

酚醛基炭气凝胶对银离子的吸附性能研究

王海清¹, 张淑婷^{1,2}, 余敏娜¹, 符若文²

(1 华南农业大学 理学院, 广东 广州 510642;

2 中山大学 材料科学研究所, 广东 广州 510275)

摘要:以4种经常压干燥法制备的酚醛基炭气凝胶(carbon aerogels, CAs)为原料,通过静态和动态吸附试验及扫描电镜(SEM)表征,研究了材料孔结构、表面特性及溶液性质等因素对 Ag^+ 吸附性能的影响。结果表明, Ag^+ 在炭气凝胶表面的吸附主要是以氧化还原形式进行的化学吸附,通过还原吸附的银颗粒主要分布在凝胶外表面,而吸附容量与孔结构、活化程度(表面活性还原官能团)、溶液pH、固液比例及 Ag^+ 浓度等有关。SEM图表明在不同pH的硝酸银溶液下吸附于凝胶表面的银状态不同。

关键词:炭气凝胶; 还原吸附; 银离子

中图分类号:O632.72

文献标识码:A

文章编号:1001-411X(2008)03-0101-06

Adsorption and Reduction of Silver Ions onto Carbon Aerogels

WANG Hai-qing¹, ZHANG Shu-ting^{1,2}, YU Min-na¹, FU Ruo-wen²

(1 College of Sciences, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;

2 Material Science Institute, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Four kinds of carbon aerogels prepared by ambient pressure technique were used to investigate the capability of adsorption silver ions onto carbon aerogels by static and dynamic adsorption experiment. The effects of pore size, the Brunauer-Emmett-Teller (BET) surface area, the initial AgNO_3 concentration, the ratio of aerogel mass/solution volume and value on adsorption properties were studied. The morphology of silver-containing carbon aerogels were investigated by means of scanning electron microscopy (SEM). The results showed that the mechanism of silver ions adsorption onto carbon aerogels is conducted by way of oxidation and reduction reaction. The adsorbent granule silver was distributed mainly on the surface of carbon aerogels, and adsorption capacity of silver was related to pore structure, the extent of activation, solution pH, the ratio of aerogel mass/solution volume, Ag^+ concentration and so on. The SEM figures showed that the state of silver adsorbed on the surface of carbon aerogels was various in the solution of different pH.

Key words: carbon aerogels; reduction adsorption; silver ions

炭气凝胶(carbon aerogel, CA)是一种由纳米级圆球状炭颗粒连接而成的具有三维网络结构的新型纳米多孔材料,因其有独特的纳米网络结构,使其在热学、力学、声学、光学和电学等方面具有广泛的应用前景,炭气凝胶的研究也引起了人们的重视^[1-2]。

最近几年,有人利用常压干燥法成功地制备了低密度的有机气凝胶及其炭气凝胶^[3-5]。炭气凝胶具有丰富的微孔,比表面积大,微孔孔径与活性炭纤维等多孔炭材料类似,其在空间的堆叠还生成了大量的中孔和大孔,故炭气凝胶可作为一种优良的吸附剂。炭

收稿日期:2007-04-09

作者简介:王海清(1984—),女,硕士研究生; 通讯作者:张淑婷(1968—),女,副教授,博士,E-mail: zhangshuting@gmail.com

基金项目:国家自然科学基金项目(50133020);广东省科技计划项目(2004A30404001)

气凝胶作为吸附剂可以回收或者去除重金属,同时载银炭气凝胶不仅可以吸附自来水中的有机物和部分无机杂质,还可以有效地抑制细菌的生长繁殖,因而也可以用于饮用水的净化^[6]. 目前,许多研究机构主要致力于炭气凝胶中掺杂金属纳米粒子以改善炭气凝胶结构、导电性及催化性能等^[7-8],有关活性炭纤维对 Ag^+ 的吸附作用及其吸附机理,中山大学陈水挾等^[9-11]已作详细研究,研究了炭纤维制备条件、表面氧化改性以及负载有机物等对活性炭纤维还原能力的影响. 结果表明用 H_3PO_4 或 ZnCl_2 活化的活性炭纤维对 Ag^+ 具有更高的还原吸附容量,分别可达 250 和 700 mg/g,约为水蒸气活化剑麻基活性炭纤维对 Ag^+ 还原吸附容量的 2 倍和 5 倍. 本文初步研究了具有不同孔结构和表面特性的炭气凝胶对 Ag^+ 的吸附规律,对认识炭气凝胶的吸附性能及其潜在的应用前景有一定的指导意义.

