

DOI: 10.7652/xjtuxb201511019

先进安注箱热工水力特性研究

苟军利¹, 单建强¹, 胡宏伟¹, 曹建华², 沈永刚²

(1. 西安交通大学核科学与技术学院, 710049, 西安; 2. 中科华核电技术研究院有限公司, 518035, 广东深圳)

摘要: 为了研究先进安注箱的热工水力特性,建立了其数学模型,包括基本守恒方程、传热模型、传质模型和阻尼器模型。开发了先进安注箱计算模块,并将其嵌入到 RELAP5/MOD3.3 程序中。通过与 CFD 模拟结果的比较分析,验证了文中模型和求解方法的合理性。针对某先进安注箱,研究了其热工水力特性,并开展了参数敏感性分析,结果表明:各参数的变化趋势合理,先进安注箱能实现从大流量到小流量段的过渡;小流量阶段的出口质量流量随阻尼器直径的增大而减小;整个阶段的出口质量流量随大流量水体积与氮气体积比的增大而减小;当立管形阻系数在一定的变化范围内时,大流量阶段的出口质量流量随立管形阻系数的减小而增大。该研究将为我国先进安注箱的设计和实验研究提供理论依据。

关键词: 先进安注箱;热工水力特性;敏感性分析

中图分类号: TL33 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)11-0116-06

Investigation on the Thermalhydraulic Characteristics of Advanced Accumulation Tank

GOU Junli¹, SHAN Jianqiang¹, HU Hongwei¹, CAO Jianhua², SHEN Yonggang²

(1. School of Nuclear Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. China Nuclear Power Technology Research Institute, Shenzhen, Guangdong 518035, China)

Abstract: To investigate the thermalhydraulic characteristics of advanced accumulation tank, the mathematical models, including the conservation equations, heat transfer model, mass transfer model and the damper model, are established. The calculation module of advanced accumulation tank is developed and embedded into the RELAP5/MOD3.3 code. By comparing the simulation results of the modified RELAP5 with those of a CFD analysis, the rationality of the models and solution methods is validated. The thermalhydraulic characteristics and the parameter sensitivity analyses of an advanced accumulation tank are performed with the modified code. It is found that the parameter variation trends are reasonable and the transition from large flow phase to small flow phase can be achieved by the advanced accumulation tank; large damper diameter leads to a small exit mass flow rate in the small flow phase; a small initial volume ratio of water to nitrogen leads to a large exit mass flow rate; and a large form loss coefficient of the stand pipe may result in a small exit mass flow rate in the large flow phase when the form loss coefficient varies in a certain range. The present study could provide a theoretical basis for the design and experimental investigation on the advanced accumulation tank.

Keywords: advanced accumulation tank; thermalhydraulic characteristics; sensitivity analysis

当压水堆核电厂发生大破口失水事故后,安注系统在喷放结束后分 3 个阶段向堆芯注水,即再灌水、再淹没和长期冷却。对于二代压水堆核电厂,依靠传统安注箱满足再灌水阶段的大流量需求,并依靠低压安注系统来满足再淹没和长期冷却阶段的小流量需求。能动的低压安注系统需在安注箱注完之后立刻启动,以提供所需的安注流量来保证堆芯再淹没。若低压安注系统不能及时启动,将使堆芯不能被有效冷却而导致堆芯熔化的严重事故发生。为此,日本三菱公司为其先进压水堆设计了一种可改变注入流量的先进安注箱^[1-2],即在安注箱内设置了阻尼器(见图 1)。由于阻尼器的存在,先进安注箱在大流量注入后过渡到小流量注入阶段,其效果如传统压水堆的低压安注泵投入初期的注射特性。因此,先进安注箱不仅可以代替传统安注箱,还可以获得较长的宽限时间以启动低压安注系统,更进一步,可能取消低压安注系统而只保留一套能动的安注系统(即高压安注系统),以完成高压安注和低压安注功能。这不仅减少了能动安全设施,使系统简化,且避免了人为干预可能产生的误操作,提高了安全性。Tadashi 等通过大量实验研究验证了其先进性^[3-7]。

