

高温堆加热除湿试验升温过程研究

沈凯跃¹, 马胜超¹, 郑伟¹, 银华强^{*1}, 何学东¹, 马涛¹, 马晓珑²

(1. 清华大学核能与新能源技术研究院, 先进核能技术协同创新中心, 先进反应堆工程与安全教育部重点实验室, 北京, 100084; 2. 西安热工研究院有限公司, 西安, 710032)

摘要: 高温气冷堆中使用了大量的碳素材料, 作为多孔材料, 碳素材料含有一定水分等杂质。为了减小反应堆高温运行条件下的堆内材料腐蚀, 高温堆在初装堆和事故后需要对一回路进行严格的加热除湿操作。目前一回路加热除湿主要是依靠主氦风机旋转, 将动能转换为热能来提升温度。本文基于大型商用软件 COMSOL Multiphysics 建立高温堆内一回路加热的流动传热模型, 对此种加热方案的一回路升温过程作数值分析, 为高温堆加热除湿方案的提供有益的指导。

关键词: 高温气冷堆; 一回路; 加热除湿; 多物理场耦合

Study on Heating Process of Dehumidifying Experiment in HTGR

SHEN Kaiyue¹, MA Shengchao¹, ZHENG Wei¹, YIN Huaqiang^{*1}, HE Xuedong¹, MA Tao¹, MA Xiaolong²

(1. Institute of Nuclear and New Energy Technology, Collaborative Innovation Center of Advanced Nuclear Energy Technology, Key Laboratory of Advanced Reactor Engineering and Safety of Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084; 2. Xi'an Thermal Power Research Institute, Xi'an, 710032)

Abstract: A large number of carbon materials are used in high temperature gas-cooled reactor (HTGR), as a kind of porous material, the carbon material contain a certain amount of moisture and other impurities. In order to reduce the corrosion of internal material in high-temperature reactor core of HTGR, the initial core or post-accident core must be strictly heated and dehumidified in the primary circuit. The current primary circuit heating mainly relies on the rotation of the primary pump to convert kinetic energy into thermal energy. The flow heat transfer model of heating primary circuit in high-temperature reactor was established based on software COMSOL Multiphysics, and the numerical analysis of the primary circuit heating process provides rewarding guidance for the selection of the dehumidification scheme in HTGR.

Key words: HTGR; Primary circuit; Heat to dehumidify; Multiphysics coupling

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11875176)

作者简介: 沈凯跃 (1995—), 河南洛阳人, 清华大学硕士研究生, 核科学与技术专业。

*通信作者: 银华强, E-mail: yinhuaqiang@tsinghua.edu.cn

1 前言

高温气冷堆 (HTGR) 是世界上首座具有第四代核电特征的堆型, 堆内装载了大量核石墨作为结构材料和燃料元件基体^[1]。石墨是典型多孔材料, 含有大量微小孔隙, 常温下通过孔隙从周围环境吸附水分。石墨中含有的水分、O₂、N₂ 和 CO₂ 等杂质, 在反应堆升温过程中释放进入氦气冷却剂。这些杂质, 在反应堆运行的高温条件下与石墨发生化学腐蚀反应, 从而影响石墨强度和服役寿命, 且在进气和进水事故工况下, 这种腐蚀反应更严重^[2]。为了减小反应堆高温运行条件下的堆内材料腐蚀, 高温堆在初装堆和事故后需要对一回路进行严格的加热除湿操作^[3]。

高温堆一回路加热除湿, 原理上是启动主氦风机, 驱动一回路冷却剂, 将动能转化为热能, 把一回路加热至目标除湿温度^[4]。在加热过程及此热态下, 水分不断从石墨材料中扩散到一回路冷却剂中, 同时氦净化系统事故冷却序列引入并冷却一回路的含湿冷却剂, 使过饱和水冷凝、分离并被排放掉, 由此可将一回路石墨材料中的含水量降低到合理水平^[5]。开展高温堆加热除湿试验目的是研究上述除湿过程, 为山东石岛湾高温气冷堆核电站示范工程积累经验提供支持。

