

DOI:10.16356/j.1005-2615.2017.01.002

## 基于 Lattice-Boltzmann 方法的多孔介质真空绝热特性

阚安康<sup>1,2</sup> 吴亦农<sup>1</sup> 徐志峰<sup>2</sup> 张安阔<sup>1</sup> 王为<sup>2</sup>

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083; 2. 上海海事大学商船学院, 上海, 201306)

**摘要:**作为真空绝热板的芯材,多孔介质微尺度空间形貌结构及物性参数对其绝热性能影响较大。为研究多孔介质真空下的导热性能,选择颗粒状、纤维状和泡沫状 3 种典型多孔介质材料,并基于 Lattice-Boltzmann(LBM)提出了一种随机构造多孔介质物理模型的方法。模型中重要参数结合多孔介质电镜扫描图像处理获取。采用 D3Q15LBM 模型进行数值模拟,并分析了真空度及颗粒/纤维/泡孔等效直径对导热系数的影响规律。模拟与实验的对比结果揭示了多孔介质真空下的导热系数随真空度及多孔介质物性参数的变化规律。

**关键词:**真空绝热板;多孔介质材料;Lattice-Boltzmann 方法;导热系数;真空度

中图分类号:TK121

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2017)01-0017-07

## Vacuum Thermal Insulation Property Analysis of Porous Materials Based on Lattice-Boltzmann Method

KAN Ankang<sup>1,2</sup>, WU Yinong<sup>1</sup>, XU Zhifeng<sup>2</sup>, ZHANG Ankuo<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>2</sup>

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Science, Shanghai, 200083, China;

2. Merchant Marine College, Shanghai Maritime University, Shanghai, 201306, China)

**Abstract:** As the core material of the vacuum insulation panel, micro structure and physical properties of porous materials have great influence on the thermal insulation performance. To study the thermal conductivity of porous material under vacuum condition, three typical porous materials, that is, granular, fibrous and foamy materials are involved in this paper, and a physical model based on the Lattice-Boltzmann method (LBM) is proposed. The key parameters of the model are obtained by scanning electron microscope image from real porous materials. Numerical simulation and analysis are made to study the influence of the vacuum degree and the equivalent diameter of the particles/fiber/cell hole versus thermal conductivity by D3Q15 model based on LBM. Comparison of simulation and experimental results explores the principles of the thermal conductivity variation versus physical properties and vacuum degree. The work is significant to optimize the structure of core materials and to improve the accuracy of effective thermal conductivity prediction.

**Key words:** vacuum insulation panel; porous material; Lattice-Boltzmann method; thermal conductivity; vacuum degree

真空绝热板(Vacuum insulation panel, VIP)以其导热系数极低、质轻、厚度小等诸多优点,而被广泛应用于家用电器、冷藏运输、建筑等领域<sup>[1-6]</sup>。

VIP 具有优良的绝热性能,同等厚度下,其热阻是诸如聚氨酯、聚苯乙烯、玻璃纤维毡等常规保温材料 10 倍之多<sup>[1]</sup>。VIP 由 3 部分组成,即多孔介

**基金项目:**中国博士后科学基金(2016M590385)资助项目;上海市自然科学基金(15ZR1419900)资助项目。

**收稿日期:**2016-11-16;**修订日期:**2016-12-09

**通信作者:**阚安康,男,博士后,高级工程师,硕士生导师,E-mail:ankang0537@126.com。

**引用格式:**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 materials based on Lattice-Boltzmann method[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(1): 17-23.

质芯层隔热材料,将外界大气与芯材隔开的隔气结构膜和用以维持内部真空的气体吸附材料,VIP通过最大限度地提高其芯材空隙内的真空度来实现绝热<sup>[2]</sup>,其结构如图1所示。VIP的芯材多为多孔介质,自身固体基质应具备良好的保温性能,且必须有一定空隙率以便将其空隙内气体抽空,还需具备一定强度以免抽真空后因外界大气压作用而坍塌<sup>[3]</sup>。目前广为应用为VIP芯材的多孔介质有纤维材料(如图2(a)所示的玻璃纤维毡和火焰绵复合纤维材料)、开孔泡沫材料(如图2(b)所示的开孔微孔聚氨酯材料)和纳米颗粒型材料(如图2(c)所示的气相二氧化硅纳米颗粒材料)。

