

流化床反应器内热动力特性的数值模拟

李锦时¹, 孙巧群¹, 王 猛¹, 朱卫兵¹, 陆慧林²

(1. 哈尔滨工程大学 航天与建筑工程学院, 150001 哈尔滨; 2. 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 150001 哈尔滨)

摘要: 为了深入研究流化床反应器内温度分布特性, 基于分群扩散理论方法, 应用中子输运模型、耦合气固传热模型以及气固双流体模型, 数值模拟流化床核反应器内气固流动和热动力特性, 研究流化床核反应器内入口氦气流量和燃料堆积床高对反应器内温度分布的影响. 研究表明, 流化床核反应器内气相温度分布比较均匀; 随着入口氦气流量的增加, 反应器内环形区域和中心区域内气相温度脉动增强; 反应器内气相温度随着燃料堆积床高的增加而升高. 数值模拟得到核反应器内气相瞬时温度分布的结果与 Pain 等人数值计算结果相吻合.

关键词: 流化床核反应器; 分群扩散理论; 中子输运模型; 双流体模型; 数值模拟

中图分类号: TK124

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2013)11-0050-06

Simulation of thermodynamics in a fluidized bed reactor

LI Jinshi¹, SUN Qiaoqun¹, WANG Meng¹, ZHU Weibing¹, LU Huilin²

(1. College of Aerospace and Civil Engineering, Harbin Engineering University, 150001 Harbin, China;

2. School of Energy Science Engineering, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China)

Abstract: Thermodynamic properties in a fluidized bed nuclear reactor were simulated by means of two-fluid model coupled heat conduction model. Neutron transport equation was used based on group diffusion method. The effect of velocity of inlet coolant and different packing height on the temperature distribution was studied. Results showed that the gas temperature was uniform in a fluidized bed nuclear reactor. The temperature fluctuation strengthened with the velocity of inlet coolant in the annular and center zones, and the gas temperature was raised with the increase of packing height. The simulation result of instantaneous gas temperature was in an agreement with the calculation results of Pain et al.

Key words: fluidized bed nuclear reactor; group diffusion method; neutron transport model; two-fluid model; numerical simulation

近年来, 基于气相流化铀核燃料颗粒的流化床核反应器引起了极大的关注, 原因在于流化床具有很好的混合能力和传热特性^[1]. 由于在流化过程中流体和颗粒之间混合均匀, 提高了气固接触效率从而增加了传热能力, 床层内的温度分布比较均匀^[2-3]. 流化床核反应器内燃料颗粒流体系统存在非线性、流域多态性, 这些特性影响反应器的燃料颗粒的裂变反应率和温度分布等特性. 国内外一些学者对此进行了相关研究,

Lathouwers 等^[4]采用点堆动力学模型数值模拟研究了流化床核反应器的动力学特性, Sefidvash 等^[5]研究了流化床核反应器内燃料颗粒的属性和粒径变化对反应器动力特性稳定性的影响. De Oliveira^[6]等和 Pain^[7-8]等采用中子动力学耦合多相流流动研究的方法研究了反应器内复杂的非线性反应特性和缓发中子浓度分布对气相温度分布和反应器能量输出特性的影响, Gomes^[9]和 Miles 等^[10-11]研究了流态化高温气冷堆内核临界特性以及钚燃料颗粒反应器的运行稳定性和功率波动幅度特性. 而有关流化床反应器内入口冷却剂流速和燃料颗粒堆积床高对反应器内温度分布特性的影响研究很少.

本文耦合气固传热模型以及气固双流体模

收稿日期: 2012-10-25.

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助(HEUCFI30206).

作者简介: 李锦时(1972—)男, 博士研究生;

朱卫兵(1961—)男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 孙巧群, yasqq@163.com.

型,应用分群扩散理论方法建立了中子输运模型,数值模拟流化床核反应器内气固流动特性和温度分布特性. 研究分析了不同的入口冷却剂速度、燃料颗粒堆积床高等参数对流化床核反应器内温度分布特性的影响. 从而为预测流化床核反应器内气固两相流动、传热过程和能量输出特性等提供理论依据.

1 数学模型

流化床核反应器内流体动力学模型满足质量守恒、动量守恒和能量守恒原理. 同时为了简化流化床核反应器内气体和颗粒流动计算,假设燃料颗粒为球形,直径为常数^[12-13].

