

多孔介质热弥散系数的分形模型

张 杰, 张 赛, 高伟业, 胡世旺, 汪振毅

A Fractal Model for Thermal Dispersion Coefficients of Porous Media

ZHANG Jie, ZHANG Sai, GAO Weiye, HU Shiwang, and WANG Zhenyi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.21656/1000-0887.420314>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于三维CFD-DEM的多孔介质流场数值模拟

Numerical Simulation of Flow Fields in Porous Media Based on the 3D CFD-DEM

应用数学和力学. 2017, 38(10): 1093-1102 <https://doi.org/10.21656/1000-0887.370326>

二维各向同性多孔介质的弹性动力学通解

General Solutions of Elastodynamics for 2D Isotropic Porous Media

应用数学和力学. 2019, 40(9): 1025-1034 <https://doi.org/10.21656/1000-0887.390235>

考虑接触角滞后性多孔介质内非混相驱替研究

An Investigation on the Immiscible Displacement in Porous Media With Contact Angle Hysteresis

应用数学和力学. 2021, 42(9): 900-914 <https://doi.org/10.21656/1000-0887.410278>

多孔介质复合方腔双扩散混合对流LBM模拟

LBM Simulation of Double Diffusive Mixed Convection in a Porous Medium Composite Cavity

应用数学和力学. 2017, 38(7): 780-793 <https://doi.org/10.21656/1000-0887.370175>

趋旋性微生物在幂律流体饱和水平多孔层中的热-生物对流稳定性分析

Linear Stability Analysis on Thermo-Bioconvection of Gyrotactic Microorganisms in a Horizontal Porous Layer Saturated by a Power-Law Fluid

应用数学和力学. 2019, 40(8): 856-865 <https://doi.org/10.21656/1000-0887.390298>

多孔介质中的一类双扩散扰动模型的解的连续依赖性

Continuous Dependence of Solutions to a Class of Double Diffusion Perturbation Models for Porous Media

应用数学和力学. 2020, 41(10): 1092-1102 <https://doi.org/10.21656/1000-0887.410128>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

多孔介质热弥散系数的分形模型*

张 杰, 张 赛, 高伟业, 胡世旺, 汪振毅

(昆明理工大学 机电工程学院, 昆明 650500)

摘要: 热弥散系数是与流体的物性和多孔介质结构有关的, 表征多孔介质传热传质强弱的重要参数. 该文建立了分形多孔介质的孔喉结构模型, 研究了在孔喉结构处流体由湍流状态变为层流状态的局部水头损失和速度弥散效应, 在考虑微观孔喉结构和速度弥散效应的影响下, 推导了热弥散系数关系式. 研究表明, 热弥散系数与孔喉比、孔喉结构个数和迂曲分形维数成正比, 与孔隙率和面积分形维数成反比. 进一步研究发现, 孔喉比在 1~150 范围内对速度弥散效应有显著影响, 流体在孔喉结构处存在局部水头损失, 导致速度弥散效应增强, 热弥散系数增大.

关键词: 多孔介质; 孔喉比; 局部水头损失; 分形; 热弥散

中图分类号: O357.5 **文献标志码:** A **DOI:** 10.21656/1000-0887.420314

A Fractal Model for Thermal Dispersion Coefficients of Porous Media

ZHANG Jie, ZHANG Sai, GAO Weiye, HU Shiwang, WANG Zhenyi

(Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology,
Kunming 650500, P.R. China)

Abstract: The thermal dispersion coefficient is an important parameter to characterize heat and mass transfer in porous media, which is related to the physical properties of fluid and the structure of porous media. The pore-throat structure model for fractal porous media was established, and the local head loss and the velocity dispersion effect were studied for the fluid changing from the turbulent state to the laminar state around the pore-throat structure. The thermal dispersion coefficient formula was derived under the influences of the micropore-throat structure and the velocity dispersion effect. The results show that, the thermal dispersion coefficient is directly proportional to the pore-throat ratio, the number of pore-throat structures and the tortuous fractal dimension, and is inversely proportional to the porosity and the area fractal dimension. Furthermore, in the range of 1~150, the pore-throat ratio has a significant influence on the velocity dispersion effect, and the fluid has a local head loss around the pore-throat structure, which leads to an enhancement of the velocity dispersion effect and an increase of the thermal dispersion coefficient.