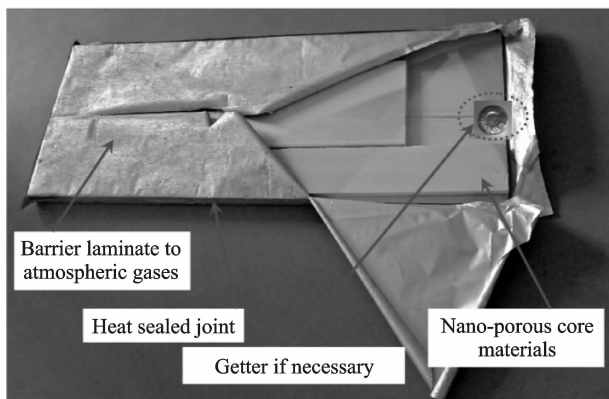


图1 VIP结构图

Fig. 1 Schematic diagram of VIP

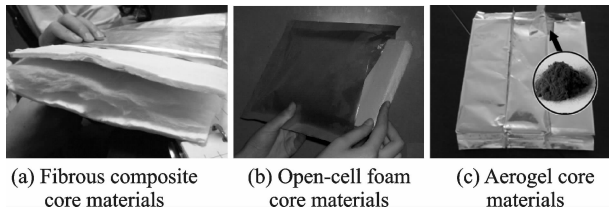


图2 不同形式多孔介质芯材VIP

Fig. 2 VIPs with different core materials

热量通过VIP传递大致经过3种途径,即芯层多孔介质材料固体基质的导热、空隙残余气体的等效导热(稀薄气体对流换热)和热辐射。固体基质的导热 $\lambda_s$ 主要是和固体材料孔隙结构和材料属性有关。残余气体等效导热 $\lambda_g$ 主要取决于残余气体的量,也就是和孔隙内气体压力有关。因在VIP内外压差作用下,随着时间 $t$ 推移,外界气体和水蒸气会通过隔气结构膜渗透到VIP内,芯层材料和隔气结构膜在长期的使用过程中也会有少量气体释放进入VIP内,故而VIP内气体压力会逐时上升,气体等效导热系数也会逐渐增大,即便是VIP内放置了气体吸附材料在一定程度上可以延缓这种气压上升趋势。热辐射等效导热 $\lambda_r$ 主要取决于芯材的结构及物性参数。故而VIP的有效导

热系数 $\lambda_{\text{eff}}$ 应为上述3部分等效导热系数的函数,即

$$\lambda_{\text{eff}}(t) = f(\lambda_s, \lambda_g(t), \lambda_r) \quad (1)$$

将上述每一部分等效导热单独加以研究或加以实验验证目前不可行,因上述3种等效导热方式综合在一起,错综复杂,难以割裂开来。故而在多孔介质真空绝热机理研究上,国内外学者展开了多种方法的理论分析和仿真研究<sup>[7-10]</sup>。Kwon等<sup>[5]</sup>基于数理统计的基础上,采用平均法对5种不同的芯材结构进行了建模,并在理论上分析了影响真空下芯材导热系数的因数;阚安康等<sup>[8]</sup>对泡沫、纤维等芯材基于分形理论的基础上进行了理论分析、数值建模和实验研究,虽然可以在一定程度上揭示芯材的绝热机理,但运算方法过于复杂,尤其在计算分形维数时,影响参数过多;随后,陈照峰<sup>[9]</sup>,邱小波<sup>[10]</sup>,Schwab等<sup>[11-18]</sup>采用实验的方法揭示了玻璃纤维芯材随着真空度降低时导热系数的变化规律;王沫然<sup>[19]</sup>,阚安康<sup>[20]</sup>,马强<sup>[21]</sup>,方振文<sup>[22]</sup>等则采用Lattice-Boltzmann(LBM)方法对多孔介质结构随机生成方法进行了探索。

国内外学者对芯材导热性能的研究工作一定程度上促进了真空绝热板芯材的研制和性能提高,但在理论分析时,往往忽视了芯材结构的随机性,从而理论和实际情况存在较大偏差。本文在基于芯材微尺度空间结构基础上,采用LBM对芯材进行了介观尺度随机构建,并对其真空绝热规律进行了理论分析和实验验证。

