

# 大亚湾核电站换料水箱底板渗漏分析与评估

卢岳川, 吴万军, 臧峰刚, 孙英学, 刘文进

(中国核动力研究设计院 核反应堆系统设计技术国家级重点实验室, 四川 成都 610041)

**摘要:** 2006年9月发现大亚湾核电站2号机组换料水箱底板底部有微量水渗出。本工作通过地震分析、应力计算、断裂力学分析,对发现渗漏的大亚湾核电站2号机组换料水箱进行分析与评估。

**关键词:** 泄漏; 分析; 评估

中图分类号: O346.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2008)S1-0648-04

## Analysis and Evaluation of Leak of Refueling Water Storage Tank Bottom Plate for Daya Bay Nuclear Power Station

LU Yue-chuan, WU Wan-jun, ZANG Feng-gang, SUN Ying-xue, LIU Wen-jin

(State Key Laboratory of Reactor System Design Technology,  
Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** The evaluation of leak of the refueling water storage tank bottom plate for Daya Bay Nuclear Power Station was finished by the seismic analysis, stress analysis and crack analysis.

**Key words:** leak; analysis; evaluation

2006年9月发现大亚湾核电站2号机组换料水箱底板底部有微量水渗出,本工作通过地震分析、应力计算、断裂力学分析,对发现渗漏的大亚湾核电站2号机组换料水箱进行分析评估,通过结构在水压载荷和地震载荷作用下的临界裂纹尺寸计算、塑性坍塌分析和疲劳裂纹扩展计算,以确定换料水箱结构的完整性。

由于裂纹的形式不明确,本工作考虑3种裂纹形式:1)罐体上的轴向裂纹;2)底板上的径向裂纹;3)底板上的环向裂纹。

### 1 结构描述

换料水箱为圆柱形立式容器,上部封头为

球冠,球冠厚度6 mm。容器全高17.952 m,外径11.8 m。容器壁从上到下分7段对接焊接而成(厚度从6.5 mm到31 mm),容器底板外圍为1圈厚度20 mm的钢板对接拼焊而成,中心底板由6 mm厚的钢板错落搭接焊接而成,容器本体全部材料为不锈钢,其法国牌号为Z2CN18.10。容器内的液体为淡硼酸,密度为1 mg/mm<sup>3</sup>。

### 2 地震分析

由于在换料水箱的底板出现渗漏,因此,分析所关心的部位在换料水箱壁的根部。在地震情形下,换料水箱根部的应力最大,且主要由换

料水箱的梁式振型贡献,换料水箱罐体的壳式振型对根部应力贡献很小,可忽略。因此,换料水箱的地震模型可简化为梁式模型,用管单元

模拟,并考虑液体的附加质量效应。地震分析采用谱分析,楼板响应谱示于图 1,计算结果(地震载荷)列于表 1、2。

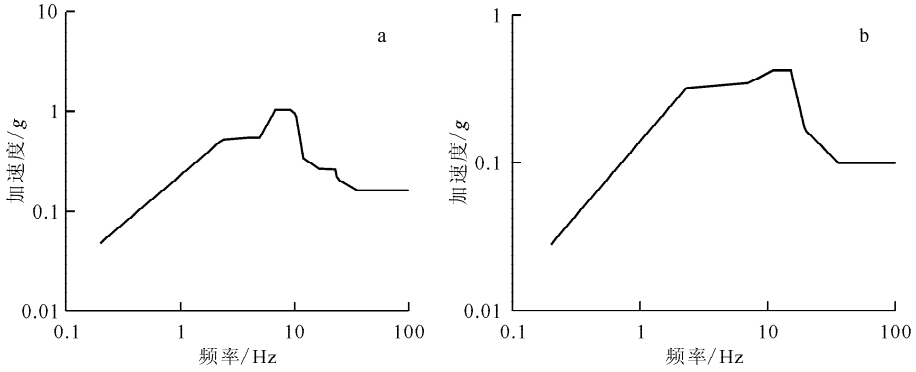


图 1 楼板反应谱

Fig. 1 Floor reponse spectra

a——水平方向;b——垂直方向

表 1 OBE 地震载荷

Table 1 OBE earthquake loads

$F_x/N$	$F_y/N$	$F_z/N$	$M_x/(N \cdot m)$	$M_y/(N \cdot m)$	$M_z/(N \cdot m)$
$1.1013 \times 10^7$	$0.29512 \times 10^7$	$1.1013 \times 10^7$	$1.3080 \times 10^8$	$8.6061 \times 10^1$	$1.3080 \times 10^8$

