

钠冷快堆钠池火灾事故数值模拟

张 斌,朱继洲

(西安交通大学 能源与动力工程学院 核能与热能工程系,陕西 西安 710049)

摘要: 为了估计和预测钠火灾的后果,构建了以“有火焰薄层”为理论基础的燃烧模型和热传输模型,给出了程序计算结果与试验值的比较。比较结果证实,该计算结果可信、模型合理。程序用来分析和预测钠池火灾事故。

关键词: 钠冷快堆;钠池火;火焰薄层

中图分类号: TL364.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6931(2005)05-0442-05

Numerical Simulation of Sodium Pool Fires in Liquid Metal-Cooled Fast Breeder Reactor

ZHANG Bin, ZHU Ji-zhou

(Nuclear Engineering Department, School of Energy and Power Engineering,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In Liquid Metal-Cooled Fast Breeder Reactor (LMFBR), the leakage of sodium can result in sodium fires. Due to sodium's high chemical reactivity in contact with air and water, sodium fires will lead to an immediate increase of the air temperature and pressure in the containment. This will harm the integrity of the containment. In order to estimate and foresee the sequence of this accident, or to prevent the accident and alleviate the influence of the accident, it is necessary to develop programs to analyze such sodium fire accidents. Based on the work of predecessors, flame sheet model is produced and used to analyze sodium pool fire accidents. Combustion model and heat transfer model are included and expatiated. And the comparison between the analytical and experimental results shows the program is creditable and reasonable. This program is more realistic to simulate the sodium pool fire accidents and can be used for nuclear safety judgement.

Key words: liquid metal-cooled fast breeder reactor; sodium pool fire; flame sheet

收稿日期:2004-05-27;修回日期:2004-11-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(19785002)

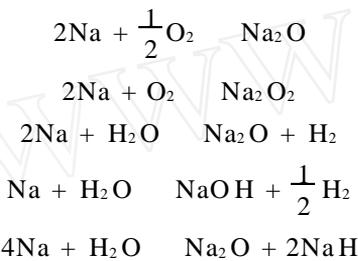
作者简介:张 斌(1976-),男,湖北枝江人,博士研究生,核能与热能工程专业

钠化学特性十分活泼,与空气或水直接接触时会激烈反应,钠冷快堆中与钠有关的安全问题得到了广泛重视。钠的泄漏是钠冷快堆设计基准事故之一。发生钠的泄漏事故时,钠从热传输系统泄漏出来,立即与氧气和水激烈反应,反应可能导致不同大小的液滴,产生所谓的雾火。泄漏的钠剩余部分可能直接溅射到地面,形成池火。所有这些都将导致安全壳内气体温度和压力的剧增,危害到安全壳的完整性。

本工作以有火焰薄层模型为理论基础,讨论钠池火灾的分析、计算等相关问题。

1 物理模型

钠池火灾中,泄漏的钠立即裸露在腔室的地表面,迅速与氧气或水发生反应。在整个钠池火中发生如下化学反应^[1]:



1.1 燃烧模型

本模型中,假设在钠池表面之上有一层无限薄的火焰薄层,在该薄层处氧化剂(氧气或水蒸气)和钠蒸气相遇燃烧。利用火焰薄层处的质量与能量守恒方程和燃烧平衡方程来求解薄层附近的化学行为。薄层处,燃烧需要的钠蒸气和氧化剂(氧气或水蒸气)分别来自钠池和环境大气的质量扩散。

采用如下假设^[2]:1) 考虑的钠池火是等压条件下的稳态燃烧;2) 火焰处局部平衡,即火焰处钠、氧气和水蒸气完全消耗;3) 环境气体和钠池表面分区反应;4) 钠池表面处燃料气体和氧化剂(氧气或水蒸气)按照一定的化学计量比反应;5) 钠池表面的温度等于钠池的温度,因为液态钠具有相当高的热导率。

质量和能量守恒方程如下:

$$N_{\text{Na}} = \sum_j N_j - N_{\text{Na}j} \quad (1)$$

$$q_{\text{burn}} = q_g + q_p + q_w \quad (2)$$

式中:下标 Na 代表钠蒸气;j 代表氧化剂(本模型中指氧气或水蒸气);N 是摩尔通量(mol ·

m⁻² · s⁻¹); N_{Na}j 是单位质量氧化剂(氧气或水蒸气)与钠反应的化学计量比;q_{burn}、q_g、q_p和q_w分别是反应热流密度、从火焰层到环境大气的热流密度、从火焰薄层到钠池的热流密度以及从火焰薄层到腔室结构壁面的热流密度, W · m⁻²。

