

# SiO<sub>2</sub> 气凝胶绝热材料传热模型及导热性能研究

胡静<sup>1</sup> 喻凡<sup>1</sup> 毛煜东<sup>1</sup> 刘婷<sup>2</sup> 于明志<sup>1,\*</sup>

(1. 山东建筑大学 热能工程学院, 山东 济南 250101; 2. 青岛科瑞新型环保材料集团有限公司, 山东 青岛 266000)

**摘要:** 常温、真空条件下, SiO<sub>2</sub> 气凝胶材料的导热性能决定了真空绝热板的表现导热性能, 真空条件下影响其等效热导率的因素及对影响因素的规律研究可为芯材和真空绝热板的生产提供理论依据。文章基于气凝胶绝热材料的热导率计算模型, 利用 MATLAB 软件编程计算其有效热导率, 研究了压强、密度、纤维体积分数对 SiO<sub>2</sub> 气凝胶绝热材料等效热导率的影响规律。结果表明: 常温条件下, 随着压强降低, 气凝胶的热导率显著降低, 压强 < 1 kPa 时, 气凝胶的热导率随压强降低趋于平缓, 材料内气相热导率降低; 密度减小使得固相热导率降低, 而同时孔隙率增大使气相热导率增加, 二者共同作用时, 气凝胶材料存在最佳密度值, 导致总热导率最小; 纤维体积分数增加, 固相热导率增大, 增加对材料内部热辐射的抑制, 最佳纤维体积分数使复合了纤维的 SiO<sub>2</sub> 气凝胶材料热导率最小。

**关键词:** SiO<sub>2</sub> 气凝胶; 绝热材料; 热导率

中图分类号: TK121

文献标识码: A

文章编号: 1673-7644(2018)03-0038-06

## The heat transfer model and thermal conduction properties of SiO<sub>2</sub> aerogels thermal insulation material

Hu Jing, Yu Fan, Mao Yudong, et al.

(School of Thermal Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

**Abstract:** The thermal conduction properties of SiO<sub>2</sub> aerogel under normal atmospheric temperature and vacuum conditions determine the effective thermal conductivity of VIP, and the research of the impact factors of SiO<sub>2</sub> aerogels thermal conductivity under vacuum conditions and their influence mechanism are important for VIP production. The paper has analyzed the influences of the gas pressure, density and fiber content on the effective thermal conductivity under normal atmospheric temperature and vacuum conditions based on the model established to calculate the effective thermal conductivity of SiO<sub>2</sub> aerogels. The results show that, the effective thermal conductivity significantly decreases with the pressure decreases from the atmospheric pressure, and then decreases smoothly when the pressure is less than 1 kPa for the gas thermal conductivity decreases sharply. The solid thermal conductivity decreases with the decrease of the density, but that of gas increases as the porosity increases. Due to these pros and cons effects, there exists an optimal density, at which the aerogel has the minimum effective thermal conductivity. With the increase of fibers content, the solid thermal conductivity increases and thermal radiation capacity decreases, there also exists an optimal fibers content bringing about the minimum effective thermal conductivity of aerogel-fiber composites.

**Key words:** SiO<sub>2</sub> aerogel; thermal insulation material; effective thermal conductivity

收稿日期: 2018-05-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0700803-01); 山东省自然科学基金项目(ZR2017MEE037)

作者简介: 胡静(1993-), 女, 在读硕士, 主要从事建筑节能技术等方面的研究。E-mail: 295136445@qq.com

通讯作者\*: 于明志(1970-), 男, 教授, 博士, 主要从事传热传质、能源利用及节能等方面的研究。E-mail: yumingzhiwh@163.com

