

# 疏水 $\text{SiO}_2$ 气凝胶的制备研究

## Study on Preparation of Hydrophobic Silica Aerogels

吴亚迪, 崔升, 韩桂芳, 沈晓冬

(南京工业大学材料科学与工程学院, 南京 210009)

WU Ya-di, CUI Sheng, HAN Guifang, SHEN Xiaodong

(College of Material Science and Technology, Nanjing

University of Technology, Nanjing 210009, China)

**摘要:** 采用正硅酸四乙酯、去离子水为原料, 甲基三乙氧基硅烷为改性剂, 乙醇为溶剂, 氨水为催化剂, 通过原位聚合法结合超临界干燥工艺制备出接触角为  $165^\circ$  的疏水型  $\text{SiO}_2$  气凝胶。根据乙醇用量、水用量和 pH 值对凝胶时间和气凝胶密度的影响关系, 确定最佳工艺条件为: TEOS:  $\text{H}_2\text{O}$ : EtOH 摩尔比为 1: 4: 16, pH 为 8.0。

**关键词:**  $\text{SiO}_2$  气凝胶; 疏水; 原位聚合; 超临界干燥; 甲基三乙氧基硅烷

中图分类号: G304 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2010)06-0016-04

**Abstract:** Hydrophobic silica aerogels with  $165^\circ$  contact angle, from TEOS as silica source, have been prepared at supercritical drying by *in situ* method from MTES as modifier. The effect of ethanol, water, pH value on gelation time and density were investigated. The result showed that the optimal technics parameter was follows: TEOS:  $\text{H}_2\text{O}$ : EtOH molar ratio 1: 4: 16, pH value 8.0.

**Key words:** silica aerogel; hydrophobic; *in situ* polymerization; supercritical drying; MTES

$\text{SiO}_2$  气凝胶具有独特的纳米多孔网络结构, 很低的折射率和热导率, 对气体的选择性透过等特性, 在力学、热学、声学、光学、电学等方面表现出极其优异的特性, 可用于隔热材料、隔音材料、过滤材料、催化剂、吸附剂、传感器、燃料电池、声阻抗耦合材料、宇宙尘埃搜集器、药物缓释材料等<sup>[1-6]</sup>。目前制得的  $\text{SiO}_2$  气凝胶表面含有大量亲水性基团硅羟基, 使其在空气中容易吸潮, 遇水容易开裂, 影响了其热、声、光、电学性能, 限制了  $\text{SiO}_2$  气凝胶的应用, 必须对其进行疏水改性。目前对其改性方法主要有两种: 一是表面后处理<sup>[7-10]</sup>, 将  $\text{SiO}_2$  气凝胶表面上的羟基活性基团进行惰性化置换, 但该方法工艺周期很长; 二是原位聚合法<sup>[11-13]</sup>, 即在溶胶-凝胶体系中加入含疏水基团的硅醇盐, 经过溶胶-凝胶的过程形成  $\text{SiO}_2$  凝胶, 经超临界干燥可得疏水  $\text{SiO}_2$  气凝胶。本工作以甲基三乙氧基硅烷为改性剂, 通过原位聚合法结合超临界干燥工艺制备出疏水型  $\text{SiO}_2$  气凝胶, 并对主要制备工艺参数进行了研究, 并表征了其疏水性能。

## 1 实验

### 1.1 实验原料与仪器

正硅酸四乙酯, 氨水, 无水乙醇, 氢氧化钠, 甲基三

乙氧基硅烷。以上试剂均为分析纯。

HA400-50-012 乙醇超临界干燥装置, pH S-25 数显 pH 计, HJ-6A 磁力加热搅拌器, DSA100 型视频接触角分析仪, Nexus 670 型傅立叶变换红外光谱仪。