1.1 连续方程和动量方程

连续性方程可以表示为 ($i = g$ 时为气体, $i = s$ 时为颗粒相)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_i \varepsilon_i) + \nabla \cdot (\rho_i \varepsilon_i \mathbf{u}_i) = 0.$$

其中: ρ_i 为 i 相密度, ε_i 为 i 相体积浓度, \mathbf{u}_i 为 i 相速度.

气相动量守恒方程需要考虑气体与燃料球颗粒之间的相互作用,可表示为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_g \rho_g \mathbf{u}_g) + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g \mathbf{u}_g \mathbf{u}_g) = -\varepsilon_g \nabla p + \varepsilon_g \rho_g \mathbf{g} + \beta(\mathbf{u}_s - \mathbf{u}_g) + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_g.$$

式中: \mathbf{g} 为重力加速度, p 为气相压力, β 为气固两相间的曳力系数, μ_g 为气相动力黏度, $\boldsymbol{\tau}_g$ 为气相应力张量, $\boldsymbol{\tau}_g = \mu_g [\nabla \mathbf{u}_g + (\nabla \mathbf{u}_g)^T] - \frac{2}{3} \mu_g (\nabla \cdot \mathbf{u}_g) \mathbf{I}$.

同理,颗粒相动量守恒方程除了需要考虑气体与颗粒之间的相互作用外,还需要考虑颗粒相互碰撞产生的作用力:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_s \rho_s \mathbf{u}_s) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s \mathbf{u}_s \mathbf{u}_s) = -\varepsilon_s \nabla p + \beta(\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_s) + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_s + \varepsilon_s \rho_s \mathbf{g}.$$

式中: $\boldsymbol{\tau}_s$ 为固相应力张量,由颗粒动力学方法固相应力可表示为

$$\boldsymbol{\tau}_s = (-p_s + \lambda_s \nabla \cdot \mathbf{u}_s) \mathbf{I} + 2\mu_s \mathbf{S} \left\{ [\nabla \mathbf{u}_s + (\nabla \mathbf{u}_s)^T] - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{u}_s) \mathbf{I} \right\}.$$

式中: p_s 为颗粒相压力, λ_s 为颗粒相表观黏度, μ_s 为颗粒相动力黏度, p_s 和 μ_s 由动力-摩擦应力模型确定,它们分别为

$$p_s = \varepsilon_s \rho_s \left[1 + 2(1+e) \varepsilon_s g_0 \right] \Theta + Fr \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_{s,\min})^n \sin \phi}{(\varepsilon_{s,\max} - \varepsilon_s)^p},$$

$$\lambda_s = \frac{4}{3} \varepsilon_s \rho_s d_s g_0 (1+e) \sqrt{\frac{\Theta}{\pi}},$$

$$\mu_s = \frac{4}{5} \varepsilon_s^2 \rho_s d_s g_0 (1+e) \sqrt{\frac{\Theta}{\pi}} + \frac{10 \rho_s d_s \sqrt{\Theta \pi}}{96(1+e) g_0} \left[1 + \frac{4}{5} \varepsilon_s (1+e) g_0 \right]^2 + Fr \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_{s,\min})^n \sin \phi}{(\varepsilon_{s,\max} - \varepsilon_s)^p \sqrt{I_{2D}}}.$$

式中: $\varepsilon_{s,\max}$ 和 $\varepsilon_{s,\min}$ 分别为填充颗粒浓度和临界颗粒浓度; Θ 为颗粒温度, $\Theta = u'^2/3$; u' 为颗粒的脉动速度; n 、 p 和 Fr 为与颗粒材料物性有关的经验系数; ϕ 为内摩擦角. 对于玻璃珠,颗粒参数 n 、 p 、 ϕ 和 Fr 分别为 2.0、5.0、28.5° 和 0.05, I_{2D} 为应变率张量第二不变偏量.