Key words: porous media; pore-throat ratio; local head loss; fractal; heat dispersion

引 言

多孔介质的热质传递过程具有广泛的实际应用背景, 其传递的重要特征之一就是通过热弥散效应增强传

* 收稿日期: 2021-10-18; 修订日期: 2021-12-08

基金项目: 昆明理工大学省级项目(人培)(KKSYS201601011); 云南省科学技术厅青年基金(KKSQ201701008)

作者简介: 张杰(1996—), 男, 硕士生(E-mail: jie_zh@163.com);

张赛(1987—), 女, 博士, 硕士生导师(通讯作者. E-mail: sai_zh@163.com).

引用格式: 张杰, 张赛, 高伟业, 胡世旺, 汪振毅. 多孔介质热弥散系数的分形模型[J]. 应用数学和力学, 2022, 43(5): 553-560.

递过程^[1-5]. Jouybari 等^[6]认为多孔介质中流体流速较高时, 弥散效应不可忽略. Vadasz^[7]通过数值模拟研究了流体弥散效应, 但没有具体分析流体弥散效应的影响因素. 戚涛等^[8]基于孔隙网络模型中的流动模拟, 采用 Euler 描述方法描述了多孔介质中流体速度分布情况, 证实了多孔介质内流体速度的脉动情况. 但是 Euler 描述法很难精确地描述流体质点的运动过程, 弥散效应是由于孔隙中流体速度脉动引起的, 这种脉动类似于湍流脉动, 存在一定的误差. 对于热弥散系数的研究, 研究者们试图建立统一适用的热弥散系数模型, 如 Moyne 等^[9]采用体积平均方法得到了均质多孔介质内宏观热弥散系数单方程模型. 但该模型是基于空间周期性结构得到的, 实际多孔介质并不是简单的周期结构, 这使得该模型缺乏通用性. Hunt 等^[10]利用统计平均的方法和混合长度理论提出了中心区和近壁区热弥散效应的关系式, 并根据他们自己的试验数据确定了其中的经验常数, 但这些经验常数的物理意义并不明确. 以上研究者所建立的热弥散系数关系式具有很大差异, 模型之间缺乏通用性和可比性; 此外, 在多孔介质热弥散系数的研究中, 很少对速度脉动做详细的解释说明. 因此, 有必要进一步理论研究多孔介质流动过程的热弥散效应.

本文通过对流体在多孔介质中的流动特征分析, 计算得到了流体在湍流和层流的临界状态时的截面速度关系式, 分析此过程中流体在孔喉结构处的局部水头损失, 推导了速度弥散效应关系式, 并结合速度弥散效应关系式、分形理论、孔喉结构随机分配函数, 建立了热弥散系数模型. 该模型把热弥散系数与孔隙率、孔喉比、孔道特征长度、固体颗粒直径、迂曲分形维数和面积分形维数联系起来, 减少了模型中的可调参数. 最后, 详细解释了孔喉结构参数对热弥散系数的影响.

1 孔喉结构分布特征

根据分形理论, 多孔材料的孔隙数目与大小满足以下关系式^[11]:

$$N_t = (\lambda_{\max}/\lambda_{\min})^{D_f}, \quad (1)$$

式中, N_t 为孔隙数目; D_f 为面积分形维数; λ_{\max} 为孔隙最大直径, m; λ_{\min} 为孔隙最小直径, m.

式(1)为孔隙直径大于或等于 λ_{\min} 条件下的孔隙累计数目. 在 λ 到 $\lambda+d_\lambda$ 区间内的孔隙数目为

$$-dN = D_f \lambda_{\max}^{D_f} \lambda^{-(D_f+1)} d\lambda. \quad (2)$$

式(2)表明孔隙数目与孔隙直径呈反比关系, $-dN > 0$. 由式(1)和(2)可得孔隙分布的概率密度函数为

$$f(\lambda) = -dN/(N_t d\lambda) = D_f \lambda_{\min}^{D_f} \lambda^{-(D_f+1)}. \quad (3)$$

式(3)表明孔隙大小分布为多孔介质孔隙微观结构的函数, 表示在孔径 λ 附近区间内孔隙数目占总孔隙数目的百分比.