## 0 引言

超级绝热材料的概念最初由 20 世纪 90 年代的研究学者提出,其定义为低于“无对流空气”热导率的绝热材料<sup>[1]</sup>。超级绝热材料形式多样,其中真空绝热板的应用较为广泛,板材多采用微小多孔芯材外覆真空保护膜的形式,通过对芯材抽真空处理,使其导热系数比空气导热系数低一个数量级,从而达到“超级绝热”的效果<sup>[2]</sup>。真空绝热板最初主要用于冰箱、冷库、船舶冷藏等的保温<sup>[3]</sup>,但随着超低能耗绿色建筑发展,建筑围护结构也对保温性能提出更为“严苛”的要求,因此将真空绝热板应用于建筑外墙保温便成为绿色建筑发展的需要。目前市场上建筑用真空绝热板的芯材主要是由 SiO<sub>2</sub> 气凝胶与纤维复合而成的纳米孔超级绝热材料,其独特的开放性纳米级多孔结构及三维立体网状结构,具有极低密度、高比表面积和高孔隙率的特性,加之真空处理,使得其表现热导率远低于空气的热导率。

对于纯气凝胶纳米孔材料,因其显著的绝热特性,国内外学者对其传热机理及等效热导率计算做了大量理论建模的研究。Zeng 等提出的 3 种交叉立方阵列结构模型应用广泛,包含交叉方杆立方阵列、交叉圆杆立方阵列和由小球体构成的杆状立方阵列结构<sup>[4]</sup>。当前,大多数研究基于 Zeng 模型建立气凝胶的气固耦合导热模型,分析纳米孔和固体孔壁内纳米尺寸效应等对热导率的影响<sup>[5-8]</sup>。为改善气凝胶材料的力学性能,通过添加纤维等组成复合材料以增强增韧,因功能添加物、非均匀结构的引入以及多种传热方式的耦合传热效应而使气凝胶材料的传热更加复杂<sup>[9]</sup>。董志军等将短切莫来石纤维掺入 SiO<sub>2</sub> 气凝胶,可有效提高 SiO<sub>2</sub> 气凝胶的力学性能和机械强度<sup>[10]</sup>。杨建明等基于纤维在气凝胶中消光系数的不同计算方法和不同分布形式,提出了纤维增强气凝胶复合材料存在的跨尺度、多物相、

分形及相互耦合等问题<sup>[11]</sup>。目前针对常温条件下气凝胶及复合材料内部的热导率研究,由于常温、常压下辐射热导率带来的影响很小,通常选择忽略辐射传热,但在高真空条件下由于材料气固耦合热导率大为降低,辐射热导率则不可被忽视<sup>[12]</sup>。建筑保温用真空绝热板芯材所处的环境为常温高真空,因此应考虑其内部的辐射传热对有效热导率产生的影响。

文章研究了常温、真空条件下, SiO<sub>2</sub> 气凝胶及气凝胶与纤维复合绝热材料导热性,分析了气相压强、密度及纤维比例等因素对材料有效热导率的影响,为真空绝热板芯材和真空绝热板生产提供理论指导。

### 1 SiO<sub>2</sub> 气凝胶理论模型阐述

#### 1.1 热导率数理模型

作为纳米孔超级绝热材料,气凝胶基体内热量传递主要包含气相导热、固相导热和辐射传热 3 种,通常在理论计算时把气体导热和固体导热耦合在一起考虑,得到气固耦合热导率<sup>[13]</sup>。其有效导热系数  $\lambda_{\text{eff}}$  可由式(1)表示为

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_{\text{gs}} + \lambda_{\text{rad}} \quad (1)$$

式中:  $\lambda_{\text{gs}}$  为气固耦合等效热导率;  $\lambda_{\text{rad}}$  为辐射等效热导率。

##### 1.1.1 气固耦合导热传热模型

通过对气凝胶纳米级球形颗粒连接的三维立体网状结构分析,结合经典的 Sierpinsky 海绵体分形结构以及交叉球杆结构,采用交叉分形球杆结构<sup>[14]</sup>作为其基本结构单元,分析气凝胶材料内部传热。

气凝胶的分形交叉球杆结构模型如图 1 所示,定义分形结构中间孔隙边长和立方体边长之比为  $\gamma$ ,若假设热流密度从上到下,固相热导率为  $\lambda_s$ ,气相热导率为  $\lambda_g$ ,固体颗粒接触面直径  $a$  与颗粒直径  $d_s$  之比  $\beta$ 。由串并联等效电路法推导可得交叉分形球杆结构的一级结构与二级结构等效热导率计算式。

