

球床式高温气冷堆旁流三维数值模拟

刘伟¹, 史进¹, 邵继凯², 於尚臻², 郭劲松¹, 李雪琳¹, 李增耀²

(1. 华能核能技术研究院有限公司, 200126, 上海;

2. 西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对球床式高温气冷堆中散体布置的石墨砖等结构带来的旁流问题, 数值模拟了高温气冷堆满功率稳态运行时卸料管、控制棒通道及窄缝中的旁流特征。通过结合华能集团自主研发的HN-750型球床式高温气冷堆的结构特点和流道特征, 建立了包含窄缝、顶反射层、堆芯球床、底反射层及底部球腔的反应堆三维几何模型和近真实物理数学模型, 生成了网格数为2.6亿的混合网格。结果表明, 总旁流占总流量比例为29.25%, 窄缝旁流占总流量比例为24.43%, 并且呈现出回流特性, 卸料管旁流占比3.87%, 控制棒通道旁流占比0.95%。该研究考虑了非轴对称的进出口结构, 是对现有的球床式高温气冷堆二维轴对称模型的补充和提升; 该研究针对球床式高温气冷堆的大规模三维数值计算, 为球床式高温气冷堆的热工水力优化和安全分析提供了丰富的数据支撑。

关键词: 球床式高温气冷堆; 旁流; 窄缝; 多孔介质; 三维数值模拟

中图分类号: TL334 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202408016 **文章编号:** 0253-987X(2024)08-0156-10

3D Numerical Simulation on Bypass Flow in Pebble-Bed High-Temperature Gas-Cooled Reactor

LIU Wei¹, SHI Jin¹, SHAO Jikai², YU Shangzhen²,

GUO Jinsong¹, LI Xuelin¹, LI Zengyao²

(1. Huaneng Nuclear Energy Technology Research Institute, Shanghai 200126, China;

2. MOE Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The bypass flow characteristics in such structures as graphite brick arranged in the pebble-bed high-temperature gas-cooled reactor (HTGR) during full-power steady-state operation is numerically simulated. In view of the structural features and flow characteristics of the HN-750 pebble-bed HTGR developed independently by Huaneng Group, a three-dimensional geometric model of the reactor including narrow gaps, top reflector layer, core pebble bed, bottom reflector layer, and bottom pebble cavity, along with a physically realistic mathematical model, is established. A hybrid grid with a mesh count of 260 million is generated. The results indicate that the total bypass flow accounts for 29.25% of the total flow rate, with narrow gap bypass flow with reflux characteristics occupying 24.43%, discharge pipe bypass flow occupying 3.87%, and control rod channel bypass flow occupying 0.95%. The non-axisymmetric inlet and outlet structures are considered in this research, serving as a complement and enhancement to the

收稿日期: 2024-01-22。 作者简介: 刘伟(1989—), 男, 工学博士, 高级工程师; 李增耀(通信作者), 男, 教授, 博士生导师。 基金项目: 华能集团总部科技资助项目(HNKJ22-H07 HN-750); 国家自然科学基金资助项目(52130609)。

网络出版时间: 2024-04-19

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20240418.1145.002>

existing two-dimensional axisymmetric models of pebble-bed HTGR. Large-scale three-dimensional numerical calculations for pebble-bed HTGRs are represented, with abundant data support being provided for the thermal-hydraulic optimization and safety analysis of pebble-bed HTGRs.

Keywords: pebble-bed high-temperature gas-cooled reactor; bypass flow; narrow gap; porous medium; 3D numerical simulation

球床式高温气冷堆是一种第四代核电堆型技术,具有突出的固有安全特性、出口温度高、发电效率高、潜在热应用广泛等优点,为核能代替化石燃料、促进碳中和开辟了新的技术空间,并在未来能源系统中具有广阔的应用和发展前景。由于球床模块式高温气冷堆具有模块化建造等优点,受到国际核能界的广泛关注^[1-3]。在 10 MW 高温气冷实验堆(HTR-10)^[4]的基础上,我国设计并建造了球床模块式高温气冷堆(HTR-PM)作为示范核电站,并获得国家科技重大专项^[5]的支持。

华能集团自主研发的球床式高温气冷堆(HN-750),由内而外依次为堆芯球床、石墨反射层和碳砖层。石墨反射层内部形成 30 个冷却剂通道、24 个控制棒通道和 6 个吸收球通道。石墨反射层相邻两块砖之间有一条竖向窄缝,该窄缝在整个球床反应器高度上连通冷、热氦联箱及堆芯,是典型的旁流通道。氦气从冷氦通道进入反应堆时,一部分经过堆芯冷却燃料球,成为高温气冷堆的主流;其余部分进入窄缝、控制棒通道以及底部卸料口,组成了高温气冷堆的旁流。由于旁流未能有效冷却堆芯中的燃料球,导致堆芯局部温度过高、反应堆出口温度过低及发电效率低等不利影响^[6],因此研究高温气冷堆的旁流问题具有重要的意义。

在反应堆热工水力设计研究中 CFD 方法是重要的研究手段^[7-8]。文献^[9-10]采用局部非热平衡多孔介质模型(darcy-brinkman-forchheimer, LNTE)求解堆芯中的流动与传热特性,验证了多孔介质模型的可靠性。多孔介质的阻力系数及换热系数对高温气冷堆的流动与换热特性影响较大,目前大多数相关文献^[9-13]均采用德国安全导则 KTA 中的公式进行计算。Sun 等^[9]首次将高温气冷堆分为上、中、下 3 部分进行拆分,分别采用不同阻力系数的多孔介质模型处理,进而计算窄缝旁流的占比,但模型过于简化。张双宝等^[14]构建高温气冷堆三维耦合模型并采用 CFD 计算了额定工况下氦气冷却剂在堆芯内的流动与换热过程,但并未考虑顶部及底部反射层以及窄缝旁流的影响。

