

研究论文

## 遮光剂对气凝胶复合材料隔热性能的影响

方文振, 张虎, 屈肖迪, 何雅玲, 陶文铨

(西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 纯气凝胶对近红外波长几乎透明, 遮光剂的加入可以显著抑制气凝胶的高温辐射性能。采用 Mie 散射理论计算出掺杂不同种类、粒径遮光剂时复合气凝胶的平均消光系数, 从而比较它们的遮光效果。采用基于瞬态平面热源法的 Hot Disk TPS2500S 导热仪测量了不同温度下复合气凝胶的热导率, 获得了遮光剂对气凝胶复合材料隔热性能的影响规律, 并与理论分析结果进行了对比。理论计算获得的不同温度下复合气凝胶的热导率与实验值符合良好, 表明: 在研究的范围内, 掺杂的最佳遮光剂粒径在  $3.5 \mu\text{m}$  左右; SiC 的遮光效果比  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{ZrO}_2$  好; 存在一个最佳的遮光剂体积含量 ( $3.75\%$  左右) 使得复合气凝胶的整体隔热性能最好; 所建立的理论模型可用来预测掺杂遮光剂的影响规律。

**关键词:** 气凝胶; 遮光剂; 辐射; Mie 散射; 瞬态平面热源法; 纳米多孔材料

**DOI:** 10.3969/j.issn.0438-1157.2014.z1.027

**中图分类号:** TK 124

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0438—1157(2014)S1—168—07

## Influence of opacifiers on thermal insulation properties of composite aerogels

FANG Wenzhen, ZHANG Hu, QU Xiaodi, HE Yaling, TAO Wenquan

(Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering of Ministry of Education, School of Energy & Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China)

**Abstract:** Aerogels are almost transparent to the near-infrared wavelengths, and therefore the opacifiers are widely doped to enhance aerogels insulation performances. Mie scattering theory was employed to calculate the mean extinction coefficient of composite aerogels doped with different kinds of opacifiers with different diameters and their shading effects were compared. A Hot Disk TPS2500S thermal analyzer based on the transient plane source method was used to measure the thermal conductivity of composite aerogels at different temperature and comparison with the theoretical analysis was conducted. The predicted thermal conductivities by theoretical model are in good agreement with the experimental data obtained by the Hot Disk thermal analyzer at different temperature. The results show that the optimal diameter of doped opacifiers is approximately at  $3.5 \mu\text{m}$ , the shading effect of SiC opacifier is better than that of  $\text{TiO}_2$  and  $\text{ZrO}_2$ , and there exists an optimal volume content of opacifiers ( $\sim 3.75\%$ ) making the overall thermal insulation performance best. The developed theoretical model can be adopted to predict the influence of doped opacifiers on the effective thermal conductivity of composite aerogels.

**Key words:** aerogels; opacifiers; thermal radiation; Mie scattering; transient plane source method; nanoporous materials

2014-01-28 收到初稿, 2014-02-10 收到修改稿。

联系人: 陶文铨。第一作者: 方文振 (1990—), 男, 硕士研究生。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51136004, 51276138); 中国教育科研网格。

**Received date:** 2014-01-28.

**Corresponding author:** Prof. TAO Wenquan, wqtao@mail.xjtu.edu.cn

**Foundation item:** supported by the National Natural Science Foundation of China (51136004, 51276138) and ChinaGrid.

## 引言

气凝胶是一种超轻纳米多孔材料，具有高度复杂的多孔空间网络骨架结构，极高的孔隙率（80%~99.8%）、比表面积（100~1600 kg·m<sup>-3</sup>）以及极低的密度（3~500 kg·m<sup>-3</sup>），在常温常压下其热导率可低至 0.013 W·(m·K)<sup>-1</sup> [1]，在航空航天及民用节能等领域具有很大的应用潜力。然而纯气凝胶对 2~10 μm 的近红外波长几乎透明 [2]，高温隔热性能差，实际使用中经常加入遮光剂来提高它的高温隔热性能。常见的遮光剂有炭黑、SiC、TiO<sub>2</sub> 和 ZrO<sub>2</sub> [3-4] 等。

