



# 纯纤维芯材孔隙尺度确定法对气相热导率影响

刘云苹<sup>1</sup>, 万 阳<sup>2</sup>, 孙宇飞<sup>1</sup>

(1. 山东建筑大学 热能工程学院, 山东 济南 250101; 2. 中机国际工程设计研究院, 江苏 南京 210000)

**摘 要:** 总结相关文献对纯纤维芯材(真空绝热板芯材)孔隙尺度确定方法(分别定义为文献法1、文献法2、文献法3),提出一种新的孔隙尺度确定方法(定义为新方法)。采用控制变量法(变量选取空气温度、空气压力、纤维直径、纤维在纯纤维芯材中的体积分数),分析孔隙尺度确定方法对气相热导率计算结果的影响。在空气温度、空气绝对压力、纤维直径、纤维在纯纤维芯材中的体积分数(以下简称纤维体积分数)分别为300 K、10 Pa、6  $\mu\text{m}$ 、15%时,由4种孔隙尺度确定方法(文献法1、文献法2、文献法3、新方法)计算的气相热导率分别为 $5.1 \times 10^{-5}$ 、 $4.9 \times 10^{-5}$ 、 $26.6 \times 10^{-5}$ 、 $9.1 \times 10^{-5} \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。在相同设定条件下,由新方法计算得到的气相热导率适中,认为这种确定孔隙尺度的方法可信。在其他设定条件不变的前提下:由不同方法计算的气相热导率均随空气温度(变化范围为253~323 K)的升高而下降。由不同方法计算的气相热导率随空气压力(变化范围为0.1 Pa~100 kPa)的变化趋势均基本一致,在空气压力较低的情况下,气相热导率基本保持不变,随着压力升高,气相热导率急剧升高,且最终趋于相等。由不同方法计算的气相热导率均随纤维体积分数(变化范围为0.01~0.40)的增大而降低。由不同方法计算的气相热导率均随纤维直径(变化范围为2~24  $\mu\text{m}$ )的增大而增大。

**关键词:** 纯纤维芯材; 孔隙尺度; 气相热导率

**中图分类号:** TU55 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-4416(2018)10-0A30-05

DOI:10.13608/j.cnki.1000-4416.2018.10.006

## 1 概述

真空绝热板(Vacuum Insulation Panel, VIP)是基于真空绝热原理制成的一种新型、高效绝热材料,通过最大限度提高板内真空度并充填芯材,实现理想的绝热性能。真空绝热板的芯材主要为纤维型材料,包括气凝胶、复合纤维芯材、纯纤维芯材。

对芯材传热机理进行深入研究,是寻求提高真空绝热板绝热性能的有效途径之一。在对芯材内部气相热导率的相关计算时发现,孔隙尺度对气相热导率产生较大影响。本文针对纯纤维芯材,研究孔隙尺度确定方法对气相热导率(孔隙中气体设定为空气)计算结果的影响。

由于纯纤维芯材的纤维直径处于 $\mu\text{m}$ 级(即孔

隙尺度处于 $\mu\text{m}$ 级),因此本文在 $\mu\text{m}$ 尺度下对纯纤维芯材内部气相热导率进行分析研究。孔隙尺度指孔隙的大小,是衡量多孔介质中所有孔隙的平均尺寸的量。主要与多孔介质的孔隙离散度及孔隙率有关:孔隙分布相对集中,孔隙率比较大时,孔隙尺度大;孔隙均匀地离散在材料中,孔隙率比较小时,孔隙尺度小。

对于颗粒状芯材,孔隙尺度比较容易确定,可以取其有效直径。对于纯纤维芯材,由于纤维的长径比较大,具有两个方向不同的尺度,因此孔隙尺度难以确定。笔者总结相关文献对纯纤维芯材孔隙尺度的确定方法,并提出一种新的孔隙尺度确定方法。采用控制变量法(变量选取空气温度、空气压力、纤

