

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2015.11.005

单分散 PS 微球的制备及其在多孔炭材料中的应用^{*}蔡江涛¹, 陈晨¹, 张亚婷¹, 刘国阳¹, 邱介山², 周安宁¹

(1. 西安科技大学化学与化工学院, 西安 710054;

2. 大连理工大学炭材料研究室, 大连理工大学精细化工国家重点实验室, 辽宁大连 116024)

摘要: 在超声波辅助下通过微乳液法聚合出纳米聚苯乙烯 (PS) 微球, 利用重力沉降法组装出 PS 胶晶阵列, 并以该胶晶为大孔模板剂, 制备出大孔-介孔分级炭材料。通过激光粒度仪、场发射扫描电镜、透射电镜、红外光谱及 N₂ 物理吸附与解吸附技术对产品的粒度、形貌、微观结构及性能进行表征与研究。结果表明, 采用超声波辅助微乳液聚合, 有利于单分散 PS 微球的可控制备。且增大过硫酸钾、聚乙烯吡咯烷酮的用量, PS 微球粒径均会变小, 而苯乙烯/十二烷基磺酸钠则要有适合的比例才能保证 PS 粒径小且均一单分散。以 300 nm 的 PS 胶晶为大孔模板剂, 三嵌段共聚物 P123 和 F127 (质量比为 1:3) 做介孔模板剂, 酚醛树脂预聚体和模板剂的质量比为 3:2, 制得大孔与介孔梯级分布的炭材料, 其比表面积为 510.5 m²/g, 比容为 0.2527 cm³/g。

关键词: 聚苯乙烯微球; 微乳液聚合; 超声波辅助; 模板剂; 多孔炭材料

中图分类号: TQ325.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2015)11-0022-05

Preparation of Monodisperse Polystyrene Microspheres and Its Application in Porous Carbon

Cai Jiangtao¹, Chen Chen¹, Zhang Yating¹, Liu Guoyang¹, Qiu Jieshan², Zhou Anning¹

(1. College of Chemistry & Chemical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Carbon Research Laboratory, Liaoning Key Lab for Energy Materials and Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Nano-polystyrene (PS) microspheres were polymerized through ultrasound-assisted micro-emulsion polymerization. Then polystyrene colloidal crystal arrays were made by gravity settling method. Finally, the hierarchical macro-mesoporous carbon (HMMC) materials were prepared with the PS array as macroporous template agent. The particle sizes, morphology, microstructure and properties of the products were characterized and researched by means of laser particle size analyzer, field emission scanning electron microscopy, transmission electron microscope, infrared, N₂ adsorption and desorption. The results show that ultrasonic assisted micro-emulsion polymerization is helped to controllable preparation of monodisperse PS microspheres. As the dosage of potassium persulfate and polyvinylpyrrolidone increase, PS particles size become smaller. Styrene / sodium dodecyl sulfonate should have a suitable ratio to ensure small particles size and good monodisperse. The HMMC are synthesized with resole resin as the carbon precursor by a dual-template method. In which, 300 nm PS colloidal crystal array are macroporous template agent, three block copolymer P123 / F127 (=1 / 3) are mesoporous template agent, and the mass ratio of phenolic resin pre-polymer and template agent is 3 : 2. The as-made HMMC products have surface area of 510.5 m² / g, the pore volume of 0.2527 cm³ / g.

Keywords: polystyrene microspheres; micro-emulsion polymerization; ultrasonic assisted; template agent; porous carbon materials

单分散聚苯乙烯 (PS) 微球因其粒径小且均一性好、比表面积大且吸附性强、表面反应能力强、易于合成而成本低廉等优势, 在材料的有序制备^[1-2]、免疫医学、生物化学、固定化酶、色谱柱填料、高效离子交换树脂及其它高新技术领域有着广阔的应用前景^[3-6]。如何绿色化、短周期、可控制备出单分散 PS 微球, 并研究其机理与应用, 对于推动纳米科学技术的发展有着深远的理论意义和应用前景。

