

# 金属银负载型 $\text{SiO}_2$ 杂化膜的制备与性能表征

杨靖<sup>1,2</sup>, 陈杰璐<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 西安工程大学环境与化学工程学院, 710048, 西安)

**摘要:** 采用溶胶-凝胶法, 制备银掺杂的  $\text{SiO}_2$  杂化溶胶和  $\text{SiO}_2$  杂化膜, 考察银的掺杂对杂化溶胶的性能和对杂化膜物理化学结构及水汽稳定性的影响. 结果表明: 随着银含量的增加, 溶胶的黏度、粒径增大, 凝胶时间缩短; 银在杂化膜中以纳米金属银的形式存在, 金属银的掺杂对杂化材料的化学结构基本无影响, 但使杂化膜的平均颗粒粒径、孔径和总孔体积略微增加; 在水汽环境中陈化后, 载银  $\text{SiO}_2$  杂化膜的  $\text{H}_2$  渗透速率略有下降, 而  $\text{H}_2/\text{CO}_2$  分离因子小幅升高; 金属银的掺杂增强了  $\text{SiO}_2$  膜的水汽稳定性, 实现了杂化膜中  $\text{H}_2$  渗透速率和  $\text{H}_2/\text{CO}_2$  分离因子的同时增大.

**关键词:** 溶胶-凝胶法; 载银; 杂化膜; 水汽稳定性

**中图分类号:** O484 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)12-0087-06

## Preparation and Characterization of Metallic Silver-Doped Silica Hybrid Membranes

YANG Jing<sup>1,2</sup>, CHEN Jierong<sup>1</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Environment and Chemical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** The silver-doped silica sol and hybrid membrane were prepared by sol-gel method. The influences of Ag dope on the sol properties, the physical and chemical structures and the steam stability of silica hybrid membranes were investigated. The results show that, with the increase of silver content, the viscosity and particle size of hybrid sol increase, and the gelation time decreases. The silver element in the hybrid membranes exists as metallic nano-silver. The loading of metallic silver exerts little influence on the chemical structure of the methyl-modified silica membranes but makes the mean particle size, pore size and total pore volume of the silica membranes larger. After aging in steam circumstances, the  $\text{H}_2$  permeation rate of the silica hybrid membranes slightly decreases while the  $\text{H}_2/\text{CO}_2$  permselectivity increases by a small margin. The doping of Ag improves the steam stability of silica membrane and increases the  $\text{H}_2$  permeability and  $\text{H}_2/\text{CO}_2$  permselectivity in the silica hybrid membranes simultaneously.

**Keywords:** sol-gel method; silver loading; hybrid membrane; steam stability

$\text{CO}_2$  是“低碳经济”的减排重点, 煤气化制氢技术是解决能源环境问题的有效手段, 其关键技术涉及  $\text{H}_2/\text{CO}_2$  的分离<sup>[1]</sup>.  $\text{SiO}_2$  膜分离技术是目前提纯  $\text{H}_2$  的有效方法, 然而普通  $\text{SiO}_2$  膜水热稳定性差<sup>[2-3]</sup>, 限制了其在水蒸气环境中的应用. 国内外的

科研工作者使用不同疏水性前驱物向  $\text{SiO}_2$  膜表面引入各种疏水基团<sup>[4-5]</sup>, 如  $\text{F}^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{C}_n\text{H}_{2n}$ 、 $\text{C}_n\text{H}_{2n+1}$  修饰等, 大大提高了膜的疏水性, 但却无法同时提高膜的气体渗透速率和分离因子.