气凝胶中的传热途径包括固相导热、气相导热、辐射传热 [5]。而遮光剂的加入改变了气凝胶中各传热途径的比例，它在抑制复合气凝胶辐射传热的同时也增加了材料的固态导热，且不同种类、粒径遮光剂对复合气凝胶隔热性能的影响效果差别很大 [6]。目前，对于遮光剂对复合气凝胶隔热性能影响的研究工作主要是在理论上定性分析，缺乏相应的实验研究 [7-10]。本文一方面通过 Mie 散射原理计算出各遮光剂的光谱消光系数来比较它们的消光性能；同时采用基于瞬态平面热源法 [11-12] 的 Hot Disk 导热仪 (TPS2500S) 实验测量不同温度下复合气凝胶的热导率，从而对比掺杂不同种类、粒径、含量时遮光剂的遮光效果。本文采用 Zeng 等 [13] 提出的交叉立方球等效结构单元体模型计算出纯气凝胶的热导率，然后采用 Mie 散射理论计算遮光剂复合气凝胶的消光系数，最后计算出掺杂遮光剂后复合气凝胶的热导率，并与实验结果进行对比。研究遮光剂对气凝胶隔热性能的影响可为气凝胶隔热性能的预测和优化设计提供依据，并为实现快速工程计算打下基础。

## 1 理论计算

### 1.1 复合气凝胶等效热导率的计算

气凝胶及其复合材料的等效热导率可以看成是由气固耦合的热导率和辐射热导率两部分组成的 [14-15]

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_c + \lambda_r \quad (1)$$

其中， $\lambda_c$  是气固耦合的热导率， $\lambda_r$  是辐射热导率。

纯气凝胶气固耦合的热导率  $\lambda_{a,c}$ ，可以基于 Zeng 等 [13] 提出的交叉立方球等效结构单元体获得

$$\lambda_{a,c} = \frac{\lambda_g \pi d}{2nD'k} \left[ -\sqrt{1 - \left(\frac{a}{d}\right)^2} - \frac{D'}{nkd} \ln \left( 1 - \frac{ndk}{D'} \sqrt{1 - \left(\frac{a}{d}\right)^2} \right) \right] + \frac{1}{4} \pi \left(\frac{a}{D'}\right)^2 \lambda_s + \frac{\lambda_g \pi (n-1)d}{D'k} \left[ \frac{a}{d} - 1 + \frac{D'}{kd} \ln \left( \frac{D'-ka}{D'-kd} \right) \right] + \left( 1 - \frac{d}{D'} \right)^2 \lambda_g \quad (2)$$

其中， $d$  是纳米颗粒直径， $D'$  是单元体边长， $a$  是两纳米颗粒小球接触面的直径， $k = 1 - \lambda_g/\lambda_s$ ，其中  $\lambda_s$  为纳米颗粒骨架的固相热导率，由于骨架颗粒的尺度和其声子平均自由程的数量级相当，故需考虑其纳米尺度效应 [14]

$$\lambda_s = \frac{\lambda_{\text{bulk}}}{1 + \frac{\Lambda_{\text{bulk}}}{a} + \frac{\Lambda_{\text{bulk}}}{3LT_d}} \quad (3)$$

其中， $\lambda_{\text{bulk}}$ 、 $\Lambda_{\text{bulk}}$  分别为块材的热导率和声子平均自由程， $L = \sqrt{D'^2 - a^2}$ ， $T_d = 0.5$ 。

气凝胶内的气相热导率  $\lambda_g$  [16] 为

$$\lambda_g = \frac{0.461 (2.25\gamma - 1.25) (\rho/k_B T) (8k_B T/\pi m_g)^{\frac{1}{2}} m_g c_v}{1 + 2 \frac{2\gamma}{\gamma + 1} \frac{1}{Pr} \frac{1}{\alpha} \frac{1}{\sqrt{2\pi d_g^2 \rho/k_B T} + 0.25 S_s \rho_{\text{por}} \varphi^{-1}} \frac{1}{l_{\text{ch}}}} \quad (4)$$

气凝胶掺杂遮光剂后其气固耦合热导率  $\lambda_{a+op,c}$  将增加，复合气凝胶的  $\lambda_{a+op,c}$  可由 Maxwell 模型 [14,17] 获得

$$\frac{\lambda_{a+op,c}}{\lambda_{a,c}} = 1 + \frac{3(\alpha - 1)\varphi_{\text{op}}}{(\alpha + 2) - (\alpha - 1)\varphi_{\text{op}}} \quad (5)$$

