

基于 LBM 的纤维多孔介质介尺度构建及其有效导热系数研究

黄亮¹ 阚安康^{2*} 陈照峰³ 黑玉林²

1 上海大众祥源动力供应有限公司, 上海 201805

2 上海海事大学商船学院, 上海 201306

3 南京航空航天大学材料科学与技术学院, 江苏 南京 211106

[摘要]文中提出一种改进的三维纤维多孔介质介尺度生成方法和 D3Q19LBM 的整体数值方法,用于模拟其在真空下的传热过程。通过扫描电镜获得到改进的纤维介观结构参数,包括:核心生成概率、纤维长度、直径、方向角和重合率,建立了真空下有效导热系数计算模型,推导了 D3Q19-BGK-LBM 离散速度模型、分布函数、分布函数的演化方程及边界条件。深研了纤维直径、长度、方向角等因素对纤维有效导热系数的影响规律。研究发现:有效导热系数随纤维体积分数的变化呈非线性,存在最小值。纤维有效导热系数与直径成反比,与长度成正比,方向角对有效导热系数有影响,方向角越接近 90°,则纤维固则有效导热系数越低。通过与已有实验数据和理论数据对比,验证了本模型的可靠性。

[关键词]真空绝热板;纤维多孔介质;格子-Boltzmann 方法;有效导热系数

DOI: 10.33142/ect.v2i2.11338

中图分类号: TU531.6

文献标识码: A

Mesoscale Construction and Effective Thermal Conductivity Study of Fiber Porous Media Based on LBM

HUANG Liang¹, KAN Ankang^{2*}, CHEN Zhaofeng³, HEI Yulin²

1 Shanghai Dazhong Xiangyuan Power Supply Co., Ltd., Shanghai, 201805, China

2 Merchant Maritime College, Shanghai Maritime University, Shanghai, 201306, China

3 College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu, 211106, China

Abstract: An improved method for generating the mesoscale of three-dimensional fibrous porous media and an overall numerical method of D3Q19LBM are proposed in the article to simulate its heat transfer process under vacuum. Improved fiber mesoscopic structural parameters were obtained through scanning electron microscopy, including core generation probability, fiber length, diameter, directional angle, and coincidence rate. A calculation model for effective thermal conductivity under vacuum was established, and the evolution equations and boundary conditions of D3Q19-BGK-LBM discrete velocity model, distribution function, and distribution function were derived. We have conducted in-depth research on the influence of factors such as fiber diameter, length, and directional angle on the effective thermal conductivity of fibers. Research has found that the effective thermal conductivity varies nonlinearly with the volume fraction of fibers, and there is a minimum value. The effective thermal conductivity of fibers is inversely proportional to their diameter and directly proportional to their length. The direction angle has an impact on the effective thermal conductivity, and the closer the direction angle is to 90°, the lower the effective thermal conductivity of fibers. The reliability of this model was verified by comparing it with existing experimental and theoretical data.

Keywords: vacuum insulation board; fiber porous media; lattice-Boltzmann method; effective thermal conductivity

引言

2020年9月22日,中国政府在第七十五届联合国大会上承诺:“中国将提高国家自主贡献力度,采取更加有力的政策和措施,二氧化碳排放强度力争于2030年前达到峰值,争取2060年前实现碳中和。”采用先进绝热材料是节能减排最为有效的举措。真空绝热板(Vacuum Insulation Panel, VIP)与传统保温材料相比, VIP 绝热性能卓越,其有效导热系数(Effective Thermal Conductivity, ETC)同等厚度下热阻为一般保温材料10倍以上,以不足传统保温材料1/3的厚度。目前已在冰箱、冷藏集装箱、建筑等领域得到初步运用^[1-2]。

VIP 主要由芯材、隔气结构和吸气剂三部分组成^[3]。芯材的性能,如闭孔率、孔隙率、容重等指标直接影响 VIP 的保温性能和使用寿命。因此,近年来大家对多种 VIP 芯材进行了研究^[4-8]。其中,因热稳定性高、成本低廉以及高真空度下的优异绝热性能的纤维多孔介质(Fibrous Porous Material, FPM)材料,备受青睐^[9]。目前的研究成果多集中在案例分析及实验制备上,而导热机理、模拟仿真及规律分析、实验验证等方面还很欠缺。因此,对 FPM 真空复合绝缘材料进行介尺度模拟研究是很有必要的。