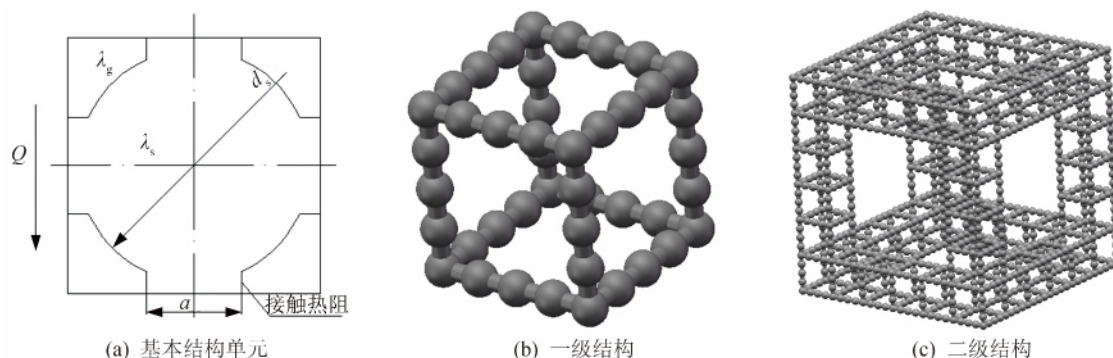


图 1 气凝胶分形交叉球杆结构模型示意图

气凝胶材料的气固耦合等效热导率  $\lambda_{gs}$  为二级结构等效热导率, 计算式由式 (2) 表示为

$$\lambda_{gs} = 4\lambda_{e,l} \left( \frac{1-\gamma}{2} \right)^2 + \frac{4\lambda_{unit}\lambda_g\gamma(1-\gamma)}{2\lambda_g(1-\gamma) + 2\lambda_{unit}\gamma} + \lambda_g\gamma^2 \quad (2)$$

式中:  $\lambda_{e,l}$  为一级结构等效热导率, 其计算式由

$$\lambda_{unit} = \left( \frac{-2\lambda_s^2\lambda_g}{(\lambda_g - \lambda_s)^2} \ln(1 + M(\frac{\lambda_g}{\lambda_s} - 1)) - M \frac{2\lambda_g\lambda_s}{\lambda_s - \lambda_g} \right) + \beta^2\lambda_s \quad (4)$$

$$2\gamma^3 - 3\gamma^2 + 1 - \sqrt{\frac{1-\varphi}{\pi}} = 0 \quad (5)$$

式中:  $M = \cos(\arcsin(\beta))$ ,  $\beta = a/d_s$ ;  $\varphi$  为气凝胶孔隙率。

### 1.1.2 基本传热模型

$$\lambda_g = \frac{(2.25\xi - 1.25)0.46m_g(p/k_B T)(8k_B T/\pi m_g)^{1/2}}{0.25S_s\rho_0/\phi + \sqrt{2}(p/k_B T)\pi d_g^2}c_v \quad (6)$$

式中:  $T$  为温度;  $p$  为压强;  $\xi$  为绝热系数, 取 1.4;  $\rho_0$  为气凝胶材料密度;  $m_g$  为单个分子平均质量, 取  $4.648 \times 10^{-26}$  kg;  $d_g$  为单个分子平均直径, 取  $3.53 \times 10^{-10}$  m;  $k_B$  为玻尔兹曼常量, 为  $1.38 \times 10^{-23}$  J/K;  $c_v$  为空气定容比热容, 取 717 J/(kg · K)。