孔喉结构分布按正态分布的随机分配函数如下^[12]:

$$f(c) = \frac{\eta_c}{\delta_c \sqrt{\pi/2}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\bar{x}}{\delta_c}\right)^2\right], \quad (4)$$

式中, δ_c 为孔喉个数的标准差; η_c 为分布的相对比例常数; x 为同一孔道上孔喉结构的个数; \bar{x} 为孔喉结构的平均个数.

2 孔喉结构流动特征

2.1 孔喉结构流动模型

对于颗粒填充床、多孔岩石和土壤等颗粒型多孔介质, 其内部孔道存在孔喉结构. 孔道内流体流动状态受孔道结构影响, 流体在孔道内的流动规律随孔道结构的变化而变化. 孔道的扩张和收缩由直径不同的固体颗粒引起, 固体颗粒凸起在孔道中形成大小不同的孔喉结构, 这些孔喉结构连接在一起形成弯曲的孔道.

如图1所示, L_{BF} 为喉道直径, m; $L_{BF}+d_p$ 为孔道直径, m. 图中虚线框表示一个孔喉单元, 其孔隙率为

$$\varepsilon = 1 - \frac{\pi d_p^2}{4(d_p + L_{BF})^2}, \quad (5)$$

式中, d_p 表示固体颗粒直径, m.

孔喉比表示为

$$\beta = \frac{L_{BF} + d_p}{L_{BF}} \tag{6}$$

式 (6) 表明, 喉道直径一定时, 固体颗粒直径越大, 孔喉比越大。

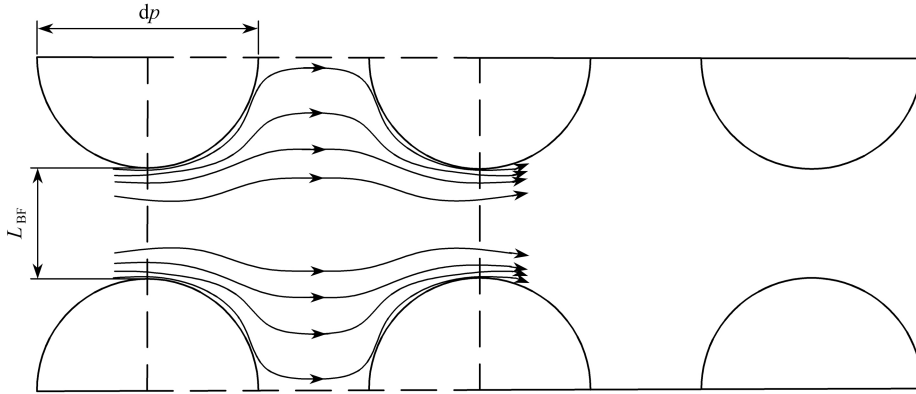


图 1 孔喉结构流动模型

Fig. 1 The flow model for the pore-throat structure

2.2 局部水头损失分析

局部水头损失为因孔道形状发生突变而使流体速度大小和方向发生改变时流体的能量损失. 假设一个孔喉单元内固体颗粒直径相等, 流体以层流状态由孔喉结构的左端流入右端流出时, 流体运动状态发生改变, 形成紊流状态. 流体经过 l 段长度后恢复到层流状态, 由于 l 段长度很短, 所以沿程损失可以忽略, 局部水头损失占主导地位.

图 2 为存在孔喉结构的孔道简化图, 流体以一定的速度在孔道中流动, 在孔道扩张和收缩处由稳定的层流状态变为紊流的湍流状态. 图中 l 段表示由湍流状态到层流状态的流体所经过的长度, 称为 Prandtl 混合长度. 混合长度所受各力沿流动方向的合力可表示为

$$F = P_1 A - P_2 A + \rho g A (h_1 - h_2) - 2\pi r l \tau, \tag{7}$$

式中, P_1 和 P_2 为沿流动方向的压强, Pa; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, $g=9.8 \text{ m/s}^2$; r 为混合长度的半径, m; $l=ky$ 为 Prandtl 混合长度, m; k 为 Karman 常数, 一般取 0.4; y 为距离孔道壁面的距离; τ 为黏性切应力.

