

DOI:10.16356/j.1005-2615.2021.01.019

纤维多孔介质介观尺度结构对其真空绝热性能的影响

陆家希, 曹 丹, 阚安康, 朱文兵, 袁野百合

(上海海事大学商船学院, 上海 201306)

摘要: 纤维多孔介质在绝热材料领域的应用广受关注, 真空工艺是提升材料绝热性能最为有效的方法。本文研究了真空条件下介观结构对纤维多孔介质的有效导热系数的影响, 改进了已有纤维随机结构生成方法, 运用 D_3Q_{19} 格子 Boltzmann 方法对其有效导热系数进行求解。改进的生成方法可明显改善纤维分布, 穿插率可降低至 3.1%。模拟结果与实验及理论数据具有良好的 consistency。结果表明, 在 1~8 μm 的区间内, 纤维直径越小, 纤维多孔介质在真空下的绝热性能越好, 对内部真空度的依赖性越低; 纤维长度方向与传热方向越不一致, 绝热性能越好; 在方向角到达 90° 时, 绝热性能最佳。研究工作对真空绝热板纤维芯材的结构设计及优化具有重要意义。

关键词: 真空绝热板; 格子玻尔兹曼方法; 有效导热系数; 介观尺度; 纤维多孔介质

中图分类号: TK121 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2021)01-0158-09

Effect of Mesoscopic Scale Structure on Vacuum Adiabatic Performance of Fibrous Porous Material

LU Jiayi, CAO Dan, KAN Ankang, ZHU Wenbing, YUAN Yebaihe

(Merchant Marine College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: The application of fibrous porous material (FPM) in the field of thermal insulation materials is widely concerned, and vacuum process is one of the most effective methods to improve the thermal insulation performance. The effect of microstructure of FPM on its effective thermal conductivity under vacuum is studied. The existing random structure generation method is improved and D_3Q_{19} lattice-Boltzmann method is used to solve the thermal conductivity. The modified generation method can significantly optimize fiber distribution and reduce the interpenetration rate to 3.1%. The simulation results are in good agreement with experimental and theoretical data. Results indicate that FPM with finer diameter leads to smaller pore size and has a more excellent ability to maintain the lower effective thermal conductivity under higher pressure in the range of 1—8 μm . Besides, the more the length direction of fiber is inconsistent with the heat transfer direction, the better the insulation performance is. And the insulation performance reaches the peak when the direction angle reaches 90°. These results are of great significance to the structural design and optimization of the fiber core material of vacuum insulation panel.

Key words: vacuum insulation panels (VIP); lattice-Boltzmann method (LBM); effective thermal conductivity; mesoscopic scale; fibrous porous material (FPM)

随着国家节能减排战略的持续推进, 绝热行业的标准及市场规模逐年提升, 而真空绝热板 (Vacuum insulation panel, VIP) 因其优异的绝热性能, 被认为是最有研究和运用前景的绝热材料之一。为

收稿日期: 2020-08-22; **修订日期:** 2020-12-15

通信作者: 阚安康, 男, 博士, 副教授, E-mail: ankang0537@126.com。

引用格式: 陆家希, 曹丹, 阚安康, 等. 纤维多孔介质介观尺度结构对其真空绝热性能的影响[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(1): 158-166. LU Jiayi, CAO Dan, KAN Ankang, et al. Effect of mesoscopic scale structure on vacuum adiabatic performance of fibrous porous material[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(1): 158-166.

提升 VIP 的绝热性能,延长其使用寿命,近几十年来,人们对各种 VIP 芯材进行了研究^[1-5]。其中,纤维多孔介质(Fibrous porous material, FPM)因具有较高热稳定性、较低的成本以及在高真空度下优异的绝热性能,备受青睐^[6]。揭示 FPM 内气固两相共轭传热机理,对进一步提高玻璃纤维芯材 VIP 的绝热性能、降低其生产成本,具有重要意义。

FPM 内部的传热强度及其有效导热系数(Effective thermal conductivity, ETC)的大小不仅取决于各组分的物理性质和孔隙率(密度),还取决于其介观结构特征。而事实上,鉴于多孔介质的不规则特性,用实验方法直接控制或测量其介观结构是极其困难的。为研究介观结构特征对多孔介质传热的影响,诸多专家学者一直都在积极寻求一种能够用几何参数随机生成复杂孔隙结构的方法。由于其网格化的特点,这一方法很容易与格子 Boltzmann 方法(Lattice-Boltzmann method, LBM)相结合。LBM 被广泛用于模拟多孔介质中的传热传质过程^[7-9],从本质上讲,它作为一种介观尺度的数值模拟方法,在求解复杂流动时具有很大优势:一方面,LBM 不需要复杂的边界条件来保证气固界面能量方程的连续性;另一方面,并行算法可以很容易地与其结合以求解计算量巨大的复杂多孔结构^[10]。比如,Chen 等^[11]采用基于扫描电镜图像(Scanning electron micrographs, SEM)的马尔可夫链蒙特卡罗(Markov chain Monte Carlo, MCMC)方法重建了页岩的三维纳米结构,并运用 LBM 算法研究了孔隙流动和 Knudsen 扩散。Wang 等^[12]提出了一种四参数结构生成算法(Quartet structure generation set, QSGS),并利用 LBM 模型研究了孔隙结构的导热系数,结果与实验数据的对比表明该方法具有较高的精度,可用于多相多孔结构的重建^[13-14]。基于 Wang 等的算法,Hussain 等^[15]进一步提出了一种宏观-微观孔随机生成方法,并将其应用于多孔介质有效质量扩散系数的模拟,与单纯基于物理参数和网格的 QSGS 方法相比,该方法生成的微观结构更接近于实际孔隙的几何特征。此外,Liu 等^[16]利用层析重建方法对多孔介质进行了重建,并进行了孔隙尺度 LBM 模拟,推导了流动与传热的关系式。同样,Qu 等^[17]也引入随机生成方法,提高了气凝胶多孔结构导热系数的模拟精度。

