

辐射传热对二氧化硅气凝胶复合材料隔热性能的影响

郭建业¹, 陈智武², 苏力军¹, 李文静¹

(1. 航天特种材料及工艺技术研究所, 北京 100074; 2. 火箭军装备部驻北京地区第六军事代表室, 北京 100074)

摘 要: 二氧化硅气凝胶复合材料在高温条件下使用时需要特别关注辐射传热对其隔热性能的影响。在 100 °C 和 900 °C 建立不同气体压力环境来调节气相传热因素以研究辐射传热对气凝胶复合材料热导率的影响。结果表明: 在 100 °C 弱的辐射传热条件下, 气体压力由 100 000 Pa 降低到 100 Pa, 气凝胶复合材料热导率降低 34%, 而由于 900 °C 强的辐射传热效应, 当气体压力由 100 000 Pa 降低到 100 Pa, 气凝胶复合材料热导率仅降低 3%。建立不同背面温度的传热模型以研究辐射传热对气凝胶复合材料背面温度的影响。结果显示, 辐射传热条件由背面温度 37 °C 增大到 535 °C, 移除背面辐射传热载荷后材料模型背面温度的升高值由 0 °C 增大为 178 °C, 而移除对流传热载荷后材料模型背面温度的升高值由 10 °C 增大为 65 °C。

关键词: 辐射传热; 二氧化硅气凝胶; 复合材料; 热导率

中图分类号: TB32 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2023)07-1811-08

网络出版时间: 2023-05-29



Effect of Thermal Radiation on Thermal Insulation Performance of Silica Aerogel Composites

GUO Jianye¹, CHEN Zhiwu², SU Lijun¹, LI Wenjing¹

(1. Research Institute of Aerospace Special Materials and Processing Technology, Beijing 100074, China; 2. The Sixth Representative Office in Beijing of Rocket Force, Beijing 100074, China)

Abstract: The thermal radiation has an effect on their thermal insulation performance when using silica aerogel composites at a high temperature. The effect of thermal radiation on the thermal conductivity of aerogel composites was investigated at different pressures and temperatures to regulate the gas phase heat transfer factors. The results show that the thermal conductivity of aerogel composites is decreased by 34% when the pressure is decreased from 100 kPa to 100 Pa under a weak radiant effect of 100 °C, while the thermal conductivity is decreased by only 3% at 900 °C due to the thermal radiation effect. The effect of thermal radiation on the back surface temperature of aerogel composites was also investigated by a heat transfer model at different back surface temperatures. It is indicated that when the radiation heat transfer condition increases from 37 °C to 535 °C, the temperature increase of the back of material model increases from 0 °C to 178 °C after removing the radiation heat transfer load between the back of the material model and environment. The temperature increase of the back of material model increases from 10 °C to 65 °C after removing the convection heat transfer load.

Keywords: thermal radiation; silica aerogel; composites; thermal conductivity

气凝胶是一种具有纳米孔隙和纳米骨架的多孔材料, 由于具有纳米尺度效应和多孔结构传热耦合效应, 使其在常温下具有极低的热导率。但纯气凝胶脆性大、力学性能低, 人们使用各种纤维增强体与气凝胶进行复合制备气凝胶复合材料来克服这一

缺点, 从而使其可以作为轻质高效隔热材料广泛应用于石油化工、航空航天、智能建筑等领域^[1-5]。

由于气凝胶复合材料内部存在固态和气态 2 种介质, 所以其热量传递主要包括固态传热、气态传热和辐射传热。研究表明, 在常温下气凝胶内部的

收稿日期: 2023-02-08。 修订日期: 2023-02-23。

基金项目: 国家自然科学基金(U2241240)。

第一作者: 郭建业(1989—), 男, 硕士, 工程师。

通信作者: 李文静(1982—), 女, 博士, 研究员。

Received date: 2023-02-08. Revised date: 2023-02-23.

First author: GUO Jianye (1989—), male, Master, Engineer.

E-mail: guojianye39@126.com

Correspondent author: LI Wenjing (1982—), female, Ph.D., Professor.