大量研究表明<sup>[5-7]</sup>, 对于溶胶-凝胶法制备的亲

水或疏水性  $\text{SiO}_2$  膜来说,其传质机制一般为努森扩散、分子筛分或努森扩散加分子筛分,难以实现气体渗透速率和分离因子的同时提高.从多孔膜的分离机理可知,减小膜孔径是增大分离效果的有效途径,但不是唯一支配因素,膜表面的化学特性也起着重要作用.根据膜的非对称结构和功能化叠加作用,如果能在  $\text{SiO}_2$  膜中引入能促进  $\text{H}_2$  传输的金属粒子,使这种复合膜既能保留传统多孔膜的高渗透速率,又可提高  $\text{H}_2$  的分离选择性,这将是一种非常有前途的膜材料.因此,本文采用溶胶修饰法,在甲基化改性的疏水性  $\text{SiO}_2$  膜中掺杂纳米金属银,以期在增强  $\text{SiO}_2$  膜水汽稳定性的基础上,同时增大其  $\text{H}_2$  渗透速率和  $\text{H}_2/\text{CO}_2$  分离因子.目前,已有研究者分别采用磁控溅射法、离子注入法和溶胶-凝胶法在亲水性  $\text{SiO}_2$  材料中掺杂金属银,制备成  $\text{Ag}/\text{SiO}_2$  复合膜<sup>[8-11]</sup>,研究其在光学和灭菌方面的性能和应用,获得了较大成功.遗憾的是,目前关于疏水性  $\text{SiO}_2$  材料中的银掺杂及其成膜材料气体渗透分离性能的研究报道极少,尤其在膜的水汽稳定性方面尚未见报道.本文在疏水性  $\text{SiO}_2$  材料中进行银的掺杂,考察银的掺杂对  $\text{SiO}_2$  杂化溶胶的性能和对杂化膜物理化学结构的影响,并探讨杂化膜的水汽稳定性.

## 1 实验部分

### 1.1 $\text{SiO}_2$ 杂化溶胶的制备

取正硅酸乙酯 (TEOS)、甲基三乙氧基硅烷 (MTES)、无水乙醇、水和硝酸的摩尔比为 1 : 0.8 : 7.6 : 7.2 : 0.085,按文献<sup>[12]</sup>中的方法制备甲基化改性的  $\text{M-SiO}_2$  溶胶.按计算的  $\text{AgNO}_3$  含量,分别将不同体积的 1.5 mol/L  $\text{AgNO}_3$  溶液与无水乙醇充分混合,在强烈搅拌下缓慢加入到以上所制  $\text{M-SiO}_2$  溶胶中,使其稀释 4 倍,然后继续搅拌 40 min,即制得最终浸涂用银掺杂的  $\text{SiO}_2$  杂化溶胶,记为“ $\text{Ag}/\text{M-SiO}_2$  溶胶”.其中,  $\text{AgNO}_3$  的加入量以  $\text{AgNO}_3$  与 TEOS 的摩尔比  $n_{\text{Ag}}$  计,分别为 0.00、0.03、0.08、0.10 和 0.15.

### 1.2 $\text{SiO}_2$ 杂化膜的制备

以多孔  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  复合膜为支撑体,上述  $\text{Ag}/\text{M-SiO}_2$  溶胶为涂膜液,按文献<sup>[12]</sup>中的浸涂-干燥-焙烧过程反复进行 6 次,即制得银掺杂的  $\text{SiO}_2$  杂化膜,记为“ $\text{Ag}/\text{M-SiO}_2$  膜”.多孔  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  复合膜的特征参数同文献<sup>[12]</sup>.将部分  $\text{Ag}/\text{M-SiO}_2$  溶胶倒入培养皿中,室温凝胶、干燥后,将其从培养皿中取出,按支撑  $\text{Ag}/\text{M-SiO}_2$  膜的焙烧程序焙烧后即得非支

撑  $\text{Ag}/\text{M-SiO}_2$  材料.

### 1.3 表征分析

溶胶黏度采用相应规格的乌氏黏度计在 30  $^{\circ}\text{C}$  的恒温水浴中所测数值表示;凝胶时间以陈化温度为 18  $^{\circ}\text{C}$  时所得数据表示;溶胶粒径分布测试采用英国马尔文仪器有限公司生产的 Nanozs 型激光粒度分析仪;X 射线衍射 (XRD) 测试采用日本理学公司生产的 Rigaku D/max2200pc 型 X 射线衍射仪,  $\text{CuK}\alpha$  靶;透射电子显微镜 (TEM) 测试采用日本电子株式会社的 JEM-3010 型透射电子显微镜;红外光谱分析采用美国 Thermo Electron 公司生产的 Nicolet 5700 型红外光谱 (FTIR) 分析仪, KBr 压片;  $\text{N}_2$  吸附-脱附测试采用美国康塔公司生产的 NOVA1000 型气体吸附-脱附仪,  $\text{N}_2$  吸附在液氮温度下进行,吸附实验进行前将样品在 250  $^{\circ}\text{C}$  真空下脱气 3 h;扫描电子显微镜 (SEM) 测试采用日本电子公司生产的 JSM-6700F 型场发射扫描电子显微镜;采用单一纯气体在室温下对所制备的  $\text{SiO}_2$  膜进行渗透性能测定,用理想分离因子表示气体选择性.

