

钠水反应试验系统中小泄漏钠水反应 氢气分布特性

侯斌, 杨红义, 杜丽岩, 余华金

(中国原子能科学研究院 反应堆工程技术研究部, 北京 102413)

摘要: 蒸汽发生器是钠冷快堆的关键设备之一, 其传热管破裂引发的钠水反应会产生大量氢气及热量, 危害钠冷快堆的安全运行。本文基于 VOF 多相流模型, 在钠水反应试验系统内开展中小泄漏钠水反应工况的数值分析, 获得了高压反应釜内氢气在钠水反应下的三维空间分布特性和迁移特性。结果表明: 高压反应釜内氢气的迁移特性受钠液流速影响, 氢气在整个循环环路的迁移特性主要受水泄漏量控制。通过设置灵敏度为 0.005 ppm 的氢计, 获得了环路不同区域检测到氢气的最快特征时间。

关键词: 中小泄漏钠水反应; VOF 多相流模型; 数值模拟

中图分类号: TL334

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2020)01-0119-06

doi: 10.7538/yzk.2019.youxian.0014

Hydrogen Distribution Characteristics of Sodium-water Reaction under Small and Medium Leakage Test System for Sodium-water Reaction

HOU Bin, YANG Hongyi, DU Liyan, YU Huajin

(Division of Reactor Engineering Technology Research,
China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: The steam generator is one of the crucial equipments of the sodium-cooled fast reactor. The sodium water reaction caused by the heat transfer pipe rupture generates a large amount of hydrogen and heat, which will endanger the safety of the sodium-cooled fast reactor. In this study, a numerical investigation in the sodium-water reactor test system under sodium-water reaction case of small and medium leakage was simulated based on VOF (volume of fluid) multiphase flow model. Both the three-dimensional spatial distribution and migration characteristics of hydrogen in the autoclave were obtained. The analytical results show that the migration characteristics of hydrogen in the autoclave are affected by the sodium flow rate, and the migration characteristics of hydrogen in the entire circulation loop are mainly controlled by the water leakage rate. By setting hydrogen meter with a sensitivity of 0.005 ppm, the fastest characteristic

time for detecting hydrogen in different regions of the circulation loop is obtained.

Key words: sodium-water reaction of small and medium leakage; VOF multiphase flow model; numerical simulation

蒸汽发生器是关系到快堆电站安全运行的重要部件,其传热管破裂引发的钠水反应会产生大量氢气及热量,形成压力波,危害钠冷快堆的安全运行。

目前,在已公开发表的文献中对采用 CFD 多相流方法计算钠水反应的报道还相对较少。国外研究者对 CFD 多相流钠水反应计算方法的研究进行了一些探索。Takata 等^[1]对比试验数据验证了 CFD 程序(自研)对可压缩多相流的计算能力,并在简化的单管泄漏及管束泄漏模型上进行耦合钠水化学反应的 CFD 计算分析。在进一步工作中,Takata 等^[2-3]用分子轨道理论和势能原理对钠水反应机理进行了分析,并对钠水反应过程进行了 CFD 计算与敏感性分析^[4]。Kim 等^[5]借助商业 CFD 软件 CFX,选用 VOF(流体体积分数)多相流模型并耦合涡扩散(EDM)快速化学反应模型,对简化的单管泄漏及管束泄漏模型进行钠水反应计算。Sang 等^[6]采用系统程序对蒸汽发生器水泄漏事故进行计算,得到了钠水反应事故工况下回路各节点的压力变化与峰值压力分析。

