

负载 Pd 蛋黄-蛋壳型磁性碳纳米复合材料 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C-Pd}$ 的制备及其催化性能研究

周云斌^{1,2} 李敏娜² 居 璨² 周林成^{2*} 吴 琼² 黄 峥²

(1.广州中鹏环保实业有限公司,广州 510220;2.兰州大学白银产业技术研究院,兰州 730000)

摘 要 用氨水做催化剂,利用正硅酸乙酯(TEOS)的溶胶-凝胶化过程和间苯二酚与甲醛的缩聚反应一步合成核壳材料;通过在 N_2 中碳化并在 NaOH 溶液中刻蚀 SiO_2 制得蛋黄-蛋壳型结构纳米微球;最后负载 Pd 得到磁性碳纳米复合材料 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C-Pd}$ 。采用透射电子显微镜、X 射线粉末衍射仪、紫外-可见分光光度计以及振动样品磁强计等手段对所制纳米材料的形貌、组成结构、晶体结构和磁性能进行了分析表征。将 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C-Pd}$ 作为催化剂用于对亚甲基蓝(MB)的催化还原,结果表明其具有良好的催化活性,重复使用 4 次催化活性几乎保持不变。

关键词 磁性,蛋黄-蛋壳型,纳米复合材料,贵金属负载,催化还原

Preparation and catalysis of Pd loaded yolk-shell $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C-Pd}$ magnetic carbon nanocomposite material

Zhou Yunbin^{1,2} Li Minna² Ju Can² Zhou Lincheng² Wu Qiong² Huang Zheng²

(1.Guangzhou Zhong Peng Environmental Protection Industry Co.,Ltd.,Guangzhou 510220;
2.Baiyin Industrial Technology Research Institute of Lanzhou University,Lanzhou 730000)

Abstract First, the yolk-shell material was prepared in one step by the sol-gel process of tetraethoxysilane (TEOS) as well as condensation polymerization of resorcinol and formaldehyde, and ammonia used as catalyst. Next, the material was carbonized by N_2 , and SiO_2 was etched in the NaOH solution. Pd was loaded on the nanoparticles finally. The morphology, composition, crystal structure and magnetic properties of catalyst were characterized by TEM, XRD, UV-Vis and VSM. The results of methylene blue (MB) reduction showed that the material exhibited good catalytic activity, and it was stable after repeating 4 times.

Key words magnetism, yolk-shell type, nanocomposite material, load of precious metal, catalytic reduction

近年来,蛋黄-蛋壳或铃铛型纳米材料由于具有高反应活性、低密度以及含有空腔的特点^[1],在催化^[2-3]、药物传输^[4-5]、纳米反应器^[6-7]、锂离子电池^[8-9]等领域应用广泛。这类材料的合成方法一般是先对核进行包覆,再利用溶剂或煅烧方法去除中间层^[10-12]。但是,这种方法需要多步包覆,合成过程较繁琐,因此开发一种简单、有效且通用的制备蛋黄-蛋壳型纳米材料的方法显得尤为重要。

负载 Pt, Au, Ag 和 Pd 等金属离子的贵金属纳米粒子(NMNPs)材料催化性能良好,具有潜在的应用前景^[1,5,7,11]。相较于非均相贵金属催化剂,虽然均相贵金属催化剂的催化效果好,但其难从反应物中分离,重复使用性差^[9]。所以,拓宽 NMNPs 材料

的应用首先需要解决 2 个重要问题,即催化剂的稳定性和其分离的简易性。

本研究通过简单快捷方法制备了蛋黄-蛋壳型磁性纳米粒子材料,该材料兼顾了催化剂的稳定性和分离要求, Pd 以离子形式进入蛋黄-蛋壳结构空腔并被还原成单质,有效防止了 Pd 流失。由于合成催化剂的蛋黄部分是 Fe_3O_4 , 具有高的磁饱和强度和磁分离效率^[13], 因此其分离回收和重复使用相对简便。用硼氢化钠(NaBH_4)作为还原剂,通过亚甲基蓝(MB)的还原反应评估合成的蛋黄-蛋壳型磁性碳纳米复合材料 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C-Pd}$ 的催化活性,结果表明该复合材料有望在实际工业生产中得到应用。

