

高温气冷堆热气联箱内部流场数值模拟

王金华, 薄涵亮, 姜胜耀, 黄志勇

(清华大学 核能与新能源技术研究院 先进反应堆工程与安全教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要:以高温气冷堆热气联箱为研究对象,在实验研究基础上,采用流体力学计算程序 CFX5 对热气联箱和热气导管内部流场进行数值模拟,以获得热气联箱和热气导管内的速度场、压力场和温度场,为高温气冷堆热气联箱的设计和实验研究提供参考。数值计算结果表明:热气联箱内气流发生剧烈搅混,加速了不同温度气流间的热传递,有利于高温和低温气流间的温度混合,存在肋片的区域未发生剧烈的气流搅混,不利于气流间的热传递;热气导管内温度混合率随其长度的增加逐渐增大,当热气导管长度为 2.5 m 以上时,温度混合率达到 99% 以上。

关键词:高温气冷堆;热气联箱;数值模拟

中图分类号:TL334;TL351.5

文献标识码:A

文章编号:1000-6931(2006)03-0262-05

Numerical Simulation of Flow Field in Hot Gas Chamber of High-Temperature Gas-Cooled Reactor

WANG Jin-hua, BO Han-liang, JIANG Sheng-yao, HUANG Zhi-yong

(Key Laboratory of Advanced Reactor Engineering and Safety of Education Ministry,

Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The flow field in the hot gas chamber of High-Temperature Gas-Cooled Reactor (HTGR) was studied with computational fluid dynamics program CFX5 on the basis of the experimental studies. The velocity, pressure and temperature fields in hot gas chamber and hot gas duct were obtained, which is helpful to the design and experimental study of hot gas chamber. The results indicate that there is much highly turbulent twisting flow to be responsible in excellent temperature mixing effect in hot gas chamber. But the flow in the ribs region is calmly, which hinders the heat transfer between the hot gas and cold gas. The temperature mixing coefficient increases with the increase of the hot gas duct's length, and the temperature mixing coefficient reaches 99% when the length of hot gas duct reaches 2.5 m.

Key words: High-Temperature Gas-Cooled Reactor; hot gas chamber; numerical simulation

高温气冷堆被公认为第四代先进反应堆之一,其特点之一是低功率的标准化反应堆机组

可以组合成功率范围很广的电厂。德国 Interatom/Siemens 公司研制的高温气冷堆机组 MODULE 采用氦气冷却,如果采用蒸汽轮机(HTR-SG),其热功率为 200 MW,堆芯出口温度为 700 ℃;如果用于生产工艺用热(HTR-PNP),其热功率为 170 MW,堆芯出口温度为 950 ℃^[1]。风机驱动氦气冷却剂流过堆满燃料元件的堆芯,燃料元件由石墨球包容的二氧化铀包壳颗粒组成。氦气从堆芯出口流过堆芯底部和热气导管进入热交换器,即蒸汽发生器。反应堆出口温度很高,必须将作用在热交换器部件材料上的热负荷尽可能降低。为延长其使用寿命,热交换器入口气流的温差必须降低至 ±15 ℃ 以下。本工作拟采用计算流体力学程序 CFX 对热气联箱内的流场进行数值仿真,并通过实验验证数值模拟结果的正确性。该工作对高温气冷堆的设计研究具有重要参考意义。

1 实验模型和空气模拟实验

反应堆底部的氦气流动用空气进行模拟。实验模型由树脂玻璃制成,以使流动在可视化条件下进行。这里需要考虑所有的物理和几何相似准则。实验模型安装在 Interatom 空气动力学实验装置的 2 MW 空气回路上,其最大流量达 20 kg/s,选择 1 : 2.9 的模型。图 1 为模

