ACME 台架蒸汽发生器传热特性数值模拟

李伟卿1,吕玉凤1,*,赵民富1,钟 佳2,王 楠2,张 鹏2

(1.中国原子能科学研究院反应堆工程技术研究部,北京 102413;2.国核华清(北京)核电技术研发中心有限公司,北京 102209)

摘要:以 ACME 台架的蒸汽发生器(SG)为研究对象,SG 二次侧选用两流体模型,采用计算流体力学软件 CFX 对 ACME 台架的 SG 进行了整体直接模拟。针对稳定试验工况进行了计算,得到了 SG 一、二次侧的温度分布,二次侧空泡份额分布及传热管的壁温等参数沿 U 型管高度方向的变化,获得了二次侧 较详细的流动和传热特性。计算结果表明,从第 2 道折流板开始,折流板底部已积聚了部分气泡,随高度的增加,折流板底部积聚的气泡越多,在弯管区附近及以上区域,已全部变为蒸汽。本文计算结果与 试验结果符合较好。

关键词:蒸汽发生器;传热;温度分布;空泡份额

 中图分类号:TL334
 文献标志码:A
 文章编号:1000-6931(2020)11-2037-08

 doi:10.7538/yzk.2019.youxian.0832

Numerical Simulation on Heat Transfer Characteristic of Steam Generator of ACME Facility

LI Weiqing¹, LYU Yufeng^{1,*}, ZHAO Minfu¹, ZHONG Jia², WANG Nan², ZHANG Peng²

(1. Division of Reactor Engineering Technology Research, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China; 2. State Nuclear Hua Qing (Beijing) Nuclear Power Technology R&D Center Co. Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract: Taking the steam generator (SG) of the ACME facility as the study object, two-fluid model was chosen for the secondary side of the SG and a direct simulation was made on the whole SG of the ACME facility with the CFD software CFX. The stable test conditions were calculated. The primary side and secondary side temperature distribution of SG, the secondary side void fraction distribution and the wall temperature of heat transfer tube were obtained. The secondary side detailed flow and heat transfer characteristics were arrived. The results show that bubbles begin to accumulate from the second baffle and bubble amount increases as the tube is higher. Near the bend area and above, they all become steam. The calculated results are all in accordance with the experimental results.

Key words: steam generator; heat transfer; temperature distribution; void fraction

收稿日期:2019-11-13;修回日期:2020-02-12

作者简介:李伟卿(1984—),女,河北石家庄人,副研究员,硕士,从事反应堆热工水力及安全研究

^{*}通信作者:吕玉凤, E-mail: nuclear15@163.com

网络出版时间:2020-04-21;网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2044.TL.20200420.1205.007.html

在引进消化吸收 AP1000 技术的基础上,我 国自主研发了具有更高功率的核电站 CAP1400, 同样采用了先进的非能动安全技术。为支持其 安全评审,特别设计了先进堆芯冷却机理试验 (ACME)整体试验台架,用于开展 CAP1400 小 破口事故模拟试验。ACME 台架是以 1/3 高 度和 1/94 体积比例设计的 CAP1400 整体试验 台架,最高运行压力为 9.2 MPa^[1]。ACME 台 架共有两台蒸汽发生器(SG),用来导出模拟堆 芯的热量,两台 SG 均采用 U 型管式换热结构, 主要由 U 型管束、折流板、筒体、U 型管束套 筒、汽水分离器、主给水接管及主蒸汽管线接口 等组成。