本文主要研究的是高温堆除湿试验中的一回路加热升温过程, 此过程显著影响着除湿的效率与最终效果, 故需要重点研究, 借助 COSMOL 软件中湍流流动模块与固体流体传热模块的无缝耦合对高温堆内的气体流动和传热情况进行数值研究, 预测升温过程所需时间, 指导相关除湿实验, 优化除湿方案。

2 高温堆除湿试验

2.1 除湿流程

高温堆一回路加热除湿过程, 由多个系统联合完成, 参与涉及的主要系统有: 反应堆一回路、主氦风机、一回路压力泄放系统、氦净化系统、氦辅助系统的排水系统、一回路抽真空系统、设备冷却水系统、余热排出系统^[6]。

高温堆一回路加热除湿实验, 基本过程包括抽真空、充气、加热、除湿、冷却、排气过程。(1) 抽真空, 在对一回路加热除湿之前, 由于安装堆内构件等操作, 一回路充满的是含湿空气, 因此有必要通过抽真空的方法, 对一回路进行初步的除湿。

(2) 充气, 在一回路中充入氦气介质, 充入的量, 应使一回路中的氦密度与反应堆正常运行时 (7MPa、250℃) 的氦气密度 6.33kg/m³ 相同。(3) 加热, 运转主氦风机, 驱动气体在堆内循环流动。气体的动能被转化为热能, 将堆内石墨材料逐渐被加热至

目标除湿温度，堆内材料吸附或携带的水也逐渐挥发、扩散到气体中。（4）除湿，一回路被加热到目标除湿温度，湿度较高的一回路工质在事故冷却序列被冷却，过饱和的水被冷凝、分离、排放到氦辅助系统的排水系统，从而降低一回路冷却剂湿度。

（5）冷却，除湿后需要对一回路进行冷却降温。（6）排气过程，将低压工质排掉，排放至接近大气压。整个除湿过程完成。

2.2 高温堆除湿试验的升温过程

在除湿流程的充气操作完成以后，吸收球停堆系统和燃料装卸系统会与一回路系统隔离。之后将开始一回路加热操作，运转主氦风机，驱动气体在堆内循环流动。通过主氦风机的转动，气体的动能将转化为热能，堆内石墨材料逐渐被加热升温至目标除湿温度，本文关注的即此升温过程。

升温过程的工况参数如 1 所示：在本阶段的升温过程中，主要利用主氦风机对一回路进行加热，阶段开始时堆内构件的初始温度为 100℃，一回路内工质温度为 100℃，压力 4MPa，流量约为 96kg/s^[7]。经过加热升温后，在阶段末，期望堆内构件以及一回路主流氦气达到 250℃高温，以满足除湿要求。

表 1 高温堆除湿试验的升温过程工况参数

过程	计算对象	热源	初始温度	目标温度
一回路加热升温过程	堆内石墨构件（反射层） 含硼碳构件（屏蔽层） 一回路工质	主氦风机转动， 动能转化为热能	100℃	250℃

3. 升温过程的数值模拟

3.1 堆内构件及参数

在高温气冷堆示范工程 HTR-PM 中，石墨构件作为反射层，是由石墨砖砌成高 15600 mm、外径 4500 mm 的近似圆筒体形结构；石墨筒体内部挖空形成直径 3000 mm、等效高度 11800 mm 的堆芯腔，堆芯腔底面形成 30 度斜面^[8]。

碳构件作为屏蔽层，大部分采用含硼碳材料，其位于石墨构件外侧，包围石墨构件形成外径 5000 mm、内径 4500 mm 的筒体。顶屏蔽层和底屏蔽层分别厚 400 mm 和 800 mm。