该模型机理示于图 1。在火焰薄层和钠池表面的区域中,假设存在一维的钠蒸气扩散^[3]:

$$N_{\text{Na}} = Y_{\text{Na}}(N_{\text{Na}} + N_{\text{N}_2}) - C_f D_{\text{Na}} \frac{dY_{\text{Na}}}{dz} \quad (3)$$

式中:Y_{Na}为钠蒸气的摩尔份额;C_f为火焰层与钠池之间区域混合气体的摩尔密度(mol · m⁻³);D_{Na}为钠蒸气的扩散系数(m² · s⁻¹);z为火焰高度方向上的坐标;下标 N₂代表氮气,且这里 N_{N₂}可设为 0,因为在这个区域中没有 N₂的产生,也不会消耗 N₂。边界方程如下所示:

$$Y_{\text{Na}} = p_{\text{Na,sat}}/p \quad z = 0 \text{ (钠池表面处)}$$

$$Y_{\text{Na}} = 0 \quad z = l_f \text{ (火焰处)}$$

式中:p为混合气体压力(Pa);p_{Na,sat}为钠蒸气的饱和压力(Pa);l_f为火焰高度(m)。

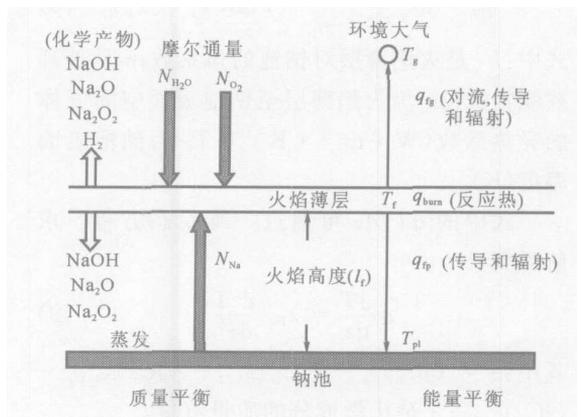


图 1 有火焰薄层的模型示意图

Fig. 1 Scheme of the flame sheet model

利用上述边界条件,由式(3)可得到从钠池到火焰薄层钠的质量流量:

$$N_{\text{Na}} = \frac{C_f D_{\text{Na}}}{l_f} \ln \frac{p}{p - p_{\text{Na,sat}}} \quad (4)$$

根据质量-热量传输的类比性,利用经验关系式,可得出氧化剂的摩尔通量:

$$N_j = B \frac{C_f D_j}{l_f} \ln \frac{Y_i}{1 - Y_j} \left[g \sqrt{\frac{1}{2} (T_f - T_g) S_c} \right]^{1/3} \quad (5)$$

式中: B 为紊流热传输的比例系数; C_j 为氧化剂 j (氧气或者水) 的摩尔密度 ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$); D_j 为氧化剂 j (氧气或水) 的扩散系数 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$); Y_j 为氧化剂 j 的摩尔份额; g 为重力加速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$); β 为体积膨胀率 ($1/\text{K}$); ν 为运动粘度 (m^2/s); T_f 为火焰薄层处温度 (K); T_g 为环境大气的温度 (K); Sc 为施密特数。

为保证火焰处的质量守恒, 引入 N_{arj} , 并联立方程(4)和(5), 得到:

$$\frac{C_i D_{Na}}{l_f} \ln \frac{p}{p - p_{Na, \text{sat}}} = \sum_j B \frac{C_j D_j}{l_f} \cdot \ln \frac{Y_j}{1 - Y_j} \left[g \frac{\beta}{2} (T_f - T_g) Sc \right]^{1/3} N_{arj} \quad (6)$$

反应热流密度 q_{burn} 由下式给出:

$$q_{\text{burn}} = \sum_j \frac{N_j H_{c_j}}{M_{Na}} N_{arj} \quad (7)$$

其中: M_{Na} 是钠分子的摩尔质量; H_{c_j} 为钠与氧化剂的反应热 ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

