

DOI: 10.7652/xjtuxb201911013

颗粒堆积床接触导热的数值分离和分析

陈波, 步珊珊, 孙皖, 马在勇, 张卢腾

(重庆大学低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室, 400044, 重庆)

摘要: 为了分析不同固体-流体导热系数比下接触导热对有效导热系数的影响,提出了基于孔隙尺度的接触导热的数值分离方法,在不同固体-流体导热系数比(6~4 400)下对简单立方结构堆积床中的接触导热进行了数值分析。当忽略接触导热时,计算模型中相邻颗粒之间的接触点采用间隙处理;当考虑接触导热时,计算模型中相邻颗粒之间的接触点采用短圆柱连接处理,接触导热通过这两种模型计算结果的差值获得。研究发现,有效导热系数随温度变化的趋势受接触导热的影响显著。考虑接触导热并且固体-流体导热系数比很大时,固相导热起主导作用;忽略接触导热时,流体导热起主导作用。随着固体-流体导热系数比的增大,接触导热对有效导热系数的贡献显著增大;当固体-流体导热系数比大于 150 时,接触导热对有效导热系数的贡献起主导作用。

关键词: 堆积床;有效导热系数;接触导热;固体-流体导热系数比

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)11-0091-06

Numerical Separation and Analysis of Contact Heat Conduction in Particle-Packed Beds

CHEN Bo, BU Shanshan, SUN Wan, MA Zaiyong, ZHANG Luteng

(Key Laboratory of Low-Grade Energy Utilization Technologies & System, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: To analyze the effect of contact heat conduction on effective thermal conductivity under different solid-to-fluid thermal conductivity ratio, a numerical method based on pore scale is presented to separate the contact conduction. The contact conduction of a simple cubic packed bed is numerically analyzed under different solid-to-fluid thermal conductivity ratios(6-4 400). When the contact conduction is neglected, the gap treatment is adopted to modify the point contact of adjacent pebbles in the computational model, while the short cylinder treatment is adopted when considering the contact conduction. The contact conduction is obtained from the difference of the calculated results between the two computational models. It is found that the varying trend of effective thermal conductivity with the temperature is greatly influenced by contact conduction. Considering the contact conduction at a high solid-to-fluid thermal conductivity ratio, the solid heat conduction plays a dominant role. On the contrary, the fluid heat conduction plays a dominant role when neglecting the contact conduction. As the solid-to-fluid thermal conductivity ratio increases, the contribution of contact conduction to effective thermal conductivity increases significantly. When the solid-to-fluid thermal conductivity ratio is higher than 150, the contact conduction plays a dominant role in contributing to the effective thermal conductivity.

收稿日期: 2019-05-08。 作者简介: 陈波(1995—),男,硕士生;步珊珊(通信作者),女,博士,讲师。 基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51606016);中国博士后科学基金资助项目(2016M602650);重庆市博士后特别资助项目(Xm2016024)。

网络出版时间: 2019-08-16 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20190815.1742.005.html>

Keywords: packed bed; effective thermal conductivity; contact heat conduction; solid-to-fluid thermal conductivity ratio

颗粒堆积床由于比表面积大、堆积密度高、设计制造简单以及运行稳定等优点,在工程中有广泛应用,如高温气冷球床堆^[1]、干燥工艺^[2]、催化反应器^[3]、蒸腾冷却工艺^[4]、高性能低温保温^[5]等,堆积床中的传热特性对于系统的安全运行和设计有重要影响,已成为当前的研究热点之一^[6]。由于堆积床中的传热十分复杂,因此采用有效导热系数来表征颗粒堆积床的综合传热特性。当流体静止时,有效导热系数主要由固体表面间的辐射、固体颗粒和流体的导热、相邻颗粒接触点之间的接触导热^[7]3部分组成,可见接触导热是堆积床有效导热系数的重要组成部分。