作者简介:刘云苹,女,硕士生,研究方向为可再生能源及建筑节能技术。

收稿日期:2017-11-23; 修回日期:2018-03-24

维直径、纤维在纯纤维芯材中的体积分数),分析孔隙尺度确定方法对气相热导率计算结果的影响。

## 2 孔隙尺度确定方法

### 2.1 文献方法

#### ① 文献法 1

邸小波等人<sup>[1]</sup>提出直接选取纤维直径作为纯纤维芯材的孔隙尺度,优点是方法比较简单,缺点是孔隙尺度的确定仅与纤维直径有关,忽略了纤维空间分布状态与孔隙率对孔隙尺度的影响,因此易产生较大误差。由文献法 1 计算的纯纤维芯材孔隙尺度  $\delta_1$  的计算式为:

$$\delta_1 = d$$

式中  $\delta_1$ ——由文献法 1 计算的纯纤维芯材孔隙尺度,  $\mu\text{m}$

$d$ ——纤维直径,  $\mu\text{m}$

#### ② 文献法 2

Zhao 等人<sup>[2]</sup>考虑了纤维直径、孔隙率对孔隙尺度的影响,提出了孔隙尺度的计算方法。由文献法 2 计算的纯纤维芯材孔隙尺度  $\delta_2$  的计算式为:

$$\delta_2 = dq^{1/3}$$

$$q = 1 - \varphi$$

式中  $\delta_2$ ——由文献法 2 计算的纯纤维芯材孔隙尺度,  $\mu\text{m}$

$q$ ——纤维孔隙率

$\varphi$ ——纯纤维芯材中纤维的体积分数(以下简称纤维体积分数)

#### ③ 文献方法 3

文献[3-7]提出了孔隙尺度的计算方法。由文献法 3 计算的纯纤维芯材孔隙尺度  $\delta_3$  的计算式为:

$$\delta_3 = \frac{\xi d}{\varphi}$$

式中  $\delta_3$ ——由文献法 3 计算的纯纤维芯材孔隙尺度,  $\mu\text{m}$

$\xi$ ——系数

对于系数  $\xi$ ,当纤维在平面分布时取  $\pi/4$ ,在空间分布时取  $\pi/6$ 。由于本文主要研究纤维在平面分布的情况,因此系数  $\xi$  取  $\pi/4$ 。

### 2.2 新方法

考虑孔隙率、纤维直径对孔隙尺度的影响,笔者采用理论推导的方法提出一种新的孔隙尺度确定方法。设定纯纤维芯材由多层孔隙率相同的纤维层叠

加而成,每层纤维层中孔隙均匀分布,那么任取一层纤维层,孔隙体积与固相体积(即纤维体积)之比即为孔隙率与纤维体积分数之比。

由于孔隙尺度是用一个值表示孔隙的大小,并没有区分各个方向上尺度的不同,因此我们也只用一个代表孔隙尺度的变量来求解孔隙体积,这里我们采用球形体积的计算公式计算孔隙体积。设  $\delta_4$  为孔隙的直径(即孔隙尺度),并将孔隙视为球形,得到孔隙体积  $V$  的计算式为:

$$V = \frac{\pi \delta_4^3}{6}$$

式中  $V$ ——孔隙的体积,  $\text{m}^3$

$\delta_4$ ——孔隙的直径(即孔隙尺度),  $\mu\text{m}$

由于固相部分由相互交叉、长短不一、方向随机的纤维组成,仅已知纤维的直径,并不已知所有纤维的总长度,因此固相部分的体积也不容易确定。为了建立孔隙尺度、孔隙率、纤维直径三者的关系,并简化计算,我们把圆柱形的纤维体积等效成若干个以纤维直径  $d$  为直径的球的体积。那么固相纤维球体积  $V_s$  的计算式为:

$$V_s = \frac{\pi d^3}{6}$$

式中  $V_s$ ——固相纤维球的体积,  $\mu\text{m}^3$

考虑到孔隙均匀分布在纤维中间,为了简化计算,我们设定孔隙的数量与纤维球的数量相等,则孔隙体积  $V$  与固相纤维球体积  $V_s$  之比可表达为:

$$\frac{V}{V_s} = \frac{\delta_4^3}{d^3} = \frac{1 - \varphi}{\varphi}$$

整理后,得到由新方法计算的纯纤维芯材孔隙尺度  $\delta_4$  的计算式为:

$$\delta_4 = d \left( \frac{1 - \varphi}{\varphi} \right)^{1/3}$$

## 3 气相热导率的计算方法

根据分子运动论,气体导热是通过气体分子在进行热运动时相互碰撞进行的,而孔隙尺度对气体分子的热运动有着重要的影响。对受限空间中的气相热导率的计算,本文采用应用最广泛的 Kaganer 模型<sup>[8-10]</sup>:

$$\lambda_g = \frac{(1 - \varphi) \lambda_0}{1 + \frac{5\pi}{12} \cdot \frac{9\gamma - 5}{\gamma + 1} \cdot \frac{2 - \alpha}{\alpha} \cdot Kn}$$

式中  $\lambda_g$ ——受限空间中的气相热导率,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

K)

$\lambda_0$ ——自由空间中静态气体的热导率, W/(m·K)

$\gamma$ ——空气的比热容比(空气的比定压热容与比定容热容之比) 本文取 1.4

$\alpha$ ——相容系数, 对于简单非极性气体通常取 1

$Kn$ ——克努森数

自由空间中静态气体的热导率  $\lambda_0$  的计算式为<sup>[11]</sup>:

$$\lambda_0 = \frac{(2.25\gamma - 1.25) 0.922 m_g \left( \frac{kT}{\pi m_g} \right)^{0.5} c_V}{\pi d_g^2}$$

式中  $m_g$ ——单个空气分子平均质量, kg, 为  $4.648 \times 10^{-26}$  kg

$k$ ——玻耳兹曼常数 J/K, 为  $1.38 \times 10^{-23}$  J/K

$T$ ——空气的温度, K

$c_V$ ——空气的比定容热容 J/(kg·K)

$d_g$ ——空气分子的直径, m, 取  $3.72 \times 10^{-10}$  m

对于空气比定容热容 根据不同温度下的空气比定压热容及空气比热容比确定。

克努森数  $Kn$  的计算式为<sup>[8]</sup>:

$$Kn = \frac{L_m}{\delta}$$

$$L_m = \frac{kT}{\sqrt{2} \pi d_g^2 p_g}$$

式中  $L_m$ ——空气分子平均自由程,  $\mu$ m

$\delta$ ——纯纤维芯材孔隙尺度

$p_g$ ——空气的绝对压力, Pa

本文的空气压力 均指空气的绝对压力。

#### 4 计算结果与讨论

我们分别采用确定纯纤维芯材孔隙尺度的文献法 1、文献法 2、文献法 3、新方法, 结合气相热导率的计算方法, 采用控制变量法(变量选取空气温度、空气压力、纤维直径、纤维体积分数) 分析不同孔隙尺度确定方法对气相热导率计算结果的影响。由于本文仅研究不同孔隙尺度确定方法对气相热导率计算结果的影响, 因此将不同孔隙尺度确定方法等效为气相热导率计算方法。

##### 4.1 气相热导率计算结果

空气温度设定为 300 K, 空气压力设定为 10

Pa, 纤维直径设定为 6  $\mu$ m, 纤维体积分数设定为 15%。由 4 种方法计算得到的气相热导率见表 1。由表 1 可知, 在相同设定条件下, 由文献法 3 计算得到的气相热导率最大, 由新方法计算得到的气相热导率次之, 由文献法 1、文献法 2 计算得到的气相热导率比较接近且最小, 计算结果由大到小的排序为文献法 3、新方法、文献法 1、文献法 2。在相同设定条件下, 由新方法计算得到的气相热导率适中, 认为这种确定孔隙尺度的方法可信。