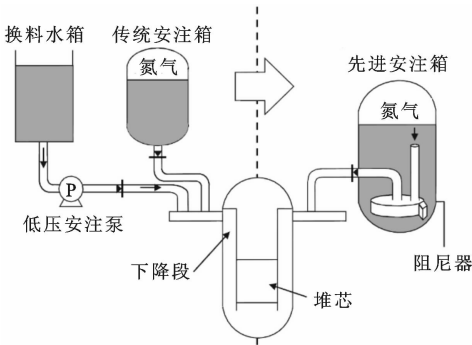


图 1 传统安注系统与先进安注系统对比图

福岛核事故引起了全世界对核电安全的广泛关注。CPR1000 作为中国商用压水堆的主力堆型,属于二代核电技术,其安全性与三代核电技术相比还有一定的差距。针对我国二代核电厂安全级冷却链的薄弱点,国家提出了反应堆安全级冷却链改进的方向和要求,研发具有自主知识产权的先进安注箱是其中的重要组成部分。为了开发用于先进安注箱热工水力特性研究的快速分析工具,本文建立了其热工水力模型,开发了计算模块并将之嵌入到 RELAP5/MOD3.3 程序。利用该程序对先进安注箱的热工水力特性进行了研究,通过参数敏感性分析,获得了主要因素对安注流量的影响规律,为先进安注箱的设计和实验研究提供了理论依据。

1 先进安注箱热工水力模型

先进安注箱工作原理如图 2 所示。位于安注箱底部中心位置的阻尼器有两个入口,即小流量管和大流量管。小流量管沿阻尼器切线方向接入,大流量管与小流量管成一定夹角接入阻尼器,大流量管的另一端与立管相连。当安注箱水位高于立管高度时,立管和小管都有流量注入阻尼器,它们交混后直接流向阻尼器中心,流动阻力很小,可以实现传统安注箱的大流量注入。当安注箱水位低于立管高度时,立管的流量变为 0,仅小管有流量沿着阻尼器切线方向注入,形成了漩涡,产生很大的流动阻力,以小流量模式注入反应堆。根据先进安注箱的结构特点和运行原理,建立了其热工水力模型。在建立该热工水力模型时,将其分为氮气区和水区,并作了如下假设:①壁面和水等温;②氮气为理想气体且比热容恒定;③忽略混合气体中水蒸气的分压。

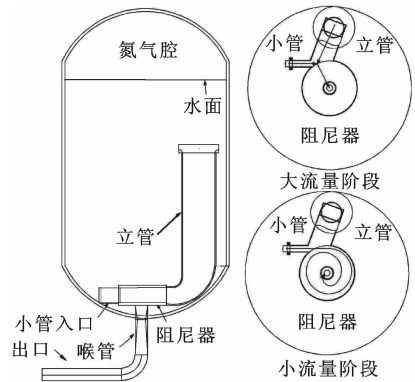


图 2 先进安注箱的工作原理图

1.1 氮气区模型

假设氮气区的质量保持不变,即

$$M_n = C = \rho_n V_n \quad (1)$$

式中: M_n 为氮气的质量; C 为常数; ρ_n 为氮气的密度; V_n 为氮气的体积。

氮气的能量守恒方程为

$$M_n (dU_n/dt) = -p_n (dV_n/dt) + Q_n \quad (2)$$

式中: U_n 为氮气内能; Q_n 为氮气的吸热量;右边第 1 项为体积变化所作的功。氮气的吸热量由下式表示

$$Q_n = h_1 A_1 (T_w - T_g) + h_2 A_2 (T_f - T_g) + \dot{M}_{vap} h_g^s (T_f) + \dot{m}_c (h_{fg} (T_g) - h_f^s (T_g)) \quad (3)$$

式中:右边第 1 项为壁面对氮气的对流换热;第 2 项为水面对氮气的对流换热;第 3 项为水蒸发带给氮气的热量;第 4 项为氮气中水蒸气冷凝带走的热量。换热系数 h_1 、 h_2 , 蒸发率 M_{vap} 和冷凝率 m_c 的计算方法可参考文献[8]。

1.2 水区模型

假设安注箱内水是不可压缩的,沿流线进行积分,可得大流量时立管动量方程为

$$\rho(Ldv_1/dt + 0.5(1 - (A_l/A_f)^2)v_1^2) + \Delta p_f = (p_n - p_D) + \Delta p_z \quad (4)$$

同理,可得小管内流体的动量方程

$$\rho(Ldv_s/dt + 0.5(1 - (A_s/A_f)^2)v_s^2) + \Delta p_f = (p_n - p_D) + \Delta p_z \quad (5)$$

