

# 容积控制箱力学分析及评定

李松, 孙磊, 马建中, 胡永陶

(中国核动力研究设计院, 四川 成都 610041)

**摘要:**采用有限元软件 ANSYS 对容积控制箱进行力学分析, 遵照规范 RCC-M2000 和 ASME 相关规定进行相应评定, 计算了多种载荷下系统的抗震性能, 同时分析了裙座的屈曲性。结果表明, 该容积控制箱的设计满足规范相关条款要求。

**关键词:**容积控制箱; 抗震性能; 屈曲

中图分类号: TQ051.501

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2008)S1-0414-04

## Mechanics Analysis and Assessment of Volume Control Tank

LI Song, SUN Lei, MA Jian-zhong, HU Yong-tao

(Nuclear Power Institute of China, P. O. Box 622-207, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** In this paper, the mechanics character of the volume control tank was studied. The ANSYS, a finite element code, was used to simulate the mechanics characters of the volume control tank under many kinds of forces. In terms of RCC-M2000 and ASME codes, its anti-earthquake characters were evaluated. At the same time, the skirt-seat buckling was studied. The result shows that the design of the volume control tank is satisfied with the correlative criterions.

**Key words:** volume control tank; anti-earthquake character; buckling

容积控制箱是核电厂中化学和容积控制系统(RCV)中的一个重要设备,其主要功能是当反应堆负荷发生变化时,它可以接纳稳压器不能容纳的部分反应堆冷却剂。该设备的安全等级为2级,抗震级别为I级。

本工作采用有限元软件 ANSYS 进行力学分析,遵照规范 RCC-M2000+2002 补遗<sup>[1]</sup>和 ASME 相关规定<sup>[2]</sup>进行相应评定<sup>[3]</sup>,分析载荷包括自重、设计温度、设计压力、试验水压、地震和接管载荷,因 RCC-M 中无屈曲分析相关规定,所以,根据 ASME 规范 NH 分册相关条款

对裙座进行支撑屈曲分析。

## 1 模型

### 1.1 结构概述

容积控制箱为立式容器,主要由两个标准椭圆形封头、圆柱壳筒体、裙座、人孔、吊耳以及接管等零部件组成(图1)。该容器采用裙式支座,其中,上下封头、筒体、人孔、补强板壁厚为10 mm,裙座、加强圈壁厚16 mm,基础板厚20 mm。容积控制箱上封头上均匀分布3个吊耳,外型呈一正梯形,下底长250 mm,高

160 mm,上边为一半径 80 mm 的圆弧,厚 20 mm。容积控制箱中除了基础板材料为 20#钢、螺栓材料为 42CrMoA 外,其他材料均为 00Cr19Ni10。设备上有人孔、溶液出入口、仪表接口、卸压阀接口、气体接口、放气口等共 10 个接管(图 1)。