### 1.2 疏水 $\text{SiO}_2$ 气凝胶的制备

将一定量的正硅酸四乙酯 (TEOS)、甲基三乙氧基硅烷 (MTES)、无水乙醇 (EtOH) 和去离子水 ( $\text{H}_2\text{O}$ ) 倒入烧杯中, 然后在  $50^\circ\text{C}$  下搅拌使其混合均匀。0.5h 后加入少量氨水 ( $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) 调节其 pH 值使其水解缩聚, 继续搅拌 2h, 静置一段时间后形成  $\text{SiO}_2$  湿凝胶。将得到的  $\text{SiO}_2$  湿凝胶在乙醇和正硅酸四乙酯混合溶液中老化 48h, 老化后的湿凝胶在乙醇超临界条件下干燥, 即可得到疏水型  $\text{SiO}_2$  气凝胶。研究了水、乙醇和 pH 值用量对凝胶时间、密度的影响, 改性剂用量对凝胶时间和疏水性能的影响。

## 2 结果与讨论

### 2.1 水量对凝胶时间和密度的影响

采用原位聚合法制备疏水  $\text{SiO}_2$  气凝胶时, 由于 TEOS 的水解和缩聚速率均比 MTES 高, 主要是由 TEOS 的水解和缩聚而形成凝胶, 所以水的量对气凝胶的影响主要表现在 TEOS 的水解和缩聚上。

在 TEOS 的水解和缩聚过程中, 水既是水解反应的反应物又是缩聚反应的生成物, 所以水量对反应有很大的影响。在水解反应中, TEOS( $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ ) 中的一个  $-\text{OC}_2\text{H}_5$  基团被一个  $-\text{OH}$  基团取代后, 剩余的  $-\text{OC}_2\text{H}_5$  基团的活性都低于第一个反应的  $-\text{OC}_2\text{H}_5$  基团, 因此, 在水量少的情況下, 生成水解度最低的水解产物  $(\text{OC}_2\text{H}_5)_3\text{Si}(\text{OH})$ , 然后  $(\text{OC}_2\text{H}_5)_3\text{Si}(\text{OH})$  之间再相互反应生成  $(\text{OC}_2\text{H}_5)_3\text{Si}-\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$ ; 随着水量的增加,  $(\text{OC}_2\text{H}_5)_3\text{Si}-\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$  会继续水解生成链状产物; 当水足量时, 链状产物中剩余的  $-\text{OC}_2\text{H}_5$  基团继续水解而生成具有支链或者三维网络结构的凝胶体系。

固定 TEOS, EtOH 和 MTES 的摩尔比为 1 : 18 : 0.5, 研究  $n_{\text{H}_2\text{O}}/n_{\text{TEOS}}$  为 1.5, 2, 2.5, 3, 4, 6, 8, 10 时对凝胶时间和密度的影响关系, 结果如图 1 和图 2 所示。

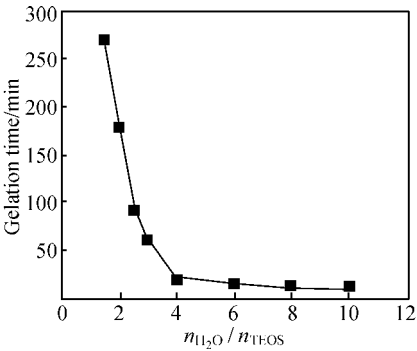


图 1  $n_{\text{H}_2\text{O}}/n_{\text{TEOS}}$ 对凝胶时间的影响

Fig. 1 Effect on gelation time with  $n_{\text{H}_2\text{O}}/n_{\text{TEOS}}$

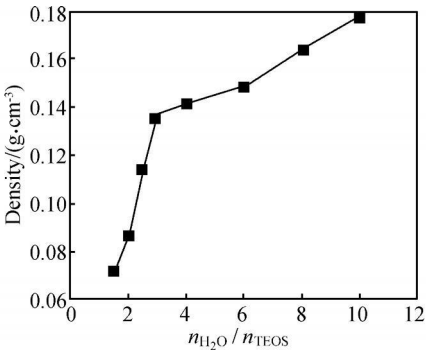


图 2  $n_{\text{H}_2\text{O}}/n_{\text{TEOS}}$ 对  $\rho$  的影响

Fig. 2 Effect on  $\rho$  with  $n_{\text{H}_2\text{O}}/n_{\text{TEOS}}$

从图 1 中可以看出, 当  $n_{\text{H}_2\text{O}}/n_{\text{TEOS}} < 4$  时, 凝胶时间随水量的增加急剧下降; 当  $n_{\text{H}_2\text{O}}/n_{\text{TEOS}} > 4$  时, 凝胶时间的变化不大。这是因为  $n_{\text{H}_2\text{O}}/n_{\text{TEOS}} < 4$  时, 随着用水量的增加, 水解反应加速, 进而使缩聚反应加快; 但