## 1 基于LBM方法的等效模型构建

### 1.1 微尺度空间结构获取及处理

对多孔介质芯材进行电子显微镜扫描(Scanning electron microscope, SEM)和图像二值化处理,是研究多孔介质微尺度空间结构、获取必要的物性参数的有效途径和重要手段。文章对3种典型的多孔介质芯材进行了SEM图形扫描,扫描后的图像如图3所示。由图可知,多孔介质空间分布杂乱无序,孔径或颗粒大小不一。多孔介质的孔隙率、开孔率、平均直径或孔径等为基于LBM方法随机构建的重要参数,可以借助专业分析软件获取。鉴于图像噪音干扰等因素的影响,本文提出了处理图像的方法,具体如图4所示。

本文结合所获取的多孔介质微观结构,提出了多孔介质三维介观物理模型的随机构造方法,采用D3Q15LBM对3种典型芯材进行了随机构造,重现了不同多孔介质的实际微尺度空间结构。物理模型中的孔隙率、空间分布等均可以根据实际参数进行调整。这里重构的3种介观尺度单元体控制区域网格设为 $100 \times 100 \times 100$ ,玻璃纤维格子步长

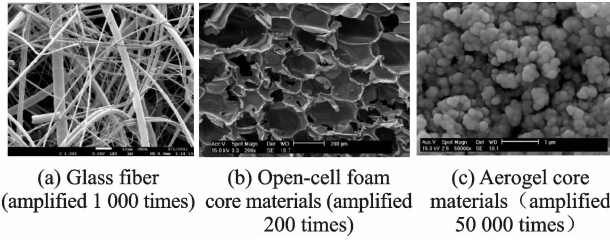


图 3 三种典型多孔介质芯材 SEM 图

Fig. 3 Three SEM images of typical core materials

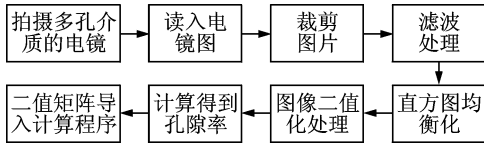


图 4 SEM 图形处理过程

Fig. 4 Method of SEM treatment

设为 10 nm, 泡沫开孔微孔聚氨酯设为 100 nm, 纳米颗粒气相二氧化硅设为 10 nm。随机生成的 3 种典型结构物理模型如图 5 所示。

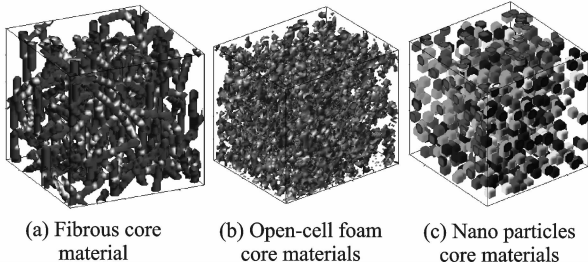


图 5 基于 LBM 的多孔介质芯材随机生成图

Fig. 5 Randomly generated three-dimensional physical models based on LBM

## 1.2 数学模型的建立

本文采用 D3Q15LBM 对生成的模型求解其导热问题。为对多孔介质有效导热系数精确求解,需对能量运输方程中温度及热流密度问题正确表述。对纯粹的导热问题,即不存在对流换热、相变和内热源的导热,其能量方程可以表述为

$$(\rho c_p)_f \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) = \lambda_f \nabla^2 T, (\rho c_p)_s \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) = \lambda_s \nabla^2 T \quad (2)$$

式中: $\lambda$  代表各种相的导热系数; $\rho c_p$  为单位体积热容,鉴于共轭换热效应,各相间单位体积热容取值相同;下标 f 表示流体相;下标 s 表示固相; $T$  为热力学温度; $t$  为时间。

由于受到温度及热流的连续性限制,故在相表面一定有

$$T_{f,int} = T_{s,int}, \lambda_f \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} \Big|_{f,int} = \lambda_s \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} \Big|_{s,int} \quad (3)$$

式中:int 表示相表面; $\mathbf{n}$  表示相表面的单位法向矢

量。

三维多相情况下多孔介质内部能量运输方程,可以表示为

$$f_\alpha(r + e_\alpha \delta_i, t + \delta_i) - f_\alpha(r, t) = -\frac{1}{\tau_n} [f_\alpha(r, t) - f_\alpha^{eq}(r, t)] \quad (4)$$