## 2 结果和讨论

### 2.1 银含量对杂化溶胶性能的影响

银含量对杂化溶胶黏度和凝胶时间的影响见图 1.图 1 表明,少量  $\text{AgNO}_3$  的加入对溶胶黏度影响并不大,但随着银含量的增加,溶胶黏度增大的速度加快,凝胶时间快速缩短.这是因为  $\text{AgNO}_3$  溶于水形成带电离子,吸附在  $\text{SiO}_2$  胶粒周围,影响了胶团的双电层平衡,改变了溶胶的  $\zeta$  电位<sup>[13]</sup>和硅溶胶中 TEOS、MTES 的水解-缩聚反应速率,因而溶胶黏度增加,凝胶时间缩短.

涂膜溶胶的粒径大小及分布对成膜孔径有重要影响.  $n_{\text{Ag}}$  对溶胶粒径分布的影响如图 2 所示.图 2 表明,随着银含量的增加,  $\text{Ag}/\text{M-SiO}_2$  杂化溶胶的粒径逐渐增大,粒径分布逐渐变宽.如前所述,  $\text{AgNO}_3$

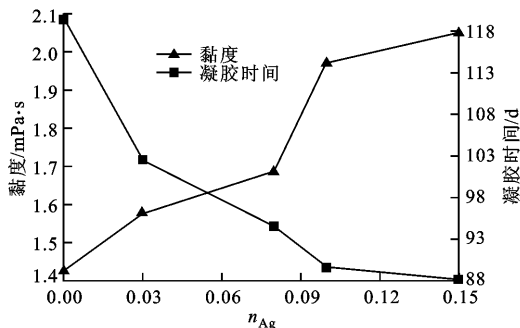


图 1  $n_{\text{Ag}}$  对溶胶黏度和凝胶时间的影响

的加入改变了溶胶的  $\zeta$  电位和 TEOS、MTES 的水解-缩聚反应速率,同时  $\zeta$  电位的改变使胶粒团聚概率增加,因而导致溶胶的平均粒径增大.  $\text{AgNO}_3$  的加入量越大,溶胶的  $\zeta$  电位变化越大,由于胶粒的碰撞、团聚是自发无规则进行的,所以在溶胶的平均粒径由于团聚而增大的同时,粒径的平均分布范围也随着变宽. 因此,从溶胶粒径分布来看, $\text{AgNO}_3$  加入量不应过大,否则可能导致溶胶粒径过大、分布过宽,从而使成膜后孔径太大和分布均匀性变差,使渗透分离性能劣化. 因此,本文在后续实验中仅讨论  $n_{\text{Ag}}$  为 0.00、0.03 和 0.08 的情况.

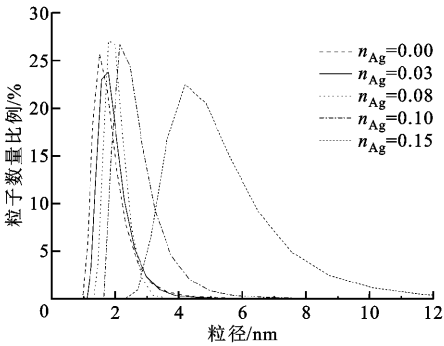


图 2  $n_{\text{Ag}}$  对溶胶粒径分布的影响

2.2 纳米金属银的形成

图 3 显示了 400 °C 焙烧后不同银含量非支撑 SiO<sub>2</sub> 材料的 XRD 图谱. 为了进行比较,焙烧前  $n_{\text{Ag}}=0.08$  杂化材料的 XRD 曲线也在图中进行了显示. 图 3 中,所有样品在  $2\theta=22.46^\circ$  附近出现的宽 XRD 衍射峰对应于无定形 SiO<sub>2</sub>. 焙烧前  $n_{\text{Ag}}=0.08$  的 Ag/M-SiO<sub>2</sub> 材料中出现了  $\text{AgNO}_3$  的衍射峰,未出现金属银的特征峰,而焙烧后  $n_{\text{Ag}}$  为 0.03 和 0.08 的 SiO<sub>2</sub> 样品中除了无定形 SiO<sub>2</sub> 的衍射峰外,可清楚地观察到晶体银的衍射峰,在  $38.12^\circ$ 、 $44.28^\circ$ 、 $64.43^\circ$ 、 $77.47^\circ$  衍射角处出现的衍射峰分别对应金属银的晶面指数 (111)、(200)、(220)、(311). 从图 3 还可以看出,随着银含量的增加,银的衍射峰强度有所增加.