当  $n_{\text{H}_2\text{O}}/n_{\text{TEOS}} > 4$  时, 水的化学计量单位已过量, 虽加速了水解反应, 但是由于缩聚过程中也生成一定量的水, 过量的水减慢了缩聚反应, 使凝胶时间变化不大, 同时生成凝胶的网络结构不均匀, 使醇凝胶内产生白色絮状颗粒。

从图 2 可以看出, 随着水量的增加, 气凝胶的密度也逐渐增加, 这是因为水的表面张力很大, 在乙醇超临界干燥过程中, 由水所引起的毛细管作用力使得  $\text{SiO}_2$  气凝胶的收缩很大, 导致  $\text{SiO}_2$  气凝胶的密度增加。

因此当  $n_{\text{H}_2\text{O}}/n_{\text{TEOS}} > 4$  时, 生成的溶胶不均匀并且密度很大; 当  $n_{\text{H}_2\text{O}}/n_{\text{TEOS}} < 4$  时, 凝胶时间长且反应不完全, 生成很多链状产物。所以选择水量  $n_{\text{H}_2\text{O}}/n_{\text{TEOS}} = 4$  时, 制得气凝胶较好。

2.2 乙醇用量对凝胶时间和密度的影响

固定 TEOS,  $\text{H}_2\text{O}$  和 MTES 的摩尔比为 1 : 4 : 0.5, 研究  $n_{\text{EtOH}}/n_{\text{TEOS}}$  为 8, 12, 16, 18, 20, 22, 30 时对凝胶时间和密度的影响关系, 结果如图 3 和图 4 所示。

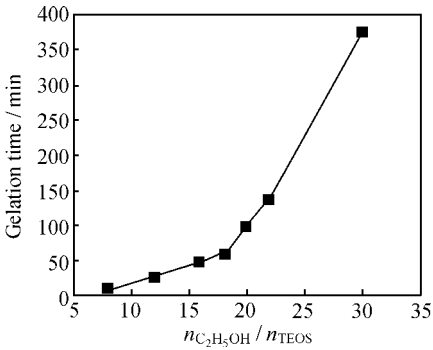


图 3  $n_{\text{EtOH}}/n_{\text{TEOS}}$ 对凝胶时间的影响

Fig. 3 Effect on gelation time with  $n_{\text{EtOH}}/n_{\text{TEOS}}$

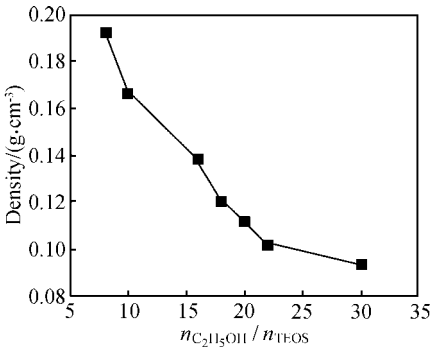


图 4  $n_{\text{EtOH}}/n_{\text{TEOS}}$ 对  $\rho$  的影响

Fig. 4 Effect on  $\rho$  with  $n_{\text{EtOH}}/n_{\text{TEOS}}$

从图 3, 4 可以看出, 随着乙醇用量的增加, 凝胶时间变长。这是因为乙醇虽然为共溶剂不参加反应, 只在网络孔洞中占据一定的体积, 但由于乙醇的量增加相当于对反应物起到了稀释的作用。乙醇用量的增加

