

# SiO<sub>2</sub> 气凝胶热参数测试及评价

杨景兴<sup>1</sup> 何凤梅<sup>1</sup> 于帆<sup>2</sup> 胡子君<sup>1</sup> 李俊宁<sup>1</sup>

(1 航天材料及工艺研究所,先进功能复合材料技术重点实验室,北京 100076)

(2 北京科技大学机械工程学院热能工程系,北京 100083)

**文 摘** 利用非稳态阶跃平面热源法对 SiO<sub>2</sub> 气凝胶的热参数进行了高温实验研究,获得了不同温度和压力条件下 SiO<sub>2</sub> 气凝胶的热导率、热扩散率以及比热容等。结果表明, SiO<sub>2</sub> 气凝胶 800℃ 的热导率比室温增大约 62%。在相同气压且低于 600℃ 时,其热导率受比热容影响,而在高于 600℃ 时,则受热扩散率影响;在相同温度且高于 10 kPa 时,热导率亦受热扩散率影响。

**关键词** 非稳态平面热源法,热导率,热物理性能, SiO<sub>2</sub> 气凝胶

## Measurement and Estimate of Thermophysical Parameters of SiO<sub>2</sub> Aerogel

Yang Jingxing<sup>1</sup> He Fengmei<sup>1</sup> Yu Fan<sup>2</sup> Hu Zijun<sup>1</sup> Li Junning<sup>1</sup>

(1 Science and Technology on Advanced Functional Composites Laboratory, Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

(2 Department of Thermal Energy Engineering, School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083)

**Abstract** The high-temperature thermophysical parameters measurement of SiO<sub>2</sub> aerogel were investigated by plane source-stepwise transient method. The thermal conductivity, thermal diffusivity and thermal capacity of the SiO<sub>2</sub> aerogel at different temperature and pressure were obtained. The results showed that the thermal conductivity of SiO<sub>2</sub> aerogel increase 62% compared with RT. In the same pressure, the thermal capacity has an important effect on thermal conductivity below 600℃, but when the temperature is over 600℃, the thermal diffusivity has an important effect. In the same temperature, the thermal conductivity is affected by thermal diffusivity over 10 kPa.

**Key words** Transient hot plane method, Thermal conductivity, Thermophysical property, SiO<sub>2</sub> aerogel

### 0 引言

SiO<sub>2</sub> 气凝胶因具有纳米级孔径,可显著降低气体分子热传导和对流传热,纳米级骨架颗粒可显著降低固态热传导,使其具有极低的热导率和低密度,已成为一种较为理想的轻质、高效隔热材料,在工程应用中有很好的发展潜力<sup>[1]</sup>。

热导率的测量方法一般可分为稳态法和非稳态法两大类。其中,非稳态平面热源法具有快速、准确、可实现多参数测量、方式灵活多样、具有较宽的温度和热参数覆盖区间等优点日益受到重视。实验测量过程中样品温度随时间变化,其分析的出发点是非稳

态导热微分方程,测量原理是对处于热平衡状态的样品施加某种热干扰,同时测量样品对热干扰的响应,根据响应曲线可分别计算得到热导率、比热容及热扩散率<sup>[2-3]</sup>。

本文采用非稳态平面热源法进行测试,获得了某种 SiO<sub>2</sub> 气凝胶的热导率、比热容以及热扩散率随温度和压力变化的关系曲线,得到了相应的变化规律,并解释其机理。

### 1 实验

采用非稳态平面热源法(图 1),样品数量为 3 块,尺寸为 90 mm×90 mm,厚度分别为 40、3.5 和 40

mm。

测量原理为:3块厚度方向为均质的同种样品处于同一恒定温度下,给平面热源通以一恒定的加热电流  $I(t)$ ,即  $I(t)=I$ ,同时用热电偶测量距热源为  $x$  处的温度变化  $T(x,t)$ ,假设样品 I 和样品 III 的厚度为无限大,热流只存在于沿厚度方向的一维热流。根据非稳态导热微分方程及解析解,通过参数估计的方法确定被测样品的热导率、热扩散率和体积比热容等热物性参数<sup>[2-4]</sup>。

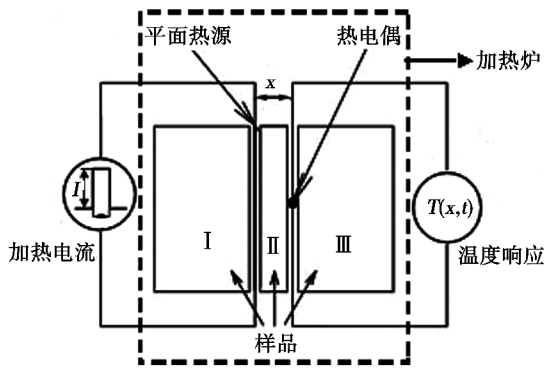


图1 非稳态平面热源法原理示意图

Fig.1 Theory chart of transient hot plane method

将待测样品、热电偶和平面热源按图1所示布置好后,待样品温度恒定后即开始测量。从室温(25℃左右)到800℃(间隔200℃),测试气氛为高纯氮气(99.999%)。