SG 内部结构非常复杂,进行直接数值模拟 非常困难,目前的研究多采用多孔介质模型,将 管束简化为阻力件,通过对多孔流域附加源项的 方式进行简化计算。蒋兴等^[2]基于 FLUENT 软 件,采用多孔介质模型,在SG二次侧流场为单 相流动的条件下,计算了核电厂稳态运行过程 中 SG 二次侧的三维流场。丛腾龙等[3-4] 采用 多孔介质模型,对 SG 二次侧流场进行了分析 求解。胡立强等^[5]把U型管束作为多孔介质 进行简化,对 AP1000 SG 进行了 CFD 分析。 姚彦贵等^[6-7]基干多孔介质模型开发了核电 SG 三维热工水力分析程序 ATHOS,并应用 ATHOS 对核电 SG 二次侧的传热传质现象进 行了数值模拟。莫少嘉等^[8]采用三维稳态分析 软件 GENEP I,利用多孔介质及局部阻力系数 表征传热管及各几何部件的复杂结构和压降影 响,对 CPR1000 SG 二次侧管束区进行了热工 水力计算。张盼等^[9]对 U 型管管壁采用第一 类边界条件,研究了 SG 二次侧的流动及传热 特性。史建新等[10]通过直接模拟方法研究了 直流蒸汽发生器1根传热管二次侧的流动沸腾 换热现象。目前也有研究者针对 SG 一、二次 侧和传热管进行耦合计算,但仅限于单根管和 单元管。杨元龙等^[11]以大亚湾核电站 SG 为原 型,建立了 SG 单元管三维物理模型,基于 CFX 软件进行了 SG 二回路侧两相流流动与沸腾换 热特性数值模拟。孙宝芝等[12-15]利用数值手段 对单根 U 型管模型和 1 根 U 型管及周围的 8 根管间流域进行了计算,研究了支撑板对一次 侧流动换热特性的影响。

ACME 台架的 SG 采用了折流板的支撑结构,无法采用通常的多孔介质模型进行简化,且 采用多孔介质模型计算得到的流体温度分布、 空泡分布是不准确的。本文借助中国原子能科 学研究院的超级计算机系统,利用计算流体力 学软件 CFX 对 ACME 台架的 SG 整体进行直 接模拟。

1 几何模型和网格划分

整个 SG 的结构复杂,建模时采用流动传 热理论分析的方法区分主次因素,对 SG 结构 进行适当简化。对于 SG 的二次侧,流体从传 热管束获得热量,处于强烈的沸腾状态,并产生 饱和蒸汽。考虑到主要换热为二次侧上升段流 体与一次侧流体通过 U 型管壁的换热,因此为 简化计算,计算将不考虑套筒下降段部分。根 据流动和传热的需求,建立一次侧流体域、管壁 及二次侧流体域结构。图 1a 为整个模型的剖 面图,主要结构包括 U 型管束、折流板、管板、 套筒和外壳。图 1b 为管束和折流板的分布,可 发现管束与折流板同一个方向不存在对称性, 由于折流板对流动的影响较大,建模时只能对 SG 进行整体建模,并考虑折流板的存在。



图 1 几何模型 Fig. 1 Geometric model

由于整个 SG 的结构复杂,直接建立流体 域整体模型比较困难,因此对一次侧流体域、管 壁及二次侧流体域分别进行实体建模。一次侧 流体域包含管内流体域和下封头内流体域,为 网格划分方便对两部分分别进行建模和网格划 分。对下封头内流体域直接建立模型,然后进 行非结构网格划分,网格如图 2a 所示。管束内 流体域部分,由于各 U 型管均为圆柱结构,且 等间距三角形排布,考虑到网格划分的方便,不 进行实体建模,而是直接进行网格划分,首先画 出单根 U 型管截面的面网格,然后通过阵列得 到进口侧或出口侧所有 U 型管的面网格,最后 通过 拉 伸得 到 整 个 管内 流 体 域 的 体 网 格。 U 型管弯头附近的网格如图 2b 所示,为结构 化网格^[16]。



图 2 下封头(a)和管内(b)流体域网格 Fig. 2 Mesh of fluid domain in lower head (a) and U-tube bundle (b)

管壁固体结构的网格划分方法与管内流体 域相同,不必建立实体模型,同样先画出单根管 的管壁截面网格,再通过阵列得到进口侧或出 口侧所有管壁的截面网格,最后通过拉伸得到 所有管壁结构的体网格。

