

中国实验快堆一回路钠净化系统 雾火事故计算与分析

胡文军, 喻宏

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要:根据中国实验快堆(CEFR)一回路钠净化系统事故房间的管道、系统设备的布置及通风系统进出口的位置,建立事故房间模型,确定泄漏点及泄漏流量。利用雾火程序 FEUMIX 计算得出事故房间的压力、混凝土温度、气溶胶浓度的值及相应曲线。

关键词:中国实验快堆;雾火;FEUMIX

中图分类号:TL33

文献标识码:A

文章编号:1000-6931(2007)S0-0306-04

Sodium Spray Fire Calculation and Analysis of Sodium Decontaminated System of First Loop of China Experimental Fast Reactor

HU Wen-jun, YU Hong

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: According to the layout of the pipes and equipments of the accident room in the sodium decontaminated system of the first loop of China Experimental Fast Reactor (CEFR), and the site of inlets and outlets of ventilation system, the model of accident room was built up and the leakage site and rate were confirmed. The pressure of the room, the temperature of the concrete and the concentration of the sodium aerosol were gotten by the program of FEUMIX.

Key words: CEFR; sodium fire; FEUMIX

1 背景介绍

一回路钠净化系统(图1)主要流经如下房间:“脏”管道竖井、一回路冷阱间、一回路钠净化系统电磁泵房、一回路阻塞计室、 γ 光谱和铯测量旁路室、一回路钠取样旁路室、一回路管廊。

中国实验快堆(CEFR)一回路钠净化系统边界为一回路冷却剂边界的一部分。在CEFR正常运行时,该系统从主容器钠池的冷区取钠,经省热器冷却降温进入冷阱净化,然后返回省热器加热升温,最后回到主容器钠池的冷区。为防止钠的泄漏,从主容器取钠的管道在第1

收稿日期:2007-05-08;修回日期:2007-07-18

作者简介:胡文军(1978—),男,湖北荆门人,助理工程师,反应堆安全专业

个截止阀之前采用双层壁结构,并在双层管后采用两个自动的快速截止阀串联。在主容器内的取钠管道端口,采用非能动的破坏虹吸装置,防止冷却剂钠快速大量泄漏,净化后向主容器回钠的管道结构与此相同。在事故发生后,通过熔断丝熔断(房间温度达到 70 °C 后立刻熔断,根据这个信号触发事故通风系统),还可根据火灾房间烟雾的增加,房间空气温度的升高,房间放射性的增加,自动火灾探测系统发出的信号,自动关闭净化管道上的两个闸阀(1 个拒动,还可关闭另 1 个),自动火灾系统探测钠泄漏的时间小于 3 min,关闭闸阀的时间小于 20 s。事故初因事件为:在低于堆内钠液位的无保护套管道段发生破口导致钠泄漏,钠净化系统主管道尺寸为 89 mm×4.5 mm,破口尺寸取 DT/4,为 90 mm²。

2 计算程序

FEUMIX 程序用于计算由管道内和箱体组成的回路中在压力下的钠喷射泄漏事故后果,包括房间压力、房间内气体温度、内部结

构和墙壁的温度、房间内产生或向外释放的气溶胶的质量、各个房间内气体压力和各种化学混合物的浓度等。程序对钠和氧气反应的界面区采用球形近似,并考虑了和钠泄漏有关的全过程。例如,包括建立钠喷射流的时间在内的点燃过程、燃烧发展过程以及熄灭过程、几个房间相连可允许这些相连房间中事故动态的结果以及监测相邻区域内钠的泄漏等。在程序的计算模型中考虑了混凝土过热后水的释放,因此,可模拟水和钠、水和气溶胶的化学反应。程序的通风选项可同时模拟通风、抽风、气体泄漏、阀门、压力释放阀等多种通风形式。在快堆设计的范围内,FEUMIX 程序提供了足够的数据库来估计结构的完整性(抗压力和温度的能力),系统的行为以及对外部环境或相邻房间予以的破坏。