式中: $e_\alpha$  为格子离散速度; $\delta$  为格子步长; $\tau_n$  为节点处所述相弛豫时间。

对 D3Q15LBM 模型的速度分布及各参数设置如下

$$e_\alpha = \begin{cases} (0, 0, 0) & \alpha = 0 \\ (\pm 1, 0, 0)c, (0, \pm 1, 0)c, (0, 0, \pm 1)c & \alpha = 1 \sim 6 \\ (\pm 1, \pm 1, \pm 1)c & \alpha = 7 \sim 14 \end{cases} \quad (5)$$

$$f_\alpha^{eq} = \begin{cases} 0 & \alpha = 0 \\ T/9 & \alpha = 1 \sim 6 \\ T/24 & \alpha = 7 \sim 14 \end{cases} \quad (6)$$

$$\tau_n = 0.5 + \frac{9}{5} \frac{\lambda_n}{(\rho c_p)_n c^2 \delta_i} \quad (7)$$

式中: $c = \frac{\delta_x}{\delta_i}$  为格子声速,其值为随机正值,但应确保  $\tau_n$  的取值为 0.5~2.0;温度  $T$  及热流  $q$  计算公式为

$$T = \sum_\alpha f_\alpha \quad (8)$$

$$q = \left( \sum_\alpha e_\alpha f_\alpha \right) \frac{\tau_n - 0.5}{\tau_n} \quad (9)$$

当温度演化达到平衡后,有效导热系数可表示为

$$\lambda_{eff} = \frac{L \int q dA}{\Delta T \int dA} \quad (10)$$

式中: $q$  为在温差  $\Delta T$  下,穿过  $L$  长度,  $dA$  截面积的热流密度。

## 1.3 边界条件的设置

为简化仿真,设置热流方向的上下表面为恒温表面,其余 4 个侧面设置为绝热边界条件。设置恒温界面为恒温边界条件,温度设置参照 ASTM: C 1484-01,分别为  $T_s = 310$  K,  $T_x = 300$  K。对绝热表面采用镜面反射处理,避免了能量沿绝热表面渗透的影响;对等温面采用非平衡态分布反射处理,即

$$f_\alpha - f_\alpha^{eq} = -(f_\beta - f_\beta^{eq}) \quad (11)$$

式中: $\alpha$  和  $\beta$  代表相反方向; $f_\alpha^{eq}$  为平衡态分布函数,可通过局部温度边界求得。

## 2 数值分析及讨论

### 2.1 纤维多孔介质真空绝热特性

纤维多孔介质芯材由纤维丝及丝间空隙组

成,纤维丝层叠交错,纵横交织,空隙相通,空气自由流动,如图3(a)所示。这种结构作为芯材,便于其间空气的抽除。但纤维丝粗细悬殊,布局凌乱,层次错综,纤维丝呈细长圆柱体结构,粗者在 $20\ \mu\text{m}$ 以上,细者不足 $0.1\ \mu\text{m}$ 。为分析微尺度空间参数对纤维状多孔介质材料导热系数的影响情况,文章基于LBM方法,选择玻璃纤维材料为例进行仿真计算和讨论,计算结果如图6所示。

由图6可知,纤维多孔介质材料有效导热系数与空隙中残余气压对应关系图中呈“S”曲线。这表明玻璃纤维毡空隙中残余气体存有上下两个临界压力值。当芯材空隙中静止气压下降到上临界值后,有效导热系数急剧下降;当其继续下降到下临界压力时,气体已经极度稀薄,可忽略不计气体导热,材料换热主要表现为丝层次之间的热传导,随着气压继续下降,有效导热系数几乎恒定不变。随着丝径增加,下临界压力值随之上升,导热系数趋于恒定时所对应气压值增大。工业生产选用玻璃纤维丝作为芯材时,推荐丝径为 $1\sim 10\ \mu\text{m}$ ,生成的VIP有效导热系数一般在 $0.002\sim 0.005\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

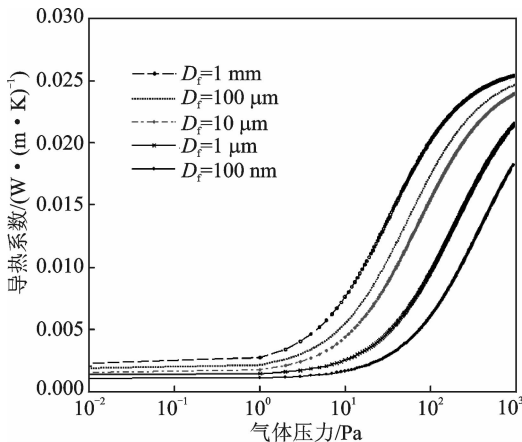


图6 有效导热系数随玻璃纤维空隙中残余气压变化关系曲线

Fig. 6 Curves of effective thermal conductivity versus vacuum in fiber core material