对于二次侧流体域,376 根 U 型管三角形 排列,管外 7 个折流板横跨 U 型管的进出口 段,并沿 U 型管束方向相对交错排布,对二次 侧的流体域结构直接进行实体建模十分困难。 通过对固体结构取补集的方法可间接得到二次 侧的流体域,这需要首先将管内一次侧填成实 心结构,然后再对固体结构取补集得到二次侧 的流体域。

对二次侧整个流体域直接划分网格也比较 困难,需进行分块处理分别进行网格划分,如 图 3所示。

最后得到管内流体域网格数量约1088 万,质量在0.6以上;管外总流体域网格数量约 1643万,质量在0.25以上;管壁网格数量约 411万,质量在0.6以上;总网格量约3142万 网格单元。所有网格划分完成后,通过Interface将各部分连接起来,进行整体计算。



a---竖直管部分半流体域网格;b---折流板附近网格放大;c---上部弯头部分网格 图 3 二次侧流体域网格

Fig. 3 Mesh of secondary side fluid domain

2 物理模型及边界条件

2.1 物理模型

选取一次侧为单相的工况进行计算。SG 一次侧管内为单相强制对流,由基本微分方程 描述,并采用标准 k-ε 模型^[17]描述湍流流动;传 热管的导热过程由导热微分方程控制;二次侧 流体为气液两相流动且涉及沸腾相变传热,采 用两流体模型描述气液两相流动与传热。两流 体模型质量、动量、能量守恒方程如式(1)~(3) 所述,方程中考虑了气液两相间的质量、动量、 能量的传输。二次侧液相作为连续相,其湍流 流动采用标准 κε 模型描述,气相采用离散相 零方程模型;采用热力学相变模型计算沸腾相 变传热;采用 Particle 模型计算两相界面传 递^[11]。计算中考虑了气泡表面张力。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k U_k) = m_{kj} \qquad (1)$$
$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k U_k) + \nabla \cdot (\alpha_k (\rho_k U_k U_k -$$

$$\mu_k (\nabla U_k + (\nabla U_k)^{\mathrm{T}}))) =$$

$$\alpha_k (B - \nabla p_k) + F_{ki} + \dot{m}_{ki} U_i \qquad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k\rho_kH_k)+\nabla\cdot(\alpha_k(\rho_kU_kH_k-\lambda_k\nabla T_k))=$$

 $Q_{ki} + \dot{m}_{ki}H_i$ 式中: ρ 为密度,kg/m³; α 为体积分数;U为速 度,m/s;t为时间,s; m_{ki} 为单位体积内的相间 传质速率, kg/(m³ • s); μ 为动力黏度系数, Pa•s; T 为热力学温度, K; B 为体积力, N/m^3 ; p为压力, Pa; F_{ii} 为单位体积内的相间 作用力, N/m³; H 为比焓, kJ/kg; λ 为导热系 数, $W/(m \cdot K)$; Q_{ki} 为单位体积内气液两相间 传热速率, W/m^3 ;下标 k, j为相标记。

2.2 边界条件

根据试验数据分别设置一、二次侧的进口 参数,一次侧压力为 8.96 MPa,入口温度为 289.7 ℃,入口流量为 50.5 kg/s,工质选用 IAPWS数据库中的 steam51。二次侧压力为 6.36 MPa,入口温度为 30 ℃,入口流量为 0.81 kg/s,其中,液相体积分数为1,气相体积 分数为 0, 工质物性选用 IAPWS 数据库中的 steam5l 和 steam5v 两流体组合^[12];出口压力 均设相对压力为0。