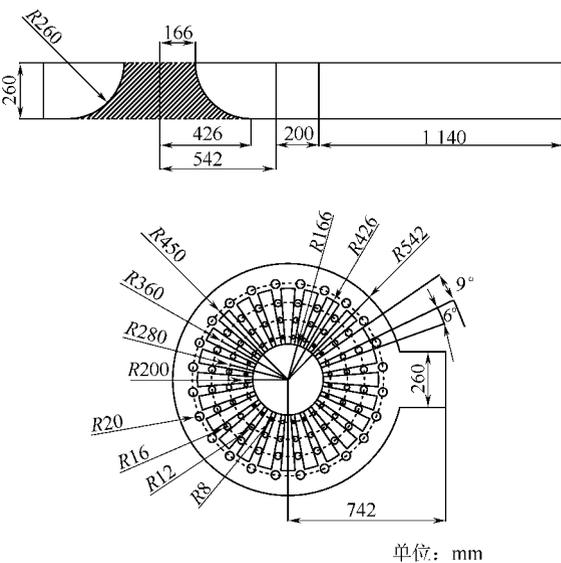


图 1 高温气冷堆热气联箱模型(1 : 2.9)

Fig.1 Model of hot gas chamber of HTGR (1 : 2.9)

型图。HTR-PNP 可在其额定工况下进行实验。HTR-SG 模型的马赫数超过了最大允许值 0.3。为防止气体的压缩性对反应堆工况的影响,HTR-SG 模型实验的 Re 数只能达到额定工况的 60%。因此,需对 HTR-SG 的温度混合实验条件及其结果进行外推。

实验给出了总的温度混合性能和整个实验模型的压降。温度混合性能由温度混合率 $\phi(\%)$ ^[2] 表示,即:

$$\phi = (1 - \Delta T_{outlet} / \Delta T_{inlet}) \times 100\% \quad (1)$$

式中: ΔT_{outlet} 为热气导管出口截面最大温差; ΔT_{inlet} 为入口截面最大温差。

$\phi=0\%$,表示无温度混合; $\phi=100\%$,表示完全的温度混合。在树脂玻璃模型上进行的模拟实验结果表明:热气联箱和与其相连的热气导管均有良好的温度混合性能,所测得的主要气流温度混合率从低流速下的 97.7% 降至 HTR-PNP 名义流速下的 97.0%,HTR-SG 名义流速下的 ϕ 通过外延计算,其值为 95%。混合率的计算仅与热电偶测得的温差相关。 ϕ 的误差约为 1%。在高 Re 数下,空气在实验模型中的逗留时间较短,从而使换热时间缩短^[3],这表现为 ϕ 与 Re 呈轻微负斜率的函数关系。

空气在流道内流动的过程中,每经过肋片间的空腔均将发生旋转。正是由于这种强烈的螺旋型湍流运动,方使得热气联箱具有良好的温度混合性能^[4]。在靠近热气导管入口处,分别从左右两侧矩形流道而来的两股旋转气流在热气导管前汇合。旋转气流在进入热气导管后还将进一步混合。

2 数值模拟

2.1 计算工具

采用流体力学计算程序 CFX5 对上述实验进行数值模拟,并通过实验结果验证数值模拟结果的准确性与可靠性。然后,模拟计算温度混合率随热气导管长度的变化规律,为高温堆热气联箱的设计提供参考。

CFX5 程序由英国 AEA TECHNOLOGY 工程软件公司开发研制,由 4 个模块组成:CFX-5 Build(前处理);CFX-5 Solver(求解器);CFX-5 Solver Manager(求解管理器);CFX-5 Post(后处理)^[5]。