表 2 SSE 地震载荷

Table 2 SSE earthquake loads

$F_x/N$	$F_y/N$	$F_z/N$	$M_x/(N \cdot m)$	$M_y/(N \cdot m)$	$M_z/(N \cdot m)$
$1.5351 \times 10^7$	$4.8432 \times 10^6$	$1.5351 \times 10^7$	$1.8196 \times 10^8$	$1.8895 \times 10^1$	$1.8196 \times 10^8$

### 3 应力分析

#### 3.1 计算模型

通过大亚湾核电站提供的结构图建立有限元计算模型,结构具有对称性,建立二维轴对称结构计算模型。但地震载荷为非对称载荷,因此,采用对称调和单元进行应力计算。

#### 3.2 边界条件

底板(与筒壁连接区域附近除外)约束垂向位移,螺栓处固定约束,在对称面采用对称约束。

#### 3.3 载荷

载荷包括地震载荷和由容器内液体产生的压力  $p$ 。液体压力  $p = \rho gh$ 。

液体深度  $h$  保守取容器满水时的深度 16.21 m;边界条件及载荷如图 2 所示。

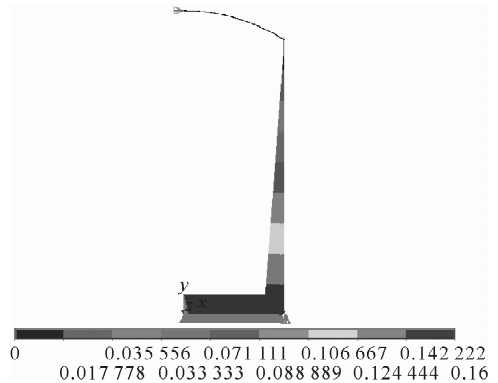


图 2 边界条件及载荷

Fig. 2 Boundary conditions and loads

#### 3.4 计算结果

考虑地震载荷的方向,在计算中进行了各种组合,计算出底板与罐壁上的最大应力(均

出现在底板与罐壁的焊接处),计算结果列于表3。

表3 底板与罐壁焊接处的应力计算结果

Table 3 Stress results of location between base plate and tank sidewall

位置	径向(或轴向)应力/MPa		环向应力/MPa	
	水压+OBE	水压+SSE	水压+OBE	水压+SSE
底板	68.92 <sup>1)</sup>	91.35 <sup>1)</sup>	15.11	19.8
罐壁	51.03 <sup>2)</sup>	71.42 <sup>2)</sup>	99.12	138.7

注:1) 径向应力

2) 轴向应力

## 4 断裂分析

### 4.1 线弹性断裂力学分析

应用断裂力学计算裂纹保持稳定的临界裂纹尺寸,该方法采用的是线弹性断裂力学分析,通常包括下面几个步骤:

- 1) 确定裂纹区域的应力状态;
- 2) 选择适当的裂纹形状,并计算应力强度因子  $K_I$ ;
- 3) 计算临界裂纹尺寸。

由于裂纹的尺寸远小于换料水箱的直径和高度,因此,可将裂纹的形式定为半无限板含有贯穿裂纹(底板为径向裂纹和环向裂纹,罐体为轴向裂纹)。其应力强度因子  $K_I$  [1] 为:

$$K_I = 1.12\sigma_H\sqrt{\pi a} \quad (1)$$

式中:1.12 为自由面的修正系数; $\sigma_H$  为环向应力; $a$  为裂纹长度。

通过式(1)可计算出临界裂纹尺寸:

$$a_{cr} = \left(\frac{K_{IC}}{1.12\sigma_H}\right)^2 \cdot \frac{1}{\pi} \quad (2)$$

将相应的最大环向应力代入式(2),可计算出相应的临界裂纹尺寸(表4)。

由表4可看出,底板的径向应力也很大,因此,在底板裂纹形式不明的情况下,有必要在底板上假设环向裂纹的存在。由于裂纹的尺寸远小于底板的直径,因此,可认为是半无限板含有环向贯穿裂纹。由径向应力代替式(2)中的环向应力,从而计算出临界裂纹长度,计算结果列于表4。

因此,在最不利载荷作用下,基于线弹性断裂力学分析,容器筒壁轴向贯穿裂纹的临界尺

表4 临界裂纹尺寸

Table 4 Critical flaw size

位置/裂纹形式	最大环向	最大径向	$K_{IC}/$ (MPa· $m^{1/2}$ )	$a_{cr}/m$
	应力/ MPa	应力/ MPa		
底板/径向裂纹	19.8		220	31
底板/环向裂纹		91.35	220	2.9
罐壁/轴向裂纹	138.7		220	0.638