其中， $\alpha$  是遮光剂和纯气凝胶的热导率之比  $\lambda_{\text{op}}/\lambda_{a,c}$ ； $\varphi_{\text{op}}$  是遮光剂的体积分。

复合气凝胶中辐射沿途被散射和吸收，只能在很短的一段距离内传播，认为满足光学厚度假设，因此辐射热流量可用 Rossland 扩散近似方程 [18] 来描述

$$q_r = -\frac{16}{3\beta_{\text{total}}} \sigma T^3 \frac{\partial T}{\partial x} = -\lambda_r \frac{\partial T}{\partial x} \quad (6)$$

其中， $\beta_{\text{total}}$  是复合气凝胶的整体消光系数，遮光剂的加入将使  $\beta_{\text{total}}$  增大。复合气凝胶的辐射热导率为

$$\lambda_r = \frac{16}{3\beta_{\text{total}}} \sigma T^3 \quad (7)$$

综上，复合气凝胶的等效热导率可将式 (5) 和式 (7) 代入式 (1) 而获得。

### 1.2 Mie 散射理论计算遮光剂的消光系数

当颗粒直径与入射光波长在同一数量级时，发生的散射形式是 Mie 散射。气凝胶对 2~10 μm 波长的近红外辐射近乎透明，常加入相同尺寸量级的

遮光剂来改善隔热性能，因此可通过 Mie 散射理论分析遮光剂的遮光效果。粒子的消光作用是颗粒散射和吸收作用的共同结果，消光效率  $Q_{\text{ext}}$  是散射截面和吸收截面与实际截面之比。假设遮光剂颗粒均匀分布在气凝胶基体中，且颗粒之间互不干涉，则单颗遮光剂的消光效率  $Q_{\text{ext}}$  可由 Mie 散射<sup>[19]</sup> 计算得到

$$Q_{\text{ext}} = \frac{2}{x^2} \text{Re} \left[ \sum_{j=1}^{\infty} (2j+1)(a_j + b_j) \right] \quad (8)$$

$$a_j = \frac{\psi'_j(mx)\psi_j(x) - m\psi_j(mx)\psi'_j(x)}{\psi'_j(mx)\xi_j(x) - m\psi_j(mx)\xi'_j(x)} \quad (9)$$

$$b_j = \frac{m\psi'_j(mx)\psi_j(x) - \psi_j(mx)\psi'_j(x)}{m\psi'_j(mx)\xi_j(x) - \psi_j(mx)\xi'_j(x)} \quad (10)$$

其中，尺度参数  $x = \pi D/\lambda'$ ，符号 Re 表示取实部， $a_j$ 、 $b_j$  为 Mie 散射系数， $m$  是复折射系数，而  $\psi_j(x) = xJ_j(x)$ ， $\xi_j(x) = xJ_j(x) - ixY_j(x)$ ，其中  $J_j(x)$ 、 $Y_j(x)$  为第一、第二类球贝塞尔函数，式 (9) 和式 (10) 中的  $\psi'_j$ ， $\xi'_j$  是它们的导数。

遮光剂的粒径给定时，由 Beer 定理可得其透射率<sup>[10]</sup> 为

$$\tau = \frac{I}{I_0} = e^{-\beta_x L} = e^{-\frac{1}{4}\pi D^2 Q_{\text{ext}} N L} \quad (11)$$

其中， $I$ 、 $I_0$  分别是透射光、入射光强度， $\beta_x$  是光谱消光系数， $D$  是遮光剂粒径， $L$  是光透过材料的厚度， $N$  是粒子数密度。由式 (11) 可得遮光剂的光谱消光系数

$$\beta_x = \frac{3}{2} Q_{\text{ext}} \frac{\varphi_{\text{op}}}{D} \quad (12)$$