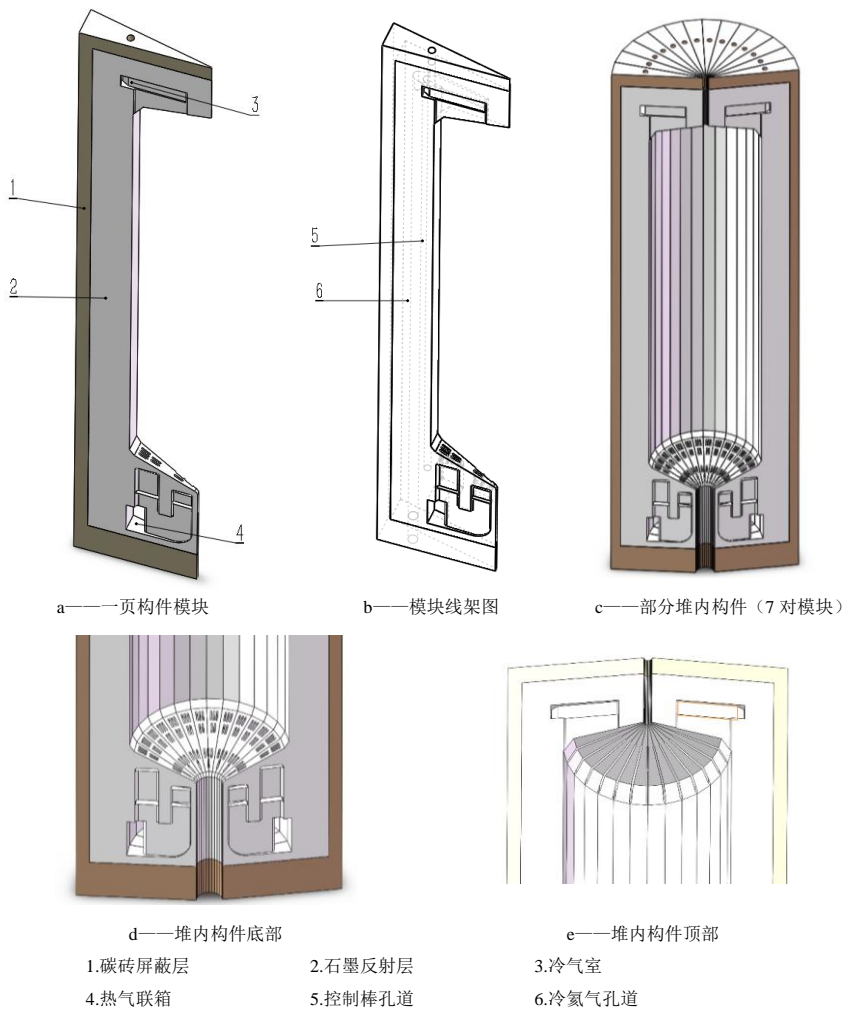


图1 HTR-PM 堆内石墨和碳构件示意图

实际上石墨和碳砖砌成的构件筒体的截面并非完美圆形，而是呈正30边形，因为筒体可看作由30块相同尺寸的模块绕堆芯中轴线按圆周布置而砌成。

在软件Solidworks中建立HTR-PM堆内石墨和碳构件及燃料球的三维几何模型，构件模型如图所示。对几何模型做如下简化：忽略石墨和碳砖之间接缝、榫键、中子源通道、吸收球通道、热气导管等；认为模型可按截面正30边形等分为30份相同三棱柱的模块，其中一页模块如图1(a)所示，且相邻每两页模块镜面对称。

用于加热堆芯的干燥热氦气的主要流动路径为：通过冷氦气孔道从堆芯底部进入顶

部的冷气室，再通过堆芯腔下降至热气联箱，最后通过热气导管离开堆芯。氦气与构件接触面为流动路线上和控制棒孔道接触面。

模型的相关参数设置如表 2 所示。

表 2 高温堆 HTR-PM 堆芯计算模型参数

堆内区域	设计体积/m ³	计算模型体积/m ³
气体流通体积	79.20	82.80
石墨反射层	147.40	147.38
碳砖屏蔽层	81.10	80.84