尽管这些生成方法已经得到了广泛的验证,并对于各种多孔介质(如黏土、气凝胶、二氧化硅等)的重建和生成具有很高的实用性,但由于纤维的细长形状以及由此产生的各向异性,以上方法很难直

接应用于 FPM。2009 年,Wang 等^[18]首次对三维纤维材料的 ETC 进行了研究,提出了一种三维纤维结构生成方法,并结合 LBM 对碳纤维复合材料的导热系数进行了模拟。与此同时,He 等^[19]还利用该方法分析了微观结构对纤维材料有效热扩散系数的影响,包括结构各向异性、体系含水量、微观结构形态和分层空间。

在上述研究基础上,本文提出了一种改进的 FPM 三维结构随机生成算法,减少纤维的穿插,改善其分布,并采用 D_3Q_{19} -LBM 方法求解了其在不同真空度下的有效导热系数,详细讨论了 FPM 的介观结构特征(即直径和方向角)对 ETC 的影响。

1 纤维介观结构生成方法

以两相(纤维/空气)FPM 为对象,结合图 1 所示电镜扫描图像获得的介观结构参数,本文所改进的 FPM 生成算法的流程图如图 2(a)所示,具体生成过程可以描述为:

(1) 初始化将所有网格节点($N_x \times N_y \times N_z$)为气相,每个格子步长为 $1 \mu\text{m}$ 。

(2) 基于给定的核心分布概率 c_d ,将一个非固相的点随机生成成为固相生长核心(x_0, y_0, z_0)。

(3) 给出倾角 α 和方位角 β ,以确定纤维的生长方向。 α 表示纤维与 z 轴之间的角度, β 表示纤维与 y 轴在平面 z 中的投影角;给出长度 l_f 和直径 d_f 以确定纤维几何结构,如图 2(b)所示。

(4) 遍历所有网格,若从任意点(x, y, z)到核心点的法向距离 $d_{(x,y,z)}$ 和轴向距离 $l_{(x,y,z)}$ 分别小于 $\frac{d_f}{2}$ 和 $\frac{l_f}{2}$,则该点生长为固相。若该点已经是固相点,则将其标记为重合点。

(5) 重复步骤(2~4),直到孔隙率达到给定值 ϵ_0 。

法向距离 $d_{(x,y,z)}$ 和轴向距离 $l_{(x,y,z)}$ 可以表示为

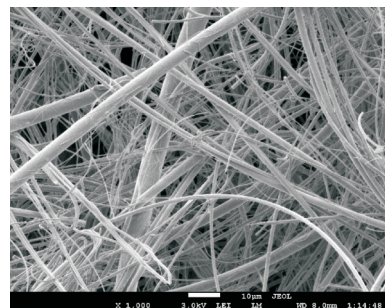
$$d_{(x,y,z)} = \left\| (\sin \alpha \cos \beta, \sin \alpha \sin \beta, \cos \beta) \times (x - x_0, y - y_0, z - z_0) \right\| \quad (1)$$


图 1 纤维多孔介质的 SEM 图像(放大 1 000 倍)
Fig.1 SEM image of FPM (Magnified 1 000 times)

