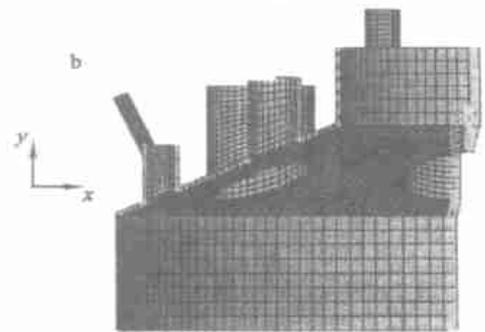
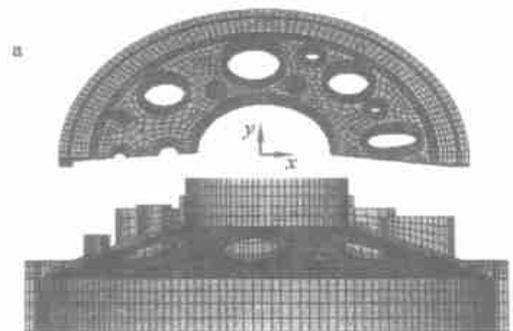


图4 锥顶盖模型

Fig. 4 The model of the coping

a——模型1;b——模型2

计算精度要求;模型2和3包含壁厚最大、壁厚最小和结构最复杂的3个接管,如仅用它们单独计算,则又忽略了锥顶盖其它部分的影响。因此,将模型2、3作为模型1的子结构,所有的边界条件均从模型1读取,而用模型1计算锥顶盖上大致的温度场,为模型2、3选出温度梯度变化最大和最小的温度分布及这两种情况下的应力和变形。这样,既保证了网格精度,又满足了锥顶盖整体的相互作用。

锥顶盖的模型 2、3 涉及到复杂结构的粗细网格过渡问题。它们虽在网格精度上比模型 1 有很大进步,但将网格划分到多细方可满足精度要求是不可知的,而目前的硬件和时间的紧迫性又不允许无限制的划分网格,为此,计算中不断调节模型 2、3 的网格数和网格比,将有限单元法的基本原理运用到同一模型的不同次计算结果中,从而得出计算结果与实际结果的接近度,直到网格模型结果的精确度满足要求为止。图 5b 示出了锥顶盖提升机导管区域的一个低准确度计算模型。

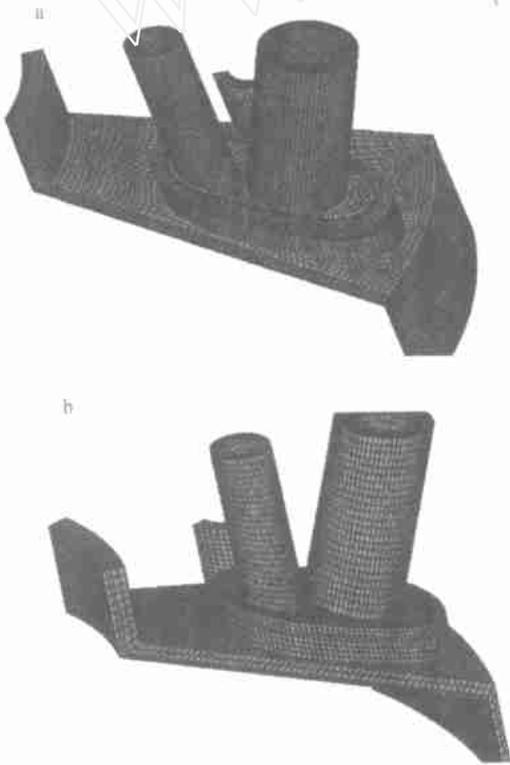


图 5 提升机导管区域模型(a)及其比较模型(b)  
Fig. 5 The model(a) and its relative model(b) for the cannula section

可将解决复杂结构的粗细网格过渡方法应用于轴对称模型的计算中,并与轴对称模型划分为较多网格的计算结果相比较,来相互验证计算结果的准确度。

3) 计算周向不对称温度场的模型

在反应堆容器运行中,主容器柱筒内将出现周向温度分布不对称的情况。为计算周向温度分布不均匀的温度场及由此产生的热应力,建立了反应堆容器顶盖和筒体部分的三维实体

元模型。考虑到温度分布关于过中轴及相应直径的平面对称性,模型只包括主容器和锥顶盖的半个圆周(图 6)。

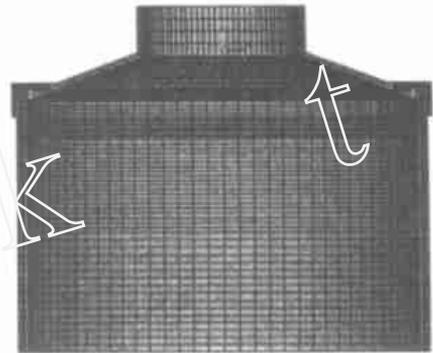


图 6 计算不对称温度场的模型  
Fig. 6 The model for the calculation of the dissymmetry temperature field

