

磁场对氨基和巯基修饰多壁碳纳米管复合材料 吸附苯酚的影响

姚夏妍 鲁兴武 程 亮 张恩玉

(西北矿冶研究院, 白银 730900)

摘 要 在不同强度的磁场作用下,将所制备的氨基和巯基修饰多壁碳纳米管复合材料($\text{NH}_2\text{-SH-MWCNTs}$)经透射电镜、傅里叶红外光谱和热重等手段分析表征后加入到循环水系统当中对苯酚进行动态吸附。结合循环水氢键数量的变化研究磁场对 $\text{NH}_2\text{-SH-MWCNTs}$ 吸附苯酚的影响。结果表明:不加磁场时, $\text{NH}_2\text{-SH-MWCNTs}$ 对苯酚的平衡吸附容量较大。当施加磁场时,由于受到洛伦兹力的影响, $\text{NH}_2\text{-SH-MWCNTs}$ 对苯酚的平衡吸附容量减小,并且磁场强度越强,平衡吸附容量越小;减少氢键数量,吸附速率随之降低,氢键数量越多,吸附速率越快。

关键词 磁场,氢键,碳纳米管,复合材料,吸附,苯酚

Influence of magnetic field on adsorption of phenol by $\text{NH}_2\text{-SH-MWCNTs}$ composite

Yao Xiayan Lu Xingwu Cheng Liang Zhang Enyu

(Northwest Institute of Mining and Metallurgy, Baiyin 730900)

Abstract Under the influence of different magnetic field strength, the prepared $\text{NH}_2\text{-SH-MWCNTs}$ composites were characterized by transmission electron microscopy, fourier infrared analysis and thermogravimetric analysis, and then added them to the circulating water system to conduct dynamic adsorption of phenol. Combined with the change of hydrogen bond number in circulating water and studied the effect of magnetic field on the adsorption of phenol by $\text{NH}_2\text{-SH-MWCNTs}$ composite. The results showed that, in the presence of magnetic field, due to the impact of Lorents force, the equilibrium adsorption capacity of $\text{NH}_2\text{-SH-MWCNTs}$ decreased with respect to phenol. And the stronger the magnetic field, the smaller the adsorption capacity. When there was no magnetic field intensity, the adsorption capacity reached the maximum. But hydrogen bonds can increase the adsorption rate, and the more the hydrogen bond number, the faster the adsorption rate. When the magnetic field strength was zero, the adsorption rate was the fastest.

Key words magnetic field, hydrogen bond, carbon nanotube, composite material, adsorption, phenol

苯酚是水污染主要的有害物质之一,对生物以及环境有着极大的危害。因此除去废水中的苯酚是水处理亟待解决的重要任务之一。而在很多废水处理方法中,吸附法因其方便快捷而受到研究人员的重视。近年来,碳纳米管因其独特的一维管状微结构以及比表面积大、表面活性高,对有机污染物的吸附容量大,吸附亲和力强等特性,作为高效吸附剂受到了广泛关注^[1]。如孙明礼等^[2]利用 ^1H 质子宽线氢谱和热重分析发现碳纳米管由于 $\pi\text{-}\pi$ 共轭作用力的不同导致其对 α -萘酚的吸附能力较对苯酚的吸附能力强。刘立柱^[3]研究了有机苯或酚类在碳纳米管上的吸附特性,结果表明:碳纳米管对酚类物质的

吸附属于物理吸附,是靠自由能驱动的吸附过程。另外,他还发现吸附质的溶解度、吸附质与吸附剂间的 $\pi\text{-}\pi$ 共轭作用以及吸附质的分子结构是影响吸附量的主要因素。而范德华作用力、氢键作用又会影响碳纳米管对有机污染物的吸附。另外,碳纳米管结构与表面性质和有机物的理化性质也会影响碳纳米管与有机污染物之间的吸附作用力^[4]。所以,整个碳纳米管吸附过程很容易受到外界因素的变化,如磁场力、电场力以及氢键等因素。同时,研究表明:磁场可以通过影响电子的自旋来影响化学反应的进行,例如磁场可以影响化学反应的速度与产率,以及某些化学反应产物的分布与取向^[5]。本研究通

基金项目:甘肃省青年科技基金计划(1606RJYA305)