国内对于钠水反应研究多集中在采用一维程序进行计算,而采用三维 CFD 程序进行计算研究还相对较少。骆焱等^[7]采用一维特征线方法建立了快堆蒸汽发生器单管发生双端断裂情况下,水从破裂传热管流出的泄漏率计算模型和钠水反应气泡从球状到柱状的变温绝热生长模型。段日强等^[8-9]通过提出氢气线密度概念,建立了氢气线密度控制微分方程、氢氧根离子传输扩散方程和氢离子的三维传输扩散方程,得到了氢计对模型计算的蒸汽发生器钠出口氢浓度的响应与实际注水试验氢计的响应比较结果,并在简化模型上对小泄漏下的压降、流场进行了一定计算。许业强^[10]采用商业 CFD 软件 FLUENT 对试验系统中氢离子在钠中的扩散过程进行模拟,该研究采用单相组分运输模型,选取部分试验系统物理模型,忽略氢气迁移过程,重点模拟了溶解氢离子的迁移特性。徐帅等^[11]采用商业软件 FLUENT 对小泄漏钠水反

应区的瞬态现象进行了数值模拟,基于简化的二维单管泄漏模型,计算得到泄漏孔径为 0.2 mm 时反应区最高温度可达 1 564 K,最高温度随泄漏率的增加而升高,但保持在一定范围内。徐帅等^[12]采用商业软件 FLUENT 对不同壳侧压力下小泄漏钠水反应区现象进行了瞬态数值模拟,计算结果表明,壳侧压力影响反应产物的扩展和高温区范围,但对反应区最高温度没有明显影响。

本文采用 VOF 多相流模型研究中小泄漏钠水反应工况下钠水反应试验系统的氢离子三维空间分布特性、迁移特性,为氢计在钠水反应试验系统的报警阈值、布置位置等设计奠定技术基础。

1 试验模型与网格

1.1 试验模型

钠水反应试验系统主要由一级事故排放罐、二级事故排放罐、电磁泵、高压计量水泵、氢计、气泡噪声探测器、爆破片、贮水罐、钠缓冲罐、钠水反应器和高压反应釜等设备组成,并通过管道与各公用系统相连,主要包括钠充排系统、钠净化系统、氩气系统、真空系统、钠泄漏探测系统、钠火消防系统、仪控系统。建模过程中忽略管路泵、阀门、测量装置等部件细节部分,整个环路如图 1 所示。

1.2 网格划分

采用全结构化与扫掠型网格方式提升网格

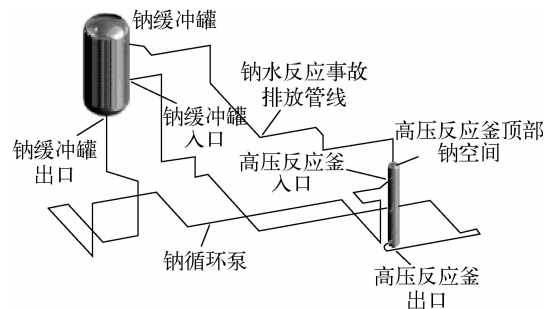


图 1 钠水反应试验系统简图

Fig. 1 Schematic diagram of sodium-water reaction test system

质量与控制网格畸形率,全计算域采用内部面(interior)连接、分步成型的一体式网格以提升计算稳定性与准确性。中小泄漏所模拟的破口尺寸相比整个环路尺度是极小的,若按模拟破口尺寸进行网格划分,需一定数量的网格以保证破口局部网格分辨率,其最终网格数量将过大(受网格膨胀率限制)。因此,中小泄漏计算物理模型中,将破口简化为 10 mm×10 mm 的正方形投影破口并维持破口中心高度不变。

图 2 示出网格无关性验证。如图 2 所示,通过对 60 万、90 万、130 万 3 种网格量级下的流场进行计算,分别取全计算域平均绝对压力、高压反应釜顶部氩气空间平均绝对压力、高压反应釜入口平均绝对压力、缓冲罐入口平均绝对压力作为代表。当网格量级发生显著变化时,计算所得数据均未发生显著变化,考虑到计算瞬态过程所消耗的时间资源,因此选择 60 万量级网格进行后续瞬态计算,最小正交质量为 0.23。