一般来说,金属银晶面指数为 (111) 处的峰最高,通常用其半高宽度来估算晶体银颗粒的平均粒径. 根据 Scherrer 公式<sup>[9]</sup>,  $n_{\text{Ag}}$  为 0.03 和 0.08 的 Ag/M-SiO<sub>2</sub> 材料中银粒子平均直径见表 1,可见随着银含量的增加,银的衍射峰峰宽变窄,银粒子的平均粒径增大.

图 4 为 400 °C 焙烧后  $n_{\text{Ag}}=0.08$  的 Ag/M-SiO<sub>2</sub> 粉末团聚颗粒和分散粒子的 TEM 形貌图. 在图 4 中,颜色较深的为银粒子,颜色较浅的为 SiO<sub>2</sub> 粒子.

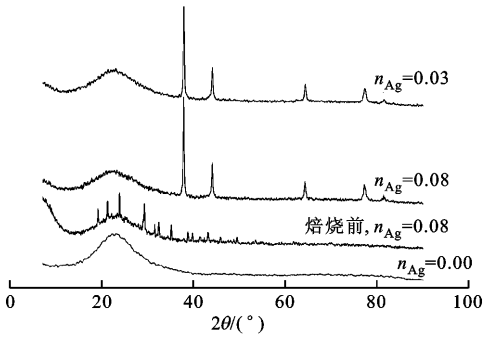
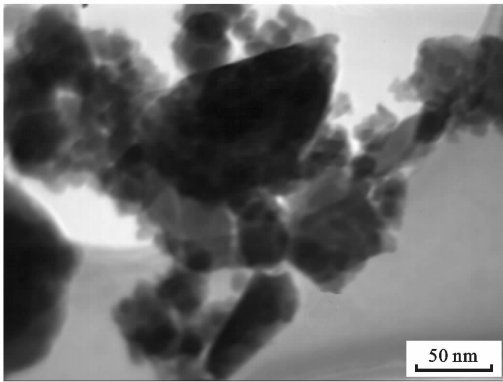


图 3 非支撑 SiO<sub>2</sub> 材料的 XRD 图谱

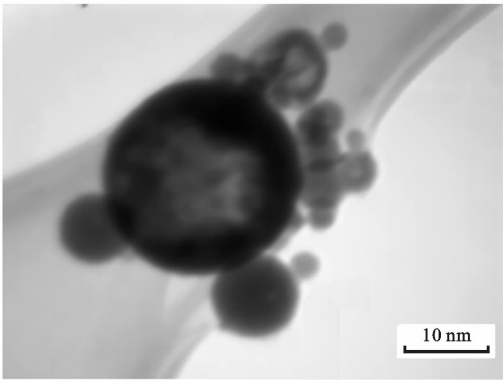
表 1 银含量对银(111)衍射峰半高宽和银晶粒平均直径的影响

| $n_{\text{Ag}}$ | 衍射角/(°) | 平均粒径/nm |
|-----------------|---------|---------|
| 0.03            | 0.315   | 26.7    |
| 0.08            | 0.296   | 28.4    |

由图 4a 可见,在这些团聚的纳米颗粒中,银粒子嵌入到 SiO<sub>2</sub> 粒子中. 图 4b 表明,这些分散的纳米粒子呈球形,中间粒径较大的银粒子周围分布着粒径较小的 SiO<sub>2</sub> 粒子,银粒子的粒径约为 25 nm,周围



(a)团聚颗粒形貌图



(b)分散粒子形貌图

图 4 Ag/M-SiO<sub>2</sub> 粉末的 TEM 形貌图

SiO<sub>2</sub> 粒子的粒径基本都在 10 nm 以下. 可见, TEM 观测到的银纳米粒子的粒径与 XRD 分析结果相近.