近年来,主要通过以下两种方法建立多孔介质的物理模型。第一种方法基于理想化的基本单元及分形理论。

ENGUEHARD 等^[10]将纳米多孔二氧化硅的 TEM 图像简化后作为基本块, 重复排列生成多孔介质物理模型。SPAGNOL 等^[11]基于雪花状的基本单元, 建立了一种具有分形几何特征的纳米多孔二氧化硅模型。此外, KWON 等^[12]利用简化的单元模型推导了粉末、泡沫、交错纤维等多孔材料在真空下的导热系数, 并将这些值与 FRICKE 等^[13]的数据进行了比较。第一种方法的优点在于几何结构相对简单, 但是目前大多数研究集中于理论研究方面。

第二种方法基于非均匀的可控随机过程。第二种方法的优点则是生成过程更接近真实多孔介质的生成过程。LALLICH 等^[14]采用这种方法生成了分形维数在 1.8 和 2.5 之间的纳米多孔二氧化硅的二维模型。而运用最广泛的是 WANG 等^[15]提出的四参数结构生成算法, 这种方法由于较强的扩展性, 自提出以来被不断改进以应用于不同结构特征的多孔介质。该过程可以很容易地与广泛用于模拟多孔介质传热传质的 LBM (Lattice Boltzmann Method, LBM) 相结合。LBM 是一种基于介观尺度的流体力学计算方法, 它在复杂流动问题求解时优势显著: 一方面, 气固界面能量方程的连续性不需要复杂的边界条件来保证; 另一方面, 可以很容易地与并行算法结合, 用来求解计算量巨大的复杂多孔结构^[16]。

本文提出一种结合了改进的三维纤维多孔介质介观结构生成方法和 D3Q19-LBM 方法的整体数值方法, 用于模拟 FPM 在真空下的传热过程。

1 三维纤维多孔结构的构建

本文采用扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscope, SEM) 获取了 FPM 样本材料的图像。如图 1 所示, FPM 内部的空间构造在垂直于视角的面上较为无序, 纤维长度参差不齐, 纤维直径粗细不一, 纤维的角度分布情况也是随机的。

将 SEM 图像按上述过程处理后, 图像矩阵大小 1280×960dpi, 其中二值化阈值取 0.32。参照原图标尺, 读取图像矩阵上的相应长度, 可得纤维直径分布范围为 1~7 μm; 纤维长度为 50~70 倍纤维直径。

本文以两相 (纤维/空气) FPM 为对象, 通过电镜扫描图像获得的介观结构参数 (图 1 所示), 推研了一种改进的 FPM 三维结构随机生成算法。算法假设纤维固相为生长相, 孔隙气体为非生长相。具体生成过程如下:

(1) 将所有网格节点 $N_x \times N_y \times N_z$ 始化为气相, 以 1 μm 为每个格子步长;

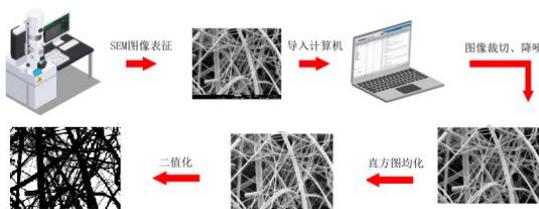


图 1 纤维多孔介质的 SEM 图像 (放大 1000 倍) 及二值化图像

(2) 根据给定的核心分布概率 C_d , 固相生长核心 (x_0, y_0, z_0) 将由一个非固相的点随机生成, 所有气相网格节点生长为固相的概率相同;

(3) 根据倾角 α 和方位角 β 来确定纤维的生长方向, α 是指纤维与 z 轴之间的角度, β 是指纤维与 y 轴在平面 z 中的投影角。根据长度 l_f 和直径 d_f 来确定纤维的几何结构, 如图 2 (a) 所示;

(4) 遍历所有网格, 如果任意点 (x, y, z) 到核心点的法向距离 $d_{(x, y, z)}$ 小于 $\frac{d_f}{2}$, 轴向距离 $l_{(x, y, z)}$ 小于 $\frac{l_f}{2}$, 那么该点将直接生长为固相; 如果该点已是固相点, 那么就将其标记为重合点;