火焰层和钠池表面之间的热传输主要是热传导和辐射。到钠池表面的热流密度 q_p 可表示为:

$$q_p = N_2 \frac{dT}{dz} \Big|_{z=l_f} + F_{fp} (T_f^4 - T_p^4) \quad (8)$$

式中: F_{fp} 是火焰薄层对钠池的角系数; N_2 是玻耳兹曼常数; N_2 为火焰薄层至钠池表面空间气体的导热系数 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$); T_p 为钠池表面温度 (K)。

式中的 dT/dz 可通过一维稳态方程^[4] 求解得到:

$$\frac{dT}{dz} = N_2 \frac{d^2 T}{dz^2} \quad (9)$$

其中: $\rho = (jC_p)_{Na} - (jC_p)_{Na_2O} - (jC_p)_{Na_2O_2} - (jC_p)_{NaOH}$; j 是化学成分的质量流量。

基于如下边界条件: $T = T_p$ ($z = 0$ 处), $T = T_f$ ($z = l_f$ 处), 方程(8)中的 $\frac{dT}{dz} \Big|_{z=l_f}$ 可表示为:

$$\frac{dT}{dz} \Big|_{z=l_f} = \frac{N_2}{\rho} \cdot \frac{T_f - T_p}{e^{l_f/N_2} - 1} \cdot \frac{l_f}{N_2} \quad (10)$$

这样, 从火焰层到环境大气的热流密度可表示为:

$$q_g = 0.14 (Gr \cdot Pr)^{1/3} (T_f - T_g) \frac{\rho}{l_f} + F_{fg} (T_f^4 - T_g^4) \quad (11)$$

式中: Gr 为格拉晓夫数; Pr 为普朗特数; ρ 为

环境大气的导热系数 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$); F_{fg} 为火焰薄层对环境空间的角系数。

从火焰层到结构壁面的传热可只考虑辐射换热, 热流密度表示为:

$$q_w = \sum_j F_{f_{wj}} (T_f^4 - T_{wj}^4) \quad (12)$$

把方程(3)~(12)代入方程(1)和(2), 即可得到关于火焰温度 T_f 和火焰层高度 l_f 的方程组, 采用牛顿-辛普生方法^[4] 迭代求解。

池火燃烧导致的化学成分的源项 M_{pl_c} 、质量源项 G_{pl} 和气体能量的产生率 S_{pl} 分别表示为:

$$M_{pl_c} = - \sum_c M_c \frac{A_f}{V_g} \sum_j \frac{N_j}{N_{arj_c}} \quad (13)$$

$$G_{pl} = \sum_c M_{pl_c} \quad (14)$$

$$S_{pl} = \frac{A_f q_g}{V_g} \quad (15)$$

式(13)和(15)中的 A_f 是计算单元中的火焰面积 (m^2); V_g 为相邻气体单元的体积 (m^3); c 是释放到气体的份额, 只有当 c 是气溶胶成分时, 这个份额才已知, 它的具体数值可根据试验或者工程经验得到。

1.2 热传输模型

采用集总参数假定来求解热传输模型。

对于环境大气, 其能量守恒方程为:

$$(cv m)_g \frac{dT_g}{dt} = \left(h_{fg} (T_f - T_g) + F_{fg} (T_f^4 - T_g^4) \right) A_f + F_{pg} (T_p^4 - T_g^4) A_p + \sum_i \left(h_{wig} (T_{wi} - T_g) + F_{wig} (T_{wi}^4 - T_g^4) \right) A_{wi} \quad (16)$$

式中: cv 为大气的定容比热容 ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$); m 为大气质量 (kg); h_{fg} 为从火焰薄层到环境的传热系数 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$); F_{pg} 为钠池表面对环境空间的角系数; A_p 为钠池面积 (m^2); h_{wig} 为从第 i 种结构壁面到环境的传热系数 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$); F_{wig} 为第 i 种结构壁面对环境空间的角系数; A_{wi} 为第 i 种结构壁面的面积 (m^2)。

方程右边依次是火焰薄层和环境大气之间的对流热流密度、火焰薄层和环境大气之间的辐射热流密度、钠池表面对环境大气的辐射热流密度、结构壁面到环境大气的对流热流密度、结构壁面到环境大气的辐射热流密度。