加大了反应物之间的距离,而导致反应速率降低,致使凝胶网络结构在较长时间内才能形成,且形成的三维网络结构比较稀疏,降低了气凝胶密度,由于气凝胶干燥时能保持凝胶态时的网络结构,因此可以通过改变乙醇的用量来调节气凝胶密度。

当  $n_{EtOH}/n_{TEOS} < 18$  时,气凝胶的密度大,结构致密;当  $n_{EtOH}/n_{TEOS} > 18$ ,气凝胶的密度小,结构疏松,但是凝胶时间太长,乙醇的挥发导致凝胶结构不均匀,所以摩尔比在 18 时生成的凝胶结构比较均匀且凝胶时间适中,以下研究选择  $n_{EtOH}/n_{TEOS}$  为 18。

2.3 pH 值对凝胶时间和密度的影响

固定 TEOS, H<sub>2</sub>O, EtOH 和 MTES 的摩尔比为 1: 4: 18: 0.5, 研究 pH 在 6.5, 7.0, 7.52, 8.0, 9.0 和 10.0 时凝胶时间和密度随 pH 的变化关系,结果如图 5 和图 6 所示。

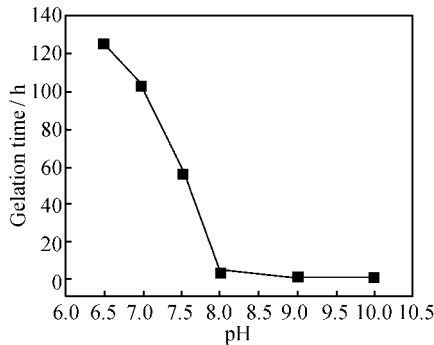


图 5 pH 值对凝胶时间的影响

Fig. 5 Effect on gelation time with pH value

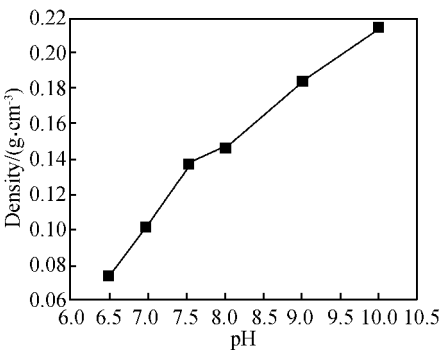


图 6 pH 值对ρ的影响

Fig. 6 Effect on ρ with pH value

从图 5, 6 可以看出, 凝胶时间随着 pH 值的增加而减小, 密度随 pH 值的增加而增加, 这是因为 pH 值增加, TEOS 和 MTES 的水解和缩聚反应速度增加, 形成的 SiO<sub>2</sub> 气凝胶致密性增加, 所以凝胶时间缩短, 密度增加; 当 pH 值大于 11 时反应剧烈并产生沉淀; 当 pH 值在 9~ 11 时, 聚合反应速度太快, 溶液混浊,

对凝胶的网络和孔洞形成不利; 在 pH 值为 8~ 9 时, 聚合反应较稳定, 制得气凝胶网络结构比较均匀, 所以 pH 值为 8 比较合适。

2.4 改性剂用量对凝胶时间和疏水性的影响

固定 TEOS, H<sub>2</sub>O 和 EtOH 的摩尔比为 1: 4: 18, 研究  $n_{MTES}/n_{TEOS}$  为 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 和 0.7 时对凝胶时间和疏水性的影响关系, 结果如图 7 和图 8 所示。

从图 7 可见, 随着改性剂量的增加, 凝胶时间亦增加。在碱性条件下, TEOS 中的乙氧基(– OC<sub>2</sub>H<sub>5</sub>) 的水解慢于缩聚, 因此 TEOS 水解缩聚成无定形 SiO<sub>2</sub> 小颗粒, 再由 SiO<sub>2</sub> 小颗粒形成团聚体; 而 METS 中的乙氧基(– OC<sub>2</sub>H<sub>5</sub>) 由于非水解的甲基的诱导效应使碱性条件下水解和缩聚反应都比 TEOS 的水解和缩聚反应要慢。在反应的初期阶段, 溶胶-凝胶体系中同时存在 TEOS 和改性剂时, TEOS 优先水解, 并形成初级胶粒, 初级胶粒相互之间形成次级胶粒, 最终形成凝胶, 而改性剂对形成凝胶的影响不大。在绝大部分 TEOS 水解和缩聚, 并即将形成凝胶后, 改性剂水解速率加快。当改性剂 MTES 的量增加时, 水解和缩聚反应物浓度均减小, 因此水解和缩聚反应速率降低, 凝胶时间增加。