微乳液是指两种相对不互溶的液体, 在表面活

性剂作用下形成的热力学稳定、各向同性、透明或半透明、粒径大小在 10~100 nm 的分散体系^[7]。微乳液聚合通常用来制备粒径小于 1 μm 的单分散聚合物微球。以往微乳液聚合中存在乳化剂用量较大、

*NSFC-新疆联合基金重点基金项目 (U1203292), 陕西省自然科学基础研究计划项目 (2014 JM2043), 陕西省教育厅专项科研计划项目 (15JK1451)

联系人: 周安宁, 教授, 主要从事复合材料及煤化工研究

收稿日期: 2015-08-25

单体浓度低、所用助剂较多、聚合时间长^[8]等问题。通过超声波辅助聚合,其“空化作用”可瞬间使局部处于高温高压环境,从而加快引发剂分解和液相内化合物价键断裂,短时间内能产生更多的自由基引发聚合,形成更多的初级粒子,有利于短时间内单体转化率的提高与聚合物的生成^[9-13]。另外超声波在聚合过程中也具有乳化、防止聚合物颗粒团聚等多重作用^[14]。

笔者将超声波用于苯乙烯(St)的微乳液聚合过程中,以期缩短聚合时间,并解决小粒径微球易团聚和分散单一性低等问题。同时,超声辅助作用还可使 St 在较高的单体浓度及较低的乳化剂用量下平稳聚合,改善传统微乳液聚合中存在的单体浓度低、乳化剂用量大等问题。以所得 PS 胶晶阵列为大孔模板,制备出大孔-介孔分级炭材料。而多孔炭材料因其来源广泛、孔结构可控、比表面大、优良的热稳定性和化学稳定性、导电性能优良等,在气体分离^[15]、催化^[16]、储氢^[17]和电化学电极材料^[18-20]等方面有广泛应用,进而大大拓展了 PS 微球的应用领域。

1 实验部分

1.1 主要原材料

St、过硫酸钾(KPS)、苯酚:天津市福晨化学试剂厂;

十二烷基磺酸钠(SDS):郑州派尼化学试剂厂;

正丁醇:广东光华科技股份有限公司;

聚乙烯吡咯烷酮(PVP):德国 BASF 公司;

甲醛:国药集团化学试剂有限公司;

三嵌段共聚物 P123($\text{EO}_{20}\text{PO}_{70}\text{EO}_{20}$, 分子量 5 800), F127($\text{EO}_{106}\text{PO}_{70}\text{EO}_{106}$, 分子量 12 600):德国 Sigma-Aldrich 公司。

1.2 主要设备与仪器

超声波细胞粉碎机:HN-650Y 型,上海汉诺仪器有限公司;

激光粒度仪:Mastersizer 2000 型,英国马尔文仪器有限公司;

冷场发射扫描电镜(FESEM):S-4800 型,日本日立公司;

透射电子显微镜(TEM):H-7650 型,日本日立公司;

傅立叶变换红外光谱(FTIR)仪:Instron5800 型,英国马尔文仪器有限公司;

1 200 °C 开启式气氛管式炉:SK-G06123K 型,天津市中环实验电炉有限公司;

物理吸附仪:ASAP 2020 型,美国麦克仪器公司。

1.3 试样制备

(1) 微波辅助 St 微乳液法聚合。

St 与 KPS 使用前精制。SDS 经 90 mL 蒸馏水溶解后,注入装有回流冷凝管、集热式磁力搅拌装置和超声波细胞粉碎装置的 250 mL 四口烧瓶中,通氮气保护,调转速为 200 r/min 磁力搅拌 10 min,并升温至 80 °C。将一定量的 KPS 溶解于 10 mL 水后一并注入四口烧瓶中,在功率 300 W 的超声波辅助下,通过恒压分液漏斗逐滴加入第一批单体(St_1)与助乳化剂正丁醇的混合物,25 min 内滴加完毕。从滴加开始起的 1 h 后再将第二批单体(St_2)全部加入,80 °C 下反应 1 h,然后升温至 85 °C 继续反应 1 h,后用冰水浴快速冷却至室温。将所得的 PS 微球乳液用蒸馏水稀释到一定浓度,参考邬泉周^[21]的重力沉降法制备 PS 胶晶模板。