该设备计算时不考虑腐蚀裕量<sup>[4]</sup>。

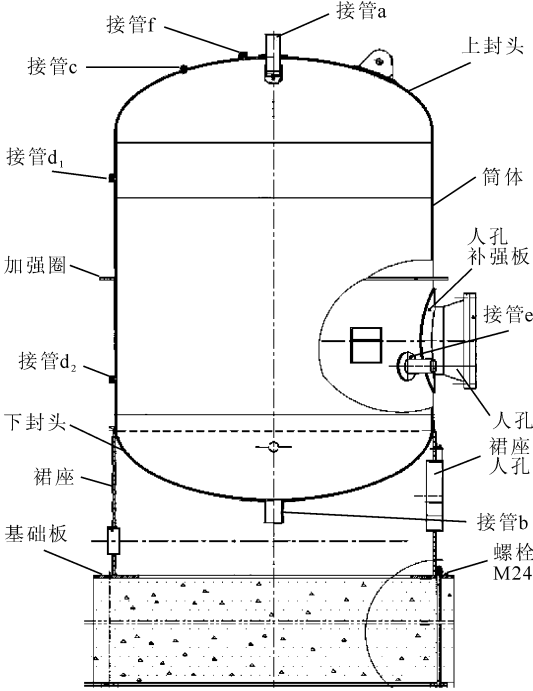


图 1 容积控制箱结构示意图

Fig. 1 Scheme of volume control tank

1.2 力学模型

分析系统采用壳单元(SHELL63)建立有限元模型,有限元模型示于图 2。

1.3 边界条件

容积控制箱通过基础板上的 12 根均布 M24 螺栓与地基连接。对模型相应位置的 12 个节点进行固支约束,模拟地脚螺栓连接,内压

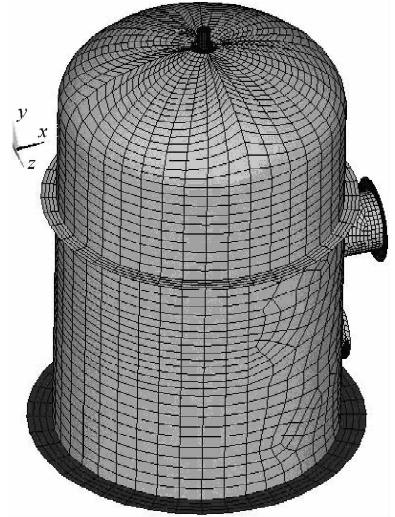


图 2 容积控制箱有限元模型

Fig. 2 Finite element model of volume control tank

力均布加在筒体、上下封头、人孔和接管上,在各个接管位置加入相应的接管载荷。

在满水情况时,将容器内的溶液质量均布到筒体和下封头上。

1.4 材料特性

根据文献[5]得到的在设计温度为 110 °C 时的材料特性与基本许用应力列于表 1。

2 载荷条件

2.1 重力

设备的总质量为 6 700 kg,其中,容器内水的质量为 3 400 kg。

2.2 地震载荷

容积控制箱地震谱参见文献[3]。

2.3 内压

容积控制箱设计压力为 0.52 MPa,外压为 0.08 MPa,水压试验压力为 0.78 MPa。

2.4 接管载荷

根据文献[4]提供的接管载荷计算方法,分

表 1 材料特性及基本许用应力

Table 1 Material character and basis allowance stress

材料	弹性模量 E/GPa	泊松比 $\nu$	抗拉强度 $S_u$ /MPa	屈服强度 $S_y$ /MPa	基本许用应力 $S(110\text{ }^\circ\text{C})$ /MPa
00Cr19Ni10	210	0.3	483	173	108
42CrMoA	203	0.3	862	724	许用拉应力 $F_{ib}=0.5S_u=431$ 许用剪应力 $F_{vb}=5S_u/24=179.58$
20#钢	209	0.278	410	245	103

别计算得到液体出口、液体入口、放气口、仪表接口、气体接口、卸压阀接口等位置的接管载荷,其大小参见文献[3]。

## 2.5 载荷组合

根据文献[4]中设备规格书的要求,各种工况下载荷组合条件列于表2。

表2 载荷组合及准则级别

Table 2 Load combination and rule level

工况	载荷组合	准则级别
设计工况	设计压力+设计温度+正常运行的自重+50%的接管载荷	O
扰动工况	设计压力+设计温度+满水情况下的自重+OBE+75%的接管载荷	B
事故工况	设计压力+设计温度+满水情况下的自重+SSE+100%的接管载荷	D
试验工况	室温下水压实验压力	TEST

## 3 应力与变形准则

根据 RCC-M2000 C3383 的规定,采用最大主应力强度理论进行评定。核安全 2 级设备的应力限值、S2 级板壳型支承的应力限值详见文献[3]。由于 RCC-M 规范未给出支承屈曲安全因子,因此,这里参考 ASME 规范 NH 分册对于设备支承件的临界屈曲因子限值的规定,各类工况下板壳型支承的屈曲安全因子参见文献[3]。

## 4 计算结果及评定

### 4.1 模态分析结果

通过有限元模态计算,得到了容积控制箱的频率(表3)。

### 4.2 各类工况下计算结果及评定

根据应力分析结果及评定,得到结构在各

表3 容积控制箱参与质量最大的频率  
Table 3 Max mass-participation frequencies

模态阶数		频率/Hz		说明
空罐	满罐	空罐	满罐	
2	2	51.51	41.00	x 方向参与质量最大
1	1	50.69	40.20	z 方向参与质量最大
4	5	120.88	80.43	y 方向参与质量最大

种载荷组合下的应力结果列于表4、5。

### 4.3 结构屈曲评定

对裙座支承进行屈曲分析得到,在扰动工况时,支承的一阶临界屈曲因子最小,为 45.9,根据 ASME 规范 NH 分册可知,扰动工况时,屈曲安全因子取 2,则  $45.9/2=22.95>1$ ,说明该裙座支承不会发生屈曲,是安全的。