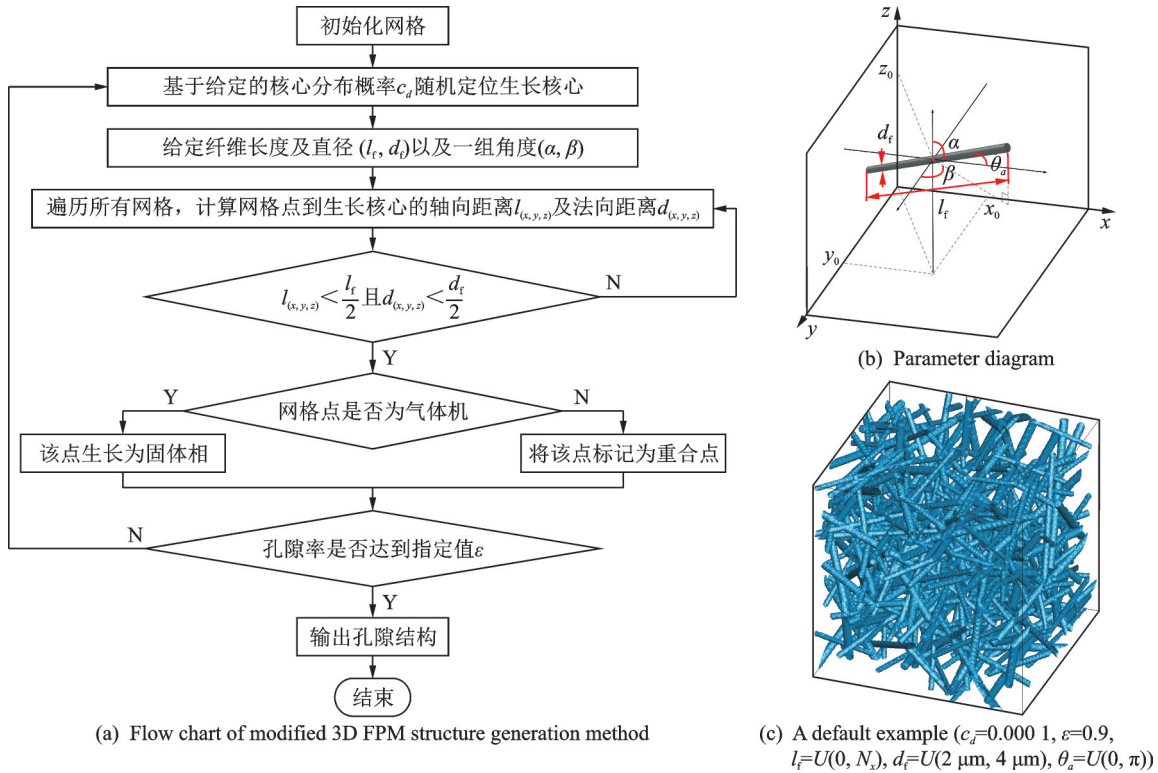


图2 纤维介观结构生成过程
Fig.2 Mesoscopic structure generation process of FPM

$$l_{(x,y,z)} = \|(x - x_0, y - y_0, z - z_0)\| \quad (2)$$

如上所述, FPM介观结构的生成过程是基于6个参数而进行的, 分别是: 芯分布概率 c_d 、角度 α 和 β 、长度 l_f 、直径 d_f 和孔隙率 ϵ 。步骤(3)中的 l_f 、 d_f 、 α 以及 β 既可以为常数, 也可以是基于均匀、正态或任何其他分布函数的随机值。本文 l_f 和 d_f 分别被默认为在 $[0, N_x]$ 和 $[2 \mu\text{m}, 4 \mu\text{m}]$ 内满足均匀分布的随机值。

为便于讨论, 文中引入了方向角 $\theta_a = \pi/2 - \arcsin(\sin\alpha \cdot \sin\beta)$, 其物理意义表示总传热方向与纤维长度方向的夹角, 该方向角也默认为满足 $[0, \pi]$ 内均匀分布的随机值。

如图1所示 FPM 中的纤维应该相互交织而不是相互穿插的, 本文定义了一个穿插率 φ_i 来描述一根纤维在生成过程中穿过另一根纤维的概率

$$\varphi_i = 2n_i / C_{n_i}^2 \quad (3)$$

式中 n_i 和 n_i 分别为纤维总数和标记的重合点的数量。由图3可知, 随着网格数量的增加, 穿插率逐渐减小并在 $N_x < 200$ 时趋于稳定。综合考虑穿插率、计算效率以及后续 LBM 算法的计算稳定性和精度, 将计算域设置为 $200 \times 200 \times 200$ 的网格, 默认生成结果如图2(c)所示。图4为用本文改进的生成方法生成的具有不同纤维直径和方向角的 FPM 介观结构。

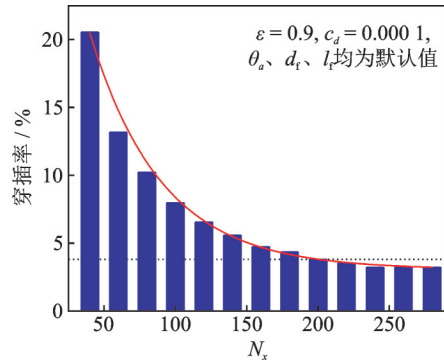
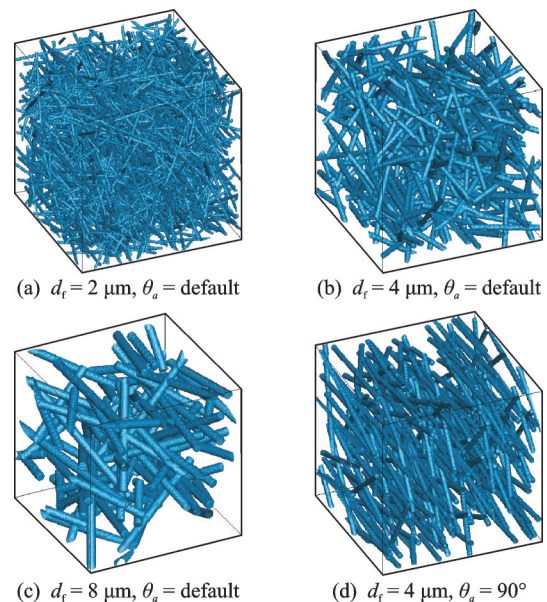


图3 穿插率的网格依赖性
Fig.3 Grid dependence of interpolation rate



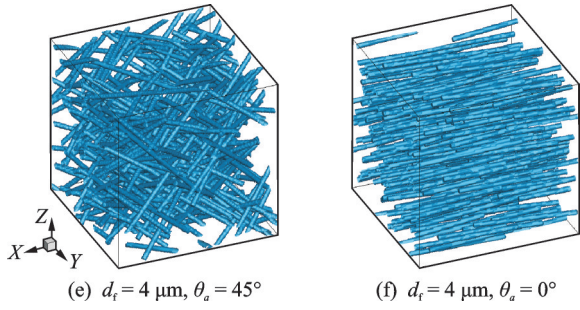


图 4 基于改进的随机结构生成方法生成的不同参数的 FPM 介观结构($c_d = 0.0001, \epsilon = 0.9, l_f = \text{default}$)

Fig.4 Mesoscopic structures of FPM with different parameters generated by the modified random structure generation method ($c_d = 0.0001, \epsilon = 0.9, l_f = \text{default}$)

2 物理方法与数值求解

2.1 有效导热系数

多孔介质的有效导热系数由以下组分耦合而成

$$\lambda_e = \lambda_{\text{solid}} + \lambda_{\text{gas}} + \lambda_{\text{conv}} + \lambda_{\text{rad}} + \lambda_{\text{coup}} + \lambda_{\text{leak}} \quad (4)$$