气凝胶比表面积  $S_s$ 、孔隙率  $\phi$  计算式分别由式 (7)、(8) 表示为

$$S_s = \frac{6d_s}{(d_s^2 + \frac{1}{2}a^2)\rho_{bulk}} \quad (7)$$

$$\phi = 1 - \frac{\rho_0}{\rho_{bulk}} \quad (8)$$

式中:  $\rho_{bulk}$  为固体块材密度。

### (2) 固相热传导

材料的固体导热往往比较复杂, 通常是各种导热机制叠加在一起的物理过程, 其主要是通过自由电子运动和晶格振动实现。SiO<sub>2</sub> 气凝胶固相热传导是通过固体颗粒分子在晶格平衡位置附近的振动来进行传热的, 一般采用 Wang 等计算纳米尺度颗粒等效热导率的修正计算式进行计算<sup>[15]</sup>, 由式 (9) 表示为

$$\lambda_s = \frac{\lambda_{bulk}}{1 + \frac{4l}{3r}} \quad (9)$$

式中:  $\lambda_{bulk}$  为固体块体材料导热系数;  $l$  为 SiO<sub>2</sub> 声子平均自由程;  $r$  为固体颗粒半径, 取  $r = d_s/2$ 。

### (3) 辐射热传导

气凝胶材料内部的辐射传热属于介质辐射, 一

式 (3) 表示为

$$\lambda_{e,l} = 4\lambda_{unit} \left( \frac{1-\gamma}{2} \right)^2 + \frac{4\lambda_{unit}\lambda_g\gamma(1-\gamma)}{2\lambda_g(1-\gamma) + 2\lambda_{unit}\gamma} + \lambda_g\gamma^2 \quad (3)$$

式中:  $\lambda_{unit}$  为交叉分形球杆结构基本单元的等效热导率。  $\lambda_{unit}$ 、 $\gamma$  分别由式 (4)、(5) 表示为

### (1) 气相热传导

在分子运动理论的基础下, 考虑分子无规则热运动, 气体分子平均自由程表征了气体分子传递热量的能力。如果气凝胶材料孔隙中的气体为空气, 则多孔介质内气相热导率计算模型由式 (6) 表示为

般工程应用中, 认为其满足光学厚介质假设<sup>[16]</sup>, 可用 Rosseland 方程计算 SiO<sub>2</sub> 材料辐射热导率, 由式 (10) 表示为

$$\lambda_{rad} = \frac{16}{3\rho_0 K_{e,m}} \sigma T^3 \quad (10)$$

式中:  $K_{e,m}$  为基体材料 Rosseland 平均质量衰减系数, 取 22.7 m<sup>2</sup>/kg;  $\sigma$  为斯蒂芬—波尔兹曼常数, 取  $5.67 \times 10^{-8}$  W/(m<sup>2</sup> · K<sup>4</sup>)。

### 1.2 有效热导率模型

SiO<sub>2</sub> 气凝胶—纤维复合型绝热材料热导率是材料总体热导率与辐射热导率之和<sup>[17]</sup>, 可由式 (11) 表示为

$$\lambda_t = \lambda_c + \lambda'_{rad} \quad (11)$$

式中:  $\lambda_c$  为复合材料总体热导率;  $\lambda'_{rad}$  为复合材料辐射热导率。

对于纤维在气凝胶基体材料中随机分布的复合材料, 可采用的计算总体热导率式由式 (12)<sup>[18]</sup> 表示为

$$\lambda_c = \left[ \frac{1-f_v}{\lambda_{eff}} + \frac{f_v}{\lambda_f} \right]^{-1} \quad (12)$$

式中:  $f_v$  为纤维体积分数;  $\lambda_{eff}$  为气凝胶气固耦合等效热导率;  $\lambda_f$  为纤维导热系数。

SiO<sub>2</sub> 气凝胶—纤维复合绝热材料的辐射热导率在加入增强纤维后, 复合材料在整个光谱范围内仍具有较大的衰减系数, 满足光学厚度假设, 可参见式 (10) 进行计算, 此时  $\rho_0$  为其复合材料的密度,  $K_{e,m}$  为其复合材料 Rosseland 平均质量衰减系数<sup>[19]</sup>。

## 2 结果与分析

结合上述介绍的气凝胶基体材料热导率计算模型,即式(1),利用 MATLAB 软件编程计算其有效热导率。计算采用的 SiO<sub>2</sub> 固体材料的参数选取见表 1<sup>[20]</sup>,温度取 300 K。