2.2 计算模型

根据上述实验模型尺寸参数,建立高温气冷堆热气联箱内部流场数值计算模型。热气联箱为对称结构,为减小计算量,仅对其 1/2 的结构进行计算(图 2)。

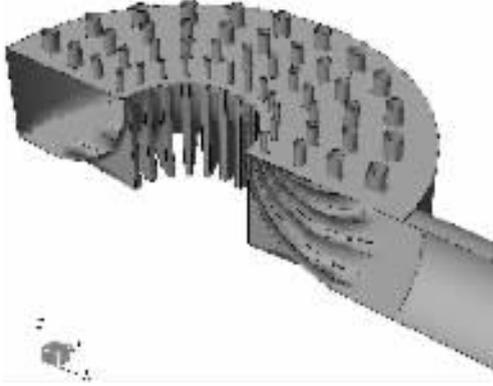


图 2 热气联箱数值计算模型

Fig. 2 Numerical model of hot gas chamber

热气联箱内部参考压力为 0.13 MPa。湍流模型采用 $k-\epsilon$ 模型^[5]。Navier-Stokes 方程组采用有限单元法进行偏微分方程离散化处理,将偏微分方程转换成线性代数方程组并联立连续方程、状态方程、能量方程和粘度物性关系式联立求解。采用全隐式多方程耦合算法求解线性代数方程组。相对于半隐式压力修正算法,即 SIMPLEC 算法而言,采用时间推进的方法可改善半隐式压力修正算法中的收敛性,并提高求解收敛速度。对于网格数量庞大的实际工程计算,时间推进法的求解速度明显优于半隐式压力修正算法^[5]。

对于热气联箱内部三维流场,基本控制方程如下。

质量守恒方程,即连续方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (2)$$

动量守恒方程为:

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \otimes \mathbf{U}) = \nabla \cdot (-p \delta + \mu (\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T)) + S_M \quad (3)$$

能量守恒方程为:

$$\frac{\partial \rho h_{\text{tot}}}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} h_{\text{tot}}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S_E \quad (4)$$

式中: ρ 为流体密度; t 为时间; \mathbf{U} 为流体速度; δ 为 δ 函数; μ 为流体动力学粘度; S_M 为动量源项; λ 为导热率; S_E 为能量源项; h_{tot} 为总比焓, $h_{\text{tot}} = h + \frac{1}{2} \mathbf{U}^2$, 其中, h 为静比焓, 它是压力和温度的函数^[5], 即 $h = h(p, T)$ 。

入口边界的湍流模型为默认强度和自动计算尺度模型。计算热气联箱入口温度分别为 10、20、30 和 40 °C 下, 热气导管内 Re 数为 $0.4 \times 10^6 \sim 3.2 \times 10^6$ 范围内热气联箱和热气导管内的速度场和温度场。出口边界的相对压力为 0, 其它未定义的面被默认为非滑移绝热面^[5]。

在模型网格划分中, 体网格划分采用四面体网格, 并在热气联箱入口、热气导管出口以及肋片等截面变化较大的区域加密网格, 以提高计算精度。

3 计算结果

3.1 热气联箱内部流场

图 3 所示为热气联箱内部流场流线。热气联箱内部气流发生剧烈搅混, 这加速了不同温度气流间的热传递, 有利于高温和低温气流间的温度混合。热气联箱矩形流道内存在大量旋转气流, 这一结果与实验结果相吻合。存在肋片的区域未发生剧烈的气流搅混, 这不利于气流间的热传递。热气导管内的气流流动平稳, 未发生气流间的搅混。



图 3 热气联箱内部流场流线

Fig. 3 Streamlines in hot gas chamber

计算结果还表明, 在热气导管内 Re 数为 0.8×10^6 时, 热气联箱内的相对压力为 0.006 3 MPa, 且热气联箱内压力变化很小, 气流在热气联箱与热气导管交接处向热气导管流动过程中

压力发生突降,热气导管内压力基本保持不变。在从热气联箱向热气导管流动过程中,气流流速逐渐增大,热气导管内流速则基本保持不变。在热气联箱内部,气流温度从内到外逐渐降低,呈阶梯状分布,热气导管内温度变化很小。

3.2 温度混合率

气流在热气导管内流动过程初期,热气导管中央温度最高,低温区位于管道上部两侧紧贴管壁的区域。随着温度不断混合,高温区温度逐渐降低,管道下部逐渐成为高温区,而低温区温度逐渐升高,位置仍保持在管壁上部两侧紧贴管壁区域。随着气流在热气导管内流动,高温区与低温区的温差逐渐减小,高温和低温气流的温度混合率逐渐增大,其增大的速度示于图 4a。由图 4a 可知,在热气导管出口处,温度混合率达 96.10%。

