

文章编号: 1007-8827(2006)03-0237-06

以含模板剂的中孔 MCM-41 为模板合成 类碳纳米管材料

刘献斌^{1,2}, 刘中民¹, 常福祥^{1,2}, 曲丽红^{1,2},
桑石云^{1,2}, 张阳阳^{1,2}

(1. 中国科学院大连化学物理研究所, 辽宁 大连 116023; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 以占据 MCM-41 中孔孔道的表面活性剂—十六烷基三甲基溴化铵 (Cetyltrimethylammonium bromide, CTAB) 作为碳源, 通过模板法合成类碳纳米管材料。使用 X 射线衍射仪 (XRD), N_2 物理吸附, 透射电镜 (TEM) 和热重分析 (TGA) 对产品的结构和性能进行了表征。研究表明: 此方法能够简便地制备出一种无定形结构的类碳纳米管材料, 其中浓硫酸预处理是制备的关键步骤。

关键词: MCM-41; 模板; 类碳纳米管

中图分类号: TB 383 **文献标识码:** A

1 前言

自 1991 年日本学者 Iijima^[1] 发现碳纳米管以来, 人们对于碳纳米管的制备和应用研究便产生极大的兴趣。目前通常用于制备碳纳米管的方法是: 电弧放电技术^[2]、激光溅射技术^[3] 和催化裂解有机物的方法^[4]。虽说这些方法在制备碳纳米管方面是成功和具有划时代的意义, 但这些方法均存在一些缺点, 前两种方法的制造成本过高, 后一种方法虽然简单, 但作为催化剂的金属颗粒却较难彻底去除。因而在一定程度上阻碍了碳纳米管的大批量生产。

自从沸石被人工成功合成 60 多年以来, 人们一直对沸石的合成与结构进行着孜孜不倦的探索。由于沸石材料拥有较均一的孔道结构, 而且孔径大小一般是纳米级别的, 因而可利用这种孔道空间来合成其他规整的材料, 即“瓶中造船”的技术^[5]。1998 年, H. D. Sun 等^[6-8] 首次报道使用微孔沸石 AIPO-5 成功制备出碳纳米管。碳源为原先用于合成微孔沸石的模板剂—三丙基胺 (Tripropylamine, TPA), 在真空条件下热解这些模板剂, 便会在 AIPO-5 的孔道中生成碳纳米管。这种方法既简单又新颖。

1999 年, R. Ryoo 等^[9-11] 利用具有三维孔道结构的中孔氧化硅作模板, 成功地合成出具有三维结

构的中孔炭分子筛。他将一种全新的思路—模板铸刻 (Nanocasting) 的思路引入材料合成中, 同时他提出一种模型: 当引入的外来碳源完全填满中孔氧化硅的孔道时, 炭化后得到的产品去除模板, 这时得到的中孔炭材料将只具有一种孔道结构, 来源于模板氧化硅的壁, 他将其称之为棒状模型 (Rod-type), 使用这种方法, 许多研究者通过改变模板类型得到一系列中孔炭材料^[12-14]。当引入的外来碳源在三维孔道结构的中孔氧化硅的孔道内壁上形成涂层时, 炭化后得到的产品去除模板, 这时得到的中孔炭材料将具有二种孔道结构, 一种来源于模板氧化硅的壁, 另一种来源于原先模板未被完全填满的孔, 这种模型称之为管状模型 (Tube-type)。在此我们将 Sun 与 R. Ryoo 的思想有机的结合起来, 使用具有两维孔道结构的 MCM-41 作为模板, 来制备具有一维结构的类纳米管材料。

笔者先前的研究已证实, 使用具有三维孔道结构的 SBA-15 作为模板和占据其孔道的结构导向剂 ($EO_{20}PO_{70}EO_{20}$, P123) 作为碳源, 在未引入其他外来碳源的前提下, 能够成功地制备出具有三维孔道结构的多孔炭材料^[15]。在本研究中, 笔者的目的是选用具有二维孔道结构的 MCM-41 作为模板, 用与上述相似的方法, 直接使用合成 MCM-41 时的结构

收稿日期: 2005-10-14; 修回日期: 2006-05-15

通讯作者: 刘中民, 研究员, 博导。Tel: +86-411-84685510; E-mail: zml@dicp.ac.cn

作者简介: 刘献斌 (1973-), 男, 新疆维吾尔自治区石河子人, 博士研究生, 主要从事多孔材料的合成和应用研究。E-mail: liu_xb@dicp.ac.cn