3.2 模拟分析

由于几何模型的对称性，为了降低计算量，只取一页构件模型的简化几何进行计算，简化几何模型见图 2 (a)，分为固体域和流体域，固体域如图 2 (b.) 包括，屏蔽层材料为含硼碳 BC，反射层材料为石墨 IG-110，流体域为氦气见图 2 (c.)；计算结果的后处理将其复原至完整构件形态。将 HTR-PM 堆内构件中一页模块的几何模型导入 COMSOL，利用 COMSOL 软件内置的网格剖分模块，合理设置最大、最小单元大小、最大单元增长率、曲率因子、狭窄区域分辨率等参数，确保网格的平滑过渡；对于气体流道狭窄区域进行了局部网格的细化；为了充分考虑气体流动的黏性底层流动特性，流体区域划分了较细的边界层网格。网格划分形式为自由四面体网格，网格数目约 457 万，最小质量单元 0.027。

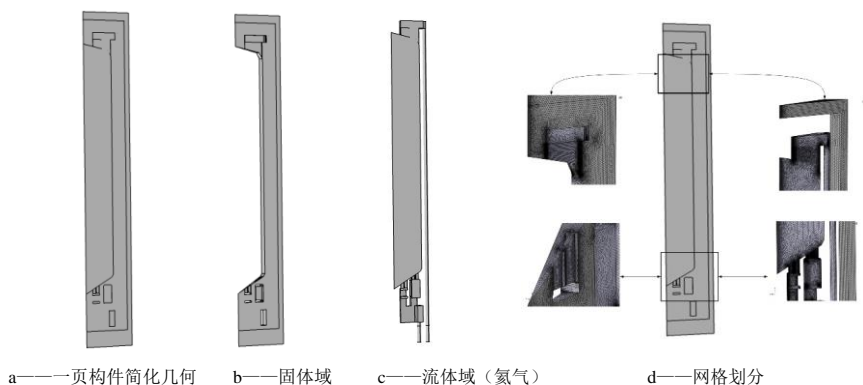


图 2 COMSOL 中简化模型与网格划分示意图

对于物理场的选择，借助 COSMOL 软件中流体流动模块与传热模块的无缝耦合，

流体流动模块选择的是湍流模型，传热模块选择固体与流体传热。相关假设条件：流体为不可压缩的恒定流动的牛顿流体，模型中的流动状态为湍流，采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型，传热仅考虑流体与固体的对流换热和固体间的导热，碳砖屏蔽层的外部边界均为绝缘条件。

1. $k-\varepsilon$ 湍流模型

采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型，其输运方程如下：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (2)$$

G_k 一因平均速度梯度引发的湍动能 k 的产生项； G_b 一由于浮力影响引起的湍动能产生； Y_M 一可压缩湍流脉动膨胀对总的耗散率的影响； S_k 和 S_ε 为用户自定义源项^[9-10]。

假设流体不可压缩，因此得出 $G_k = Y_M = S_k = S_\varepsilon = 0$ ，得到最终简化的输运方程如下：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中： $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 σ_ε 、 σ_k 经验常数；取值分别为 $C_{1\varepsilon}=1.44$ ， $C_{2\varepsilon}=1.92$ ， $\sigma_\varepsilon=1.3$ ， $\sigma_k=1$

COMSOL 中的 $k-\varepsilon$ 湍流模型基于以上公式来设定的这些经验常数。

2. 传热模块

采用的是 COMSOL 传热模块中的流体固体传热，相关方程如下：

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \bar{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q \quad (5)$$

$$q = -k \nabla T \quad (6)$$

式中： ρ 是密度， C_p 是定压比热容， \bar{u} 为速度矢量， q 为热流密度， Q 为换热量；

碳砖屏蔽层外部边界均为绝热条件。

3. 3 模拟结果分析

3. 3. 1 氦气流动情况

为了更好的研究高温堆内升温过程，有必要对堆内的氦气流动情况进行分析，根据 $k-\varepsilon$ 湍流模块和传热模块的耦合，在 COMSOL 中建立对应的稳态模型并进行数值计算，得到高温堆体积内气体流动的稳态流场。