E-mail: ht3lwj@126.com

热量传递主要依靠固相传热和气相传热, 辐射传热相对较弱^[6], 随着温度的升高, 气凝胶复合材料的热导率明显增大^[7-9], 主要是由于高温下辐射传热对气凝胶材料整体热量传递的影响增大所致, 所以辐射传热对于气凝胶高温下导热的影响至关重要, 气凝胶复合材料辐射传热相关方面的研究常有报道, 段远源等^[10]利用分层颗粒的 Mie 散射理论, 计算含水气凝胶的消光系数, 同时引入相关散射模型, 考虑了气凝胶颗粒间散射、吸收的相互影响, 并对计算结果进行修正, 得到了温度相关的辐射热导率。朱传勇等^[11]基于 SiO_2 对红外波段的消光系数较小而导致高温下气凝胶辐射传热迅速增加, 采用分层 Mie 散射理论和扩散近似理论研究了核壳结构遮光剂的遮光特性以及其掺杂二氧化硅气凝胶的辐射特性, 建立了遮光剂-二氧化硅气凝胶复合材料辐射热导率的预测模型, 分析了该新型遮光剂的参数对二氧化硅气凝胶复合材料辐射传热的影响规律。罗中一等^[12]基于吸收基质效应和改进的 Mie 散射理论, 建立了 SiC 气凝胶复合绝热材料的热辐射理论模型。Lu 等^[13-14]将气凝胶材料做光学厚介质进行处理, 采用 Rossland 扩散近似描述材料内的辐射传热, 计算了气凝胶材料的辐射热导率。Zhao 等^[15]根据有限扩散堆积方法(DLCA)构建了气凝胶纳米多孔材料的随机结构, 采用双通量模型对气凝胶材料内部的介质辐射传热进行了数值计算。由于辐射热导率作为衡量辐射传热的指标无法通过实验测试获得, 所以目前关于气凝胶材料辐射传热的研究主要围绕辐射模型的建立以及基于此的辐射热导率计算, 而试验中主要以消光系数的测试作为衡量气凝胶材料辐射传热的指标。

气凝胶复合材料的工程应用关注辐射传热对材料宏观隔热性能的影响, 有必要从此角度对材料的辐射传热进行研究, 因此, 本工作通过建立不同的气体压力环境来调节气相传热因素以期研究辐射传热对气凝胶复合材料热导率的影响, 通过建立不同背面温度的传热模型以期研究辐射传热对气凝胶复

合材料隔热性能的影响。

1 实验与模拟方法

以硅溶胶为溶胶前驱体、莫来石纤维为增强体制备耐高温二氧化硅气凝胶复合材料, 材料密度为 0.34 g/cm^3 , 增强纤维与氧化硅基体的质量比为 1.0:2.4, 气凝胶复合材料的制备流程如图 1 所示。采用 Quanta PEG 650 扫描电子显微镜对样品的微观形貌进行观察; 采用实验室搭建的稳态热流计热导率测试系统对样品不同温度和压力下的热导率进行测试。采用铜卡计混合法对样品比热容进行测试, 测试标准为 GJB330A-2000。采用基于 Fourier 光谱仪(美国赛默飞 IS-50)的发射率测量系统对样品进行发射率测试, 室温发射率的测试方法为反射法, 通过探测器检测椭球腔体里所有的反射能, 先按式(1)计算试样的反射率:

$$\rho = \frac{I_D}{\sigma T_{\text{IR}}^4} \quad (1)$$

其中: ρ 为试样的反射率; I_D 为检测到的能量; T_{IR} 为红外辐射源温度; σ 为 Stephen-Boltzmann 常数。试样的发射率按式(2)计算:

$$\varepsilon = 1 - \rho \quad (2)$$

其中: ε 为被测试样的发射率。测试前将探测头分别放置在低发射率参比试样(镜面镀金)和高发射率参比试样(黑材料)上, 自动按反射能量大小进行校准, 然后将探测头放置在被测试样上, 设备随机软件自动计算出被测试样的发射率。500 °C 和 900 °C 发射率的测试方法为能量比较法, 通过测试同一温度下被测试样的辐射指示值和黑体腔的辐射指示值, 按式(3)计算被测试样的发射率:

$$\varepsilon = \frac{\Phi_s}{\Phi_b} \quad (3)$$

其中: ε 为被测试样的发射率; Φ_s 为从检测仪器上读出的被测试样辐射指示值; Φ_b 为从检测仪器上读出的黑体腔辐射指示值。采用实验室自行搭建的石英灯考核设备对二氧化硅气凝胶复合材料进行石

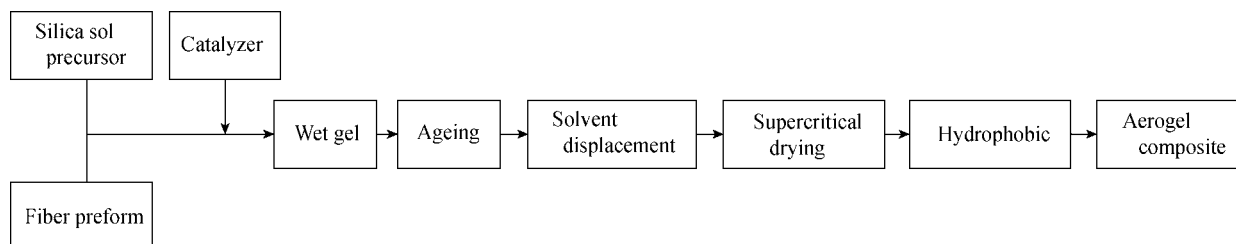


图 1 气凝胶复合材料的制备流程图

Fig. 1 Preparation flow chart of aerogel composite

英灯加热考核试验, 热加载曲线如图 2 所示, 考核温度为 900℃, 考核时间为 1 000 s, 升温速率为 10℃/s。高温热处理方法为将马弗炉以 10℃/min 的升温速率升高到预定温度, 放入样品, 保温 1 000 s 后取出样品。

