

新型安注箱水动力特性的数值模拟

姜国宝 凌空 陈黎 张剑飞 李增耀 陶文铨

(热流科学与工程教育部重点实验室, 西安交通大学能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要 安注箱是一种在核电站发生事故时向事故设备注射冷却水的先进设备。它对缓解核反应堆冷却水损失事故非常有利。本文在国外已有的新型安注箱设计基础上提出了一个原理性模型进行理论分析和数值模拟, 以确认其注水特性。研究表明, 对于所研究的原理性模型采用多尺度网格进行数值计算, 可以得到能够满足核反应堆实际运行需求的水流量曲线。

关键词 核电站; 失水事故; 安注箱; 多尺度模拟; 数值计算

中图分类号: TL364+.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2014)02-0320-04

Numerical Analysis on the Hydrodynamic Performance of the Advanced Accumulators

JIANG Guo-Bao LING Kong CHEN Li ZHANG Jian-Fei LI Zeng-Yao TAO Wen-Quan
(Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering of MOE, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract The advanced accumulator is used in the nuclear power station and plays an important role in a loss-of-coolant accident (LOCA). In this paper, a prototype model of the advanced accumulator based on the existing ones abroad was proposed and studied by using numerical simulation. The results show that for the proposed model the required variation pattern of the water flow rate with time can be obtained by using multi-scale mesh.

Key words nuclear power generation; LOCA; advanced accumulator; multi-scale; numerical analysis

0 引言

日本福岛的核电事故引起了全世界对核电安全性的特别关注。当前核电安全性的研究比以往任何时候都更为重视。安注箱就是提高核电安全性的一个重要部件。

先进安注箱 (advanced accumulator, A-ACC) 是一种在核电站发生事故时可即刻向事故设备注射冷却水的先进设备, 其特点是在安注过程中可以改变水的流量, 从而延长安注时间, 对缓解核反应堆的失水事故非常有利^[1]。本文所研究的安注箱是在国外已有的新型安注箱设计基础上 (图 1) 提出的一种原理性模型。其原理性结构图如图 2 所示, 由压力容器, 水力学部件 (阻尼器), 立管等组成。

安注箱的工作原理为: 在安注箱工作开始前, 容器内上部有氮气构成的气相压力空间, 下部为安注所用的水。当下部阀门打开后, 安注箱内的水在容器内氮气压力的推动下, 同时经立管上端入口和水力学部件的入口流出 A-ACC, 此时出水量较大, 安注箱内的液面很快下降。当液面下降到立管入口位

置后, 容器内的水不再进入立管上端入口流出, 而仅从水力学部件的流通面积小得多的通道流出, 水流量大为减小, 延长了可注射的时间, 从而为确保其它由电路系统驱动的水泵投入运行争取了足够的时间。

本文对安注箱原理性模型 (图 3) 进行数值计算, 获得流量随注射时间而变化的特性曲线, 以从原理上确认上述对安注箱注水特性要求的可行性。

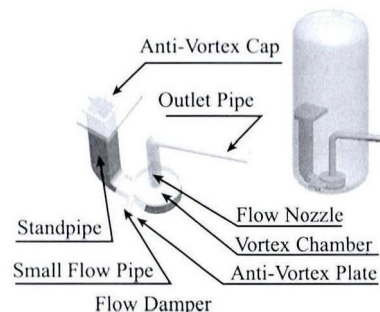


图 1 先进安注箱结构图^[2]

Fig. 1 Structure of the advanced accumulators^[2]

收稿日期: 2013-01-09; 修订日期: 2014-01-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.51136004); NSFC- 广东联合基金资助项目 (No.U0934005)

作者简介: 姜国宝 (1987-), 男, 山东烟台人, 博士研究生, 主要从事相变传热实验及数值模拟研究; 通信作者: 陶文铨, 男, 教授, 博士生导师, 中国科学院院士, wqtao@mail.xjtu.edu.cn