表 1 SiO<sub>2</sub> 物性参数表

块材密度 $\rho_{\text{bulk}}$ $/( \text{kg} \cdot \text{m}^{-3} )$	定容比热 $c_V$ $/( \text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1} )$	声子平均 自由程 $l/\text{m}$	声子速度 $v/( \text{m} \cdot \text{s}^{-1} )$
2200	$1.66 \times 106$	0.58	4100

### 2.1 SiO<sub>2</sub> 气凝胶有效热导率随压强变化规律

SiO<sub>2</sub> 气凝胶有效热导率随压强的变化情况如图 2 所示。可以看出,气凝胶基体材料温度和密度一定时,随着真空度的增加,有效热导率先是急剧减小;当压强 < 1 kPa 时,随压强的降低,有效热导率几乎不变。这是因为压强比较高时,气体分子平均自由程相对较小,且 < 孔隙尺度,分子在孔隙内可自由运动,加之压强大时单位体积内分子数量多,因此气体分子自由碰撞频率高,故气相热导率大。随着压强的减小,气体分子平均自由程逐渐增大,使得分子自由运动受孔隙的束缚作用逐渐增强,另外单位体积内气体分子数量减少,因而气体碰撞几率下降,导致气相热导率下降。同时,固相导热和辐射不受压强变化的影响,因此气凝胶材料有效热导率变化受气相热导率影响,随压强降低而减小。

当压强低至一定程度后,分子平均自由程与气凝胶孔隙尺度相当或大于孔隙尺度时,气体分子自由运动受到严重束缚,分子碰撞几率趋于零,气相热导率趋近于零,此时热量的传递主要是固相导热和辐射传热,而固相导热和辐射传热不受压强变化影响,因而材料有效热导率几乎维持不变。

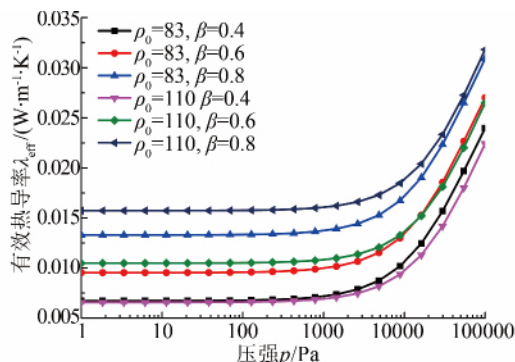


图 2 SiO<sub>2</sub> 气凝胶有效热导率随压强的变化曲线图

### 2.2 SiO<sub>2</sub> 气凝胶有效热导率随密度变化规律

气凝胶材料有效热导率随密度的变化情况如图 3 所示,显示气凝胶热导率随密度减小,呈现先减小后增加趋势。气凝胶密度与孔隙率成反比,因而图 3 表明气凝胶有效热导率随着气凝胶密度的减小或孔隙率的增加不呈单调变化,而是存在最佳密度或最佳孔隙率使有效热导率最小。不同压强下最佳气凝胶密度值及对应的最小热导率见表 2。因为密度减小时固相热导率下降,密度减小表明孔隙率增加,因而气相热导率增加。当密度较高时,固相热导率对有效热导率贡献大,其变化决定有效热导率的变化趋势,因此随着密度的降低有效热导率降低;当密度较小时,气相热导率对有效热导率贡献大,其变化决定有效热导率的变化趋势,因此随着密度的降低有效热导率增加。