1 材料与方法

1.1 主要试剂和仪器

1.1.1 试剂 间苯二酚(resorcinol):分析纯,上海五联化工厂;甲醛(formaldehyde)、糠醛(furfural):分析纯,广州化学试剂厂;十六烷基三甲基溴化铵(CTAB):分析纯,上海伯奥生物科技有限公司;异丙醇(isopropanol)、乙醇(ethanol):分析纯,天津化学试剂一厂;硝酸银(silver nitrate):分析纯,国药集团化学试剂公司;厨艺牌花生油:食用,广州市番禺南利油脂制品有限公司.

1.1.2 仪器 炭化、活化炉:自制;PHS-3C 精密 pH 计、雷磁 ZDJ-4A 型自动电位滴定仪:上海精密科学仪器有限公司,银电极和 217 型参比电极内装浓度为 2.5 mol/L 的 NaNO_3 ;SHZ-82 气浴恒温振荡器:广州正一科技有限公司;WFX-1C 型原子吸收分光光度计,北京第二光学仪器厂. 游标卡尺用于测量炭气凝胶体积,并与其恒质量后的凝胶质量计其密度. JSM-6330F 场发射扫描电子扫描镜,观察炭气凝胶形貌. ASAP2010 型比表面积及孔径分析测试仪,测定比表面积及孔径,并根据 Brunauer-Emmett-Teller (BET) 方程由氮吸附等温线计算比表面积,根据 Horvath-Kawazoe (HK) 理论和 Barret-Joyner-Halenda (BJH) 方程计算孔结构数据^[12].

1.2 材料制备

采用 4 种常压干燥制备得到炭气凝胶材料,其制备过程见文献[3-5]. 其中 Carbon Aerogel 35 (CA35) 和 Carbon Aerogel 25 (CA25) 是有机溶剂体系的炭气凝胶^[3],以间苯二酚(R)和糠醛(furfural)

为单体($n_R/n_{\text{furfural}} = 0.5$),六次甲基四胺(HMTA)作催化剂,分别以异丙醇(I) ($m_R/V_I = 0.1 \text{ g/mL}$, $n_R/n_{\text{HMTA}} = 35$) 和乙醇(E) ($m_R/V_E = 0.2 \text{ g/mL}$, $n_R/n_{\text{HMTA}} = 25$) 为溶剂,经溶胶凝胶、老化、常压干燥和高温炭化制备得到的块状炭气凝胶. Meso Carbon Aerogel (MCA) 是水体系块状炭气凝胶^[4],以 R 和甲醛(formaldehyde)为单体($n_R/n_{\text{formaldehyde}} = 0.5$),十六烷基三甲基溴化铵(CTAB) ($n_R/n_{\text{CTAB}} = 100$) 作催化剂,水为溶剂(R 和 formaldehyde 质量分数共 40%) 制备而得到. Granule Meso Carbon Aerogel (GMCA) 的配方与 MCA 相同,是以花生油作油相,采用悬浮聚合法制备的球形炭气凝胶颗粒^[5].

炭化过程:在 800 mL/min 流量的 N_2 中,以 5 $^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速度,在 900 $^\circ\text{C}$ 炭化 3 h 制得炭气凝胶. 活化过程:将炭气凝胶放入卧式活化炉中,在 N_2 保护下 1 h 内升温到 900 $^\circ\text{C}$,然后通入流量为 200 mL/min 的 CO_2 及 600 mL/min 的 N_2 进行活化,一定时间后,继续通入 N_2 冷却至室温,得活性炭气凝胶.

所有块状炭气凝胶样品经粉碎后过筛,取 20 ~ 40 目大小的样品备用. 制得的球形炭气凝胶颗粒过筛,取 10 ~ 20 目(以 GMCA₁ 表示)和 20 ~ 40 目(以 GMCA₂ 表示)备用.