图 4b 所示为热气导管出口温度混合率计算结果与实验结果的比较。可以看出,计算结果与实验结果较为接近,两者之间的偏差在 1.5% 以内。计算结果显示,热气联箱的温度混合率随 Re 数的增大略微降低,但比实验结果降低的幅度小。无论是实验结果还是计算结果,热气联箱的温度混合率随 Re 数(变化范围 $0 \sim 3.2 \times 10^6$) 增大而变化的幅度均在 1.6% 以内。

图 5 所示为热气导管内热气流和冷气流间的温差随热气导管长度的变化。可以看出,热气导管长度增长,导管内温差随之减小^[6],出口温差为 1.17 °C。

3.3 热气导管内温度混合率的变化

实验研究表明,气流在热气导管内流动过程中,温度混合率增大^[7]。由于实验条件所限,

无法精确获得有关热气导管内温度混合率的变化规律。通过上述对热气联箱温度混合率的数值模拟,验证了 CFX 程序在热气联箱温度混合计算方面的精度可满足要求。为此,采用 CFX 程序对较长的热气导管内部温度混合进行计算。在此,取热气导管长度为 5 m。

由计算结果可知:在热气导管入口处,导管中央的温度最高;在 0~1 m 段,高温区位于热气导管下部,低温区位于管壁上部两侧紧贴管壁区域;在 1~4 m 段,高温区逐渐集中到热气导管最下部,低温区则逐渐集中到热气导管上部区域;在 4~5 m 段,高温区位于热气导管下半部分,低温区位于热气导管上部区域,高温与低温区的温差值很小,仅为 0.03 °C。

图 6 所示为计算得到的 5 m 长热气导管内不同截面处的温度混合率。可以看出,热气导管内温度混合率随导管长度的增长逐渐升高,但升高速度随之变缓,导管长度大于 2.5 m 时,温度混合率已达 99% 以上,热气导管长度继续增大,温度混合率的变化幅度很小。用最小二乘法对温度混合率随热气导管长度的变化规律进行拟合,得到在热气导管长度大于 1 m 后温度混合率随热气导管长度(L, m) 变化的拟合关系式:

$$\phi = (97.9276 + 11.0689L^{-0.5} - 14.8205L^{-1})\%(L > 1 \text{ m}) \quad (5)$$

