

规则球床堆熔盐流动压降与对流换热 CFD 模拟

潘 登^{1,2} 余笑寒¹ 邹 杨¹ 鄂彦志^{1,2} 徐 博^{1,2} 周振华^{1,2} 何 杰^{1,2}

1 (中国科学院上海应用物理研究所 嘉定园区 上海 201800)

2 (中国科学院大学 北京 100049)

摘要 球床堆复杂的几何结构导致直接建模进行热工水力模拟非常困难, 一般使用多孔介质模型简化处理, 但多孔介质已有的压降和对流换热公式在熔盐冷却球床中的有效性仍待验证。本文基于固态燃料熔盐堆建立了 6 cm 直径小球的规则球床模型, 给定球床进口熔盐流量和球壳发热功率, 模拟了球床内的稳态流动与换热, 计算了对应的压降和对流换热系数, 并分别得到了球床压降、对流换热 Nu 随球床内流动 Re 变化的曲线。对比发现: 模拟压降结果与已有公式差异较大, 而模拟对流换热 Nu 结果与已有公式的差异相对较小。结合模拟结果和已有的公式, 拟合得到了修正的压降和对流换热 Nu 公式。将修正公式应用于 3 cm 直径规则球床中, 结果表明多孔介质修正模型与直接模拟结果一致。

关键词 球床堆, 熔盐堆, 计算流体动力学模拟, 多孔介质

中图分类号 TL334

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.080604

CFD-simulation of structured packed beds molten salt reactors on pressure drop and heat transfer

PAN Deng^{1,2} YU Xiaohan¹ ZOU Yang¹ E Yanzhi^{1,2} XU Bo^{1,2} ZHOU Zhenhua^{1,2} HE Jie^{1,2}

1(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Jiading Campus, Shanghai 201800, China)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Background: The computational fluid dynamics (CFD) simulation of thermal-hydraulic characters is essential to ensure the safety in designing and operating a nuclear reactor. To obtain reliable results, a suitable model must be chosen. For the pebble bed reactors, the complex geometries of the core make it difficult to establish a precise model for CFD simulation, especially for the molten salt reactor (MSR)-one of the most hopeful GIV nuclear power system. **Purpose:** This study is aimed to valid the porous media model used in pebble beds thermal-hydraulic simulation, including the Pressure-Drop formula and the Convection-Heat-Transfer formula. **Methods:** The fluent model of an orderly-arranged pebble bed was built, and the SST-turbulence model was chosen to simulate the molten salt flow inside the bed. **Results:** In a large range of fluid Reynolds numbers, the linear pressure drop of the flow was obtained, and also was the Nusselt numbers for convection heat transfer between sphere surface and the salt fluid. **Conclusions:** The data was fitted to format new formulas. For the pressure drop, simulation result much differs in both of the KTA (Kerntechnischer Ausschuss)-formula and the Ergun-equation. However, the Nusselt number from simulation is more close to the KTA-formula and the Wakao-formula. Modification of the traditional formulas is needed obviously, and new formulas fitted from KTA-formula is much more close to the simulation results, both for

中国科学院战略性先导科技专项(No.XDA02001002)资助

第一作者: 潘登, 男, 1989 年出生, 2013 年毕业于哈尔滨工程大学, 现为硕士研究生, 研究方向为熔盐堆热工水力

通信作者: 邹杨, E-mail: zouyang@sinap.ac.cn

Supported by Strategic Pilot Science and Technology Project of Chinese Academy of Sciences (No.XDA02001002)

First author: PAN Deng, male, born in 1989, graduated from Harbin Engineering University in 2013, master student, focusing on thermal-hydraulics of the pebble bed-molten salt reactor

Corresponding author: ZOU Yang, E-mail: zouyang@sinap.ac.cn

收稿日期: 2016-03-03, 修回日期: 2016-04-08

the linear pressure drop and the Nusselt number.

Key words Pebble bed reactor, MSR, CFD simulation, Porous media model

球床堆由于结构复杂不利于几何建模, 因此在计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)模拟中多采用多孔介质来等效球床区域^[1-3]。即将多孔区域视作连续相, 来求解流场和温度场, 并分别使用附加阻力压降公式和对流换热公式修正对应的动量和能量方程^[4]。早期计算多孔介质区域的附加阻力压降主流公式有层流 Darcy 公式和湍流 Ergun 公式, 计算对流换热 Nu 主要使用 Wakao 公式^[4-7]。为了验证这些已有公式用于球床堆模拟的有效性, 诸多研究人员进行了大量研究。