3 计算模型

3.1 房间模型

房间模型如图 2 所示。房间地板、壁面、天花板均为 3mm 的不锈钢和绝热层(绝热层采

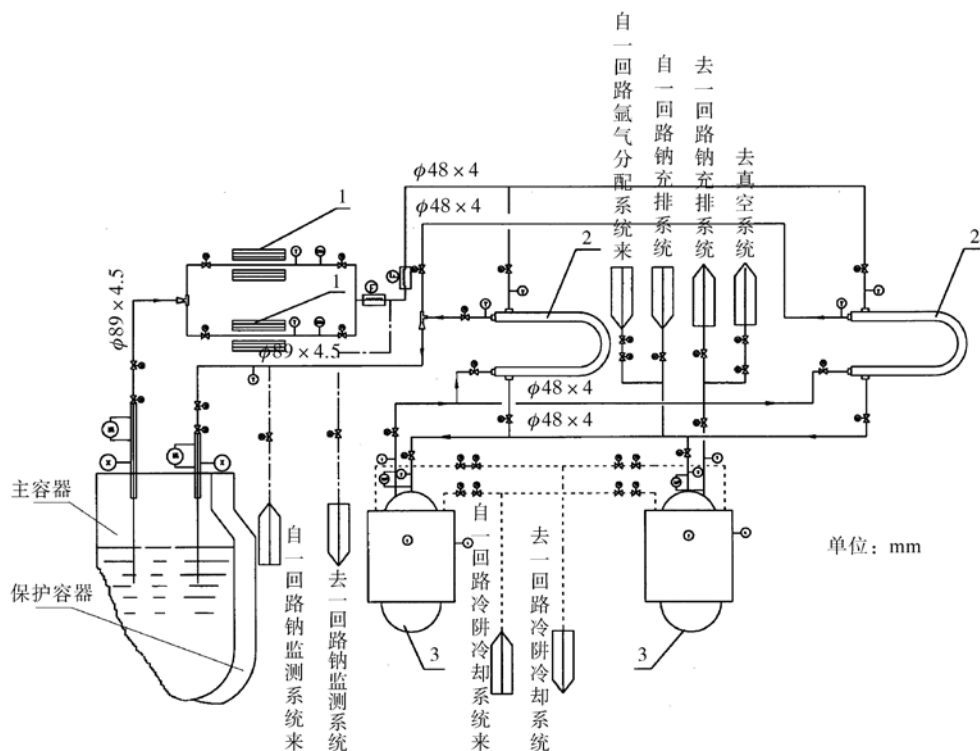


图 1 一回路钠净化系统流程图

Fig. 1 Sketch map of sodium decontaminated system of first loop

1——钠电磁泵;2——省热器;3——冷阱

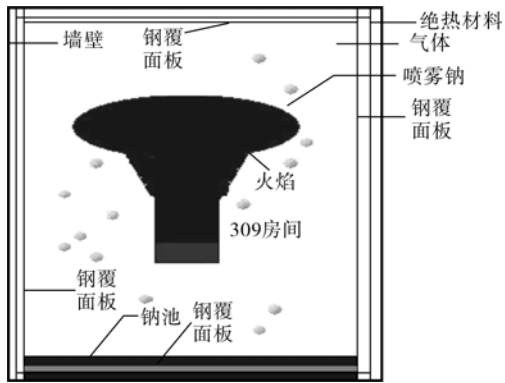


图2 房间模型示意图

Fig. 2 Sketch map of model of room

用厚度为 30 mm 普通硅酸铝纤维层和厚度为 70 mm 岩棉层的复合材料,计算中将不锈钢分为 10 层,普通硅酸铝纤维层和岩棉层均分为 6 层)。

3.2 泄漏率计算

泄漏点假设在管道点,计算公式如下:

$$V_{Na} = F \sqrt{\frac{2\rho(p-p_1)}{\xi_{\Sigma}}} / 1000$$

式中: V_{Na} 为泄漏率, kg/s; F 为破口截面积, cm^2 ; ρ 为钠的密度, g/cm^3 , 它由压力 p 和温度 T 决定; p 为破口内压力, bar; p_1 为破口外压力, bar; $\xi_{\Sigma} = \xi_{TP} + \xi_m$, 即总阻力系数 = 局部阻力系数 + 摩擦阻力系数; 局部阻力系数 $\xi_{TP} = 1.5$; 摩擦阻力系数 $\xi_m = \lambda \cdot \frac{l}{d}$; 假设 ξ_{Σ} 、 ξ_{TP} 、 ξ_m 、 F 在泄漏过程中保持不变。 $\lambda = 0.02$; l 为破口的管壁厚度; d 为破口的当量直径。