1.3 炭气凝胶对银离子的静态吸附试验

将一定量经恒质量的炭气凝胶样品,放入装有 100 mL 硝酸银溶液的 250 mL 锥形瓶中,在 35 $^\circ\text{C}$ 恒温下振荡吸附 6 h,将吸附后的炭气凝胶样品滤出,用电位法测定吸附前后溶液中 Ag^+ 浓度的变化,并同时用 pH 计测定溶液 pH 的变化. 对于不同 pH 条件下的吸附试验,采用原子吸收分光光度计测定吸附前后 Ag^+ 浓度的变化.

1.4 炭气凝胶对银离子的动态吸附试验

称取一定量的炭气凝胶样品 2 份(每份 0.2 g),分别用于测定 pH 和电极电位. 每份样品于锥形瓶中加入 100 mg/L 的硝酸银溶液 50 mL,室温下开动磁力搅拌,计时并间隔一定时间测定一次溶液的电极电位及 pH,直到不再有明显的变化.

2 结果与分析

2.1 炭气凝胶对银离子的静态吸附性能

2.1.1 不同孔结构炭气凝胶对 Ag^+ 的吸附性能 从孔结构分析(表 1)结合前期工作^[13]可知,CA35 的凝胶结构中以微孔和大孔为主,密度较高的 CA25 材料主要以中孔和微孔为主,而密度较高的水相体系炭气凝胶 MCA 以中孔为主. GMCA₂ 的孔结构与 MCA 类似,但是在凝胶颗粒表面有一层致密的凝胶膜^[5].

表 1 炭气凝胶的比表面积和孔结构参数
Tab. 1 Surface and pore parameters of CAs

样品 sample	$\rho/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	比表面积		$d_{\text{pore}}/\text{nm}$	相对体积	
		specific area / ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)			specific volume / ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)	
		BET	微孔 micropore		微孔 micropore	中孔 mesopore
CA35	0.25	678	564	0.44	0.26	0.20
CA25	0.42	525	314	10.00	0.15	0.54
MCA	0.45	623	339	13.40	0.16	1.02
GMCA ₂		530	348	8.90	0.16	0.46

表 2 是不同孔结构的炭气凝胶在不同质量浓度硝酸银溶液中的吸附容量. 试验中发现:密度较高的块状炭气凝胶(MCA, CA25)与 500 mg/L 的硝酸银溶液接触后,几秒钟内即可见到凝胶外表面出现白色的片状银,球形炭气凝胶(GMCA₁、GMCA₂)颗粒的外表面几乎完全被银包裹,形成银白色的颗粒,这主要可能是 Ag⁺被炭气凝胶还原成单质银而吸附于其表面;而密度较低,以大孔和微孔为主的炭气凝胶(CA35)则未见到这种现象,原因可能主要是其表面还原活性点较少.

表 2 炭气凝胶在不同质量浓度 Ag⁺溶液中的吸附容量
Tab. 2 Adsorption capacity of CAs in various mass concentration of Ag⁺ solutions

$\rho(\text{Ag}^+)/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	吸附容量 adsorption capacity/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)				
	CA35	CA25	MCA	GMCA ₁	GMCA ₂
5	4.58	4.60	4.91	4.57	4.56
10	9.60	9.76	10.35	9.81	9.81
100	72.57	70.33	63.58	79.38	90.27
500	150.03	150.12	148.32	149.25	155.67

有研究表明,活性炭的吸附性能主要由孔结构和表面官能团决定^[14-15],吸附容量与活性炭的孔隙结构及有效孔隙容积有关,只有吸附质分子或离子能充填进入的孔隙才是有效的孔隙. 对于 CA35,凝胶结构疏松,有效孔隙容积比凝胶结构致密的中孔材料(MCA)稍大. 在低浓度下总体吸附容量小,其吸附容量主要与吸附速度有关;在高浓度下总体吸附容量大,吸附容量主要与有效孔隙容积有关.