基金项目:白银市科技计划项目(2016-3-2G)

作者简介:周云斌(1977-),男,硕士,主要从事新型环保技术开发研究。

联系人:周林成(1974-),男,博士,副教授,主要从事环境功能高分子材料、环境污染控制研究。

1 实验部分

1.1 原料与仪器

三水合柠檬酸钠、无水 FeCl_3 , 国药集团化学试剂有限公司提供; 醋酸钠、甲醛、氨水, 天津光复精细化工研究所; 无水乙醇, 利安隆博华医药化学有限公司; 间苯二酚、正硅酸乙酯 (TEOS), Alfa Aesar (中国) 公司。所有试剂均为分析纯, 实验用水为去离子水。

透射电子显微镜 (TEM, Tecnai G2 F30 型), 赛默飞世尔科技; X 射线粉末衍射仪 (XRD, Rigaku D/MAX-2400 型), 日本理学公司; 振动样品磁强计 (VSM, LAKESHORE-7304 型), 美国 LakeShore 公司; 紫外-可见分光光度计 (UV-Vis, TU-1810PC 型), 北京普析通用仪器有限责任公司。

1.2 实验步骤

1.2.1 Fe_3O_4 纳米粒子的制备

通过溶剂热法制备 Fe_3O_4 纳米粒子。称取 2.6g 无水 FeCl_3 、1.0g 三水合柠檬酸钠以及 4.0g 醋酸钠于 80mL 乙二醇中, 超声分散并剧烈机械搅拌 1h 形成均相溶液。将该溶液于 200℃ 反应 10h, 冷却至室温, 分别用去离子水和无水乙醇洗涤并通过磁铁分离得到黑色产物, 将黑色产物于 40℃ 真空干燥, 得到 Fe_3O_4 纳米粒子。

1.2.2 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{RF}$ 纳米粒子的制备

通过一锅法制备 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{间苯二酚甲醛树脂复合物(RF)}$ 纳米粒子。称量 0.2g Fe_3O_4 纳米粒子、16.7mL 无水乙醇、13.3mL 去离子水以及 1.5mL 氨水, 超声分散并机械搅拌 15min 使其混合均匀, 然后缓慢滴加 1.4mL TEOS 与 10mL 无水乙醇的混合溶液, 超声搅拌 10min 后加入 0.2g 间苯二酚; 继续搅拌 10min 后加入 0.28mL 甲醛溶液; 在 30℃ 条件下持续搅拌 24h。将混合物置于马弗炉, 于 100℃ 反应 24h。反应完成后冷却至室温, 分别用去离子水和无水乙醇洗涤并通过磁铁分离, 于 100℃ 干燥至恒重, 得到核壳结构的 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{RF}$ 纳米粒子。

1.2.3 蛋黄-蛋壳型磁性碳纳米粒子 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}$ 的制备

将制备的 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{RF}$ 纳米粒子在 N_2 中于 500℃ 反应 2h, 冷却即得到 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{C}$ 磁性纳米粒子。在 0.2g $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{C}$ 磁性纳米粒子中加入 10mL 质量分数 10% 的 NaOH, 于 51℃ 搅拌 3h, 刻蚀 SiO_2 层, 所得材料用去离子水洗

涤至上层清液 pH 接近中性, 于 40℃ 真空干燥得到 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}$ 纳米粒子。

1.2.4 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C-Pd}$ 的制备

称取 50mg $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}$ 纳米粒子, 添加到 10mL 氯钯酸 (H_2PdCl_4) (25 μmol) 乙醇溶液中, 超声分散并在搅拌 6h 后加入 10mL NaBH_4 溶液 (0.1mol/L), 持续搅拌 30min。混合物用去离子水充分洗涤后通过外磁场分离, 于 40℃ 真空干燥, 得到 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C-Pd}$ 磁性碳纳米复合材料。