本文针对 HN-750,采用 ANSYS Fluent 商用

软件,建立包含氦气上升通道、顶反射层、控制棒通道、堆芯、底反射层、窄缝、环腔等的近真实三维几何模型,采用多孔介质模型描述堆芯中的流动传热,考虑堆芯、氦气通道、窄缝旁流以及控制棒通道等之间的耦合影响,对额定工况下的 HN-750 中的流动传热及旁流特性进行研究,期望对高温气冷堆热工和安全分析提供支撑。

1 模型描述

1.1 物理模型

HN-750 横截面示意图如图 1 所示,HN-750 纵剖面及三维模型示意图如图 2 所示。在金属堆内构件内壁位置设置第一层环腔,用于连接碳砖与金属堆内构件内壁之间的流体,在金属堆内构件外壁与压力容器内壁之间存在第二层环腔,氦流从压力容器壁的入口流入该环腔后分为两股:一股氦气流入 30 个分流入口,通过冷氦上升通道流入顶反射层,经过顶反射层的分流混合后流入堆芯,最终再通过底反射层、热氦联箱混合从出口流出;另一股氦气通过底部环形空间中的 1 mm 卸料口缝隙流入堆芯,这部分流体用于冷却卸料管,最终也从出口流出。此外,第二层环腔是通过冷氦通道以及 1 mm 卸料口缝隙与堆芯区域相互联通。由于窄缝和方键周围区域对旁流影响较大,在处理窄缝几何模型时,假设竖向窄缝在高度方向上尺寸保持不变,因此在堆芯周围均匀分布着 30 条 1.6 mm 的窄缝,窄缝连接堆芯与第一层环腔。

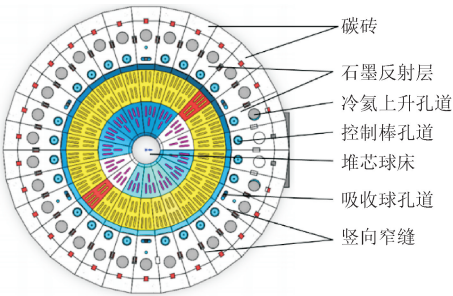


图 1 HN-750 横截面示意图

Fig. 1 Cross section of HN-750

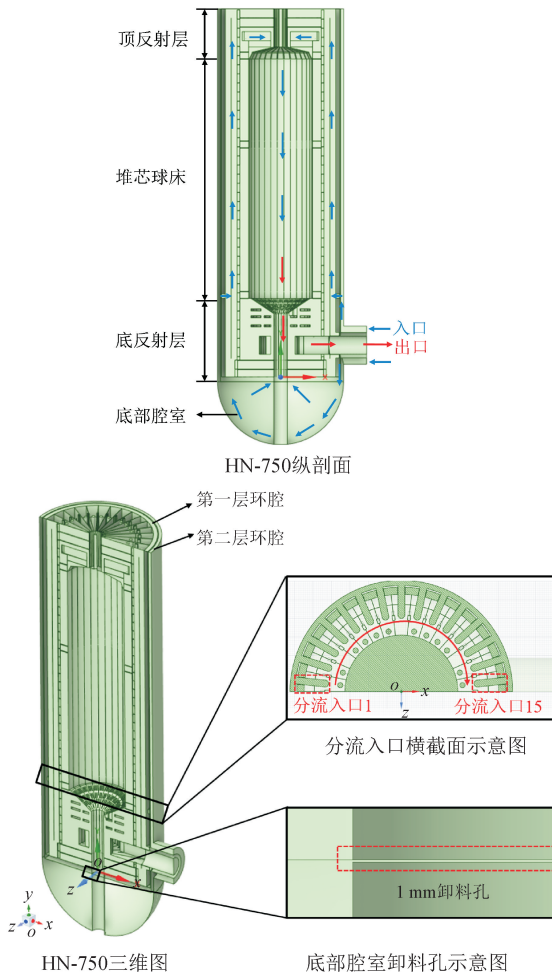


图 2 HN-750 纵剖面及三维模型示意图

Fig. 2 Vertical section and 3D model of HN-750

石墨层包裹着反应堆堆芯,从顶反射层顶部开始,每条窄缝上均设置方键,方键示意图如图 3 所示。从顶反射层顶部到底反射层底部总高度 16 500 mm,每条窄缝上均匀布置 41 个方键,每个方键的尺寸为 120 mm×70 mm×40 mm。将 HN-750 中的流动传热过程作如下分区处理:堆芯区域作为多孔介质区域,其余区域都为真实的纯流体区域;忽略石墨砖和碳砖固体域的影响。顶反射层及底反射层均采用模型的真实结构,假设竖向窄缝在高度方向上尺寸保持不变。本文模拟中采用原模型周向的一半,可减小计算量,但在结果分析中有的全周向展示。

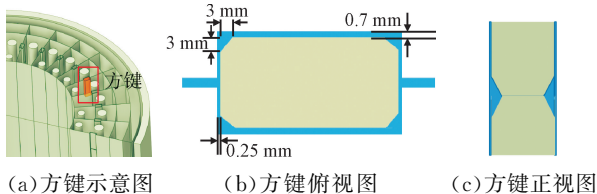


图 3 方键结构示意图

Fig. 3 The structure of square bond air gap

1.2 数学模型

高温气冷堆中的流动和传热过程可用如下方程来描述

$$\frac{\partial(\alpha_{\phi}\rho u_j\phi)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}(\alpha_{\phi}\Gamma_{\phi}\frac{\partial\phi}{\partial x_j}) + S_{\phi} \quad (1)$$

式中: ϕ 为通用变量; α_{ϕ} 为与 ϕ 对应的扩散项系数; Γ_{ϕ} 为与 ϕ 对应的广义扩散系数; S_{ϕ} 为与 ϕ 对应的广义源项。

控制方程中各个系数及源项如表 1 所示。表 1 中 u, v, w 分别为速度在 x, y, z 方向上的分量, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; ρ 为流体密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; p 为流体压力, Pa; T 为流体温度, K; c_p 为流体比定压热容, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; α_{sf} 为相间换热面; h_{sf} 为相间对流换热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$; φ 为孔隙率; T_s 为固体温度, K; T_f 为流体温度, K; λ_f 为流体导热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; λ_s 为固体导热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; $\dot{Q}$ 为燃料球发热量, $\text{W} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