(2) 大孔-介孔分级炭材料的制备。

称取介孔模板剂 P123 和 F127(质量比为 1 : 3)配制成质量分数为 20% 的乙醇溶液,另取酚醛树脂的乙醇溶液(质量分数为 20%),按照介孔模板剂与酚醛树脂预聚物的质量比为 2 : 3 进行超声混匀,后涂于上述所得含有 PS 胶晶阵列的玻璃板上。置于 55 °C 真空条件下进行溶剂蒸发诱导的自组装,待溶剂挥发后置于 110 °C 的烘箱中,老化 24 h 后刮下薄膜,在 N_2 保护下程序升温炭化。炭化后随炉冷却取出,所得产品即为最终的炭材料。炭化升温程序如下:

$20^\circ\text{C} \xrightarrow{430\text{ min}} 450^\circ\text{C} \xrightarrow{180\text{ min}} 450^\circ\text{C} \xrightarrow{450\text{ min}} 900^\circ\text{C} \xrightarrow{120\text{ min}} 900^\circ\text{C}$

1.4 性能测试

采用激光粒度仪测试 PS 微球的粒径及其分布,每个试样平行测三次,取中值粒径的平均值作为 PS 微球的粒径 D_n ;

采用 FESEM 观察 PS 微球(喷金处理,0.7 kV 加速电压)及炭材料(无需喷金,5 kV 加速电压)的表面形貌;

采用 TEM 观察炭材料的介孔分布,试样分散在乙醇中超声 10 min,滴于铜网上在电镜下(加速电压 75 kV)观察;

采用 FTIR 仪对 PS 试样(干燥后与溴化钾按 1 : 100 称重后研磨压片)进行红外分析;

采用物理吸附仪对炭材料在 77 K 下进行物理吸附脱附测试,测试前试样在真空条件下 250 °C 脱

气 5 h,比表面积根据 Brunauer-Emmett-Teller(BET)法计算,介孔孔径分布曲线由 Barrett-Joyner-Halenda(BJH)模型得到。

2 结果与讨论

2.1 PS 微球的红外分析

引发剂 KPS 用量一定,对比不加入稳定剂 PVP、加入 1.5 g PVP、加入 0.5 g 乳化剂 SDS 所得 PS 试样的 FTIR 谱图见图 1。

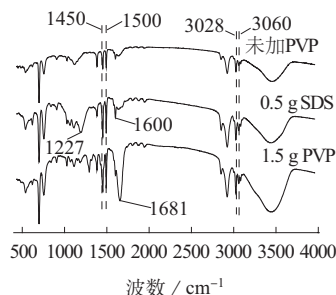


图1 PS 的 FTIR 图谱

由图 1 可知,在 3028 cm^{-1} , $3060\sim 3125\text{ cm}^{-1}$ 附近谱带为苯环的 C—H 振动吸收峰, $1600, 1500, 1450\text{ cm}^{-1}$ 为苯环的 C=C 的伸缩振动峰,这些是苯环骨架的振动特征峰。其中加入 PVP 在波长为 1681 cm^{-1} 处有 PVP 的 C=O 吸收峰,在波长 1227 cm^{-1} 处有 SDS 的 O=S=O 的振动峰。说明稳定剂 PVP 与乳化剂 SDS 在 St 的聚合过程中均起到相应作用。

2.2 引发剂 KPS 对 PS 纳米微球粒径的影响

保持 St_1 为 0.15 g、 St_2 为 4.85 g、乳化剂 SDS 为 0.15 g 及正丁醇为 0.1 g 用量不变,研究引发剂 KPS 用量对 PS 微球粒径和粒度分布的影响。粒径测试结果见图 2、图 3。