### 2.3 红外光谱分析

图 5 显示了 400 °C 焙烧后不同银含量非支撑 SiO<sub>2</sub> 材料的红外光谱图. 在图 5 中, 443、1 053 cm<sup>-1</sup> 附近出现的峰分别代表 Si—O—Si 的弯曲振动和伸缩振动, 790 cm<sup>-1</sup> 处出现的峰代表 O—Si—O 的对称伸缩振动, 1 276 cm<sup>-1</sup> 附近出现的是 Si—CH<sub>3</sub> 特征振动峰, 2 978 cm<sup>-1</sup> 附近出现的峰代表 —CH<sub>3</sub> 的特征振动, 1 638、3 450 cm<sup>-1</sup> 附近出现的吸收峰代表吸附水的 H—OH 振动<sup>[5-7]</sup>. 从图 5 可以看出, 不同银含量 SiO<sub>2</sub> 材料红外光谱图中 Si—CH<sub>3</sub> 吸收峰的强度变化不明显, 银含量并没有影响 Ag/M-SiO<sub>2</sub> 材料的红外谱图, 说明金属银的掺杂对 Ag/M-SiO<sub>2</sub> 材料的化学结构影响不明显, 这就意味着银元素在 Ag/M-SiO<sub>2</sub> 材料中并非以 ≡Si—O—Ag 形式存在<sup>[8,11]</sup>, 而是以单质银形式存在.

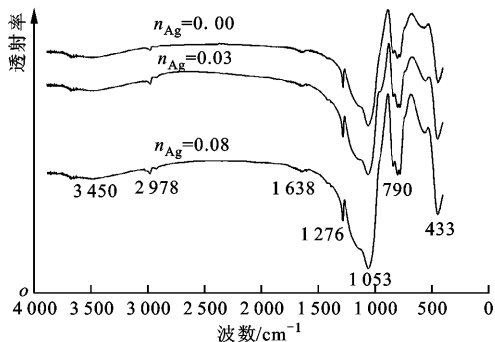


图 5 不同银含量非支撑 SiO<sub>2</sub> 材料的红外光谱图

### 2.4 孔结构分析

400 °C 焙烧后不同银含量非支撑 SiO<sub>2</sub> 杂化材料的 N<sub>2</sub> 吸附-脱附等温线如图 6 所示, 图中横坐标  $p/p_0$  表示相对压力, N<sub>2</sub> 体积为其在标准状态下的体积. 从图 6 可以看出, 这些样品的 N<sub>2</sub> 吸附-脱附等温线基本都是可逆的, 为 I 型等温线<sup>[13]</sup>. 随着银含量的增加, 这些样品的 N<sub>2</sub> 吸附量减小, 其孔径分布如图 7 所示. 从图 7 可以明显看出, 不同银含量 SiO<sub>2</sub> 材料的孔径分布基本相似, 但随着银含量的增加, 样品的平均孔径和总孔体积稍有增加. 这与 Ameen 等<sup>[10]</sup> 在亲水性 SiO<sub>2</sub> 材料中掺杂银所得结果稍有不同. 应当说明的是, 由于非支撑 SiO<sub>2</sub> 材料和支撑型 SiO<sub>2</sub> 膜在热处理过程中的干燥应力并不完全相同, 因此不能期望这两种材料具有完全相同的结构. 非支撑 SiO<sub>2</sub> 材料的颗粒粒径、孔结构数据不

能定量地换算到支撑型膜的情况, 但可以定性地表明材料结构在处理过程中的变化趋势.