一、二回路侧流体与传热管接触面均设置 为流周交界面,其中液相为无滑移边界条件,气 相为有滑移边界条件。流固交界面热量传递为 热流相等。

3 计算结果及分析

3.1 一次侧流动传热结果

图 4 示出管束一次侧进、出口截面速度分 布及局部速度矢量图。图 4a 中左半部分为进 口截面,右半部分为出口截面。可看出,中心管 束区(短管)的流速较高,周围管束(长管)的流 速较低,这是由于入口接管和下封头结构局部 阻力的影响,管板 U 型管进口处流量分配不 均,流体由入口接管进入后流到下封头中心,然 后向上向周围流动,靠近中心短管的流量较大, 周围长管内流量较小(图 4b),从而短管内流速 较高,长管内流速较低。



(3)

图 4 管束一次侧进、出口截面速度分布(a)及局部速度矢量图(b) Fig. 4 Inlet and outlet section velocity distribution of bundle primary side (a) and local velocity vector (b)

计算得到 U 型管管束一次侧压力分布,如 图 5 所示。由于各 U 型管的总长度相差较小, 沿程阻力的影响较小,各U型管进出口局部阻 力为压降的主要影响因素,短管内流速高,因此 流动压差更大,为 3.526 kPa;长管内流速低, 流动压差要低一些,为2.191 kPa。试验测量 的 U 型管内的流动压差为 3.09 kPa,测量值处 于长管和短管确定的流动压差范围之间,因此 计算值是合理的。

长、短 U 型管内的流体温度分布如图 6 所 示,横坐标为距离管板的高度。由图 6a 可见, 流体由热端进入后,随着传热的进行温度沿管 长逐渐降低。计算得到热端中部的温度为 287.22 ℃,比试验测量值 288.51 ℃偏低,可能 的原因为二次侧入口流体温度设为 30 ℃,而实 际上由于套筒的预热作用,入口流体温度会高 于 30 ℃,这将导致一、二次侧计算的传热量将 比实际偏大,一次侧的温度将比试验值偏低。

冷端计算的流体温度与试验值非常接近,说明随长度的增加,二次侧入口温度的影响逐渐减弱,基本可忽略。由图 6b 可见,短 U 型管内与长 U 型管内的流体温度分布类似,只是出口温度更高一些。这是因为短 U 型管的换热面积相对长 U 型管较小,导致进、出口温度差较小。

3.2 二次侧流动传热

Fig. 6

SG 二次侧的流体温度分布如图 7 所示。 管板底部为过冷水,向上流动过程中在一次侧 流体的加热下迅速升温,经过第 1 道折流板后 已基本变为饱和水。也就是说预热段相比沸腾 段要短很多,二次侧入口处的温度对二次侧换 热的影响很小。



Fig. 5 Pressure distribution of bundle primary side



图 6 长 U 型管(a)和短 U 型管(b)内流体温度沿高度的变化 Flow temperature variation in long U-type tube (a) and short U-type tube (b) with height



Fig. 7 Secondary side temperature distribution of SG

SG 二次侧的空泡份额分布如图 8 所示。

从第2道折流板开始产生气泡,随高度的增加, 折流板底部积聚的气泡增多,在弯管区附近及 以上区域已全部变为蒸汽。从图8中还可发 现,折流板附近的截面上,外侧的空泡份额比内 侧低很多,说明外侧管束的换热能力更强。



图 8 SG 二次侧空泡份额分布 Fig. 8 Secondary side void fraction distribution of SG

计算的二次侧入口压力为-21 411 Pa,根据试验测量的液位 2.78 m 推算出二次侧入口 压力为-21 488 Pa,与试验结果符合较好。

3.3 U型管传热

U型管束的壁面温度分布如图 9 所示。 图 9a为管束左视图,右侧为传热管进口,左侧 为传热管出口,可看出沿 U 型管长度方向壁面 温度的变化。由于整个 U 型管浸没在二次侧 流体中,且底部为过冷水(即预热段),因此该段 传热管的壁面温度较低。U 型管进口处水温 较高,因此预热段右端的壁面温度比左端的壁 面温度要高些。在上升段,二次侧流体逐渐沸 腾并产生蒸汽,因此壁面温度也在升高。图 9b 为管束前视图,可看出在折流板及折流板上部 一段区域内,壁面温度稍高些,这是因为该处的 流速较低,换热能力较差。