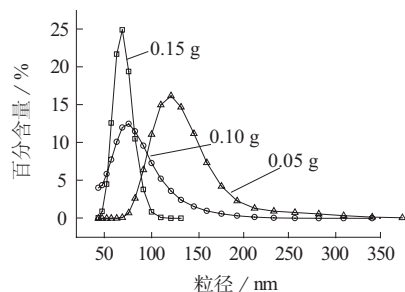
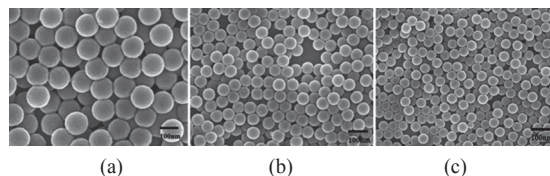


图2 KPS 用量对 PS 的粒径分布的影响

由图 2 和图 3 可以看出,随着 KPS 用量的增加,PS 微球的直径逐渐减小。这是由于随着 KPS 浓度的增大,自由基浓度增加,使单体在多个聚合中心聚合,形成多个小粒径聚合产物,从而达到粒径减小的效果。但不同粒径的微球均呈现出较好的单分散性。



a—0.05 g ; b—0.10 g ; c—0.15 g

图3 KPS 不同量时 PS 微球的 FESEM 图

2.3 乳化剂 SDS 用量对 PS 粒径的影响

保持 $St_1/SDS=1:1$ 、正丁醇 0.1 g、KPS 0.15 g 用量不变,研究加料方式及 SDS 不同用量 (见表 1) 对 PS 粒径分布的影响见图 4。

表 1 各试样的 St_1 及乳化剂 SDS 用量

试样编号	St_1	St_2	SDS
1 [#]	0.15	4.85	0.15
2 [#]	0.25	4.75	0.25
3 [#]	0.5	4.5	0.5
4 [#]	0.75	4.25	0.75
5 [#]	1	4	1
6 [#]	1.5	3.5	1.5

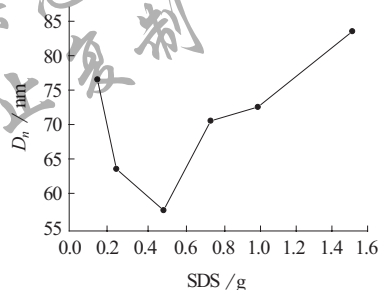


图4 SDS 用量对 PS 粒径的影响

由图 4 可见,随着 St_1 与 SDS 含量的提高,PS 粒径出现了先减小后增大的趋势。在所采用的微乳液聚合体系中,由于单体是分两段逐滴加入,而乳化剂 SDS 则先于单体全部加入体系,故其含量会出现阶段性相对较高的情况。同时,由于单体采用了逐滴加入的方法,使聚合体系一直处于单体的“饥饿”状态,单体一进入水相即被迅速超声分散,并立即被乳化剂分子形成的胶束捕捉,这些数量众多且表面积很大的增溶胶束易于捕捉到自由基,遵循微乳液聚合中特有的“胶束成核”机理生长;同时,因为乳化剂 SDS 的存在,且有超声波强化分散,还有部分单体可能溶解于 $80\sim 85^\circ\text{C}$ 热水中,它们可能优先捕捉到同处于水相中的自由基后聚合形成齐聚物,即存在“均相成核”机理生长,且占主导地位。因此, St_1 的成核数量与该阶段加入的单体量密切相关。这从图 4 中可看出随着第一批加入单体量 St_1 的增加,总体上的成核数量相应增多,从而使得 PS 微球的粒径相应地减小。但同时发现 St_1 并非越多越好,

当 St_1 增大到单体总量的 15%(4[#] 样品) 时,粒径又明显地回升。这可能是因为当 St_1 增加到一定程度以后,会使体系中的成核机理变得更为复杂,均相成核与胶束内成核竞相增长、多阶段成核等造成 PS 微球粒径增大的现象。