$\alpha_{\text{sf}}, h_{\text{sf}}$ 基于球床反应堆通用的德国安全导则 KTA3102.2^[15] 来计算,即

$$Nu_p = 1.27 \frac{Pr^{1/3} Re^{0.36}}{\varphi^{1.18}} + 0.033 \frac{Pr^{0.5} Re^{0.86}}{\varphi^{1.07}} \quad (2)$$

$$Nu_p = \frac{h_{\text{sf}} d_p}{\lambda_f} \quad (3)$$

$$Pr = \frac{\mu_f c_p}{\lambda_f} \quad (4)$$

在采用多孔介质模型计算时,多孔介质的渗透率 α 、黏性阻力系数 D 和惯性阻力系数 C_2 计算公式为

$$\alpha = \frac{d_p^2}{A} \frac{\varphi^3}{(1-\varphi)^2} \quad (5)$$

$$D = \frac{1}{\alpha} \quad (6)$$

$$C_2 = \frac{B}{d_p} \frac{(1-\varphi)}{\varphi^3} \quad (7)$$

A, B 的取值来自于实验经验公式,这里计算使用的经验公式为球床反应堆通用的德国安全导则 KTA3102.3^[16],通常用于氦气冷却球床式气冷堆的分析^[17-19],即

$$\psi = \frac{320}{(Re/(1-\varphi))} + \frac{6}{(Re/(1-\varphi))^{0.1}} \quad (8)$$

$$A = 160; B = 3 \left(\frac{Re}{1-\varphi} \right)^{-0.1} \quad (9)$$

氦气进出口温差较大,所以应该考虑其物性的变化。这里采用球床反应堆通用的德国安全导则 KTA3102.1 经验公式^[20] 来计算氦气物性,并且通过 UDF 方式与控制方程关联,所使用到的经验公式如下

表 1 通用方程组中的参数表

Table 1 Parameters in a universal system of equations

控制域	方程类型	ρ	ϕ	α_ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ
	连续性方程	ρ	1	1	0	0
纯流体域	动量方程	ρ	u	1	μ	$\rho f_x - \frac{\partial p}{\partial x}$
			v			$\rho f_y - \frac{\partial p}{\partial y}$
			w			$\rho f_z - \frac{\partial p}{\partial z}$
	能量方程	ρc_p	T	1	λ_f	0
	连续性方程	ρ	1	1	0	0
多孔介质域	动量方程	ρ	u	1	μ	$-\varphi \frac{\partial p}{\partial x} - \left(\frac{\mu}{\alpha} \varphi u + \varphi^2 \frac{\rho C_F}{\sqrt{\alpha}} u u \right)$
			v			$-\varphi \frac{\partial p}{\partial y} - \left(\frac{\mu}{\alpha} \varphi v + \varphi^2 \frac{\rho C_F}{\sqrt{\alpha}} u v \right)$
			w			$-\varphi \frac{\partial p}{\partial z} - \left(\frac{\mu}{\alpha} \varphi w + \varphi^2 \frac{\rho C_F}{\sqrt{\alpha}} u w \right)$
	能量方程(流体)	ρc_p	T	φ	λ_f	$h_{sf} \alpha_{sf} (T_s - T_f)$
	能量方程(固体)	0	T	1	λ_s	$(1 - \varphi) \dot{Q} - h_{sf} \alpha_{sf} (T_s - T_f)$

$$\rho = 48.14 \frac{p}{T} \left(1 + 0.4446 \frac{p}{T^{1.2}} \right)^{-1} \tag{10}$$

$$c_p = 5\,195 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \tag{11}$$

$$c_v = 3\,117 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \tag{12}$$

$$\mu_f = 3.674 \times 10^{-7} T^{0.7} \tag{13}$$

$$\lambda_f = 2.682 \times 10^{-3} (1 + 1.123 \times 10^{-3} p) \cdot T^{0.71(1-2 \times 10^{-4} p)} \tag{14}$$

式中： μ_f 为氦气动力黏度， $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$ ； λ_f 为氦气导热系数， $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。采用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型，其湍动能 k 方程和耗散率 ϵ 方程如下

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_e \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon \tag{15}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\epsilon \mu_e \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \tag{16}$$

式中： μ_e 为有效黏度； G_k 、 G_b 分别为由平均速度梯度和浮升力引起的湍动能产生项； α_k 、 α_ϵ 为 $k-\epsilon$ 方程各自对应的有效普朗特数； $C_{1\epsilon}$ 、 $C_{2\epsilon}$ 、 $C_{3\epsilon}$ 为模型常数，分别取 1.42、1.68、0.084 5^[21]。近壁区采用标准壁面函数法处理。文献[22]通过对文献[23]的毫米量级矩形平直窄缝氦气流动进行 CFD 建模并与实验结果对比，证明了采用湍流模型采用 RNG $k-\epsilon$ 模型

并结合标准壁面处理的适用性，可用于竖缝旁流问题的计算。

堆芯热源功率分布由 VSOP-THERMIX^[24-25]核热耦合计算所得，如图 4 所示，得到的功率分布通过 UDF 赋值到三维 CFD 模型的堆芯球床区域。在该模型中，通过建立纵向管线计算非堆芯流动，而没有考虑局部几何细节。该程序采用两维四群模型，其主要分析功能包括堆芯中子动力学、反应堆内固体热传导、反应堆内气体对流和一回路中的流体流动。VSOP-THERMIX 程序包经过 AVR、THTR、HTR-10 运行数据验证，计算结果可靠。

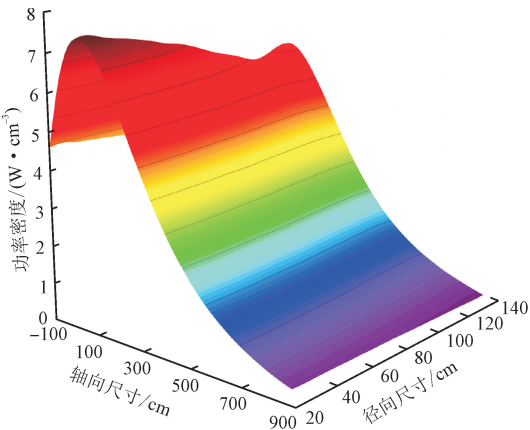


图 4 堆芯球床功率分布

Fig. 4 Power distribution in the core

对于 HN-750 稳态 100% 功率运行工况, 计算边界条件设置如下: ①氦气入口流量为 $38.5\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$, 入口温度为 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$; ②氦气出口为压力边界条件, 背压为 7 MPa ; ③二层环腔侧壁面为绝热边界。