颗粒温度 Θ 可按固相脉动能守恒方程确定:

$$\frac{3}{2} \left[\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_s \rho_s \Theta) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s \Theta \mathbf{u}_s) \right] = (-\nabla p_s \mathbf{I} + \boldsymbol{\tau}_s) : \nabla \mathbf{u}_s + \nabla \cdot (k_s \nabla \Theta) q_s - \gamma_s + \phi_s.$$

式中: \mathbf{I} 为单位向量, k_s 为颗粒相热传导系数, γ_s 为颗粒脉动能耗散率, ϕ_s 为气体与颗粒间脉动能交换,它们分别为

$$\gamma_s = 3(1-e^2) \varepsilon_s^2 \rho_s g_0 \Theta \left(\frac{4}{d_s} \sqrt{\frac{\Theta}{\pi}} - \nabla \cdot \mathbf{u}_s \right),$$

$$\phi_s = -3\beta\Theta,$$

$$k_s = \frac{75 \rho_s d_s \sqrt{\pi \Theta}}{192(1+e) g_0} \left[1 + \frac{6}{5} (1+e) g_0 \varepsilon_s \right]^2 +$$

$$2\varepsilon_s^2 \rho_s (1+e) \sqrt{\frac{\Theta}{\pi}}.$$

其中, d_s 为颗粒直径, g_0 为颗粒径向分布函数,

$$g_0 = \frac{3}{5} \left[1 - \left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{s,\max}} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{-1}.$$

1.2 相间动量交换

相间动量交换系数 β 表达式为^[14]

$$\beta = \begin{cases} 150 \frac{\varepsilon_s^2 \mu}{\varepsilon_g d_s} + 1.75 \varepsilon_s \frac{\rho_g}{d_s} |u_g - u_s|, & \varepsilon_g \leq 0.8; \\ \frac{3}{4} C_D \frac{\varepsilon_s \rho_g |u_g - u_s|}{d_s} \varepsilon_g^{-2.65}, & \varepsilon_g > 0.8. \end{cases}$$

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}), & Re \leq 1000; \\ 0.44, & Re > 1000. \end{cases}$$

其中: Re 为颗粒雷诺数, $Re = \varepsilon_g \rho_g d_s |u_g - u_s| / \mu$.

1.3 中子输运方程

核反应堆内所发生的各种核反应率,也就是堆内物理过程及反应堆的许多工程方面的基本特性都取决于中子群体的分布. 为了确定反应堆内的中子分布,必须研究中子的输运过程,即中子在堆内的运动,这一点可由求解中子输运方程得到解决^[15]. 由于要精确地求解此方程比较困难和复

杂,在实际应用中做了一些假设^[16],可以得到与能量有关的中子扩散方程为

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \phi}{\partial t} - \nabla D(r, E) \cdot \nabla \phi + \sum_{\Gamma} \Sigma_{\Gamma}(r, E) \phi(r, E, \Omega, t) = \int_0^{\infty} \sum_s (E' \rightarrow E) \phi(r, E', t) dE' + \chi(E) \int_0^{\infty} \nu(E') \sum_{\Gamma} (E') \phi(r, E', t) dE' + S.$$

式中: v 为中子速率, ϕ 为中子注量率, D 为扩散系数, \sum_{Γ} 为总截面, $\int_0^{\infty} \sum_s (E' \rightarrow E) \phi(r, E', t) dE'$ 为散射项, $\chi(E) \int_0^{\infty} \nu(E') \sum_{\Gamma} (E') \phi(r, E', t) dE'$ 为裂变源项, S 为能量项. 在流化床核反应器内, 氦气与核燃料颗粒的相互作用使得床内颗粒混合迅速, 中子通量沿床径向和轴向不均匀分布的影响较小, 燃料放热量主要取决于颗粒浓度. 为简化计算, 取流化床核反应堆内燃料反应热量 $Q(r, z) = \varepsilon(s) Q_{\max}$, Q_{\max} 为堆芯区中心处单位体积的燃料反应热.

1.4 传热模型

反应器中的流动和传热过程是流动、传热及传质各种过程相互作用的结果, 使详细求解微观上的流动、传热过程非常复杂; 因此对反应器中的对流换热进行数值模拟时简化了其中的诸多因素和过程. 可以得到在欧拉-欧拉双流体模型中的气相和固相能量方程表达式为^[15]

$$\begin{aligned} c_{p,g} \varepsilon_g \rho_g \frac{DT_g}{Dt} &= -p_g \nabla \cdot (\varepsilon_g \mathbf{u}_g) + \nabla \cdot (\varepsilon_g \lambda_g \nabla T_g) + h_{gs} (T_s - T_g) + \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_g^4), \\ \varepsilon_s \rho_s c_{p,s} \frac{DT_s}{Dt} &= -\nabla \cdot (\varepsilon_s \lambda_s \nabla T_s) + h_{gs} (T_g - T_s) + \varepsilon \sigma (T_g^4 - T_s^4) + Q. \end{aligned}$$