1.3 催化性能实验

1.3.1 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C-Pd}$ 的催化性能

在质量浓度为 50mg/L 亚甲基蓝 (MB) 溶液中加入 NaBH_4 溶液 (0.5mg/mL) 和 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C-Pd}$ (0.5mg/mL), 充分混合后观察到 MB 溶液迅速褪色。降解反应过程中, 可以通过紫外-可见分光光度计测定 MB 溶液的吸光度 (最大吸收波长 668nm)。

1.3.2 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C-Pd}$ 动力学曲线绘制

在 MB 溶液中加入 NaBH_4 溶液和 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C-Pd}$, 分别测试溶液反应 20s、35s、1min 后的吸光度, 绘制动力学曲线。

1.3.3 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C-Pd}$ 重复性测定

称取适量 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C-Pd}$, 添加 MB 溶液和 NaBH_4 溶液静置反应, 用去离子水和无水乙醇洗涤, 通过外加磁场分离后于 60℃ 真空干燥。用干燥之后的 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C-Pd}$ 磁性纳米材料重复上述实验过程, 通过紫外-可见分光光度计检测混合液的吸光度来确定 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C-Pd}$ 的重复使用性能。

1.3.4 对比实验

保持 MB 和 NaBH_4 溶液的用量不变, 分别加入 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C-Pd}$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}$ 和不加催化剂进行对比实验, 并通过紫外-可见分光光度计分别检测 3 组实验在不同时刻的吸光度并计算反应速率常数。

1.3.5 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C-Pd}$ 与 NaBH_4 最佳比例的测定

将 NaBH_4 溶液与 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C-Pd}$ 分别按体积比 3:1、2:1、1:1、1:2、1:3 加入一定量 MB 溶液中, 通过紫外-可见分光光度计测试不同时刻的吸光度, 求得反应速率常数。

2 结果与讨论

2.1 TEM 分析

图 1 为所制纳米材料的 TEM 图。从图 1(a) 可以看出, 制备的 Fe_3O_4 纳米粒子呈单分散球形, 粒径约为 360nm。由图 1(b) 可看出, 通过包覆 SiO_2 以及 RF 壳层所得的核壳结构纳米粒子 $\text{Fe}_3\text{O}_4@$

$\text{SiO}_2@\text{RF}$ 具有良好的单分散性, 粒径增加到约 460nm, 并且可以清晰看到所得材料为一核双壳结构, SiO_2 和 RF 壳层厚度分别为 78nm 和 23nm。将 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{RF}$ 碳化, 刻蚀中间部分 SiO_2 后所得蛋黄-蛋壳型纳米粒子 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}$ 见图 1(c)。从图 1(c) 可明显看到外层碳壳与 Fe_3O_4 内核之间存在空腔, 内核可在空腔中自由移动, 同时外界小分子物质也可以顺利地通过壳层的孔道扩散到空腔内部。

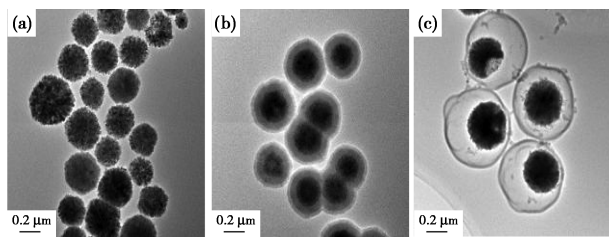


图 1 Fe_3O_4 (a)、 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{RF}$ (b) 与 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}$ (c) 的 TEM 图