2.4 多孔炭材料的表面结构分析

图 5 为 PS 胶晶阵列及大孔-介孔分级多孔炭材料的电镜照片。图 5a 是以粒径约为 300 nm 的 PS 微球用乙醇分散所制备的 PS 胶晶阵列的 FESEM 图,可见 PS 微球有序排列。当酚醛树脂炭源完全浸渍到 PS 胶晶阵列的孔隙后,烧蚀 PS 微球即可得到大孔有序分布的炭材料。图 5b 为多孔炭材料的 FESEM 图,可看出所制备的多孔炭材料基本反相复制了 PS 微球的形状,但孔径收缩至约 200 nm 左右。这是由于高温碳化时 PS 线性分子链分解致孔,而交联的酚醛树脂虽有少量分解,但大部分骨架仍能基本保持与 PS 胶晶组装时的形状。图 5c 为多孔炭材料的 TEM 图,可观察到这些炭骨架均具有比较均匀、呈条带状平行排列的介孔孔道。

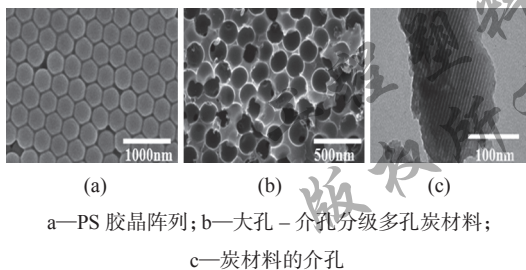


图 5 PS 胶晶阵列及大孔-介孔分级多孔炭材料的电镜照片

2.5 多孔炭材料的物理吸附

图 6 为多孔炭材料的 N_2 吸附-脱附曲线。以 300 nm 的 PS 胶晶阵列为大孔模板剂,制备出多孔炭材料,其物理吸附-解吸附测试结果如图 6 所示。

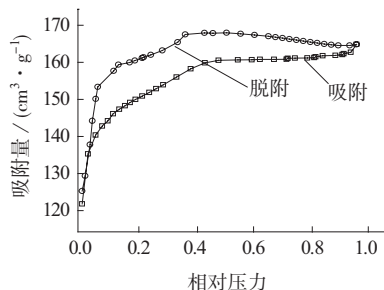


图 6 多孔炭材料的 N_2 吸附-脱附曲线

由图 6 可看出,该材料在 N_2 吸附-脱附过程中,出现了明显的滞后环,且从低至高的相对压力处均有滞后。由此可以推断出,所制备的多孔炭材料具有大孔-介孔-微孔梯级分布。从吸附分支得到的

介孔孔径分布曲线见图 7。

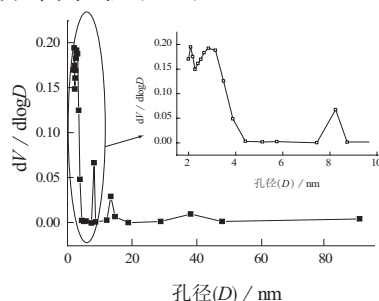


图 7 多孔炭材料的孔径分布曲线

由图 7 可以看出,该炭材料中介孔主要集中在 3,8 nm 和 13 nm 左右,介孔孔径分布相对较丰富。计算得到该多孔炭材料的 BET 比表面积为 $510.5 \text{ m}^2/\text{g}$,孔比容为 $0.2527 \text{ cm}^3/\text{g}$ 。

3 结论

通过超声波辅助微乳液法制备出了 PS 纳米微球,经重力沉降自组装成 PS 胶晶阵列,与介孔模板剂分别对于酚醛树脂预聚体进行组装,制备出大孔-介孔梯级分布的有序多孔炭材料。通过性能测试所得结论如下:

在传统的微乳液聚合体系的基础上,采用超声波辅助聚合,调控 SDS, St, KPS 等原料的用量,实现 PS 微球粒径在 50 ~ 500 nm 范围内可控调节。PS 微球的粒径随着引发剂 KPS、稳定剂 PVP 用量的增加而逐渐减小。

以 PS 胶晶为大孔模板剂, P123 和 F127(质量比为 1 : 3) 做介孔模板剂,炭源前驱体和模板剂的质量比为 3 : 2,制备出大孔-介孔梯级分布的有序分级多孔炭材料,其比表面积为 $510.5 \text{ m}^2/\text{g}$,孔比容为 $0.2527 \text{ cm}^3/\text{g}$ 。