目前,堆积床有效导热系数的研究主要集中于理论分析^[8]和实验研究^[9],而基于孔隙尺度的数值研究还较少。孔隙尺度的数值方法可以构建堆积床局部传热特性和宏观有效导热系数的联系,得到了越来越多的关注^[10]。在基于孔隙尺度的数值分析中,颗粒之间的接触区域网格控制比较困难,通常需要对相邻颗粒接触区域做一定的简化^[11-13],这必然对颗粒之间的接触导热产生影响,进一步影响堆积床有效导热系数。本文前期研究工作表明,接触区域处理方法对堆积床有效导热系数的计算结果影响不能忽略^[14-15],尤其是在温度不太高的情况下。然而,由于间隙处理方式更为简便(通常球径缩小1%),一些研究^[16-17]中将堆积床相邻颗粒之间作了间隙模型简化,忽略了接触导热,但计算结果和经验关联式的误差依然在合理范围之内。这主要是由于固体-流体导热系数比($\kappa = k_s/k_f$)较小,接触导热对有效导热系数的贡献和影响比较小。

为了得到不同固体-流体导热系数比下接触导热对有效导热系数的影响,本文提出了基于孔隙尺度分离颗粒堆积床中接触导热的数值方法,研究了不同固体-流体导热系数比($\kappa = 6 \sim 4\,400$)下对简单立方结构堆积床中的接触导热对颗粒堆积床有效导热系数的影响,分析了接触导热在有效导热系数中的贡献。该研究可以为不同固体-流体导热系数比下颗粒堆积床有效导热系数 CFD 研究中接触区域处理方式的选择提供指导。

1 物理模型

为数值分离出接触导热,本文采用了两种计算

模型,如图1所示。这两种计算模型的堆积结构都是简单立方堆积,只是颗粒之间的接触区域处理方式不同。模型1中将颗粒之间的接触区域简化为短圆柱连接,其计算结果包含了接触导热;模型2中接触区域简化为间隙处理,其计算结果不考虑接触导热。根据本课题组的前期研究工作^[11],当短圆柱的直径为 $0.05d_p$ ($d_p = 2\text{ mm}$ 为球体颗粒直径)时,计算结果与 ZSK 经验关联式结果吻合很好,因此模型1采用直径为 $0.05d_p$ 的短圆柱替代相邻颗粒接触点,模型2中颗粒之间的间隙通过将颗粒直径缩小1%获得。

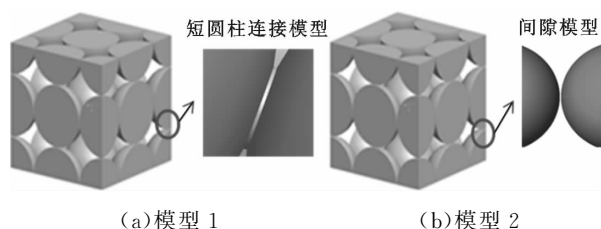


图1 计算模型示意图

2 数值计算方法

本文以 ANSYS Fluent15.0 为计算平台,基于有限容积法求解能量方程。假设堆积床内热流密度和温度分布连续,由于堆积床内部的气体处于滞止状态,不考虑流体流动,且不考虑辐射换热,因此在无内热源的稳态工况下,固体和流体区域的能量方程为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0 \quad (1)$$

式中: k 为固体或流体的导热系数 k_s 或 k_f ,并随着温度变化。获得球床温度分布后,通过逆求解一维傅里叶导热定律可获得该堆积床的有效导热系数

$$k_e = \frac{q}{\Delta T / \Delta z} \quad (2)$$

式中: q 是平均热流密度; ΔT 是沿热流方向(z 方向)的温度差。

为了获得大范围的固体-流体导热系数比 κ ,采用4种不同材料的堆积床,其中固体材料分别采用石墨(高温气冷堆燃料元件材料)和偏钛酸锂(Li_2TiO_3 ,聚变堆增殖包层氚增殖剂材料),流体材料分别采用氮气和氦气,这4种材料的导热系数如图2所示。随着温度升高,流体的导热系数均增大;