出口管内流体的动量方程可表示为

$$p_D = p_e + \rho L(dv/dt) + \Delta p_f + \Delta p_j + \Delta p_v \quad (6)$$

式中: Δp_f 为摩擦压降; Δp_z 为重力压降; p_e 为出口的压力; p_n 为氮气的压力; v_1 为立管的流速; v_s 为小管的流速。交混压降 Δp_j 和漩涡压降 Δp_v 分别由式(7)和式(8)计算^[8]

$$\Delta p_j = \rho v_s^2 [m^2 (B/B') \cos(\Phi + \phi) - (b/B') \cos \Phi + (b/B')^2 (m(B/b) + 1)^2 / C_c] \quad (7)$$

$$\Delta p_v = \int_R^r \rho (v^2/r) dr = \frac{1}{n} \frac{\rho}{2} v_0^2 (1 - (R/r)^{2n}) \quad (8)$$

式中: $m = v_1/v_s$;其他参数如图 3 所示。

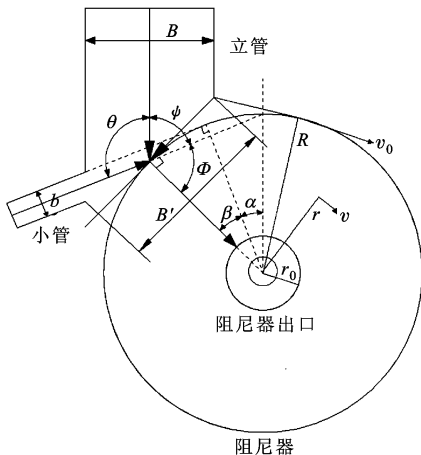


图 3 阻尼器参数图

2 模型求解及验证

为了开发适合于 RELAP5/MOD3.3 程序的先进安注箱模块,需采用合适的数值方法对上述模型进行求解。本文基于半隐方法对上述模型进行离散,获得了便于数值计算的离散形式,采用高斯赛德尔迭代求解获得氮气压力、温度,立管水位、流速、压力和安注箱出口质量流量等主要参数^[8],并将开发的计算模块嵌入 RELAP5/MOD3.3 程序,改进后的程序与先进安注箱模块间的调用关系如图 4 所示。

由于我国先进安注箱的实验研究正处于准备阶

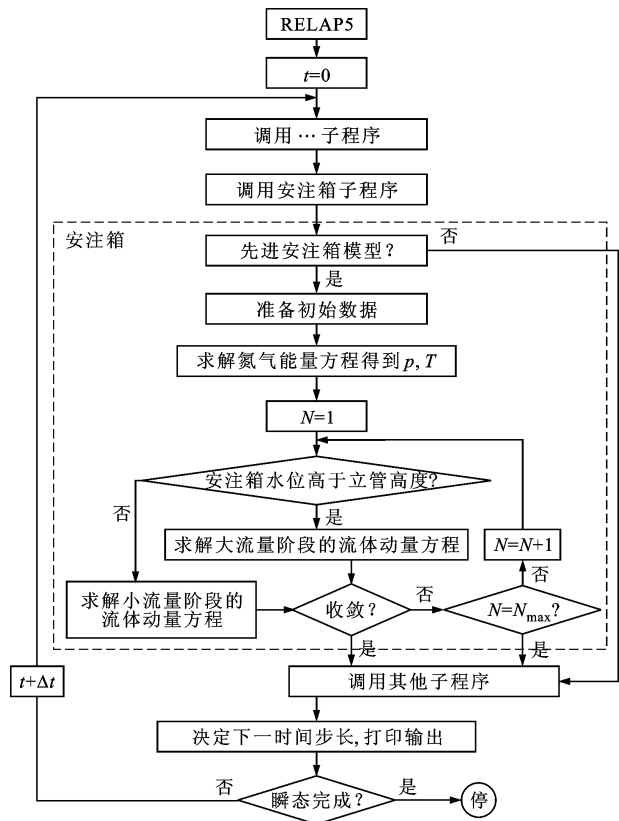


图 4 RELAP5/MOD3.3 中先进安注箱解法流程图

段,而国外的实验数据没有公开,为了初步验证模型及其求解方法的合理性,本文将模型计算结果与中科华核电技术研究院提供的先进安注箱缩比模型(1/2 模型)的 CFD 计算结果进行了比较^[9]。如图 5 所示,RELAP5 和 CFD 模拟的出口体积流量 Q 基本一致,从定性上验证了本文建立的模型及其求解方法的正确性和合理性。