作者简介:姚夏妍(1988-),男,硕士研究生,主要研究方向为冶金新材料、碳纳米材料和磁处理水。

过将制备好的氨基和巯基修饰多壁碳纳米管复合材料($\text{NH}_2\text{-SH-MWCNTs}$)经透射电镜、傅里叶红外光谱和热重等手段分析表征后加入到循环水系统中对苯酚进行动态吸附^[6],结合循环水氢键数量的变化研究磁场对 $\text{NH}_2\text{-SH-MWCNTs}$ 吸附苯酚的影响。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

多壁碳纳米管(MWCNTs),深圳纳米港有限公司;浓硫酸(H_2SO_4)、浓硝酸(HNO_3),天津市百世化工有限公司;冰乙酸(CH_3COOH),天津市北辰方正试剂厂;3-巯基丙基三甲氧基硅烷 $[\text{HS}(\text{CH}_2)_3\text{Si}(\text{OCH}_3)_3]$,上海市源叶生物科技有限公司;丙酮(CH_3COCH_3)、水合肼(N_2H_4),天津市北辰方正试剂厂;无水乙醇($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$),天津市化学试剂六厂;重水(D_2O),分析纯,济宁佰一化工有限公司。

分析天平(ATY124型),菲律宾 Shimadzu Philippines 公司;超纯水仪(UPD-I-20T型),成都超纯科技有限公司;微量高速台式离心机(TG16-W),长沙湘仪离心机仪器有限公司;真空抽滤泵(BX-05)、真空干燥箱(DZF-6050),上海博迅实业有限公司医疗设备厂;超声清洗机(KQ3200DE),昆山市超声仪器有限公司;恒温振荡箱(THZ-82),常州国华电器有限公司;数显恒温水浴锅(HH-S2),金坛市医疗仪器厂;透射电子显微镜(TEM, JEM-2010型),日本电子光学公司;特斯拉计(HT100型),上海精密仪器公司;傅里叶变换红外光谱仪(FT-IR, NICOTCT 5700型),美国热电仪器公司;核磁共振仪(Bruker advance AV III 400型),郑州树仁科技发展有限公司;紫外-可见分光光度计(7230G型),上海精密科学仪器有限公司。

1.2 氨基和巯基修饰多壁碳纳米管复合材料($\text{NH}_2\text{-SH-MWCNTs}$)的制备

第一步:首先称取 2g MWCNTs 放入锥形瓶,在其中倒入混合均匀的 60mL 浓 H_2SO_4 和 20mL 浓 HNO_3 ,其后超声震荡 25min,待 MWCNTs 超声分散均匀后置于 60℃ 恒温水浴锅中,并以 150r/min 的速度机械搅拌 3h。反应结束后将混合物稀释 10 倍静置 12h,除去上清液。随后,利用聚四氟乙烯滤膜进行抽滤,抽滤过程中要进行多次冲洗直至滤液为中性,接着再用无水乙醇冲洗。最后,将产物置于 80℃ 真空干燥箱中干燥 12h 后研磨,便得到纯化好的 MWCNTs。

第二步:取 400mg MWCNTs 置于三颈瓶中,

加 100mL 无水乙醇并超声分散后提前通入 5min N_2 ,在 N_2 保护下将 4mL CH_3COOH 和 8mL 3-巯基丙基三甲氧基硅烷滴加到 MWCNTs 分散液中并在 100r/min 的速度下搅拌 24h。反应结束后向其中缓慢加入 100mL 丙酮继续反应,需要强调的是此过程一直要通 N_2 进行保护;6h 后进行过滤,此过程需要无水乙醇洗涤 2—3 次,随后将产物在 60℃ 下真空干燥 8h,便得到产物巯基修饰多壁碳纳米管复合材料(SH-MWCNTs)。

第三步:称取上一步得到的 200mg SH-MWCNTs 加入到 50mL 无水乙醇中进行快速搅拌,随后超声 30min;在室温、 N_2 保护下向分散液中缓慢加入 10mL 水合肼反应 6h 后抽滤,并且利用去离子水和无水乙醇分别依次洗涤产物 3—4 次后于 60℃ 真空干燥 8h,得到 $\text{NH}_2\text{-SH-MWCNTs}$ 。