式中: λ_{solid} 及 λ_{gas} 分别表示固相和气相的导热系数; λ_{leak} 表示由热泄漏引起的导热系数增量,在保温材料中可忽略不计; λ_{coup} 表示耦合传热的导热系数,一般忽略不计^[20]; λ_{conv} 表示对流换热的等效导热系数,以往的研究表明,在孔隙尺寸小于 1 mm 或纤维密度大于 20 kg/m³时,对流换热可以忽略不计^[21]。另外,出于计算效率的考虑,辐射导热系数直接采用式(5)计算^[22]

$$\lambda_{\text{rad}} = \frac{4K_B T_m^3 (d_f / (1 - \epsilon)) L}{L + [d_f / (1 - \epsilon)] (1/e - 1)} \quad (5)$$

式中: $K_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$; L 为冷热板之间的距离; T_m 为平均温度; e 为纤维材料的发射率。

由此可得,将 LBM 计算域划分为固体区域(纤维) Ω_s 和气体区域 Ω_g (空气),如图 5 所示。不同的区域具有不同的固有物理属性,如密度 ρ 、热容 c_p 和导热系数 λ 。

根据以上分析,本文采用如下共轭传热控制方程

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T \quad (6)$$

式中: c_p 为比热容; T 为网格点温度; t 为离散时间; λ 为导热系数。

$$e_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

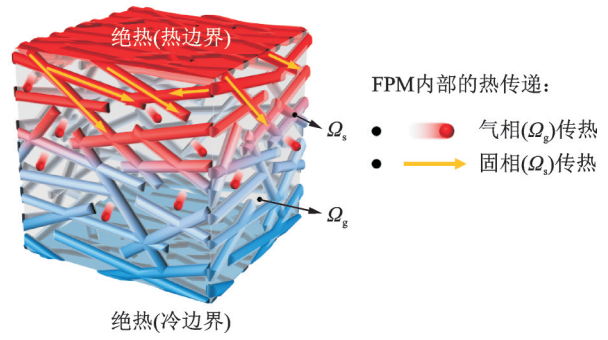


图 5 LBM 计算域示意图

Fig.5 Schematic diagram of LBM computing domain

2.2 格子玻尔兹曼求解器

本文采用的 D₃Q₁₉模型如图 6 所示。

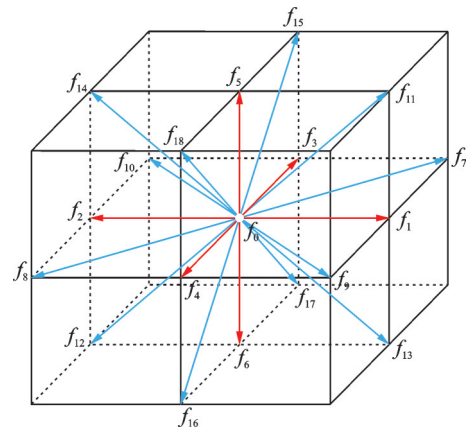


图 6 D₃Q₁₉模型示意图

Fig.6 Schematic diagram of D₃Q₁₉-LBM model

碰撞过程可表示为

$$f_i(x + e_i \delta t, t + \delta t) - f_i(x, t) = -\frac{1}{\tau} [f_i(x, t) - f_i^{\text{eq}}(x, t)] \quad (7)$$

流动过程可表示为

$$f_i(x + e_i \delta t, t + \delta t) = f_i(x, t) \quad (8)$$

式中: f_i 为位置 x 处在离散方向 i 上的温度演化函数; e_i 为离散速度; δt 为时间步长; τ 为无量纲弛豫时间; f_i^{eq} 为局部平衡函数,因未考虑气相的对流和传质,所以气固两相的 f_i^{eq} 都可由式(9~10)给出

$$f_i^{\text{eq}}(x, t) = w_i T(x, t) \quad (9)$$

$$T(x, t) = \sum_{i=0}^8 f_i \quad (10)$$

式中: $T(x, t)$ 为局部温度; w_i 为权重系数,取值如下

$$w_i = \begin{cases} 1/3 & i = 0 \\ 1/18 & i = 1 \sim 6 \\ 1/36 & i = 7 \sim 18 \end{cases} \quad (11)$$

D₃Q₁₉模型的离散速度可以表示为

无量纲弛豫时间可表示为

$$\tau = \frac{3}{2} \frac{\lambda}{\rho c_p c^2 \delta t} + 0.5 \quad (13)$$

固相和气相的无量纲弛豫时间都可用方程(13)表示。为了反映宏观上的热流密度, ρc_p 取 1^[23-24]。

对于气相来说,气体分子在FPM内的运动受到高度限制,因此微孔内的气体导热系数 λ 与自由空间内的 λ_{g0} 不同 Knudsen 数下有所不同

$$\lambda = \frac{\lambda_{g0}}{1 + 2\beta_e Kn} \quad (14)$$

式中: $\lambda_{g0} = 0.0242 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; β_e 为描述气体分子与固体边界之间能量传递的系数,由普朗特数和热扩散系数决定^[25-26],对于空气而言, β_e 通常取 1.63; Kn 为 Knudsen 数,可用式(15)表示

$$Kn = \frac{K_B T}{\sqrt{2} \pi d_g^2 p_g} \cdot \frac{1}{l_{cs}} \quad (15)$$

式中: $K_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$; $d_g = 3.72 \times 10^{-10} \text{ m}$; l_{cs} 为纤维多孔介质的特征孔径,本文 $l_{cs} = 6.15 d_f \epsilon^{3.35}$ 。