提高溶液的 pH 可使多孔炭材料电极电位下降,从而提高活性炭材料对 Ag⁺的吸附能力^[14]. 本研究分别测定了原始 Ag⁺溶液及吸附后溶液的 pH(图 1). 原始溶液的 pH 随 Ag⁺初始浓度的提高而略有下降;对于块状炭气凝胶(CA35, CA25, MCA),吸附后低浓度下溶液的 pH 比原始溶液有所上升,而高浓度下溶液的 pH 比原始溶液明显下降. 这是因为炭气凝胶在水溶液中的 pH 比 Ag⁺溶液稍高,在氧化还原吸附过

程中,逐步释放出 H⁺,所以在高浓度下使溶液的 pH 明显下降. 图 1 中球形炭气凝胶(GMCA)颗粒吸附银后,溶液的 pH 比初始 Ag⁺溶液都要高,并随着 Ag⁺浓度的升高而快速下降. 与 MCA 同样的配方,GMCA 颗粒炭气凝胶的 pH 比 MCA 的高,这可能与颗粒凝胶致密的外膜上含有较多的碱性官能团有关.

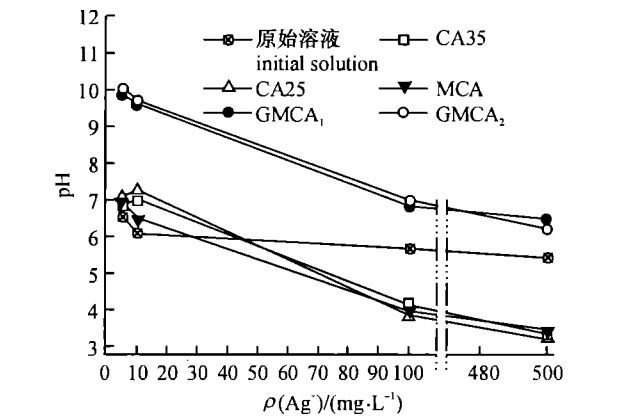


图 1 炭气凝胶在不同质量浓度 Ag⁺溶液中吸附后溶液的 pH 变化
Fig. 1 Variation of pH after CAs adsorptions in different mass concentration of Ag⁺ solutions

2.1.2 比表面积对 Ag⁺吸附性能的影响 将水相体系炭气凝胶(MCA)用 CO₂ 进行活化,在不同活化时间下得到一系列具有不同比表面积的活性炭气凝胶材料,用于研究炭气凝胶的比表面积对 Ag⁺吸附容量的影响(表 3). 在 CO₂ 活化过程中伴随着大量微孔和中孔形成,比表面积随之增加^[16]. 随着活化时间的延长,炭气凝胶的比表面积上升. 由表 3 可见,随着原始溶液 Ag⁺浓度增加,吸附容量增加;随着活化时间延长,炭气凝胶对 Ag⁺的吸附容量也增加,但活化 180 min 的炭气凝胶吸附容量反而有所下降,这主要是炭气凝胶过度活化导致表面活性还原点的减少,引起还原吸附容量下降. 由此可见,活性炭气凝胶的还原性能与炭纤维类似,与比表面积并无正比关系,而主要与炭材料表面还原活性点有关^[14].

表3 不同活化时间炭气凝胶 MCA 的比表面积及其对 Ag^+ 的吸附容量

Tab. 3 Surface area and adsorption capacity of activated MCA obtained in different activation time

$t_{\text{活化activation}} / \text{min}$	BET 比表面积 specific area of BET/ ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	吸附容量 ¹⁾ adsorption capacity/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)			
		5	10	100	500
0	628	4.67	10.13	60.21	147.69
60	974	4.85	10.42	65.42	149.52
90	1 165	4.99	10.23	68.79	166.68
120	1 189	5.15	11.40	75.28	175.23
180	1 399	4.77	9.64	71.71	154.12

1) 5、10、100、500 均指原始溶液 $\rho(\text{Ag}^+)/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$

炭气凝胶用 CO_2 活化后在不同浓度 Ag^+ 溶液中吸附后溶液 pH 变化见图 2。由图 2 可知,炭气凝胶活化后,在 Ag^+ 溶液中的 pH 普遍降低,一方面与炭气凝胶吸附溶液中 Ag^+ 后发生氧化还原反应释放的 H^+ 有关,另一方面与活化过程中伴随的含氧碱性官能团增加有关。未活化样品吸附后,低浓度下溶液 pH 上升,而高浓度下溶液 pH 明显下降;活化后,吸附液 pH 都比原始 Ag^+ 溶液低,并随着活化程度的升高而下降;活化到 180 min 的炭气凝胶,其 pH 的变化有反常,这主要与材料在 Ag^+ 溶液中的还原性能下降有关。

