

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.04.011

PCS 系统作用下的安全壳内部大气流动与传热行为研究

王辉, 陈巧艳

(中国核电工程有限公司, 北京 100840)

摘要: 先进压水堆核电厂普遍设有非能动安全系统以导出事故后安全壳内部热量, 俄罗斯 AES-2006 型反应堆采用了开式自然循环回路的非能动安全壳冷却系统(PCS), 对该类 PCS 系统作用下的安全壳内部大气流动与传热行为进行了数值模拟研究。研究结果表明, PCS 系统下部的安全壳区域存在着由于冷凝作用产生的气体流动, PCS 系统以上的安全壳区域的气体流动相对停滞; 水蒸汽质量和温度在高度方向上呈层状分布, 水平方向上则分布均匀; 在计算时间段内, PCS 系统的冷凝速率维持在了一个相对恒定的数值。本文的研究有助于国内自主先进压水堆 PCS 系统的研发设计。

关键词: PCS; 安全壳; 壁面冷凝; 数值研究

中图分类号: TL334

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)04-0066-04

Research on Gas Behavior of Flow and Heat Transfer in Containment with the Effect of PCS

WANG Hui, CHEN Qiaoyan

(China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840, China)

Abstract: Passive safety systems are widely used to remove heat inside containment in advanced PWR nuclear power plants, passive containment cooling system (PCS) based on open natural circulation scheme is introduced to Russia AES-2006 reactor. Gas flow and heat transfer in containment with effect of this kind of PCS is numerically investigated in this paper. The results indicate that: gas flows downwards with the effect of condensation in containment area below PCS while gas flow in the area above PCS is stagnant; vapor mass fraction and mixture temperature is stratified in vertical direction while the distribution is homogeneous; PCS condensation rate remains nearly constant during the whole simulation time. Research in this paper benefits the research and design of PCS for domestic advanced PWR.

Key words: PCS; containment; wall condensation; numerical research

安全壳是防止反应堆放射性物质外泄的最后一道实体屏障。传统压水堆核电厂通常设置安全壳喷淋系统导出破口事故期间安全壳内部热量, 防止安全壳因超温超压而丧失完整性。然而, 在发生诸如全厂断电等丧失外电源的超设计基准事故或极端事故下, 喷淋系统因丧失外电失效, 从而使得安全壳的完整性面临极大威胁。

因此, 核工业界提出了若干以非能动方式导出安全壳内部热量的安全壳冷却系统设计方案, 如西屋公司 AP1000/600 的非能动安全壳冷却系统^[1]、

程旭等人提出的钢制安全壳空冷方案^[2]以及韩国科学与技术高级研究院提出的混凝土安全壳非能动喷淋冷却方案^[3]等。

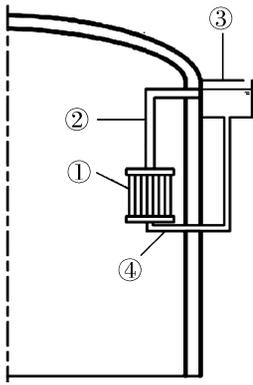
俄罗斯开发的 AES-2006 反应堆引入了基于开式自然循环回路的非能动安全壳冷却系统(PCS), 本文采用 ANSYS CFX 14.5 对该 PCS 系统作用下的安全壳内部大气流动与传热行为进行数值模拟研究。

1 系统简介

AES-2006 反应堆的 PCS 系统如图 1 所示, 该系统主要由置于安全壳内部的换热器、上升管、下降管以及安全壳外部水箱组成。

收稿日期: 2015-10-21

作者简介: 王辉(1986), 男, 山西运城人, 工程师, 硕士, 主要从事安全壳热工水力及严重事故计算分析(e-mail) wanghuia@cnpe.cc。