其中， $\varphi_{\text{op}}$  是体积分数， $\varphi_{\text{op}} = \pi D^3 N/6$ 。

在一定温度下，遮光剂的平均消光系数是不同权重的光谱消光系数在一定波长范围内积分平均值

$$\beta(T) = \frac{1}{\int_0^{\infty} \frac{1}{\beta_x} \frac{\partial E_{\text{b}\lambda}}{\partial E_{\text{b}}} d\lambda} \approx \frac{1}{\int_{\lambda'_{\text{min}}}^{\lambda'_{\text{max}}} \frac{1}{\beta_x} \frac{\partial E_{\text{b}\lambda'}}{\partial E_{\text{b}}} d\lambda'} \quad (13)$$

其中，

$$\frac{\partial E_{\text{b}\lambda'}}{\partial E_{\text{b}}} = \frac{\partial}{\partial E_{\text{b}}} \left( \frac{C_1}{\lambda'^5 \{ \exp[(C_2/\lambda')(\sigma/E_{\text{b}})^{1/4}] - 1 \}} \right) = \frac{1}{4} \frac{C_1 C_2}{\lambda'^6} \frac{\sigma^{1/4}}{E_{\text{b}}^{5/4}} \frac{\exp[(C_2/\lambda')(\sigma/E_{\text{b}})^{1/4}]}{\{ \exp[(C_2/\lambda')(\sigma/E_{\text{b}})^{1/4}] - 1 \}^2} \quad (14)$$

$C_1$  是第一辐射常量， $C_1 = 3.7419 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$ ； $C_2$  是第二辐射常量， $C_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ 。

复合气凝胶的总消光系数可按式 (15) 计算

$$\beta_{\text{total}} = \beta_{\text{op}} + \beta_{\text{a}}(1 - \varphi_{\text{op}}) \quad (15)$$

其中， $\beta_{\text{op}}$  是遮光剂的消光系数， $\beta_{\text{a}}$  是纯气凝胶的消光系数， $\varphi_{\text{op}}$  是遮光剂体积分数。

## 2 热导率实验系统及方法

本文基于瞬态平面热源法<sup>[11-12]</sup> (Hot Disk) 测量复合气凝胶常压时在不同温度下的热导率。实验装置示意图如图 1 所示。

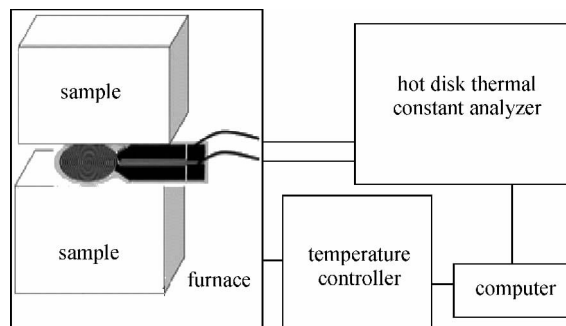


图 1 热导率测试实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of thermal conductivity measurement apparatus

在一定的测试时间内，给测试探头通入恒定的功率，此时 Hot Disk 探头表面和待测样品内部都会有一个相应的温度响应，探头表面的温升可通过探头内镍丝的电阻变化监测得到，因此探头既是热源又是温度传感器。探头表面的温升大小与其相接触的待测样品的热物性（热扩散系数、热导率）密切相关。当待测样品的热导率大时，在相同的时间内可以导走更多的热量，探头表面温升较小；而当待测样品的热导率较小时，探头表面温升较大。通过监测探头表面的温升曲线，经过处理可同时测试出待测样品的热导率和热扩散系数<sup>[12,20]</sup>。

## 3 结果及分析

复折射系数 ( $m = n - ik$ ) 是遮光剂的基本光学参数，实部  $n$  为遮光剂的折射率，虚部  $k$  是吸收系数。通过复折射系数  $m$ ，可由 Mie 散射原理算出遮光剂的消光效率  $Q_{\text{ext}}$ ，进而计算出消光系数  $\beta$ 。遮光剂的复折射系数可由文献 [21] 获得。根据 Matlab 程序计算的结果，SiC 遮光剂的消光效率  $Q_{\text{ext}}$  与尺寸参数  $x$  ( $x = \pi D/\lambda'$ ) 的关系如图 2 所示。