式中: 下标 g, s 分别表示气相和颗粒相, T_g, T_s 分别表示气相和颗粒相的温度, λ_g, λ_s 分别表示气相和颗粒相的有效热传导系数, Q 为反应产生的裂变热源, ε 为核燃料颗粒的发射率; σ 为玻尔兹曼常数; h_{gs} 是气相和颗粒之间的对流换热系数. 当计算区域的 $Re < 10^5$ 时, Nu 可表示为^[17]

$$Nu = (7 - 10\varepsilon_g + 5\varepsilon_g^2) (1 + 0.7Re_s^{0.2} Pr^{1/3}) + (1.33 - 2.4\varepsilon_g + 1.2\varepsilon_g^2) Re_s^{0.2} Pr^{1/3}.$$

其中流体和颗粒相的热传导率为^[15] 为

$$\varepsilon_g \lambda_g = (1 - \sqrt{1 - \varepsilon_g}) \lambda_{gas},$$

$$\varepsilon_s \lambda_s = \varepsilon_s \rho_s c_{p,s} d_s \frac{\sqrt{\pi^3 \Theta}}{32g_0}, \quad g_0 = \frac{16 - 7\varepsilon_s}{16(1 - \varepsilon_s)^2}.$$

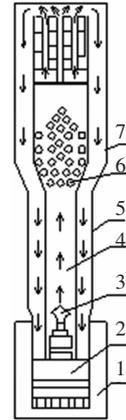
氦气的比热容值基本不受压力和温度的影响, 其中黏度和热传导率采用计算公式 $\mu_g =$

$3.5953 \times 10^{-7} T_g^{0.687}$ 和 $\lambda_g = 2.774 \times 10^{-3} T_g^{0.701}$. 忽略包覆碳化硅等涂层的影响, 可得燃料颗粒的比热容计算公式为

$$m_p c_{p,s} = m_{UO_2} c_{p,UO_2} + m_c c_{p,c}.$$

2 模拟结果和分析

图1表示流化床核反应器内流体流动的结构示意图. 反应堆堆芯内存储一定量的核燃料球颗粒, 氦气作为冷却剂. 在反应器正常运行时, 流化床核反应器内核燃料颗粒处于流化状态. 在流化过程中中子与裂变核燃料作用释放能量, 冷却流体与燃料颗粒之间发生传热, 形成高温气体, 最后由反应器顶部送出. 当系统停止时, 流化床内核燃料颗粒由于重力的作用离开反应堆芯落回燃料室.



1—支撑结构; 2—压气机; 3—进口; 4—燃料室流化床; 5—壳体; 6—反应堆芯; 7—环型通道

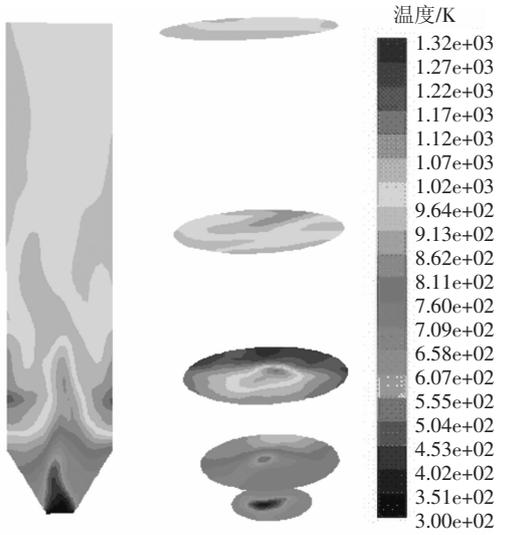
图1 流化床核反应器堆芯结构图

采用三维柱坐标模拟, 流化床核反应器的结构为圆截面管, 柱体直径为 1.25 m, 床高 9.4 m, 床体倾斜角为 60°. 模拟计算在计算域的矩形网格内进行, 流化床核反应器的运行压力为 6 MPa. 模拟计算时的冷却氦气密度为 0.162 5 kg/m³, 核燃料颗粒的直径和颗粒密度分别为 25 mm 和 1 920 kg/m³. 模拟计算时, 在入口处给定氦气温度为 300 K. 在壁面处设置为绝热条件, 即 $q_w = 0$.