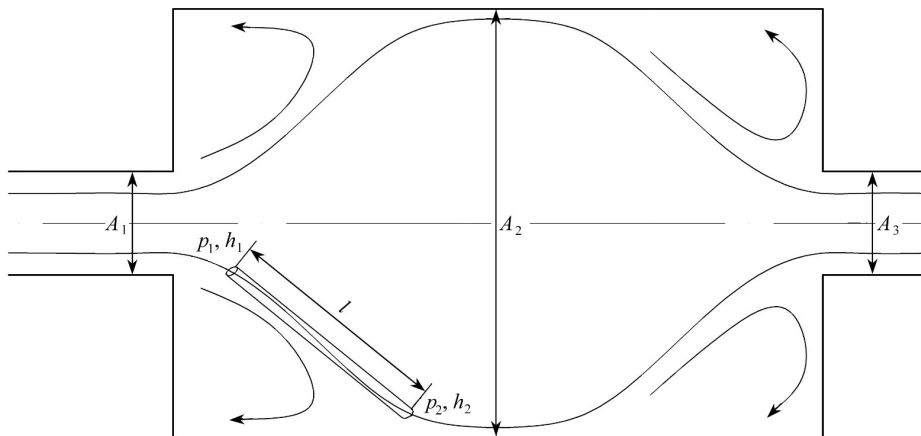


图 2 孔道内流体流动模型

Fig. 2 The fluid flow model in the channel

黏性切应力表示为

$$\tau = -\mu \frac{dv_r}{dr}, \tag{8}$$

式中, μ 为流体黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; v_r 为流体速度, m/s .

流体处在临界状态时流动状态稳定,沿流动方向流体的加速度为 0 m/s^2 ,所以合力 $F=0 \text{ N}$.式(7)化简整理可得

$$\frac{(P_1/(\rho g) + h_1) - (P_2/(\rho g) + h_2)}{l} = -\frac{2\mu}{\rho g r} \frac{dv_r}{dr}. \quad (9)$$

流体处于稳态流动,水头变化值为沿流动方向的函数,式(9)的左端项可写为 h_f/l ,于是有

$$\frac{h_f}{l} = -\frac{2\mu}{r\rho g} \frac{dv_r}{dr}, \quad (10)$$

式中, h_f 为局部水头损失系数.

其中局部水头损失为^[13]

$$h_f = \sum_i \xi_i \frac{v_i^2}{2g}, \quad (11)$$

式中, ξ_i 为局部动能损失系数; v_i 为管道内流体的平均流速, m/s .

管道扩张时局部动能损失系数为

$$\xi_1 = (1 - A_1/A_2)^2 = (1 - 1/\beta^2)^2; \quad (12)$$

由管道扩张引起的局部水头损失为

$$h_{f1} = \xi_1 \frac{v_1^2}{2g}; \quad (13)$$

管道收缩的局部动能损失系数为

$$\xi_2 = 0.5(1 - A_3/A_2); \quad (14)$$

由管道收缩引起的局部水头损失为

$$h_{f2} = \xi_2 \frac{v_2^2}{2g}. \quad (15)$$

由于 $A_1=A_3$,管道内层流状态时各截面流体平均速度相等, $v_1=v_2=v$.联立式(6)、(11)~(15),可得局部水头损失系数为

$$h_f = h_{f1} + h_{f2} = \left(\frac{3}{2} + \frac{1}{\beta^4} - \frac{5}{2\beta^2} \right) \frac{v^2}{2g}. \quad (16)$$

式(16)表明,当孔喉比为1时,局部水头损失系数为0,即没有水头损失,这与实际情况是相符的.