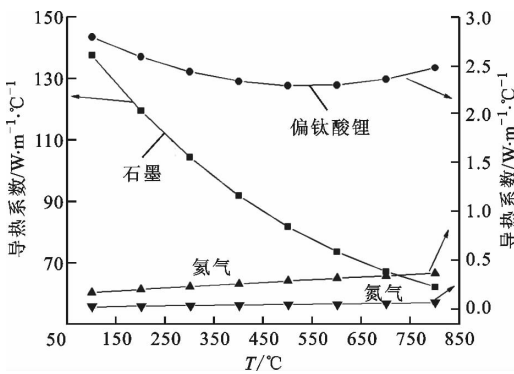


图2 固体和流体的导热系数

石墨的导热系数降低;偏钛酸锂的导热系数先减小,然后略增大,但是总的变化幅度不大。100~800℃范围内4种堆积床的材料组成及其固体-流体导热系数比如表1所示,可以看出堆积床的固体-流体导热系数比的变化范围为6~4 400。

表1 4种堆积床的材料组成及其
固体-流体导热系数比

堆积床	固体材料	流体材料	κ
1	偏钛酸锂	氦气	6~16
2	偏钛酸锂	氮气	35~90
3	石墨	氦气	160~770
4	石墨	氮气	880~4 400

边界条件设置如图3所示,在模型 z 方向(热流传递方向)的前后两个面是定温边界面,两个定温面的平均温度即为堆积床的平均温度。垂直于 xy 平面的4个表面为绝热壁面。设定前后面的温差为10℃,因此对于式(2), $\Delta T=10^\circ\text{C}$, $\Delta z=4\text{ mm}$, q 取两个定温面的平均热流密度,可从Fluent15.0中直接获得。

采用ICEM软件对模型进行网格划分。网格采用非结构化网格,并对球间接触区域进行适当的局部加密(见图4)。堆积床平均温度为500℃时的网格无关性验证如表2所示,结果表明,网格数为785 019和1 071 870时模型所得结果相差很小(0.04%),因此可认为在网格总数为785 019时模型获得网格无关解。模型2也采用类似网格进行计算。

将上述模型导入ANSYS Fluent15.0中计算:求解器基于压力求解,气体与固体接触面设置为COUPLED,求解算法选用SIMPLE算法,物性参数根据图2所示的材料导热系数编写UDF以导入程序,离散格式采用二阶迎风格式,松弛因子采用默认设置,采用残差值小于 10^{-14} 作为收敛判据。

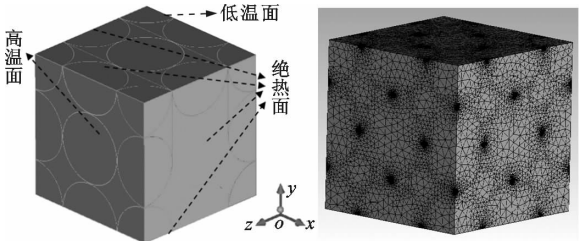


图3 边界条件示意图

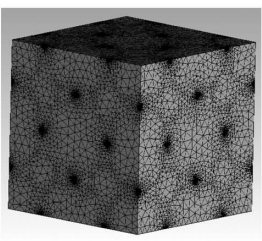


图4 网格划分结果

表2 模型1网格无关性验证

网格数	有效导热系数 $/\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	热流密度 $/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	相对误差 $/\%$
570 181	0.893 4	2 233	0.94
785 019	0.901 6	2 254	0.04
1 071 870	0.902 0	2 255	