目前, 使用了球形燃料的核反应堆主要有气冷堆和固态燃料熔盐堆^[8]。德国研究机构基于其研究开发的氦气冷却的高温堆, 拟合了有别于上述公式的 KTA (Kerntechnischer Ausschuss, 德国研究机构) 压降公式和 KTA 对流换热 Nu 公式^[9-10]。熔盐堆由于缺乏实验数据, 目前还没有统一的计算公式。宋世雄^[8]使用 RNG (Re -Normalization Group, 重整化群) k - ϵ 湍流模型对 3 cm 直径燃料球的氟盐冷却高温堆 (Pebble Bed-Advanced High-Temperature Reactor, PB-AHTR) 进行了 CFD 模拟, 拟合了压降公式和对流换热 Nu 公式。此外, 孟现珂等^[1]根据真实实验得到了水流在毫米级颗粒球床中的压降和对流换热结果, 并拟合了相应的公式。

中国科学院上海应用物理研究所设计了 10 MW 固态燃料熔盐堆 (Thorium Molten Salt Reactor-Solid Fuel V1, TMSR-SF1) 采用 6 cm 直径的固态燃料球随机填充堆芯, 以液态 FLiBe 盐作为堆芯冷却剂^[11-13]。本文将使用 Ansys Fluent14.5 软件基于 TMSR-SF1 建立规则球床模型, 使用 Re 适用范围更宽的 SST-4eq 湍流模型计算熔盐流动的压降和对流换热系数, 以验证上述多孔介质模型的公式在熔盐冷却球床堆中的有效性, 并基于模拟结果对上述公式进行必要的拟合修正, 最后将得到的修正公式用于其它直径小球的球床中验证适用性。

1 研究方法

1.1 多孔介质模型

利用 CFD 研究流动和换热, 当求解域为多孔介质时, 质量、动量和能量守恒方程里的物性参数和物理量是对多孔区域内采用体积平均化处理后的结果。其中最主要的平均化物理量有孔隙率 ϵ 和表观速度 u :

$$u = \dot{m} / (\rho A) \quad (1)$$

式中: $\dot{m}$ 为球床的质量流量, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$; ρ 为熔盐密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; A 为球床垂直流向的截面积, m^2 。

多孔介质模型常用的阻力因子和对流换热 Nu 表达式和压降公式如下:

$$S_{i, \text{KTA}} = - \left(\frac{320}{\left(\frac{Re}{1-\epsilon} \right)} + \frac{6}{\left(\frac{Re}{1-\epsilon} \right)^{0.1}} \right) \frac{1-\epsilon}{\epsilon^3} \frac{1}{d_p} \frac{\rho}{2} |u| u_i \quad (2)$$

$$S_{i, \text{Ergun}} = - \left[150 \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3 d_p^2} \mu u_i + 1.75 \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon^3 d_p} \rho |u| u_i \right] \quad (3)$$

对流换热 Nu 公式为:

$$Nu_{\text{KTA}} = 1.27 \frac{Pr^{1/3}}{\epsilon^{1.18}} Re^{0.36} + 0.033 \frac{Pr^{1/2}}{\epsilon^{1.07}} Re^{0.86} \quad (4)$$

$$Nu_{\text{Wakao}} = 2 + 1.1 Pr^{1/3} Re^{0.6} \quad (5)$$

式中: S_i 为 i 方向附加线性阻力, $\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1}$; u_i 为 i 方向表观流速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; ϵ 为球床孔隙率, $\epsilon = V_{\text{void}} / V_{\text{bed}}$; V_{void} 、 V_{bed} 分别为孔隙体积和球床总体积, m^3 ; d_p 为填充球床的燃料球直径, m ; Re 和 Nu 的特征长度取 d_p ; Re 的特征速度取表观速度 u 。

在 Fluent 程序中, 多孔介质模型主要使用二次方阻力 (Ergun 方程) 或幂律阻力计算附加阻力^[14]。对于能量方程, 采用非平衡模型, 即固相和流体介质间存在温差, 两相间的能量传递由傅立叶冷却公式计算。因此, 阻力系数和对流换热系数都是需要输入的边界条件。

1.2 直接 CFD 球床模型

直接 CFD 模型利用 Fluent 程序建立球床真实的几何模型, 模拟球床中流动与换热, 求解熔盐在规则球床中的压降和对流换热系数, 对上述多孔介质模型公式中的常数系数进行修正, 为球床的等效多孔介质模型提供参考依据。