(5) 统计该纤维 (即每一个固相核心) 的重合点数量, 若超出给定值 δ , 则该纤维的所有固相点重置为气相。

(6) 重复步骤 (2) - (5), 直到孔隙率达到给定值 ε 。

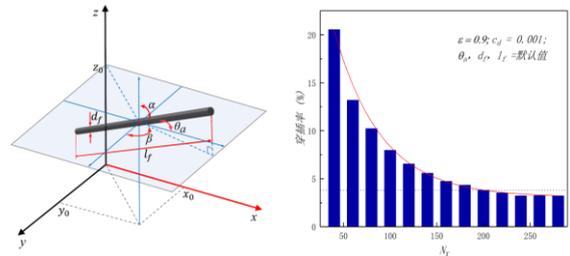


图 2 参数示意图以及穿插率的网格依赖性

法向距离 $d_{(x, y, z)}$ 和轴向距离 $l_{(x, y, z)}$ 可以分别表示为:

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

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

FPM 介观结构的生成过程是基于芯分布概率 c_d 、角度 α 、角度 β 、长度 l_f 、直径 d_f 、重合点数量 n_i 和孔隙率 ε 这七个参数进行的。 l_f , d_f , α 以及 β 可以是常数, 也可以是基于任意分布函数的随机值。在本研究中, 默认这四个参数分别在 $[0, N_x]$ 、 $[1 \mu\text{m}, 7 \mu\text{m}]$ 、 $\left[0, \frac{\pi}{2}\right]$ 和 $[-\pi, \pi]$ 区间内满足正态分布。为了后续讨论的方便, 我们引入了方向角 $\theta_\alpha = \frac{\pi}{2} - \arcsin(\sin \alpha \cdot \sin \beta)$, 该方向角默认为满足 $[0, \pi]$ 内均匀分布的随机值。

由图 1 的 SEM 结果可以看出, FPM 中的纤维应为相互交织而非相互穿插。但以往的 FPM 随机生成过程均不考虑这一点, 导致模拟计算时接触热阻无法充分体现, 产生较大的误差。为了减少穿插现象, 本文考虑了网格大小及重合点数量对穿插现象的影响。本文定义了穿插率 ϕ_i 来定量描述穿插现象, 它表示一根纤维在生成过程中穿过另一根纤维的概率:

$$\varphi_1 = 2n_i / C_{n_f}^2 \quad (3)$$

式中 n_i 为重合点数, n_f 为纤维总数。在保证其他参数相同的情况下, 分别计算了穿插率, 结果如图 2 (b) 所示, 随着网格数量的不断增加, 穿插率逐渐减小, 当 $N_x < 200$ 时趋于稳定。考虑到穿插率、计算效率、LBM 算法的计算稳定性和精度, 将计算域设置为 $200 \times 200 \times 200$ 的网格较为合适。

本文以孔隙率 $\varepsilon = 0.9$, 基于 MATLAB 构建了 FPM 介观结构, 如图 3 (a) 所示, 其中有色区域表示固相纤维, 不同丝径的纤维采用不同颜色标识, 无色区域为气相。从数量上看, 有 36.9% 的纤维丝径分布于 $3 \sim 4 \mu\text{m}$ 的区间内, 与设定值吻合度较高, 从均度上看, 直径为 $2 \sim 5 \mu\text{m}$ 的纤维丝在整个计算域中分布较为均匀, 但该直径区间按设定的正态分布, 也是纤维丝数量最多的区间, 因此整体上, 纤维直径在满足 $1 \sim 7 \mu\text{m}$ 内的正态分布的情况下分布较为均匀, 结果与已有实验结果^[17]吻合较好, 具有较高的精度和可靠性。

图 4 列举了典型的分布模型, 其中深蓝色区域表示固相纤维, 白色区域为气相, 未定义的参数全部设置为默认值。对比图 4 (a-c) 可以看出, 在孔隙率相同的情况下, 纤维直径的增加会使纤维丝数量减少。在导致纤维分布均匀度下降的同时, 会使单个孔隙体积增大。