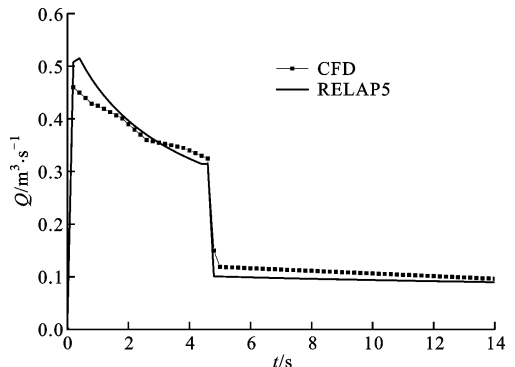


图 5 CFD 模型和 RELAP5 模型的对比

3 先进安注箱热工水力特性研究

表 1 给出了某先进安注箱初步设计参数。先进安注箱内初始压力为 4.4 MPa、初始温度为 313.15 K、出口压力设为 0.1 MPa。基于此参数,开展了先

进安注箱的热工水力特性分析。

表 1 先进安注箱的几何参数

参数	数值
先进安注箱的高度 H_a/m	14
安注箱水位 H_{aw}/m	12
立管高度 H_l/m	6
立管横截面边长 B/m	0.294
小管长度 L_s/m	0.5
小管横截面边长 b/m	0.08
出口管半径 d_e/m	0.08
阻尼器直径 d_v/m	1.4
阻尼器厚度 H_v/m	0.176
先进安注箱的直径 d_a/m	2.57
立管和小管的夹角 $\theta/(\text{^\circ})$	110

如图 6 所示,当安注箱启动后,立管和小管内都有流量,交混后直接流向阻尼器中心,这时阻尼器的漩涡压降很小,所以该阶段的安注箱出口质量流量 W 很大,称之为大流量阶段。当水位低于立管高度时,如图 6 中 35 s 时,立管内流量变为 0,小管内的流量沿着阻尼器切线方向流入,于是在阻尼器内部形成漩涡流,产生很大的漩涡压降,此时流量就会变得很小,称之为小流量阶段。小流量阶段的持续时间由先进安注箱的几何参数确定。因此,由于阻尼器的存在,安注流量实现了从大流量阶段向小流量阶段的过渡,以满足失水事故之后再灌水阶段的大流量要求和再淹没阶段的小流量要求。阻尼器的流量压降特性如图 7 所示,图中 Δp_t^p 为交混压降和漩涡压降之和。

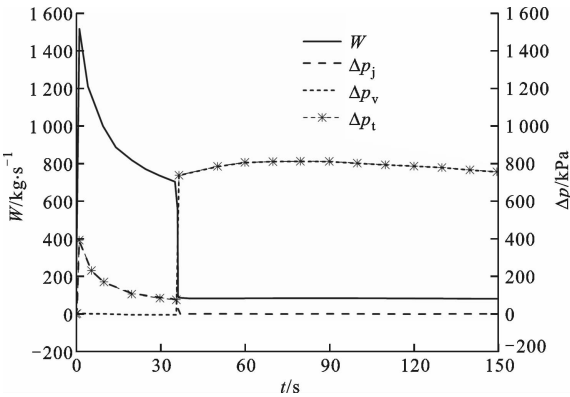


图 6 先进安注箱出口质量流量和阻尼器压降特性

如图 8 所示,当安注箱启动后,由于初始氮气体积较小,随着安注箱内流体的快速流出,氮气体积迅速扩大,从而导致氮气压力迅速降低,压力下降的同时导致出口流量减小,尤其是阻尼器启动后流量更

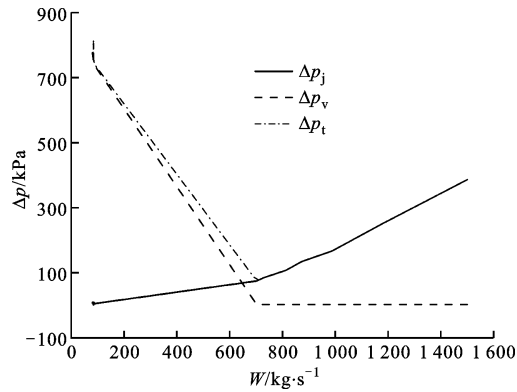


图 7 阻尼器压降流量特性曲线

小。这又使得氮气体积变化率减小,压力开始缓慢下降,其中 36 s 后有一个压力上升的趋势,原因是氮气温度回升所致。

由于初始阶段压力变化很大,氮气体积扩大对外做功大于由于传热而吸收的热量,从而导致氮气的内能减小,氮气温度 T_n 下降,而随着流量的减小,氮气的压力变化率减小,壁面和水面对氮气的传热可以弥补氮气体积扩大对外做的功,此时氮气的温度将会上升,最后接近壁面和水面的温度。