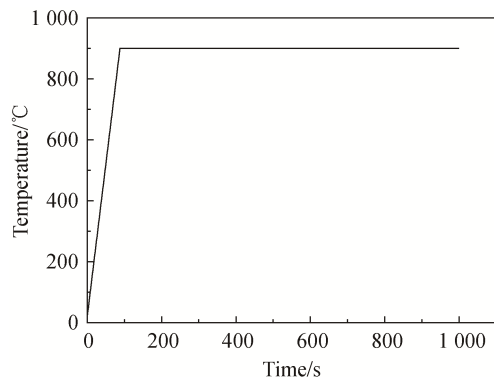


图 2 热加载曲线

Fig. 2 Thermal load curve

使用 ANSYS 15.0, 选择 PLANE55 单元进行模拟仿真, 该单元是二维 Thermal Mass Solid Quad 4node 单元, 背温面与环境对流换热系数确定时模拟计算传热模型的厚度为 20 mm, 全局网格尺寸为 2 mm, 低温背温面传热模型的计算模型厚度为 30 mm, 全局网格尺寸为 3 mm, 高温背温面传热模型的计算模型厚度为 5 mm。全局网格尺寸为 0.5 mm。时间为 1 000 s, 时间步长设置为 2 s, 按一维传热处理, 温度场的变化情况可以用模型某个特定位置沿厚度方向的温度变化来表示, 以温度-时间曲线作为热载荷输入, 材料背温面采用对流换热和辐射传热作为热量输出, 背温面辐射传热使用表面效应单元 SURF151 覆盖在模型背温面的外表面来处理, 同时在平面中定义一个和表面效应单元配套的空间节点, 空间节点加载周围空间的温度(20℃), 表面效应单元上赋予辐射率参数。模型如图 3 所示。

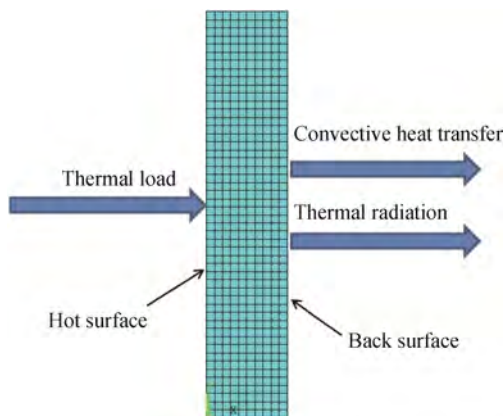


图 3 模拟模型

Fig. 3 Simulation model of aerogel composites

2 气凝胶复合材料的传热机制

图 4 为本工作制备的二氧化硅气凝胶复合材料的微观形貌照片。二氧化硅气凝胶复合材料具有大量的孔洞以及纤维和二氧化硅颗粒骨架, 因此, 其高温下的热量传递主要包括纤维和二氧化硅颗粒骨架的固相传热、孔洞内的气相传热以及辐射传热。

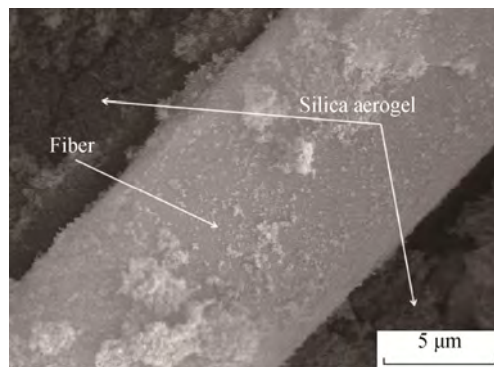


图 4 本工作制备的气凝胶复合材料的微观形貌

Fig. 4 Microtopography of aerogel composites prepared in this work

固体材料的热传导主要依靠固体分子的晶格振动, 也就是声子传热, 对于非晶态二氧化硅材料, 声子的平均自由程为 0.58 nm, 而气凝胶材料的二氧化硅一次颗粒直径为 2~5 nm, 其骨架特征尺度接近于固体的声子平均自由程, 因而在纳米尺度效应下, 气凝胶材料的固相导热极低。此外, 由于气凝胶复合材料内部复杂的三维多孔网络结构, 增加了热量传递路径的复杂程度, 综合使得气凝胶复合材料具有比传统材料低得多的固相热传导^[16-19]。固相热传导主要与气凝胶材料的结构相关, Fricke 等^[20]在气凝胶热导率实验测量结果的基础上, 将气凝胶的固相热导率拟合成材料密度的经验关联式:

$$\lambda_s \propto \rho_a^{1.5} \quad (4)$$

式中: λ_s 为固相热导率; ρ_a 为材料密度。上述的固相热导率是根据实验数据直接剥离得到的固相导热对总体热导率的贡献。

气相传热主要为气凝胶材料孔隙内气体的气相传热传导和气相传热对流, 研究指出, 由于气凝胶材料存在的大量纳米孔洞可以抑制气相传热对流, 使得气凝胶材料内部的气相传热对流较弱, 气相传热是依靠气凝胶材料孔隙内的气体分子热运动相互碰撞而产生的热量传递^[21], 由于气凝胶材料内部存在大量小于空气平均自由程(70 nm)的纳米孔隙, 这种纳米尺度的孔隙可以将气体分子锁住, 限制其自由移动,