2.2 XRD 分析

图 2 为所制纳米材料的 XRD 谱图。从图可以看出, 3 种纳米材料在衍射角 2θ 为 30.0° 、 35.5° 、 43.2° 、 53.8° 、 57.2° 和 62.6° 处均出现了衍射峰, 分别对应 (220)、(311)、(400)、(422)、(511) 和 (440) 晶面, 这些衍射特征峰的位置与 Fe_3O_4 粉末衍射 JCPDS 卡 (65-3107) 的标准数据一致, 表明复合物中的 Fe_3O_4 具有高度有序的单相尖晶石结构, 同时也说明 Fe_3O_4 纳米粒子被成功包覆^[14]。与 Fe_3O_4 的 XRD 谱图不同, $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{RF}$ 在衍射角 $2\theta = 20 \sim 30^\circ$ 范围内出现了宽峰, 对应于非晶态 SiO_2 , 说明 SiO_2 壳层已成功包覆于 Fe_3O_4 纳米粒子表面^[12]。对 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{RF}$ 进行碳化, 刻蚀去除 SiO_2 并负载 Pd 后, $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}-\text{Pd}$ 位于 $2\theta = 20 \sim 30^\circ$ 之间的衍射峰消失, 说明 SiO_2 已被刻蚀, 在刻蚀过程中 Fe_3O_4 的组成并未发生变化。同时检测到 Pd 纳米粒子立方晶型 (111) 晶面处的衍射峰^[11], 表明 Pd 纳米颗粒被成功负载于 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}$ 上。

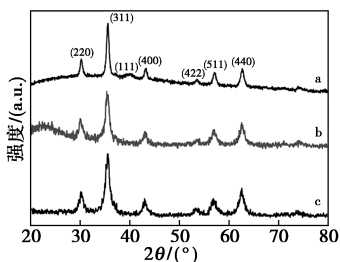


图 2 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}-\text{Pd}$ (a)、 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{RF}$ (b) 与 Fe_3O_4 (c) 的 XRD 谱图

2.3 VSM 测试

图 3 是对 Fe_3O_4 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}-\text{Pd}$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{RF}$ 进行 VSM 测定后得到的磁滞回线。由表 1 可以看出, 由于 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}-\text{Pd}$ 比 Fe_3O_4 多了一层 C, 故比饱和磁化强度比 Fe_3O_4 略低, 但仍然满足磁分离的要求, 可通过外加磁场分离。 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}-\text{Pd}$ 的剩余磁化强度与 Fe_3O_4 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{RF}$ 差别不大, 但矫顽力要大很多。

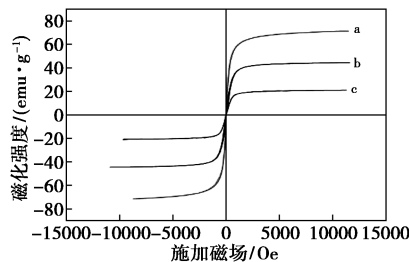


图 3 Fe_3O_4 (a)、 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}-\text{Pd}$ (b)、 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{RF}$ (c) 的磁滞回线

表 1 纳米材料的磁性参数

样品	磁性参数		
	$M_S / (\text{emu} \cdot \text{g}^{-1})$	H_C / Oe	$M_R / (\text{emu} \cdot \text{g}^{-1})$
Fe_3O_4	71.40	4.10	1.09
$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}-\text{Pd}$	44.50	42.00	3.20
$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{RF}$	21.00	11.31	0.56

注: M_S 为比饱和磁化强度; H_C 为矫顽力; M_R 为剩余磁化强度。

2.4 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}-\text{Pd}$ 催化还原性能测试

贵金属 Pd 被证实是一种高活性的催化剂^[15]。以 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}-\text{Pd}$ 磁性纳米复合材料为催化剂, NaBH_4 为还原剂, 通过催化还原 MB 考察 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}-\text{Pd}$ 的催化性能。该催化还原反应的优点在于催化过程中没有任何副产物产生。反应过程中 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}-\text{Pd}$ 可将 BH_4^- 吸附至催化剂表面, 产生活泼氢, 最终将 MB 还原。