经过改性剂的反应, 首先形成的亲水凝胶表面的 – OH 被憎水的 – CH<sub>3</sub> 所取代, 形成疏水凝胶。从凝胶形成和改性剂的反应来看, 初始凝胶颗粒的核心不包含 – CH<sub>3</sub>, – CH<sub>3</sub> 只存在于气凝胶的表面。

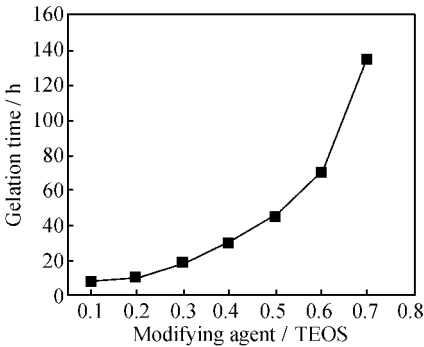
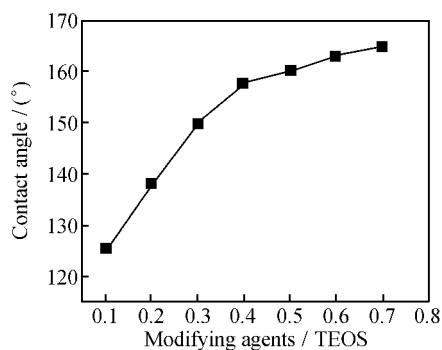


图 7  $n_{MTES}/n_{TEOS}$  对凝胶时间的影响

Fig. 7 Effect on gelation time with  $n_{MTES}/n_{TEOS}$

从图 8 可以看出, 随着  $n_{MTES}/n_{TEOS}$  的增加, 接触角均亦增大。这是因为随着改性剂用量增加, 气凝胶表面 – OH 反应的愈完全, 气凝胶骨架上亲水基团 – OH 愈少, 疏水基团 – CH<sub>3</sub> 愈多, 所制备 SiO<sub>2</sub> 气凝胶疏水性越好。

当  $n_{MTES}/n_{TEOS} < 0.5$  时, 接触角随  $n_{MTES}/n_{TEOS}$  增大而增大; 当  $n_{MTES}/n_{TEOS} > 0.5$  时, 接触角随  $n_{MTES}/$

图 8  $n_{\text{MTES}}/n_{\text{TEOS}}$  对接角的影响Fig. 8 Effect on contact angle with  $n_{\text{MTES}}/n_{\text{TEOS}}$ 

$n_{\text{TEOS}}$  增大而减小。这是因为随着 MTES 的增加, 气凝胶表面的  $-\text{OH}$  越来越少, 反应速率越大越小, 当 MTES 增加到一定程度时, 气凝胶表面的  $-\text{CH}_3$  基团数目大于  $-\text{OH}$  基团数目, 在一定程度上影响了  $-\text{OH}$  的反应。当  $n_{\text{MTES}}/n_{\text{TEOS}} = 0.5$  时, 接触角为  $160^\circ$ ; 当  $n_{\text{MTES}}/n_{\text{TEOS}} = 0.7$  时, 接触角达到  $165^\circ$ ; 因此 MTES 改性的 SiO<sub>2</sub> 气凝胶具有很好的疏水性。