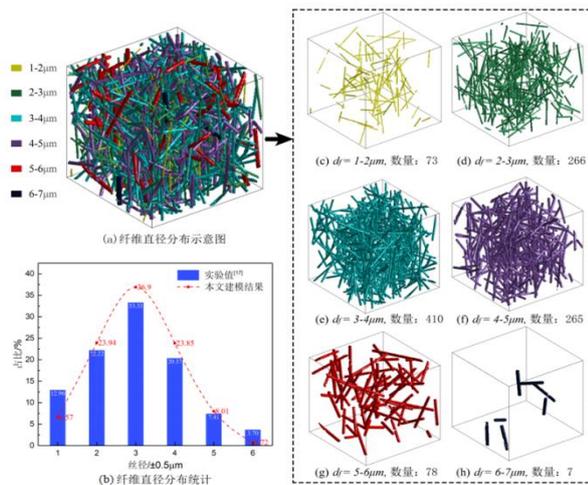


图 3 基于改进的随机结构生成方法生成的 FPM 介观结构纤维直径分布

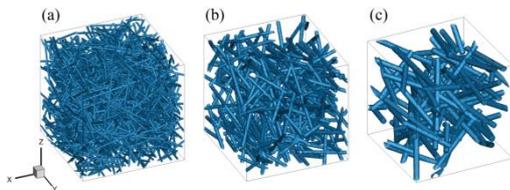


图 4 基于改进的随机结构生成方法生成的不同直径的 FPM 介观结构
(a) $d_i = 2 \mu\text{m}$; $\theta_a = \text{default}$; $l_i = \text{default}$; (b) $d_i = 4 \mu\text{m}$; $\theta_a = \text{default}$; $l_i = \text{default}$; (c) $d_i = 8 \mu\text{m}$; $\theta_a = \text{default}$; $l_i = \text{default}$

2 物理方法和数值求解

2.1 有效导热系数

以下组分耦合而成的多孔介质的有效导热系数:

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

式中, λ_{solid} 及 λ_{gas} 分别表示固相和气相的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; 漏热 λ_{leak} 和耦合 λ_{coup} , 一般忽略不计^[17]; λ_{conv} 表示对流换热等效导热系数 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。当孔隙尺寸小于 1mm 或纤维密度大于 $20\text{kg}/\text{m}^3$ 时, 对流换热可忽略不计^[18]。另外, 考虑到计算效率, 辐射导热系数通过公式 (5) 直接计算^[19]:

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

式中 σ 为斯忒藩-玻尔兹曼常数, $\sigma = 5.6 \times 10^8 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, L 是冷板与热板之间的距离, m ; T_m 是平均温度, K ; ε 是纤维材料的发射率。

将 LBM 计算域划分为两个区域, 分别是固体区域 Ω_s (纤维) 和气体区域 Ω_g (空气), 如图 5 所示。边界条件如式 (6) 所示, 左右边界分别保持等温边界 T_1 和 T_2 , 上下边界绝热。

$$\begin{cases} T = T_1, & x = 0, 0 \leq y(z) \leq L \\ T = T_2, & x = L, 0 \leq y(z) \leq L \\ -\lambda^0 \left(\frac{\partial T}{\partial y(z)} \right) = 0, & y(z) = 0, 0 < x < L \\ -\lambda^0 \left(\frac{\partial T}{\partial y(z)} \right) = 0, & y(z) = 0, 0 < x < L \end{cases} \quad (6)$$

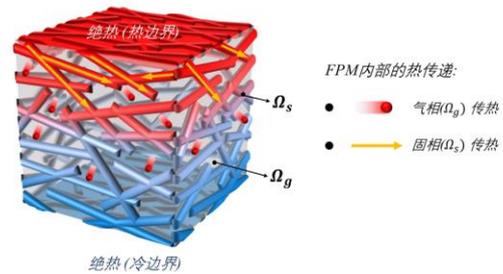


图 5 LBM 计算域示意图

2.2 D3Q19 模型

一个完整的格子玻尔兹曼模型通常由三部分组成: 即离散速度模型; 分布函数; 分布函数的演化方程。本文采用 D3Q19 离散速度模型, 如图 6 所示。碰撞过程可表示为:

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

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 是 x 位置处在离散方向 i 上的温度分布函数; e_i 表示离散速度; δt 表示时间步长; τ 表示无量纲弛豫时间; f_i^{eq} 表示局部平衡函数, 不考虑气相的对流和传质,