以 NaBH_4 为还原剂、 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}-\text{Pd}$ 为催化剂, MB 溶液在不同反应时间的 UV-Vis 谱图见图 4 (a)。从图可以看出, 催化还原反应 1min 时, 吸光度趋近于 0, 这说明 MB 在 1min 内几乎完全反应。实验过程中发现 MB 溶液由反应初始的蓝色逐渐变为无色。

以 NaBH_4 为还原剂, 分别添加 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}$ 和 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}-\text{Pd}$, 通过动力学方程对催化过程进行进一步研究。设 NaBH_4 还原 MB 反应的准一级反应动力学方程为 $\ln(C/C_0) = -kt$, 其中, C 为 MB 溶

液在 t 时刻的瞬时质量浓度, mg/L ; C_0 为 MB 溶液的初始质量浓度, mg/L ; k 为反应速率常数, s^{-1} ; t 为反应时间, s 。从图 4(b)可知, $\ln(C/C_0)$ 与反应时间 t 成良好的线性关系, 与一级反应动力学方程基本相符。通过计算斜率可知, $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C-Pd}$ 的反应速率常数为 1.10872s^{-1} , 远大于直接使用 NaBH_4 还原和利用 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}$ 催化还原的反应速率常数 [见图 4(b)]^[15]。

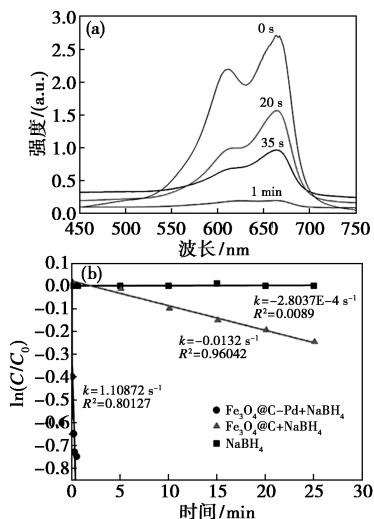


图 4 MB 溶液在不同反应时间的 UV-Vis 谱图(a)以及 $\ln(C/C_0)-t$ 的关系曲线图(b)

将 NaBH_4 溶液与 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C-Pd}$ 分别按体积比 3:1、2:1、1:1、1:2、1:3 加入 MB 溶液, 测定吸光度的变化。由图 5(a)可知, 当 $V(\text{NaBH}_4):V(\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C-Pd})=2:1$ 时, 催化效率最高。图 5(b)是对图 5(a)线性拟合的结果, 从图可以看出 $V(\text{NaBH}_4):V(\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C-Pd})=2:1$ 时, 反应速率常数为

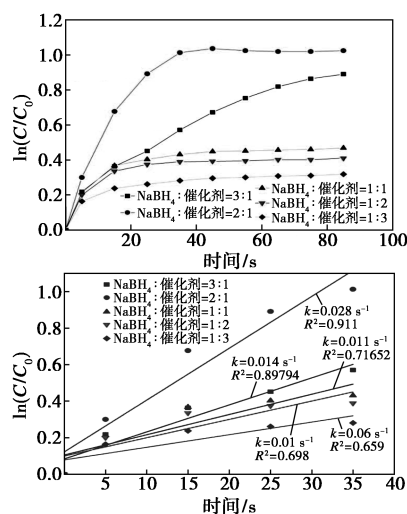


图 5 $\ln(C/C_0)-t$ 的关系曲线图(a)以及 $\ln(C/C_0)-t$ 的关系曲线拟合图(b)

0.028s^{-1} , 高于其他投料比时的反应速率常数。

2.5 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C-Pd}$ 重复性能测试

催化剂的重复利用性是评价其实际应用价值的一个重要指标。对 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C-Pd}$ 进行重复使用实验, 结果如图 6 所示。从图可知, $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C-Pd}$ 重复使用 4 次, 其催化活性基本保持不变。