导向剂—十六烷基三甲基溴化铵作为碳源,在较温和的条件下,合成一种类碳纳米管材料。

2 实验部分

2.1 材料制备

MCM-41的合成简述如下:将十六烷基三甲基溴化铵(AR,中国医药(集团)上海化学试剂公司,简称为CTAB)和氢氧化钠(AR,沈阳联邦试剂厂)溶于适量去离子水中,在搅拌的条件下,使十六烷基三甲基溴化铵和氢氧化钠完全溶解,然后继续搅拌,冷至室温,此后加入计量的原硅酸四乙酯(AR,北京化学试剂公司,简称为TEOS),加样完毕后继续搅拌30 min,混合物的最终摩尔组成为1 TEOS:0.12CTAB:0.2NaOH:100H₂O,然后置于120℃烘箱中晶化48 h,取出后倒除上层清液,对白色固体用去离子水洗涤,洗至中性后,于100℃烘箱中烘干备用。为方便以后的对比,取一部分烘干后的MCM-41,直接在550℃空气中焙烧4 h,燃烧除去孔中的表面活性剂,这部分样品命名为M41A(M41代表MCM-41,A代表在空气中焙烧,无特殊声明,下同)。

类碳纳米管的合成如下:取1 g烘干后的MCM-41(含有表面活性剂),用6 g浓硫酸(AR,沈阳联邦试剂厂)室温浸渍12 h,此时样品的颜色由最初的白色转变为褐色,然后将混合物置于管式炉中,在高纯氮气(纯度为99.999%)保护下,对其进行550℃焙烧4 h,以保证模板剂的完全炭化,此时样品的颜色转变为黑色。这部分样品被命名为M41N。然后M41N用质量分数10%的HF溶液室温下浸泡12 h,在浸泡的过程中不时进行搅拌以保证能完全除去二氧化硅模板,对剩余的黑色样品用去离子水洗涤,洗至中性后,置于100℃烘箱中烘干备用,这部分样品被命名为C-M41N。(N代表在高纯氮气中焙烧;C代表刻蚀模板后得到的炭材料)

2.2 表征

XRD测试在日本理学D/max-rb型X射线衍射仪上进行,测试条件:Cu靶,K α 辐射源,管电压30 kV~40 kV,管电流40 mA~50 mA。所有样品的扫描范围为1.0°~6.0°(2 θ)。比表面和孔分布的测定在Nova 4100物理吸附仪上进行,样品先行在250℃,真空预处理6 h,以脱除物理吸附的水和有机物,然后以氮气作为吸附气体,在液氮温度(77 K)下进行物理吸附测定,比表面通过BET法计算^[16],

中孔孔径和孔容的计算使用吸附等温线的脱附分支,采用Barrett-Joyner-Halenda(BJH)法测定^[16]。TEM测试在JEOL JEM2 000EX电子显微镜上测定,粉末样品超声分散于乙醇中,滴于铜网上在空气中晾干,然后观察,电镜加速电压100 kV。热重分析(TG)采用Perkin-Elmer TGA型热重分析仪在空气下测定,升温速率为10 K/min。

3 结果与讨论

图1为含有表面活性剂的MCM-41、M41A、M41N和C-M41N的小角度XRD图。结合内插的2 θ 在3.0°~5.0°的XRD衍射图,可清晰的看出含有表面活性剂的MCM-41和M41A具有相似的XRD衍射图,只不过各衍射峰的强度有些差别。M41A有明显可辨的三个衍射峰,而且有较大的衍射峰强度,这与J. S. Beck等人报道的文献衍射峰的位置完全吻合,分别可归属为(100), (110)和(200)衍射峰,为典型的P6 mm六方结构^[17-18]。M41N仅可看到一个衍射峰((100)衍射峰),但衍射峰强度要远远小于M41A的衍射峰强度,同时在稍高角度无明显衍射峰出现,原因可能归因于在MCM-41的中孔孔道内有一些对X射线起散射性的物质(如表面活性剂或碳物质)^[19-20]。这一点与T. Hyeon等人^[21]观察到现象也完全一致。从XRD图中,可基本断定含有表面活性剂的MCM-41和M41N具有与M41A相同的骨架结构,即P6 mm六

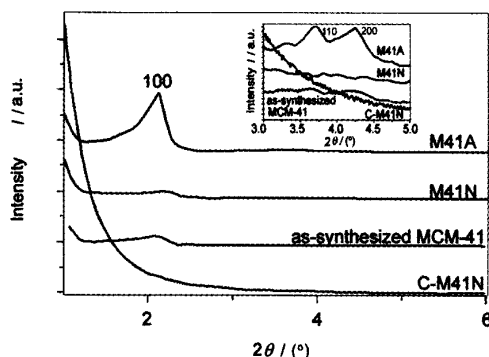


图1 样品的小角度XRD图

Fig. 1 The XRD patterns of samples. As-synthesized MCM-41 denotes that the surfactant-containing MCM-41; M41A denotes that the surfactant-containing MCM-41 is calcined in air; M41N denotes that the surfactant-containing MCM-41 after impregnation with concentrated sulfuric acid is carbonized under N₂; C-M41N denotes that carbon material is obtained by removal the silica template of M41N.