在大流量阶段,安注箱水位高于立管高度,所以立管水位 H_{lw} 一直是 6 m。当水位降到立管高度时,大管内的水由于惯性会导致水位急剧下降,但是安注箱内氮气的压力与阻尼器中交混点的压力差值会使立管水位回升,最终达到一个平衡状态。

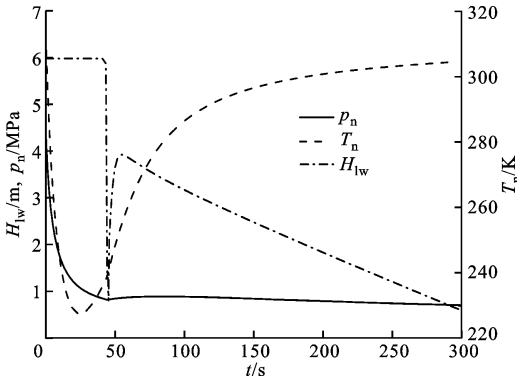


图 8 先进安注箱内氮气压力、温度和立管水位变化

4 参数敏感性分析

4.1 阻尼器直径对安注箱特性的影响

如图 9 所示,在大流量阶段不同阻尼器直径下先进安注箱的出口质量流量基本不变,但小流量阶段的流量随着阻尼器直径的增大而减小。其原因主要在于:整个阶段氮气的压力变化情况基本一样,在大流量阶段不同阻尼器直径下交混压降基本相同,

漩涡压降都为 0,所以该阶段的流量一样;在小流量阶段,不同阻尼器直径下的漩涡压降差别很大,从而导致该阶段的流量差别也很大。

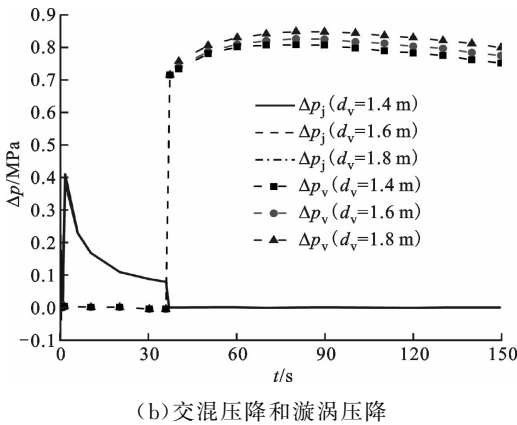
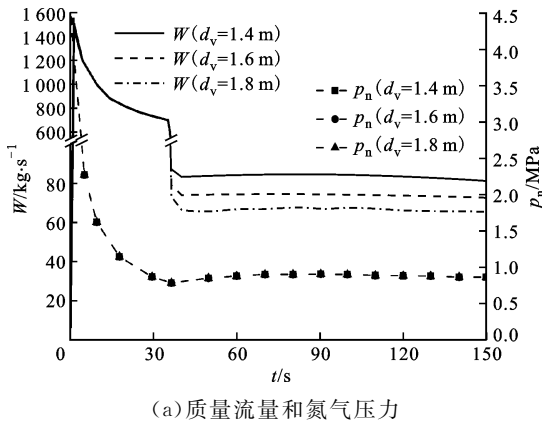


图 9 阻尼器直径对安注箱特性的影响

4.2 大流量水体积与氮气体积比对安注箱特性的影响

如图 10 所示,整个阶段的出口质量流量随着初始体积比 V_r 的减小而增大,其中对大流量阶段的影响较大,而对小流量阶段的影响较小。其原因在于:初始体积比越小,氮气的体积变化率越小,氮气压力变化率越小,则压头越大;在大流量阶段,漩涡压降为 0,交混压降的影响远小于压头的影响,所以该阶段出口质量流量都较大,且初始体积比越小流量越大;在小流量阶段,交混压降为 0,氮气压力的下降压头减小,且压头越大时漩涡压降也越大,所以体积比对小流量阶段的影响较小。