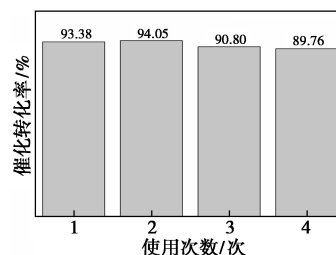


图 6 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C-Pd}$ 重复使用次数和催化转化率

3 结论

通过一种简单、快捷、绿色的方法合成了负载贵金属 Pd 纳米粒子的蛋黄-蛋壳型磁性碳纳米复合材料 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C-Pd}$ 。 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C-Pd}$ 在 MB 还原反应中表现出良好的催化活性和强磁响应性能(易通过外磁场进行分离, 降低了回收成本), 且重复使用性能良好。该复合材料有望在工业生产中得到应用。

参考文献

- [1] Kalidindi S B, Jagirdar B R. Nanocatalysis and prospects of green chemistry[J]. *ChemSuschem*, 2012, 5(1): 65-75.
- [2] Yavuz M S, Cheng Y, Chen J, et al. Gold nanocages covered by smart polymers for controlled release with near-infrared light [J]. *Nature Materials*, 2009, 8(12): 935-939.
- [3] Tian N, Zhou Z Y, Sun S G, et al. Synthesis of tetrahedral platinum nanocrystals with high-index facets and high electro-oxidation activity[J]. *Science*, 2007, 38(31): 732-735.
- [4] Lee H, Habas S E, Kweskin S, et al. Morphological control of catalytically active platinum nanocrystals [J]. *Angewandte Chemie*, 2006, 45(46): 7824.
- [5] Lim B, Jiang M, Camargo P H C, et al. Cheminform abstract: Pd-Pt bimetallic nanodendrites with high activity for oxygen reduction[J]. *Science*, 2009, 40(33): 1302-1305.
- [6] Burda C, Chen X, Narayanan R, et al. Chemistry and properties of nanocrystals of different shapes[J]. *Chemical Reviews*, 2005, 105(4): 1025-1102.
- [7] Xia Y, Xiong Y, Lim B, et al. Shape-controlled synthesis of metal nanocrystals: simple chemistry meets complex physics? [J]. *Angewandte Chemie (International ed. in English)*, 2009, 48(1): 60-103.
- [8] Beller M, Fischer H, Kühlein K. Tandem diazotization Heck reactions: a general synthesis of substituted styrenes from an-

- ilines[J]. Tetrahedron Letters, 1994, 35(47): 8773-8776.
- [9] Skrabalak S E, Chen J, Sun Y, et al. Gold nanocages: synthesis, properties, and applications[J]. Accounts of Chemical Research, 2008, 40(14): 1587.
- [10] Zhou L, Shao Y, Liu J, et al. Preparation and characterization of magnetic porous carbon microspheres for removal of methylene blue by a heterogeneous Fenton reaction[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2014, 6(10): 7275-7285.
- [11] Gu X, Lu Z H, Jiang H L, et al. Synergistic catalysis of metal-organic framework-immobilized Au-Pd nanoparticles in dehydrogenation of formic acid for chemical hydrogen storage[J]. Journal of the American Chemical Society, 2011, 133(31): 11822-11825.
- [12] Wang C, Tao S, Wei W, et al. Multifunctional mesoporous material for detection, adsorption and removal of Hg^{2+} in aqueous solution[J]. Journal of Materials Chemistry, 2010, 20(22): 4635-4641.
- [13] 徐光辉, 王钰蓉, 王文昌, 等. 磁性核壳 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2-\text{Ag}$ 纳米粒子的制备及性能研究[J]. 化工新型材料, 2016, 44(2): 49-51.
- [14] Ji L, Zhou L, Xue B, et al. Facile synthesis of multiwall carbon nanotubes/iron oxides for removal of tetrabromobisphenol A and Pb(II)[J]. Journal of Materials Chemistry, 2012, 22(31): 15853-15862.
- [15] Zhang L, Lu T, Bao J, et al. Preparation method of an ultrafine carbon supported Pd catalyst as an anodic catalyst in a direct formic acid fuel cell[J]. Electrochemistry Communications, 2006, 8(10): 1625-1627.