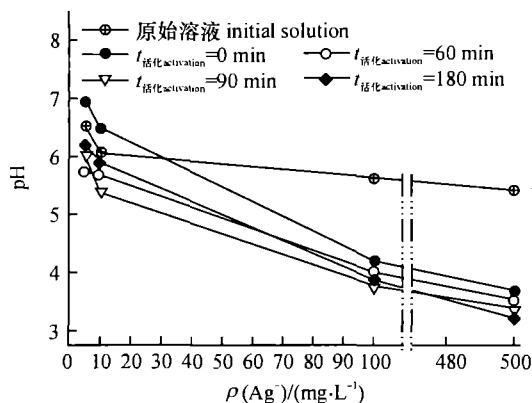
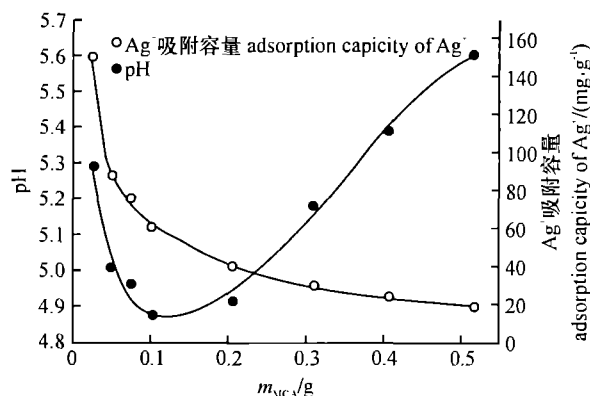


图2 活性炭气凝胶 MCA 在不同质量浓度 Ag^+ 溶液中吸附后溶液的 pH 变化

Fig. 2 Variation of pH when the activated MCA was immersed in the solution with various mass concentration of Ag^+

2.1.3 炭气凝胶固液比对 Ag^+ 吸附容量的影响 不同固液比的炭气凝胶(MCA)在 Ag^+ 溶液中的吸附量及吸附后溶液的 pH 变化见图 3。由图 3 可知,炭气凝胶(MCA)吸附容量随固液比的增加快速下降后逐渐趋向平缓,但炭气凝胶的 Ag^+ 吸附总量一直增加。溶液 pH 与吸附后所释放的 H^+ 浓度及载体炭气凝胶的量有关,因中孔炭气凝胶在水溶液中的碱性比 Ag^+

溶液高,而氧化还原释放的 H^+ 浓度随吸附容量的增加而升高,因而吸附后溶液的 pH 值先下降,至固液比为 0.001 g/mL 左右时最低,然后又逐渐升高。



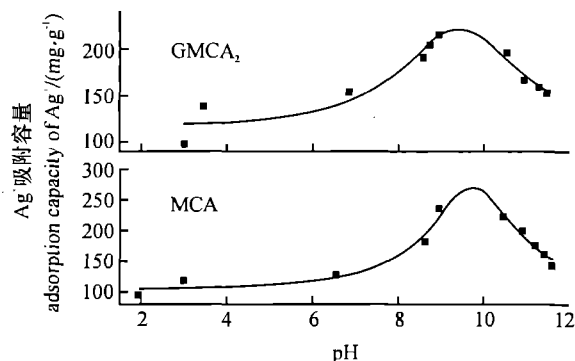
每样品用 $\rho(\text{Ag}^+) = 100 \text{ mg/L}$ 的溶液 100 mL

$\rho(\text{Ag}^+) = 100 \text{ mg/L}$, using Ag^+ solution 100 mL per sample

图3 不同固液比的炭气凝胶(MCA)在一定质量浓度 Ag^+ 溶液中吸附容量及吸附后溶液的 pH 变化

Fig. 3 Variation of Ag^+ adsorption capacity and pH as a function of the mass of carbon aerogels