4.3 立管形阻系数对安注箱特性的影响

如图 11 所示,当立管形阻系数 K_l 在一定的变化范围内时,大流量阶段先进安注箱的出口质量流量随着立管形阻系数的减小而增大,小流量阶段先进安注箱的出口质量流量基本一致。其原因在于:整个阶段氮气的压力变化情况基本一样,在小流量

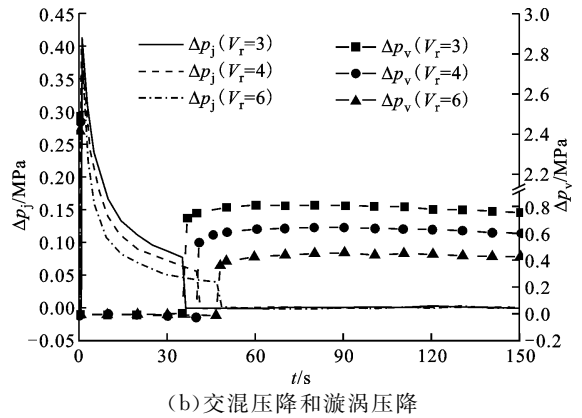
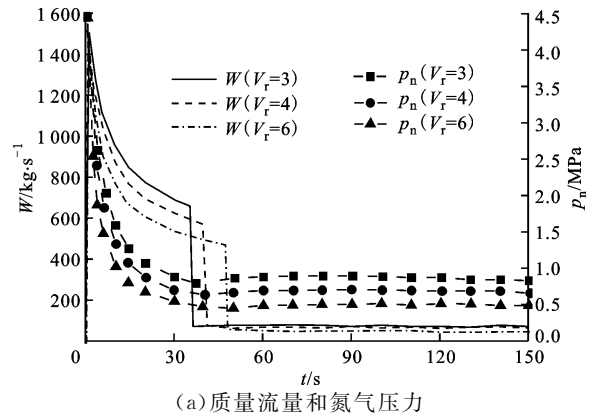


图 10 大流量水体积与氮气体积比对安注箱特性的影响

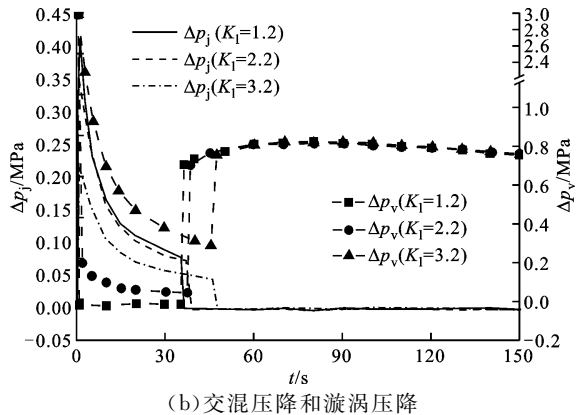
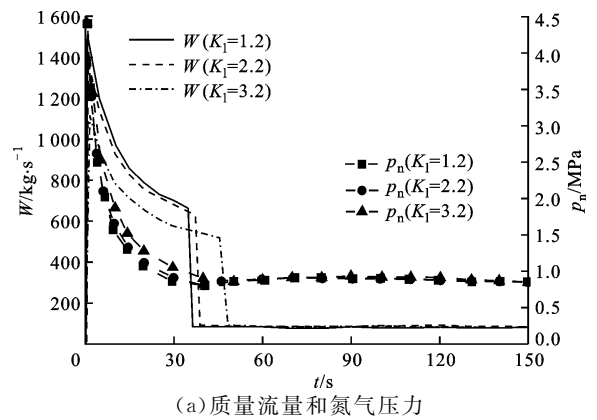


图 11 立管形阻系数对安注箱特性的影响

阶段,不同立管形阻系数下漩涡压降基本相同,交混压降都为 0,所以这个阶段的质量流量一样;在大流量阶段,立管形阻系数越小,交混后的流体速度方向更加接近阻尼器中心,所以产生的漩涡压降越小,同时交混压降差别不大,从而导致大流量阶段的质量流量越大。当立管形阻系数为 1.2 时,交混后的流体速度方向直接指向阻尼器中心,漩涡压降为 0,大流量阶段的质量流量也达到最大。