对于钠池和结构壁面,采用一维热传导^[4]传输模型来求解。下式为适用于钠池和结构壁面的热传导方程,求解即可得到钠池和结构壁面中的温度分布。

$$\frac{dT}{dt} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (17)$$

钠池的边界条件为:

$$\left. \frac{\partial T_p}{\partial z} \right|_{z=0} = \frac{1}{Na} \left(N_2 \left. \frac{\partial T_{N_2}}{\partial z} \right|_{z=0} + F_{fp} (T_f^A - T_p^A) - F_{fg} (T_p^A - T_g^A) - \sum_i F_{pwi} (T_p^A - T_{wi}^A) - h_{pg} (T_p - T_g) \right) \quad (18)$$

式中: N_a 为钠的导热系数($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$); h_{pg} 为从钠池表面到环境的传热系数($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$); F_{pwi} 为钠池表面对第 i 种结构壁面的角系数。

结构壁面的边界条件如下:

$$\left. \frac{\partial T_{wi}}{\partial z} \right|_{z=0} = \frac{-1}{w_i} F_{fwi} \frac{A_f}{A_{wi}} (T_f^A - T_{wi}^A) + F_{pwi} \frac{A_p}{A_{wi}} (T_p^A - T_{wi}^A) + \sum_i F_{wi,w} (T_{wi}^A - T_w^A) + F_{gwi} (T_g^A - T_{wi}^A) + h_{gwi} (T_g - T_{wi}) \quad (19)$$

式中: w_i 为第 i 种结构壁面的导热系数($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$); h_{gwi} 为从环境到第 i 种结构壁面的传热系数($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$); F_{gwi} 为环境空间对第 i 种结构壁面的角系数; F_{fwi} 为火焰薄层对第 i 种结构壁面的角系数; $F_{wi,w}$ 为第 i 种结构壁面对第 j 种结构壁面的角系数。

2 程序验证

2.1 试验描述

为了验证程序,选取模拟日本文殊(Monju)核电厂二次侧热传输管道破裂的大规模钠燃烧试验^[5]作为参考试验。在该试验中,钠池火占主要比重。试验装置示于图 2。试验中,液态钠从附着在 22B 管道上的一个喷嘴以钠柱火的形式泄漏,整个泄漏持续 3.7 h,但监测过程持续 5 h。试验监测了释放出来的所有化学成分的温度和浓度。

试验^[5]条件如下:试验腔室, $171.55 m^3$; 泄漏高度, 3.6 m; 温度, 480 °C; 泄漏率, $0.054 kg \cdot s^{-1}$; 持续时间, 3.7 h; 气体初始温度, 25 °C; N_2 初始含量(以体积百分比计,下同), 74.6%; O_2 初始含量, 21.0%; H_2O 汽初始含量, 1.4%; 入口边界温度, 23 °C; 通过率, $0.69 kg \cdot s^{-1}$; 入口边界 N_2 含量, 74.6%; O_2 含量, 21.0%; H_2O 汽含量, 1.4%。

数值计算采用三维笛卡尔坐标系,并将整个区域网格划分为 $10(I) \times 10(J) \times 15(K)$ 个计算单元, I, J, K 分别表示 x, y, z 坐标轴上计算网格数。时间步长 $t_g = 1.0 s$, $t_p = 2.5 \times 10^{-3} s$; 颗粒数目 100 个, 分析时间 18 000 s。