2.1.4 不同 pH 吸附液对吸附容量的影响 块状炭气凝胶(MCA)和球形炭气凝胶(GMCA₂)在 500 mg/L 硝酸银溶液中的吸附容量随 pH 的变化关系见图 4。GMCA₂ 和 MCA 的变化趋势基本一致,吸附容量随着 pH 的增大先增加, pH 约为 9 时达到最高值,后逐渐下降。高 pH 下 Ag^+ 吸附容量下降的原因是溶液中的 Ag^+ 主要以银氨配合物的形式存在,其氧化还原电位下降引起还原吸附容量降低。这一变化趋势与文献中有关活性炭纤维的结果类似^[17],表明炭气凝胶对 Ag^+ 的吸附特性主要表现为氧化还原形式的化学吸附。



吸附液 $\rho(\text{Ag}^+) = 500 \text{ mg/L}$; pH < 7 时,用 HNO_3 调节溶液的 pH; pH > 7 时,用 $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 调节溶液的 pH

The solution of $\rho(\text{Ag}^+) = 500 \text{ mg/L}$; When pH < 7, HNO_3 was used to adjust the pH; When pH > 7, $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ was used to adjust the pH.

图4 GMCA₂ 和 MCA 在硝酸银溶液中 Ag^+ 吸附容量随 pH 的变化

Fig. 4 Ag^+ adsorption capacity in solution of silver nitrate on the GMCA₂ and MCA at different pH

2.2 炭气凝胶对银离子的动态吸附性能

溶液中 Ag^+ 浓度的对数值与银的电极电位呈正比关系,本试验中通过实时检测溶液中银的电极电位及 pH 变化,研究了不同孔结构的炭气凝胶在 Ag^+ 溶液中的动态吸附性能(图 5、6)。

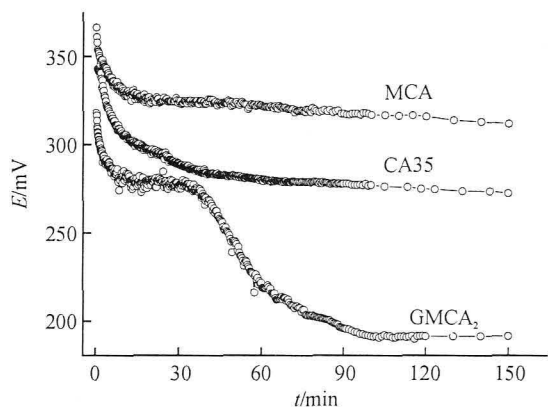


图5 不同炭气凝胶动态吸附过程中银电极电位随时间的变化
Fig.5 Variation of silver electrode potential of various carbon aerogels in Ag^+ solution as a function of contact time

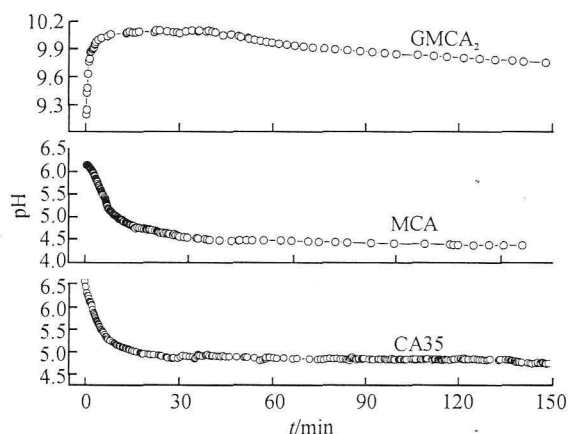


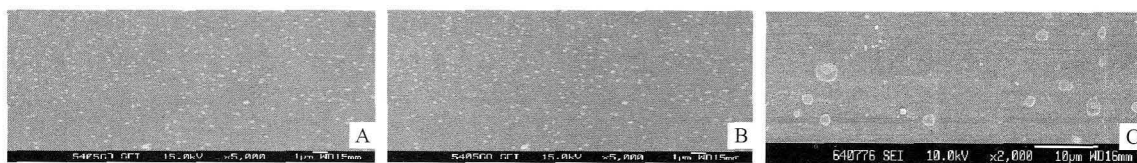
图6 不同炭气凝胶动态吸附过程中 pH 随时间的变化
Fig.6 Variation of pH of various carbon aerogels in Ag^+ solution as a function of contact time