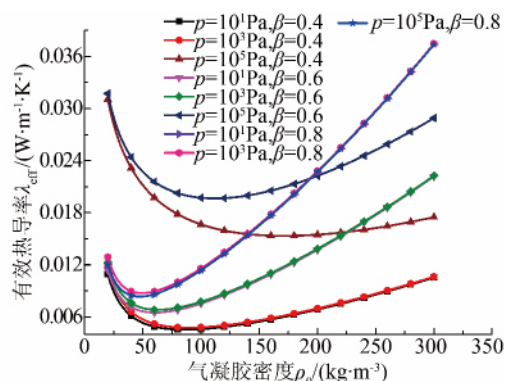


图 3 SiO<sub>2</sub> 气凝胶有效热导率随密度的变化曲线图

### 2.3 纤维体积分数对 SiO<sub>2</sub> 气凝胶—纤维复合材料有效热导率的影响

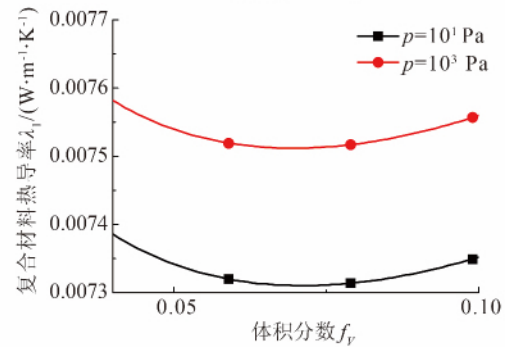
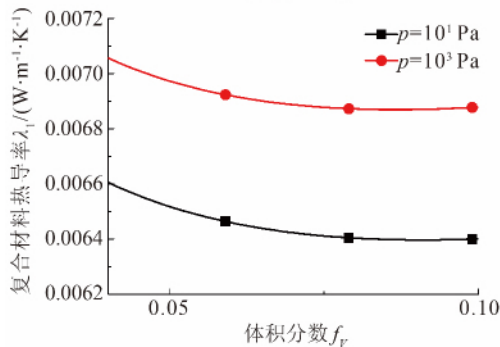
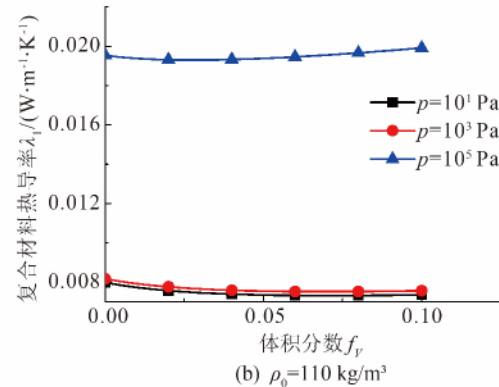
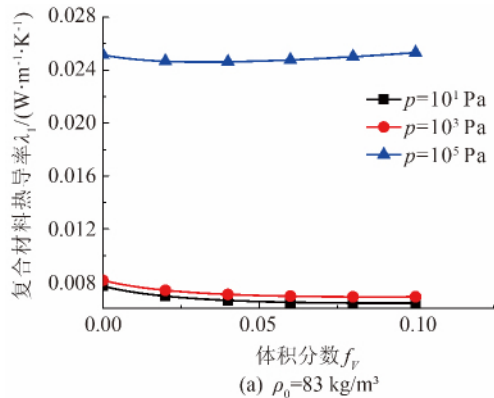
结合密度和压强对气凝胶基体材料有效热导率规律的分析,可知当  $\beta$  为 0.6  $\rho_0$  为 60 ~ 110 kg/m<sup>3</sup>,此时气凝胶基体材料有效热导率相对较小,在此基础上分析复合材料热导率影响规律。SiO<sub>2</sub> 固体颗粒参数见表 1,纤维在气凝胶中随机分布,纤维密度  $\rho_f$  取 2200 kg/m<sup>3</sup>。

模拟计算的复合材料热导率随纤维体积分数的变化规律如图 4 所示,不同压强下最佳纤维体积分数及对应的最小热导率见表 3。结果表明:不同气压条件下,复合材料热导率随着纤维体积分数的增加而增大,但整体变化趋势较缓;低压条件下,复合材料热导率基本趋于不变,但存在一个最佳的纤维体积分数使总体热导率最小。这是因为气凝胶加入纤维后:(1)增加固相热导率;(2)纤维减弱了材料内部的辐射传热。当其他条件不变时,上述 2 个方面的共同作用决定了有效热导率的变化。