注: ①—换热器; ②—上升管; ③—外部水箱; ④—下降管

图1 AES-2006 PCS 系统示意图

Fig. 1 PCS Sketch of AES-2006

破口事故后, 外部水箱的低温冷却水由下降管进入换热器, 受安全壳内部高温高压气体加热, 受热的冷却水经上升管进入外部水箱, 由此持续进行的自然循环将安全壳内部热量导出到壳外。

2 研究对象

本文旨在对 PCS 系统作用下的安全壳内部大气流动与传热行为进行数值研究, 因此将复杂的 PCS 系统简化为简单的传热面, 同时, 不考虑安全壳内部的复杂结构, 将其处理为一个仅含有 PCS 系统传热面的封闭空间。为节省计算资源, 进行二维计算, 这样最终简化的几何模型如图 2 所示, 其中安全壳高度约为 52 m, 直径约 46 m, PCS 传热面距离安全壳底部约 17 m。

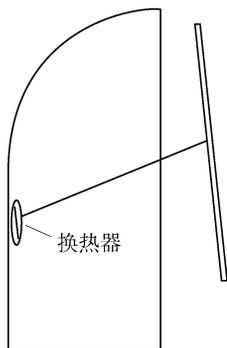


图2 简化的安全壳模型

Fig. 2 Simplified Containment

3 含不可凝气体的水蒸汽壁面冷凝模型

含不可凝气体的水蒸汽壁面冷凝是 PCS 系统导出安全壳内部热量的主要传热机理。

使用 CFD 方法模拟壁面冷凝, 有两种方法^[4]:

第一种方法基于物理学基本定律, 考虑气液两相, 分别列出气体和冷凝液膜的控制方程, 冷凝发生在气液界面, 冷凝质量和能量根据传热传质的机理模型进行计算; 第二种方法只针对气相列出控制方程, 冷凝发生在近壁面单元网格内, 冷凝的质量和能量以“质量阱”和“能量阱”的形式添加到气相的质量和能量方程。冷凝质量和能量既可以根据机理模型计算, 也可根据实验关系式确定。

本文采用的软件使用了基于第二类方法的壁面冷凝模型, 在该模型中, 冷凝传热传质速率采用浓度边界层方法得到, 具体而言, 对于湍流边界层, 冷凝质量流密度采用以下公式^[5]计算:

$$M_{Bw} = -T_M \frac{Y_{Bp} - Y_{Bw}}{1 - Y_{Bw}} \quad (1)$$

式中: M_{Bw} 为混合气体中可凝结组分 B 的冷凝质量流密度, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; Y_{Bp} 为近壁面第一层流体单元中可凝结组分 B 的质量分数; Y_{Bw} 为假定混合气体处于壁面温度下的饱和状态而得到的可凝结组分 B 的质量分数; T_M 为壁面乘积因子, 与湍流壁面函数有关。

凝结热采用下式计算:

$$Q = -M_{Bw} \cdot H \quad (2)$$

式中: Q 为凝结热, W/m^2 ; H 为可凝结组分 B 的汽化潜热, J/kg 。

文[5-7]研究表明: 上述壁面冷凝模型对冷凝面处的网格尺度有严格要求, 仅当壁面 y^+ 小于或接近于 1 时, 模型才可以较为准确的模拟冷凝速率。

4 初始及边界条件

反应堆冷却剂系统破口喷放事故初期, 大量高速流体进入到安全壳空间, 对安全壳内部大气搅浑剧烈。为研究 PCS 系统对安全壳内部大气流动与传热行为的影响, 本文不考虑破口喷放的流体对安全壳大气的搅混作用, 同时不考虑安全壳墙体对大气的冷却作用。

计算假定: 初始时刻安全壳内部混合气体为水蒸汽和空气, 速度为 0; 混合气体压力和温度分别为 0.40 MPa 和 403.15 K; 水蒸汽处于饱和状态; 同时, 计算假定 PCS 传热面为恒温 343.15 K。