表 1 由 4 种计算方法计算得到的气相热导率

| 计算方法  | 气相热导率/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ) |
|-------|---------------------------------------------|
| 文献法 1 | $5.1 \times 10^{-5}$                        |
| 文献法 2 | $4.9 \times 10^{-5}$                        |
| 文献法 3 | $26.6 \times 10^{-5}$                       |
| 新方法   | $9.1 \times 10^{-5}$                        |

##### 4.2 影响因素分析

###### ① 温度

在其他设定条件不变的前提下, 由不同方法计算的气相热导率随空气温度(变化范围为 253 ~ 323 K) 的变化见图 1。由图 1 可知, 随着空气温度的升高, 气相热导率呈下降趋势。

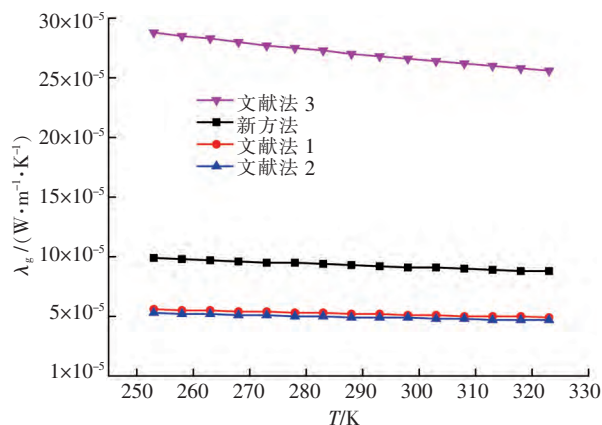


图 1 由不同方法计算的气相热导率随空气温度的变化

###### ② 空气压力

在其他设定条件不变的前提下, 由不同方法计算的气相热导率随空气压力(变化范围为 0.1 Pa ~ 100 kPa) 的变化见图 2。由图 2 可知, 由不同方法计算的气相热导率随空气压力的变化趋势均基本一致, 在空气压力较低的情况下, 气相热导率基本保持不变, 随着压力升高, 气相热导率急剧升高, 且趋于相等。

主要因为在空气压力较高时, 孔隙尺度远大

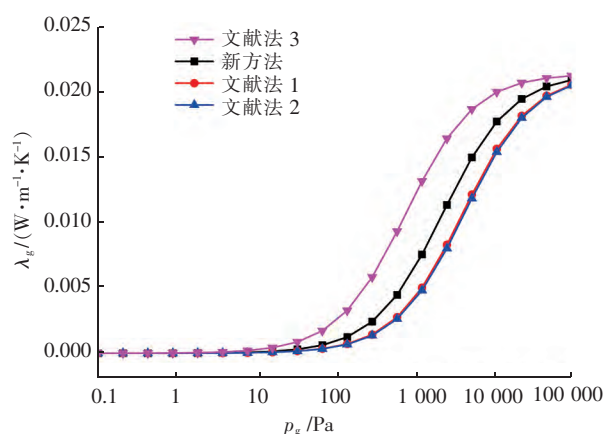


图2 由不同方法计算的气相热导率随空气压力的变化  
于空气分子的平均自由程,分子运动剧烈,使得气相热导率提高。空气分子的平均自由程随着压力的降低而变大,气体分子的活动受到一定的限制,当空气分子的平均自由程大到与孔隙尺度相同时,气体分子的运动几乎完全受到限制,即使压力继续降低,气相热导率也不会继续降低。

### ③ 纤维体积分数

在其他设定条件不变的前提下,由不同方法计算的气相热导率随纤维体积分数(变化范围为 0.01 ~ 0.40)的变化见图 3。由图 3 可知,由不同方法计算的气相热导率随纤维体积分数的变化趋势均基本一致,均随着纤维体积分数的增大而降低。主要是由于纤维体积分数的增大,限制了空气分子的热运动,使气相热导率变小。