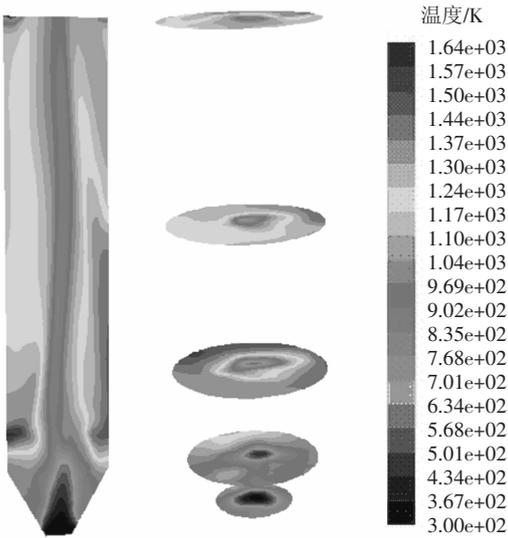
由计算条件可得到床内燃料颗粒数为 223 063, 取燃料铀的利用率为 1%, 包覆颗粒的核心直径为 230 μm, 每个燃料颗粒含有的包覆颗粒数量分别为 9 869^[18], 对应的反应堆热功率为 10 MW. 由此可以得到对应的燃料颗粒反应热量 300×10^4 W/m³.

图2表示核燃料颗粒直径 25.0 mm、入口冷却流体氦气的射流速度分别为 12 m/s 和 25 m/s, 燃料堆积床高分别为 3.0 m、3.5 m 时, 中心截面和不同高度位置时的床内气相温度分布图. 由图可知, 在接近入口处中心射流区域内参与释放热

量的颗粒浓度较低,因此气相温度较低,在高浓度核燃料颗粒区域内气相温度较高. 随着入口流化气流量的增加,由于环形区内的大部分颗粒被流化,引起床层膨胀高度增加. 沿截面颗粒浓度分布中心为稀相区,两侧环形区为稠密区. 反应器内两侧环形区域内的气相温度高于中心区域值. 同时由于反应器内的燃料堆积床高增加,释放热源的颗粒浓度升高,引起反应器内的气相温度升高.



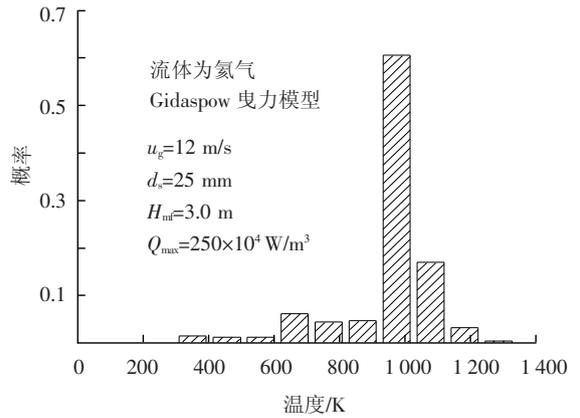
(a) $u_g = 12 \text{ m/s}$, $Q_{\max} = 250 \times 10^4 \text{ W/m}^3$



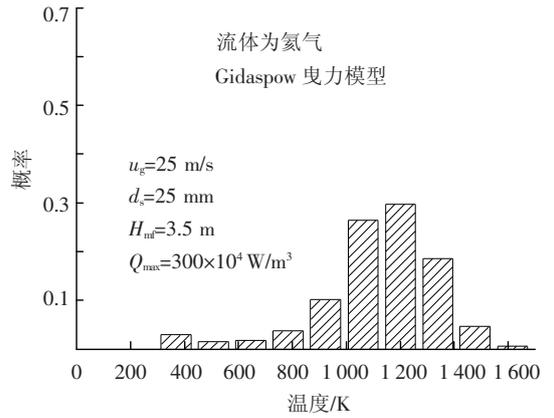
(b) $u_g = 25 \text{ m/s}$, $Q_{\max} = 300 \times 10^4 \text{ W/m}^3$

图 2 不同冷却流体速度时反应器内气相温度分布

图 3 表示反应器内气相温度的概率分布图. 在入口冷却流体氦气的不同射流速度时,反应器内气相温度概率分布分别出现了峰值. 随着反应器内的核燃料堆积床高增加,气相可吸收的热量增加,反应器内出现高温的概率增加. 图 4 表示反应器内两侧环形区域和中心区域瞬时气相温度随时间的变化. 在反应器内不同位置的瞬时气相温度分布脉动是不同的. 随着入口氦气流量的增加反应器内气相温度脉动增强.