参考文献

- [1] 周颖,王志超,王春雷,等. 大孔-介孔分级孔结构炭材料制备及性能研究[J]. 无机材料学报, 2011, 26(2): 145-148.
Zhou Ying, Wang Zhichao, Wang ChunLei, et al. Synthesis and properties of hierarchical macro-mesoporous carbon materials[J]. J of Inorganic Materials, 2011, 26(2): 145-148.
- [2] Tian Shu, Zhou Qun, Gu Zhuomin, et al. Hydrogen peroxide biosensor based on microperoxidase-11 immobilized in a silica cavity array electrode [J]. Talanta, 2013, 107: 324-331.
- [3] Riyo Enomoto, Makoto Imamori, Ayouni Seon, et al. Proposal for a new evaluation of phagocytosis using different sizes of fluorescent polystyrene microspheres[J]. Adv. Biol. Chem., 2013, 3(6): 556-563.
- [4] Fudouzi H, Xia Younan. Photonic papers and inks: Color writing with colorless materials[J]. Adv Mater, 2003, 15(11): 892-896.
- [5] Shen R, Akiyama C, Senyo T, et al. Emulsion and dispersion

- polymerization of styrene in the presence of PEO macromonomers with p-vinylphenylalkyl end groups [J]. *Comptes Rendus Chimie*, 2003, 6(11-12):1 329-1 335.
- [6] 范婷, 陈建定, 黄广建. 分散聚合法制备单分散聚苯乙烯微球 [J]. *功能高分子学报*, 2007, 19-20(2):172-176.
Fan Ting, Chen Jianding, Huang Guangjian. Preparation of monodispersed polystyrene microspheres by dispersion polymerization[J]. *J of Functional Polymers*, 2007, 19-20(2):172-176.
- [7] 陈均, 乔军, 尹万云, 等. 高固含量微乳液聚合的研究进展 [J]. *高分子通报*, 2011(5):63-66.
Chen Jun, Qiao Jun, Yin Wanyuan, et al. Progress in research of high solid content microemulsion polymerization[J]. *Polymer Bulletin*, 2011(5):63-66.
- [8] 王东波, 冯玉杰, 韩俐伟, 等. 乳液聚合制备聚苯乙烯纳米微球 [J]. *化工新型材料*, 2007, 35(8):48-49.
Wang Dongbo, Feng Yujie, Han Liwei, et al. Preparation of polystyrene nano-microspheres by emulsion polymerization[J]. *New Chemical Materials*, 2007, 35(8):48-49.
- [9] Soo Keat Ooi, Simon Biggs. Ultrasonic initiation of polystyrene latex synthesis[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2000(7):125-133.
- [10] Wang Qi, Xia Hesheng, Liao Yongqin, et al. Ultrasonically initiated emulsion polymerization of n-butyl acrylate[J]. *Polymer International*, 2001, 50(11):1 252-1 259.
- [11] Gareth J P, Emma J L, Ansell Christopher W G. The effect of high-intensity ultrasound on the ring-opening polymerization of cyclic lactones [J]. *European Polymer Journal*, 2002, 38:1 753-1 760.
- [12] 郑媛媛, 曹亚, 何玉晖. 用阳离子可聚合表面活性剂超声引发乳液聚合制备聚合物纳米粒子 [J]. *精细化工*, 2005, 22(11):819-826.
Zheng Yuanyuan, Cao Ya, He Yuhui. Application of cationic polymerizable surfactant in ultrasonically irradiated emulsion polymerization to preparation of polymer nanoparticles[J]. *Fine Chemicals*, 2005, 22(11):819-826.
- [13] Yin Nianwei, Chen Keqiang. Ultrasonically initiated emulsifier-free emulsion copolymerization of n-butyl acrylate and acrylamide Part I: Polymerization mechanism[J]. *Polymer*, 2004, 45:3 587-3 594.
- [14] 程艳玲, 邱俊英, 易昌凤, 等. 超声辐照分散聚合制备聚苯乙烯纳米微球 [J]. *应用化学*, 2008, 25(10):1 217-1 220.
Cheng Yanling, Qiu Junying, Yi Changfeng, et al. Polystyrene nanoparticles prepared by dispersion polymerization under ultrasonic irradiation[J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2008, 25(10):1 217-1 220.
- [15] Cheng Lihua, Fu Ywujang, Liao Kuosung, et al. A high permeance supported carbon molecular sieve membrane fabricated by plasma-enhanced chemical vapor deposition followed by carbonization for CO₂ capture [J]. *J Membr Sci*, 2014, 460(15):1-8.
- [16] 张金岭, 鲍旭晨, 代晓东, 等. 多孔炭材料在二氧化钛光催化水处理中的应用 [J]. *分子催化*, 2009, 23(6):574-578.
Zhang Jinling, Bao Xuchen, Dai Xiaodong, et al. Application of porous carbon materials in photocatalytic water treatment of titanium dioxide[J]. *J of Molecular Catalysis*, 2009, 23(6):574-578.
- [17] 曾利辉, 曾永康, 谭小艳. 负载型钨炭加氢催化剂的工艺研究 [J]. *山东化工*, 2014, 43(4):39-41.
Zeng Lihui, Zeng Yongkang, Tan Xiaoyan, et al. Preparation of R uthenium catalyst supported on activated carbon[J]. *Shandong Chemical Industry*, 2014, 43(4):39-41.
- [18] Fan Xiaoming, Yu Chang, Yang Juan, et al. A layered-nanospace-confinement strategy for the synthesis of two-dimensional porous carbon nanosheets for high-rate performance supercapacitors [J]. *Advanced Energy Materials*, 2015, 5(7), DOI:10.1002 / aenm.201570035.
- [19] Wang Huanlei, Gao Qiuming, Hu Juan. High hydrogen storage capacity of porous carbons prepared by using activated carbon[J]. *Journals of American Chemical Society*, 2009, 131:7 016-7 022.
- [20] Pandolfo A G, Hollenkamp A F. Carbon properties and their role in supercapacitors[J]. *J Power Sources*, 2006, 157(1):11-27.
- [21] 郭泉周, 何建峰. 聚苯乙烯胶晶的组装 [J]. *广州化学*, 2008, 33(4):26-29.
Wu Quanzhou, He Jianfeng. Assembly of polystyrene colloidal crystal[J]. *Guangzhou Chemistry*, 2008, 33(4):26-29.