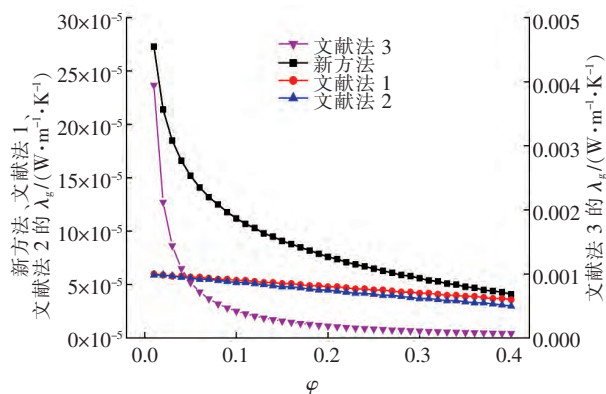


图3 由不同方法计算的气相热导率  
随纤维体积分数的变化

### ④ 纤维直径

在其他设定条件不变的前提下,由不同方法计算的气相热导率随纤维直径(变化范围为 2 ~ 24 μm)的变化见图 4。由图 4 可知,由不同方法计算的气相热导率随纤维直径的变化趋势均基本一致,

均随着纤维直径的增大而增大。主要原因为随着纤维直径的变大使孔隙尺度变大,进而对空气分子的限制作用减小,气相热导率增大。

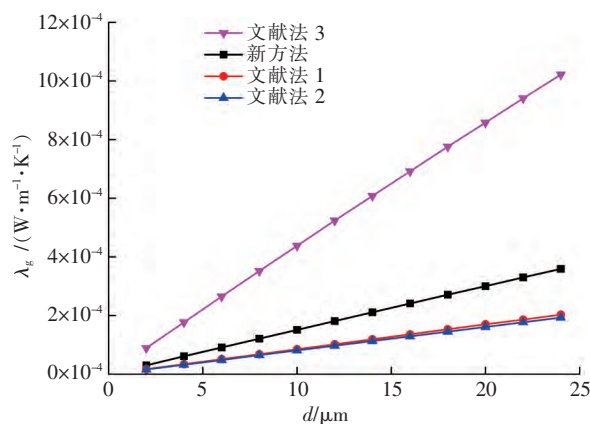


图4 由不同方法计算的气相热导率随纤维直径的变化

## 5 结论

总结相关文献对纯纤维芯材孔隙尺度确定方法(分别定义为文献法 1、文献法 2、文献法 3),提出一种新的孔隙尺度确定方法(定义为新方法)。采用控制变量法(变量选取空气温度、空气压力、纤维直径、纤维在纯纤维芯材中的体积分数),分析孔隙尺度确定方法对气相热导率计算结果的影响。在空气温度、空气压力、纤维直径、纤维在纯纤维芯材中的体积分数(以下简称纤维体积分数)分别为 300 K、10 Pa、6 μm、15% 时,由 4 种孔隙尺度确定方法(文献法 1、文献法 2、文献法 3、新方法)计算的气相热导率分别为  $5.1 \times 10^{-5}$ 、 $4.9 \times 10^{-5}$ 、 $26.6 \times 10^{-5}$ 、 $9.1 \times 10^{-5}$  W/(m·K)。在相同设定条件下,由新方法计算得到的气相热导率适中,认为这种确定孔隙尺度的方法可信。

在其他设定条件不变的前提下:由不同方法计算的气相热导率均随空气温度(变化范围为 253 ~ 323 K)的升高而下降。由不同方法计算的气相热导率随空气压力(变化范围为 0.1 Pa ~ 100 kPa)的变化趋势均基本一致,在空气压力较低的情况下,气相热导率基本保持不变,随着压力升高,气相热导率急剧升高,且最终趋于相等。由不同方法计算的气相热导率均随纤维体积分数(变化范围为 0.01 ~ 0.40)的增大而降低。由不同方法计算的气相热导率均随纤维直径(变化范围为 2 ~ 24 μm)的增大而增大。