计算可得一回路管廊房间的泄漏率 $V_{Na} = 2.734 \text{ kg/s}$ 。计算中,采用初始泄漏率作为整个计算的初始泄漏率,并根据国外实验,假设只有 10% 泄漏钠燃烧。

3.3 通风模型

将事故通风管道假设成 1 个虚拟房间,该虚拟房间和虚拟房间通过孔相连,虚拟房间通过孔和大气相连,计算中均采用 TROU 模型。且在 6 s 后,事故通风打开。通风模型如图 3 所示。

4 计算假设

计算假设如下:

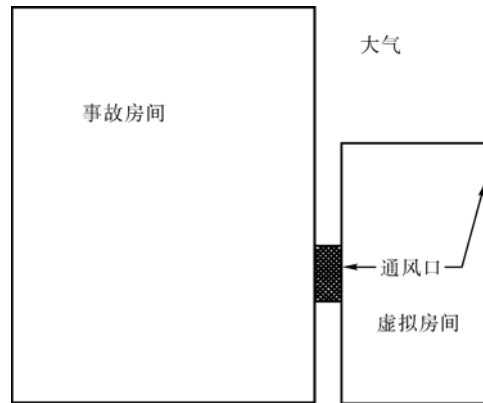


图3 通风模型示意图

Fig. 3 Sketch map of ventilation model

- 1) 钠泄漏破口面积采用 $DT/4$;
- 2) 泄漏点的选取主要考虑泄漏点管道中的压力和泄漏点离天花板的距离两个因素;
- 3) 初始泄漏率作为整个过程的平均泄漏率;
- 4) 钠燃烧在氧气体积浓度为 0.05 时开始熄灭,在 0.03 时完全熄灭;
- 5) 钠的燃烧产物均为 Na_2O ;
- 6) 事故通风口过滤器效率 90%。

5 计算所需参数

- 1) 房间几何尺寸 $11.65 \text{ m} \times 3.00 \text{ m} \times 2.74 \text{ m}$;
- 2) 房间压力 99 950 Pa;
- 3) 房间温度:夏天 $45 \text{ }^\circ\text{C}$,冬天 $5 \text{ }^\circ\text{C}$;
- 4) 钠的初始温度 $360 \text{ }^\circ\text{C}$;
- 5) 房间最低管道离天花板的距离 2.35 m;
- 6) 管道的几何尺寸 $89.0 \text{ mm} \times 4.5 \text{ mm}$;
- 7) 所取泄漏点的压力 0.8 932 MPa;
- 8) 房间地板和墙裙为 3 mm 的不锈钢和绝热层(绝热层采用厚度为 30 mm 普通硅酸铝纤维层和厚度为 70 mm 岩棉层的复合材料);
- 9) 房间天花板和墙面为 6 mm 的碳钢和绝热层(绝热层采用厚度为 30 mm 普通硅酸铝纤维层和厚度为 70 mm 岩棉层的复合材料);
- 10) 房间内氧气份额 0.21;
- 11) 管道泄漏率 2.734 kg/s;
- 12) 计算时间 200.0 s;

13) 房间中有一回路钠净化系统和一回路钠分析监测系统的管道流经此房间,经计算选取一回路钠净化系统的管道作为此房间的雾火计算分析。

6 计算结果及分析

房间最高压力在 6 s 左右达到最高为 106 923.2 Pa,由于事故通风的突然启动,导致房间压力突然下降,而后由于泄漏钠的继续燃烧,且泄漏钠的温度高,在 10.3 s 左右达到第 2 峰值 104 470.9 Pa。在计算时间内第 1 层混凝土温度基本保持不变,Na₂O 总产生量为 27 kg 左右。考虑到过滤器效率,27 kg Na₂O 中有 2.7 kg 以气溶胶的形式迁移到大气中。2.7 kg 钠的火灾烟雾中所含的主要成分的放射性活度列于表 1。

7 结论

CEFR 一回路钠净化系统在发生钠火灾事故工况的情况下,热力学后果即温度压力在建筑可接受范围内,放射性后果也在允许值内。

表 1 气溶胶放射性活度

Table 1 Activity of sodium aerosol

元素	放射性活度/Bq
²⁴ Na	4.32×10 ¹⁰
¹³¹ I	2.70×10 ⁵
¹³⁴ Cs	4.21×10 ⁶
¹³⁷ Cs	1.51×10 ⁸
²² Na	1.78×10 ⁵
³ H	3.46×10 ⁷