由图 5 可见,以中孔为主的炭气凝胶, MCA / Ag^+ 溶液中的电极电位在短时间内迅速下降,随后趋向平缓,表现出快速吸附的特性。以微孔和大孔为主

的炭气凝胶, CA35 / Ag^+ 溶液中的电极电位随接触时间的增加,开始阶段下降速度比 MCA 稍慢,随后平缓下降。由图 6 可见, CA35、MCA / Ag^+ 溶液的 pH 变化趋势与其电极电位的变化呈对应关系,随着还原吸附的进行, pH 快速下降后趋向平缓。这也反应了银的还原吸附过程中不断释放出 H^+ , 伴随着 pH 的下降。CA35 / Ag^+ 溶液中的 pH 在接触 15 min 时降到 5.0, 而 MCA / Ag^+ 溶液中的 pH 则降到 4.7 左右。MCA 的还原吸附速度比 CA35 快的原因可能有二: 一是由于 MCA 凝胶表面具有更多的还原性官能团和更高的 pH, 即化学吸附量较高; 再就是与孔结构有关, CA35 密度低, 凝胶颗粒堆积结构疏松, 吸附质的扩散需经过大孔才能到达微孔被吸附, 因而吸附速度较慢, 而 MCA 密度高, 大量纳米炭颗粒堆积形成的中孔直接露于凝胶外表面, 吸附路径较短, 因而其吸附速度较快。球形炭气凝胶 (GMCA₂) 在 Ag^+ 溶液中呈现多阶段吸附现象, 在接触 10 ~ 40 min 阶段出现一个电极电位持续不变的过程, 随后又缓慢下降, 其中的原因一方面可能在于吸附质从凝胶颗粒外膜扩散到内层的速度较慢, 出现一个缓冲期, 另一方面可能在于球形炭气凝胶本身具有一定的碱性 (pH ≈ 10), 溶液 pH 随润湿程度的加深而上升, 而与 Ag^+ 溶液接触后还原吸附引起 pH 快速下降, 使溶液在 10 ~ 40 min 阶段出现 pH 的稳定期, 同时也使溶液的电极电位出现一个稳定的阶段。

2.3 扫描电镜下炭气凝胶吸附银离子后的结构表征

图 7 是炭气凝胶 MCA 吸附 Ag^+ 后的扫描电镜 (SEM) 图。在高 Ag^+ 浓度时 (图 7A), 炭气凝胶表面吸附还原生成的纳米银颗粒多而密集。当吸附液酸性较强时 (图 7B), H^+ 抑制了 Ag^+ 的还原过程, 只在炭气凝胶表面活性较强的位点上才能形成纳米银颗粒, 因而吸附的纳米银颗粒分布零星且形状不规则。当吸附液碱性稍强时 (图 7C), 吸附还原形成的纳米银颗粒较多且呈雪花状, 形状不规则。



A: $\rho(\text{Ag}^+) = 100 \text{ mg/L}$ 吸附液; B: 吸附液 pH = 2.09; C: 吸附液 pH = 8.08

A: The solution with $\rho(\text{Ag}^+) = 100 \text{ mg/L}$; B: The solution with pH = 2.09; C: The solution with pH = 8.08

图7 炭气凝胶 MCA 吸附 Ag^+ 后的扫描电镜 (SEM) 图

Fig.7 The scanning electron microscopy (SEM) photographs of Ag^+ adsorbed onto MCA at different conditions

3 结论

炭气凝胶对 Ag^+ 的吸附特征主要表现为氧化还原反应进行的化学吸附,其吸附容量与以下因素有关:(1)与孔隙结构及有效孔隙容积有关,只有吸附质分子或离子能充填进入的孔隙才是有效的孔隙;(2)与活化程度(表面活性还原官能团)有关,随着活化程度的增加,炭气凝胶的比表面积增大,而吸附容量则先增加后减小;(3)与溶液 pH 有关,吸附容量随着 pH 的增大先增加,pH 约为 9 时达到最高值,后逐渐下降;(4)与固液比有关,吸附容量随着固液比的增大而减小;(5)与 Ag^+ 浓度有关,吸附容量随 Ag^+ 浓度的增大而增加。