3 计算结果与分析

3.1 局部温度分布分析

当固体材料为偏钛酸锂、流体材料为氦气、堆积床的平均温度为500℃时,模型1(考虑接触导热)中固体颗粒温度分布如图5所示。沿热流传递方向,固体温度不断降低,每个颗粒内部的温度并不相同。这是由于固体-流体导热系数比较小($\kappa=8$),颗粒内部的热阻不能忽略。同时,发现颗粒内部温度梯度比接触区域的温度梯度要小。当固体材料为石墨、流体材料为氦气、堆积床的平均温度为500℃时,模型1中颗粒温度分布如图6所示。球体内部温度分布趋于一致,球体接触区域温度梯度很大。这是由于固体-流体导热系数比较大($\kappa=275$),颗粒内部的热阻比较小,基本可以忽略。此时,堆积床的传热热阻主要集中在球体颗粒接触区域。

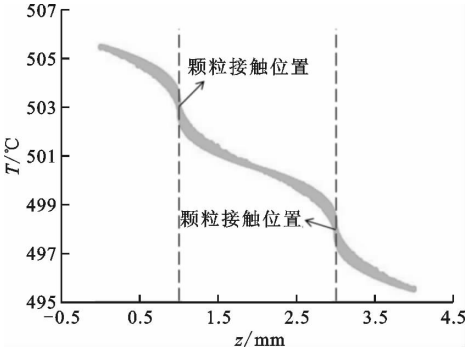


图5 偏钛酸锂-氦气堆积床固体颗粒温度分布

3.2 接触导热对有效导热系数的影响

图7为模型1(考虑接触导热)中有效导热系数随温度变化的情况。固体材料为石墨时,无论流体

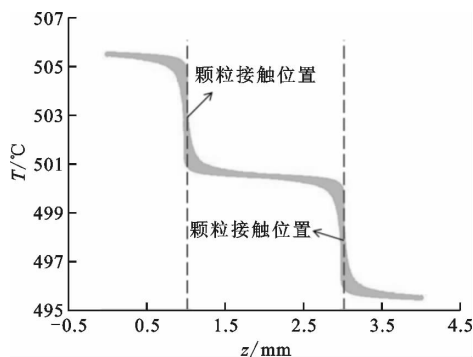


图6 石墨-氮气堆积床固体颗粒温度分布

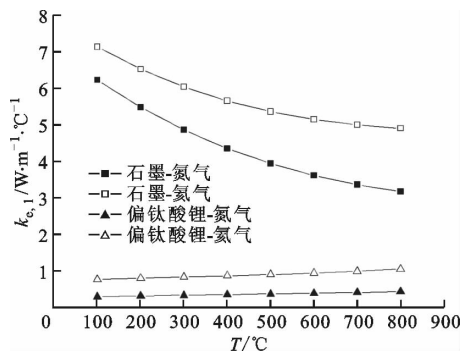


图7 模型1(考虑接触导热)的有效导热系数随温度的变化

材料为氮气或者氦气,堆积床的有效导热系数都随温度的升高而减小。这是由于石墨的导热系数远大于氮气或者氦气,固体-流体导热系数比较大($\kappa = 160 \sim 4\,400$),热量主要通过固体颗粒和颗粒接触区域传递,而石墨的导热系数随温度的升高而减小(图2),即使流体导热系数随温度升高而增加,堆积床的有效导热系数仍然呈下降趋势。这说明考虑接触导热时,固体导热对有效导热系数的影响更大。当固体材料为偏钛酸锂时,流体无论为氮气或者氦气,堆积床的有效导热系数均随温度的升高而略微增大。这是由于偏钛酸锂的导热系数小于石墨,且随温度变化的幅度并不大,固体-流体导热系数比较小($\kappa = 6 \sim 90$)。

图8为模型2(忽略接触导热)中有效导热系数随温度变化情况,可以看出4种堆积床的有效导热系数均随着温度的升高而增大。这与流体导热系数随温度升高而增大的趋势一致,而且流体为氮气的堆积床有效导热系数明显比氮气堆积床有效导热系数要大,表明在不考虑接触导热时,流体导热对有效导热系数的影响更显著。以上分析表明,接触导热对有效导热系数随温度变化的趋势具有显著影响。