方结构。换一句话说成浓硫酸和氮气保护焙烧处理的样品,其依旧能保持与原先母体相同的有序结构。对于去除模板的纯碳样品而言,其在 $2\theta = 1^\circ \sim 6^\circ$ 之间无明显衍射峰的出现。这个结果表明所得炭材料已不具有与其母体相似的长程有序性。在其高角度 XRD 衍射图中(图 2),在 $2\theta = 22^\circ$ 附近只有一弱的和宽化的 XRD 衍射峰,这与活性炭材料的 XRD 衍射图极为相似,亦更好地证实在本研究中得到的类炭材料是无定形性质的。

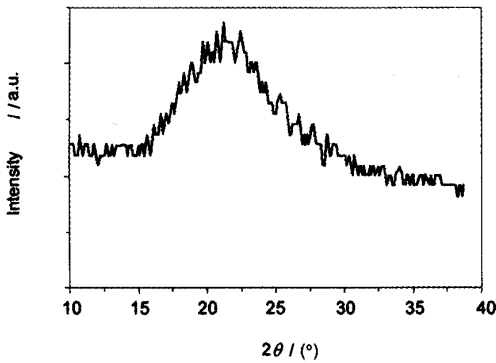


图 2 C-M41N 的高角度 XRD 衍射图
Fig. 2 Wide-angle XRD pattern for C-M41N

图 3 为 M41A 和 M41N 在 77 K 下氮气的吸附等温线图。二者的吸附等温线均属 Type IV,有明显的吸附滞后环,是典型的中孔材料的吸附等温线^[16]。M41N 对氮气的吸附量明显小于 M41A,这可能归因于表面活性剂炭化后形成的碳部分占据了 MCM-41 的中孔^[21],从而减小了孔容。同时从表 1 可看出,碳的存在已明显减小了中孔基质的比表面积和孔容积。二者的孔径分布曲线见图 4,令人感兴趣的是 M41N 的孔径明显大于 M41A,原因可能在于在合成具有六方结构的 MCM-41 的过程中,在液相中表面活性剂与硅物种的自组装是依靠二者之间强的静电相互作用力来实现的^[17,18],因而在浓硫酸预处理时,这种强的静电相互作用力会导致表面活性剂炭化后能在中孔内表面形成均匀类炭涂层,进而在随后的高温炭化过程中这种在孔内形成的类炭涂层能有效地阻止中孔内表面的硅羟基的缩合,表现为孔径的缩小程度要小于空气中焙烧的样品^[22]。另一方面,M41N 的孔径分布曲线的半峰宽要小于 M41A,这表明 M41N 具有更为均匀的孔径分布,同时,也反映样品的内孔表面极为均匀^[23],即来自表面活性剂炭化后形成的碳在孔内的填充也是均匀的^[20,24],换一句话说,碳极可能在孔道内表面

形成一层薄的镀层,而不是部分的堵塞中孔。这一推断,可用随后的 TEM 结果来证实。

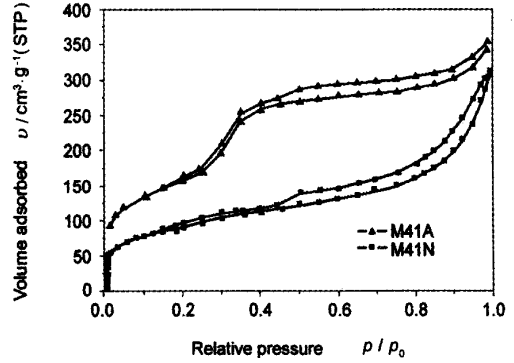


图 3 两个样品的氮气吸附等温线
Fig. 3 The nitrogen adsorption/desorption isotherms of two samples (The samples are the same as in Fig. 1)