由图 2 可知当入射波长远大于直径时（此时  $x \rightarrow 0$ ），消光效率  $Q_{\text{ext}}$  趋近于零；而当入射波长远小于颗粒直径时（此时  $x \rightarrow \infty$ ），消光效率  $Q_{\text{ext}}$  趋近于 2，也即消光截面是实际几何截面的两倍，

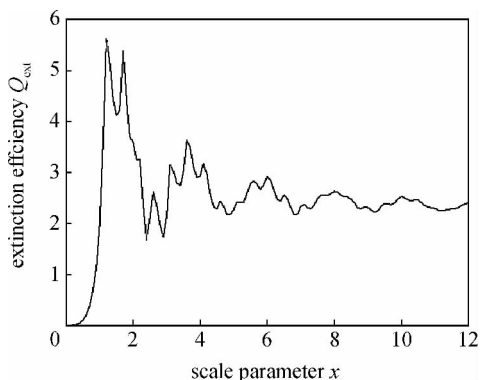


图 2 遮光剂消光效率随尺寸参数的变化

Fig. 2 Opacifiers extinction efficiency vs scale parameter

符合 Mie 散射规律。

### 3.1 遮光剂粒径的影响

从图 2 中可以看出，对于同一入射波长，不同粒径遮光剂相对应的尺寸参数  $x$  不同，因此不同粒径单颗遮光剂的光谱消光效率不一样。粒径对消光系数的影响因素并不是单一的，可根据式 (11) 来获得它们的光谱消光系数 (图 3)。从图 3 的光谱消光系数可以计算得到在  $0 \sim 25 \mu\text{m}$  波段内、不同温度下遮光剂的平均消光系数 (图 4)。从图 4 可得，当温度较低 ( $< 650 \text{ K}$ ) 时，对应最大的平均消光系数是粒径为  $4 \mu\text{m}$  的遮光剂，因而最佳粒径是  $D = 4 \mu\text{m}$ ；而当温度较高 ( $> 650 \text{ K}$ ) 时，最佳的遮光剂粒径  $D = 3 \mu\text{m}$ 。由维恩位移定律可知，当温度升高时，对应于最大光谱辐射力的波长  $\lambda_m$  将向短波方向移动，因此相应的遮光剂粒径也应该减小。

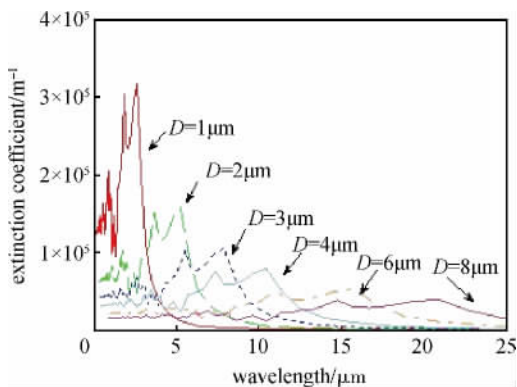


图 3 不同粒径遮光剂的光谱消光系数

Fig. 3 Effect of opacifier diameter on spectrum extinction coefficient

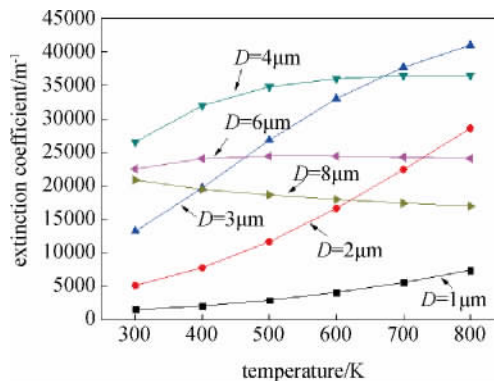


图 4 不同粒径遮光剂的平均消光系数

Fig. 4 Effect of opacifier diameter on mean extinction coefficient at different temperature

图 5 的实验测量结果也表明，对于分别掺杂粒径为  $1.5、3.5、7、14 \mu\text{m}$  SiC 遮光剂的复合气凝胶，粒径为  $3.5 \mu\text{m}$  的遮光效果最好，而  $14 \mu\text{m}$  粒径的遮光效果最差。