2 结果与讨论

2.1 TEM 分析

图 1 为 MWCNTs、 SH-MWCNTs 和 $\text{NH}_2\text{-SH-MWCNTs}$ 的 TEM 图。由图可知,由于混酸的纯化除去了 MWCNTs 表面的杂质,同时引入了羧基和羟基,强化了其在溶液中的分散性,MWCNTs 分布分散且表面光滑,同时出现断口。而 SH-MWCNTs 的表面可以看到均匀包覆一层粒径为 6nm 左右的纳米粒子,而且 MWCNTs 团聚也不明显。但是 $\text{NH}_2\text{-SH-MWCNTs}$ 中 MWCNTs 表面包覆的膜厚一些,平均厚度约为 6.5nm。因此,氨基和硫醇基都已成功包覆到 MWCNTs 表面。

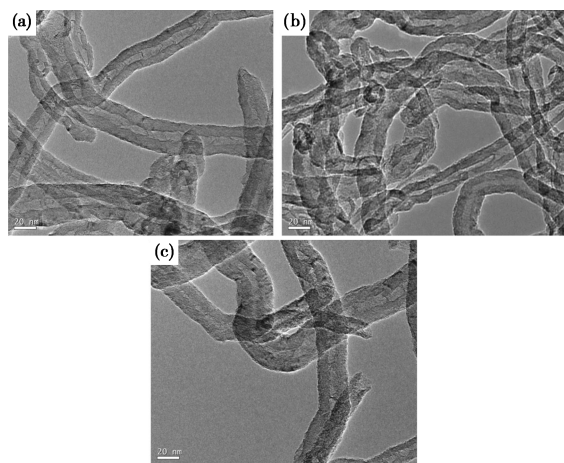


图 1 MWCNTs(a)、 SH-MWCNTs (b)和 $\text{NH}_2\text{-SH-MWCNTs}$ (c)的 TEM 图

2.2 FT-IR 分析

图 2 为 MWCNTs 与 $\text{NH}_2\text{-SH-MWCNTs}$ 的

FT-IR 谱图。由图可知, 1562cm^{-1} 附近为 $\text{C}=\text{C}$ 的伸缩振动峰。对比发现, 606cm^{-1} 为 $-\text{NH}_2$ 的面外摇、 692cm^{-1} 处为 $\text{N}-\text{H}$ 的弯曲振动峰, 2359cm^{-1} 处为 NH_2 的伸缩振动峰^[7], 出现这些峰证明氨基已成功负载到 MWCNTs 表面。另外, 721cm^{-1} 处的 $\text{Si}-\text{C}$ 和 805cm^{-1} 处的 $\text{Si}-\text{N}$ 伸缩振动峰^[8], 这说明硫醇基(MPTs)负载到了 MWCNTs 表面, 即氨基与 3-巯基丙基三甲氧基硅烷已成功连在一起。由于原始 MWCNTs 经氧化而负载了大量 $-\text{OH}$, 1036cm^{-1} 处为 $\text{O}-\text{H}$ 的伸缩振动峰^[9]。 $2800\sim 3000\text{cm}^{-1}$ 之间对应着 $-\text{CH}_2$ 的对称与非对称伸缩振动峰。对比发现, $-\text{CH}_2$ 的强度增大了, 其原因是引入了 MPTs 中的亚甲基。 2560cm^{-1} 处为 $\text{S}-\text{H}$ 的吸收峰^[10]。另外, 1106cm^{-1} 处出现了 $\text{Si}-\text{O}$ 的伸缩振动峰。 $\text{Si}-\text{C}$ 和 $\text{Si}-\text{O}$ 吸收峰的出现都说明 MPTs 已成功负载到了 MWCNTs 表面, 及氨基与 MPTs 发生了反应。