### 4.4 地脚螺栓强度校核

容积控制箱用 12 个 M24 的地脚螺栓固定在楼板上,M24 螺栓的有效横截面积  $A=301.59\text{ mm}^2$ ,单个螺栓的拧紧力矩  $T=150\text{ N}\cdot\text{m}$ ,单个螺栓的预紧力  $F'=T/0.2d=3.125\times 10^4\text{ N}$ ( $d$  为螺栓的公称直径),则预紧力引起的拉应力满足规范要求。各类工况下地脚螺栓评定结果列于表6。可知,在各工况下,地脚螺栓均满足规范要求。

## 5 结论

通过对容积控制箱的力学计算分析,按照 RCC-M 规范和 ASME 规范 NH 分册相关规定,进行详细的评定后可得出以下结论:

1) 容积控制箱结构强度设计满足规范要求;

表4 容积控制箱结构应力计算结果及评定

Table 4 Stress results and evaluation of volume control tank

工况	薄膜应力 $\sigma_m/\text{MPa}$	发生位置	应力限值/ MPa	薄膜加弯曲应力 $(\sigma_m+\sigma_b)/\text{MPa}$	发生位置	应力限值/ MPa
设计工况	83	筒体与人孔连接处	$S=108$	97.5	接管 b	$1.5S=162$
扰动工况	90	接管 b	$1.1S=118$	134	接管 b	$1.65S=178$
事故工况	113	接管 b	$2S=216$	176	接管 b	$2.4S=259$
试验工况	146	筒体与人孔连接处	$0.95S_y=102$	153	筒体与人孔连接处	$1.4S_y=151$

表 5 裙座支承应力计算结果及评定  
Table 5 Stress results and evaluation of skirt-seat

工况	薄膜应力/ MPa	发生位置	应力限值/ MPa	薄膜加弯曲 应力/MPa	发生位置	应力限值/ MPa
设计工况	7.9	裙座支承与人孔 连接处	$S=108$	26.8	裙座与筒体 连接处	$1.5S=162$
扰动工况	10.7	裙座底板螺栓 连接处	$S=108$	27	裙座与筒体 连接处	$1.5S=162$
事故工况	21.6	裙座底板螺栓 连接处	$\min(1.0S_y, 0.5S_u)=173$	35.4	裙座底板螺栓 连接处	$\min(1.5S_y, 0.8S_u)=259.5$
试验工况	16	裙座支承与人孔 连接处	$S_y=173$			

表 6 各类工况下地脚螺栓应力评定  
Table 6 Stress results and evaluation of foundation bolts under all conditions

工况	拉应力 $f_t$ /MPa	许用拉应力限值 $F_{tb}$ /MPa	剪应力 $f_v$ /MPa	许用剪应力限值 $F_{vb}$ /MPa	最大拉伸与剪切组合作用 $f_t^2/F_{tb}^2 + f_v^2/F_{vb}^2$
设计工况	1.002	431	7.019	179.58	0.0015
扰动工况	7.549	431	22.831	179.58	0.0165
事故工况	11.658	431	38.585	179.58	0.0469
试验工况	4.166	431	11.783	179.58	0.0044

2) 容积控制箱与地基连接螺栓的设计满足规范要求;

3) 容积控制箱的裙座临界屈曲因子满足 ASME 规范要求;

4) 容积控制箱人孔密封螺栓截面积满足规范要求。

参考文献:

[1] 法国原子能协会. RCC-M2000+2002 补遗 压水堆核岛机械设备设计和建造规则[S]. 法国:

法国原子能协会,2002.

[2] 美国机械工程师协会. ASME 2004 规范:NH 分册[M]. 纽约:中国石化出版社,2004.

[3] 李松. 容积控制箱力学分析和评定, HYHL-1-04 [R]. 成都:中国核动力研究设计院反应堆工程研究所,2007.

[4] 张冀辉. 辽宁红沿河核电一期工程容积控制箱技术规格书, HYHS-430601-GG1[R]. 成都:中国核动力研究设计院设计所,2007.

[5] 方向威. 机械工程材料性能数据手册[M]. 北京:机械工业出版社,1995.