## 2.5 疏水改性 SiO<sub>2</sub> 气凝胶的红外光谱图

图 9 为疏水改性前 SiO<sub>2</sub> 气凝胶的红外光谱图。图中谱峰  $1081, 800, 456\text{cm}^{-1}$  分别由组成疏水性 SiO<sub>2</sub> 气凝胶骨架的  $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$  反对称伸缩振动、对称伸缩振动和弯曲振动引起的; 在  $3452\text{cm}^{-1}$  附近出现的宽峰和  $1628\text{cm}^{-1}$  附近出现的小峰分别对应吸附水  $\text{H}-\text{OH}$  的不对称伸缩振动和弯曲振动, 说明该样品放置于空气中会吸附水分;  $2969\text{cm}^{-1}$  和  $956\text{cm}^{-1}$  处的微弱小峰是  $-\text{CH}_3$  中  $\text{C}-\text{H}$  伸缩振动和弯曲振动引起的。

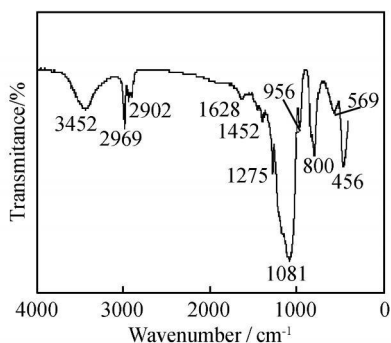
图 9 改性前 SiO<sub>2</sub> 气凝胶的红外光谱图

Fig. 9 FTIR of silica aerogels before modifying

图 10 为  $n_{\text{MTES}}/n_{\text{TEOS}}$  为 0.1 和 0.5 疏水改性后 SiO<sub>2</sub> 气凝胶的红外光谱图。2969~2902 $\text{cm}^{-1}$  的一系列小峰是  $-\text{CH}_3$  中  $\text{C}-\text{H}$  的对称伸缩振动和不对称伸缩振动引起的、 $1452\text{cm}^{-1}$  和  $956\text{cm}^{-1}$  的一系列小峰

是  $-\text{CH}_3$  中  $\text{C}-\text{H}$  的简式弯曲振动和平面摇摆弯曲振动引起的;  $1275, 842\text{cm}^{-1}$  和  $756\text{cm}^{-1}$  处的小峰是  $\text{Si}-\text{CH}_3$  振动引起的; 在这几个波数范围内,  $n_{\text{MTES}}/n_{\text{TEOS}}$  为 0.5 时的 SiO<sub>2</sub> 气凝胶的谱峰比  $n_{\text{MTES}}/n_{\text{TEOS}}$  为 0.1 时的 SiO<sub>2</sub> 气凝胶的谱峰尖锐且振动强度明显提高, 说明改性剂 MTES 的用量越大, SiO<sub>2</sub> 气凝胶表面的  $-\text{CH}_3$  基团越多, 疏水性越好。

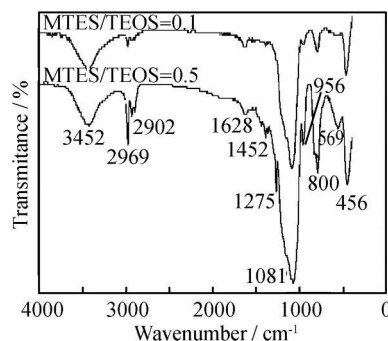
图 10 改性后 SiO<sub>2</sub> 气凝胶的红外光谱图

Fig. 10 FTIR of silica aerogels after modifying

## 3 结论

(1) 以 TEOS 为硅源、MTES 为改性剂, 采用原位聚合法, 结合超临界干燥制备出接触角为  $165^\circ$  的疏水型 SiO<sub>2</sub> 气凝胶。

(2) 根据乙醇用量、水的用量和 pH 值对凝胶时间和气凝胶密度的影响关系, 确定最佳工艺条件为: TEOS: H<sub>2</sub>O: EtOH 摩尔比为 1: 4: 16, pH 为 8.0。