2.2 结果及分析

图 3 给出了本程序计算结果和试验结果的比较。从图3可以看出,对于天花板附近气体

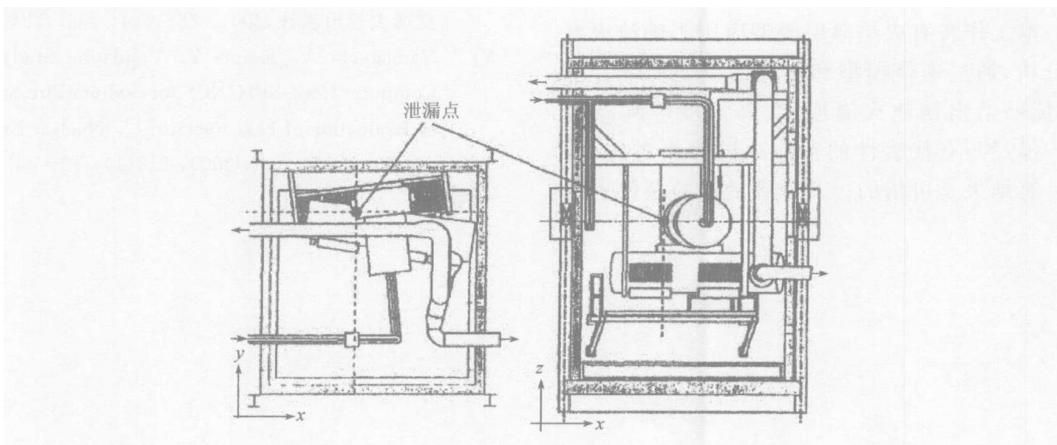


图 2 大型钠燃烧试验装置

Fig. 2 Experimental apparatus of large-scale sodium combustion test

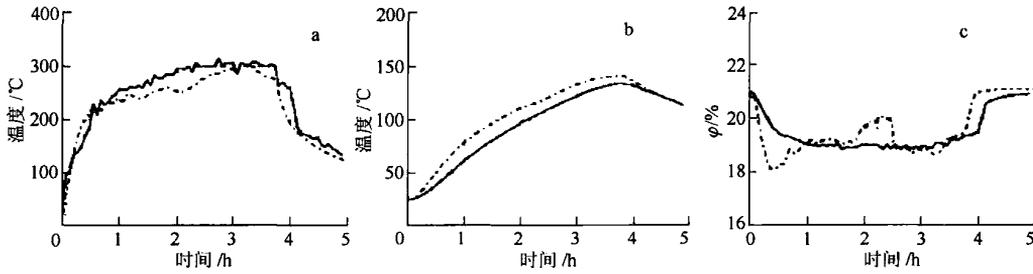


图3 钠池火试验值和计算值比较

Fig. 3 Comparison between analytical and experimental results

a——天花板附近气体温度;b——天花板里18 mm深度混凝土温度;c——试验装置中心处氧气浓度
虚线——试验值;实线——计算值

的温度,程序计算值与试验值在总的变化趋势和最大值方面均符合很好。天花板附近混凝土2个温度值也符合很好。对于氧气浓度,程序计算所得的总体变化曲线和试验测得的数据大体上符合较好,只是试验中测到的一些局部波动(比如开始时刻的突降),程序计算值未能反映出来。这主要是因为,在试验的开始阶段,钠与结构壁面发生碰撞或者落到地面时,钠会分散开,导致钠液滴的分裂和钠池面积的增大,这些都将促进钠的燃烧。相反,本程序假定钠池深度是一定的,面积是慢慢扩大的。这就导致了上述区别的出现。但总的来说,计算值和试验值符合良好,这也验证了程序的有火焰薄层钠池火理论模型的合理性。

3 结论

本工作将有火焰薄层模型应用于钠池火灾事故分析,通过燃烧模型和热传输模型的耦合求解,能够给出钠池火温度、气体温度等瞬态变化。经过与有代表性的钠池火试验相对比,证明计算结果是可信的。其计算的试验条件下的

气体温度、气体中氧气浓度等均与试验值符合很好。通过该程序的开发可深入准确理解与研究钠池火燃烧现象。

参考文献:

- [1] Beiriger P, Hopenfeld J, Silberberg M, et al. SOFIRE II User Report[R]. California: Atomics International Division, 1973.
- [2] Kikuchi Y. Investigation of Burning Rate of Sodium Pool Fires[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 1985, 23(1): 83~85.
- [3] Miyake O, Miyahara S, Ohno S, et al. Sodium Pool Combustion Codes for Evaluation of Fast Breeder Reactor Safety[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 1991, 28(2): 107~121.
- [4] 陶文铨. 数值传热学(第2版)[M]. 西安:西安交通大学出版社,2001. 78~124, 263~294.
- [5] Yamaguchi A, Tajima Y. Validation Study of Computer Code SPHINCS for Sodium Fire Safety Evaluation of Fast Reactor[J]. Nuclear Engineering and Design, 2003, 219(1): 19~34.