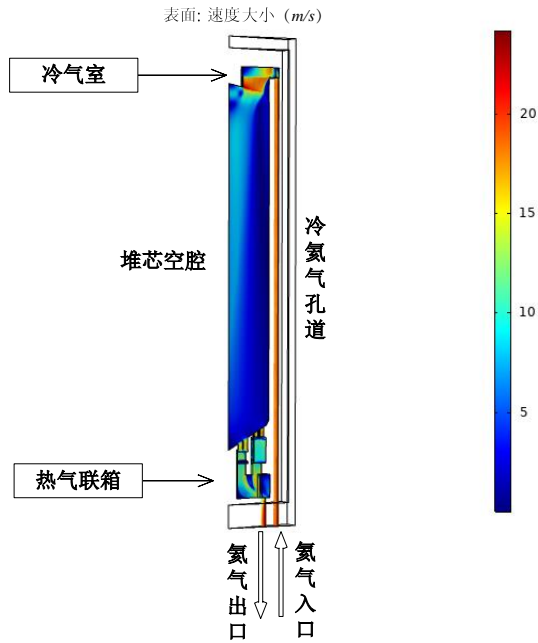


图 3. 一页构件内流体的流速分布示意图

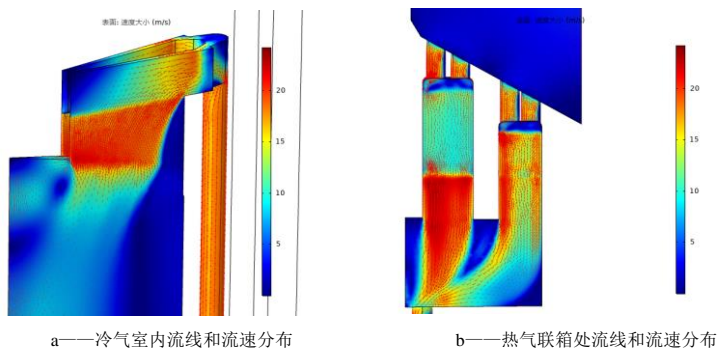


图 4. 稳态流场局部放大示意图

由图 3 流速分布示意图可知，氦气自底部入口进入高温堆，经过冷氦气孔道进入顶部的冷气室，再通过堆芯腔下降至热气联箱，最后通过热气导管自底部离开堆芯。在氦气孔道内，气体流动速度在 20m/s 左右，到达冷气室后，气体在此减速混合碰撞，冷气

室内存在部分流动死区（流线及流速分布如图 4（a.）所示），从冷气室至堆芯空腔要经过较狭窄通道，过流面积突然减少，流束收缩，气体流速突增。进入堆芯空腔后，流通面积激增，不同流速的流体质点碰撞，造成较大的局部速度梯度，且在进口处形成明显的漩涡流动，空腔入口处流速分布很不均匀。流体流经空腔后，会通过竖直入口进入热气联箱，其流线及流速分布如图 4（b.）所示，由于流道的复杂以及流通面积的持续激烈的变化，此区域的流速具有较大的局部速度梯度，在小型热气联箱顶部有小范围的回流现象，流动情况较为复杂。

将一页构件的计算结果，经过镜像对称后处理，将其复原至完整构件形态，得到整个堆芯的流速分布示意图如图 5 所示。

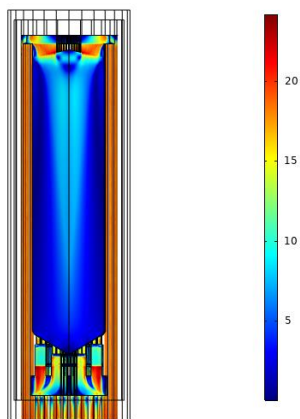


图 5 高温堆堆芯内流体的流速分布示意图

3.3.2 堆内温度场分布

借助 COMSOL 软件的多物理场耦合-非等温流动，实现了高温堆内流体流动和传热过程的数值计算，得到了高温堆升温过程的瞬态温度场分布以及堆内各区域平均温度的瞬态变化。图 6 是整个堆芯的瞬态温度场分布（选取 0h、5h、10h、15h、25h、35h 六个时间点温度场分布）。