从而可以抑制气相热传导,使得气凝胶材料可以具有比空气低的热导率,纤维增强气凝胶复合材料内部的孔隙分布往往不均匀,会存在部分大孔,使其对气相热传导和气相热对流的抑制作用会减弱,因此复合材料在高温下的气相传热效应会变得明显。

辐射传热主要为气凝胶材料外部的辐射热以及气凝胶材料自身发射的辐射热以电磁波的形式传递,外部传入的辐射热能或者气凝胶材料中固相物质发射的辐射热能,穿过气凝胶材料内的孔隙或骨架,会被固相材料吸收、反射或者散射,理论上,随着温度的升高,气凝胶复合材料的辐射传热效应逐渐增大。

气凝胶复合材料中一维导热现象的规律遵循 Fourier 定律:

$$q^* = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (5)$$

式中: q^* 为热流密度; λ 为材料的热导率; T 为物体的温度; x 为长度。热流密度正比于材料的热导率。

根据能量守恒定律,无内热源一维导热气凝胶复合材料内部温度分布的微分方程为:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (6)$$

式中: ρ 为材料的密度; c 为材料的比热容。材料内部某一点的温度是材料热导率、密度和比热容的函数。

材料背面与环境对流传热遵循牛顿冷却公式:

$$q^* = h(T_s - T_b) \quad (7)$$

式中: h 为对流换热系数; T_s 、 T_b 分别为材料背面和环境的温度,对流换热的热流密度正比于材料背面与环境的对流换热系数。

材料背面与环境的热辐射遵循 Stephen-Boltzmann 定律:

$$q^* = \varepsilon \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (8)$$

式中: ε 为发射率; σ 为 Stephen-Boltzmann 常数, T_1 、 T_2 分别为材料背面和环境的温度。材料向环境辐射的热流密度正比于材料的发射率。

3 辐射传热对热导率的影响

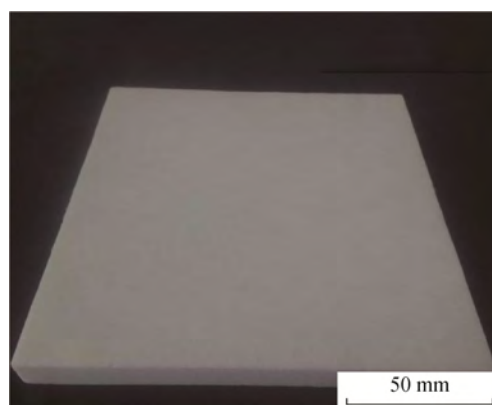
本工作制备的气凝胶复合材料二氧化硅颗粒骨架强健,工程上可应用于 1 100 °C 环境。由表 1 可知,气凝胶复合材料经过 1 100 °C 热处理后的室温热导率基本无变化,说明材料可在高温下保持结构稳定。图 5 为气凝胶复合材料经 900 °C 热处理前后的宏观形貌变化。由图 5 可以看出,材料经过高温

处理后状态基本没有发生变化,无收缩。因此在研究中可以认为随着温度的升高气凝胶复合材料的固相传热效应基本保持不变。而材料的气相传热效应和辐射传热效应随着温度的升高均会增大。为了研究辐射传热效应对气凝胶复合材料隔热性能的影响,本工作通过在不同温度下建立不同气体压力环境来调节材料的气相传热因素。由于气凝胶复合材料的热导率是评价其隔热性能的关键因素,所以本工作通过分析不同压力环境材料低温条件下和高温条件下的热导率变化以达到研究目的,低温温度选择 100 °C,高温温度选择 900 °C,气体压力分别为 100、1 000、10 000 Pa 和 100 000 Pa。

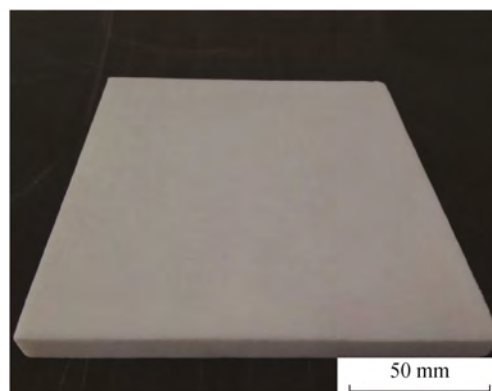
表 1 热处理后气凝胶复合材料的室温热导率

Table 1 Room Temperature Thermal Conductivity of Aerogel Composites after Heat Treatment

Heat treatment temperature/°C	Thermal conductivity/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
Before heat treatment	0.021
900	0.021
1 000	0.022
1 100	0.022