## 2.2 开孔泡沫多孔介质真空绝热特性

开孔泡沫由固体基质及泡孔组成,内部泡孔连续分布,泡孔之间相通,孔隙中气体可自由流动,抽真空时便于将固封在泡孔中的空气、发泡剂及水蒸气等驱除。本文选取的开孔微孔聚氨酯硬质泡沫的微尺度空间结构如图3(b)所示。在空间上,泡孔结构大致呈立方单元体,最大孔径为 $450\ \mu\text{m}$ ,最小孔径不足 $2\ \mu\text{m}$ ,孔径集中在 $80\sim 220\ \mu\text{m}$ 之间。为分析微尺度空间参数对泡沫状多孔介质材料导

热系数的影响情况,文章基于LBM方法,进行仿真计算和讨论,结果如图7所示。

由图7可知,泡孔中静止气体压力下到上临界压力后,其有效导热系数也会随之急剧下降;当气压值下降到下临界压力后,气体导热可忽略,导热主要表现为泡孔骨架的导热,且其导热系数趋于恒定。泡孔直径越小,对应的下临界压力也就越大,在实际生产中也就越容易实现。较小的泡孔直径可以有效限制真空下孔隙内残余气体自由行程,降低气体组分导热,即可获得理想保温效果。在泡沫材料作为VIP芯材时,可以适当选择泡孔直径在 $100\ \mu\text{m}$ 以下的材料,真空抽至 $10\ \text{Pa}$ 以下,可获得较理想的绝热性能。一般聚氨酯芯材VIP有效导热系数可低至 $0.005\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 以下,多集中在 $0.004\sim 0.010\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 之间。

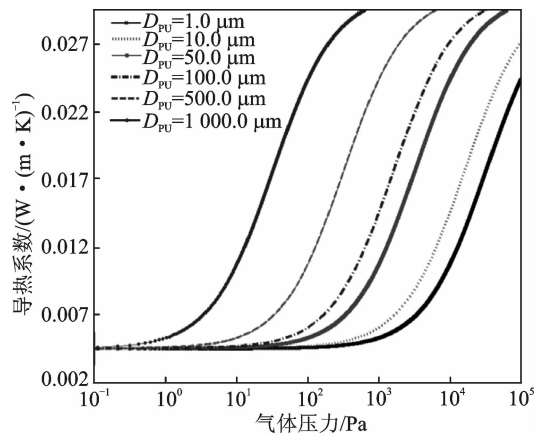


图7 有效导热系数随泡孔空隙内气压变化曲线  
Fig. 7 Curves of effective thermal conductivity versus vacuum in foam core material

## 2.3 纳米颗粒多孔介质真空绝热特性

颗粒状多孔介质主要由固体基质及颗粒之间的气体组成。气体可在孔隙内流动,且孔隙彼此连通,便于气体从其中驱除。颗粒分布及粒径大小不同,很难采用数学方法对真实传热情况加以完整描述。如图3(c)所示为超细二氧化硅颗粒微尺度空间结构图。从图中可以看出,颗粒集中在 $7\sim 40\ \text{nm}$ ,颗粒直径最小的不到 $1\ \text{nm}$ ,最大的超过 $200\ \text{nm}$ 。

本文选用二氧化硅颗粒为芯材,基于LBM方法进行仿真计算和讨论,结果如图8所示。由图8可知,与上述两种材料相类似,当颗粒间隙中静止气压下降到上临界压力后,导热系数也会急剧下降,但随着气压降到下临界压力后,导热主要表现为固体基质的导热,随着气体压力的下降,其导热系数趋于恒定。结果表明,多孔介质粒径越小,对应真空下导热系数越低,芯材真空绝热效果也就越

好。工业生产中,严格要求所有粒径在纳米级,且要保证粒间孔隙相通是相当困难的。在选用颗粒状多孔介质作为 VIP 芯材时,推荐平均粒径为 100 nm,耐温性好,本身导热系数低低的材料。选用颗粒状二氧化硅为芯材的 VIP,其导热系数一般为 0.005~0.010 W/(m·K),且使用寿命较长,可用于建筑复合墙体等保温领域。