1.3 数值方法

1.3.1 网格划分

网格分区及网格示意图如图 5 所示。由于几何模型复杂、耦合面多且流动换热过程复杂, 本文将整个计算模型拆分成 23 个子区域分别进行网格划分, 最后合并成为包含蜂窝、六面体、四面体等混合网格的整体网格。图中平面 1 位于 $y=14\,900\text{ mm}$ 处, 属于顶反射层区域; 平面 2 位于 $y=10\,020\text{ mm}$ 处, 属于堆芯区域; 平面 3 位于 $y=2\,650\text{ mm}$ 处, 属于热氦联箱区域; 平面 4 位于 $y=1\,450\text{ mm}$ 位置处, 属于热氦联箱与出口连接区域。堆芯区域采用蜂窝状网格, 窄缝和方键由于尺寸较小, 采用六面体网格进行局部加密。

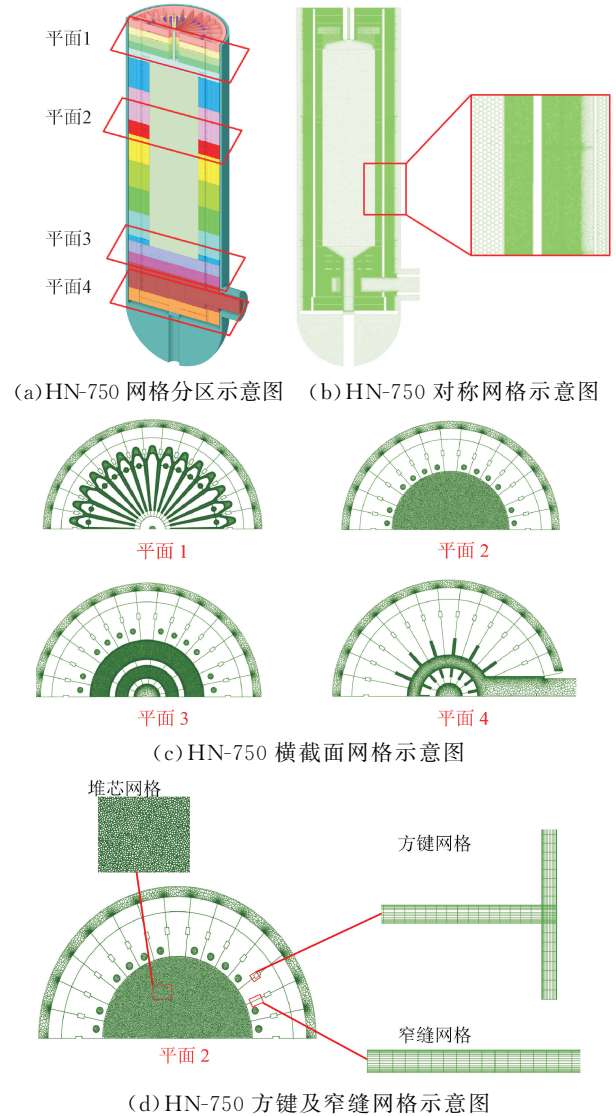


图 5 网格分区及网格示意图

Fig. 5 Partition of grid and schematic diagram of grid

1.3.2 计算方法

采用有限体积法对流体控制方程进行离散, 对流项采用二阶迎风格式离散, 压力与速度的耦合采用 SIMPLEC 算法进行处理。当所有离散方程的残差小于 10^{-6} 时认为迭代收敛。

1.3.3 网格无关性验证

基于 18 498、26 626、30 649 万 3 套网格进行计算, HN-750 中氦气的进出口压降及出口温度如表 2 所示。结果表明, 当网格数达到 26 626 万时, 氦气的进出口压降及出口温度基本不变, 这时的数值解可以认为是网格无关性的解。后续的计算均采用 26 626 万网格进行。

表 2 网格无关性验证

Table 2 Grid independence verification

网格数/万	球床压降/kPa	氦气出口平均温度/ $^{\circ}\text{C}$
18 498	87.24	720.83
26 626	94.96	749.89
30 649	94.55	748.66

2 计算结果与分析

2.1 模型及方法的可靠性验证

为了验证本文模型及方法的可靠性, 建立了不考虑旁流的三维堆芯模型进行了数值模拟, 并将结果与公认的球床式高温气冷堆热工流体程序 THERMIX^[22] 的计算结果对比, 如表 3 所示。结果表明, 本文的计算结果与 THERMIX 结果符合很好, 对于球床压降的预测偏差为 2.3%, 对于氦气最高温度的预测偏差为 3.0%, 对于氦气出口平均温度的预测偏差为 0.06%。设计出口温度为 $750\text{ }^{\circ}\text{C}$, 是氦气全部流过堆芯时的出口温度, 但利用 Fluent 和 THERMIX 计算时预先考虑了旁流, 因此计算所得出口平均温度高于设计温度。

表 3 本文与 THERMIX^[22] 计算对比

Table 3 Comparison of calculations between this article and THERMIX^[22]

软件	球床压降/ kPa	氦气最高 温度/ $^{\circ}\text{C}$	出口平均 温度/ $^{\circ}\text{C}$
Fluent	78.2	894.4	785.5
THERMIX	80.0	868.0	786.0
相对误差/%	2.25	-3.04	0.06