表 2 最佳气凝胶密度表

压强 $p/\text{Pa}$	$\beta=0.4$		$\beta=0.6$		$\beta=0.8$	
	密度 $\rho_0$	最小热导率 $\lambda_{\text{eff}}$	密度 $\rho_0$	最小热导率 $\lambda_{\text{eff}}$	密度 $\rho_0$	最小热导率 $\lambda_{\text{eff}}$
	$/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
10	85.0	0.004524	60.1	0.006493	46.9	0.008336
$10^3$	88.0	0.004762	62.2	0.006814	48.6	0.008734
$10^5$	171.4	0.015327	112.0	0.019650	81.0	0.023311



(c) 密度为 83 kg/m³ 时, 10、1000 Pa 的热导率

(d) 密度为 110 kg/m³ 时, 10、1000 Pa 的热导率

图 4 SiO<sub>2</sub> 气凝胶—纤维复合材料有效热导率随纤维体积分数的变化曲线图

表 3 最佳纤维体积分数表

压强 $p$ /Pa	气凝胶密度( $\rho_0 = 83 \text{ kg/m}^3$ )		气凝胶密度( $\rho_0 = 110 \text{ kg/m}^3$ )	
	体积分数	最小热导率 $\lambda_{\text{eff}}$	体积分数	最小热导率 $\lambda_{\text{eff}}$
	$f_v$	$/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$f_v$	$/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
$10^1$	0.091	0.006396	0.071	0.007310
$10^3$	0.086	0.006869	0.069	0.007512
$10^5$	0.033	0.024613	0.027	0.019300

### 3 结论

(1) 有效热导率随真空度增加先急剧降低, 当降至约 1 kPa 后, 有效热导率减小趋缓。其主要原因是随压强减小, 一方面气体分子平均自由程增大, 分子自由运动受孔隙束缚作用增强; 另一方面气体密度减小, 二者共同作用使得气相热导率下降, 因而气凝胶有效热导率降低。

(2) 有效热导率并不随密度变化呈单调变化, 而是存在使有效热导率最小的最佳密度值。这是由

于密度减小导致固相热导率下降, 与此相反的是密度减小孔隙率增加, 使得气相热导率增加。密度较大时, 固相热导率对有效热导率起决定作用; 密度较小时, 气相热导率起决定作用。

(3) 在研究的纤维体积分数范围内, 纤维体积分数对复合材料热导率影响较小, 存在最佳纤维体积分数使总体热导率最小。这是由于纤维增加会增加固相热导率, 但同时抑制了材料内部的辐射传热, 二者共同作用决定了有效热导率的变化。

#### 参考文献:

- [1] 倪文, 刘凤梅. 纳米孔超级绝热材料的原理及制备[J]. 新型建筑材料 2002(1): 36-38.
- [2] 孟闯, 阚安康, 郭志鹏, 等. 真空绝热板研究现状及其在建筑领域的应用[J]. 真空 2017, 54(1): 67-73.
- [3] 郭志鹏, 阚安康, 杨帆, 等. 布置真空绝热板的冷藏集装箱内温度分布[J]. 南京航空航天大学学报 2017, 49(1): 29-33.
- [4] Zeng S Q, Hunt A, Greif R. Geometric structure and thermal