由图 6（a）~（f）可知，堆芯温度初始温度为 100℃，在经过 35h 加热后，堆芯内主流氦气温度在 250℃左右，堆内构件除底部和顶部屏蔽层碳砖外，温度也接近 250℃。由于堆内氦气处于流动状态，而石墨材料具有较高的导热系数，最终堆芯的主体温度较为均匀，而堆芯顶部和底部屏蔽层碳砖的温度则分布不均。

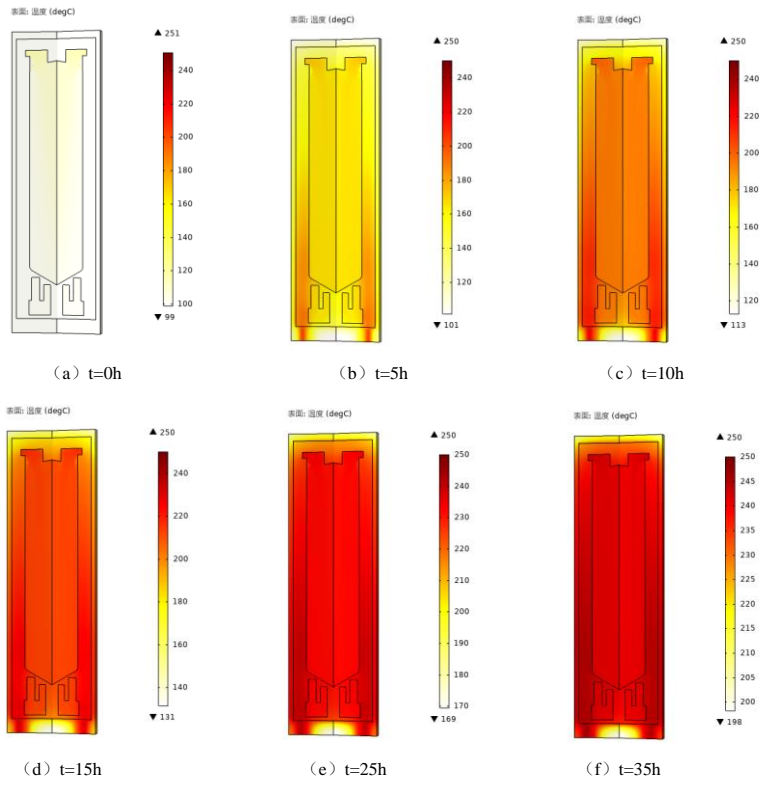


图6 堆芯整体温度分布图

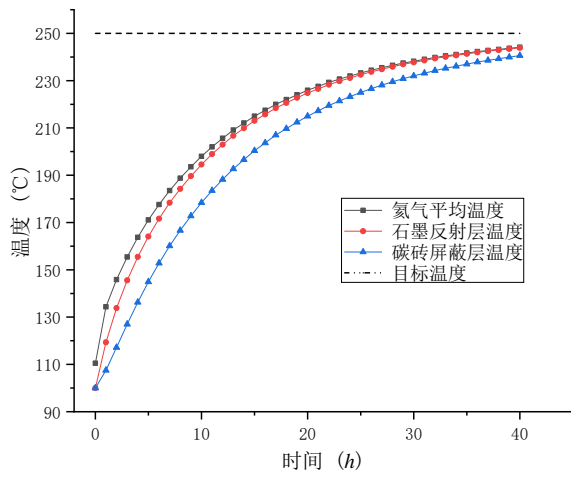


图7 堆芯内各区域平均温度随时间变化曲线

图7给出了堆芯各区域平均温度随时间的变化曲线,各区域平均温度为积分平均值,表征氦气和堆内构件的总体温度变化。在40h时,氦气平均温度达244.1℃,石墨反射层平均温度为243.9℃,碳砖屏蔽层平均温度为240.6℃。升温过程中,氦气的升温速度略大于石墨反射层,在15h后,两区域温度以及上升情况基本一致。在初始阶段,碳砖屏蔽层的升温速度远低于其他两区域,这是由于碳砖在外部,距离热氦气较远,热响应需要较长时间。