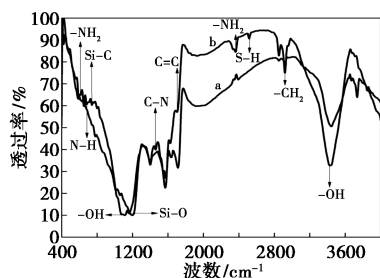


图 2 MWCNTs(a)与 $\text{NH}_2\text{-SH-MWCNTs(b)}$ 的 FT-IR 谱图

2.3 TG 分析

MWCNTs、SH-MWCNTs 和 $\text{NH}_2\text{-SH-MWCNTs}$ 的 TG 曲线见图 3。由图可知, MWCNTs 在 $0\sim 90^\circ\text{C}$ 之间由于层间水分蒸发而出现质量损失, 而在 $100\sim 382.51^\circ\text{C}$ 之间的损失量约为 16.46%, 这很可能是残留的过氧化氢、硝酸根离子及硫酸根离子的热解造成的。SH-MWCNTs 在 $50\sim 275^\circ\text{C}$ 之间质量损失为 3.9%, 这与 MWCNTs 一致的, 而在 $275\sim 800^\circ\text{C}$ 之间主要是由于 MWCNTs 表面的 MPTs 损失, 所以硫醇基基团的负载量约为 13.5%。 $\text{NH}_2\text{-SH-MWCNTs}$ 在 $50.38\sim 112.63^\circ\text{C}$ 和 $112.63\sim 269.5^\circ\text{C}$ 两个阶段有质量损失, 分别为 2.06% 和 6.77%, 而 $269.5\sim 786^\circ\text{C}$ 之间为其第三阶段的质量损失, 其损失量约为 16.5%, 这可能是硫醇基与氨基基团的总损失量, 所以氨基基团的负载量约为 3%。

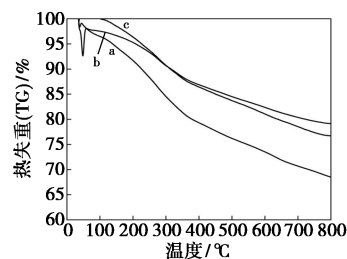


图 3 MWCNTs(a)、SH-MWCNTs(b)和 $\text{NH}_2\text{-SH-MWCNTs(c)}$ 的 TG 曲线图

2.4 磁场对 $\text{NH}_2\text{-SH-MWCNTs}$ 吸附苯酚的影响

为了研究磁场对 $\text{NH}_2\text{-SH-MWCNTs}$ 吸附苯酚的影响, 首先需要利用紫外分光光度计测出了苯酚的标准曲线(图 4), 接着取 0.5g 苯酚和 $\text{NH}_2\text{-SH-MWCNTs}$ 加入到温度为 303K , 水速为 0.2m/s 的循环系统当中, 通过在不同吸附时间、不同磁场强度下进行动态吸附实验得到了不同条件下的实验数据, 由此分析磁场对 $\text{NH}_2\text{-SH-MWCNTs}$ 吸附苯酚的影响。水样利用核磁共振仪器和重水测量水样的半缝宽。 $\text{NH}_2\text{-SH-MWCNTs}$ 对苯酚的吸附能力通过式(1)计算^[11]; 接着经过滤的滤液用紫外分光光度计测定苯酚吸光度来计算其相应浓度。

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \quad (1)$$

式中, q_e 为 $\text{NH}_2\text{-SH-MWCNTs}$ 对苯酚的平衡吸附量, mg/g ; C_0 为溶液中苯酚的初始浓度, mg/L ; C_e 为溶液中苯酚的平衡浓度, mg/L ; V 为溶液的体积, L ; m 为 $\text{NH}_2\text{-SH-MWCNTs}$ 的加入量, g 。

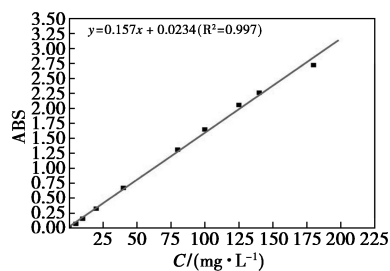


图 4 苯酚的标准曲线图

2.5 磁场强度对 $\text{NH}_2\text{-SH-MWCNTs}$ 吸附苯酚的影响

磁场强度对 $\text{NH}_2\text{-SH-MWCNTs}$ 吸附苯酚的影响见图 5。由图可知, 200min 时, $\text{NH}_2\text{-SH-MWCNTs}$ 对苯酚的吸附容量已经达到平衡, 200min 后随着吸附时间的增加, 平衡吸附量基本保持不变。在磁场强度分别为 0、0.25T 和 0.5T 时, $\text{NH}_2\text{-SH-MWCNTs}$ 对苯酚的最大吸附容量分别达 275mg/g 、 164mg/g 和 140mg/g 。但由于在 $\text{NH}_2\text{-SH-MWCNTs}$ 表面负载的基团呈电负性, 并且由于苯酚