- conductivity of porous medium silica aerogel [J]. Journal of Heat Transfer-Transactions of the ASME, 1995, 117(4): 1055–1058.
- [5] 王立新. 二氧化硅气凝胶纳米孔隙绝热材料气相导热规律研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- [6] Dai Y J, Tang Y Q, Fang W Z, *et al.* A theoretical model for the effective thermal conductivity of silica aerogel composites [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 128: 1634–1645.
- [7] Wei G S, Zhang Y D, Xu C, *et al.* A thermal conductivity study of double-pore distributed powdered silica aerogels [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 108(B): 1297–1304.
- [8] Li Z Y, Zhu C Y, Zhao X P. A theoretical and numerical study on the gas-contributed thermal conductivity in aerogel [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 108: 1982–1990.
- [9] 廖云丹, 吴会军, 丁云飞. SiO<sub>2</sub> 气凝胶力学性能的影响及改善方法[J]. 功能材料, 2010, 41(S2): 201–203.
- [10] 董志军, 李轩科, 袁观明. 莫来石纤维增强 SiO<sub>2</sub> 气凝胶复合材料的制备及性能研究[J]. 化工新型材料, 2006, 34(7): 58–61.
- [11] 杨建明, 吴会军, 王沫然. 预测纤维增强气凝胶复合材料热导率的研究进展[J]. 材料导报, 2015, 29(11): 124–128.
- [12] Zhao J J, Duan Y Y, Wang X D, *et al.* Radiative properties and heat transfer characteristics of fiber-loaded silica aerogel composites for thermal insulation[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, 55(19–20): 5196–5204.
- [13] 陆规, 段远源, 王晓东. 微米尺度结构特征对纳米材料热导率的影响[J]. 宇航材料工艺, 2011, 41(1): 29–33.
- [14] Xie T, He Y L, Hu Z J. Theoretical study on thermal conductivities of silica aerogel composite insulating material [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 58(1–2): 540–552.
- [15] Wang B X, Zhou L P, Peng X F. A fractal model for predicting the effective thermal conductivity of liquid with suspension of nanoparticles [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003, 46: 2665–2672.
- [16] Howell J R, Menguc M P, Siegel R, Thermal Radiation Heat Transfer[M]. Boca Raton: CRC press, 2010.
- [17] He Y L, Xie T. Advances of thermal conductivity models of nanoscale silica aerogel insulation material [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 81: 28–50.
- [18] 杨建明, 吴会军, 钟支葵, 等. 石英玻璃纤维/气凝胶复合材料的热导率计算及优化[J]. 材料导报, 2016, 30(10): 139–143, 147.
- [19] Xie T, He Y L. Heat transfer characteristics of silica aerogel composite materials: Structure reconstruction and numerical modeling [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 95: 621–635.
- [20] Kittel C. Introduction to Solid State Physics [M]. 项金钟, 吴兴惠, 译. 北京: 化学工业出版社, 2005.

(学科责编: 耿斐)

(上接第18页)

- [27] GB 18918—2002 城镇污水处理厂污染物排放标准[S]. 北京: 中国环境出版社, 2002.
- [28] 山东省环境保护厅. 关于批准发布《<山东省南水北调沿线水污染物综合排放标准>等4项标准增加全盐量指标限值修改单》的通知[EB/OL]. (2014-01-24) [2018-05-30]. [http://www.sdein.gov.cn/hjbz/zfjbz/sldb/201401/t20140124\\_248148.html](http://www.sdein.gov.cn/hjbz/zfjbz/sldb/201401/t20140124_248148.html).
- [29] Lundie S, Peters G M, Beavis P C. Life cycle assessment for sustainable metropolitan water systems planning [J]. Environmental Science & Technology, 2004, 38(13): 3465–3473.
- [30] Heinonen J, Saynajoki A, Junnonen J M, *et al.* Pre-use phase LCA of a multi-story residential building: Can greenhouse gas emissions be used as a more general environmental performance indicator? [J]. Building and Environment, 2016, 95: 116–125.
- [31] 纪丹凤, 夏训峰, 刘骏, 等. 北京市生活垃圾处理的环境影响评价[J]. 环境工程学报, 2011, 5(9): 2101–2107.
- [32] Claudio F, Ivan M, Elisa D G, *et al.* Towards a probabilistic approach in LCA of building retrofit measures [J]. Energy Procedia, 2017, 134: 394–403.
- [33] 刘丽. 基于LCA的AAO与AO污水处理工艺比较[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- [34] 王学魁, 赵斌, 张爱群, 等. 城市污水处理厂污泥处置的现状与研究进展[J]. 天津科技大学学报, 2015, 30(4): 1–7.
- [35] 白莉萍, 齐洪涛, 伏亚萍, 等. 北京地区不同城镇污水处理厂堆肥污泥的营养含量和重金属污染[J]. 环境科学, 2014, 35(12): 4648–4654.

(学科责编: 耿斐)