2 模型建立与计算

在 CFD 模拟中, 对计算结果准确性有直接影响的包括几何建模、网格划分、边界条件、湍流模型和迭代求解器等步骤。

2.1 几何建模与网格划分

本文使用了规则堆积球床模型如图 1 所示，使用 ABACABAC... 的循环排列，改型自面心立方排列（ABCABC... 循环），理论最大填充率约为 74.01%^[4-5]。该排列具有基本对称 cell 的体积较小、且无直通孔的优点。

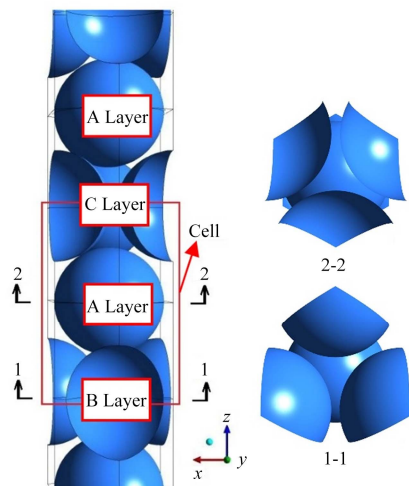


图 1 规则球床模型示意图

Fig.1 Schematic of the pebble bed arranged in order.

由图 1，该模型包括 11 个以 A 层为中心的基本 cell，以消除进出口效应的影响。小球直径 60 mm，球心间距 64 mm，孔隙率 40%，与 TMSR-SF1 堆芯孔隙率一致。对于球间相对位置区域的处理方法有增加球间距、扁平化处理和小圆柱桥接，本研究采用增加球间距的处理方法^[15]。

图 2 为局部网格示意图，经网格无关性验证，网格数量 1.1516×10^7 ，最差网格质量 0.444，相关数据如表 1 所示。

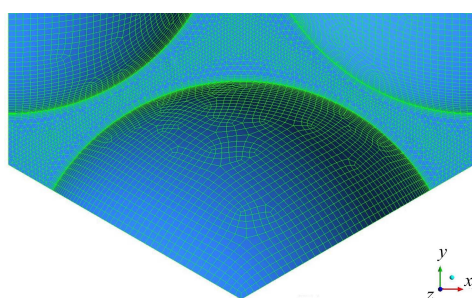


图 2 规则球床球间局部网格示意图

Fig.2 Schematic of the bed grid.

对于 cell 内的平均线性压降，取 cell 上、下截面平均压力的差值作为压差，计算如式(6)：

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{P_1 - P_2}{L} \quad (6)$$

式中： P_1 为 cell 进口压力，Pa； P_2 为 cell 出口压力，Pa； L 为 cell 在流向方向长度，m。

表 1 网格无关性验证相关数据
Table 1 Data of grid-independent verification.

网格数目 Cell number / 10^6	线性压降 Pressure drop / $\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1}$	平均 Nu Nusselt number	Y-Plus 最大值 Max value of Y-Plus
8.52	13 632	509.21	5.3
11.51	11 962	464.86	1.5
14.36	12 100	466.95	1.1

对于 cell 内的平均 Nu 数，计算如式(7)：

$$h = \frac{q}{\bar{T}_w - \bar{T}_f}, \quad Nu = \frac{h \cdot d_p}{\lambda} \quad (7)$$

式中： q 为球壳壁面热流密度， $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ； $\bar{T}_w$ 为 cell 内球壳平均温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $\bar{T}_f$ 为 cell 内流体的平均温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

2.2 边界条件

熔盐物性主要包括密度、粘度、热容和热导率等，参考 TMSR-SF1 设计资料，暂不考虑变物性的影响^[13]。具体参数为：密度 $\rho = 1986 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ；动力粘度 $\mu = 0.00855 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ；定压热容 $c = 2390 \text{ J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ ；热导率 $\lambda = 1.1 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ 。

为简化计算，模型中不考虑球体内部，采用球壳均匀热流密度模型^[16]。为验证改变热边界条件带来的影响，模拟并比较了绕流单球的均匀体热源、球壳均匀热流和球壳恒温，如图 3 所示。

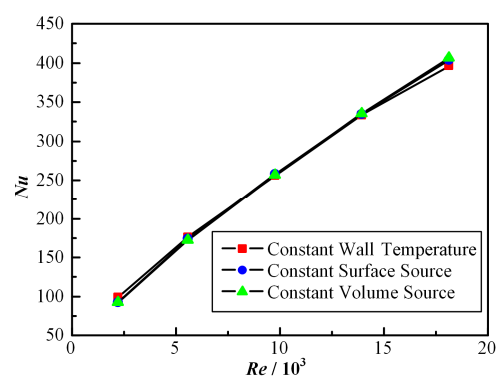


图 3 绕流单球对流换热模拟结果

Fig.3 Simulation result of the flow past single sphere.

