

事故后安全壳内环境条件计算分析

孙婧, 马秀歌, 陈巧艳

(中国核电工程有限公司, 北京 100840, 中国)

摘要: 以 M 310 + 型核电厂为例, 计算分析了设计基准事故以及严重事故后安全壳内压力、温度环境条件。对核电厂设计基准事故和严重事故分析分别采用了法国的安全壳热工水力计算分析程序 PAREO 和一体化严重事故分析程序 MAAP。计算分析给出了设计基准事故和严重事故下安全壳压力、大气温度和露点温度的峰值随时间变化曲线。计算结果表明设计基准事故和严重事故后, 安全壳压力峰值工况均以 MSLB 为始发事故; 设计基准事故后安全壳压力峰值为 0.511 8 MPa, 严重事故后安全壳压力峰值为 0.602 MPa。

关键词: 安全壳; 环境条件; 设计基准事故; 严重事故

中图分类号: TL364 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8676(2015)04-0053-04

Computational Analysis of Environment Condition Inside Containment After Accident

SUN Jing, MA Xiuge, CHEN Qiaoyan

(China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840, China)

Abstract: The pressure and temperature inside containment after both design basis accidents and severe accidents are calculated and analyzed based on M 310 + NPP. Design basis accidents are calculated by French containment thermal hydraulic analysis code PAREO and severe accidents are calculated by integrated severe accident analysis code MAAP. The containment peak pressure, atmosphere and dew peak temperature of design basis accident and severe accident are calculated and shown. The results show that both design basis and severe accidents containment peak pressure conditions are induced by MSLB accident, that the peak containment pressure after design basis accidents is 0.511 8 MPa and after severe accidents is 0.602 MPa.

Key words: containment; environmental condition; design basis accident; severe accident

安全壳是防止裂变产物泄漏的第三道屏障, 并提供良好的密封功能。这就需要对设计基准事故以及严重事故后安全壳环境条件进行计算, 以使得安全壳设计能够承受由于事故压力温度升高所引起的机械应力和热应力。另外, 为了保证事故“需要用到”的设备和仪表在发生设计基准事故或严重事故时能够执行所需功能、评价其可用性(壳外设备和仪表受影响相对较小), 需要对事故后安全壳内环境条件进行计算分析。

M 310 + 型核电厂是在 M 310 型核电厂的基础上, 增加了若干福岛后改进项, 提高了严重事故预防能力, 如(1)一回路快速卸压系统; (2)堆腔注水冷却系统; (3)非能动氢气复合器消氢系统; (4)安全壳过滤排放系统等。

本文计算分析了 M 310 + 型核电厂发生设计基准事故以及严重事故多个事故序列后安全壳内的压力和温度, 给出了始发主蒸汽管道破口设计基准和严重事故后的安全壳压力、大气温度和露点温度曲线。

1 计算程序

1.1 设计基准事故计算程序

设计基准事故后安全壳压力温度计算使用了 PAREO 程序。PAREO 可计算在一回路或二回路管

需要一回路快速卸压的序列, 均假设在堆芯出口温度超过 650 °C 后立即开启。过滤排放系统假设为在 24 h 内开启压力为 0.65 MPa, 24 h 后开启压力为 0.52 MPa。

3 计算结果与分析

3.1 设计基准事故计算

计算结果表明, 所选取的事故序列中达到安全壳压力峰值(0.511 8 MPa)的是“一只给水控制阀失效、初始功率水平为 75%”的工况, 图 4、图 5 给出该工况安全壳内的压力、大气温度和露点温度, 表 1 给出“一只给水控制阀失效”不同功率水平工况的安全壳压力温度计算结果。

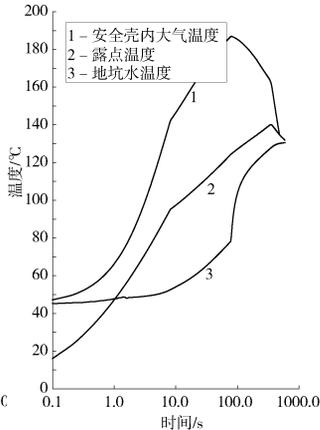
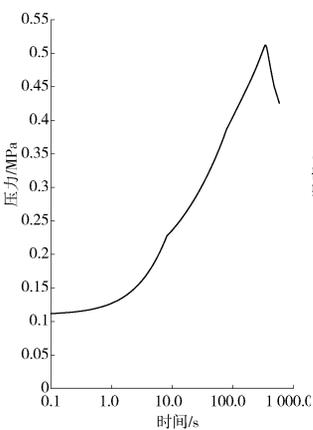