炭气凝胶对 Ag^+ 的吸附速度与孔结构及 Ag^+ 扩散速度有关。中孔结构的炭气凝胶对 Ag^+ 的吸附速度比大孔及微孔炭气凝胶快。球形颗粒炭气凝胶的吸附为多阶段吸附过程, Ag^+ 从凝胶颗粒外膜扩散到内层的速度较慢。通过还原吸附的银颗粒主要分布在凝胶外表面,其分布受吸附液初始浓度、pH 等条件影响。SEM 图表明在不同 pH 的 Ag^+ 溶液下吸附于凝胶表面的银状态不同。

本研究主要致力于块状炭气凝胶的吸附性能研究,而球形炭气凝胶对 Ag^+ 的吸附特性有待进一步深入地研究。

参考文献:

- [1] PEKALA R W, MAYER S T, KASCHMITTER J L, et al. Sol-gel processing and applications[M]. New York: Plenum Press, 1994.
- [2] PAJONK G M. Catalytic aerogels[J]. Catalysis Today, 1997, 35: 319-337.
- [3] WU Ding-cai, FU Ruo-wen, ZHANG Shu-ting, et al. The preparation of low-density carbon aerogels by the ambient pressure drying procedure[J]. Carbon, 2004, 42: 2033-2039.
- [4] WU Ding-cai, FU Ruo-wen, MILDRED S, et al. Fabrication and nano-structure control of carbon aerogels via a microemulsion-templated sol-gel polymerization method[J]. Carbon, 2006, 44: 675-68.
- [5] 张淑婷. 纳米银负载的炭气凝胶制备、结构及其抗菌性能研究[D]. 广州: 中山大学化学与化学工程学院, 2006.
- [6] ZHANG Shu-ting, FU Ruo-wen, WU Ding-cai, et al. Preparation and characterization of antibacterial activated silver-dispersed carbon aerogels[J]. Carbon, 2004, 42: 3209-3216.
- [7] BEKYAROVA E, KANEKO K. Structure and physical properties of tailor-made Ce, Zr-doped carbon aerogels[J]. Advanced Materials, 2000, 12: 1625-1627.
- [8] BAUMANN T F, FOX G A, SATCHER J H, et al. Synthesis and characterization of copper-doped carbon aerogels[J]. Langmuir, 2002, 18: 7073-7076.
- [9] 陈水挟, 曾汉民. 活性炭纤维的制备及其液相吸附研究: 对水溶液中有机物和银的吸附特性[J]. 高科技纤维与应用, 2002, 27(2): 32-34.
- [10] 陈水挟, 黄镇洲, 梁瑾, 等. 银在活性炭纤维上的吸附与分布[J]. 新型炭材料, 2002, 17(3): 6-10.
- [11] 陈水挟, 许瑞梅, 黄慧星, 等. 活性炭纤维对铂离子的还原吸附特征[J]. 离子交换与吸附, 2006, 22(1): 9-15.
- [12] 严继民, 张启元, 高敬琮. 吸附与凝聚: 固体的表面与孔[M]. 北京: 科学出版社, 1986: 139-154.
- [13] 张淑婷, 符若文, 吴丁财, 等. 纳米银负载的炭气凝胶制备及抗菌性能研究[J]. 离子交换与吸附, 2006, 22(3): 199-207.
- [14] 岳中仁. 活性炭纤维的制备及对 Ag^+ 还原吸附机理的研究[D]. 广州: 中山大学化学与化学工程学院, 1995.
- [15] 陈水挟, 曾汉民. 活性炭纤维对银离子还原吸附能力的改进[J]. 离子交换与吸附, 2001, 17(5): 316-323.
- [16] WU Ding-cai, SHA Zhuo-qi, FU Ruo-wen. Structure and adsorption properties of activated carbon aerogels[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2006, 99: 2263-2267.
- [17] 符若文. 活性炭纤维的氧化还原特性及其应用前景[J]. 新型炭材料, 1998, 13(4): 1-12.

【责任编辑 李晓卉】