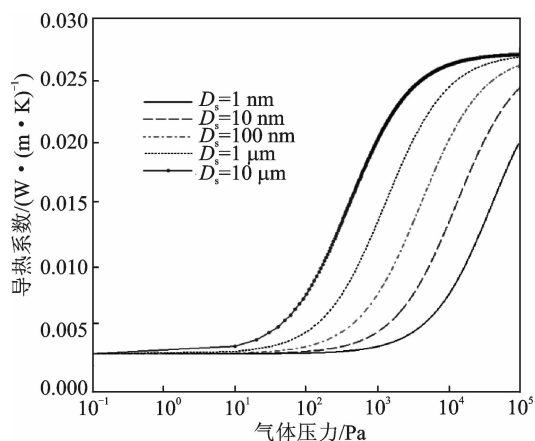


图 8 有效导热系数随二氧化硅颗粒孔隙气压变化曲线

Fig. 8 Curves of effective thermal conductivity versus vacuum in nano-particle core materials

### 3 实验对比及讨论

#### 3.1 VIP 的制取及导热系数测定方法

为验证本文理论分析的正确性,本文选择上述 3 种芯材制作了 VIP,并对其导热系数进行了理论计算和实验测试的对比分析。3 种多孔介质材料的物性参数如表 1 所示。

实验所用 VIP 采用专用设备制备,采集 VIP 内真空终压为真空室内气压,实验前预设 VIP 封装气压分别为 0.1, 1, 10, 100 和 1 000 Pa,这样就可以制备不同真空度的 VIP。采取平板热保护法测量 VIP 有效导热系数,严格按照 ASTM: C 1484-01<sup>[23]</sup> 设置测试边界,采用水浴冷却,热板温度为 35 °C,冷板温度为 15 °C。本文取 VIP 中心区域导热系数为有效导热系数值,忽略边缘热桥效应影响。鉴于实验取得的板内终压与预设值有偏差,本文采用反真空法标定。

#### 3.2 实验结果及分析

为减小隔气结构膜对测试结果的影响,在 VIP 制备时,均选用同一批次和规格的隔气结构膜,并基于相同工况下制作。测试结果如表 2 所示。理论计算与实测之间对比如图 9 所示。

表 1 3 种不同多孔介质芯材物性参数

Tab. 1 Physical parameters of three different core materials

芯材	物性参数				
	外形尺寸/ (mm×mm×mm)	容重/(kg·m <sup>-3</sup> )	平均直径(孔径)/μm	孔隙率/%	包裹材料
玻璃纤维	300×300×20	200~250	2~10	>90	高阻隔薄膜
聚氨酯泡沫	300×300×10	50~75	80~100	95	高阻隔薄膜
二氧化硅	300×300×10	180~200	0.01~0.04	>95	高阻隔薄膜和无无纺布

表 2 真空绝热板导热系数及压力测试结果

Tab. 2 Collections of vacuum and effective thermal conductivities

参数	多孔介质芯材														
	玻璃纤维					聚氨酯泡沫					二氧化硅				
	FG1	FG2	FG3	FG4	FG5	PU1	PU2	PU3	PU4	PU5	SI1	SI2	SI3	SI4	SI5
预设压力/Pa	0.1	1	10	10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>	0.1	1	10	10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>	0.1	1	10	10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>
终压/Pa	0.6	7	25	165	763	5	13	45	140	713	15	38	80	241	892
导热系数 测量值/ (mW·(m·K) <sup>-1</sup> )	2.68	2.96	3.19	5.84	14.63	4.12	4.15	5.04	16.23	21.16	3.06	3.82	4.14	4.75	8.24
导热系数 计算值/ (mW·(m·K) <sup>-1</sup> )	2.61	2.83	2.94	4.86	10.44	4.03	4.42	4.84	14.33	19.21	3.23	3.35	3.98	4.12	8.08

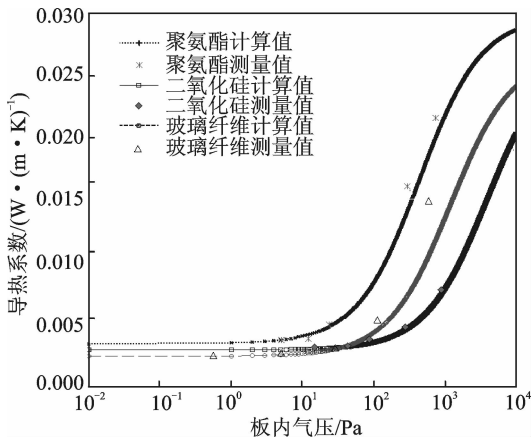


图9 有效导热系数与VIP内气压对应关系

Fig. 9 Effective thermal conductivity versus vacuum in comparison of calculation and collection