## 2 结果与讨论

图2为SiO<sub>2</sub>气凝胶的热导率随温度变化曲线,可以看出相同压力下的热导率随温度的升高而增大,而且不同压力下热导率升高的幅度都很接近,在0.1MPa、N<sub>2</sub>下,其热导率从室温的21mW/(m·K)增大到800℃的34mW/(m·K),增大约62%。

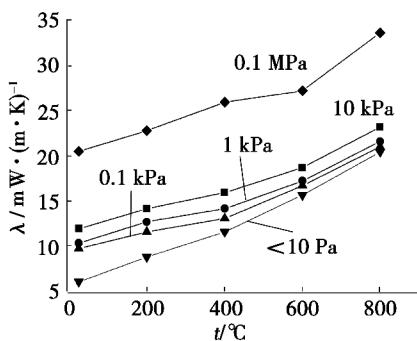


图2 不同压力下热导率随温度变化关系曲线

Fig.2 Thermal conductivity curves with change of temperature at different pressure

图3为样品热导率随压力变化的关系曲线。可以看出相同温度下样品的热导率都是随压力的升高而增大,且<10kPa时,其增大的速率较为缓慢,10kPa以上速率有增大趋势,这是由于气体分子浓度升

高,增加了气体分子之间以及气体分子与孔壁之间碰撞的概率,使得当压力>10kPa时,表现出材料热导率升高的斜率变大。这与文献[5]报道的类似SiO<sub>2</sub>气凝胶热导率随压力变化的规律相一致<sup>[5]</sup>。

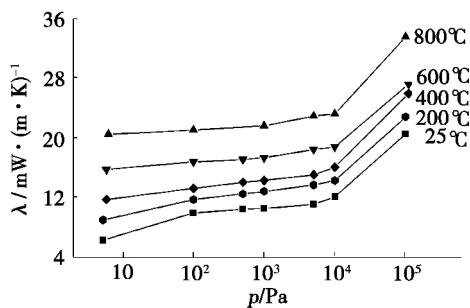


图3 不同温度下热导率随压力变化关系曲线

Fig.3 Thermal conductivity curves with change of pressure during different temperature

图4和图5分别为SiO<sub>2</sub>气凝胶不同压力下体积比热容随温度变化关系曲线和不同温度下体积比热容随压力变化关系曲线。

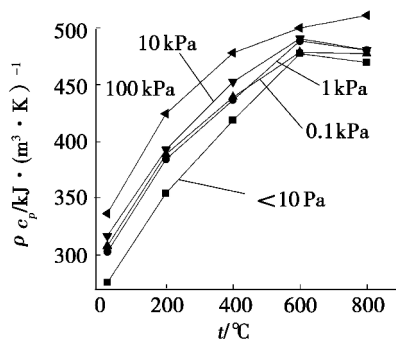


图4 不同压力下体积比热容随温度变化关系曲线

Fig.4 Thermal capacity curves with change of temperature at different pressure

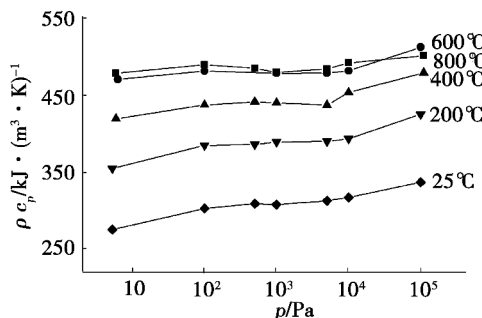


图5 不同温度下体积比热容随压力变化关系曲线

Fig.5 Thermal capacity curves with change of pressure at different temperature

从图4可以看出,相同压力下,比热容随温度的升高显著增大。原因是气体的密度远小于同温度下固相的密度,且气体密度随温度升高显著下降。根据德拜比热容理论,对于绝大多数氧化物,比热容都是从0K时的0J/(K·mol)增加到近似于25J/(K·mol)。

mol)<sup>[6]</sup>,且不同温度区间,变化趋势不同,一般低温下增速明显,高温增速减缓,至德拜温度 $\theta_D$ 趋于恒定(杜隆-珀替定律)。因此,气凝胶固相部分的比热容 $c_p$ 从室温到600℃随温度的升高增大显著,导致SiO<sub>2</sub>气凝胶的 $\rho \cdot c_p$ 呈现增大趋势。当温度继续升高至800℃时,因气体分子数不断下降,气相部分 $c_p$ 下降明显,而固相部分比热容增速减缓,或趋于恒定,致体积比热容趋于不变或略微下降。