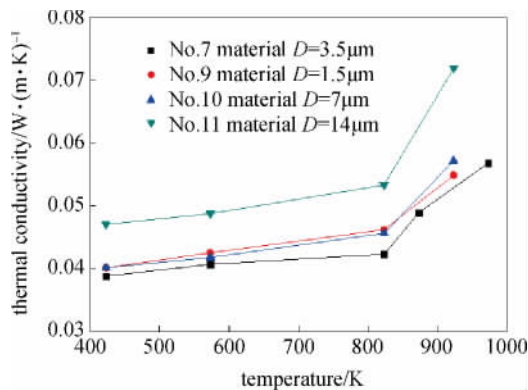


图 5 遮光剂粒径对复合气凝胶热导率的影响规律

Fig. 5 Effect of opacifier diameter on thermal conductivity of composite aerogels

### 3.2 遮光剂种类的影响

不同种类遮光剂的复折射系数不一样，因而它们的消光效果不同。本文理论计算了几种常见遮光剂在不同温度下的平均消光系数。

图 6 中纯气凝胶在不同温度下的平均消光系数是文献 [7] 中的光谱消光系数在  $0 \sim 25 \mu\text{m}$  波段按式 (13) 的计算结果。由图可见，遮光剂的消光系数高于纯气凝胶的，因此遮光剂的加入有助于抑制气凝胶的辐射传热量，特别是在高温时。不同遮光剂的遮光效果不一样：炭黑的遮光效果最好，SiC 其次，但是炭黑在高温下易被氧化，只能在  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  以下的工作环境中使用。SiC 的遮光效果较

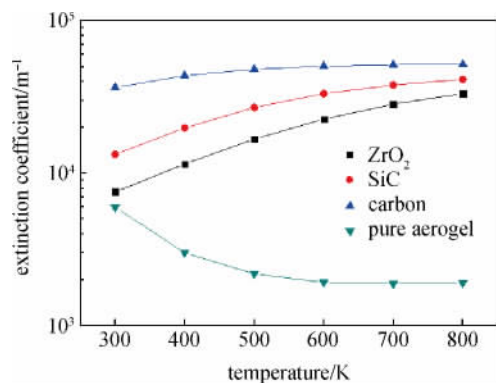


图 6 不同种类遮光剂的消光系数随温度的变化  
Fig 6 Effect of opacifier type on extinction coefficient at different temperature

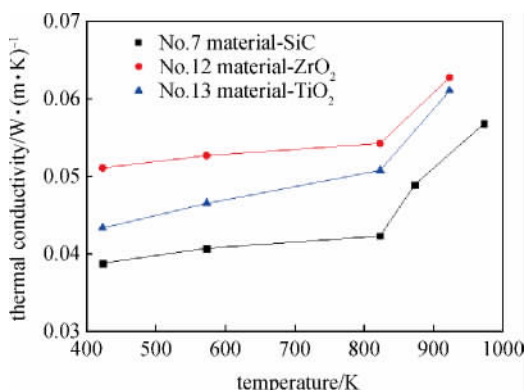


图 7 遮光剂种类对复合气凝胶热导率的影响规律  
Fig 7 Effect of opacifier type on thermal conductivity of composite aerogels

好且高温下稳定，综合性能突出。在具有温度梯度的服役环境下，可在靠近高温区添加 SiC，而在低温区使用炭黑，以提高材料的整体遮光性能。

同种粒径 (3.5 μm) 下掺杂不同种类遮光剂 (SiC、TiO<sub>2</sub>、ZrO<sub>2</sub>) 的复合气凝胶在不同温度下的热导率的测试结果如图 7 所示，结果表明添加 SiC 遮光剂的遮光效果比 TiO<sub>2</sub> 和 ZrO<sub>2</sub> 的好。

### 3.3 遮光剂体积分量的影响

遮光剂自身的热导率比气凝胶基体的热导率高，因此遮光剂的加入虽然增加了材料的消光系数，但同时也提高了复合材料的固态热导率。从理论上讲，存在着最佳的遮光剂体积含量，使遮光剂的整体隔热性能最好。