从图9可知:(1)当气压在10 Pa以下时,玻璃纤维多孔介质理论值与实测值之间的偏差不大,在 $0.004 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 以下。当板内压力超过20 Pa后,实测值剧增,与理论计算值之间的偏差也在增加;当板内气压超过300 Pa时,实测值和理论计算值偏差加大,原因在于玻璃纤维毡具有可压缩性。实验选取的玻璃纤维毡为多层叠加,自然状态下厚度约为20 mm,制作成VIP后,编号为FG1,FG2,FG3的VIP厚度约为10.5 mm,FG4为11.3 mm,FG5为12.1 mm。厚度变化造成板内孔隙尺寸差异,而孔隙率的变化在仿真中是无法预测的,这也就造成理论值与实测值之间的偏差增加。(2)真空压力小于10 Pa时,聚氨酯导热系数基本恒定,实测值略高于理论值。随板内压力上升,导热系数随之增大,理论与实测值偏差增大。在估算泡沫状芯材真空下导热系数时,板内气压低于100 Pa时本模型计算值较接近真实值。(3)就纳米颗粒二氧化硅芯材而言,板内气压在100 Pa以下时,导热系数在 $0.005 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 以下,且趋于定值,理论值和实测值两者基本吻合。但随气压上升,导热系数迅速增加。

从理论值和实测值的比较可见,在板内气压较低时,本理论模型与实测值较一致,且随气压变化,理论值与实测值变化趋势也相同。通过3种材料导热系数变化趋势比较可以看出,二氧化硅VIP板内压力上升到1000 Pa时其导热系数依然维持在理想的范围,而以聚氨酯和玻璃纤维为芯材的VIP导热系数超出10 Pa便出现明显上升趋势。故而在工程实际应用中,二氧化硅VIP具有较长使用寿命,且形变量小,适用于建筑保温。而聚氨酯和玻璃纤维VIP一般在制取过程中需要添加气体吸附材料来维持板内真空,适用于冰箱、展示柜、

保温箱、冷藏车、冷库等设备使用寿命不是很长的冷藏运输装备。

## 4 结 论

(1)基于LBM方法下,对纤维状、泡沫状、颗粒状3种典型VIP芯材微尺度空间结构进行了分析和随机构建,并采用D3Q15对随机生成模型进行了理论计算,分析了芯材导热系数随多孔介质微尺度空间结构和真空度变化的规律。结果显示,芯材均存在真空度下限,当低于这一下限值时,材料表现为良好的绝热性能,且导热系数趋于恒定。

(2)选用超细玻璃纤维毡、开孔微孔聚氨酯、纳米二氧化硅颗粒3种典型多孔介质芯材为例,对导热性能基于LBM模型进行了理论分析,结合实际生产工艺,分析板内真空、微尺度空间结构等对导热系数的影响规律,并推荐了最佳真空压力。

(3)经实验测试与理论计算对比,本LBM理论分析模型与实测情况存在相同变化趋势,且在板内气压较低时数据拟合度较好。本模型可真实反映真空下多孔介质芯材导热系数与其微尺度结构及真空度之间的关系。

## 参考文献:

- [1] FRICKE J, HEINEMANN U, EBERT H P. Vacuum insulation panels—from research to market [J]. *Vacuum*, 2008, 82(2): 680-690.
- [2] BAETENS R, JELLE B P, THUE J V. Vacuum insulation panels for building applications: A review and beyond [J]. *Energy and Buildings*, 2010 (42): 147-172.
- [3] 纪珺, 韩厚德, 阚安康. 真空绝热板热工性能极其在冷藏集装箱上的应用 [J]. *化工学报*, 2008, 59(2): 114-118.  
JI Jun, HAN Houde, KAN Ankang. Thermal property of vacuum insulated panels and their application to refrigerated containers [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2008, 59(2): 114-118.
- [4] SIMMLER H, BRUNNER S. Vacuum insulation panels for building application basic properties, aging mechanisms and service life [J]. *Energy and Buildings*, 2005, 37: 1122-1131.
- [5] KWON J S, JANG C H, JUNG H Y, et al. Effective thermal conductivity of various filling materials for vacuum insulation panels [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 52: 5525-5532.
- [6] ALAM M, SINGH H, LIMBACHIYA M C. Vacuum insulation panels (VIPs) for building construction industry—A review of the contemporary develop-