都是以酚盐离子的形式存在也带有负电^[12],所以 $\text{NH}_2\text{-SH-MWCNTs}$ 与苯酚离子之间存在着一定的静电排斥作用,这在一定程度上减少了苯酚离子与 $\text{NH}_2\text{-SH-MWCNTs}$ 的接触几率,因此降低了苯酚吸附容量^[13]。根据曲线的变化趋势,在吸附初期,吸附量随时间基本呈线性变化,而在接近吸附平衡时,吸附量基本保持不变,遵循 Langmuir 方程^[14] [式(2)]。

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (2)$$

式中, q_t 为 t 时刻 $\text{NH}_2\text{-SH-MWCNTs}$ 对苯酚的吸附量, mg/g ; q_e 为平衡时 $\text{NH}_2\text{-SH-MWCNTs}$ 对苯酚的吸附量, mg/g ; k_2 为吸附速率常数, min^{-1} 。

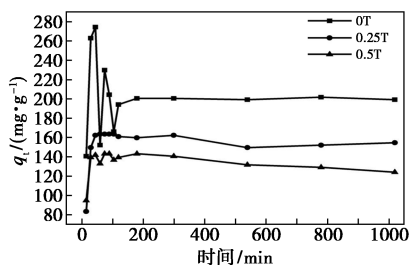


图 5 磁场强度对 $\text{NH}_2\text{-SH-MWCNTs}$ 吸附苯酚的影响

以 t/q_t 对 t 作图得图 6。

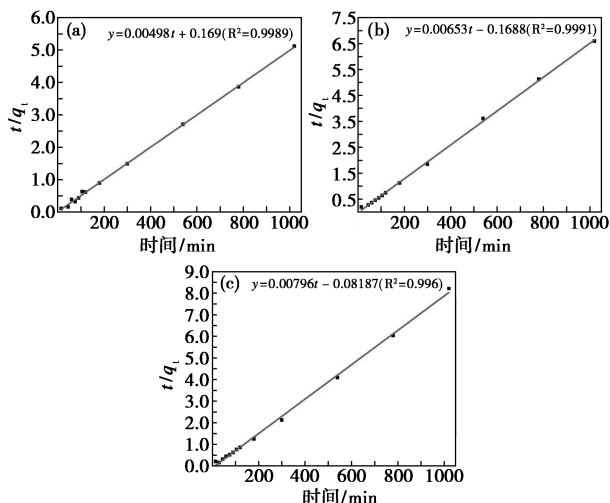


图 6 不同磁场强度下 $\text{NH}_2\text{-SH-MWCNTs}$ 对苯酚的吸附动力学变化图
[(a) 0T; (b) 0.25T; (c) 0.5T]

计算可得,磁场强度为 0、0.25T 和 0.5T 时,其 q_e 分别为 200.8 mg/g 、153.14 mg/g 和 125.63 mg/g ,可见磁场减小了平衡吸附量,并且磁场强度越大,平衡吸附量越小。这主要是由于吸附剂表面上负载的基团和苯酚带显示出负电性,当通过磁场时,由于二者的带电量不同使得受到了大小不同的洛伦磁力,并促使二者分离,这种分离力随磁场强度的增强而

增大,导致平衡吸附容量减小。

对于 $\text{NH}_2\text{-SH-MWCNTs}$ 对苯酚的吸附速率常数 k 而言,由图 6 和式(3)可以得到图 7。由图可知, $k_0 > k_{0.5} > k_{0.25}$ 。

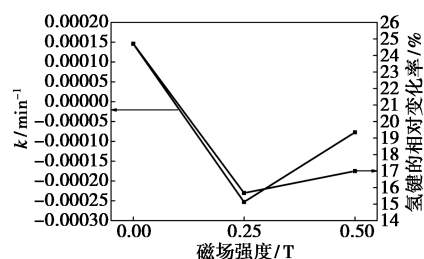


图 7 磁场强度对吸附速率常数和氢键相对变化率的影响

而每组氢键数量的变化可通过核磁共振所测得半峰宽来计算^[15]。

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{C - C_0}{C_0} = \frac{\Delta v_{1/2}^0 - \Delta v_{1/2}}{\Delta v_{1/2}} \quad (3)$$