本实验测量了添加不同体积含量、粒径都为  $D=3.5 \mu\text{m}$  的 SiC 遮光剂复合气凝胶在不同温度下热导率，结果如图 8 所示。

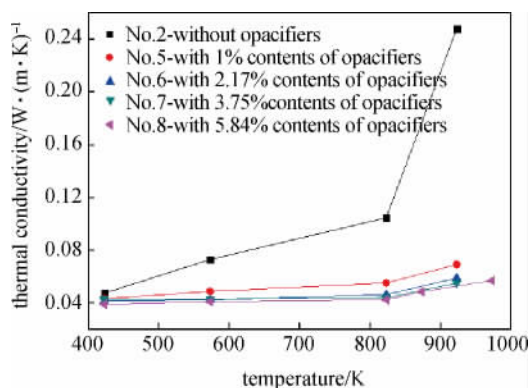


图 8 遮光剂体积含量对复合气凝胶热导率的影响规律  
Fig 8 Effect of opacifier content on thermal conductivity of composite aerogels

由图可见，在 923 K 时不添加遮光剂的气凝胶的热导率为  $0.248 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ，而加入体积分数为 1% 的 SiC 遮光剂后，整体热导率降到  $0.069 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ 。因此遮光剂的加入显著地抑制了复合气凝胶高温下的热导率，使其高温隔热性能大大提高。而遮光剂体积含量为 5.84% 时的热导率却比 3.75% 时的热导率还高，说明此时加入遮光剂后复合气凝胶固态热导率增加的幅度超过了辐射热导率的减小幅度，故所加入的遮光剂存在着一个最佳的体积分数。本实验的研究结果表明：最佳的体积含量在 3.75% 左右。

### 3.4 复合气凝胶热导率理论预测和实验结果的对比

复合气凝胶的热导率可按前述理论分析计算得到。为验证理论计算的可靠性，进行热导率理论计算值和实验结果的对比，对比结果如图 9 所示。

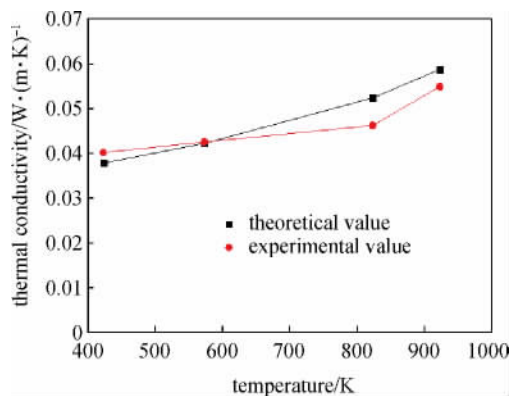


图 9 复合气凝胶热导率理论计算和实验结果的对比  
Fig 9 Comparison between theoretical prediction and experimental result

由图 9 可见, 理论计算结果和实验值的变化趋势基本一致, 最大偏差在 13% 以内, 一般工程计算可以接受。在 800 K 左右相差较大的原因很多, 与实验值本身的误差、理论模型的局限性、纳米多孔材料的复杂随机结构等有关, 需要进一步研究。

#### 4 结 论

(1) 不同粒径遮光剂的消光效果不同, 理论计算结果表明: 较低温度 ( $<650$  K) 下, 最佳粒径是  $4 \mu\text{m}$ ; 较高温度 ( $>650$  K) 时, 最佳粒径是  $3 \mu\text{m}$ 。在所做的实验范围内, 研究结果表明: 遮光剂的最佳粒径为  $3.5 \mu\text{m}$ , 最佳的遮光剂体积含量在 3.75% 左右。炭黑的遮光效果最好, 然而高温下易被氧化, SiC 的综合性能最好。

(2) 不同温度下的理论计算的遮光剂复合气凝胶的热导率与实验结果一致, 误差在 13% 以内, 可用于快速工程预测遮光剂复合气凝胶的隔热性能。

#### 符 号 说 明

- $D$ ——遮光剂粒径,  $\mu\text{m}$   
 $I, I_0$ ——分别为透射光和入射光的强度  
 $m$ ——复折射系数,  $m = n - ik$ ,  $n$  是折射率,  $k$  是吸收系数  
 $Q_{\text{ext}}$ ——消光效率, 散射和吸收的共同作用  
 $q_r$ ——辐射热通量,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$   
 $T$ ——温度, K  
 $x$ ——尺度因子,  $x = \pi D / \lambda'$   
 $\beta', \beta$ ——分别为光谱消光系数和平均消光系数,  $\text{m}^{-1}$   
 $\lambda$ ——热导率,  $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$   
 $\lambda'$ ——波长,  $\mu\text{m}$
- 下角标  
a——纯气凝胶  
bulk——块材  
c——气固耦合  
eff——等效值  
g——气体  
op——遮光剂  
r——辐射  
s——固体  
total——总体