2.2 HN-750 流场与温度场分布

HN-750 对称面速度矢量图及压力分布云图如图 6 所示。

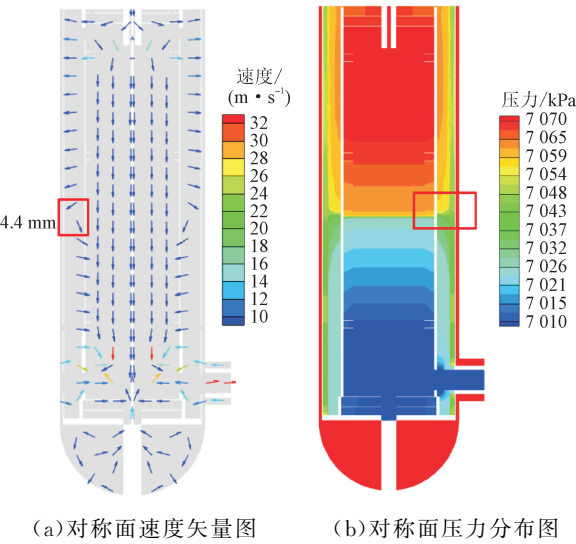


图 6 对称面速度矢量图及压力云图

Fig. 6 The contours of velocity vector and pressure on the symmetry plane

由图 6(a)可以看出,冷氦从热气导管外的环形空间流入反应堆,一部分向下流入底部球腔,经卸料

孔流入反应堆内部;另一部分沿着冷氦上升通道进入冷氦联箱,经过混合后流入堆芯成为氦气主流。此外,有一部分氦气从堆芯上部流入窄缝,在堆芯下部又重新流入堆芯,窄缝旁流流向变化的转折点离堆芯出口 4.4 m。由图 6(b)可以看出,转折点以上部分,堆芯中氦气压力高于窄缝,因此在压力驱动下氦气由堆芯流入窄缝,而在转折点以下则相反。

HN-750 从顶反射层到底反射层(出口处)不同高度处的速度和温度云图如图 7、8 所示。由图 7 可以看出:进入各冷氦流道的氦气入口速度均匀分布,堆芯截面流速较低,约为 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;底反射层的混流结构使得局部氦气流速增加,最终汇聚在热氦联箱底部后流出压力容器,出口速度较大,约为 $32\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。由图 8 可以看出,从堆芯顶部到底部,堆芯中央的温度逐渐升高,这主要是由于氦气沿堆芯高度方向冷却燃料球,因此氦气温度升高,最终汇聚于热氦联箱中以 $1\,023\text{ K}$ 的出口温度流出热气导管。

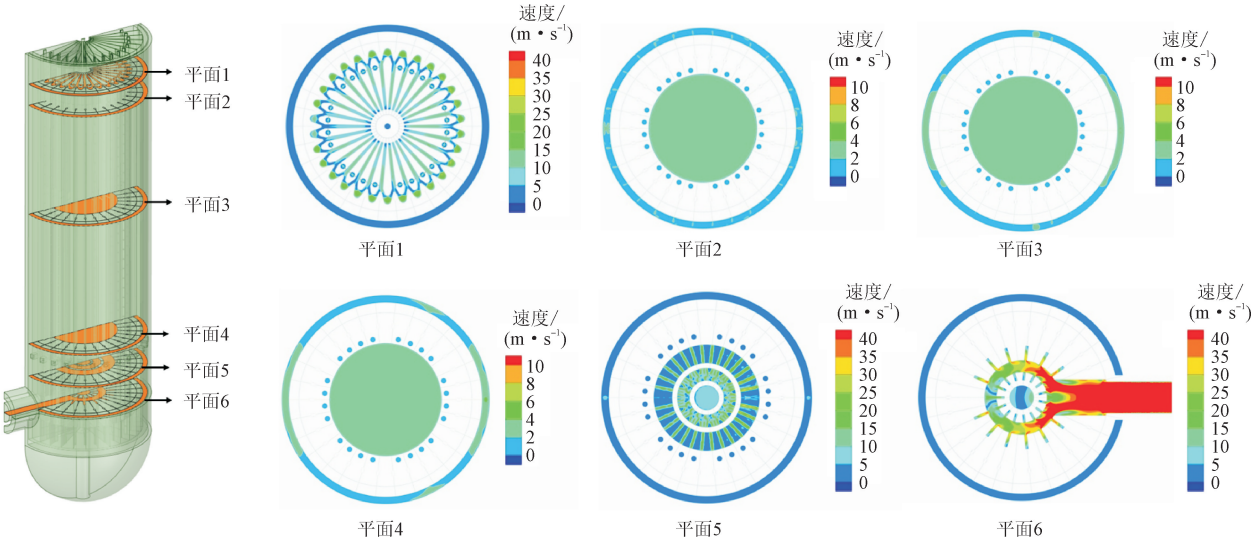


图 7 HN-750 不同位置处速度云图

Fig. 7 Velocity contours at different positions of HN-750

2.3 HN-750 旁流分布规律

在 HN-750 模型中,从入口进入的大部分氦气沿着冷氦通道流入顶反射层,经过顶反射层的混合后大部分流入堆芯进行燃料球的冷却,最后经过底反射层从压力容器出口流出。除了这一主流的流路外,还存在部分流氦气流入卸料管、控制棒通道及纵向窄缝。因此,本文分别考虑了流入卸料管、控制棒通道以及纵向窄缝的旁流流量,并将三者之和记为总旁流流量。

卸料管、控制棒通道及纵向窄缝的旁流示意图如图 9 所示。图 9(a)展示了卸料管旁流的流向,这部分旁流的主要作用是用于卸料管的冷却。从入口流入压力容器的氦气一部分沿着上腔体流动进入冷氦流道,另一部分流入压力容器底部的空腔并通过卸料管缝隙(高度为 1 mm)流入底反射层,最后从堆芯出口流出,这部分即为卸料管旁流。经过计算所得这部分流量为 $1.49\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ 。图 9(b)展示了控制棒通道旁流的流向,标号 1~12 表示不同位置的