由图 3，三种绕流单球的对流换热模拟表明：同等热功率条件下，球壳均匀热流模型与均匀体热源模型得到的对流换热系数相对较接近。

2.3 湍流模型

对于球床模拟的湍流模型, Shams 等^[17-18]针对气冷堆的系列研究指出, 直接模拟(Direct Numerical Simulation, DNS) 优于大涡模拟(Large Eddy Simulation, LES), 此两种模型均可以获得高精度解, 但需要耗费巨大的机时, 而稳态的 SST 模型耗时少, 也能满足计算精度要求, 因此对球床的模拟计算选择 SST 模型。

根据 Fluent 帮助文件, 建议在使用 SST 模型时, 壁面附近的第一层网格 Y-Plus 应小于 8, 小于 1 最佳, 且增长率应小于 1.1^[14]。本文建立的模型在模拟的最大 Re 数 3 500 时, 壁面附近 Y-Plus 最大值为 1.5, 出现在入口区域, 堆芯区域 Y-Plus 均小于 1, 符合计算要求。

3 计算结果

3.1 规则球床氦气流动与换热模拟结果

在进行球床熔盐流动与换热模拟前, 为了验证 CFD 模拟球床流动压降和换热结果的可靠性, 对比了规则球床气体流动实验结果, 表 2 为氦气模拟结果, 作为对比给出了杨剑等^[19]基于 FCC 排列球床空气流动实验数据。

表 2 规则球床氦气模拟结果
Table 2 Result of the CFD simulation on helium.

	CFD 模拟结果	杨剑实验结果 ^[19]	相对误差
	CFD result	YANG result ^[19]	Error
$\Delta P/L$	734.23	1 526.42	-51.90%
$/\text{Pa}\cdot\text{m}^{-1}$	474.00	873.13	-45.71%
	235.56	400.97	-41.25%
Nusselt number	138.81	119.51	-12.03%
	117.21	98.84	-10.19%
	93.68	75.71	-6.31%

由表 2, 压降模拟结果偏差较大, 高达 40%–50%; 而 Nu 偏差较小, 不超过 15%。杨剑^[19]的 CFD 模拟结果表现出与上述类似的偏差, 他将其解释为实验中球间接触排列理论上会增加阻力系数, 但对换热影响不大。综合结果表明, 本研究中 CFD 模型用于球床的压降与换热计算具有可行性。

3.2 规则球床熔盐流动与换热模拟结果

球床熔盐流动与换热模拟选取 Re 范围在 200–3 500, 涵盖了 TMSR-SF1 堆芯所有可能的实际工况。残差维持稳定, 迭代次数在 15 000 次左右。

使用 10 个 CPU 和 1 个 GPU 并行计算, 每个 case 实际耗时约 90 h。

图 4、5 为 $Re=1\ 700$ 时, 第 6 个 cell 的 A 层的中心小球附近的流线和温度场云图。

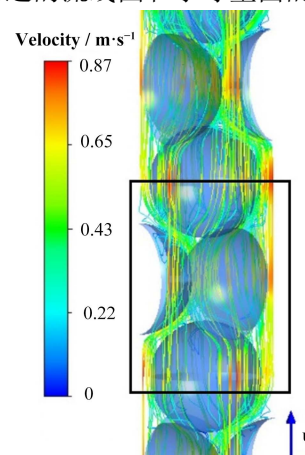


图 4 球床中熔盐流动流线图
Fig.4 Streamline of salt flow in packed bed.

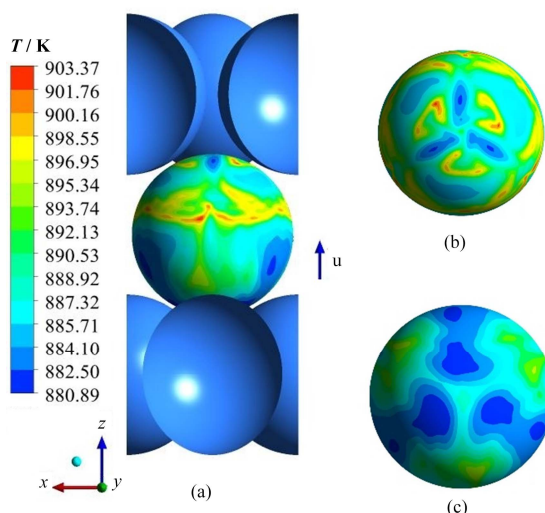


图 5 球面温度云图(a)、远端(b)和近端(c)
Fig.5 Temperature contours of sphere surface (a), rear (b) and front (c).