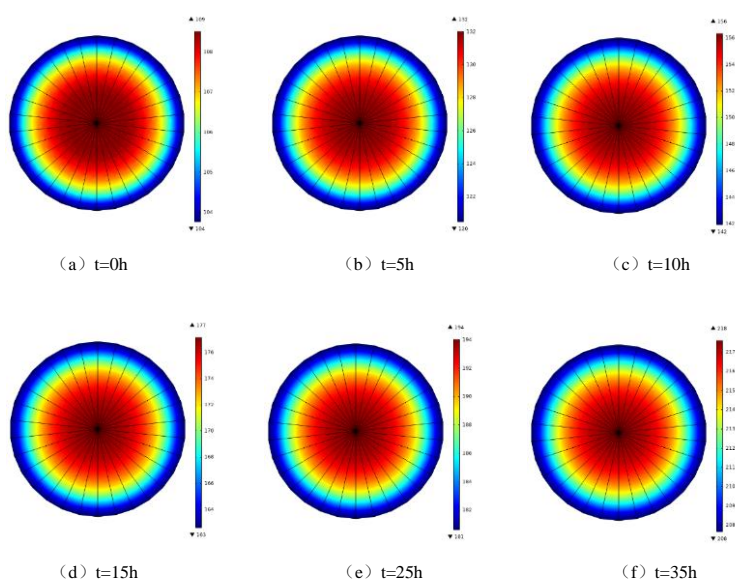


图8 堆芯顶部碳砖温度分布

如图8(a)~(f)所示,是堆芯顶部碳砖温度分布瞬态变化图,随着加热时间的推移,堆芯顶部碳砖的整体温度在上升,温度分布沿径向方向自外向内温度逐渐上升,中心温度最高,中心与最外部温差在10℃左右。

如图9所示堆芯底部碳砖温度分布不均匀程度较高,沿径向方向,自外向内,温度先升高后下降,在氦气入口孔道附近温度有极大值。由图(a)~(f)可知,随着加热进程的推进,外部碳砖的温度逐渐升高,最终达到与氦气入口孔道相近的温度,温差在10-20℃以内,中心部分碳砖的温度升高速度较慢,在t=10h时仍有100℃的温差,在升温过程末端依然存在50℃的差距。主要原因是:底部中心碳砖距离流经的氦气热源较远,热量需要通过氦气与堆芯构件的对流换热以及长距离的石墨材料之间的导热才能到达

底部中心碳砖处。

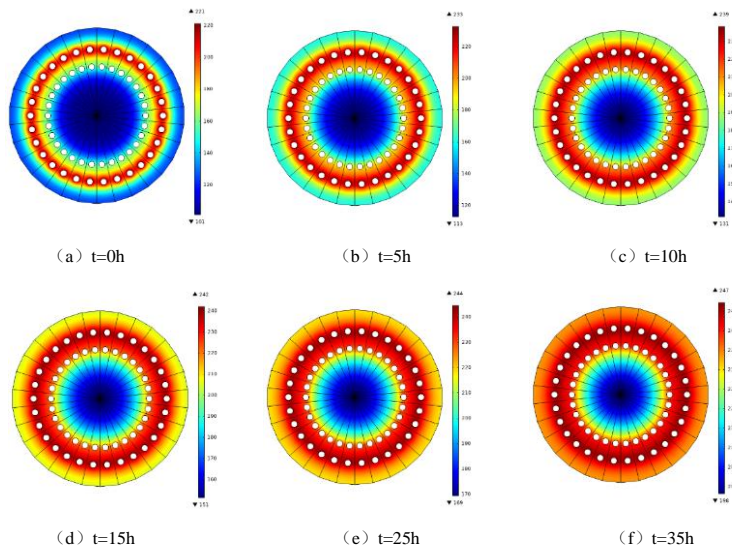


图9 堆芯底部碳砖温度分布

4. 结论

本文基于大型商用软件 COMSOL Multiphysics 建立高温堆内一回路加热的流动传热模型，对高温堆加热除湿试验的堆芯升温过程作数值分析，得到了升温过程中的流场分布和温度分布。