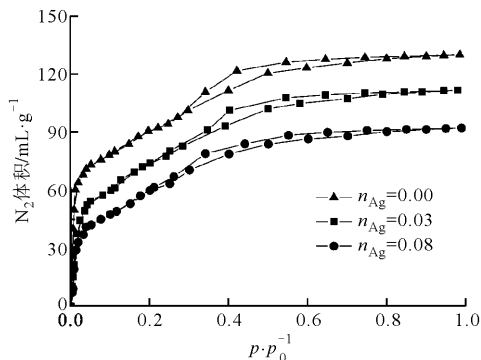


图 6 不同银含量非支撑 SiO<sub>2</sub> 材料的 N<sub>2</sub> 吸附-脱附等温线

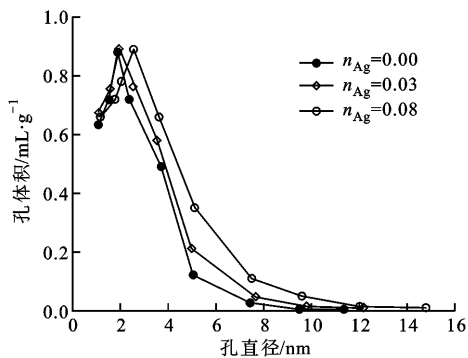


图 7 不同银含量非支撑 SiO<sub>2</sub> 材料的孔径分布

### 2.5 气体渗透性能分析

将  $n_{Ag}$  分别为 0.00、0.03 和 0.08 的 SiO<sub>2</sub> 膜放置在相对湿度为 70%~80% 的水汽环境中陈化, 在室温及 0.3 MPa 压差的条件下测试, 结果如图 8 所示. 图 8 表明, Ag/M-SiO<sub>2</sub> 膜具有更高的气体渗透速率, 且随着  $n_{Ag}$  的增加, 气体的渗透速率呈现增大的趋势.  $n_{Ag}$  为 0.00、0.03 和 0.08 的 SiO<sub>2</sub> 膜 H<sub>2</sub> 渗透速率分别为  $3.05 \times 10^{-6}$ 、 $3.50 \times 10^{-6}$  和  $5.27 \times 10^{-6}$  mol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup> · Pa<sup>-1</sup>, H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 分离因子分别为 4.97、5.00 和 5.38. 与  $n_{Ag}$  为 0.00 的 SiO<sub>2</sub> 膜相比,  $n_{Ag}$  为 0.03 和 0.08 的 SiO<sub>2</sub> 膜的 H<sub>2</sub> 渗透速率分别增加了 14.8% 和 72.8%, H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 分离因子分别增加了 0.7% 和 8.3%. 由于随着银含量的增加, SiO<sub>2</sub> 膜的孔径和总孔体积略有增大, 因此银掺杂后气体渗透速率的增加并非分子筛分的结果, 说明金属银的负载引入了其他传输机制, 这可能是由于纳米银粒子对 H<sub>2</sub> 具有一定的吸附作用, 金属银的负载增强了 H<sub>2</sub> 的表面扩散作用, 从而使 H<sub>2</sub> 渗透速率明显增加, H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 分离因子提高.

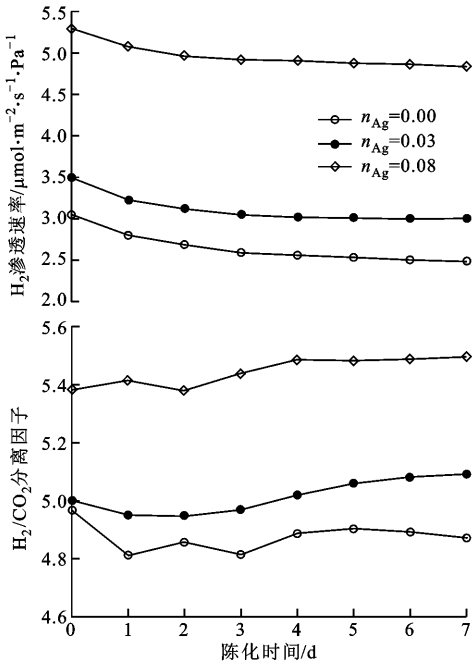


图 8 陈化时间对不同银含量 SiO<sub>2</sub> 膜 H<sub>2</sub> 渗透速率和 H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 分离因子的影响

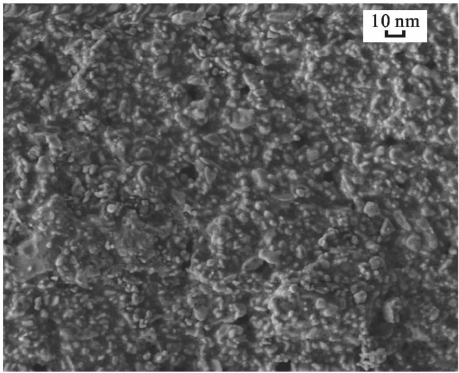
另外,从图 8 可以看出,随着陈化时间的延长,各 SiO<sub>2</sub> 膜的 H<sub>2</sub> 渗透速率均出现不同程度的下降,3 d 后达到相对稳定的状态。但是,随着银含量的增加, SiO<sub>2</sub> 膜气体渗透速率下降的幅度减小。与陈化前相比,在水汽环境中陈化 7 d 后,  $n_{\text{Ag}}$  为 0.00、0.03 和 0.08 的 SiO<sub>2</sub> 膜的 H<sub>2</sub> 渗透速率分别下降了 18.7%、14.4% 和 8.4%,  $n_{\text{Ag}}=0.00$  的 SiO<sub>2</sub> 膜的 H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 分离因子稍有降低,而  $n_{\text{Ag}}$  为 0.03 和 0.08 的 Ag/M-SiO<sub>2</sub> 膜的 H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 分离因子则分别增加了 1.8% 和 2.1%。以上数据表明,在水汽环境中陈化后, Ag/M-SiO<sub>2</sub> 膜的性能劣化程度较单纯的甲基化改性 SiO<sub>2</sub> 膜的小,显示了更强的水汽稳定性。