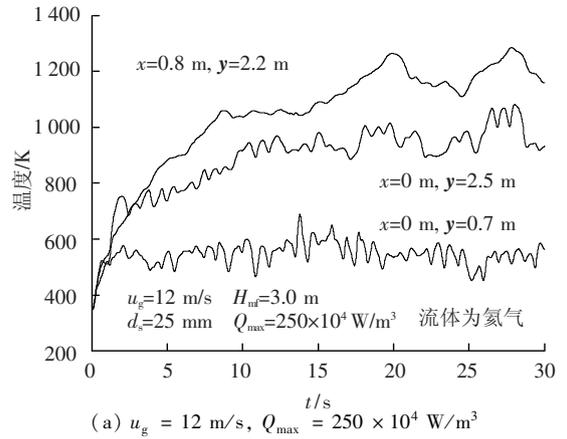


(a) $u_g = 12 \text{ m/s}$, $Q_{\max} = 250 \times 10^4 \text{ W/m}^3$

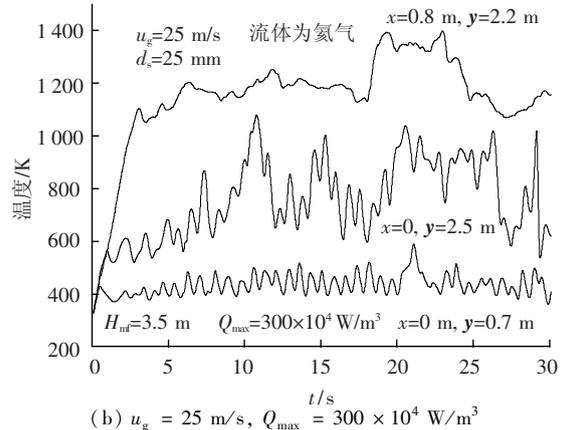


(b) $u_g = 25 \text{ m/s}$, $Q_{\max} = 300 \times 10^4 \text{ W/m}^3$

图 3 不同冷却流体速度时反应器内颗粒浓度和气相温度概率分布



(a) $u_g = 12 \text{ m/s}$, $Q_{\max} = 250 \times 10^4 \text{ W/m}^3$

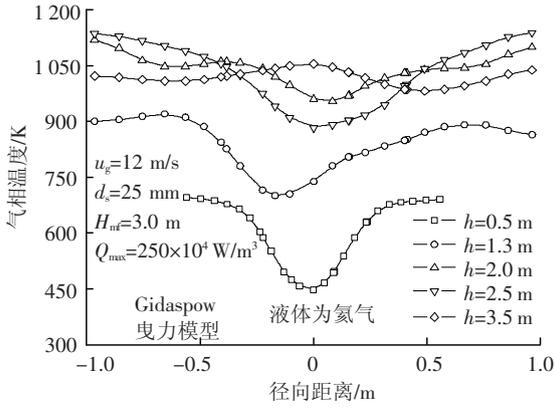


(b) $u_g = 25 \text{ m/s}$, $Q_{\max} = 300 \times 10^4 \text{ W/m}^3$

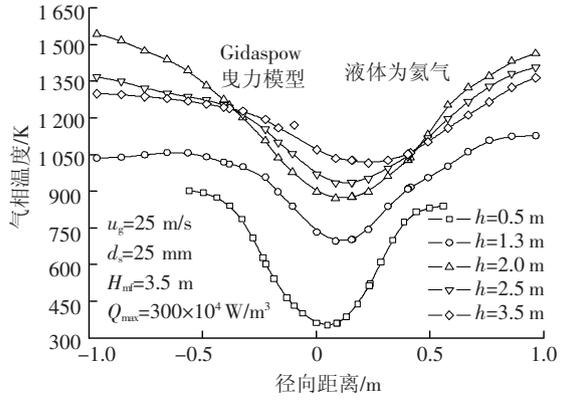
图 4 反应器内瞬时气相温度随时间的变化

图5和图6分别表示反应器内不同床层高度和沿反应器高度方向的气相温度径向和轴向分布. 沿着反应器床层高度的增加方向气相温度上升, 气相温度径向温度分布两侧区域高于中心区

域. 随着入口氦气流量和燃料堆积床高的增加, 气相温度分别在颗粒浓度相对较低的中心区域和颗粒浓度相对较高的环形区域内升高.