## 参考文献

- [1] SUZANA ŠTANDEKER, ZORAN NOVAK, ŽELJKO KNEZ. Adsorption of toxic organic compounds from water with hydrophobic silica aerogels [J]. Faculty of Chemistry and Chemical Engineering, 2007, 44(7): 362–368.
- [2] SMIRNOV A, MAMIC J, ARLT W. Adsorption of drugs on silica aerogels [J]. Langmuir, 2003, 9(1): 52–81.
- [3] 刘继来, 侯占忠, 孙明辉. 气凝胶应用研究进展 [J]. 河北北方学院学报, 2007, 23(2): 20–22.
- [4] 沈军, 周斌, 吴广明, 等. 纳米孔超级绝热材料气凝胶的制备与热学特性 [J]. 过程工程学报, 2002, (24): 341–345.
- [5] 冷映丽, 沈晓冬, 崔升, 等. SiO<sub>2</sub> 气凝胶超临界干燥工艺参数的优化 [J]. 精细化工, 2008, 25(3): 209–211.
- [6] SEUNGHUN LEE, YOUNG CHUL CHA, HAE JIM HWANG, et al. The effect of pH on the physicochemical properties of silica aerogels prepared by an ambient pressure drying method [J]. Materials Letters, 2007, 61(14): 3130–3133.

现, 剪切强度和剪切模量都通过了 Anderson-Darling 拟合优度检验。

根据剪切实验数据统计分析的结果, 得到材料剪切性能的分散性模型, 具体表达式如下:

剪切强度  $S_{xy} \sim \ln(5.0718, 0.1553)$ , 即

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times 0.1553x} \exp\left[-\frac{(\ln x - 5.0718)^2}{2 \times 0.1553^2}\right]$$

剪切模量  $G_{xy} \sim N(12.087, 2.216^2)$ , 即

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times 2.216} \exp\left[-\frac{(x - 12.087)^2}{2 \times 2.216^2}\right]$$

### 3 结论

(1) T300/QY8911 复合材料层合板的纵向拉、压以及剪切应力-应变曲线均为直线, 其破坏可认为是脆性破坏。

(2) 通过对拉、压、剪实验结果的统计分析, 认为抗拉强度和拉伸模量服从三参数威布尔分布; 压缩强度、压缩模量、剪切模量以及拉伸泊松比服从正态分布; 剪切强度和压缩泊松比则服从对数正态分布。得到了复合材料拉、压、剪切性能的分散性模型参数, 并给出了分散性模型的具体表达式。

(3) 本实验方法和分析过程可以用于研究复合材料其他结构性能参数的分散性。可扩充由实验结果支持的材料参数分散性模型库, 为可靠性应用理论的研究提供真实可靠的数据, 缩短可靠性理论到实际应用的研究周期。