## 参考文献:

- [1] 邱小波, 鲍崇高, 高义民, 等. 真空绝热板导热系数与板内真空度关系研究[J]. 真空, 2011, 48(3): 12-15.
- [2] ZHAO J J, DUAN Y Y, WANG X D, et al. A3-D numerical heat transfer model for silica aerogels based on the porous secondary nanoparticle aggregate structure[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2012, 358(10): 1287-1297.
- [3] DARYABEIGI K, CUNNINGTON G R, KNUTSON J R. Combined heat transfer in high-porosity high-temperature fibrous insulation: theory and experimental validation[C]// 10th AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference. Chicago: AIAA, 2010: 536-546.
- [4] KAGANER M G. Thermal Insulation in Cryogenic Engineering[M]. Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations Press, 1969: 75-76.
- [5] DARYABEIGI K, CUNNINGTON G R, KNUTSON J R. Heat transfer modeling for rigid high-temperature fibrous insulation[J]. Journal of Thermophysics & Heat Transfer, 2013, 27(3): 414-421.
- [6] LEE S C, CUNNINGTON G R. Conduction and radiation heat transfer in highporosity fiber thermal insulation[J]. J. Thermophys. Heat Transf., 2000, 14(2): 121-136.
- [7] BANKVALL C. Heat transfer in fibrous materials[J]. J. Test. Eval., 1973(3): 235-243.
- [8] LU X, ARDUINI-SCHUSTER M C, KUHN J, et al. Thermal conductivity of monolithic organic aerogels[J]. Science, 1992, 255(5047): 971-972.
- [9] FGE H. Thermal transport properties of functionally graded carbon aerogels[J]. International Journal of Thermophysics, 2009, 30(4): 1357-1371.
- [10] SWIMM K, REICHENAUER G, VIDI S, et al. Gas Pressure dependence of the heat transport in porous solids with pores smaller than 10  $\mu\text{m}$ [J]. International Journal of Thermophysics, 2009, 30(4): 1329-1342.
- [11] KAGANER M G, MOSCONA A. Thermal insulation in cryogenic engineering[M]. Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations, 1969: 227.

### Influence of Pore Size Determination Methods of Pure Fiber Core Material on Gas-phase Thermal Conductivity

LIU Yunping, WAN Yang, SUN Yufei

**Abstract:** The methods for determining the pore size of pure fiber core material in the related literatures (defined as literature method 1, literature method 2 and literature method 3 respectively) are summarized. A new method for determining the pore size (defined as the new method) is proposed. The influence of pore size determination methods on the calculation result of gas-phase thermal conductivity is analyzed by the control variable method (variables are air temperature, air pressure, fiber diameter and the volume fraction of fiber in pure fiber core). When the air temperature, air pressure, fiber diameter and the volume fraction of fiber in pure fiber core (hereinafter referred to as fiber volume fraction) are 300 K, 10 Pa, 6  $\mu\text{m}$  and 15% respectively, the gas-phase thermal conductivities calculated by 4 kinds of methods (literature method 1, literature method 2, literature method 3 and new method) are  $5.1 \times 10^{-5}$ ,  $4.9 \times 10^{-5}$ ,  $26.6 \times 10^{-5}$  and  $9.1 \times 10^{-5} \text{ W}/(\text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$  respectively. Under the same setting conditions, the gas-phase thermal conductivity calculated by the new method is moderate, and it is believed that this method for determining the pore size is credible. Under the premise that other setting conditions are unchanged, the gas-phase thermal conductivities calculated by different methods decrease with the increase of air temperature (the variation range is 253 to 323 K), and the variation trends of gas-phase thermal conductivities calculated by different methods with the air pressure (the variation range is 0.1 Pa to 100 kPa) are basically the same. In the case of low air pressure, the gas-phase thermal conductivity basically remains unchanged, and as the pressure increases, the gas-phase thermal conductivity rises sharply and eventually tends to be equal. The gas-phase thermal conductivities calculated by different methods decrease with the increase of the fiber volume fraction (the variation range is 0.01 to 0.40). The gas-phase thermal conductivities calculated by different methods increase with the increase of the fiber diameter (the variation range is 2 to 24  $\mu\text{m}$ ).

**Key words:** pure fiber core material; pore size; gas-phase thermal conductivity