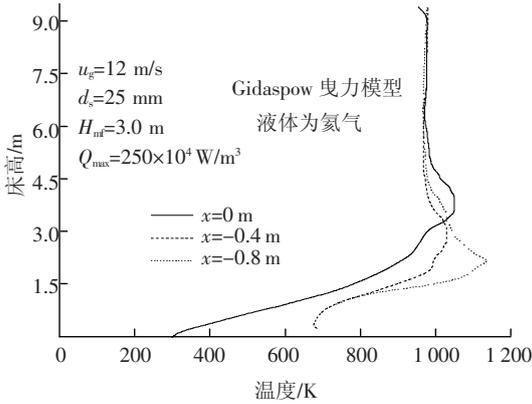


(a) $u_g = 12 \text{ m/s}$, $Q_{\max} = 250 \times 10^4 \text{ W/m}^3$

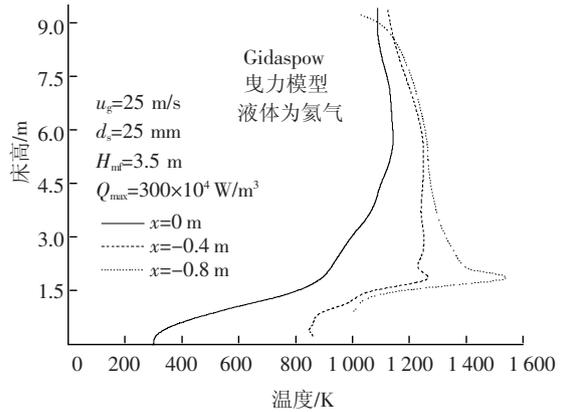


(b) $u_g = 25 \text{ m/s}$, $Q_{\max} = 300 \times 10^4 \text{ W/m}^3$

图5 反应器内时均气相温度的径向分布



(a) $u_g = 12 \text{ m/s}$, $Q_{\max} = 250 \times 10^4 \text{ W/m}^3$



(b) $u_g = 25 \text{ m/s}$, $Q_{\max} = 300 \times 10^4 \text{ W/m}^3$

图6 反应器内时均气相温度沿轴向方向分布

3 数值模拟结果对比

为了与Pain^[8]数值模拟计算结果比较, 采用流化床核反应器的模型计算参数如表2所示. 图7表示采用Pain^[8]等流化床核反应器结构模拟计算得到的瞬时气相温度分布. 得到的模拟结果与已有的计算结果趋势比较接近. 在反应器内不同位置的瞬时气相温度均呈现脉动现象. 在中心区域瞬时气相温度的波动幅度较大、频率较高, 相反在壁面区域气相温度波动相对较小.

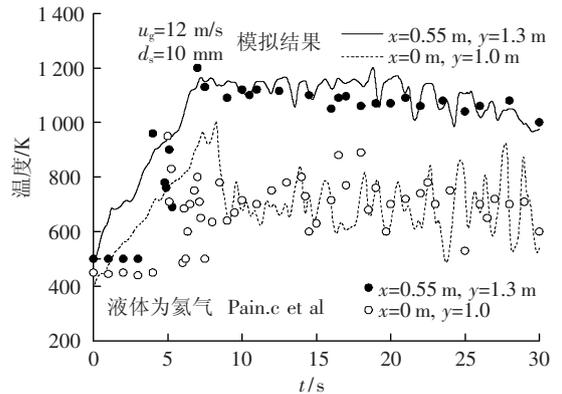


图7 模拟计算与Pain等(2002)计算结果的对比

表2 模拟计算参数

方法	颗粒密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	颗粒直径/ mm	气相密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	最大固相 容积份额	核反应器 压力/MPa	核反应器 初始温度/ $^{\circ}\text{C}$	入口速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	床体直径/ mm	堆积床高/ mm
文献数值	1 920	10	0.162 5	0.62	6	230	12	1 250	1 360
本文计算值	1 920	10	0.162 5	0.62	6	230	12	1 250	1 360