5 结 论

本文建立了先进安注箱的热工水力模型,开发了相应的计算模块,并将其嵌入到 RELAP5/MOD3.3 程序中。通过与中科华核电技术研究院的 CFD 模拟结果的分析比较,验证了该模型和求解方法的正确性与合理性。其次,采用修改后的 RELAP5/MOD3.3 程序对先进安注箱的热工水力特性进行了分析研究,获得了安注箱压力、温度、立管水位,出口质量流量等参数的变化特性,以及大流量到小流量的转换过程。最后,开展了参数敏感性分析,获得了影响先进安注箱流量大小的主要因素,所得结论如下。

(1)小流量阶段出口质量流量随阻尼器直径的增大而减小。

(2)整个阶段的出口质量流量随大流量水体积与氮气体积比的增大而减小。

(3)立管形阻系数在一定的变化范围内时,大流量阶段出口质量流量随立管形阻系数的减小而增大。

本研究开发了用于我国先进安注箱热工水力特性研究的快速分析工具,研究成果将为我国先进安注箱的设计和实验研究提供理论依据。

参考文献:

- [1] SUZUKI S, OGATA Y, NISHIHARA Y, et al. Global development of Mitsubishi standard APWR as an effective countermeasure against global warming [J]. Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, 2008, 45(3): 51-54.
- [2] SUZUKI S, KANDA M, SHIMIZU S, et al. EU-APWR realizing safety reliability and economic efficiency [J]. Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, 2009, 46(1): 17-20.
- [3] SAITO T, YAMASHITA J, ISHIWATARI Y, et al. Advances in light water reactor technologies [M].

New York, USA: Springer, 2011: 31-83.

- [4] SHIRAISHI T, WATAKABE H, NAKAMORI N, et al. Characteristics of the flow-controlled accumulator [J]. Nuclear Technology, 1994, 108: 181-190.
- [5] SHIRAISHI T, MATSUOKA T, SUGIZAKI T, et al. Development of the advanced accumulator for next generation PWR [J]. Thermal and Nuclear Power Engineering, 1994, 45(6): 43-49.
- [6] SHIRAISHI T. Design of the advanced accumulator for the pressurized water reactor [J]. Nuclear Engineering and Design, 2011, 241: 3910-3924.
- [7] SHIRAISHI T, WATAKABE H. Development of the advanced accumulator for the pressurized water reactor [J]. Nuclear Engineering and Design, 2012, 249: 318-334.
- [8] 胡宏伟. 先进安注箱性能分析及其在 CPR1000 中的应用研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2014.
- [9] 凌空, 陶文铨. 新型安注箱水动力特性的数值模拟 [R]. 深圳: 中科华核电技术研究院有限公司, 2013: 20-25.

[本刊相关文献链接]

王新军,周子杰,宋钊,等. 核电站凝汽器的压力瞬态变化特性. 2015,49(7):6-10. [doi:10.7652/xjtuxb201507002]

程鹏,王新军,张峰,等. 核电汽轮机弯管式汽水分离器的改进结构及其除湿性能. 2014,48(5):61-66. [doi:10.7652/xjtuxb201405011]

曹玉良,王永生,靳栓宝. 浸没式喷水推进泵设计及装船后性能预报. 2014,48(5):96-101. [doi:10.7652/xjtuxb201405017]

赵曙,朱惠人,郭涛,等. 旋转带肋回转通道流动换热数值模拟. 2014,48(2):125-130. [doi:10.7652/xjtuxb201402021]

李瑜,宁德亮,李亮,等. 汽轮机中湿汽损失的定量计算. 2014,48(1):25-30. [doi:10.7652/xjtuxb201401005]

邵帅,邓清华,时和双,等. 不同容积流量下汽轮机低压缸末三级定常流动数值研究. 2013,47(1):15-20. [doi:10.7652/xjtuxb201301004]

杨珏,张勇,赵传奇,等. 双排棒组件超临界水堆堆芯方案设计. 2012,46(9):78-82. [doi:10.7652/xjtuxb201209015]

王秀礼,袁寿其,朱荣生,等. 离心泵汽蚀过渡过程瞬态特性分析. 2012,46(7):38-43. [doi:10.7652/xjtuxb201207008]

潘家成,徐亮,高建民,等. 轴向间距对二次水滴运动特性及沉积规律的影响. 2012,46(7):1-6. [doi:10.7652/xjtuxb201207001]

(编辑 荆树蓉)