有效导热系数可通过方程(16)求解

$$\lambda_e = \frac{L \cdot \int q dA}{\Delta T \int dA} \quad (16)$$

式中: ΔT 为冷板和热板之间的温差; q 为热流密度,可根据 f_i 计算得到

$$q = \frac{\tau - 0.5}{\tau} \sum_{i=0}^{18} e_i f_i \quad (17)$$

2.3 边界条件

对于传热问题,本文采用 Zou 和 He^[27] 提出的非平衡分布反弹格式来处理等温边界

$$f_k = f_k^{eq} - (f_{k'} - f_{k'}^{eq}) \quad (18)$$

式中下标 k 代表未知方向,而 k' 则表示对应的相反方向。

绝热边界采用反射格式^[28]

$$f_k = f_{k'} \quad (19)$$

详细的边界处理条件如表 1 和图 7 所示。

表 1 具体边界处理格式

Table 1 Specific boundary treatment format

宏观边界	边界条件	边界处理格式
热板(左边界)	等温边界($T_{hot} = 302 \text{ K}$)	非平衡反弹格式
前边界	绝热($q=0$)	Neumann 边界
后边界	绝热($q=0$)	Neumann 边界
上边界	绝热($q=0$)	Neumann 边界
下边界	绝热($q=0$)	Neumann 边界
冷板(右边界)	等温边界($T_{cold} = 298 \text{ K}$)	非平衡反弹格式

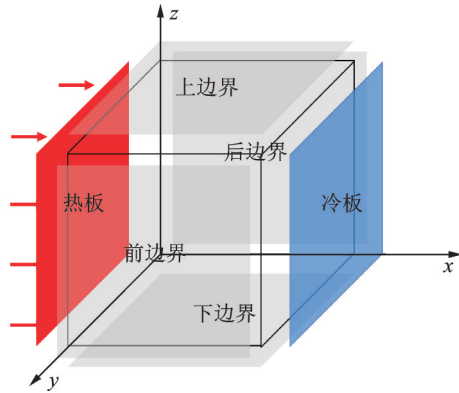


图7 边界条件示意图

Fig.7 Boundary conditions

3 对比及验证

本文模拟了FPM的ETC随压力 p_g 的变化情况,以验证改进的纤维随机结构生成方法和 D_3Q_{19} -LBM 的有效性。纤维直径被假设为在 $[7 \mu\text{m}, 12 \mu\text{m}]$ 内满足均匀分布。

模拟结果与已发表数据的对比如图 8 所示。结果表明,随气体压力的增加, λ_e 的变化都可分为 3 个阶段:当 $p_g < 50 \text{ Pa}$ 时, λ_e 基本稳定在理想的低值 ($< 4 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$);但随着压力的进一步增加, λ_e 迅速增加;当 $p_g > 10^4 \text{ Pa}$ 时, λ_e 趋于稳定,不再随压力的升高而增加。模拟结果与已发表数据基本相符,它们之间的细微偏差可归因于以下原因:(1) 在本研究中,特征孔径代替精确的局部孔径进行 LBM 迭代;(2) 辐射导热系数被视为一个固定值。

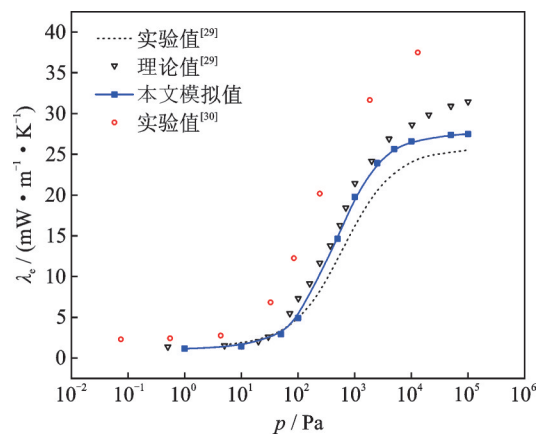


图8 模拟结果与已发表数据之间的比较

Fig.8 Comparison of simulation results with published data

4 结果与讨论

本文详细讨论了真空度、纤维直径和纤维方向角对FPM的绝热性能,尤其对有效导热系数的影响。

4.1 气体压力和纤维直径对绝热性能的影响

真空度在FPM芯材真空绝热板的传热过程中起着关键作用。以往的研究表明,FPM芯材在极低压力(特别是 ≤ 50 Pa)下具有优异的绝热性能,但对内部压力的升高也更为敏感^[31-32]。这种特性可能与其更高的开孔率和更大的孔径(相较于二氧化硅或气凝胶材料)有关。因此,本文选取了5种直径,即 $d_f=1, 2, 4, 6$ 和 $8 \mu\text{m}$ 的FPM作为研究对象。用相同的孔隙率($\epsilon=0.9$)生成了5种直径对应的介观结构,其余参数设为默认值($c_d=0.0001, l_f=U(0, N_x), \theta_a=U(0, \pi)$)。

如图9所示,虽然不同纤维直径的FPM,其ETC在压力 p_g 变化时具有相似的趋势,但其对压力的敏感程度不同。若以 $\lambda_c=8 \text{mW}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 作为失效阈值, $d_f=8 \mu\text{m}$ 的FPM在 $p_g=100$ Pa时就达到阈值。纤维直径越细,则失效压力越高。由图9还可以发现,在 $p_g=1$ Pa时, $d_f=8 \mu\text{m}$ 和 $d_f=1 \mu\text{m}$ 的ETC差值达到了 $1.41 \text{mW}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 。这种明显的差距同样可在 $p_g=10^5$ Pa下观察到。由图10可知,该现象可以由Knudsen扩散原理解释:FPM孔隙特征尺寸(l_c)与直径密切相关,图10(a)中所示介观结构具有比图10(b)中所示具有更细

的纤维直径,在相同孔隙率下具有更大的纤维数量。故而图10(a)所示结构比图10(b)所示具有更致密的纤维排列、更小的孔径和更均匀的孔隙分布。根据Knudsen扩散理论,较小的孔径意味着较小的分子平均自由程,可大大抑制气体热传导。具有较小纤维直径的FPM(图10(a)和图10(c))在真空或大气压下表现出更均匀的等温线分布,这表明更小的纤维直径对于提升FPM的绝热性能、降低热桥效应等具有重要意义。