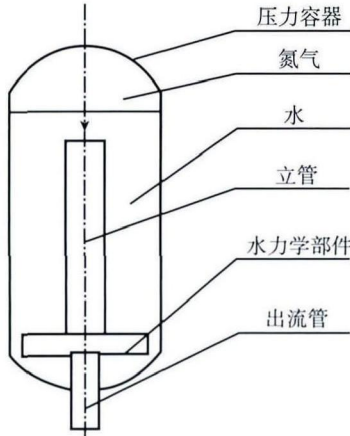


图 2 安注箱的原理性示意图
Fig. 2 Sketch of the advanced accumulators

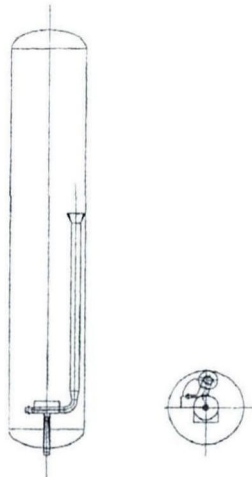


图 3 安注箱原理性计算模型
Fig. 3 Computation model of the advanced accumulators

1 计算模型与数值方法

1.1 计算模型的假设

由于安注过程中水的温度变化很小,基本上是个等温过程,因此水按不可压缩的常物性流体处理,物性取为初始温度 300 K 的值,对于氮气采用理想气体的可压缩模型。取箱体壁面为绝热边界条件;假设流动为湍流。模拟采用商业软件 FLUENT 进行。

1.2 网格系统

模型的网格划分采用 GAMBIT2.3.16 进行,对于本模型的网格系统,主要做了以下两点考虑:

- 1) 阻尼器及管道内部的流动较复杂而且流速较高,对安注箱的整体性能影响较大,其外部是平缓的容积流动。因此,采用多尺度网格的思想,对阻尼器和管道内部的区域采用细密的网格,而对其外部区域采用粗稀的网格,最大与最小网格的尺度比达到 30:1。这样可以抓住主要矛盾,同时减少计算量。
- 2) 所发生的物理过程是两相流问题,水在氮气压

力作用下界面向下推进,为了更准确地捕捉相界面,按照 FLUENT 的推荐,应尽可能采用六面体网格。但是由于结构的复杂性,在局部结构复杂的区域以及部件之间的连接过渡区也采用了一些四面体网格。

图 4 和图 5 为按照上面设计思路所构建的网格图。

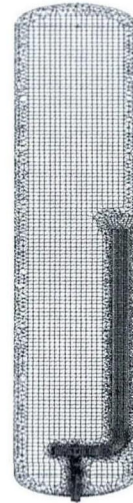


图 4 通过立管中心线竖直截面的网格
Fig. 4 Vertical-section mesh

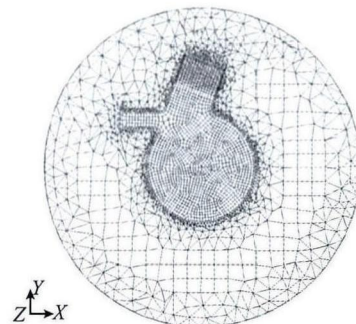


图 5 阻尼器横的截面网格
Fig. 5 Cross-section mesh of the damper

1.3 数值方法

采用 VOF 模型捕捉两相界面,计算过程中保证 Courant 数始终小于 0.15。对于湍流采用 RNG 模型。N-S 方程中的对流项采用 FUD 格式离散,时间项采用一阶全隐格式,用 SIMPLE 算法迭代求解 [3]。

2 计算模型的验证

2.1 简化的理论分析模型说明

为了考核本文采用的计算模型和方法,我们构建了一个可以进行分析求解的理论模型,简述如下。有一个装矿泉水的圆柱形桶体竖立放置,其内一半空间为水,另一半为气体,其底面中心连接有一竖

直圆管。圆柱形桶体的结构如图 6 所示,其几何尺寸见图 7。

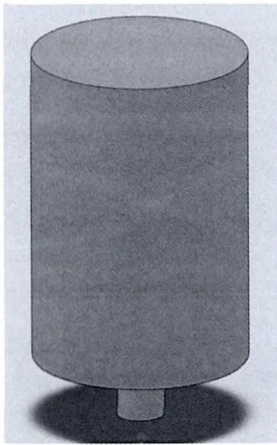


图 6 圆柱形筒体

Fig. 6 Cylindrical container

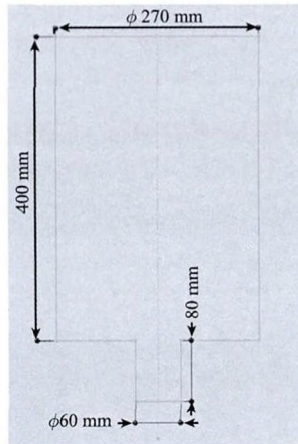


图 7 圆柱形水桶几何尺寸

Fig. 7 Cylinder geometry

初始条件:桶等分为上下两部分,上部空间为空气(占据 200 mm 高度,压力为 0.20 MPa),下部为水,出口处的压力为 0.15 MPa。

采用与安注箱的计算完全相同的计算模型,从开始注射时刻起,研究出口流量变化的情况。对于这一简单的注射过程可以根据热力学和流体力学的基本原理建立理论分析模型并得出分析解。据此可以评价数值计算结果的正确性。