- ments and future directions [J]. *Applied Energy*, 2011, 88: 3592-3602.
- [7] 何雅玲, 谢涛. 气凝胶纳米多孔材料传热计算模型研究进展[J]. *科学通报*, 2015, 60(2): 142.  
HE Yaling, XIE Tao. A review of heat transfer models of nanoporous silica aerogel insulation material[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2015, 60(2): 142.
- [8] 阚安康, 张婷婷, 楼海军. 基于分形理论的玻璃纤维真空绝热热工特性研究[J]. *真空科学与技术学报*, 2013, 33(7): 655-657.  
KAN Ankang, ZHANG Tingting, LOU Haijun. Fractal study of effective thermal conductivity of fiber glass materials[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2013, 33(7): 655-657.
- [9] LI C D, CHEN Z F, BO F E, et al. Determination of optimum drying condition of VIP core material by wet method [J]. *Drying Technology*, 2013, 31(10): 1084-1090.
- [10] DI Xiaobo, GAO Yimin, BAO Chonggao, 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.
- [11] CAPSA R, BEYRICHERA H, KRAUSB D, et al. Quality control of vacuum insulation panels: Methods of measuring gas pressure [J]. *Vacuum*, 2008, 82: 691-699.
- [12] SCHWAB H, HEINEMANN U, BECK A. Prediction of service life for vacuum insulation panels with fumed silica kernel and foil cover [J]. *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 2005, 28(4): 357-374.
- [13] SCHWAB H, HEINEMANN U, WACHTEL J. Prediction for the increase in pressure and water content of vacuum insulation panels (VIPs) integrated into building construction using model calculation [J]. *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 2005, 28(4): 327-344.
- [14] WEGGER E, JELLE B P, SVEIPEI E, et al. Aging effects on thermal properties and service life of vacuum insulation panels [J]. *Journal of Building Physics*, 2010, 35(2): 128-167.
- [15] KUNIC R. Vacuum insulation panels—An assessment of the impact of accelerated ageing on service life [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 58(10): 598-606.
- [16] ARAKIA K, KAMOTOB D, MATSUOKA S. Optimization about multilayer laminated film and getter device materials of vacuum insulation panel for using at high temperature [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209: 271-282.
- [17] MAROUANI S. Investigation of the resistance welding of multilayer aluminum-coated polymer complexes used as envelopes of vacuum insulation panels [J]. *Materials and Design*, 2012, 36: 546-556.
- [18] BRUNNER S, GASSER P, SIMMLER H, et al. Investigation of multilayered aluminium-coated polymer laminates by focused ion beam (FIB) etching [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2006, 200: 5908-5914.
- [19] WANG Moran, HE Jihuan, YU Jianyong, et al. Lattice-Boltzmann modeling of the effective thermal conductivity for fibrous materials [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2007, 46: 848-855.
- [20] 阚安康, 康利云, 曹丹, 等. 基于 Lattice-Boltzmann 方法的纳米颗粒多孔介质导热特性[J]. *化工学报*, 2015, 66(11): 4412-4417.  
KAN Ankang, KANG Liyun, CAO Dan, et al. Thermal conduction characteristic of nano-granule porous material using Lattice-Boltzmann method[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2015, 66(11): 4412-4417.
- [21] 马强, 陈俊, 陈振乾. 分形多孔介质传热传质过程的格子 Boltzmann 模拟[J]. *化工学报*, 2014, 65(S1): 183-185.  
MA Qiang, CHEN Jun, CHEN Zhenqian. Lattice Boltzmann simulation for heat and mass transfer in fractal porous media[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2014, 65(S1): 183-185.
- [22] 方文振, 粘权鑫, 张虎, 等. 气凝胶及其纤维复合材料等效导热系数预测[J]. *西安交通大学学报*, 2015, 49(7): 25-29.  
FANG Wenzhen, NIAN Quanxin, ZHANG Hu, et al. Prediction of the effective thermal conductivity of aerogel and its fiber-loaded composites[J]. *Journal of Xian Jiaotong University*, 2015, 49(7): 25-29.
- [23] ASTM Standard C 1484-01. Standard specification for vacuum insulation panels [S]. West Conshohocken, United States: ASTM, 2001.