由图 4, 在 cell 内出现了平直的 z 方向流线, 表明流体在连续两个中心 A 层间的局部通孔出现了直流, 相对于复杂的随机球床, 该现象会降低流动阻力。在两球相对的区域, 流线密集, 颜色加深, 表明熔盐出现加速, 强化了熔盐与球壳的对流换热。但在真实球床中, 相邻小球相切接触, 会存在滞留区导致传热恶化, 这也是 CFD 球床模拟与实际球床的差异。

图 5 中的球壳表面温度场与流体绕流单球的温度场相似, 迎流区以及靠近迎流区的球间狭窄区域温度较低, 而背流区以及靠近背流区的球间狭窄区域出现了局部热点。

图 6 为各单元单位内单位长度的平均压降和各单元内的平均 Nu 数。

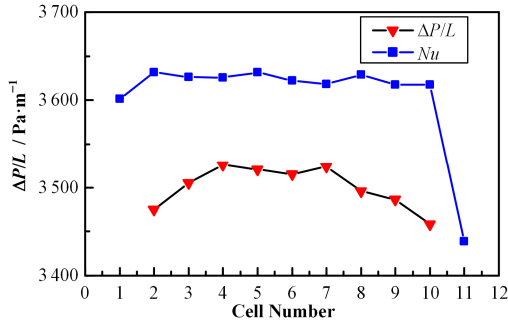


图 6 各 cell 内的线性压降和 Nu 数

Fig.6 Average of linear pressure drop and Nusselt numbers.

图 6 中压降和对流换热 Nu 数明显受进出口效应影响, 去除进、出口附近的各三个单元, 选择 4–7 号 cell 算术平均结果计算得到线性压降和对流换热 Nu 。

3.3 熔盐流动模拟结果与已有公式对比

计算得到的有效段压降曲线和对流换热 Nu 数曲线分别如图 7、8 所示。

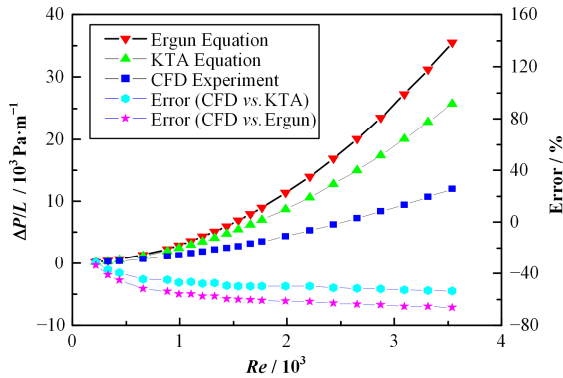


图 7 规则球床中熔盐流动压降模拟结果

Fig.7 Pressure drop of molten salt flow in packed bed.

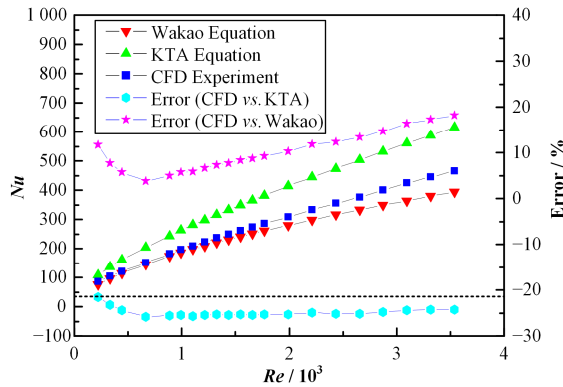


图 8 规则球床中熔盐流动对流换热模拟结果

Fig.8 Convection of molten salt flow in packed bed.

由图 7 可知, 压降计算结果与 Ergun 公式和 KTA 公式相比明显偏小, 且 Re 越大, 偏差越大。其中, 与 Ergun 公式的偏差从 30% 逐渐增加到 60%, 而与 KTA 公式的偏差稳定在 50%。

由图 8, Nu 随 Re 的变化趋势与 Wakao 公式给出的值较吻合, 差异在 10%–20% 之间; 而与 KTA 对流换热公式给出的预测值差异较大, 但基本都维持在 25% 左右。

基于上述模拟结果, 对已有公式进行拟合修正, 压降和对流换热 Nu 都分别得到了两种拟合形式。在拟合压降公式时, 依据已有的文献^[20–21], 对公式进行无量纲化, 针对常数系数进行修正, 分别对 KTA 和 Ergun 压降形式处理:

$$\frac{Re}{1-\varepsilon} \cdot S_{i,KTA} \bigg/ \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \frac{1}{d_p} \frac{\rho}{2} |u| u_i = A + B \cdot \left(\frac{Re}{1-\varepsilon} \right)^{0.9} \quad (8)$$

$$S_{i,Ergun} \bigg/ \frac{\rho u^2}{d_p} = C_1 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{1}{Re} + C_2 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} = B \cdot \frac{1}{Re} + A \quad (9)$$