气固两相的局部平衡函数 f_i^{eq} 都可由下式给出:

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

$$T(x, t) = \sum_{i=0}^{18} f_i \quad (10)$$

式中 $T(x, t)$ 为局部温度, K, 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:

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

无量纲弛豫时间可表示为:

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

有效导热系数可通过以下方程求解:

$$\lambda_e = \frac{L \int q dA}{\Delta T \int dA} \quad (14)$$

式中, L 表示冷板和热板之间的距离, m ; ΔT 表示冷板和热板之间的温差, K ; q 为热流量, W 。可通过 f_i 计算得出:

$$q = \frac{\tau - 0.5}{\tau} \sum_{i=0}^{18} e_i f_i \quad (15)$$

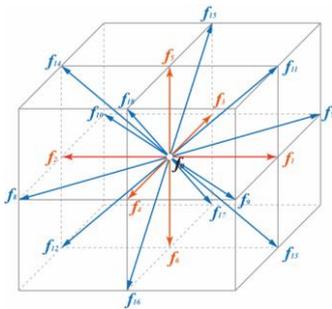


图6 D3Q19 模型示意图

3 结果与讨论

3.1 气体压力和纤维直径对 ETC 的影响

在以前的研究中表明, FPM 芯材在极低压力下具有绝佳绝热性能, 对内部压力的增加十分敏感^[20,21]。本文考虑了 5 种直径, 即 $d_f=1, 2, 4, 6$ 和 $8 \mu m$ 。不同纤维直径的 FPM 对压力变化的敏感程度不同。纤维直径与导热系数失效阈值显示出明显的负相关: 纤维直径越细, 则失效压力越高。通过图 7 也可以观察到孔的特征尺寸 (l_{cs}) 与直径密切相关, 介观结构中的图 7 (a) 的纤维直径比图 7 (b) 中要细, 纤维直径越细意味着需要更多的纤维来实

现相同的孔隙率。此外, 在真空或大气压下纤维直径较小的 FPM (图 7 (a) 和图 7 (c)) 表现出更均匀的等温线分布, 纤维直径越大会导致温度分布越不均匀, 这说明提高孔隙分布的均匀程度对于提升 FPM 的绝热性能, 降低热桥效应意义重大。

3.2 方向角对 ETC 的影响

纤维长度有两个典型的生长方向: 垂直于传热方向 (图 8 (a)) 和平行于传热方向 (图 8 (d))。根据图 8 可以得出结论, 固相的传热主要沿着纤维长度的方向高度定向。因此, 如图 8 (a) 所示, 当方向角为 90° 时, 热通道主要沿着垂直于传热方向的界面, 这时的热通道最为曲折, 当方向角减小时, 热通道缩短, 传热增强, 温度场更宽, 如图 8 (b) - (d) 所示。这可能是由于纤维间的传热受到接触热阻的阻碍, 使得传热主要沿着长度方向。Chen 等^[17]的通过实验研究也得出了类似结论。此外, 低压情况下, λ_e 的变化范围扩大, 这可能是由于低压情况下气体传热受到抑制, 以固体热传导为主, 因此固体的导热系数对 ETC 产生显著影响。

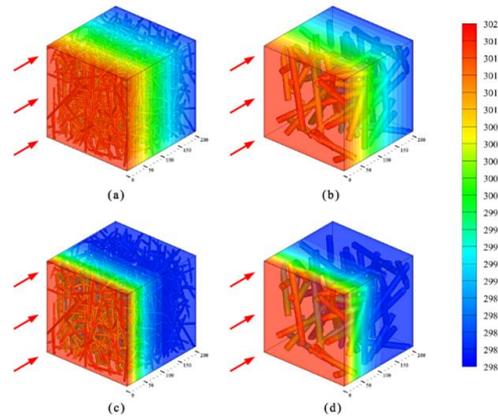


图7 同直径的 FPM 结构在两种压力条件下的稳态温度分布

(a) $d_f=1 \mu m$; $P_g=10^5 Pa$; (b) $d_f=8 \mu m$; $P_g=10^5 Pa$; (c) $d_f=1 \mu m$; $P_g=1 Pa$; (d) $d_f=8 \mu m$; $P_g=1 Pa$