5 计算结果与分析

采用 SST 湍流模型进行瞬态计算, 模拟时间为

1 200 s。计算中时间步长取做0.1 s，每一时间步的收敛标准为残差小于 10^{-4} 。

5.1 混合气体速度场

典型时刻的混合气体速度场如图3所示，由图可见，在PCS换热面冷凝作用下，换热面附近混合气体中的部分水蒸汽被凝结，温度降低，因而该处的混合气体密度增大，这样即产生了向下的驱动力，因此混合气体向下流动。当气体向下流动遇到安全壳底部时，产生折返，气流转而向上部空间流动。注意到，折返气流所影响的区域在高度方向上不会超过PCS换热面的顶部位置，这表明，在仅有PCS系统作用下，PCS换热面上部空间可能处于流动滞止的状态。此外，从图中还可以观察到PCS换热面附近局部区域混合气体向下的速度大致在0.5~1.0 m/s之间。

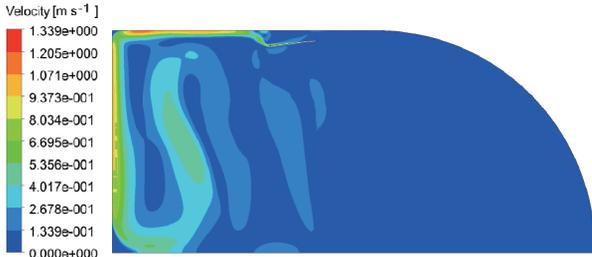


图3 典型时刻混合气体速度场

Fig. 3 Velocity Field of Gas Mixture at Typical Time

5.2 混合气体分布

图4给出了典型时刻的安全壳内水蒸汽质量分数分布，可以看出，由于PCS换热面的冷凝作用，换热管附近局部区域的水蒸汽浓度降低，并且，这种水蒸汽浓度相对较低的混合气体的向下流动，在安全壳下部空间造成了一个水蒸汽浓度相对较低的区域。注意到，在PCS换热面的冷凝作用下，安全壳空间的水蒸汽浓度在高度方向上呈现分层。

更好的说明这种高度方向上的水蒸汽浓度分层，在安全壳空间分别选取垂直方向上的特征线以及水平方向上的特征线，如图5所示。

图6给出了不同时刻下的垂直特征线上的水蒸汽质量分数变化。可以明显看出，在PCS换热器开始作用以后，安全壳内的水蒸汽浓度在高度方向上呈层状分布，并且，随着时间的推移，这种层状结构不断向安全壳上部空间推移。另外，注意到，安全壳下部空间的水蒸汽质量分数在高度方向上并无