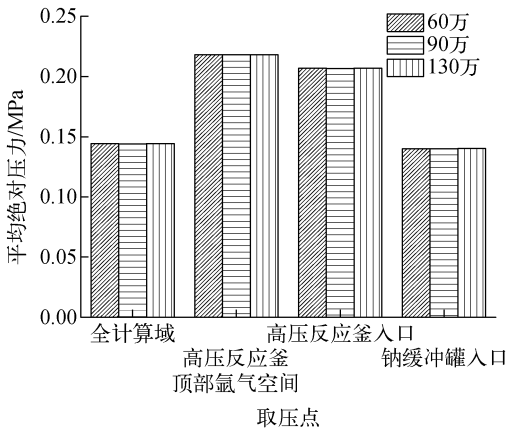


图 2 网格无关性验证

Fig. 2 Grid independence check

2 数学模型

2.1 守恒方程

流体的流动和传热规律以质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律为基础。

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\boldsymbol{\tau}} + \rho \mathbf{g} + S_v \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (\mathbf{v}(\rho E + p)) =$$

$$\nabla \cdot (K_{\text{eff}} \nabla T + (\bar{\boldsymbol{\tau}} \cdot \mathbf{v})) + S_E \quad (3)$$

式中: ρ 为密度; \mathbf{v} 为流速; p 为静压; S_v 为动量

源项; $\bar{\boldsymbol{\tau}}$ 为应力张量; E 为流体总能量; K_{eff} 为有效热导率; T 为温度; S_E 为能量源项。

2.2 湍流模型

本研究中流动雷诺数变化范围很宽, k -epsilon湍流模型不再适用,因此采用 SST k -omega湍流模型。

2.3 VOF 多相流模型

本研究采用 VOF 多相流模型,VOF 多相流模型的基本假设是计算域中的多相流体之间相互不渗透,通过求解相体积分数的连续性方程以追踪相间交界面,对于某相 q ,其体积分方程为:

$$\frac{1}{\rho_q} \left(\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q) \right) = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (m_{pq} - m_{qp}) \quad (4)$$

式中: α_q 为 q 相的体积分; ρ_q 为 q 相的密度; \mathbf{v}_q 为 q 相的速度; S_{α_q} 为 q 相的质量源项; m_{pq} 为从 p 相传递到 q 相的质量; m_{qp} 为从 q 相传递到 p 相的质量; t 为时间。

2.4 闪蒸及冷凝模型

本研究中,由于采用 VOF 多相流模型,其相界面温度与压力等信息由两相共享,蒸发冷凝模型考虑为 Lee 模型。在 Lee 模型中,蒸汽输运方程用于求解气相与液态相的质量输运:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_v \rho_v) + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v \mathbf{v}_v) = \dot{m}_{lv} - \dot{m}_{vl} \quad (5)$$

式中:下标 v 表示蒸汽相; α_v 为蒸汽体积分; ρ_v 为蒸汽相密度; \mathbf{v}_v 为蒸汽相速度; \dot{m}_{lv} 和 \dot{m}_{vl} 分别为蒸发和冷凝的质量输运速率。

2.5 组分输运模型

对于有 i 种物质的单相混合物体系来说,某种具体物质所对应的质量分数为 Y_i ,其组分输运守恒方程式可表示为:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} Y_i) = -\nabla \cdot \mathbf{J}_i + R_i + S_i \quad (6)$$

式中: S_i 为自定义源项; R_i 为化学反应质量源项; \mathbf{J}_i 为质量扩散项。

因此,组分输运模型的关键在于求解质量扩散项,其在湍流流动中可被描述为:

$$\mathbf{J}_i = -\left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_i} \right) \nabla Y_i - D_{i,T} \frac{\nabla T}{T} \quad (7)$$

式中: $D_{i,m}$ 为混合物体系中 i 物质的质量扩散系数; Sc_i 为湍流施密特数; $D_{i,T}$ 为混合物体系中 i 物质的热扩散系数; μ_i 为黏度。

2.6 快速化学反应模型

采用涡扩散模型(EDM, eddy-dissipation model)表征化学反应。该模型指出,在湍流条件下,对于反应 r 物质 i 的快速化学反应的速率 $R_{i,r}$ 受两种因素控制,反应物侧速率、生成物侧速率分别为:

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A \rho \frac{\epsilon}{k} \min_{\mathfrak{R}} \left(\frac{Y_{\mathfrak{R}}}{v_{\mathfrak{R},r} M_{w,\mathfrak{R}}} \right) \quad (8)$$

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A B \rho \frac{\epsilon}{k} \frac{\sum_P Y_P}{\sum_j v''_{j,r} M_{w,j}} \quad (9)$$

式中: A 、 B 为常数,分别取 4、0.5; k 为湍动能; ϵ 为湍动能耗散率; Y_P 和 $Y_{\mathfrak{R}}$ 分别为生成物和反应物的质量分数; $M_{w,i}$ 、 $M_{w,\mathfrak{R}}$ 和 $M_{w,j}$ 分别为物质 i 、 \mathfrak{R} 和 j 的分子量; $v_{\mathfrak{R},r}$ 为反应 r 中物质 \mathfrak{R} 的化学计量系数; $v'_{i,r}$ 为反应 r 中物质反应物 i 的化学计量系数; $v''_{j,r}$ 为反应 r 中物质生成物 j 的化学计量系数。

2.7 边界条件

1) 循环边界

本研究中计算物理模型为环路,钠液没有

进出口边界条件,因此在原回路钠循环泵位置(图1)设定循环边界条件,利用压力差(泵压头)建立整个环路的初始稳态钠循环流动。

2) 破口边界条件

破口边界条件设定为水质量流量边界条件,水质量流量(即水泄漏量)按表1给定。本研究中考虑入口边界水质量流量为线性增加类型,其流量由0到达设定值的时间为0.01 s。

表1 计算参数

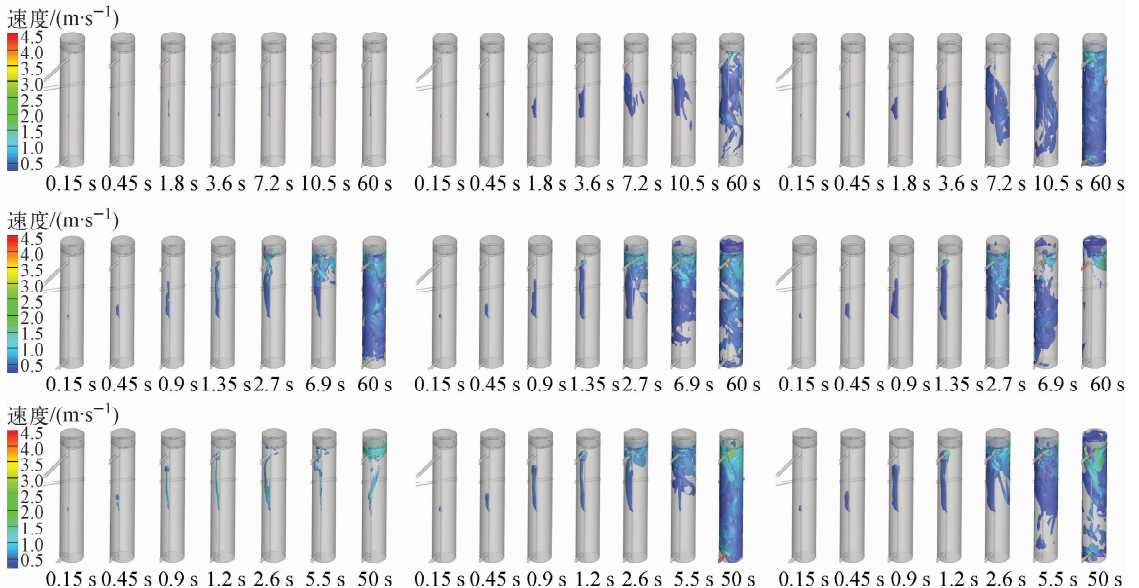
Table 1 Calculation parameter

计算工况	水泄漏量/ ($\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$)	模拟破口 直径/mm	预定泄漏 时间/s
1	0.09	0.07	60
2	2.18	60	
3	6	0.3	50