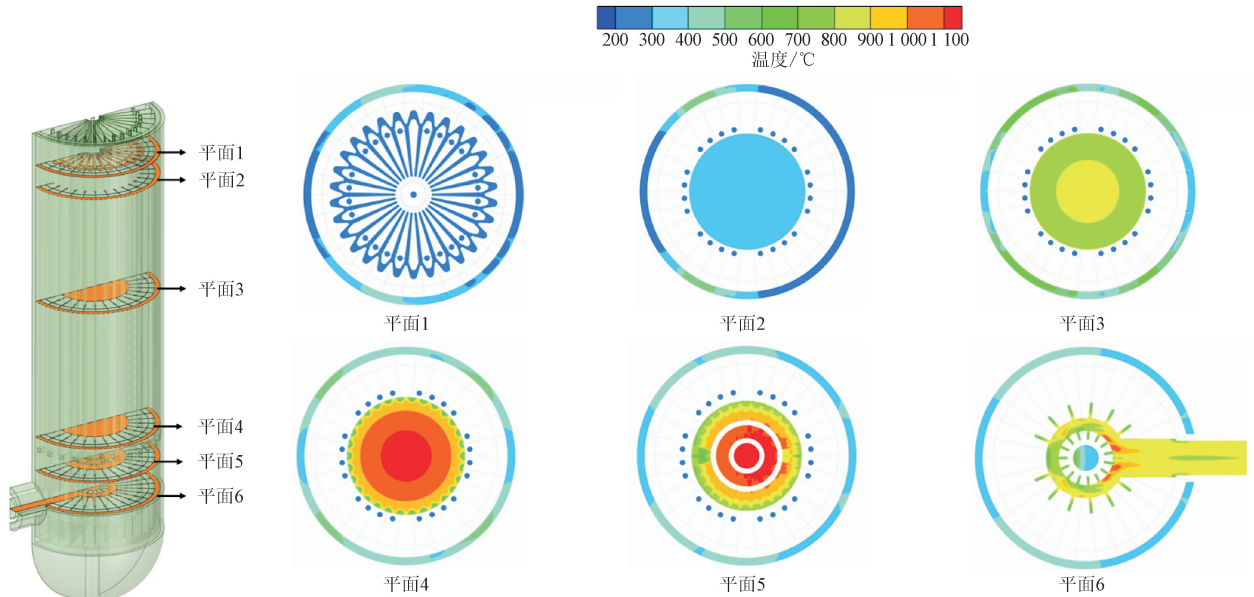


图 8 HN-750 不同位置处温度云图

Fig. 8 Temperature contours at different positions of HN-750

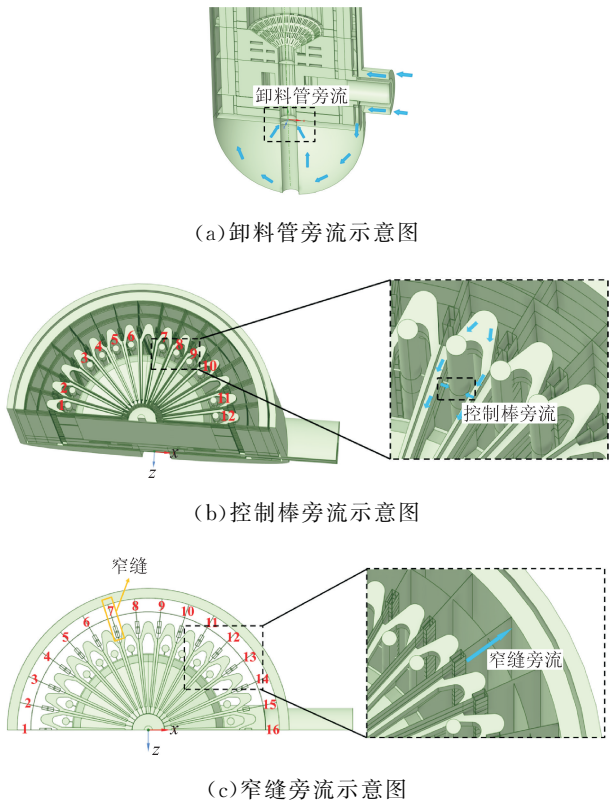
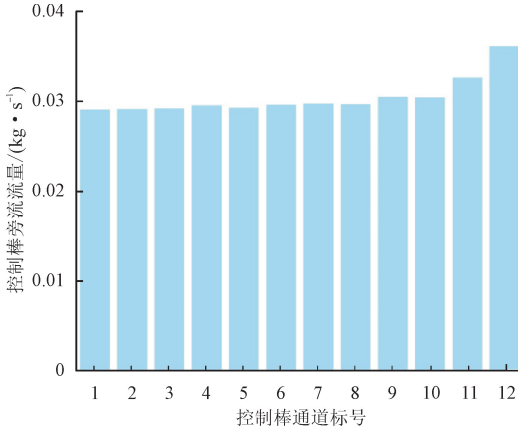


图 9 卸料管、控制棒通道流道及窄缝旁流示意图

Fig. 9 Schematic diagram of bypass flow routes in discharge pipes, control rods, and narrow gaps

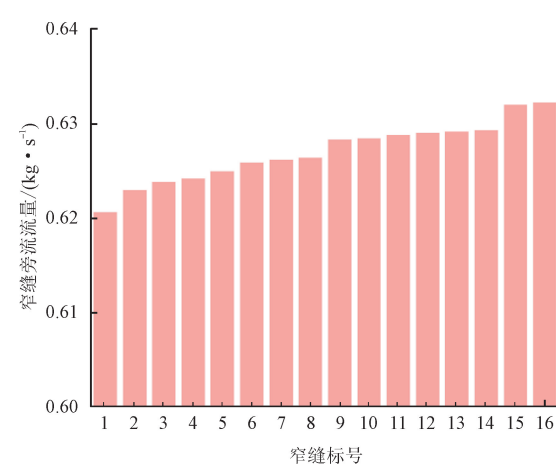
小部分从顶反射层主流与控制棒通道相连的小通道（直径为 10 mm）流入控制棒通道，然后沿着控制棒通道向着底反射层流动直至热氦联箱，这一部分即为控制棒通道旁流。