寸为0.638 m;底板轴向贯穿裂纹的临界裂纹尺寸为31 m;底板环向贯穿裂纹的临界裂纹尺寸为2.9 m。

由于Z2CN18.10钢的高韧性,因此,其断裂失效更可能由塑性坍塌引起,所以,还需进行塑性坍塌分析。

### 4.2 塑性坍塌分析

Z2CN18.10钢和大多数奥氏体钢一样具有高韧性和高延性,在该条件下,失效的预测还应采用极限载荷法,即保证含裂纹截面的剩余韧带不会发生塑性坍塌。

对轴向裂纹,引起塑性坍塌的环向应力<sup>[2]</sup>为:

$$\sigma_{Hf} = \frac{\sigma_f}{\left(1 + \frac{1.61}{4Rt}l^2\right)^{1/2}} \quad (3)$$

式中:流变应力  $\sigma_f = 345$  MPa<sup>[3]</sup>;平均半径  $R = 5884.5$  mm;壁厚  $t = 31$  mm。

根据文献[4],在事故工况下,载荷考虑1.5倍的裕度。将各参数代入式(3),计算得到  $l = 890$  mm。

如果裂纹为边裂纹,则裂纹的长度为445 mm。

### 4.3 裂纹扩展计算

裂纹扩展主要有两种形式:疲劳裂纹扩展和应力腐蚀裂纹扩展。本工作考虑由结构受循环载荷而引起的疲劳裂纹扩展。

每个应力循环下的裂纹扩展率由下式<sup>[4]</sup>给出:

$$\frac{da}{dN} = C_0(\Delta K_I)^n \quad (4)$$

式中: $C_0 = 10^{-10.009+8.12 \times 10^{-4}t-1.13 \times 10^{-6}t^2+1.02 \times 10^{-9}t^3}$ ,  $t = 40$  °C (105 °F);  $\Delta K_I$  为相关应力循环下的应力强度因子变化幅度; $n = 3.3$ 。

引起换料水箱应力循环的瞬态只有充水排水;地震载荷考虑 OBE。由于裂纹的形式及尺寸不明确,因此,为计算裂纹扩展,作以下假设:

1) 对罐体轴向裂纹,假设初始裂纹尺寸为 20 mm(假设容器壁有一长度等于底板厚的边裂纹),最终裂纹尺寸为 25.4 mm;

2) 对底板径向裂纹,假设初始裂纹尺寸为 20 mm(假设底板有一长度等于底板厚的边裂纹),最终裂纹尺寸为 97 mm(6 mm 板与 20 mm 板焊接交界面位置);

3) 对底板环向裂纹,假设初始裂纹尺寸为 20 mm(假设底板有一长度等于底板厚的环向裂纹),最终裂纹尺寸为 25.4 mm。

通过计算 3 种裂纹形式的应力强度因子变化幅度,由式(4)可计算出满足假设条件所需的循环次数  $N$ :罐体轴向裂纹, $N=3.5 \times 10^4$ ;底板径向裂纹, $N=7.75 \times 10^7$ ;底板环向裂纹, $N=1.8 \times 10^5$ 。

## 5 结论

1) 在水压+SSE 地震载荷下,只要底板径向贯穿裂纹不超过 31 m,环向贯穿裂纹不超过 2.9 m,则底板仍能保持稳定。另外,诸如锚固

螺栓、焊接交界面等因数均能起到抑制裂纹扩展的作用。

2) 在水压+SSE 地震载荷下,罐体根部轴向边裂纹的长度不超过 445 mm,则结构不会有塑性坍塌的危险。

3) 在水压+OBE 地震载荷下,需  $3.5 \times 10^4$  次充、排水,罐体根部轴向贯穿裂纹才能从假设初始尺寸(20 mm)扩展到 25.4 mm。

4) 在水压+OBE 地震载荷下,需  $7.75 \times 10^7$  次充、排水,底板径向贯穿裂纹才能从假设初始尺寸(20 mm)扩展到 97 mm。

5) 在水压+OBE 地震载荷下,需  $1.8 \times 10^5$  次充、排水,底板环向贯穿裂纹才能从假设初始尺寸(20 mm)扩展到 25.4 mm。

## 参考文献:

- [1] THOMAS W M. Evaluation of the refueling water storage tank bottom plate crack[R]. [S. l.]: [s. n.], 2000.
- [2] EPRI. Evaluation of flaw in austenitic steel piping, NP-4690-SR[R]. [S. l.]: [s. n.], 1986.
- [3] RCC-M 2000 版及 2002 补遗[S]. [出版地不详]:[出版者不详],2000.
- [4] ASME 规范 XI[S]. [出版地不详]:[出版者不详],2004.