将式(8)和(9)稍作转换, 拟合求解斜率 B 和截距 A 。 Nu 公式也做类似处理, 得到拟合修正公式(10)–(13)。

KTA 压降修正:

$$\frac{\Delta P_i}{L} = \left(\frac{598.4}{Re} + \frac{2.65}{\left(\frac{Re}{1-\varepsilon} \right)^{0.1}} \right) \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \frac{1}{D} \frac{\rho}{2} |u| u_i \quad (10)$$

Ergun 压降修正:

$$\frac{\Delta P_i}{L} = 436.5 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3 d_p^2} \mu u_i + 0.54 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3 d_p} \rho |u| u_i \quad (11)$$

Wakao 对流换热修正:

$$Nu = 20 + 0.44 Re^{0.73} Pr^{1/3} \quad (12)$$

KTA 对流换热修正:

$$Nu = 0.95 \frac{Pr^{1/3}}{\varepsilon^{1.18}} Re^{0.36} + 0.025 \frac{Pr^{1/2}}{\varepsilon^{1.07}} Re^{0.86} \quad (13)$$

图 9、10 分别为压降和对流换热 Nu 的拟合误差。

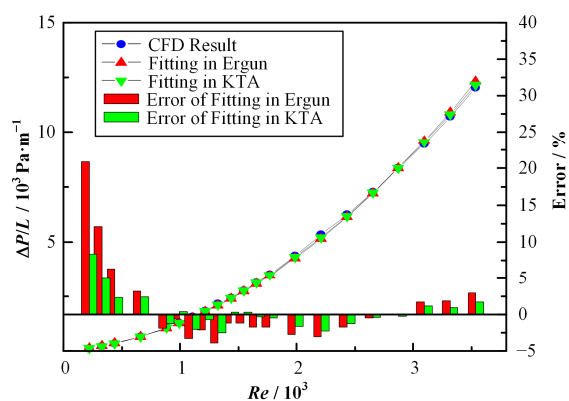


图9 规则球床熔盐流动模拟压降拟合误差
Fig.9 Fitting error of the pressure drop curve for salt flow.

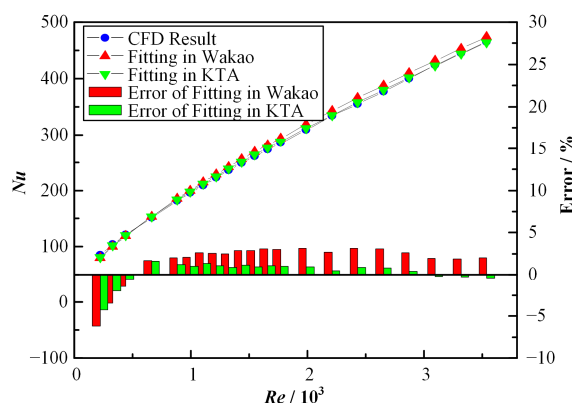


图10 规则球床熔盐对流换热拟合误差
Fig.10 Fitting error of the convention curve for salt flow.

由图9, KTA形式的拟合误差较平稳, 且小于Ergun形式的拟合误差。Ergun和KTA公式等号右边第一项为粘性项, 即由流体的粘性引起的压降; 第二项为惯性项, 主要是由球床几何形状造成的压降。对比拟合公式和原公式均可以发现, 本文拟合得到的公式增加了粘性压降, 而减小了惯性压降。分析原因, 可能是由于熔盐粘度较大, 而规则球床形阻小, 因此, 惯性压降贡献相对减小。

由图10, Wakao修正在低 Re 段拟合误差较大。当 Re 趋于0时, 对流换热 Nu 趋近于一个非零常数, 得到Wakao等诸多学者的实验验证。而另一部分学者则认为 Nu 应随 Re 趋于0, 对流换热公式不应有常数存在, 因为对流产生于流体的宏观运动, 实验中的常数是扩散导致^[7]。