2.6 SEM 分析

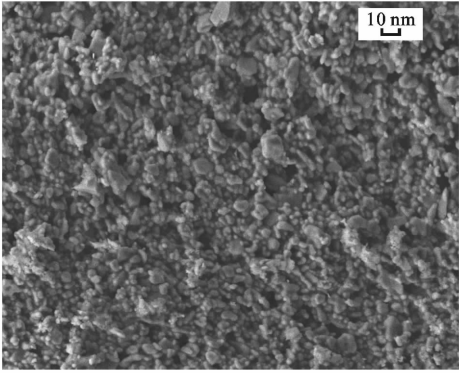
$n_{\text{Ag}}$  为 0.00 和 0.08 的 SiO<sub>2</sub> 膜的 SEM 表面形貌如图 9 所示。从图 9 可以看出,两个试样表面绝大多数颗粒直径相近,在 3~8 nm 之间,但相比较而言, Ag/M-SiO<sub>2</sub> 膜表面有少量粒径较大的粒子,其表面平均颗粒粒径较  $n_{\text{Ag}}=0.00$  的 SiO<sub>2</sub> 膜略大。这可能是由于 AgNO<sub>3</sub> 的引入使杂化溶胶粒子增大,焙烧过程中金属银的形成共同导致膜表面平均颗粒粒径略微增大。

3 结 论

(1)随着溶胶中 AgNO<sub>3</sub> 含量的增加,溶胶的黏度、粒径增大,凝胶时间急剧缩短。气体分离用 Ag/



(a)  $n_{\text{Ag}}=0.00$



(b)  $n_{\text{Ag}}=0.08$

图 9  $n_{\text{Ag}}$  为 0.00 和 0.08 的 SiO<sub>2</sub> 膜 SEM 表面形貌图

M-SiO<sub>2</sub> 膜中 AgNO<sub>3</sub> 加入量不应过大。

(2)Ag/M-SiO<sub>2</sub> 膜中的银元素以纳米单质银的形式存在。金属银的掺杂对杂化材料的化学结构基本无影响,但使杂化膜的平均颗粒粒径、孔径和总孔体积略微增加。

(3)随着银含量的增加, Ag/M-SiO<sub>2</sub> 膜的 H<sub>2</sub> 渗透速率和 H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 分离因子增加。随着水汽陈化时间的延长,杂化膜的 H<sub>2</sub> 渗透速率下降, H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 分离因子小幅升高,金属银的掺杂增强了 SiO<sub>2</sub> 膜的水汽稳定性,实现了杂化膜中 H<sub>2</sub> 渗透速率和 H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 分离因子同时增大的突破。

参考文献:

[1] 乔春珍,肖云汉. 碳制氢过程的比较及直接制氢分析[J]. 工程热物理学报,2005,26(5):729-732.  
QIAO Chunzhen, XIAO Yunhan. Comparison of processes of hydrogen from carbon and analysis of hydrogen from carbon direct[J]. Journal of Engineering Thermophysics,2005,26(5):729-732.  
[2] RAO A V, HEGDE N D, SHEWALE P M. Imperviousness of the hydrophobic silica aerogels against vari-