控制棒通道和窄缝旁流量随位置的变化如图 10 所示。由图 10(a)可以看出，在靠近出口处控制棒通道的旁流量相较于其他位置较大，经过计算，统计了一半模型的所有控制棒通道流量之和，总控制棒通道旁流量为 $0.37 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 。图 9(c)展示了窄缝旁流的流向，标号 1~16 表示不同位置出的窄缝。连通堆芯内部及环腔的细长矩形流道即为窄缝，图 10(b)显示了不同位置处窄缝的旁流流量，可知从 1~16 号（靠近出口），窄缝流量逐渐增加。计算所得所有窄缝旁流（流出堆芯的氦气）流量之和为 $0.37 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 。



(a) 控制棒通道旁流流量随控制棒位置变化图

控制棒通道。从冷氦通道流入顶反射层的氦气，大部分在顶反射层经过混合分流后流入堆芯，还有一



(b)窄缝旁流流量随窄缝位置变化图

图 10 控制棒通道和窄缝旁流量随位置的变化
Fig. 10 The variation of bypass flow rate of control rods and narrow gaps with position

氦气温度沿轴向和径向的变化如图 11 所示,轴向取为堆芯中轴线($x=z=0,y=3.5\sim14\text{ m}$),径向位置取为 $x=0,y=8.45\text{ m},z=0\sim1.4\text{ m}$ 。

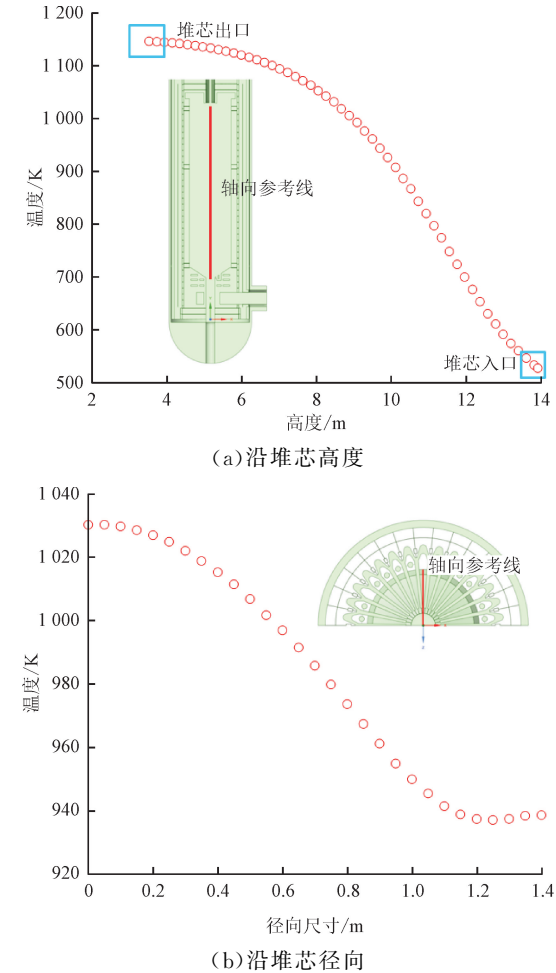


图 11 氦气温度变化

Fig. 11 The variation of temperature of helium gas

由图 11(a)可以看出,氦气由于持续被燃料球加热,所以其温度沿轴向(高度方向从上到下)逐渐升高。由如图 11(b)可以看出,由于堆芯功率沿径向(由里而外)逐渐减小,所以氦气温度沿径向也逐渐减小,但在半径为 1.2~1.4 m 范围内氦气温度有小范围的升高,这主要是靠近堆芯外侧部分的氦气由堆芯进入窄缝,使得氦气流量减小所致的。

HN-750 各部分旁流流量及旁流量占比如表 4 所示,可知窄缝旁流占比最大,其次是卸料管旁流,控制棒通道旁流最小,因此 HN-750 总旁流量为 $11.27\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$,占比为 29.25 %。

表 4 旁流分布及占比情况

Table 4 Distribution and proportion of bypass flow		
旁流类型	流量/($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	占总流量比例/%
卸料管旁流	1.49	3.87
控制棒通道旁流	0.37	0.95
窄缝旁流	9.41	24.43

3 结 论

本文针对华能集团自主研发的球床式高温气冷堆 HN-750,基于分区建模思想建立了反应堆的近真实三维几何模型,模型中包含了窄缝、顶反射层、堆芯球床、底反射层及底部球腔等结构,利用 ANASYS FLUENT 商业软件对满功率运行的 HN-750 高温气冷堆中的流动传热特性进行了大规模数值模拟,并对卸料管、控制棒通道及窄缝中旁流进行了分析研究,可得如下主要结论。

(1)进入各冷氦流道的氦气入口速度均匀分布,堆芯截面流速较低,底反射层的混流结构使得局部氦气流速增加,流体温度分布更加均匀,最终汇聚在热氦联箱底部后流出压力容器,出口速度较大。

(2)有一部分氦气从堆芯上部流入窄缝,在堆芯下部又重新流入堆芯,窄缝旁流流向变化的转折点离堆芯出口 4.4 m。

(3)总旁流占氦气总流量的 29.25 %,其中窄缝旁流占 24.43 %、卸料管旁流占 3.87 %,控制棒通道旁流占 0.95 %。

参考文献:

[1] 张浩,王建建. 模块式高温气冷堆的技术背景及展望 [J]. 中国核电, 2021, 14(3): 419-422.
ZHANG Hao, WANG Jianjian. The technical base and development prospects of the modular high tem-