(a) Before heat treatment



(b) After heat treatment

图 5 样品 900 °C 处理前后的宏观形貌变化

Fig. 5 Macro morphology of samples before and after heat treatment at 900 °C

气凝胶复合材料不同气体压力下的 100 °C 热导率如表 2 所示。当气体压力为 100 000 Pa 时, 气凝胶复合材料 100 °C 的热导率为 0.024 9 W/(m·K), 当气体压力为 100 Pa 时, 材料 100 °C 的热导率降低为 0.016 5 W/(m·K), 随着气体压力的降低, 气凝胶复合材料 100 °C 的热导率逐渐降低。低温条件下气凝胶复合材料的辐射传热效应微弱, 使得气相传热因素的变化对气凝胶复合材料的热量传递产生较大影响。低气压环境下空气浓度较低, 使得材料的气相传热传导和局部气相对流效应较弱, 因此材料的热导率较低, 100 °C 条件下, 由于材料的辐射传热效应较微弱, 当气体压力减小为初始的 0.1% 时, 气相传热因素的变化使得材料 100 °C 的热导率下降 34%, 下降较明显。

表 2 100 °C 条件气凝胶复合材料不同压力下的热导率
Table 2 Thermal conductivity of aerogel composites under different pressures at 100 °C

Ambient gas pressure/Pa	Thermal conductivity/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
100	0.016 5
1 000	0.017 8
10 000	0.020 8
100 000	0.024 9

气体压力为 100 Pa 时, 气凝胶孔隙内的气体浓度极小, 此时气凝胶孔隙内的气相传热效应处于极低水平, 除了固相传热, 辐射传热应占主导地位。从表 3 可以看出, 在 100 Pa 的气体压力环境下, 气凝胶复合材料 900 °C 的热导率为 0.083 9 W/(m·K)。温度从 100 °C 增大到 900 °C, 辐射传热的影响使得气凝胶复合材料的热导率由 0.016 5 W/(m·K) 增大到 0.083 9 W/(m·K), 增大 4 倍。

表 3 900 °C 条件气凝胶复合材料不同压力下的热导率
Table 3 Thermal conductivity of aerogel composites under different pressures at 900 °C

Ambient gas pressure /Pa	Thermal conductivity/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
100	0.083 9
1 000	0.084 0
10 000	0.085 2
100 000	0.086 5

当压力为 100 000 Pa, 温度从 100 °C 增大到 900 °C 时, 气凝胶复合材料的辐射传热效应和气相传热效应同时增大, 综合使得材料的热导率由 0.024 9 W/(m·K) 增大到 0.086 5 W/(m·K), 与气体压力为 100 Pa, 温度从 100 °C 增大到 900 °C 时材料热导率的增加值接近, 说明随着温度的增大, 气凝胶

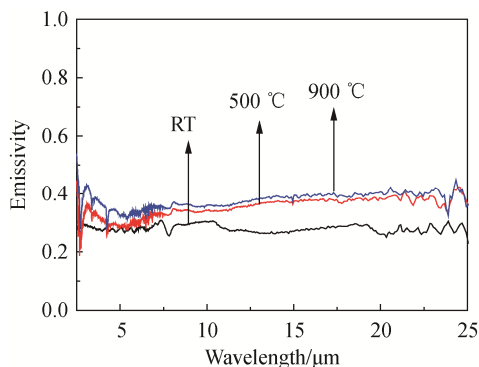
复合材料辐射传热效应的增加幅度要远大于气相传热效应。

900 °C 时气凝胶复合材料的辐射传热效应增大, 使得气体压力从 100 000 Pa 降低到 100 Pa 时, 气凝胶复合材料 900 °C 的热导率从 0.086 5 W/(m·K) 降低到 0.083 9 W/(m·K), 降低仅为 1%, 说明 900 °C 时气相传热效应对气凝胶复合材料热量传递的影响已明显小于辐射传热效应, 高温条件下气凝胶复合材料辐射传热对材料整体热量传递的贡献大幅度增大使得气体压力的降低对于气凝胶复合材料的热导率影响极小。

4 辐射传热对材料背面温度的影响

气凝胶复合材料作为隔热构件使用时, 通常以其传热背面的温度作为其隔热性能的评价指标。而热量从气凝胶复合材料向环境中传递时, 材料背面与环境的传热直接影响其背面的温度, 所以本工作通过分析材料背面与环境的辐射传热对材料背面温度的影响, 以研究辐射传热对气凝胶复合材料隔热性能的影响。使用 ANSYS 进行热仿真计算, 将制备的气凝胶复合材料物性参数赋予建立的材料模型。保持模型的热载荷输入不变, 通过改变材料模型厚度来调节模型背面温度, 建立不同强度辐射传热效应的传热模型, 以实现研究目的。

模拟计算时气凝胶复合材料的热导率、比热容、密度、辐射率物性参数值通过对制备的气凝胶复合材料进行实验测试获得。热导率随温度升高而增大, 选取 6 个温度点的数据, 比热容选取材料 25~900 °C 的平均比热容数据, 由于辐射率的测试值与温度和波长相关, 如图 6 所示, 为了说明问题并使计算不至繁琐, 本工作模拟计算时将发射率设定为固定值, 为最大值 0.54。



RT is room temperature.