4 结 论

1) 模拟计算得到了反应器内瞬时温度和时均颗粒浓度、温度的分布情况。核反应器内气相瞬时温度分布与已有的相关数值计算结果分布趋势比较接近。

2) 随着入口氦气流量的增加, 环形区域和中心区域内的气相温度脉动增强, 引起高颗粒浓度的环形区域内气相温度较高。

3) 流化床核反应器内核燃料颗粒的不同堆积床高对时均核燃料颗粒浓度分布和反应器内温度分布特性的影响分析表明, 增加燃料堆积床高时, 核反应器内的气相温度分布升高。

参 考 文 献

- [1] MOLERUS O, BURSCHKA A, DIETZ S, *et al.* Particle migration at solid surfaces and heat transfer in bubbling fluidized beds: particle migration measurement systems [J]. *Chemical Engineering Science*, 1995, 50(5): 871–877.
- [2] MOLERUS O, BURSCHKA A, DIETZ S, *et al.* Particle migration at solid surfaces and heat transfer in bubbling fluidized beds: prediction of heat transfer in bubbling fluidized beds [J]. *Chemical Engineering Science*, 1995, 50(5): 879–885.
- [3] WANG S Y, LI X, LU H L, *et al.* Simulations of flow behavior of fuel particles in a conceptual helium-cooled spout fluidized bed nuclear reactor [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2009, 239(1): 106–115.
- [4] LATHOUWERS A, AGUNG A. Dynamics modeling and stability analysis of a fluidized bed nuclear reactor [J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2003, 43(1/2/3/4): 437–443.
- [5] SEFIDVASH F. Status of the small modular fluidized bed light water nuclear reactor concept [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1996, 167(2/3): 203–214.
- [6] DE OLIVEIRA C R. An arbitrary geometry finite element method for multigroup neutron transport with anisotropic [J]. *Progress in Nuclear Energy*, 1986, 18(1/2): 227–236.
- [7] PAIN C C, DE OLIVEIRA C R, GODDARD A J H, *et al.* Non-linear space-dependent kinetics for criticality assessment of fissile solutions [J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2001, 39(1): 53–114.
- [8] PAIN C C, GOMES J L, EATON M D, *et al.* Space-dependent kinetics simulation of a gas-cooled fluidized bed nuclear reactor [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2002, 219(3): 225–245.
- [9] GOMES J L, PAIN C C, EATON M D, *et al.* Investigation of nuclear criticality within a powder using coupled neutronics and thermofluids [J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2008, 35(11): 2073–2092.
- [10] MILES B E, PAIN C C, GOMES J L, *et al.* Simulation of a gas-cooled fluidized bed nuclear reactor. Part I: Mixed oxide fuels [J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2010, 37(7): 999–1013.
- [11] MILES B E, PAIN C C, GOMES J L, *et al.* Simulation of a gas-cooled fluidized bed nuclear reactor — Part II: Stability of a fluidized bed reactor with mixed oxide fuels [J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2010, 37(7): 1014–1025.
- [12] 孙巧群, 朱卫兵, 朱润孺, 等. 喷动床反应器内流体动力特性的数值模拟 [J]. *节能技术*, 2011, 29(1): 35–41.
- [13] 孙巧群, 高建民, 朱卫兵, 等. 流化床反应器内气固两相流动特性的研究 [J]. *热能动力工程*, 2010, 25(6): 621–626.
- [14] LU H L, GIDASPOW D, BOUILLARD J X, *et al.* Hydrodynamics simulation of gas-solid flow in a riser using kinetic theory of granular flow [J]. *Chemical Engineering Science*, 2003, 95(1): 1–13.
- [15] AGUNG A. Conceptual design of a fluidized bed nuclear reactor [M]. [S. l.]: Delft University Press, 2007.
- [16] 邬国伟, 潘系人. 核反应堆工程设计 [M]. 北京: 原子能出版社, 1997: 53–78.
- [17] YAGHOUB B, SHAHROKH S. CFD modeling of hydrodynamic and heat transfer in fluidized bed [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfers*, 2008, 35(3): 357–368.
- [18] 马翔泉. 核能开发与应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 360–367.

(编辑 杨 波)