3.4 拟合公式在3cm小球的规则球床适用性验证

在Fluent中模拟计算小球直径30mm时, 熔盐流场的压降与对流换热。图11为30mm直径小球的球床中, 分别使用拟合公式计算得到的结果和模拟结果。

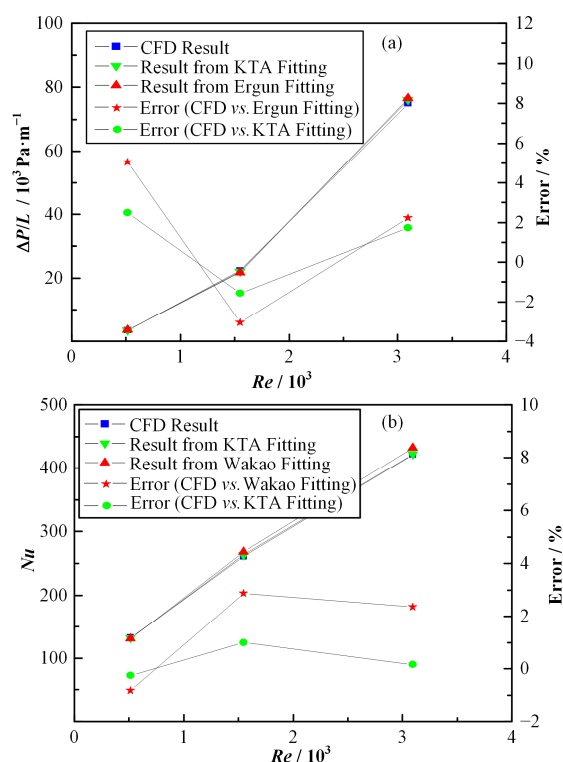


图11 熔盐在30mm直径小球的球床流动模拟结果
(a) 压降模拟结果, (b) 对流换热模拟结果
Fig.11 Simulation results of salt flow in bed packed by sphere in 30-mm diameter.
(a) Pressure drop result, (b) Heat transfer result

图11的结果表明, 模拟结果与两种形式的拟合公式误差都较小, 但KTA形式拟合修正得到的压降和对流换热公式误差相对更小, 建议采用KTA拟合修正公式。因此, 拟合公式理论上可用于30–60mm小球的60%填充率的规则球床。

4 结语

本文对类密排六方堆积的规则球床进行了建模计算, 并对网格模型、边界条件和湍流模型进行了必要的验证模拟。最终模拟得到的熔盐在规则球床内流动的平均阻力压降和平均对流换热 Nu , 结论如下:

- 1) 以熔盐为工质的阻力压降模拟结果均大于Ergun或KTA压降公式的预测值。
- 2) 以熔盐为工质的对流换热 Nu 模拟结果与Wakao对流换热公式预测值较接近, 与KTA对流换热公式的预测值相差25%左右。
- 3) 基于模拟结果对原有公式修正, 分别得到了如KTA和Ergun形式的压降公式, 通过误差分析, 推荐使用KTA形式拟合修正公式:

$$\frac{\Delta P_i}{L} = \left(\frac{598.4}{Re} + \frac{2.65}{\left(\frac{Re}{1-\varepsilon} \right)^{0.1}} \right) \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \frac{1}{D} \frac{\rho}{2} |u| u_i \quad (14)$$

4) 基于模拟结果对原有公式修正, 分别得到了如 KTA 和 Wakao 形式的对流换热 Nu 数关系式, 通过误差分析, 推荐使用 KTA 形式拟合修正公式:

$$Nu = 0.95 \frac{Pr^{1/3}}{\varepsilon^{1.18}} Re^{0.36} + 0.025 \frac{Pr^{1/2}}{\varepsilon^{1.07}} Re^{0.86} \quad (15)$$