式中, $\Delta C/C_0$ 为自由水的相对变化量, %, 即氢键的变化量, 若 $\Delta C/C_0$ 为正值, 则氢键数量减少, 反之则相反; C 为磁处理后的自由水的比例, %; C_0 为超纯水的自由水的比例, %; $v_{1/2}^0$ 是超纯水的半峰宽高度; $v_{1/2}$ 是实验组的半峰宽高度。氢键的具体变化量见图 7。

由图 7 可知,氢键越多,反应速率越快。所以增加氢键数量可以提高反应速率。从磁场影响分子间氢键形成的角度而言,磁场可以促使水分子自由态向氢键结合态转变^[16],但是负离子会减小氢键数量^[17],所以不施加磁场强度时,苯酚离子大部分被吸附在 $\text{NH}_2\text{-SH-MWCNTs}$ 表面而降低了对氢键的影响,当施加磁场时,一方面由于氢键的生成而增大反应速率,另一方面通过抑制 $\text{NH}_2\text{-SH-MWCNTs}$ 对苯酚的吸附而减小反应速率,所以在磁场强度为 0 时,平衡吸附容量最大,反应速率最快。其后,随着磁场强度的增加,平衡吸附容量减小。而反应速率却与氢键数量呈正比例变化。可见在磁场环境下, $\text{NH}_2\text{-SH-MWCNTs}$ 对苯酚进行动态吸附时要考虑洛伦磁力和氢键两方面的影响。

3 结论

通过 $\text{NH}_2\text{-SH-MWCNTs}$ 在不同磁场环境下对苯酚的动态吸附实验表明:在磁场存在的条件下,由于受到洛伦磁力的影响, $\text{NH}_2\text{-SH-MWCNTs}$ 对苯酚的平衡吸附容量减小,并且磁场强度越强,吸附

容量越小,磁场强度为零时,吸附容量达到最大。但是氢键可以提高吸附速率,氢键数目越多,吸附速率越快,磁场强度为零时,吸附速率最快。

参考文献

- [1] Pan B, Lin D H, Mashayekhi H, et al. Adsorption and hysteresis of bisphenol a and 17 α -ethinyl estradiol on carbon nanomaterials[J]. Environ Sci Technol, 2008, 42(15): 5480-5485.
- [2] 孙明礼, 成荣明, 徐学诚, 等. 苯酚及取代酚在碳纳米管上的吸附研究[J]. 化学研究与应用, 2006, 18(1): 13-18.
- [3] 刘立柱. 有机苯或酚类在碳纳米管上的吸附研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2008.
- [4] Fagan S, Souza A, Lima J, et al. 1,2-dichlorobenzene interacting with carbon nanotubes[J]. Nan Lett, 2004, 4(7): 1285-1288.
- [5] 蒋秉植, 杨健美. 磁场对某些化学反应的影响[J]. 化学通报, 1991, 2(10): 11-15.
- [6] 杨卫亚, 沈智奇, 王丽华, 等. 透射电子显微镜及相关技术多相催化研究中的应用[J]. 分析测试学报, 2010, 29(7): 755-760.
- [7] Fu R Q, Liu Y, Lou Z M, et al. Adsorption removal of Pb(II) by magnetic activated carbon incorporated with amino groups from aqueous solutions[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2016, 2(62): 247-258.
- [8] Zhou F, Yue B, Wang X L. Surface roughness, mechanical properties and bonding structure of silicon carbon nitride films grown by dual ion beam sputtering[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 492(1-2): 269-276.