2.3 弥散效应

设孔道直径 $L_{BF}+d_p=\lambda$,在 r 到 λ 内对式(10)进行积分,到孔道内速度分布函数为

$$v_r = \frac{h_f \rho g (\lambda^2 - r^2)}{4\mu l}. \quad (17)$$

式(17)为孔道内流体层流状态时的速度分布函数.通过孔道截面的总流量为

$$Q = \int_0^\lambda \frac{h_f \rho g (\lambda^2 - r^2)}{4\mu l} \cdot 2\pi r dr = \frac{\pi \lambda^4 h_f \rho g}{8\mu l}; \quad (18)$$

孔道截面的流速为

$$v_s = \frac{Q}{\pi \lambda^2} = \frac{h_f \rho g \lambda^2}{8\mu l}. \quad (19)$$

式(19)表明,流体流速主要受自身物性和孔隙结构参数的影响.流体的直线速度为

$$v = \frac{v_s}{\varepsilon}, \quad (20)$$

式中, ε 为孔隙率.由弯曲毛细管的分形标度规律方程^[11],可以得到弯曲毛细管里流体的分形速度为

$$u = \frac{dL_t}{dt} = D_T L^{D_T-1} \lambda^{1-D_T} v, \quad (21)$$

$v'=u-v$ 为孔道内速度相对于直线速度的偏离值,即速度弥散效应.联立式(16)、(19)~(21)可得

$$v' = \frac{(D_T L^{D_T-1} \lambda^{1-D_T} - 1) \left(\frac{3}{2} + \frac{1}{\beta^4} - \frac{5}{2\beta^2} \right) \rho \lambda^2 v^2}{16\mu\epsilon} \tag{22}$$

式 (22) 表明, 流体的速度弥散效应除了与流体黏性和密度有关之外, 还与孔隙率、孔喉比、孔道直径、孔道特征长度和孔道迂曲分形维数等介质结构参数有关。

3 热弥散系数的分形模型

由速度弥散效应引起的热流量可表示为

$$q = \rho c_p v' T' \tag{23}$$

式中, c_p 为流体的定压比热容, $J/(kg \cdot K)$; T' 为偏离平均值的温度, K , 其偏离值与介质固体颗粒直径和宏观温度梯度成正比。

偏离平均值的温度可由下式表示^[14]:

$$T' = -C d_p \frac{d\langle T \rangle}{d_n} \tag{24}$$

式中, C 拟合常数。

联立式 (22)~(24) 可得

$$q = - \frac{C(\rho v)^2 c_p d_p (D_T L^{D_T-1} \lambda^{1-D_T} - 1) \left(\frac{3}{2} + \frac{1}{\beta^4} - \frac{5}{2\beta^2} \right) \lambda^2}{16\mu\epsilon} \frac{d\langle T \rangle}{d_n} \tag{25}$$

单根管道内热弥散系数表达式为

$$k = - \frac{q}{\frac{d\langle T \rangle}{d_n}} = \frac{C(\rho v)^2 c_p d_p (D_T L^{D_T-1} \lambda^{1-D_T} - 1) \left(\frac{3}{2} + \frac{1}{\beta^4} - \frac{5}{2\beta^2} \right) \lambda^2}{16\mu\epsilon} \tag{26}$$

在同一多孔介质中, 还需要考虑孔隙大小分布和孔喉结构分布情况, 联立式 (3)、(4) 和 (26) 可得

$$k' = k \cdot f(\lambda) \cdot f(c) = \frac{\eta_c C c_p d_p \lambda^{1-D_T} D_f \lambda_{\min}^{D_f} (\rho v)^2 (D_T L^{D_T-1} \lambda^{1-D_T} - 1) \left(\frac{3}{2} + \frac{1}{\beta^4} - \frac{5}{2\beta^2} \right)}{16 \sqrt{\pi/2} \mu \epsilon \delta_c} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \bar{x}}{\delta_c} \right)^2 \right] \tag{27}$$