3.3 接触导热的数值分离和贡献分析

接触导热的数值分离流程如图9所示。模型1

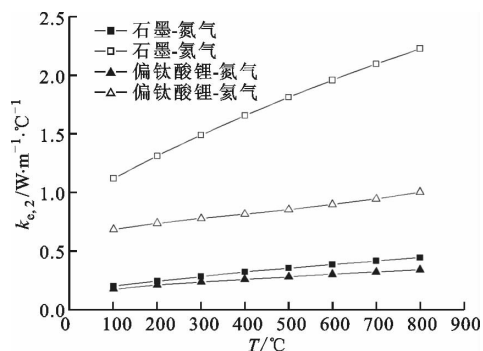


图8 模型2(忽略接触导热)的有效导热系数随温度的变化

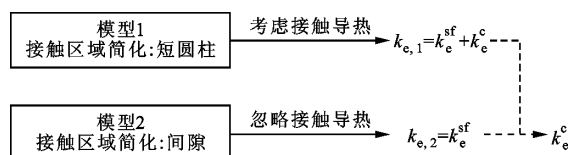
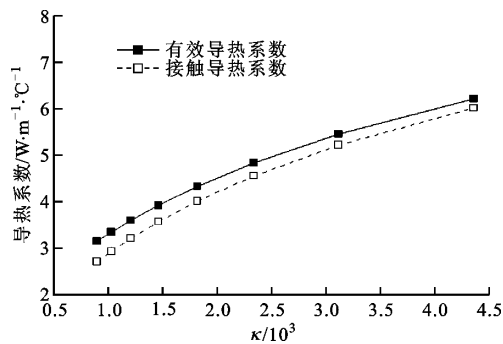


图9 接触导热分离流程

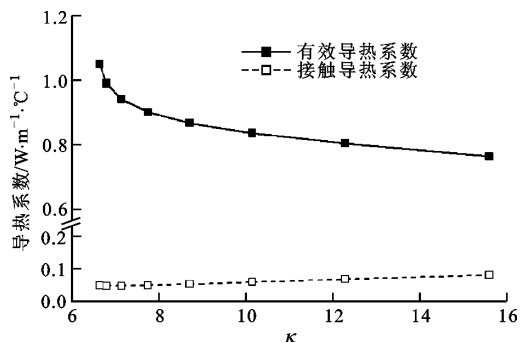
中的有效导热系数 $k_{e,1}$ 由接触导热系数 k_e^c 和流体-固体导热系数 k_e^{sf} 组成,模型2中只包含了流体-固体导热系数 k_e^{sf} ,因此接触导热系数的计算公式为

$$k_e^c = k_{e,1} - k_{e,2} \quad (3)$$

接触导热系数和有效导热系数随固体-流体导热系数比的变化如图10所示。从图10a可以看出,对于石墨-氮气堆积床的接触导热与有效导热系数



(a) 石墨-氮气堆积床



(b) 偏钛酸锂-氮气堆积床

图10 接触导热系数和有效导热系数随 κ 的变化

的差距非常小,说明接触导热是石墨-氮气堆积床的主导传热机制。有效导热系数和接触导热系数都随 κ 增大而增大,这是由于 κ 增大,石墨导热系数增大,因此接触导热增强,从而使有效导热系数增大。

从图 10b 可以看出,偏钛酸锂-氮气堆积床的有效导热系数比接触导热系数大很多,说明接触导热对有效导热系数的贡献并不大。接触导热系数随 κ 增大而增大,这是由于 κ 增大,偏钛酸锂导热系数增大,因此接触导热增强。另一方面,随着 κ 增大,氮气导热系数减小,使得以固体-流体导热为主导的传热机制削弱,从而使有效导热系数随着 κ 增大而减小。

在不同的固体-流体导热系数比下,接触导热系数对有效导热系数的贡献(k_e^c/k_e)如图 11 所示。随着固体-流体导热系数比增大,接触导热系数在有效导热系数中所占份额从 4.5% 增大到 96.8%。当 $\kappa=10$ 时,接触导热系数的贡献只有 8% 左右,而当 $\kappa>150$ 时,接触导热系数的贡献大于 50%。因此,当 κ 较大时,接触导热对有效导热系数的贡献起主导作用。