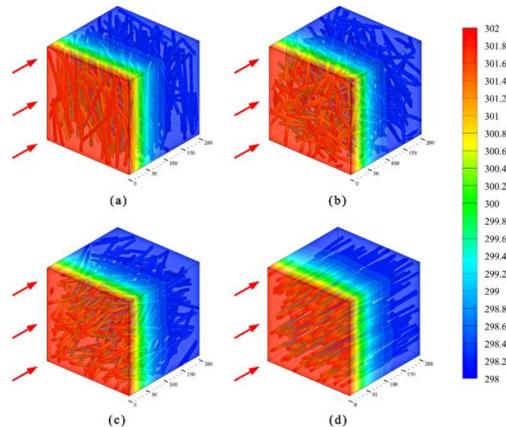


图8 不同方向角的 4 种 FPM 结构的稳态温度分布

(a) $\theta_a=90^\circ$; (b) $\theta_a=60^\circ$; (c) $\theta_a=30^\circ$; (d) $\theta_a=0^\circ$

3.3 纤维长度对 ETC 的影响

从图 9(a)中可以看到,在曲线的前半段,不同纤维直径的 FPM,随着纤维长度增加,有效导热系数都呈现出增加的趋势。总体上曲线的前半段变化幅度较大,而后半段变化幅度较小,说明在长径比较低的情况下,纤维长度对 FPM 有效导热系数的影响较为显著。此外,从图 9(b)中可以看到,取向角对纤维长度与导热系数的关系也具有明显影响。在相同条件下,取向角 $\theta_a=0^\circ\sim 30^\circ$ 时,x 方向(传热方向)温度梯度明显更小,且等温线波动更小。这是因为当取向角较小时,纤维长度变化引起的固相传热通道变化与总传热方向角度过大,对总传热方向的 ETC 影响有限。

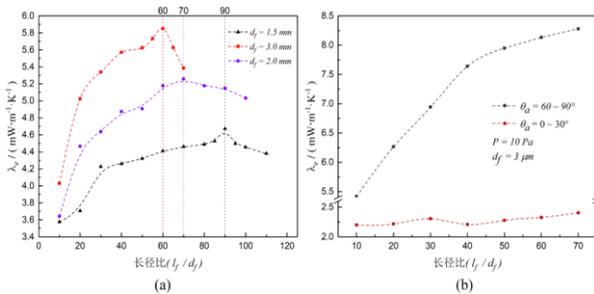


图 9 ETC 随纤维长度的变化规律

(a) 纤维长径比对 ETC 影响; (b) 取向角对 ETC 的影响

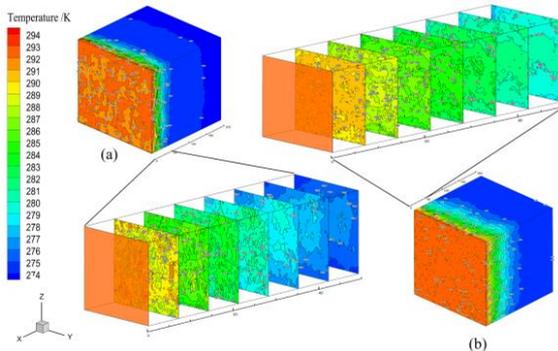


图 10 不同方向角的 2 种 FPM 结构的稳态温度分布

(a) $\theta_a=60^\circ\sim 90^\circ$; (b) $\theta_a=0^\circ\sim 30^\circ$

4 结论

本文提出一种改进的三维纤维多孔介质介观结构生成方法和 D3Q19-LBM 的整体数值方法,用于研究纤维介观结构参数对其有效导热系数的影响。模型与实验数据及理论值相比,展现出了较高的精度,得出如下结论:

纤维直径的增大会导致纤维多孔介质结构抵抗压力升高的能力变弱,实际制造过程中,应尽量减小纤维直径、降低压强,这对提高以纤维为芯材的真空绝热板使用寿命具有重要意义。方向角越接近 90° ,则纤维多孔介质的有效导热系数越低。且在纤维直径的变化不改变导热系数随纤维方向角的变化趋势。