5) 熔盐在 30 mm 球的规则球床中的流动与换热的计算结果与拟合修正公式结果较吻合。

参考文献

- Meng X K, Sun Z N, Xu G Z, *et al.* Single-phase convection heat transfer characteristic of the pebble-bed channels with internal heat generation[J]. Nuclear Engineer and Design, 2012, **252**(10): 121–127. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2012.05.041
- Bardet P, Blandford E, Fratoni M, *et al.* Design, analysis and development of the modular PB-AHTR[R]. Berkeley, CA, USA: University of California, 2008
- Scarlat R. Pebble bed heat transfer - particle-to-fluid heat convection[R]. Berkeley, CA, USA: University of California, 2009
- Bear J. Dynamics of fluids in porous media[M]. New York, USA: American Elsevier Publishing Company INC, 1972
- Scheidegger A E. The physics of flow through porous media[M]. 3rd Ed. Toronto, Japan: University of Toronto Press, 1974
- Ergun S. Fluid flow through packed columns[J]. Chemical Engineering Progress, 1952, **48**(2): 89–94
- Wakao N, Kaguei S. Heat and mass transfer in packed beds[M]. New York, USA: Gordon and Breach Science Publishers, 1982
- Song S, Cai X, Liu Y, *et al.* Pore scale thermal hydraulics investigations of molten salt cooled pebble bed high temperature reactor with BCC and FCC configurations[J]. Science & Technology of Nuclear Installations, 2014, **3**: 1–16. DOI: 10.1155/2014/589895
- Geschäftsstelle des Kerntechnischen Ausschusses. KTA 3102.3, reactor core design of high-temperature gas-cooled reactors Part 3: loss of pressure through friction in pebble bed cores[R]. Berlin, Germany: Nuclear Safety Standards Commission, 1981
- Geschäftsstelle des Kerntechnischen Ausschusses. KTA 3102.2, reactor core design of high-temperature gas-cooled reactors Part 2: heat transfer in spherical fuel elements[R]. Berlin, Germany: Nuclear Safety Standards Commission, 1983
- 江绵恒, 徐洪杰, 戴志敏. 未来先进核裂变能——TMSR 核能系统[J]. 中国科学院院刊, 2012, **27**(3): 366–374. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3045.2012.03.016
JIANG Mianheng, XU Hongjie, DAI Zhimin. Advanced fission energy program-TMSR nuclear energy system[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2012, **27**(3): 366–374. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3045.2012.03.016
- 牛强, 宋士雄, 魏权, 等. 熔盐冷却球床堆热通道热工水力特性数值分析[J]. 核技术, 2014, **37**(7): 070602. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.070602
NIU Qiang, SONG Shixiong, WEI Quan, *et al.* Thermal-hydraulics numerical analyses of pebble bed advanced high temperature reactor hot channel[J]. Nuclear Techniques, 2014, **37**(7): 070602. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.070602
- 梅牡丹, 邵世威, 何兆忠, 等. 固态钍基熔盐堆概率安全评价始发事件分析研究[J]. 核技术, 2014, **37**(9): 090601. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.090601
MEI Mudan, SHAO Shiwei, HE Zhaozhong, *et al.* Research on initial event analysis for solid thorium molten salt reactor probabilistic safety assessment[J]. Nuclear Techniques, 2014, **37**(9): 090601. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.090601
- ANSYS Inc. ANSYS FLUENT theory guide[OL]. Release 15.0, 2013. <https://uiuc-cse.github.io/me498cm-fa15/lessons/fluvent/refs/ANSYS%20Fluent%20Theory%20Guide.pdf>
- 徐广展, 孙中宁, 孟现珂, 等. 球床堆流动与传热数值模拟[J]. 核动力工程, 2013, **34**(3): 63–66. DOI: 0258-0926(2013)03-0063-04
XU Guangzhan, SUN Zhongning, MENG Xianke, *et al.* Numerical simulation of fluid flow and heat transfer in pebble bed reactor[J]. Nuclear Power Engineering, 2013, **34**(3): 63–66. DOI: 0258-0926(2013)03-0063-04
- 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2006
YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat transfer[M]. 4th Ed. Beijing: Higher Education Press, 2006
- Shams A, Roelofs F, Komen E M J, *et al.* Quasi-direct numerical simulation of a pebble bed configuration[J]. Nuclear Engineering & Design, 2013, **263**(1): 473–489. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2012.06.016

-
- 18 Shams A, Roelofs F, Komen E M J, *et al.* Large eddy simulation of a nuclear pebble bed configuration[J]. Nuclear Engineering & Design, 2013, **261**(8): 10–19. DOI: 10.1016/j.compfluid.2014.03.025
- 19 Yang J, Wang J, Bu S, *et al.* Experimental analysis of forced convective heat transfer in novel structured packed beds of particles[J]. Chemical Engineering Science, 2012, **71**(13): 126–137. DOI: 10.1016/j.ces.2011.12.005
- 20 Zuo J X, Jing J P, Bi J S, *et al.* Framework analysis of fluoride salt-cooled high temperature reactor probabilistic safety assessment[J]. Nuclear Science and Techniques, 2015, **26**(5): 050602. DOI: 10.13538/j.1001-8042/nst.26.050602
- 21 杨群, 于世和, 邹杨, 等. 氟盐冷却球床堆与 HTR-10 和 MSRE 的定量相似性分析[J]. 核技术, 2016, **39**(1): 010601. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.010601
- YANG Qun, YU Shihe, ZOU Yang, *et al.* Quantitative similarity analysis of the fluoride salt-cooled pebble bed reactor with HTR-10 and MSRE[J]. Nuclear Techniques, 2016, **39**(1): 010601. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.010601