#### References

- [1] Soleimani Dorcheh A, Abbasi M. Silica aerogel: synthesis, properties and characterization [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, **199** (1): 10-26
- [2] Caps R, Fricke J. Infrared radiative heat transfer in highly transparent silica aerogel [J]. *Solar Energy*, 1986, **36** (4): 361-364
- [3] Wang J, Kuhn J, Lu X. Monolithic silica aerogel insulation doped with  $\text{TiO}_2$  powder and ceramic fibers [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1995, **186**: 296-300
- [4] Zhao Junjie, Duan Yuanyuan, Wang Xiaodong. Particles loaded in silica aerogels for high temperature thermal insulation [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2013, **70**: 54-64
- [5] Zhang Hu (张虎), Li Zengyao (李增耀), Dan Dan (丹聃), Tao Wenquan (陶文铨). The influence of gas pressure on the effective thermal conductivity of nano-porous material [J]. *Journal of Engineering Thermalphysics (工程热物理学报)*, 2013, **34** (4): 756-759
- [6] Zhao Junjie, Duan Yuanyuan, Wang Xiaodong. 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
- [7] Zeng S Q, Hunt A, Greif R. Theoretical modeling of carbon content to minimize heat transfer in silica aerogel [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1995, **186**: 271-277
- [8] Rettelbach T, Suberlich J, Korder S. Thermal conductivity of IR-opacified silica aerogel powders between 10 K and 275 K [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1995, **28** (3): 581-586
- [9] Ren Dengfeng (任登凤), Xuan Yimin (宣益民), Han Yuge (韩玉阁). Effect of multi-scale features on radiation property of nanoporous materials [J]. *CIESC Journal (化工学报)*, 2012, **63** (S1): 219-224
- [10] Sun Duo (孙夺), Wang Xiaodong (王晓东), Duan Yuanyuan (段远源), Zhao Junjie (赵俊杰). Radiant performance of opacifier in opacifier-loaded silica aerogel-based composites [J]. *Journal of Basic Science and Engineering (应用基础与工程科学学报)*, 2012, **20** (1): 181-189
- [11] Saleh A Al-Ajlan. Measurements of thermal properties of insulation materials by using transient plane source technique [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2006, **26** (17): 2184-2191
- [12] ISO 22007-2 (2008). Plastics-determination of thermal source (hot disc) method [S]
- [13] Zeng S Q, Hunt A, Greif R. Geometric structure and thermal conductivity of porous medium silica aerogel [J]. *ASME Journal of Heat Transfer*, 1995, **117** (4): 758-761
- [14] Xie Tao, He Yaling, Hu Zijun. 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] Liu Yusong (刘育松). Heat transfer mechanism and thermal design of nanoporous insulating materials [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2007
- [16] Zeng S Q, Hunt A, Greif R. Mean free path and apparent thermal conductivity of a gas in a porous medium [J]. *Journal of Heat Transfer*, 1995, **117** (3): 758-761

- [17] Lu Gui, Wang Xiaodong, Duan Yuanyuan, Li Xiongwei. Effects of non-ideal structures and high temperatures on the insulation properties of aerogel-based composite materials [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2011, **357** (22/23): 3822-3829
- [18] Wei Gaosheng, Liu Yusong, Zhang Xinxin, Fang Yu, Du Xiaoze. 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
- [19] Mätzler C. Matlab functions for Mie scattering and absorption, version 2 [R]. Institut für Angewandte Physik, Universität Bern, 2002
- [20] Zhang Hu, Jin Yu, Gu Wei, Li Zengyao, Tao Wenquan. A numerical study on the influence of insulating layer of the hot disk sensor on the thermal conductivity measuring accuracy [J]. *Progress in Computational Fluid Dynamics, An International Journal*, 2013, **13** (3): 191-201
- [21] Palik E D. Handbook of Optical Constants of Solids: Index [M]. Orlando: Academic Press, 1998