- [9] Mourao P A M, Carrott P J M, Carrott M M L. Application of different equations to adsorption isotherms of phenolic compounds on activated carbons prepared from cork[J]. Carbon, 2006, 44(12): 2422-2429.
- [10] Pham C V, Eck M, Krueger M. Thiol functionalized reduced graphene oxide as a base material for novel graphene-nanoparticle hybrid composites[J]. Chemical Engineering Journal, 2013, 231(9): 146-154.
- [11] Abdel-Ghani N T, El-Chaghaby G A, Helal F S. Individual and competitive adsorption of phenol and nickel onto multiwalled carbon nanotubes[J]. Journal of Advanced Research, 2014, 6(3): 1-11.
- [12] Rao G P, Lu C, Su F. Sorption of divalent metal ions from aqueous solution by carbon nanotubes: a review[J]. Separation Purification Technology, 2007, 58(1): 224-231.
- [13] 李婷, 孟昭福, 张斌. 两性修饰膨润土对苯酚的吸附及热力学特征[J]. 环境科学, 2012, 33(5): 1632-1638.
- [14] Wu F C, Tseng R L, Juang R S. Kinetic modeling of liquid phase adsorption of reactive dyes and metal ions on chitosan[J]. Wat Res, 2001, 35(3): 613-618.
- [15] Rao G P, Lu C, Su F. Sorption of divalent metal ions from aqueous solution by carbon nanotubes: a review[J]. Separation Purification Technology, 2007, 58(1): 224-231.
- [16] Hosoda H, Mori H, Sogoshi N, et al. Refractive indices of water and aqueous electrolyte solutions under high magnetic fields[J]. J Phys Chem A, 2004, 108(9): 1461-1469.
- [17] Marcus Y. Effect of ions on the structure of water: structure making and breaking[J]. Chem Rev, 2009, 109(3): 1346-1351.

收稿日期: 2017-08-04

(上接第 188 页)

涂膜与玻璃表面能形成稳定的化学键, 因此, 涂膜与玻璃的附着性较好。

3 结语

本实验主要探讨了不同硅烷改性硅溶胶对其改性性能的影响, 并对工艺条件进行了优化。最佳反应参数为不同硅烷和硅溶胶的质量比为 4:1~5:1, 反应温度为 60℃, 反应时间为 4h, 其单体转化率最大, 附着力最好。采用不同硅烷偶联剂对硅溶胶进行疏水改性, 显著提高了膜的疏水性, 其接触角大小顺序为 N-十二烷基三乙氧基硅烷改性硅溶胶>N-辛基三乙氧基硅烷改性硅溶胶>丙基三乙氧基硅烷改性硅溶胶>甲基三乙氧基硅烷改性硅溶胶; 改性后硅溶胶的耐热性能与普通硅溶胶相比有较大的提升, 且耐热性能强弱顺序为丙基三乙氧基硅烷改性硅溶胶>甲基三乙氧基硅烷改性硅溶胶>N-十二烷基三乙氧基硅烷改性硅溶胶>N-辛基三乙氧基硅烷改性硅溶胶。此研究为应用奠定了基础, 提供

了参考依据, 具有较好的应用前景。

参考文献

- [1] 冯金辉. 硅溶胶的表面改性及其在环氧树脂中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [2] 刘见祥, 曾舒, 王聚恒, 等. 疏水改性硅溶胶的制备及应用[J]. 电镀与涂饰, 2016, 35(6): 291-294.
- [3] 李洁, 陈连喜, 张中明, 等. 硅溶胶的表面改性及应用研究进展[J]. 建材世界, 2012, 33(3): 1-4.
- [4] Lee Y G, Park J H, Oh C, et al. Preparation of highly monodispersed hybrid silica spheres using a one-step sol-gel reaction in aqueous solute[J]. Langmuir, 2007, 23(22): 10875-10878.
- [5] 杨丽静, 田辉平, 龙军, 等. 碱性硅溶胶稳定性的研究[J]. 石油炼制与化工, 2010, 41(6): 12-16.
- [6] 黄月文, 刘伟区, 任昕. 水性纳米硅溶胶的表面改性及其应用研究[J]. 广州化学, 2009, 34(1): 14-21.
- [7] 陈利君, 江元汝, 张璇卓一, 等. 甲基三乙氧基硅烷改性硅溶胶及疏水性能研究[J]. 涂料工业, 2012, 42(4): 26-28.
- [8] 何岩, 郝博, 李国军, 等. 溶剂型有机硅改性硅溶胶的合成与性能研究[J]. 有机硅材料, 2014, 28(3): 149-152.

收稿日期: 2017-07-31