4 结论

1) 模拟计算结果表明,热气联箱内气流的剧烈搅混加速了不同温度气流间的热传递,有利于高、低温气流间的温度混合。热气联箱矩形流道内存在大量旋转气流。计算结果与实验

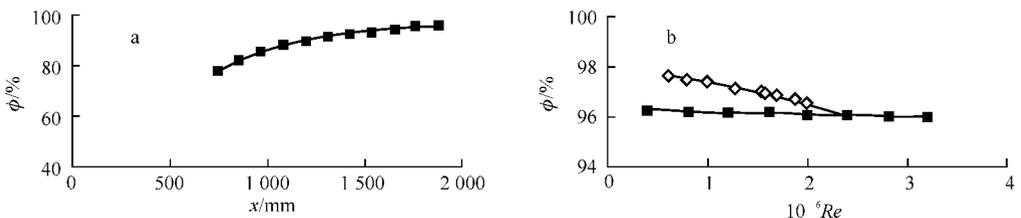


图 4 热气导管内温度混合率

Fig. 4 Temperature mixing coefficient in hot gas duct

a——不同位置处的混合率(x 为位置坐标); b——不同 Re 下的混合率

◇——实验值; ■——计算值

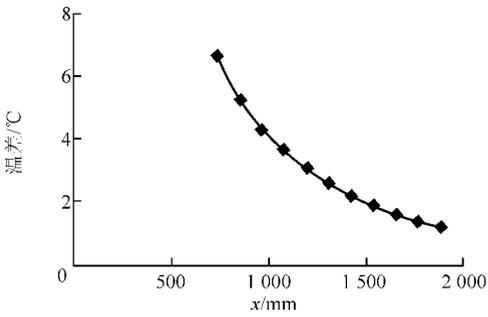


图5 热气导管内气流温差

Fig. 5 Temperature difference in hot gas duct

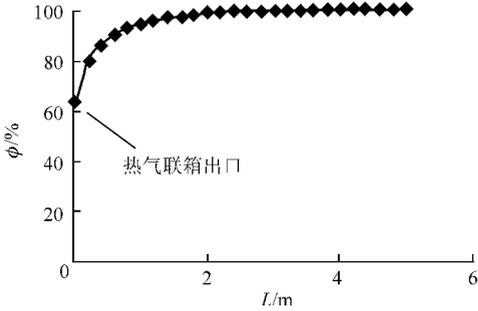


图6 热气导管内温度混合率随导管长度的变化

Fig. 6 Temperature mixing coefficient in hot gas duct

结果吻合,肋片区内未发生剧烈的气流搅混,不利于气流间的热传递。热气导管内的气流流动平稳,无气流间的搅混。

2) 热气导管内 $Re=0.8 \times 10^6$ 时,热气联箱内的相对压力为 6.3 kPa,且箱内压力变化很小。在热气联箱与热气导管交接处向热气导管流动过程中,气流压力发生突降,热气导管内压力基本保持不变。以上计算结果与实验结果吻合。在从热气联箱向热气导管流动过程中,气流流速逐渐增大,热气导管内流速则基本不变。在热气联箱内部,气流温度从内到外逐渐降低,呈阶梯状分布,热气导管内的温度变化很小。

3) 热气导管出口温度混合率计算结果与实验结果较为接近,两者偏差在 1.5% 以内。计算结果表明,热气联箱的温度混合率随 Re 数的增大而略微降低,但比实验结果降低的幅度小。无论是实验结果,还是计算结果,热气联箱的温度混合率随 Re 数(变化范围 $0 \sim 3.2 \times 10^6$) 增大而变化的幅度均在 1.6% 以内。

4) 热气导管内温度混合率随导管长度增长而提高,提高程度随之减小。热气导管长度在 2.5 m 以上时,温度混合率达到 99% 以上,热气导管长度继续增长,温度混合率的变化幅度很小。

5) 数值模拟计算结果与实验结果基本吻合。数值模拟结果有助于高温堆热气联箱的实验研究和结构优化。

参考文献:

- [1] INAGAKI Y, KUNUGI T, MIYAMOTO Y. Thermal mixing test of coolant in the core bottom structure of a High-Temperature Engineering Test Reactor[J]. Nuclear Engineering and Design, 1990, 123:77-86.
- [2] XU Yuanhui, ZUO Kaifen. Overview of the 10 MW High-Temperature Gas-Cooled Reactor test module project[J]. Nuclear Engineering and Design, 2002, 218(12):13-23.
- [3] DAMM G, WEHRLEIN K. Simulation tests for temperature mixing in a core bottom model of the HTR-Module[J]. Nuclear Engineering and Design, 1992, 137(1):97-105.
- [4] INAGAKI Y, KUNITOMI K, MIYAMOTO Y. Thermal-hydraulic characteristics of coolant in the core bottom structure of the High-Temperature Engineering Test Reactor[J]. Nuclear Technology, 1992, 99(7):90-100.
- [5] AEA Technology. Introduction to CFX-5[CP]. England:AEA Technology, 2001.
- [6] 黄志勇,姚梅生,马昌文,等. 高温气冷堆堆底流道的热混合性能[J]. 清华大学学报, 1995, 35(6):1-5.
HUANG Zhiyong, YAO Meisheng, MA Changwen, et al. Temperature mixing characteristics of the flow channels in the bottom of the High-Temperature Gas-Cooled Reactor[J]. Journal of Tsinghua University Science and Technology, 1995, 35(6):1-5(in Chinese).
- [7] YAO M S, HUANG Z Y, MA C W, et al. Simulating test for thermal mixing in the hot gas chamber of the HTR-10[J]. Nuclear Engineering and Design, 2002, 218(12):233-240.