显著区别，趋于均匀化，这是因为，安全壳下部空间存在着折返气流的扰动。

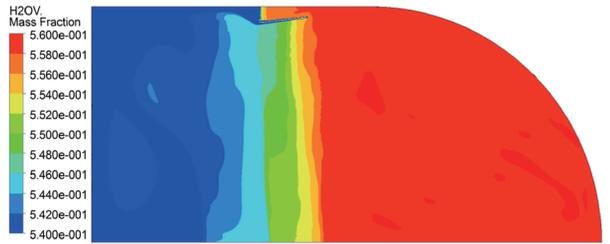


图4 典型时刻水蒸汽质量分布

Fig. 4 Mass Fraction Distribution of Vapor at Typical Time

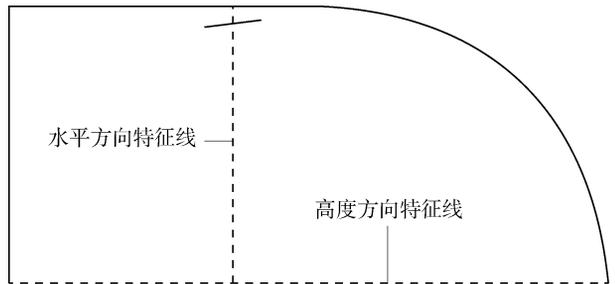


图5 竖直和水平特征线

Fig. 5 Characteristic Vertical and Horizontal Lines

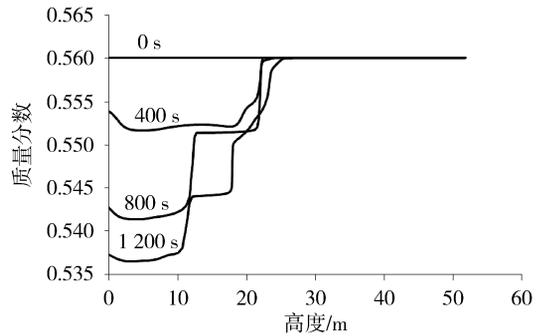


图6 竖直特征线上的水蒸汽质量分数

Fig. 6 Vapor Mass Fraction on Characteristic Vertical Line

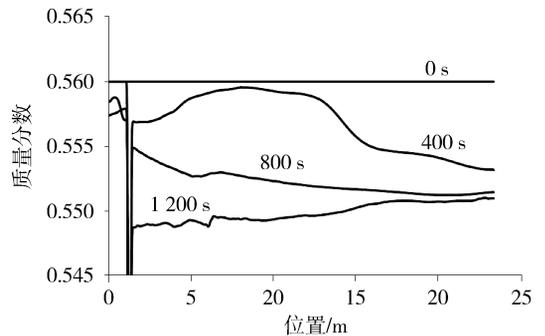


图7 水平特征线上的水蒸汽质量分数

Fig. 7 Vapor Mass Fraction on Characteristic Horizontal Line

作为对照, 图7给出了不同时刻下的水平方向上水蒸汽质量分数变化, 其中安全壳左侧设为0 m起始点。可以看出, 除了接近PCS换热面的区域, 其余区域在同一高度上的水蒸汽质量分数大致相同, 这表明, 水平方向上水蒸汽浓度分布相对均匀。另外, 值得注意的是, 随着时间推移, 同一高度上的水蒸汽质量分数逐渐下降, 这是高度方向上的水蒸汽浓度分层结构不断向上推移造成的, 在这种分层结构中, 下部水蒸汽质量分数较低, 上部水蒸汽质量分数较高。

特别指出, 虽然计算结果显示, 在仅有PCS系统作用下, 安全壳内水蒸汽浓度出现分层, 但在计算时间段内, 这种分层结构最大值与最小值的差别不大。

5.3 混合气体温度场

典型时刻的安全壳内温度分布如图8所示, 可以看出, 由于PCS的冷凝作用, 换热面附近局部区域的混合气体温度下降, 并且, 这种温度相对较低的混合气体的向下流动, 在安全壳下部空间造成了一个温度相对较低的区域。注意到, 在冷凝作用下, 安全壳空间的混合气体温度在高度方向上呈现分层。

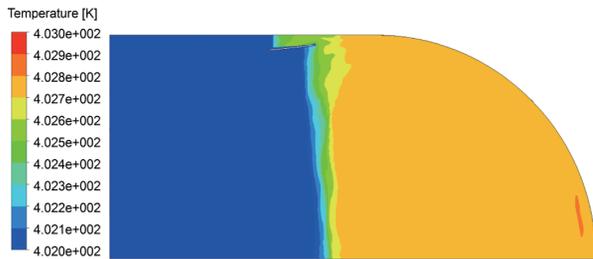


图8 典型时刻混合气体温度场

Fig. 8 Temperature Field of Gas Mixture at Typical Time

对比气体分布与温度场, 可以发现, 水蒸汽质量分数和混合气体温度分布具有相似性, 这是因为, PCS换热器导出安全壳热量的主要机理是水蒸汽冷凝, 该机理是典型的传热传质耦合现象, 因而水蒸汽质量分数和混合气体温度分布呈现一定的相似性。

5.4 冷凝速率

PCS系统的作用为在超设计基准事故和严重事故期间导出安全壳内部热量, 维持安全壳的完整性, 其导热的主要机理为水蒸汽冷凝, 因而, 该系统的水蒸汽冷凝速率是安全壳热工水力计算中关注