图 6 气凝胶复合材料不同温度下的发射率曲线
Fig. 6 Emissivity curves of aerogel composites at different temperatures

模型背面与环境对流换热系数的确定通过实验和模拟计算相结合的方法。对制备的厚度为 20 mm 的气凝胶复合材料进行石英灯热考核试验, 热加载曲线如图 2 所示, 同时建立与热考核试验用气凝胶复合材料相同厚度的材料模型, 赋予其气凝胶复合材料的物性参数, 实验和模拟计算选择相同的热载荷输入, 通过调节模拟计算时模型背面与环境的对流换热系数得到不同温度的背温曲线。当模拟计算时背温与热考核实验的背温相同时的对流换热系数数值确定为本研究模型的输入值, 最终确定的模型与环境的对流换热系数数值为 $4 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, 如图 7 所示。最终确定的材料模型所有物性参数输入值如表 4 所示。

对于 30 mm 厚的背面低辐射传热效应模型, 传热 1 000 s 时材料模型内部的温度分布如图 8 所示, 其背面的温度曲线如图 9 所示, 传热 1 000 s 时, 模型背温为 37°C 。当移除背面与环境的辐射传热载荷后, 模型背温仍为 37°C , 而当材料模型背面与环境的对流传热载荷移除后, 模型背温为 47°C , 对流传热使得模型背面的温度降低 10°C 。低温条件下, 微弱的辐射传热效应使得其对材料模型的隔热性能基

本无影响, 此时模型背面与环境的传热主要依靠对流换热。对于 5 mm 厚的背面强辐射传热效应模型, 材料模型内部的温度分布如图 10 所示, 其背面的温度曲线如图 11 所示, 传热 1 000 s 时, 模型背温为 535°C 。当移除背面与环境的辐射传热载荷后, 模型背温增大到 713°C , 材料模型背面与环境的辐射传热效应使其背面温度减小 178°C , 而当移除材料模型背面与环境的对流传热载荷后, 模型背面温度为 600°C , 对流传热使得模型背面温度降低

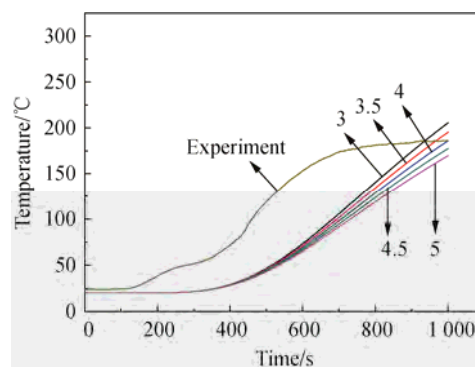


图 7 试验及不同对流系数计算的材料背面温升曲线
Fig. 7 Back surface temperature rise curves of experiment and simulation using different convection coefficients

表 4 模拟计算时的材料模型物性参数输入值

Table 4 Input Values of Physical Parameters for Heat Transfer Simulation of Aerogel Composites

Temperature/ $^\circ\text{C}$	Thermal conductivity/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	Specific heat capacity/ ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	Density/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Convective heat transfer coefficient/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	Emissivity
25	0.020	1080	0.34	4	0.54
100	0.023				
300	0.027				
500	0.040				
700	0.057				
900	0.089				

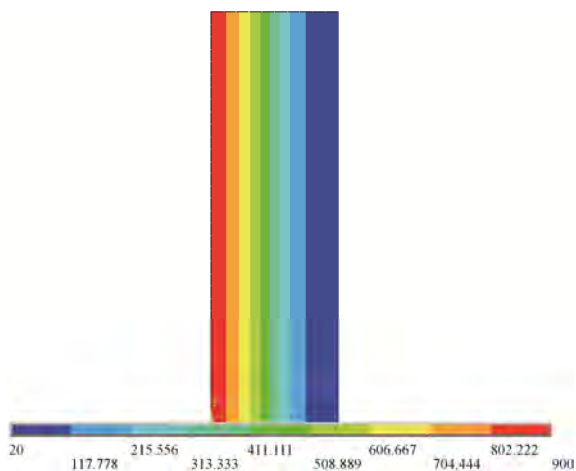


图 8 低温辐射下材料模型的温度分布云图

Fig. 8 Cloud image of temperature field distribution of low temperature radiation

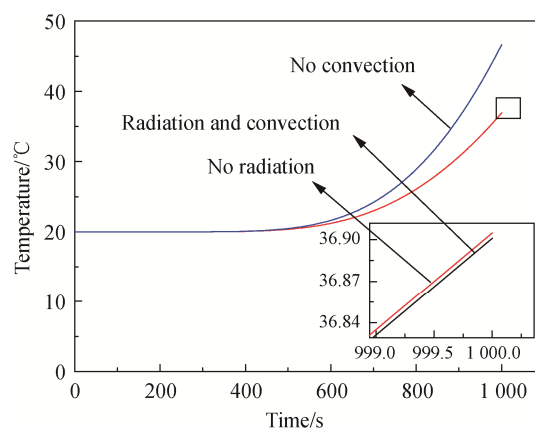


图 9 低温辐射条件下气凝胶复合材料模拟计算的背温面温升曲线(30 mm 厚)