- perature gas cooled reactor [J]. *China Nuclear Power*, 2021, 14(3): 419-422.
- [2] 张成龙, 袁媛, 刘国明, 等. 棱柱式超级安全气冷堆堆芯物理特性研究 [J]. *原子能科学技术*, 2023, 57(1): 156-164.
- ZHANG Chenglong, YUAN Yuan, LIU Guoming, et al. Research on core physical characteristics of prismatic super-safe gas-cooled reactor [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2023, 57(1): 156-164.
- [3] 吴宗鑫, 张作义. 世界核电发展趋势与高温气冷堆 [J]. *核科学与工程*, 2000, 20(3): 211-219.
- WU Zongxin, ZHANG Zuoyi. World development of nuclear power system and high temperature gas-cooled reactor [J]. *Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering*, 2000, 20(3): 211-219.
- [4] XU Yuanhui, ZUO Kaifen. Overview of the 10 MW high temperature gas cooled reactor: test module project [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2002, 218(1/2/3): 13-23.
- [5] ZHANG Zuoyi, WU Zongxin, WANG Dazhong, et al. Current status and technical description of Chinese $2 \times 250 \text{ MW}_{\text{th}}$ HTR-PM demonstration plant [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2009, 239(7): 1212-1219.
- [6] ZHENG Yanhua, CHEN Fubing, SHI Lei. Analysis of bypass effect on a 250 MW high temperature gas-cooled reactor [C]//2014 22nd International Conference on Nuclear Engineering. New York, NY, USA: ASME, 2014: V003T06A002.
- [7] SMITH B L. Assessment of CFD codes used in nuclear reactor safety simulations [J]. *Nuclear Engineering and Technology*, 2010, 42(4): 339-364.
- [8] 李林森, 王侃, 宋小明. CFD在核能系统分析中应用的最新进展 [J]. *核动力工程*, 2009, 30(S1): 28-33.
- LI Linsen, WANG Kan, SONG Xiaoming. International research progress of CFD application in analysis of nuclear power system [J]. *Nuclear Power Engineering*, 2009, 30(S1): 28-33.
- [9] SUN Ximing, CHEN Zhipeng, SUN Jun, et al. CFD investigation of bypass flow in HTR-PM [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2018, 329: 147-155.
- [10] 宋士雄, 魏泉, 蔡翔舟, 等. 基于CFD方法的球床式高温气冷堆稳态热工水力分析 [J]. *核技术*, 2013, 36(12): 39-45.
- SONG Shixiong, WEI Quan, CAI Xiangzhou, et al. High temperature gas-cooled pebble bed reactor steady state thermal-hydraulics analyses based on CFD method [J]. *Nuclear Techniques*, 2013, 36(12): 39-45.
- [11] 孙世妍, 张佑杰, 郑艳华, 等. 高温气冷堆热工分析模型改进与堆芯温度场分析 [J]. *原子能科学技术*, 2021, 55(8): 1376-1385.
- SUN Shiyan, ZHANG Youjie, ZHENG Yanhua, et al. Improvement of thermal hydraulic model and analysis of core temperature distribution of high temperature gas-cooled reactor [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2021, 55(8): 1376-1385.
- [12] 彭浩然, 孙俊. 高温气冷堆堆芯球床的流动与换热分析 [J]. *工程热物理学报*, 2016, 37(5): 1076-1083.
- PENG Haoran, SUN Jun. Investigation of flow and heat transfer in the pebble bed of the high temperature gas-cooled reactor [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2016, 37(5): 1076-1083.
- [13] 孙世妍, 张佑杰, 郑艳华, 等. HTR-10超高温运行堆芯温度场分析 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2021, 61(11): 1301-1307.
- SUN Shiyan, ZHANG Youjie, ZHENG Yanhua, et al. Core temperature distributions in HTR-10 operating at very high temperatures [J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 2021, 61(11): 1301-1307.
- [14] 张双宝, 李良星, 谢伟, 等. 球床式高温气冷堆堆芯三维建模及稳态热工水力分析 [J]. *中国科学院大学学报*, 2020, 37(2): 186-191.
- ZHANG Shuangbao, LI Liangxing, XIE Wei, et al. Three-dimensional modeling of pebble bed type high temperature gas-cooled reactor core and steady-state thermal hydraulic analysis [J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2020, 37(2): 186-191.
- [15] Nuclear Safety Standards Commission. Reactor core design of high-temperature gas-cooled reactors: part 2 heat transfer in spherical fuel elements; KTA 3102.2 [S]. Salzgitter, Germany: Nuclear Safety Standards Commission, 1983.
- [16] Nuclear Safety Standards Commission. Reactor core design of high-temperature gas-cooled reactors: part 3 loss of pressure through friction in pebble bed cores; KTA 3102.3 [S]. Salzgitter, Germany: Nuclear Safety Standards Commission, 1981.
- [17] BECKER S, LAURIEN E. Three-dimensional numerical simulation of flow and heat transport in high-temperature nuclear reactors [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2003, 222(2/3): 189-201.
- [18] 郝琛, 李富, 郭炯. 球床式高温气冷堆球流混流的模拟 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2014, 54(5): 624-628.

HAO Chen, LI Fu, GUO Jiong. Simulations of mixing in the pebble flow of a pebble bed HTR [J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2014, 54(5): 624-628.

[19] GAO Zuying, SHI Lei. Thermal hydraulic calculation of the HTR-10 for the initial and equilibrium core [J]. Nuclear Engineering and Design, 2002, 218 (1/3): 51-64.

[20] Nuclear Safety Standards Commission. Reactor core design for high-temperature gas-cooled reactors; part 1 calculation of the material properties of helium; KTA 3102.1 [S]. Salzgitter, Germany; Nuclear Safety Standards Commission, 1978.

[21] RUAN Bo, MENG Hua. Supercritical heat transfer of cryogenic-propellant methane in rectangular engine cooling channels [J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2012, 26(2): 313-321.

[22] 彭浩然, 孙俊. 高温气冷堆堆芯球床的流动与换热分析 [J]. 工程热物理学报, 2016, 37(5): 1076-1083.

PENG Haoran, SUN Jun. Investigation of flow and heat transfer in the pebble bed of the high temperature gas-cooled reactor [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2016, 37(5): 1076-1083.

[23] VAN WYK M. Verification of leakage through the side reflector graphite of the PBMR reactor [D]. Vanderbijlpark, The Republic of South Africa; North-West University, 2004.

[24] RÜTTEN H J, HAAS K A, BROCKMANN H, et al. V. S. O. P. (99/09) computer code system for reactor physics and fuel cycle simulation [M]. Giessen, Germany; Institut für Energieforschung, 2009.

[25] CHEN Fubing, HAN Zihao. Steady-state thermal fluids analysis for the HTR-PM equilibrium core [J]. International Journal of Advanced Nuclear Reactor Design and Technology, 2021, 3: 11-17.

(编辑 赵炜)