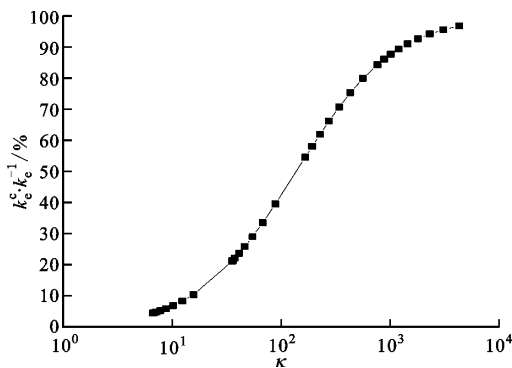


图 11 接触导热系数对有效导热系数的贡献

4 结 论

本文在不同固体-流体导热系数比下,对颗粒堆积床中的接触导热进行了数值分离和分析,主要结论如下。

(1)提出了颗粒堆积床中接触导热的数值分离方法。当忽略接触导热时,计算模型的相邻颗粒之间的接触点采用间隙处理;当考虑接触导热时,计算模型的相邻颗粒之间的接触点采用短圆柱连接处理,接触导热通过这两种模型计算结果的差值获得。

(2)有效导热系数随温度变化的趋势受到接触导热的显著影响。考虑接触导热并且固体-流体导热系数比很大时,固体导热起主导作用,因此有效导热系数随温度变化的趋势与固体导热系数一致;忽

略接触导热时,流体导热起主导作用,有效导热系数随温度变化的趋势与流体导热系数一致。

(3)接触导热对有效导热系数的贡献受固体-流体导热系数比的显著影响。随着 κ 增大,接触导热对有效导热系数的贡献也增大。当 $\kappa>150$ 时,接触导热所占份额达 50% 以上。因此,在较大的固体-流体导热系数比下,接触导热是堆积床有效导热系数的主要组成部分。

参考文献:

- [1] REN C, YANG X, JIA H, et al. Theoretical analysis of effective thermal conductivity for the Chinese HTR-PM heat transfer test facility [J]. Applied Sciences-Basel, 2017, 7(1): 2076-3417.
- [2] WHITAKER S. Heat and mass transfer in granular porous media [J]. Advances in Drying, 1980, 1: 23-61.
- [3] 吴江权, 杨剑, 周浪, 等. 不同圆球复合无序堆积床内流动传热数值分析 [J]. 化工学报, 2015, 66(S1): 111-116.
- WU Jiangquan, YANG Jian, ZHOU Lang, et al. Numerical analysis of fluid flow and heat transfer in various composite packed beds [J]. CIESC Journal, 2015, 66(S1): 111-116.
- [4] ECKERT E R G, CHO H H. Transition from transpiration to film cooling [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 1994, 37(2): 3-8.
- [5] TIEN C L, CUNNINGTON G R. Cryogenic insulation heat transfer [J]. Advances in Heat Transfer, 1973, 9: 349-417.
- [6] 赵述敏, 胡志刚. 椭球颗粒随机紧密堆积实验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(9): 140-145.
- ZHAO Shumin, HU Zhigang. Experiments for randomly close packing of ellipsoids [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(9): 140-145.
- [7] PANCHAL M, CHAUDHURI P, LEW J T V, et al. Numerical modelling for the effective thermal conductivity of lithium meta titanate pebble bed with different packing structures [J]. Fusion Engineering & Design, 2016, 112: 303-310.
- [8] KAVIANY M. Principles of heat transfer in porous media [M]. Berlin, Germany: Springer, 1991: 126-127.
- [9] 任成, 杨星团, 李聪新, 等. 高温堆球床等效导热系数测量实验加热系统设计及可行性验证 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2014, 54(8): 1068-1072.

(下转第 111 页)