图 10 示出长 U 型管和短 U 型管壁面温度的分布。可看出,沿管束长度方向,由于上升段

过冷水的冷却作用,壁面温度首先急剧降低。 进入蒸发段后,壁面温度基本不变。试验测量 的壁面温度基本在 281 ℃左右,计算的壁面温 度比试验值稍高。



Fig. 9 Wall temperature distribution of U-type bundle





4 结论

采用计算流体力学软件 CFX 对 ACME 台 架的 SG 稳态工况进行了模拟计算,选用热力 学相变模型描述 SG 二次侧两相的沸腾与换热 过程,获得了 SG 一、二次侧的流动和传热情 况,掌握了 SG 一、二次侧及传热管整体耦合计 算的方法,主要结论如下。

 1)采用一、二次侧及传热管流固耦合的方法进行了SG的整体模拟,获得了准确的一次 侧流体的温度分布、管壁温度分布、二次侧流体 温度分布及空泡份额分布。计算结果与试验结 果符合较好。 2) 计算得到的长 U 型管内流体温度、短 U 型管内流体温度及管壁温度与试验值均较 接近,最大相差约 2 ℃。在一次侧流体的加热 作用下,二次侧水处于强烈的沸腾状态,大部分 空间为汽水两相混合物。从第 2 道折流板开 始,在折流板底部已积聚了部分气泡,且随高度 增加,折流板底部积聚的气泡越多。在弯管区 附近及以上区域,已经全部变为蒸汽,部分 U 型管束已经裸露。

参考文献:

[1] 李玉全,常华健,叶子申,等. ACME 整体试验台

架堆芯模拟体设计[J]. 动力工程学报,2016,36 (3):236-241.

LI Yuquan, CHANG Huajian, YE Zishen, et al. Design of reactor core simulator for ACME integral test facility[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2016, 36(3): 236-241 (in Chinese).

[2] 蒋兴,张明,谢永诚,等. 蒸汽发生器二次侧流场 三维数值模拟[J]. 原子能科学技术,2008,42(增 刊):438-443.

> JIANG Xing, ZHANG Ming, XIE Yongcheng, et al. Three dimensional numerical simulation of secondary side flow field in steam generator[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2008, 42(Suppl.): 438-443(in Chinese).

[3] 丛腾龙,田文喜,秋穗正,等. 压水堆蒸汽发生器 一、二次侧稳态流场耦合分析[J]. 原子能科学技 术,2014,48(5):836-843.

> CONG Tenglong, TIAN Wenxi, QIU Suizheng, et al. Coupled analysis on steady flow in primary and secondary sides of PWR steam generator[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2014, 48(5): 836-843(in Chinese).

 [4] 丛腾龙,田文喜,秋穗正,等. 蒸汽发生器二次侧
 三维两相流场稳态计算[J]. 核动力工程,2014, 35(2):37-40.

> CONG Tenglong, TIAN Wenxi, QIU Suizheng, et al. Three-dimensional steady calculation on two-phase flow in secondary side of steam generator[J]. Nuclear Power Engineering, 2014, 35 (2): 37-40(in Chinese).

[5] 胡立强,杨立新. 蒸汽发生器 U 型管束多孔介质 模型简化方法研究[J]. 中国设备工程,2017,16 (8):104-106.

> HU Liqiang, YANG Lixin. Simplified method study on porous media model of the U-tube bundle in steam generators[J]. China Plant Engineering, 2017, 16(8): 104-106(in Chinese).

[6] 姚彦贵,施杨. 多孔介质模型在核电蒸汽发生器 设计中的应用[J]. 现代计算机:专业版,2014,18 (6):40-43.

> YAO Yangui, SHI Yang. Application of the porous media model in the design of nuclear plants steam generators[J]. Modern Computer, 2014, 18(6): 40-43(in Chinese).