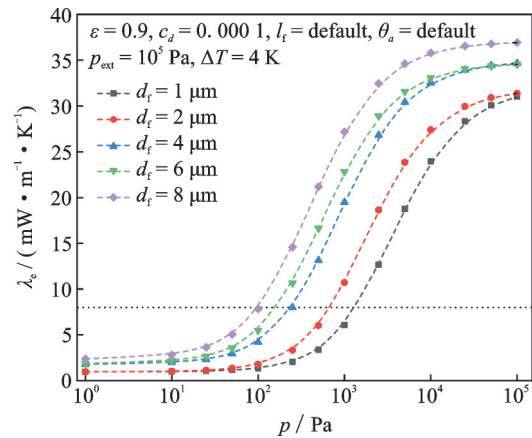


图9 不同 d_f 下 λ_e 随压力变化规律

Fig.9 Variation of effective thermal conductivity with pressure under different d_f

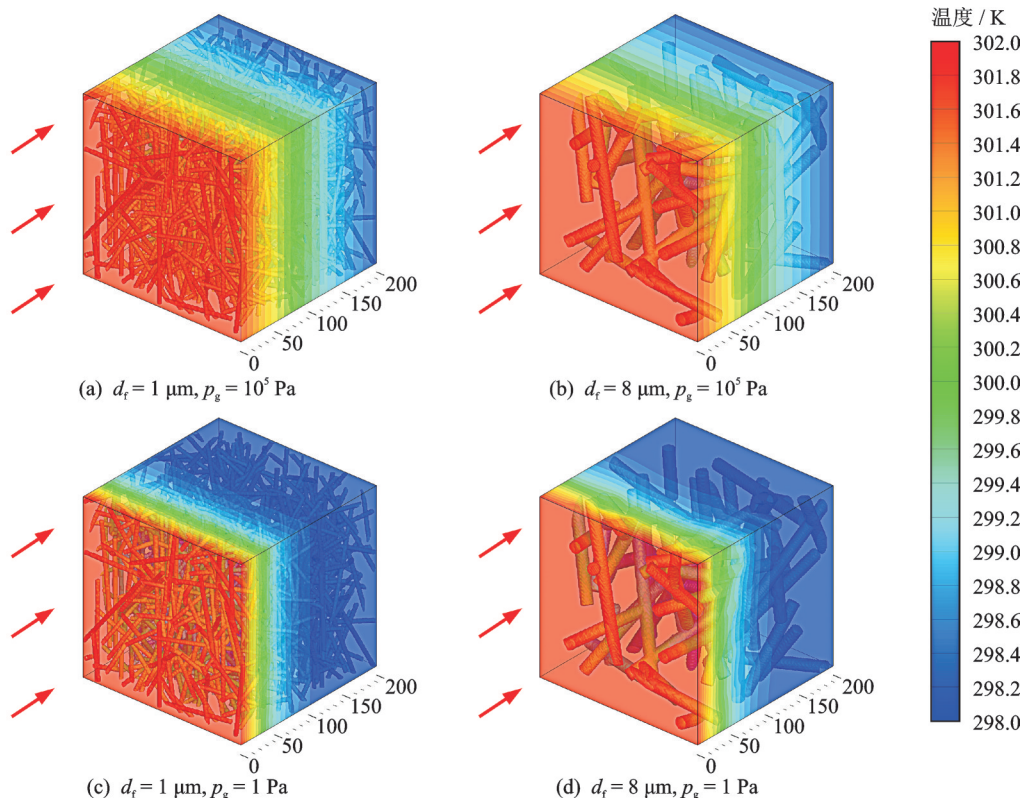


图10 不同直径的FPM结构在两种压力条件下的稳态温度分布($\epsilon=0.9, c_d=0.0001, l_f=\text{default}, \theta_a=\text{default}$)

Fig.10 Steady state temperature distribution of FPM structures with different diameters under two pressure conditions ($\epsilon=0.9, c_d=0.0001, l_f=\text{default}, \theta_a=\text{default}$)

4.2 方向角对保温性能的影响

为便于论述,本文定义了纤维长度的两个典型生长方向,即垂直于传热方向和平行于传热方向。由图 11 可知, λ_e 与 θ_a 呈负相关,并在 θ_a 达到 90° 时, λ_e 达到极小值。由图 12 知,固相的传热是高度定向的,即沿着纤维长度的方向。当 θ_a 达到 90° 时,热通道主要沿着垂直于传热方向的界面,而 θ_a 减小时,热通道随即变短,传热加强,温度场发育更广。Chen 等^[33]的实验也得出了相同结论。在低压下, λ_e 的变化范围扩大,是因为低压下气相传热被大大抑制,固相传热占主导作用,从而导致固相的导热系数对 ETC 的影响更为显著。