升温过程中，堆芯各区域的初始温度为 100°C ，经过 40h 的加热，一回路内氦气平均温度达 244.1°C ，石墨反射层平均温度为 243.9°C ，碳砖屏蔽层平均温度为 240.6°C ，各区域平均温度接近目标温度 250°C ，但此计算过程中忽略了外部碳砖与外界的热交换。若考虑向外散热，则加热效率会更低，加热所需时间将更长，还会出现热量的平衡点即达到加热的极限温度，这样将难以达到理想的除湿温度。故依靠主氦风机旋转，将动能转换为热能的加热方式存在明显缺点，需要更优化的加热方案。可以在蒸汽发生器处（二回路）增加外加热源来加热一回路工质，提高加热效率，缩短加热时间，提升除湿温度。

参考文献:

批注 [w1]: 小五号, 宋体+新罗马

- [1] 卢振明, 陈晓彤, 魏利强, 等. HTR 堆内碳素构件孔结构及吸湿特性研究[J]. 原子能科学技术, 2016, 50(3): 477-483.
LU Zhen-ming, CHEN Xiao-tong, WEI Li-qiang, ZHOU Xiang-wen, ZHANG Jie, LIU Bing. Pore Structure and Moisture Absorption Property of Carbon Materials in HTR[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2016, 50(3): 477-483.
- [2] 喻新利, 杨小勇, 于溯源. 高温气冷堆在进水进气情况下石墨氧化研究现状[J]. 核动力工程, 2006(8): 313-315.
YU Xin-li, YANG Xiao-yong, YU Su-yuan. Present status of Research on the Oxidation of Graphite in Case of Air and Water Leakage in HTR[J]. Nuclear Power Engineering, 2006(8): 313-315.
- [3] 窦金元, 银华强. HTR-PM 初装堆除湿模型初步研究. 第十四届全国反应堆热工流体学术会议, 北京, 2015.
Dou Jinyuan, Yin Huaqiang. Preliminary Investigation into the Dehumidification Model of HTR-PM Initial Core[C]. The 14th National Symposium on Reactor Thermal Fluid. Beijing: Key Laboratory of Advanced Reactor Engineering and Safety of Ministry of Education, Tsinghua University, 2015.
- [4] 陈华, 马涛, 陈晓明. HTR-PM 系统调试大纲. 清华大学核能与新能源技术研究院, 2015, 3.
- [5] Xingbin Zhao, Huaqiang Yin, Tao Ma, Design of Dehumidification Test of HTR-PM. HTR 2016, Las Vegas.
- [6] 银华强. 华能石岛湾核电厂高温气冷堆核电站示范工程一回路加热除湿试验大纲[M]..清华大学核能与新能源技术研究院, 2016,1.
- [7] 郑艳华, 陈志鹏, 石磊. 华能石岛湾核电厂高温气冷堆核电站示范工程调试阶段一回路加热及冷却过程计算分析报告[M]. 清华大学核能与新能源技术研究院, 2015, 10.
- [8] 张振声. 华能石岛湾核电厂高温气冷堆核电站示范工程石墨和碳砖堆内构件设计说明书[M]. 清华大学核能与新能源技术研究院, 2015, 3.
- [9] 傅笑珊. 不同湍流模型下燃气轮机进气系统流场的模拟[J]. 机械设计与制造(07)
- [10] 雷林, 王智祥, 孙鹏,等. 计算流体力学 $k-\epsilon$ 湍流二方程湍流模型应用研究[J]. 船舶工程, 2010, 32(3):5-8.