纤维越长,则有效导热系数越高,这种影响在长径比

较低时极为明显,在长径比较大时,受制于计算域范围限制,未能得出明显的结论。

纤维长度对有效导热系数的影响受方向角的影响。方向角越小,即纤维长度方向越接近总传热方向时,纤维长度对 ETC 的影响越显著。

基金项目:国家自然科学基金联合基金(核技术)重点支持项目(No. U2167214)。

[参考文献]

[1]杜杰,豆孟柯,王建信,等.组合矩形蓄冷壳体的疫苗冷藏箱仿真与实验研究[J].制冷技术,2021,41(5):105-110.
[2]Sveipe E ,Jelle B P ,Wegger E ,et al.Improving Thermal Insulation of Timber Frame Walls by Retrofitting with Vacuum Insulation Panels - Experimental and Theoretical Investigations[J].Journal of Building Physics,2014,35(2):168-188.
[3]ZHOU C,CHEN Z F,QIU J L,et al.Vacuum Insulation Panel for Green Building[J].Applied Mechanics and Materials,2011(71):607-611.
[4]LAKATOS A,KOVÁ CS Z.Comparison of thermal insulation performance of Vacuum Insulation Panels with EPS protection layers measured with different methods[J].Energy and Buildings,2021,236(4):110771.
[5]黄熠.真空绝热板及其在冰箱上的应用[J].制冷技术,2011,31(1):38-42.
[6]CHOI B,YEO I,LEE J.Pillar-supported vacuum insulation panel with multi-layered filler material[J].International Journal of Heat and Mass Transfer,2016(102):902-910.
[7]Chen B;Kan A,Chen Z,et al. Investigation on effective thermal conductivity of fibrous porous materials as vacuum insulation panels' core using lattice Boltzmann method[J].Energies,2023(16):3692.
[8]ZHANG H,FANG W Z,LI Y M.Experimental study of the thermal conductivity of polyurethane foams[J].Applied Thermal Engineering,2017(115):528-538.
[9]陈沈绪恺,全晓军,李金京.基于格子 Boltzmann 方法的水平管外层流膜状冷凝换热模拟[J].制冷技术,2022,42(4):15-21.
[10]ENGUEHARD F.Multi-scale modeling of radiation heat transfer through nanoporous super insulating materials[J].International Journal of

Thermophysics,2007,28(5):1693-1717.

- [11]SPAGNOL S,LARTIGUE B,TROMBE A. Thermal modeling of two-dimensional periodic fractal patterns, an application to nano porous media[J].Euro physics Letters,2007,78(4):46005.
- [12]KWON J S,JANG C H,JUNG H. Effective thermal conductivity of various filling materials for vacuum insulation panels[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2009,52(23):5525-5532.
- [13]FRICKE J,SCHWAB H,HEINEMANN U. Vacuum insulation panels-exciting thermal properties and most challenging applications[J]. International Journal of Thermophysics,2006,27(4):1123-1139.
- [14]LALLICH S,ENGUEHARD F,BAILLIS D. Experimental determination and modeling of the radiative properties of silica nanoporous matrices[J]. Journal of Heat Transfer,2009,131(8):082701.
- [15]WANG M,PAN N. Modeling and prediction of the effective thermal conductivity of random open-cell porous foams[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2008,51(5):1325-1331.
- [16]LIU H,KANG Q,LEONARDI C R. Multiphase lattice Boltzmann simulations for porous media applications[J]. Computational Geofences,2014,20(4):777-805.
- [17]WEI G,LIU Y,ZHANG X. Thermal conductivities study on silica aerogel and its composite insulation materials[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2011,54(11):2355-2366.
- [18]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.
- [19]HAGER N E,STEERE R C. Radiant Heat Transfer in Fibrous Thermal Insulation[J]. Journal of Applied Physics,1967,38(12):4663-4668.
- [20]KAN A K,ZHANG Q L,CHE Z F N,et al., Novel prediction of thermal conductivities for nano-aerogel and its composites as vacuum insulation panel core[J]. International Journal of Thermal Sciences,2023(189):108277.
- [21]BRUNNER S,WAKILI K G,STAHL T. Vacuum insulation panels for building applications:continuous challenges and developments[J]. Energy and Buildings,2014(85):592-596.

作者简介: 阚安康(1981—),男,高级工程师,博士。
研究方向: 多孔介质传热传质、船舶冷藏运输技术。