的重点之一。

图9给出了冷凝质量流密度, 即凝结速率随时间的变化。由图9可见, 在初始时刻, 凝结速率很大, 随即迅速衰减, 其原因在于, 初始时刻换热器周围充满着水蒸汽浓度较高的静态混合气体, 水蒸汽可以快速凝结, 但水蒸汽凝结后, 换热器附近混合气体水蒸汽浓度下降, 因而凝结速率亦随之下降。另外, 虽然与初始状态相比, 水蒸汽凝结速率快速下降, 但注意到, 在整个计算时间段内, 凝结速率受流动与传热影响不断波动, 但大致维持在一个恒定的数值, 约为 $0.0045 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

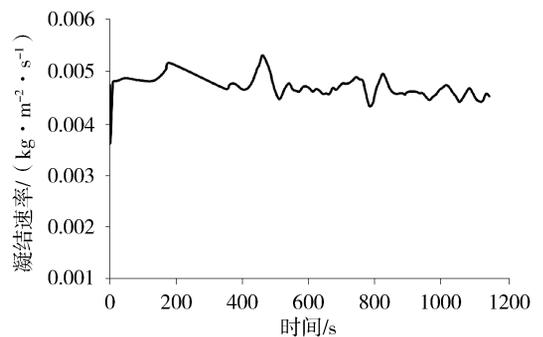


图9 水蒸汽冷凝速率随时间变化

Fig. 9 Vapor Condensation Rate with Time

6 结论

本文采用ANSYS CFX 14.5对基于开式自然循环回路设计的PCS系统作用下的安全壳内部大气流动与传热行为进行了数值模拟研究。计算采用了程序内嵌的基于浓度边界层方法的含不可凝气体的水蒸汽壁面冷凝模型。计算得到了以下结论:

1) PCS系统以下的安全壳区域存在着由于冷凝作用而形成的气体流动, 而PCS系统以上的安全壳区域的流动则相对停滞。

2) 在PCS系统作用下, 安全壳内部混合气体的水蒸汽质量分数和温度在高度方向上呈分层结构, 水平方向上则相对均匀。

3) 在计算时间段内, PCS系统的冷凝速率维持在了一个相对恒定的数值。

4) 计算未考虑破口喷放的高能流体对安全壳内部大气的搅浑作用, 后续将开展进一步研究工作。

5) 研究成果有助于国内先进压水堆PCS系统的研发设计。

(下转第87页 Continued on Page 87)

- [12] 陈希飞,邢辉,郭世鑫,等. 铁氧体法处理核电厂含 Co^{2+} 离子放射性废水的模拟实验 [J]. 净水技术, 2013, 32(2): 43-47.
CHEN Xifei, XING Hui, GUO Shixin, et al. Simulated Tests of Treatment for Radioactive Wastewater Containing Co^{2+} Ion in Nuclear Power Plant by Means of Ferrite Process [J]. Water Purification Technology, 2013, 32(2): 43-47.
- [13] 李雯玺,邵嘉慧,蒯琳萍,等. 聚乙烯亚胺辅助超滤法处理含铯含钴废水 [J]. 净水技术, 2011, 30(4): 31-34.
LI Wenxin, SHAO Jiahui, KUAI Linping, et al. Removal of Strontium and Cobalt from Industrial Wastewater by Polyethyleneimine Enhanced Ultrafiltration Process [J]. Water Purification Technology, 2011, 30(4): 31-34.
- [14] 麻思明,共沉淀—微滤组合工艺处理钴、铯混合废水 [D]. 天津:天津大学,2013.
- [15] 卿云花,康斌,戴耀东,等. 铁氰化镍对铯离子的吸附机理研究 [J]. 原子能科学技术, 2014, 48(10): 1751-1756.
QING Yunhua, KANG Bin, DAI Yaodong, et al. Adsorption Mechanism Analysis of Cesium Ions in Nickel Hexacyanoferrate [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2014, 48(10): 1751-1756.
- [16] ZHANG Hengxuan, ZHAO Xuan, WEI Jiyong, et al. Removal of Cesium From Low-level Radioactive Wastewaters Using Magnetic Potassium Titanium Hexacyanoferrate [J]. Chemical Engineering Journal, 2015, 275(1): 262 - 270.
- [17] CHITRA S, VISWANATHAN S, RAO S, et al. Uptake of Cesium and Strontium by Crystalline Silicotitanates from Radioactive Wastes [J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2011, 287(3): 955-960.
- [18] TAN Zhaoyi, HUANG Zhaoya, ZHANG Dong, et al. Structural Characterization of Ammonium Molybdophosphate with Different Amount of Cesium Adsorption [J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2014, 299(3): 1165-1169.
- [19] 张文锋,李俊峰,王建龙. 乳化剂对水泥固化放射性废有机溶剂的影响 [J]. 清华大学学报:自然科学版, 2015, 55(6): 666-671.
ZHANG Wenfeng, LI Junfeng, WANG Jianlong. Effect of Emulsifiers on The Cementation of Spent Radioactive Organic Solvents [J]. Journal of Tsinghua University: Science & Technology, 2015, 55(6): 666-671.
- [20] DING Dahu, ZHAO Yingxin, YANG Shengjiong, et al. Adsorption of Cesium from Aqueous Solution Using Agricultural Residue-walnut Shell: Equilibrium, Kinetic and Thermodynamic Modeling Studies [J]. Water Research, 2013, 47(7): 2563-2571.