3 结果与讨论

3.1 高压反应釜氢气分布特征

通过对工况计算结果进行后处理,分别以VOF为0.1、0.01、0.001做等值面代表不同浓度氢气团,不同时刻、不同工况下高压反应釜内氢气的三维空间分布如图3所示。



工况:第1行为工况1,第2行为工况2,第3行为工况3

VOF:第1列为0.1,第2列为0.01,第3列为0.001

图3 不同时刻、不同工况下高压反应釜内氢气的三维空间分布

Fig. 3 Three-dimensional spatial distribution of hydrogen in autoclave at different time and cases

由图3可知,氢气变化大致分为3个特征阶段。水泄漏刚开始时,整个环路仅有正常的钠液循环。此时观测到氢气在密度差的作用下逐渐上浮,但该阶段并非完全无扰动,当氢气浓度过低时其仍可在钠液的携带下至出口,因此泄漏初段氢气分布特征同时受泄漏量与钠液在高压反应釜内的宏观向下流速控制。氢气上升至高压反应釜顶部钠液入口水平面附近,由于该入口流速显著高于高压反应釜内部,此时,氢气团受到钠液的强烈冲击,氢气团外形不能继续维持,氢气团被破碎,破碎化的氢气微团被钠液携带至高压反应釜下部。由于钠液对氢气团的冲击破碎作用,高压反应釜开始由上至下逐渐累积氢气,氢气最终到达高压反应釜下部钠液出口,最后随时间的进一步推进,氢气随钠液在整个循环回路迁移。

3.2 氢气迁移特性

表2列出氢气迁移过程。由表2可得,随水泄漏量的增大,氢气完成第1次循环时间会显著降低。对于工况2与工况3,仅需约1.6 s高压反应釜顶部钠空间就开始有氢气累积,而工况1所需时间达到10.1 s。因此,着眼于整个环路进行分析,氢气首次出现的特征时间与水泄漏量相关。

表2 氢气迁移过程

Table 2 Hydrogen migration process

位置	氢气首次出现时间/s		
	工况1	工况2	工况3
高压反应釜顶部钠空间	10.1	1.69	1.51
高压反应釜出口通道	10.43	6.85	5.51
钠缓冲罐入口通道	29.04	12.43	9.46
钠缓冲罐出口通道	50.92	18.02	20.33
模拟泵出口通道	55.09	24.97	22.51
高压反应釜入口通道	65.16	30.4	26.92

3.3 事故进程分析

结合钠水反应过程数据,通过添加假想氢测点可对钠水反应事故进程进行分析,所采用数据均为管道截面、容器截面、容器空间平均值,按氢可能出现的顺序对假想氢测点进行编号,共分析5个氢测点。根据一般氢测量仪器标准,假设氢计的灵敏度均为0.005 ppm。

表3列出假想氢测点氢气首次出现的特征时间。由表3可见,氢计检测到泄漏的最快特征时间分别为:工况1,12.27 s;工况2,1.56 s;工况3,1.28 s。

表3 不同氢测点氢气首次出现的特征时间

Table 3 Characteristic time of the first appearance of hydrogen at different hydrogen measurement points

测点位置	氢气首次出现的特征时间/s		
	工况1	工况2	工况3
高压反应釜顶部钠空间(测点1)	12.27	1.56	1.28
高压反应釜出口(测点2)	12.62	7.34	5.34
钠缓冲罐入口(测点3)	29.06	12.49	9.48
钠缓冲罐出口(测点4)	52.76	21.51	20.57
高压反应釜入口(测点5)	65.23	30.55	27.12

4 结论

反应区氢气迁移特性与高压反应釜内宏观钠液流速和高压反应釜入口钠液当地流速有关,氢气迁移及分布特征可划分为3个阶段。

1) 泄漏初始阶段:氢气在密度差的作用下逐渐上浮。

2) 氢气团破裂阶段:氢气上升至高压反应釜顶部钠液入口附近,由于钠液流速显著高于氢气速度,钠液对氢气团形成冲击,破碎化的氢气微团被钠液携带至高压反应釜下部。

3) 泄漏稳定阶段:高压反应釜开始由上至下逐渐累积氢气,氢气最终到达高压反应釜下部钠液出口,氢气开始随钠液在整个循环回路迁移。

氢气在整个循环回路的迁移特性主要受水泄漏量控制,在不考虑氢计延迟时间的条件下,灵敏度为0.005 ppm的氢计检测到泄漏的氢气首次出现的最快特征时间分别为:工况1,12.27 s;工况2,1.56 s;工况3,1.28 s。