式 (27) 表明, 热弥散系数为流体物性和多孔介质结构参数 (孔隙率、孔喉比、孔道特征长度、孔道直径、迂曲分形维数和面积分形维数等) 的函数。当孔隙率趋近于 1 时, 表明管道内没有固体颗粒凸起, 即孔喉比为 1, 导致热弥散系数为 0。

$$\frac{k'}{k_f} = \frac{P_e \eta_c C \lambda^{1-D_T} D_f \lambda_{\min}^{D_f} \rho v (D_T L^{D_T-1} \lambda^{1-D_T} - 1) \left(\frac{3}{2} + \frac{1}{\beta^4} - \frac{5}{2\beta^2} \right)}{16 \sqrt{\pi/2} \mu \epsilon \delta_c} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \bar{x}}{\delta_c} \right)^2 \right] \tag{28}$$

式中, $P_e = \rho c_p v d_p / k_f$ 为 Berkeley 数; k_f 为流体导热系数。

4 分析和讨论

本文中的流体为氢气, 分析氢气在多孔介质中流动情况, 模型中的部分参数取值如表 1 所示。图 3 为式 (26) 与文献 [14] 结果的对比, 可以看出一致性较高。从图中可以看出, 随着孔隙率的减小, 热弥散系数迅速增大。这是因为孔隙率越小, 流线越弯曲, 速度弥散效应越强, 所以导致热弥散系数越大。

图 4 为热弥散系数分形模型与 Metzger 等^[15] 的实验值对比图。Metzger 等^[15] 以水为流体, 实验预测了玻璃球填充床内水的热弥散系数。由图可知, 本文的热弥散系数分形模型与实验值吻合度较高。由图还可知, 随着 Berkeley 数的增大, 热弥散系数增大, 即流体流速越快, 热弥散系数越大。这是因为流体流速变快时, 弥散效应

加强,所以热弥散系数增大。

图3和图4表明,式(27)可用于计算颗粒填充床、多孔岩石和土壤等具有孔喉结构的多孔介质内流体热弥散系数。

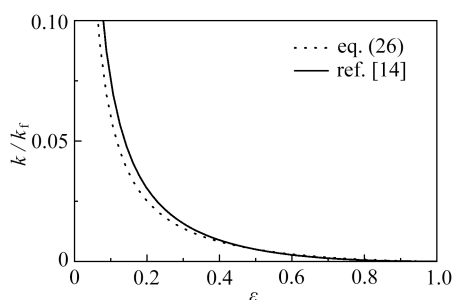


图3 热弥散系数分形模型与常规模型对比

Fig. 3 Comparison between the fractal model for the thermal dispersion coefficient and the conventional model

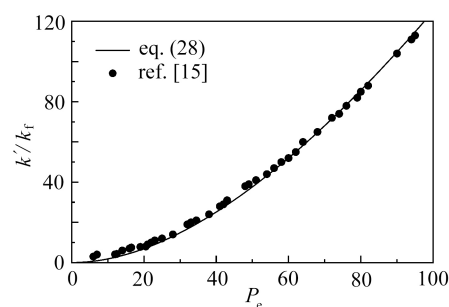


图4 热弥散系数分形模型与实验值对比

Fig. 4 Comparison between the fractal model for the thermal dispersion coefficient and experimental values

将表1中数据代入关系式(22)和(27)中,得到流体物性、孔隙结构参数与热弥散系数的函数关系,图5~8能够较准确地解释孔隙结构参数对热弥散系数的影响。

表1 分形模型中部分参数与数值

Table 1 Some parameters and values in the fractal model

parameter	value
pore diameter λ / m	$1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-4}$
minimum pore diameter $\lambda_{\text{min}} / \text{m}$	1×10^{-6}
solid particles d_p / m	1×10^{-4}
viscosity $\mu / (\text{Pa} \cdot \text{s})$	1.2×10^{-5}
density $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	8.9×10^{-2}
specific heat capacity $c_p / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	1.43×10^4

图5显示了速度弥散效应随孔喉比的强弱变化情况。由图可知,迂曲分形维数为1.1, 1.2和1.3时,随着孔喉比的增大,速度弥散效应逐渐增强,孔喉比增大到150时,孔喉比对速度弥散效应影响较小。这是因为孔喉比增大时,流体由层流转变为湍流,由式(22)可知,速度大小以孔喉比的次方数倍关系偏离其速度原有平均值;当迂曲分形维数增大时,速度弥散效应增强,即孔道越迂曲,速度弥散效应越显著。