(责任编辑 郑文棠)

(上接第 65 页 Continued from Page 65)

参考文献:

- [1] 何文洁,裴育峰,郭晓克,等. 蒸汽管道汽锤分析研究 [J]. 吉林电力, 2014, 42(3): 5-8.
HE Wenjie, PEI Yufeng, GUO Xiaoke, et al. Evaluating and Analysis of Steam Hammer Loads in Steam Piping Systems [J]. Jilin Electric Power, 2014, 42(3): 5-8.
- [2] 郑军. 高温高压蒸汽管道动态分析 [J]. 科技信息, 2009, 35: 793.
ZHENG Jun. High Temperature and High Pressure Steam Piping Dynamic Analysis [J]. Science & Technology Information, 2009(35): 793.
- [3] 于沛,李嫦月. 压水堆核电厂主蒸汽管道汽锤计算分析 [J]. 核动力工程, 2014, 35(增刊1): 125-126.
YU Pei, LI Changyue. Steam Hammer Calculation and Analysis in Main Steam System of PWR Nuclear Power Plants [J]. Nuclear Power Engineering, 2014, 35(S1): 125-126.

(责任编辑 高春萌)

(上接第 69 页 Continued from Page 69)

参考文献:

- [1] 孙汉虹,程平东. 第三代核电技术 AP1000 [M]. 北京:中国电力出版社, 2010: 263-273.
- [2] CHENG X, ERBACHER F J. Passive Containment Cooling by Natural air Convection and Thermal Radiation After Severe Accidents [J]. Nuclear Engineering and Design, 2000(202): 219-229.
- [3] CHANG S H. Conceptual Design and Safety Analysis of Advanced Reactors [R]. Report No. CARR/SDSA-9601, Center for Advanced Reactor Research, KAIST, Korea, 1996.
- [4] IVO Kljenak. Modeling of Containment Atmosphere Mixing and Stratification Experiment Using a CFD Approach [J]. Nuclear Engineering and Design, 2006(236): 1682-1692.
- [5] MARCUS Lejon. Wall Condensation Modelling in Convective Flow [D]. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, 2013.
- [6] LADISLAV Vyskoil. CFD Simulation of Air-steam Flow with Condensation [J]. Nuclear Engineering and Design, 2014(279): 147-157.
- [7] ZSCHAECK G. CFD Modeling and Validation of Wall Condensation in the Presence of Non-condensable Gases [J]. Nuclear Engineering and Design, 2014(279): 137-146.

(责任编辑 高春萌)