图 4 安全壳压力
Fig. 4 Containment Pressure

图 5 安全壳大气、露点、地坑水温度
Fig. 5 Atmosphere, Dew and Sump Temperature of Containment

管道破口向安全壳内喷放, 反应堆冷却剂系统内的能量被大量带走, 系统温度和压力降低; 5 s 时产生主蒸汽隔离信号, 隔离完好的蒸汽发生器; 安注信号后 5 s 主给水控制阀应关闭, 若假设一只给水控制阀失效, 则延迟失效给水控制阀的关闭时间。由于主给水未完全关闭, 更多的蒸汽从破损蒸汽发生器排出, 安全壳压力快速上升, 并在事故发生后 348 s 形成一个压力峰值 0.511 8 MPa, 相应的露点温度在 350 s 形成一个温度峰值 140.1 °C, 该值低于安全壳设计考虑值。该工况的安全壳大气温度峰值为 186.9 °C, 不过“初始功率水平为 102%”的工况大气温度峰值更大, 为 189.8 °C。

3.2 严重事故计算

严重事故序列计算进程结果如表 2 所示。计算结果表明, 所选取的事故序列中达到安全壳压力峰值的是 MSLB 事故, 图 6、图 7 给出该事故安全壳内的压力、大气温度和露点温度。

表 2 严重事故序列进程

Table 2 Severe Accident Sequences

事故进程	1	2	3	4
	SBO	LLOCA	SLOCA	MSLB
事故开始	0	0	0	0
堆芯裸露	7 618	10	1 825	5 724
堆芯出口温度达到 650 °C	8 552	1 085	2 354	6 515
燃料包壳快速氧化	15 080	1 750	5 881	18 396
过滤排放系统第一次开启	86 400	86 400	86 400	86 400
过滤排放系统第一次关闭	221 100	184 100	—	—
过滤排放系统第二次开启	—	246 700	—	—
喷淋开启	259 200	259 200	259 200	259 200
过滤排放系统第二次关闭	—	259 700	259 700	259 700

表 1 MSLB 事故下安全壳压力温度峰值计算结果
(一只给水控制阀失效)

Table 1 Containment Peak Pressure and Temperature After MSLB Basis Accidents with Failure of One Main Feedwater Control Valve

功率 /%	压力 /MPa	大气温度 /°C	地坑水温度 /°C	露点温度 /°C
102	0.511 6	189.8	130.3	139.9
75	0.511 8	186.9	130.8	140.1
50	0.507	184.6	130.6	139.8
25	0.502	181.3	130.0	139.3
0	0.503	178.7	129.2	139.5

发生“一只给水控制阀失效、初始功率水平为 75%”MSLB 设计基准事故后, 大量蒸汽从主蒸汽

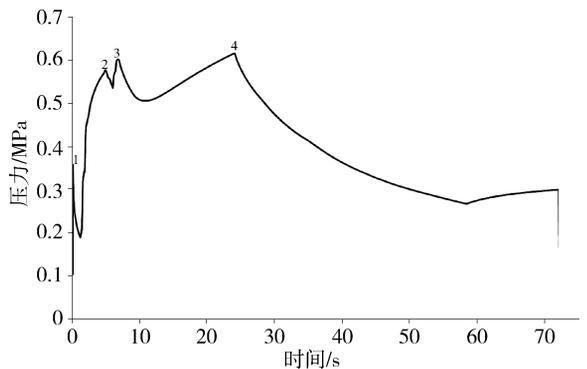


图 6 MSLB 严重事故后安全壳内压力
Fig. 6 Containment Pressure During MSLB Severe Accident

表3 MSLB事故始发设计基准事故和严重事故对比

Table 3 Comparison of Design Basis Accident and Severe Accident Induced by Mslb Accident

工况	压力峰值/MPa	压力峰值时间/s	大气温度峰值/℃	温度峰值时间/s	计算结束时间/s	峰值形成原因
设计基准事故	0.511 8	348	189.8	80	590	破口向安全壳喷放
严重事故	0.602	86 400	196	86 400	259 200	24 h时过滤排放系统开启