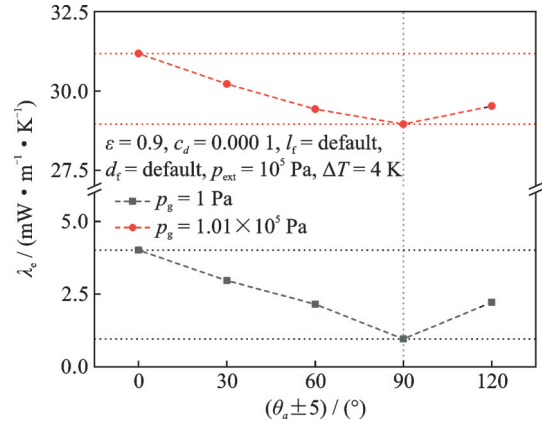


图 11 ETC 随方向角的变化规律
Fig.11 Dependence of ETC on the orientation angle

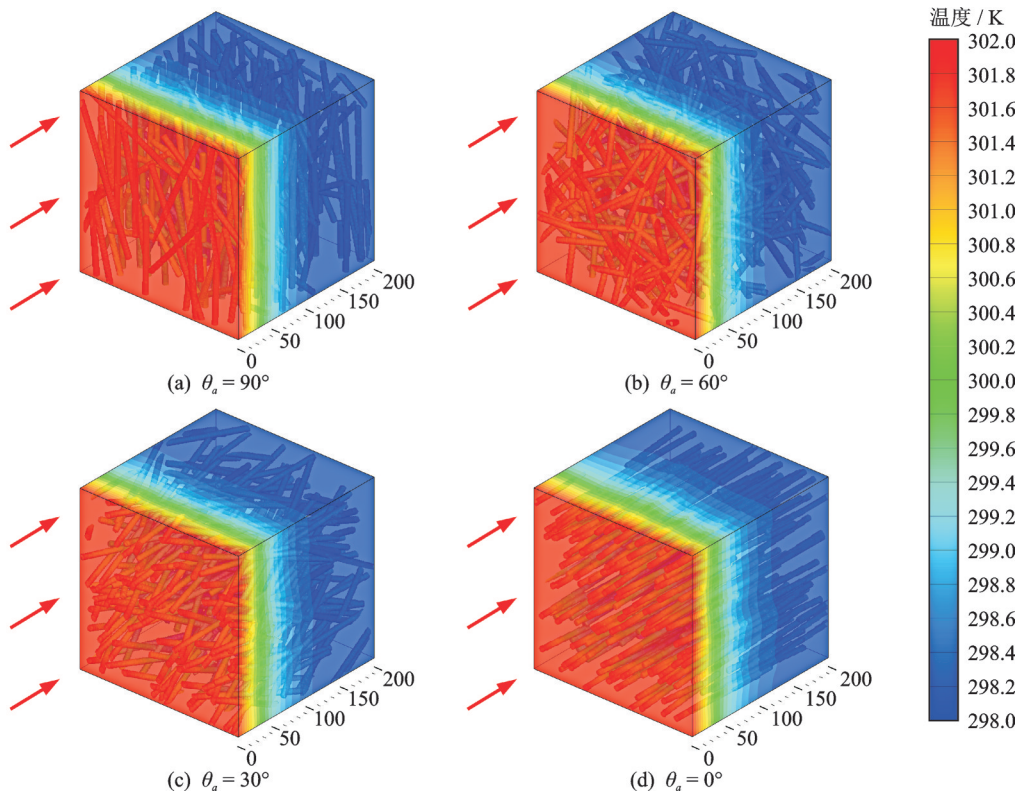


图 12 不同方向角的 4 种 FPM 结构在 $p_g = 1$ Pa 下的稳态温度分布($\epsilon=0.9, c_d = 0.000 1, l_f = \text{default}, d_f = 4 \mu\text{m}, p_g = 1$ Pa)
Fig.12 Steady state temperature distribution of four FPM structures with different orientations under pressure of 1 Pa ($\epsilon=0.9, c_d = 0.000 1, l_f = \text{default}, d_f = 4 \mu\text{m}, p_g = 1$ Pa)

5 结 论

本文在改进 3D 纤维多孔结构生成方法的基础上,结合 D_3Q_{19} 格子 Boltzmann 方法,构建了一种用于研究纤维多孔介质真空绝热性能的数值计算模型,详细讨论了介观结构对有效导热系数的影响因素。改进的生成方法可有效减少纤维穿插,穿插率降低至 3.1% 以内,更接近真实纤维排布结构。与实验数据及理论值相比,模型具有较高的可靠性,可作为纤维结构优化的依据。模拟结果总结如下:

(1) 揭示了有效导热系数随纤维直径变化的规

律。在 $1 \sim 8 \mu\text{m}$ 的区间内,纤维多孔介质介观结构直径越细,则孔径越小,有效导热系数越小,且在较高气压下保持较低有效导热系数的能力越强。

(2) 有效导热系数受纤维多孔介质内部纤维方向角的影响。当方向角达到 90° 时,有效导热系数数值最小,即纤维长度方向与传热方向越一致,传热能力越强,绝热性能越差。

参考文献:

[1] KIM J, SONG T H. Vacuum insulation properties of glass wool and opacified fumed silica under variable