图6为面积分形维数对热弥散系数的影响曲线。从图中可以看出,热弥散系数随面积分形维数的增大而减小,面积分形维数增大意味着固体颗粒在孔道空间的占比减小,导致流体流动时局部水头损失系数减小,速度弥散效应减弱,热弥散系数越小。

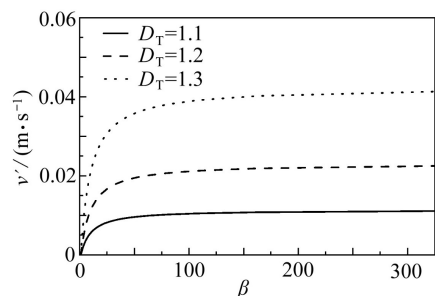


图5 孔喉比对速度弥散效应的影响

Fig. 5 Influences of the pore-throat ratio on the velocity dispersion effect

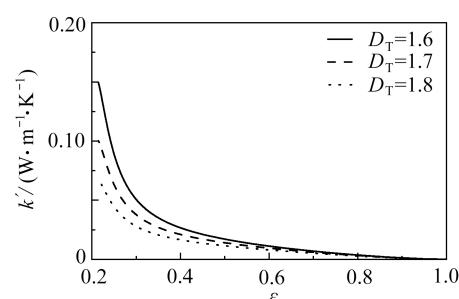


图6 面积分形维数对热弥散系数的影响

Fig. 6 Influences of the area fractal dimension on the thermal dispersion coefficient

图7为迂曲分形维数对热弥散系数的影响曲线,随着迂曲分形维数的增大热弥散系数显著增大。由于孔道的扩张和收缩,流体从层流状态变为湍流状态, D_T 越大表明孔道越弯曲,孔道弯曲使原本的紊流状态加剧,

所以热弥散系数增大。

图 8 为孔喉结构个数对热弥散系数的影响曲线,由图可以看出,随着孔喉结构个数的增加,热弥散系数增大,其增大的趋势逐渐减缓。这是因为孔道空间被固体颗粒占据面积增大,流体通过孔道的路径变长,导致速度弥散效应增强,故热弥散系数增大;当孔喉结构个数足够多时,相当于孔喉比大于 150,孔道空间被连续的固体颗粒填充,与图 4 结论一致,孔喉比不再对速度弥散效应有影响,故热弥散系数变化值较小。

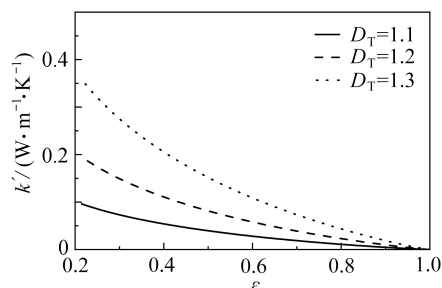


图 7 迂曲分形维数对热弥散系数的影响

Fig. 7 Influences of the tortuous fractal dimension on the thermal dispersion coefficient

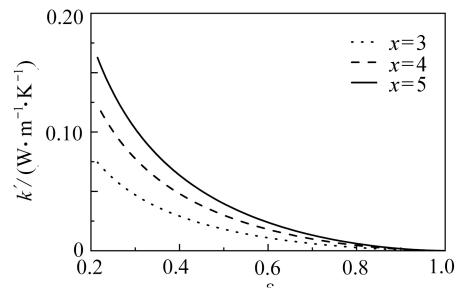


图 8 孔喉结构个数对热弥散系数的影响

Fig. 8 Influences of the number of pore-throat structures on the thermal dispersion coefficient

5 结 论

本文对多孔介质内流体进行力学分析,探究了热弥散系数与流体在多孔介质孔隙内流动的关系,得到的热弥散系数模型普适性高,建立的模型可以确定微观孔隙结构多孔介质热弥散系数,为流体在微观孔隙中的流动研究提供了理论参考。主要得出了以下结论:

- 1) 管道形状发生突变(如扩张、收缩和弯曲)时,流体速度弥散效应增强,热弥散系数增大。
- 2) 孔喉比为 1 时,局部水头损失系数为 0,热弥散系数为 0;孔喉比大于 150 时,孔喉比对速度弥散效应影响较小。
- 3) 本文的热弥散系数模型是基于孔喉结构模型和速度弥散效应得到的,所考虑的参数较全面,无速度弥散效应经验参数,更精确地解释了热弥散过程。

参考文献(References):

- [1] SHOKOUMAND H, BAGHERZADE P, FAZLI M, et al. Thermal dispersion effects on heat transfer of laminar gas flow in a microtube filled with porous medium[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2017, **122**: 281-291.
- [2] 李晓宇, 徐宏阳, 代敏, 等. 热弥散对地理管换热器全尺度传热的影响[J]. 化工学报, 2021, **72**(5): 2547-2559. (LI Xiaoyu, XU Hongyang, DAI Min, et al. Impact of thermal dispersion on full-scale heat transfer of borehole heat exchanges[J]. *CIESC Journal*, 2021, **72**(5): 2547-2559.(in Chinese))
- [3] 陈仲山. 多孔介质内热质弥散及湍流预混火焰特性的双尺度研究[D]. 博士学位论文. 大连: 大连理工大学, 2015. (CHEN Zhongshan. Double-scale study on heat and mass dispersion and turbulent premixed flame characteristics in porous media[D]. PhD Thesis. Dalian: Dalian University of Technology, 2015. (in Chinese))
- [4] 郁伯铭, 徐鹏, 邹明清, 等. 分形多孔介质输运物理[M]. 北京: 科学出版社, 2014. (YU Boming, XU Peng, ZOU Mingqing, et al. *Transport Physics of Fractal Porous Media*[M]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese))
- [5] 周焕林, 严俊, 余波, 等. 识别含热源瞬态热传导问题的热扩散系数[J]. 应用数学和力学, 2018, **39**(2): 160-169. (ZHOU Huanlin, YAN Jun, YU Bo, et al. Identification of thermal diffusion coefficients for transient heat conduction problems with heat sources[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2018, **39**(2): 160-169.(in Chinese))
- [6] JOUYBARI N F, LUNDSTRÖM T S, HELLSTRÖM J. Investigation of thermal dispersion and intra-pore turbulent heat flux in porous media[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2020, **81**: 108523.
- [7] VADASZ P. Heat flux dispersion in natural convection in porous media[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, **53**(17/18): 3394-3404.

- [8] 戚涛, 胡勇, 李骞, 等. 多孔介质速度场和流量场分布[J]. 天然气地球科学, 2020, **208**(3): 28-35. (QI Tao, HU Yong, LI Qian, et al. Velocity and flow field in porous media[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2020, **208**(3): 28-35.(in Chinese))
- [9] MOYNE C, DIDIERJEAN S, SOUTO H, et al. Thermal dispersion in porous media: one-equation model[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2000, **43**(20): 3853-3867.
- [10] HUNT M L, TIEN C L. Effects of thermal dispersion on forced convection in fibrous media[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1988, **31**(2): 301-309.
- [11] YU B M, CHENG P. A fractal permeability model for bi-dispersed porous media[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2002, **45**(14): 2983-2993.
- [12] 张赛, 陈君若, 刘显茜. 气体有效扩散系数的分形模型[J]. 化学工程, 2013, **41**(5): 39-43. (ZHANG Sai, CHEN Junruo, LIU Xianxi. Fractal model of gas effective diffusivity[J]. *Chemical Engineering*, 2013, **41**(5): 39-43.(in Chinese))
- [13] WU J S, YU B M. A fractal resistance model for flow through porous media[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, **50**(19/20): 3925-3932.
- [14] HSU C T, CHENG P. Thermal dispersion in a porous medium[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1990, **33**(8): 1587-1597.
- [15] METZGER T, DIDIERJEAN S, MAILLET D. Optimal experimental estimation of thermal dispersion coefficients in porous media[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, **47**(14/16): 3341-3353.