4) 裙座模型

堆容器的支承裙开有 10 个孔,分布在不同的高度和半径上。为了计算堆容器支承裙座在温度载荷和重量载荷作用下的应力,建立裙座的如下三维实体元模型(图 7)。

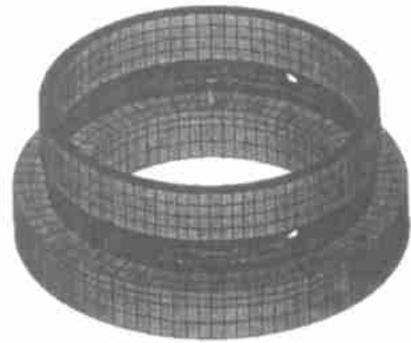


图 7 裙座模型  
Fig. 7 The model of the supporting skirt

5) 正弦三波计算模型

为考虑长周期地震正弦三波的影响,计算正弦三波产生的晃动压力所引起的应力,建立堆容器锥顶盖和主容器筒体到上支承环部分的三维实体元模型,在施加载荷下,计算正弦三波产生的晃动压力所引起的应力。正弦三波计算模型示于图 8。

6) 热冲击计算模型

热冲击计算和分析是堆容器计算中必须考虑的一个难点。首先,热冲击计算本身复杂,它



图8 正弦二波模型

Fig. 8 The model of the sine bar

涉及到瞬态温度场的计算和结果的收敛性;其次,与堆容器结构复杂性有关。堆容器热冲击计算的模型直接采用轴对称模型。由于包络工况温度变化比 A 级工况大,因此,仅对包络工况进行计算。整个计算分为两步:1) 计算瞬态温度场;2) 根据瞬态温度场,按准静态过程计算应力场。

包络工况过程的环境温度变化在 15 000 s 内完成,考虑到瞬态温度场计算耗费的存储和时间很多,将时间历程压缩 10 倍,即将 15 000 s 的时间历程压缩为 1 500 s,同时,将计算终止时间确定在 2 000 s,并设定了 1 500 ~ 2 000 s 的外部环境温度为 1 500 s 时的环境温度。为确定计算结果的收敛性,以 1/2 的倍数逐步缩短步长计算,直到两次结果相近为止。

堆容器下部轴对称模型 2 s 步长和 4 s 步长某一秒的计算结果示于图 9。

### 3.2 评定

CEFR 堆容器的强度评定涉及一级设备、二级设备、高温设备,在应力强度上涉及总体一次薄膜应力、局部一次薄膜应力、一次弯曲应力、膨胀应力、二次应力、峰值应力,尤其是核安全一级设备和高温评定,无成法可依。ASME 规范虽给出了评定要求,但将其转化为可用的各种评定依据,即将理论运用于实际,却是一个非常艰巨的任务。在所给出的完整的 CEFR 堆容器应力强度计算与评定报告中,先对高温区域进行评定,再将高温区与非高温区合并到非高温区评定,最后对支承进行评定,每一部分均需考虑设计、A 级、B 级、C 级、D 级、试验等不同工况。

评定结果表明:CEFR 堆容器的应力强

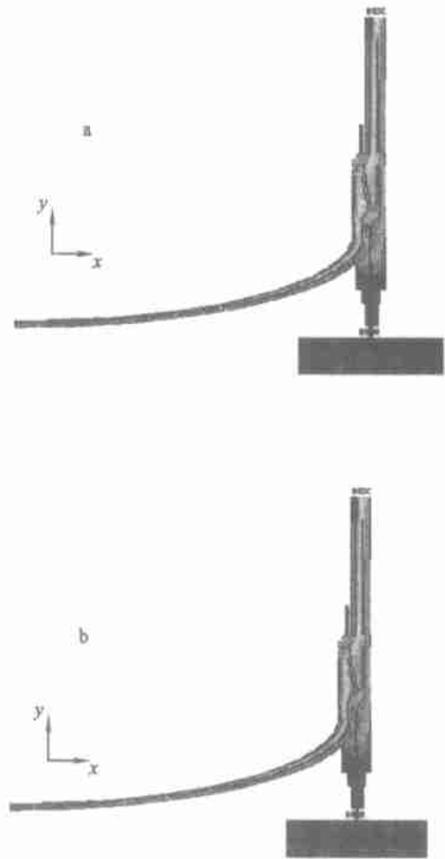


图9 堆容器下部模型某一秒的瞬态温度场

Fig. 9 The two transient temperature field at certain second of the down model for the main vessel  
a —— 2 s 步长; b —— 4 s 步长

度满足 ASME 规范要求。

### 4 结语

CEFR 堆容器应力强度的计算和评定工作耗时 1 年,计算和评定涉及到核安全一级设备和高温评定、等效热导率、温度场热应力计算、热冲击计算、套管接管力施加以及复杂结构的粗细网格过渡等一系列问题。本工作很好解决了上述问题。

### 参考文献:

- [1] 美国机械工程师协会, ASME 规范[S].
- [2] GB50267-95, 核电厂抗震设计规范[S].
- [3] 余华金, 张双旺, 栾霖. 核安全三级容器应力分析与评定[J]. 原子能科学技术, 2002, 36(2): 139 ~ 142.