- pressing load and vacuum level[J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2013, 64: 783-791.
- [2] 陈照峰,李承东,陈清,等.真空绝热板芯材研究进展[J].*科技导报*, 2014, 32(9): 59-62.
CHEN Zhaofeng, LI Chengdong, CHEN Qing, et al. Research progress of vacuum insulation panel core material[J]. *Science & Technology Review*, 2014, 32(9): 59-62.
- [3] CHOI B, YEO I, LEE J, et al. Pillar-supported vacuum insulation panel with multi-layered filler material[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 102: 902-910.
- [4] 阚安康,吴亦农,徐志峰,等.基于Lattice-Boltzmann方法的多孔介质真空绝热特性[J].*南京航空航天大学学报*, 2017, 49(1): 17-23.
KAN Ankang, WU Yinong, XU Zhifeng, et al. Vacuum thermal insulation property analysis of porous material based on lattice-Boltzmann method[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2017, 49(1): 17-23.
- [5] ZHANG H, FANG W Z, LI Y M, et al. Experimental study of the thermal conductivity of polyurethane foams[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 115: 528-538.
- [6] 温永刚,王先荣,杨建斌,等.真空绝热板(VIP)技术及其发展[J].*低温工程*, 2008(6): 35-39.
WEN Yonggang, WANG Xianrong, YANG Jianbin, et al. Vacuum insulation board (VIP) technology and its development[J]. *Cryogenics*, 2008(6): 35-39.
- [7] WANG J, WANG M, LI Z. A lattice Boltzmann algorithm for fluid-solid conjugate heat transfer[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2007, 46(3): 228-234.
- [8] GAO Dongyan, CHEN Zhenqian, CHEN Linghai, et al. A modified lattice Boltzmann model for conjugate heat transfer in porous media[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 105: 673-683.
- [9] KARANI H, HUBER C. Lattice Boltzmann formulation for conjugate heat transfer in heterogeneous media[J]. *Physical Review E*, 2015. DOI: 10.1103/PhysRevE.91.023304.
- [10] LIU H, KANG Q, LEONARDI C R, et al. Multi-phase lattice Boltzmann simulations for porous media applications[J]. *Computational Geosciences*, 2014, 20(4): 777-805.
- [11] CHEN L, ZHANG L, KANG Q, et al. Nanoscale simulation of shale transport properties using the lattice Boltzmann method: Permeability and diffusivity[J]. *Nature*, 2015. DOI: 10.1038/srep08089.
- [12] WANG M, WANG J, PAN N, et al. Mesoscopic predictions of the effective thermal conductivity for microscale random porous media[J]. *Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics*, 2007, 75(3): 036702.
- [13] 阚安康,张婷婷,曹丹.基于分形理论的纳米颗粒多孔介质真空导热特性[J].*化工学报*, 2013, 64(11): 4008-4014.
KAN Ankang, ZHANG Tingting, CAO Dan. Vacuum thermal conduction characteristic of nano-granule porous medium using fractal theory[J]. *CIESC Journal*, 2013, 64(11): 4008-4014.
- [14] 李仁民,刘松玉,方磊,等.采用随机生长四参数生成法构造黏土微观结构[J].*浙江大学学报(工学版)*, 2010, 44(10): 1897-1901.
LI Renmin, LIU Songyu, FANG Lei, et al. Microstructure of clay generated by quartet structure generation set[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2010, 44(10): 1897-1901.
- [15] HUSSAIN M, TIAN E, CAO T F, et al. Pore-scale modeling of effective diffusion coefficient of building materials[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 90: 1266-1274.
- [16] LIU Z, WU H. Pore-scale study on flow and heat transfer in 3D reconstructed porous media using microtomography images[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 100: 602-610.
- [17] QU Z G, FU Y D, LIU Y, et al. Approach for predicting effective thermal conductivity of aerogel materials through a modified lattice Boltzmann method[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 132: 730-739.
- [18] WANG M, KANG Q, PAN N. Thermal conductivity enhancement of carbon fiber composites[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29(2/3): 418-421.
- [19] HE X, GUO Y, LI M, et al. Effective gas diffusion coefficient in fibrous materials by mesoscopic modeling[J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2017, 107: 736-746.
- [20] WEI G, LIU Y, ZHANG X, et al. Thermal conductivities study on silica aerogel and its composite insulation materials[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2011, 54(11/12): 2355-2366.
- [21] HUSSAIN M, TAO W Q. Numerical prediction of effective thermal conductivity of ceramic fiber board using lattice Boltzmann method[J]. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 2018, 74(6): 1285-1300.
- [22] HAGER N E, STEERE R C. Radiant heat transfer in fibrous thermal insulation[J]. *Journal of Applied Physics*, 1967, 38(12): 4663-4668.
- [23] XIE C, WANG J, WANG D, et al. Lattice Boltzmann modeling of thermal conduction in compos-

- ites with thermal contact resistance[J]. *Communications in Computational Physics*, 2015, 17(4): 1037-1055.
- [24] GUO Y, HE X, HUANG W, et al. Microstructure effects on effective gas diffusion coefficient of nanoporous materials[J]. *Transport in Porous Media*, 2019, 126(2): 431-453.
- [25] ZHAO J J, DUAN Y Y, WANG X D, et al. Effects of solid-gas coupling and pore and particle microstructures on the effective gaseous thermal conductivity in aerogels[J]. *Journal of Nanoparticle Research*, 2012. DOI: 10.1007/s11051-012-1024-0.
- [26] DI X, GAO Y, BAO C, et al. Thermal insulation property and service life of vacuum insulation panels with glass fiber chopped strand as core materials[J]. *Energy and Buildings*, 2014, 73: 176-183.
- [27] ZOU Q, HE X. On pressure and velocity boundary conditions for the lattice Boltzmann BGK model[J]. *Physics of Fluids*, 1997, 9(6): 1591-1598.
- [28] SHEIKHOLESAMI M, ASHORYNEJAD H R, RANA P. Lattice Boltzmann simulation of nanofluid heat transfer enhancement and entropy generation[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2016, 214: 86-95.
- [29] DI X, GAO Y, BAO C, et al. Optimization of glass fiber based core materials for vacuum insulation panels with laminated aluminum foils as envelopes[J]. *Vacuum*, 2013, 97: 55-59.
- [30] HEINEMANN U, CAPS R, FRICKE J. Characterization and optimization of filler materials for vacuum insulations[J]. *Vuoto Scienza et Tecnologia*, 1999, 28(1/2): 43-46.
- [31] FRICKE J, HEINEMANN U, EBERT H P. Vacuum insulation panels—From research to market[J]. *Vacuum*, 2008, 82(7): 680-690.
- [32] BRUNNER S, WAKILI K G, STAHL T, et al. Vacuum insulation panels for building applications—Continuous challenges and developments[J]. *Energy and Buildings*, 2014, 85: 592-596.
- [33] CHEN Zhou, CHEN Zhaofeng, YANG Zhaogang, et al. Preparation and characterization of vacuum insulation panels with super-stratified glass fiber core material[J]. *Energy*, 2015, 93: 945-954.

(编辑:胥橙庭)