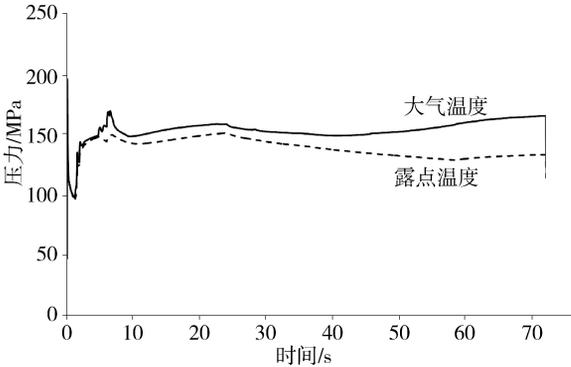


图7 MSLB严重事故后安全壳内温度

Fig. 7 Containment Temperature During MSLB Severe Accident

MSLB事故诱发的严重事故是假设主蒸汽管道发生大破口,大量蒸汽从破口排入安全壳后形成一个压力峰值,如图6所示峰值1,破口所对应蒸汽发生器二次侧压力和水位迅速下降。图5安全壳压力峰值1小于设计基准事故中(图4)MSLB的压力峰值是因为严重事故计算时未考虑一只给水控制阀失效。由于二次侧排热量的突然增加,一回路冷却剂温度在短时间内迅速降低,慢化剂温度反应性反馈的作用使得堆芯功率有短暂上升的过程,一回路迅速升温升压,一回路高压信号引起反应堆停堆,随后汽轮机脱扣,主给水关闭。假设辅助给水失效,蒸汽发生器排空后丧失带热能力,堆芯衰变热无法有效排出,一回路压力升高使得稳压器安全阀频繁的自动开启关闭,一回路冷却剂丧失的同时向安全壳释放质量和能量,安全壳压力又再次上升。随着堆芯裸露,堆芯出口温度到达650℃后快速卸压阀开启,安全壳压力又继续上升形成一个压力峰值2;堆芯坍塌后,安全壳压力又形成一个压力峰值3。事故发生后24h,安全壳压力达到0.602 MPa,大于过滤排放24h后开启压力0.52 MPa,过滤排放系统开启,安全壳压力开始下降,安全壳压力、温度得到控制;72h时,随着喷淋系统的开启,安全壳压力温度迅速下降。

3.3 MSLB事故后安全壳内环境条件

以MSLB为始发事件的设计基准事故和严重事

故序列,均为计算序列里面安全壳压力最大的工况。对比始发MSLB设计基准事故和严重事故后安全壳内的压力和温度计算如表3所示。从表3中可以看到,严重事故后的压力、温度峰值更高,这是因为随着严重事故发展堆芯逐渐熔化、坍塌,会向安全壳释放更多的质量和能量,这些质能释放再叠加事故开始时由主蒸汽管道破口向安全壳释放的质量和能量使得安全壳压力和温度峰值更高。

4 结论

本文以M310+型核电厂为例,计算分析了核电厂发生设计基准事故(LOCA事故3种工况、MSLB事故10种工况)以及严重事故(SBO、大LOCA、小LOCA、MSLB)后安全壳内的压力及温度变化,计算结果如下:

1)设计基准事故中以MSLB事故为始发事故的安全壳压力峰值最大,MSLB事故中一只给水控制阀失效、初始功率水平为75%名义功率时压力峰值最大,为0.511 8 MPa,小于安全设计压力0.52 MPa;一只给水控制阀失效、初始功率水平为102%名义功率时大气温度峰值最大,为189.8℃。

2)严重事故序列计算中以MSLB事故为始发事故的安全壳压力、温度峰值最大,压力峰值为0.602 MPa,大气温度峰值为196℃,均在事故发生后24h时达到;24h时过滤排放系统开启以及72h时喷淋系统开启,安全壳压力温度均会下降。

参考文献:

- [1] HAF 102—2004,核动力厂设计安全规定[S].
- [2] 朱继洲.核反应堆安全分析[M].北京:原子能出版社,2004.
- [3] 臧希年.核电厂系统及设备[M].北京:清华大学出版社,2003.
- [4] 陈松,刘鑫,史国宝,等.严重事故下安全壳内环境条件计算分析[J].核动力工程,2006,1(增刊):14-17.
CHEN Song, LIU Xin, SHI Guobao, et al. Computational Analysis of Environment Condition Inside Containment under Severe Accident [J]. Nuclear Power Engineering, 2006, 1 (Supp. 1): 14-17.

(责任编辑 黄肇和)