[7] 姚彦贵,祖洪彪,姚伟达. 核电蒸汽发生器热工 水力分析程序研究现状与进展[J]. 核安全, 2015,14(1):85-93.

YAO Yangui, ZU Hongbiao, YAO Weida. Introduction on the thermal-hydraulic analysis codes for nuclear steam generator [J]. Nuclear Safety, 2015, 14(1): 85-93(in Chinese).

- [8] 莫少嘉,盛朝阳,任红兵,等. 蒸汽发生器二次侧 三维稳态热工水力分析[J]. 原子能科学技术, 2015,49(7):1227-1231.
 MO Shaojia, SHENG Zhaoyang, REN Hongbing, et al. Three-dimensional steady state thermal-hydraulic analysis of secondary side for CPR1000 steam generator[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2015, 49(7): 1 227-1 231(in Chinese).
- [9] 张盼,陆道纲,张春明,等. 核电厂蒸汽发生器二 次侧三维流场分析[J]. 核安全,2014,13(2):71-76.

ZHANG Pan, LU Daogang, ZHANG Chunming, et al. Three-dimensional flow field analysis on secondary side of nuclear power plant steam generators[J]. Nuclear Safety, 2014, 13 (2): 71-76(in Chinese).

- [10] 史建新,孙宝芝,于翔,等. 直流蒸汽发生器全范 围流动与传热数值模拟[J]. 原子能科学技术, 2017,51(3):425-431.
 SHI Jianxin, SUN Baozhi, YU Xiang, et al. Numerical simulation of full range flow and heat transfer in once-through steam generator[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2017, 51(3): 425-431(in Chinese).
- [11] 杨元龙,孙宝芝,杨龙滨,等. 蒸汽发生器二次侧 汽液两相流数值模拟[J]. 原子能科学技术, 2012,46(1):51-56.
 YANG Yuanlong, SUN Baozhi, YANG Longbin, et al. Numerical simulation on vapor-liquid two-phase flow of the secondary circuit in steam

generator[J]. Atomic Energy Science and Tech-

nology, 2012, 46(1): 51-56(in Chinese). [12] 郑陆松,孙宝芝,杨元龙,等. 基于流热固耦合的 核电蒸汽发生器传热管热应力数值模拟[J]. 原 子能科学技术,2014,48(1):74-80. ZHENG Lusong, SUN Baozhi, YANG Yuanlong, et al. Numerical simulation on thermal stress of tube in steam generator of nuclear power plant based on fluid-thermal-structure interaction [J]. 2014, 48(1): 74-80(in Chinese).

[13] 杨元龙,孙宝芝,张国磊,等. 支撑板对蒸汽发生

器流动与传热特性的影响[J]. 上海交通大学学报,2014,48(2):205-209.

YANG Yuanlong, SUN Baozhi, ZHANG Guolei, et al. Impacts of tube support plate on flow and heat transfer characteristics of steam generator[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2014, 48(2): 205-209(in Chinese).

[14] 孙宝芝,杨柳,杨元龙. 支撑板缝隙对蒸汽发生 器热工水力特性的影响[J]. 工程热物理学报, 2014,35(9):1 821-1 825.

> SUN Baozhi, YANG Liu, YANG Yuanlong. The influence of tube support plates gaps on thermal hydraulic characteristics in a steam generator[J]. Journal of Engineering Thermophys

ics, 2014, 35(9): 1 821-1 825(in Chinese).

- [15] 郑陆松,赵颖杰,孙宝芝,等. 蒸汽发生器降负荷 过程热工水力特性瞬态数值分析[J]. 化工学报, 2015,66(S2):116-122.
 ZHENG Lusong, ZHAO Yingjie, SUN Baozhi, et al. Transient numerical analysis of steam generator thermal hydraulics during down load process[J]. CIESC Journal, 2015, 66(S2): 116-
- [16] 王福军编著. 计算流体动力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.

122(in Chinese).

[17] 陶文铨编著. 数值传热学[M]. 2版. 西安:西安 交通大学出版社,2001.