2.3 简化模型的理论分析

在注射过程中,高压气体膨胀,水从底部喷出。注射开始时出口截面的流速可由总流伯努利方程获得:取水与气体初始分界面和水管出口两个界面进行分析,桶内水的总能头满足总流伯努利方程^[4]:

$$\frac{v_1^2}{2g} + z_1 + \frac{p_1}{\rho g} = \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + h_{LT} \quad (1)$$

式中,左边为气液交界面处流体的总能头,右边为下部出口处的总能头, v_1 、 v_2 分别为气液界面水的速度、底面上出口管中水的速度。式中 h_{LT} 为流动的沿程阻力和局部阻力。

由于流动过程的路程很短,所以忽略沿程阻力项对计算影响不大,截面突然缩小的局部阻力计算式为^[4]:

$$h_j = 0.5 \left(1 - \frac{s_2}{s_1} \right) \frac{v_2^2}{2g} \quad (2)$$

化简得到下式:

$$1.4482 \times \frac{v^2}{2g} = z + \frac{p_1 - p_2}{\rho g} \quad (3)$$

式中, v 为出口流速即式 (1) 中的 v_2 ; z 为气液界面

到出水管口的高度差 ($z_1 - z_2$); p_1 为气相压力, p_2 为出口压力 (0.15 MPa);

为了求解出口流速,首先需要确定出口流速与水柱高度 z 之间的关系,实际上:

$$\frac{d\left(\frac{\pi D^2}{4} z\right)}{dt} = (\pi r^2) v_2 \quad (4)$$

式中, D 为筒体直径, r 为出口圆管的半径。将图 7 中的几何数据代入得:

$$v_1 = \frac{dz}{dt}, \quad v_2 = \frac{81}{4} \frac{dz}{dt} \quad (5)$$

式 (5) 是关于高度 z 和速度 v_1 的联立一阶常微分方程,其初始条件为: $t = 0, z = 0.28 \text{ m}, v_1 = v_2 = 0$ (此处 0.28 是出水管高度与筒体半高之和)。

其次,需要确定气相压力随圆桶中水柱高度 z 的变化规律。将上部空气的膨胀分别按照等温与绝热^[5] 两种情况进行处理 (实际过程介于两者之间),

$$p_1 = 0.2 \frac{20}{48 - z} \text{ MPa (等温)} \quad (6)$$

$$p_1 = 0.2 \left(\frac{20}{48 - z} \right)^{1.4} \text{ MPa (绝热)} \quad (7)$$

这样由式 (1)~ 式 (7) 就可求出圆管出口速度 $v_2 = v(t)$ 。

2.4 理论分析模型计算结果与数值解的比较

图 8 中分别对绝热膨胀与等温膨胀绘制了出口流速的变化曲线计算结果。从曲线中可以看出,绝热膨胀与等温膨胀之间的差别不大。按照本数值模型计算得出的结果在开始阶段速度略低于理论分析,而在后半阶段则略高于理论分析,平均结果与理论分析得到的曲线基本一致。

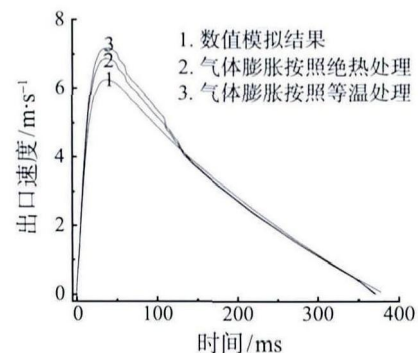


图 8 按不同方法计算的桶体圆管出口流速随时间的变化
Fig. 8 Outlet velocity vs. time by three different ways