参考文献:

- [1] TAKATA T, YAMAGUCHI A. Numerical approach to the safety evaluation of sodium & water reaction[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2003, 40(10): 708-718.
- [2] TAKATA T, YAMAGUCHI A, FUKUZAWA K, et al. Numerical methodology of sodium-

- water reaction with multiphase flow analysis[J]. Nuclear Science and Engineering, 2005, 150(2): 221-236.
- [3] TAKATA T, YAMAGUCHI A, UCHIBORI A, et al. Computational methodology of sodium-water reaction phenomenon in steam generator of sodium-cooled fast reactor[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2009, 46(6): 613-623.
- [4] TAKATA T, YAMAGUCHI A, OHSHIMA H, et al. Computational sensitivity study on sodium-water reaction phenomenon[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2006, 43(5): 514-525.
- [5] KIM S, EOH J H, KIM S O. Development of a numerical analysis methodology for the multi-dimensional and multi-phase phenomena of a sodium-water reaction in a SFR steam generator [J]. Annals of Nuclear Energy, 2007, 34(10): 839-848.
- [6] SANG J A, HA K S, CHANG W P, et al. Evaluation of a sodium-water reaction event caused by steam generator tubes break in the prototype generation IV sodium-cooled fast reactor [J]. Nuclear Engineering and Technology, 2016, 48(4): 952-964.
- [7] 骆焱, 张建民, 单建强, 等. 快堆蒸汽发生器大泄漏钠-水反应计算[J]. 核科学与工程, 2000, 20(2): 154-161.
LUO Yan, ZHANG Jianmin, SHAN Jianqiang, et al. Large leakage sodium-water reaction calculation of fast reactor steam generator[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2000, 20(2): 154-161(in Chinese).
- [8] 段日强, 王洲, 杨献勇, 等. 快堆蒸汽发生器小泄漏钠水反应产物传输扩散三维数值模拟[J]. 核动力工程, 2001, 22(3): 207-210.
DUAN Riqiang, WANG Zhou, YANG Xianyong, et al. Three-dimensional numerical simulation of transport and diffusion of small leaking sodium water reaction products in fast reactor steam generator[J]. Nuclear Power Engineering, 2001, 22(3): 207-210(in Chinese).
- [9] 段日强, 王洲. 快堆蒸汽发生器小泄漏下三维流场数值模拟[J]. 核动力工程, 2001, 22(2): 150-154.
DUAN Riqiang, WANG Zhou. Numerical simulation of three-dimensional flow field under small leakage of fast reactor steam generator[J]. Nuclear Power Engineering, 2001, 22(2): 150-154 (in Chinese).
- [10] 许业强. 蒸汽发生器事故保护系统设计研究[D]. 北京: 中国原子能科学研究院, 2017.
- [11] 徐帅, 余华金, 王冲, 等. 钠冷快堆蒸汽发生器小钠水反应现象数值模拟[J]. 原子能科学技术, 2018, 52(9): 1 641-1 648.
XU Shuai, YU Huajin, WANG Chong, et al. Numerical simulation of reaction of small sodium water in sodium-cooled fast reactor steam generator[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2018, 52(9): 1 641-1 648(in Chinese).
- [12] 徐帅, 余华金, 王冲, 等. 快堆蒸汽发生器壳侧压力对小钠水反应现象的敏感性分析[J]. 产业与科技论坛, 2018, 17(9): 57-58.
XU Shuai, YU Huajin, WANG Chong, et al. Sensitivity analysis of shell side pressure of fast reactor steam generator to small sodium water reaction[J]. Estate and Science Tribune, 2018, 17(9): 57-58(in Chinese).