- ous solvents and acids[J]. Appl Surf Sci, 2007, 253(9):4137-4141.
- [3] ROUESSAC V, FERREIRA P, DURAND J. Preparation of silica membranes inside macroporous alumina tubes by PECVD for hydrogen selectivity[J]. Sep Purif Technol, 2003, 32(1/3):37-43.
- [4] SMAIHI M, JERMOUMI T, MARIGANN J, et al. Organic-inorganic gas separation membranes: preparation and characterization[J]. J Membr Sci, 1996, 116(2):211-220.
- [5] 韦奇, 李健林, 宋春林, 等. 憎水二氧化硅膜的制备、表征及水热稳定性研究[J]. 无机材料学报, 2004, 19(2):417-423.
- WEI Qi, LI Jianlin, SONG Chunlin, et al. Preparation, characterization and hydrothermal stability of hydrophobic methyl-modified silica membrane[J]. Journal of Inorganic Materials, 2004, 19(2):417-423.
- [6] DE VOS R M, VERWEIJ H. Improved performance of silica membranes for gas separation[J]. J Membr Sci, 1998, 143(1/2):37-51.
- [7] RAO A V, HARANATH D. Effect of methyltrimethoxysilane as a synthesis component on the hydrophobicity and some physical properties of silica aerogels[J]. Microporous Mesoporous Mater, 1999, 30(2/3):267-273.
- [8] 焦力实, 张波萍, 丁昕祯, 等. Ag/SiO<sub>2</sub> 复合薄膜的溶胶凝胶法制备与光吸收特性[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(S1):882-884.
- JIAO Lishi, ZHANG Boping, DING Xinzheng, et al. Sol-gel preparation of Ag/SiO<sub>2</sub> nano-composite films and their optical absorption properties[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(S1):882-884.
- [9] RYU J H, CHANG D S, CHOI B G, et al. Fabrication of Ag nanoparticles-coated macroporous SiO<sub>2</sub> structure by using polystyrene spheres[J]. Mater Chem Phys, 2007, 101:486-491.
- [10] AMEEN K B, RAJASEKHARAN T, RAJASEKHARAN M V. Grain size dependence of physico-optical properties of nanometallic silver in silica aerogel matrix[J]. J Non-Cryst Solids, 2006, 352:737-746.
- [11] DE G, LICCIULLI A, MASSARO C, et al. Silver nanocrystals in silica by sol-gel processing[J]. J Non-Cryst Solids, 1996, 194:225-234.
- [12] YANG Jing, CHEN Jierong. Surface free energies and steam stability of methyl-modified silica membranes[J]. J Porous Mater, 2009, 16(6):737-744.
- [13] 沈钟, 王果庭. 胶体与表面化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 1997:67-76.

### [本刊相关文献链接]

集成电路钝化层薄膜的纳米力学性质研究. 西安交通大学学报, 2008, 42(11):1345-1349.

激光照射金纳米微粒靶向细胞对细胞膜通透性的影响. 西安交通大学学报, 2008, 42(12):1560-1564.

中空纤维膜换热器传热传质特性的实验和理论研究. 西安交通大学学报, 2009, 43(5):40-45.

中空纤维膜溶液热交换器的传热传质模拟研究. 西安交通大学学报, 2009, 43(3):36-41.

孔间距对气膜冷却效率影响的数值模拟. 西安交通大学学报, 2009, 43(3):101-105.

汽轮机静叶表面水膜缝隙抽吸的试验研究. 西安交通大学学报, 2009, 43(1):20-23.

远程氧等离子体灭菌对基质材料表面性能的影响. 西安交通大学学报, 2009, 43(3):82-86.

TiO<sub>2</sub> 光阳极有序微结构的纳米压印工艺. 西安交通大学学报, 2009, 43(11):90-94.

Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 与 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-hBN 陶瓷配副在水润滑下的摩擦化学行为. 西安交通大学学报, 2009, 43(9):75-80.

可溶性聚吡咯的合成及其光致发光性能. 西安交通大学学报, 2009, 43(11):121-124.

利用激波管实验装置研究丙烯/氧气/氮气混合气着火滞燃期. 西安交通大学学报, 2010, 44(1):9-12.

ZnO 纳米线膜的可控生长及其量子限域效应研究. 西安交通大学学报, 2010, 44(4):82-86.

凹槽状动叶顶部非定常气膜冷却性能的研究. 西安交通大学学报, 2010, 44(5):5-9.

采用抗体包被纳米金多层自组装膜的 HCG 安培免疫传感器. 西安交通大学学报, 2010, 44(7):114-119.

射频溅射功率密度对 Ga:ZnO 透明导电薄膜性能的影响. 西安交通大学学报, 2010, 44(8):58-62.

(编辑 杜秀杰)