以上验证分析表明, 我们所采用的在安注箱模拟过程中采用的设置是合理的。

3 安注箱计算结果

3.1 计算模型出口边界的假设

安注箱的出口采用压力出口边界, 其压力的变化如图 9 所示。

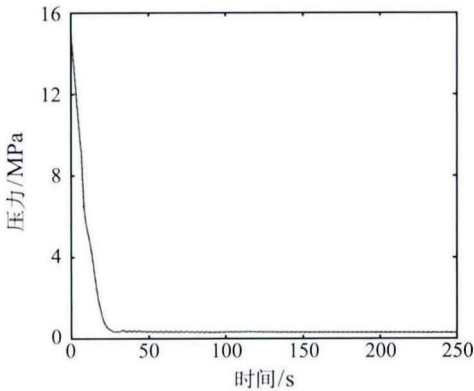


图 9 出口背压条件

Fig. 9 Pressure change at the outlet

3.2 计算结果

图 10 为采用数值计算得到的出口流量随时间的变化。从流量曲线可以看出, 流动过程分为两个阶段, 即大流量阶段和小流量阶段。两个阶段的分割点大约在 5 s 左右, 此时液面下降到了立管入口位置, 由于阻尼器内产生的很高的流动阻力, 使流量在很短的时间间隔内有一个明显的下降。

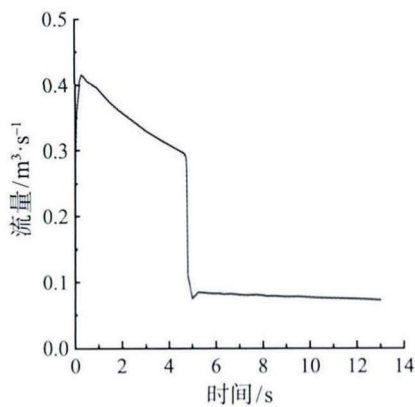


图 10 出口流量曲线

Fig. 10 Outlet velocity vs. time

图 11 是 12.3 s 时的纵截面流体的温度场。在安注箱的上部分由于氮气膨胀, 温度迅速降低, 此时最低的温度约为 247 K(约零下 26°C), 此后随着氮气的继续膨胀, 这个温度还会继续降低。由于水具

有较大的热惯性, 在氮气所占据的区域中靠近于水的一部分氮气受水的影响因此温度相对较高, 而水的温度基本还保持初始时的 300 K, 验证了对两种物质物性假设的正确性。

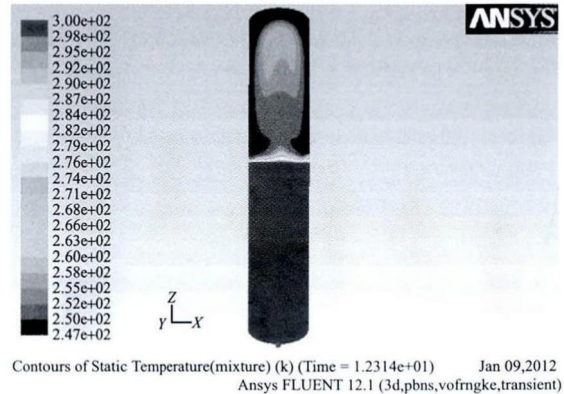


图 11 12.3 s 时的流体温度场

Fig. 11 Temperature field after 12.3 seconds

4 结 论

本文首先采用一个简单的桶状模型对所采用的数值方法进行了验证, 计算结果与理论分析结果基本一致, 证明了数值分析模型和方法的可靠性。对安注箱的原理性模型的数值计算结果能够很好解释安注箱的工作原理: 安注箱的流动过程分为大流量阶段和小流量阶段, 小流量阶段阻尼器内的流动阻力是确保小流量的关键因素。随着氮气的膨胀, 气体区域的温度会显著下降, 但水由于具有较大的热惯性, 温度基本保持不变。

参 考 文 献

- [1] Shiraiishi. The Advanced Accumulator: A New Passive ECCS Component of the APWR [C]// Saito. Advances in Light Water Reactor Technologies, Springer Science+Business Media, LLC 2011
- [2] Takata T, Takafumi O, Takashi I, et al. CFD on Small Flow Injection of Advanced Accumulator in APWR [J]. Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, 2009, 46(2): 54-60
- [3] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 第二版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001
TAO Wenquan. Numerical Heat Transfer [M]. 2ed. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001
- [4] 景思睿, 张鸣远. 流体力学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001
JING Sirui, ZHANG Mingyuan. Fluid Mechanics [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001
- [5] 沈维道, 蒋智敏, 童钧耕. 工程热力学 [M]. 第三版. 北京: 高等教育出版社, 2001
SHEN Weidao, JIANG Zhimin, Tong Jungeng. Engineering Thermodynamics [M]. 3ed. Beijing: Higher Education Press, 2001