

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/mm³。

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。

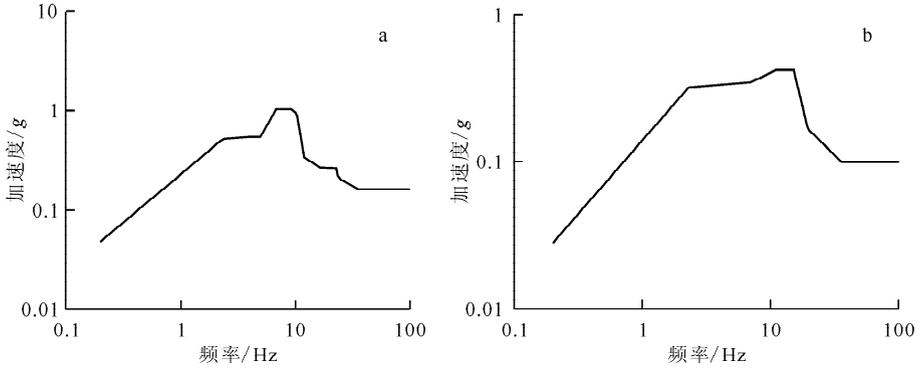


图 1 楼板反应谱

Fig. 1 Floor response 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	$M_x/(N \cdot m)$	$M_y/(N \cdot m)$	$M_z/(N \cdot m)$
1.1013×10^7	0.29512×10^7	1.1013×10^7	1.3080×10^8	8.6061×10^1	1.3080×10^8

表 2 SSE 地震载荷

Table 2 SSE earthquake loads

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

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。

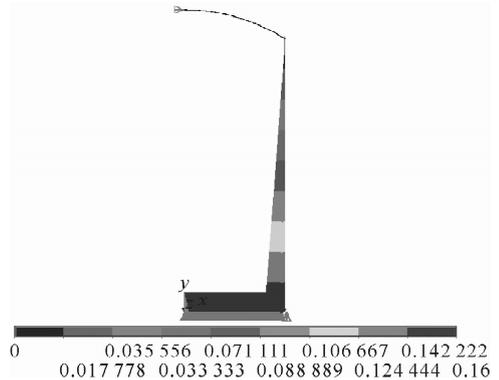


图 2 边界条件及载荷

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 ¹⁾	91.35 ¹⁾	15.11	19.8
罐壁	51.03 ²⁾	71.42 ²⁾	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; σ_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^[2]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^[3];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^[4]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); ΔK_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 3.5×10^4 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 7.75×10^7 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 1.8×10^5 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.