### 参考文献

- [1] GRAHAM L L, GURLEY B K, MASTER F. Nongaussian simulation of local material properties based on a moving window technique[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2003, 18: 223–234.
- [2] 范建华, 杨庆雄. 复合材料弹性模量随机计算模型[J]. 复合材料学报, 1998, 15(4): 134–138.
- [3] 宋迎东, 孙志刚, 高希光. 纤维增强复合材料有效性能分散性的研究[J]. 航空动力学报, 2005, 20(2): 230–235.
- [4] 高希光, 宋迎东, 孙志刚. 纤维位置随机引起的复合材料性能分散性研究[J]. 航空动力学报, 2005, 20(4): 584–589.
- [5] 王佩艳, 岳珠峰. 大子样下复合材料层合板拉伸性能分散性研究[J]. 机械强度, 2007, 29(6): 1005–1008.
- [6] GUILLAUMAT L, HAMDOUM Z. Reliability model of drilled composite materials[J]. Composite Structures, 2006, 74: 467–474.
- [7] NGAH M F, YOUNG A. Application of the spectral stochastic finite element method for performance prediction of composite structures[J]. Composite Structures, 2007, 78: 447–456.
- [8] 熊峻江, 刘洪天, 寇长河, 等. 复合材料可靠性设计的小子样系数法[J]. 复合材料学报, 2001, 18(3): 111–118.
- [9] 邓建, 古得生, 李夕兵. 确定可靠性分析 Weibull 分布参数的概率加权矩法[J]. 计算力学学报, 2004, 21(5): 609–613.
- [10] 傅惠民. 分散性和落入概率整体推断方法[J]. 机械强度, 2006, 28(2): 216–219.
- [11] RAO A V, KULDARNI M M, AMALNERKAR D P. Superhydrophobic silica aerogels based on methyltrimethoxysilane precursor[J]. Journal of Non-crystalline Solids, 2003, 330: 187–195.
- [12] RAO A V, KULKARNI D P, SETH T. Surface chemical modification of silica aerogels using various alkylalkoxy/chlorosilanes[J]. Applied Surface Science, 2003, (206): 262–270.
- [13] RAO A V, MANISH S K. Hydrophobic properties of TMOS/TMES based silica aerogels[J]. Materials Research Bulletin, 2002, 37: 1667–1677.
- [14] RAO A V, PAJONK G M. Effect of methyltrimethoxysilane as a co-precursor on the optical properties of silica aerogels[J]. Journal of Non-crystalline Solids, 2001, 285: 202–209.
- [15] RAO A V, HARANATH D. Effect of methyltrimethoxysilane as a synthesis component on the hydrophobicity and some physical properties of silica aerogels[J]. Microporous and Mesoporous Materials, 1999, 30: 67–273.
- [16] RAO A V, PAJONK G M. Effect of methyltrimethoxysilane as a co-precursor on the optical properties of silica aerogels[J]. Journal of Non-crystalline Solids, 2001, 285: 202–209.
- [17] FRITZ S, GLAUBITT W, SCHUBERT U. Hydrophobic aerogels from Si(OMe)<sub>4</sub>/MeSi(OMe)<sub>3</sub> mixtures[J]. Journal of Non-crystalline Solids, 1992, 145: 85–89.

收稿日期: 2009-04-13; 修订日期: 2009-11-20

作者简介: 朱振涛(1981—), 男, 硕士研究生, 现从事先进复合材料力学行为研究工作, 联系地址: 北京市 9200 信箱 10 分箱 13 号(100076), E-mail: ztzh2008@yahoo.com.cn

(上接第 19 页)

- [7] RAO A V, KULDARNI M M, AMALNERKAR D P. Superhydrophobic silica aerogels based on methyltrimethoxysilane precursor[J]. Journal of Non-crystalline Solids, 2003, 330: 187–195.
- [8] RAO A V, KULKARNI D P, SETH T. Surface chemical modification of silica aerogels using various alkylalkoxy/chlorosilanes[J]. Applied Surface Science, 2003, (206): 262–270.
- [9] RAO A V, MANISH S K. Hydrophobic properties of TMOS/TMES based silica aerogels[J]. Materials Research Bulletin, 2002, 37: 1667–1677.
- [10] RAO A V, PAJONK G M. Effect of methyltrimethoxysilane as a co-precursor on the optical properties of silica aerogels[J]. Journal of Non-crystalline Solids, 2001, 285: 202–209.
- [11] RAO A V, HARANATH D. Effect of methyltrimethoxysilane as a synthesis component on the hydrophobicity and some physical properties of silica aerogels[J]. Microporous and Mesoporous Materials, 1999, 30: 67–273.
- [12] RAO A V, PAJONK G M. Effect of methyltrimethoxysilane as a co-precursor on the optical properties of silica aerogels[J]. Journal of Non-crystalline Solids, 2001, 285: 202–209.
- [13] FRITZ S, GLAUBITT W, SCHUBERT U. Hydrophobic aerogels from Si(OMe)<sub>4</sub>/MeSi(OMe)<sub>3</sub> mixtures[J]. Journal of Non-crystalline Solids, 1992, 145: 85–89.

基金项目: 江苏省博士后科研资助计划项目(0701012B)

收稿日期: 2009-05-30; 修订日期: 2009-09-25

作者简介: 吴亚迪(1987—), 男, 主要从事纳米复合材料的研究, 联系地址: 北京市海淀区 81 号信箱 12 号分箱(100095), E-mail: mikko\_wu@126.com