可乐丽开发出柔软透明的光固化弹性体

日本可乐丽公司(kuraray)不久前宣布, 开发出了兼具固化性和柔软性的光固化弹性体。通过控制弹性体部分和光固化性部分的分子量及排列, 同时实现了固化性和柔软性。新材料可通过调整弹性体部分的长度任意控制其柔软性和强度。与普通的光固化树脂相比, 这种新材料不仅固化时间短, 而且固化后还可保持柔软性。固化时不易收缩, 尺寸稳定性出色。

在粘合剂用途方面, 可充分发挥固化性、尺寸稳定性、柔软性及透明性等特点, 可用于显示器、电子部件及光学透镜等。在涂层用途方面, 凭借其透明性、耐候性、加工性、柔软

性及固化性, 可用于车载透镜、涂料、建材、印刷制版等。作为成型材料使用时, 凭借耐冲击性、透明性、耐候性、柔软性及固化性特点, 可用于 3D 打印材料及纳米压印等。

(慧聪塑料网)

美开发天然阻燃剂, 无有毒物质释放

美国得克萨斯大学的克里斯托弗·埃里森领导的研究小组已经开发出一种用于聚氨酯泡沫的天然阻燃剂, 不会向空气中释放有毒物质。聚多巴胺的合成涂层(由天然化合物多巴胺制成)可作为聚氨酯泡沫的阻燃剂。该材料天然存在于海洋贝类, 可替代目前众多商业添加剂。研究成果于 2015 年 9 月 9 日发表在《材料化学》杂志上。(慧聪塑料网)