Fig. 9 Back surface temperature rise curves under low temperature radiation (30 mm thick)

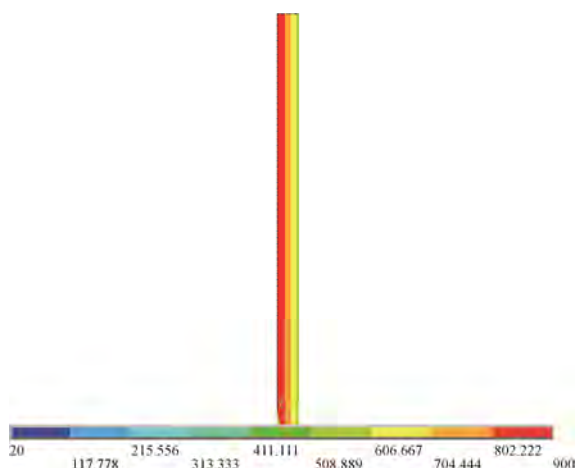


图 10 高温辐射下材料模型的温度分布云图

Fig. 10 Cloud image of temperature field distribution of high temperature radiation

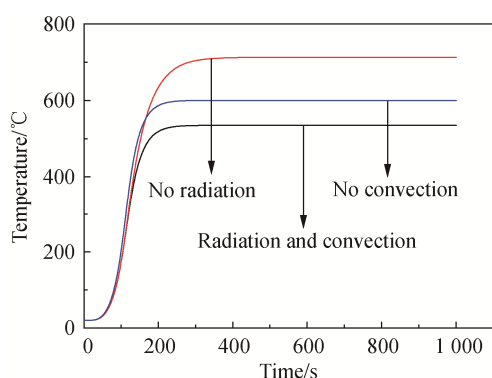


图 11 高温辐射条件下气凝胶复合材料模拟计算的背温面温升曲线(5 mm 厚)

Fig. 11 Back surface temperature rise curves under high temperature radiation (5 mm thick)

65℃。此时辐射传热效应对材料隔热性能的影响已变得极其明显, 是对流传热效应的 3 倍。

由于气凝胶复合材料背面与环境的对流传热遵循 Newton 冷却公式, 如式(7)所示, 当环境温度不变时, 热流密度与材料背面温度的一次方成正比, 而材料背面与环境的辐射传热遵循 Stephen-Boltzmann 方程, 如式(8)所示, 当环境温度不变时, 辐射热量与材料背面温度的 4 次方成正比, 随着传热的进行, 材料背面温度逐渐增大, 材料与环境之间的对流传热和辐射传热同时增大, 但辐射传热呈 4 次方增长, 而对流传热呈 1 次方增长, 尤其在温度较高时, 辐射传热的增大要明显大于对流传热。因此导致材料与环境的辐射传热对材料隔热性能的影响随着材料背面温度的不同而产生显著差异。

5 结论

1) 在低温和高温条件下分别建立了不同气体

压力环境以调节气相传热因素, 研究了辐射传热效应对气凝胶复合材料热导率的影响, 由于辐射传热效应的变化, 在 100℃条件下当气体压力从 100 000 Pa 降低到 100 Pa 时, 气凝胶复合材料的热导率降低 34%, 而在 900℃条件下当气体压力从 100 000 Pa 降低到 100 Pa 时, 材料的热导率仅降低 3%。100 Pa 的气体压力条件下, 当温度由 100℃增大到 900℃时, 由于辐射传热效应的变化使得气凝胶复合材料的热导率增大 4 倍。随着温度的升高辐射传热效应要远大于对流传热效应, 这使得气凝胶复合材料在 100 000 Pa 气体压力下温度由 100℃增大到 900℃时热导率的增加值与在 100 Pa 气体压力下接近。

2) 通过控制模型厚度建立了不同辐射传热强度的材料传热模型, 研究了辐射传热对气凝胶复合材料传热背面温度的影响, 在背面温度为 37℃模型与环境弱的辐射传热效应下, 当移除模型背面与环境辐射传热载荷后, 材料模型背面温度没有发生变化, 而当移除对流传热载荷后, 材料模型背面温度增大 10℃, 此时对流传热对材料隔热性能的影响要大于辐射传热。在背面温度为 535℃模型与环境强的辐射传热效应下, 模型背面与环境的辐射传热使得材料模型背面温度降低 178℃, 而对流传热使得材料模型背面温度仅降低 65℃, 此时辐射传热对材料隔热性能的影响要远大于对流传热。

参考文献:

- [1] 王叙春, 李金泽, 李广勇, 等. 气凝胶微球的制备及应用[J]. 物理化学学报, 2017, 33(11): 2141–2152.
WANG Xuchun, LI Jinze, LI Guangyong, et al. Acta Phys Chim Sin(in Chinese), 2017, 33(11): 2141–2152.
- [2] BAETENS R, JELLE B P, GUSTAVSEN A. Aerogel insulation for building applications: a state-of-the-art review[J]. Energy Build, 2011, 43(4): 761–769.
- [3] 梁玉莹, 吴会军, 杨建明, 等. 气凝胶复合材料真空绝热板的热导率计算及优化[J]. 材料导报, 2018, 32(12): 2112–2117.
LIANG Yuying, WU Huijun, YANG Jianming, et al. Mater Rev(in Chinese), 2018, 32(12): 2112–2117.
- [4] 师建军, 孔磊, 左小彪, 等. 酚醛/SiO₂双体系凝胶网络结构杂化气凝胶的制备与性能[J]. 高分子学报, 2018(10): 1307–1314.
SHI Jianjun, KONG Lei, ZUO Xiaobiao, et al. Acta Polym Sin(in Chinese), 2018(10): 1307–1314.
- [5] 黄仁达, 吴会军, 何石泉, 等. 二氧化硅气凝胶复合材料热导率优化研究进展[J]. 无机盐工业, 2017, 49(10): 6–11.
HUANG Renda, WU Huijun, HE Shiquan, et al. Inorg Chem Ind(in Chinese), 2017, 49(10): 6–11.
- [6] 苏高辉, 杨自春, 孙丰瑞. 遮光剂对 SiO₂ 气凝胶热辐射特性影响的理论研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014, 35(5): 642–648.
SU Gaohui, YANG Zichun, SUN Fengrui. J Harbin Eng Univ(in

- Chinese), 2014, 35(5): 642–648.
- [7] WANG J, KUHN J, LU X. Monolithic silica aerogel insulation doped with TiO_2 powder and ceramic fibers[J]. *J Non Cryst Solids*, 1995, 186: 296–300.
- [8] ZENG S Q, HUNT A, GREIF R. Theoretical modeling of carbon content to minimize heat transfer in silica aerogel[J]. *J Non Cryst Solids*, 1995, 186: 271–277.
- [9] 张虎, 马奕新, 王炯, 等. 添加物对氧化硅凝胶隔热性能影响的实验研究[J]. *工程热物理学报*, 2018, 39(5): 1039–1043.
- ZHANG Hu, MA Yixin, WANG Xian, et al. *J Eng Thermophys(in Chinese)*, 2018, 39(5): 1039–1043.
- [10] 段远源, 于海童, 王晓东, 等. 含水量及相关散射对气凝胶辐射传热的影响[J]. *材料工程*, 2014, 42(2): 65–69.
- DUAN Yuanyuan, YU Haitong, WANG Xiaodong, et al. *J Mater Eng(in Chinese)*, 2014, 42(2): 65–69.
- [11] 朱传勇, 李增耀, 庞昊强. 核壳结构遮光剂对 SiO_2 气凝胶辐射传热的影响[J]. *工程热物理学报*, 2019, 40(2): 429–434.
- ZHU Chuanyong, LI Zengyao, PANG Haoqiang. *J Eng Thermophys(in Chinese)*, 2019, 40(2): 429–434.
- [12] 罗中一, 杨自春, 费志方. 基于改进的Mie散射理论计算 SiC 红外遮光剂对气凝胶辐射传热的影响[J]. *海军工程大学学报*, 2016, 28(6): 78–83.
- LUO Zhongyi, YANG Zichun, FEI Zhifang. *J Nav Univ Eng(in Chinese)*, 2016, 28(6): 78–83.
- [13] LU X, ARDUINI-SCHUSTER M C, KUHN J, et al. Thermal conductivity of monolithic organic aerogels[J]. *Science*, 1992, 255(5047): 971–972.
- [14] LU X, CAPS R, FRICKE J, et al. Correlation between structure and thermal conductivity of organic aerogels[J]. *J Non Cryst Solids*, 1995, 188(3): 226–234.
- [15] ZHAO J J, DUAN Y Y, WANG X D, et al. A 3-D numerical heat transfer model for silica aerogels based on the porous secondary nanoparticle aggregate structure[J]. *J Non Cryst Solids*, 2012, 358(10): 1287–1297.
- [16] WARRIER P, YUAN Y H, BECK M P, et al. Heat transfer in nanoparticle suspensions: modeling the thermal conductivity of nanofluids[J]. *Aiche J*, 2010, 56(12): 3243–3256.
- [17] BI C, TANG G H. Effective thermal conductivity of the solid backbone of aerogel[J]. *Int J Heat Mass Transf*, 2013, 64: 452–456.
- [18] 王少伟, 邵亚国. 二氧化硅气凝胶/玻纤棉复合材料导热性的研究[J]. *玻璃纤维*, 2019(1): 9–14.
- WANG Shaowei, SHAO Yaguo. *Fiber Glass(in Chinese)*, 2019(1): 9–14.
- [19] 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): 137–163.
- HE Yaling, XIE Tao. *Chin Sci Bull(in Chinese)*, 2015, 60(2): 137–163.
- [20] FRICKE J, LU X, WANG P, et al. Optimization of monolithic silica aerogel insulants[J]. *Int J Heat Mass Transf*, 1992, 35(9): 2305–2309.
- [21] 杨世铭, 陶文铨. *传热学*[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2006.