收稿日期: 2017-08-02

修稿日期: 2018-10-27

(上接第 222 页)

改性沥青的软化点逐渐上升, 软化点和延度均出现不同程度地下降; 当改性剂掺量超过 15% 时, 改性沥青的延度值已经不能满足技术要求。

(3) 随着改性剂掺量的增加, 改性沥青的 $G^*/\sin\delta$ 逐渐增大, 而 δ 逐渐减小。表明改性剂对沥青的高温流变性能有着明显的改善性能, 这主要是因为改性剂中的 PEG 发挥了吸收热量的作用。

(4) 与基质沥青相比, 改性沥青的耐老化性能更优。这是因为在老化升温过程中, 改性剂中的 PEG 吸收了部分热量, 延缓了沥青的受热老化。

参考文献

- [1] 吉增晖. 沥青路面预防性养护技术综述与探讨[J]. 公路, 2015(12): 56-63.
- [2] 汤晴, 吴大鸿. 沥青路面使用性能及其预测研究[J]. 公路工程, 2015, 40(5): 217-219.
- [3] 白雪, 贾秦龙. 高速公路沥青路面病害分析及处治维修[J]. 筑路机械与施工机械化, 2016, 33(9): 76-79.
- [4] 谭积青. 沥青路面车辙病害处治方法研究[J]. 中外公路, 2005, 25(4): 50-52.
- [5] 郝勇敢, 邵先坤, 唐海娣, 等. 石蜡/ TiO_2 /活性炭复合相变材料的制备及其性能[J]. 材料工程, 2016, 44(11): 51-55.
- [6] Yang J, Qi G Q, Liu Y, et al. Hybrid graphene aerogels/phase change material composites: thermal conductivity, shape-stabilization and light-to-thermal energy storage[J]. Carbon, 2016, 100: 693-702.
- [7] 马素德, 宋国林, 樊鹏飞, 等. 相变储能材料的应用及研究进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2010, 26(8): 161-164.
- [8] 杨洲, 陈水生, 霍翠, 等. 聚乙二醇/废旧饮料瓶改性沥青的研究[J]. 化工新型材料, 2014(4): 195-197.
- [9] 甘新立, 张楠, 刘羽. 聚乙二醇改性沥青性能研究[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2014, 35(5): 84-86.

收稿日期: 2017-10-13

化学所在组装的二肽单晶诱导生物膜形成与拓展方面研究取得新进展

磷脂和肽是构筑细胞的基本结构单元。细胞的关键生物活动几乎都与这些生物分子的组装体有关。通过分子组装技术动态调控上述组装体的结构, 可以更好地帮助理解细胞生命活动的本质规律。

在国家科技部、国家自然科学基金委、中国科学院和化学所的支持下, 胶体、界面与化学热力学重点实验室的研究人员长期致力于磷脂与苯丙氨酸二肽的可控分子组装与功能化的研究。近年来, 他们在苯丙氨酸二肽有机凝胶中引入光酸分子, 利用可见光照射, 实现了二肽

组装体凝胶-溶胶的原位可逆相变。此外, 他们还发现苯丙氨酸二肽组装体能有效诱导生物体中脂质体的组装与解组装, 并在生理条件下导致细胞膜的外溢并形成内质网膜。

进一步的研究发现组装的二肽单晶能诱导生物膜的产生与扩展。实验证实二肽分子聚集体的解组装是磷脂分子膜形成和拓展的必要条件。这种生物分子诱导的膜“此消彼长”的动态转化为研究细胞生命活动中的分裂和增殖研究提供了新的途径。

(新型)