由图5可知,相同温度不同压力下,材料的体积比热容随气体压力(即气体分子浓度)的升高缓慢升高。这是因为相同温度下,固相部分的比热容和密度与气体压力无关,即固相部分的体积比热容不随压力变化为定值,而气相部分的比热容和密度随压力的升高,明显增大,所以同温不同压力下, SiO<sub>2</sub>气凝胶的体积比热容由气相部分体积比热容决定,随压力升高缓慢升高。

图6和图7分别为不同压力下热扩散率随温度变化关系曲线和不同温度下热扩散率随压力变化关系曲线。

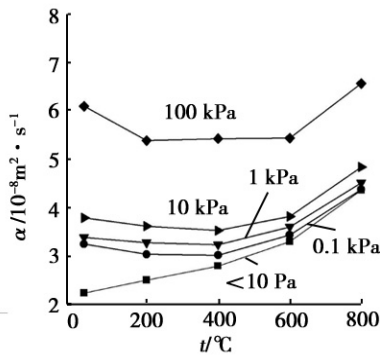


图6 不同压力下热扩散率随温度变化关系曲线  
Fig.6 Thermal diffusivity curves versus of temperature at different pressure

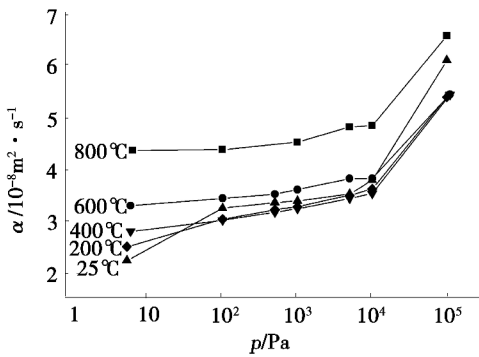


图7 不同温度下热扩散率随压力变化关系曲线  
Fig.7 Thermal diffusivity versus pressure at different temperature

可以看到,相同压力下,室温到600℃,热扩散率随温度的变化不明显。这是因为热导率 $\lambda$ 与热扩散率 $\alpha$ 和密度 $\rho$ 存在关系式: $\lambda = \alpha \rho c_p$ ,由上述可知,当 $< 600^\circ\text{C}$ 时, $\rho c_p$ 随温度升高增速与热导率随温度升高增速基本相同,因此热扩散率无明显变化;当 $> 600^\circ\text{C}$ 时,因体积比热容趋于定值,使得热扩散率趋于增大。由此,可以说明600℃之前,热导率增大主要贡献为体积比热容,600℃之后增大的主要贡献为热扩散率。

### 3 结论

(1) SiO<sub>2</sub>气凝胶从室温到800℃,热导率增加了62%,室温下约为21 mW/(m·K),800℃时约为34 mW/(m·K),具有很好的隔热性能;

(2) 同等压力下, SiO<sub>2</sub>气凝胶的热导率随温度的升高而增大,在600℃之前,热导率的升高是因比热容增大占主导,600℃之后是以热扩散率升高占主导;

(3) 同等温度下, SiO<sub>2</sub>气凝胶的热导率也随压力的升高而增大。当压力 $< 10$  kPa时,热导率增幅不大,是由于材料比热容和热扩散率均无显著变化所致,而当压力 $> 10$  kPa之后,材料热导率升高是因为气相部分的作用导致热扩散率增大所致。

(4) 同等压力下,600℃之前,材料的体积比热容随温度的升高而显著增大,600℃开始,趋于定值;同等温度下,材料的体积比热容随压力变化不明显。

**致谢** 本论文中大量的实验工作得到了杨海龙、陈聪慧、刘亮、郑斌、李琦、胡胜泊、孙银洁、黄娜、王晓叶等许多同事们的帮助,在此致以衷心的感谢。

### 参考文献

[1] 高庆福. 纳米多孔 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>及其高效隔热复合材料研究[D]. 国防科学技术大学,2009

[2] 于帆,张欣欣,何小瓦. 非稳态平面热源法同时测量材料的热导率和热扩散率[J]. 宇航计测技术,2006,26(6):13-21

[3] Kubicar L. Pulse method of measuring basic thermo-physical parameters [M]. Comprehensive Analytical Chemistry, Vol. XII, Thermal Analysis, Part E, (Svehla G ed., Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo: Elsevier), 1990:350

[4] 王补宣,韩礼钟,王维城,等. 同时测定绝热材料 $\alpha$ 和 $\lambda$ 的常功率平面热源法[J]. 工程热物理论,1980,1(1):80-87

[5] 葛新石,叶宏. 传热和传质基本原理[M]. 北京:化学工业出版社,2009:41

[6] 耿桂宏. 材料物理与性能学[M]. 北京:清华大学出版社,2010:10

(编辑 吴坚)