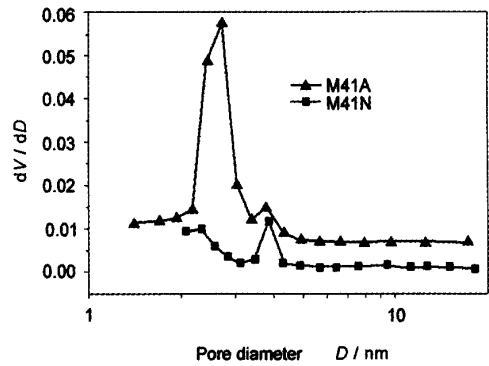


图 4 两个样品的孔径分布曲线
Fig. 4 The pore size distributions of two samples (The same samples are the same as in Fig. 1)

表 1 空气中焙烧的样品与浓硫酸处理后氮气保护焙烧的样品的性能表

Table 1 Physical proprieties of calcined sample in air and calcined sample under nitrogen flow after concentrated sulfuric acid pretreatment

| Sample | Carbon source | BET area / $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ | Total pore volume / $\text{v} / \text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ | Average pore radius R / nm |
|--------|---------------|---|--|-------------------------------------|
| M41A | | 570 | 0.55 | 2.7 |
| M41N | CTAB | 339 | 0.42 | 4.0 |

从图 5(a)中可看出,在 MCM-41 颗粒外部没有碳类物质的堆积和在孔内没有碳物质的堵塞现象出现。在图中可清晰看到明暗相间的条纹,表明炭化后的样品依旧具有与母体 MCM-41 相同的高度有序的六方结构,条纹之间的间距大约为 5.0 nm,这与氮气吸附等温线得到的数值大致相同。这些现象

证明经过浓硫酸浸渍与炭化处理均没有破坏基质 MCM-41 的中孔结构,样品依旧保持着非常有序的中孔结构,这一点与 XRD 的结果也基本吻合。这些结果亦暗示表面活性剂炭化后形成的炭只可能以涂层的形式存在。图 5(b)、5(c)为 M41N 用质量

分数 10% 的 HF 溶液脱除氧化硅模板后得到的碳物种的 TEM 图,在图中可看出,有大量管状物质存在,长度可达数微米,这一点更好地证实表面活性剂炭化后得到的碳是以镀层的形式存在于 MCM-41 的中孔中。

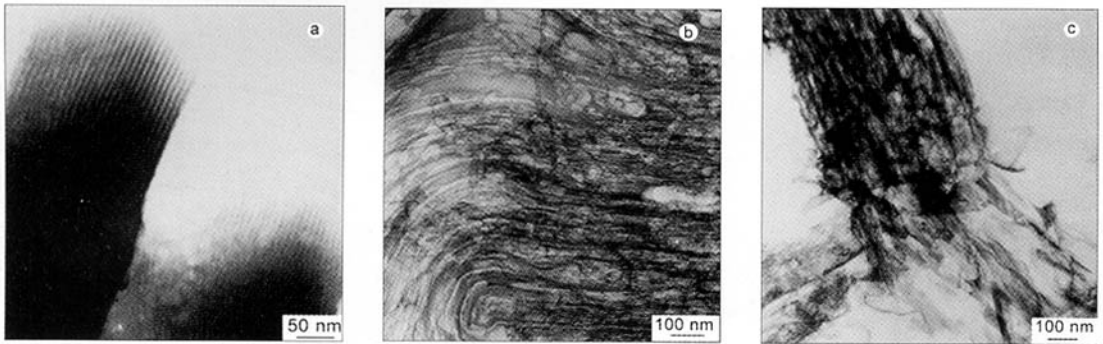


图 5 C-M41N 的 TEM 图 (a)炭化后未去除二氧化硅模板 (b)、(c)脱除二氧化硅模板
Fig. 5 TEM images of C-M41N (a) Without removal of silica template (b)、(c) Removal of silica template
(C-M41N is the same as in Fig. 1)

从图 6 可知,在含有模板剂的 MCM-41 中,主要的失重区域发生在 150 °C ~ 400 °C 之间,为表面活性剂的热脱除或热降解,失重量可认为是存在于模板中孔中的表面活性剂量,为 33.4 %,这与 C. T. Kresge 的研究结果基本一致^[17]。在 500 °C ~ 800 °C 之间,大约 2.0 % 的失重可能来源于硅羟基的脱水缩合失去的水量。对于炭化后的样品 (M41N),主要的失重区域向高温端移动,同时失重区域变狭窄,在 400 °C ~ 550 °C 之间,表现为大约 13 % 的失重。这部分失重只可能归因于表面活性剂炭化后形成的碳类物质的氧化。通过计算可知,大约有质量分数 62.5 % 的表面活性剂转变为碳(表面活性剂的含碳量为: $228/364.45 \times 100 \% = 62.5 \%$)。进一步换算,发现每平方纳米拥有 11.5 个碳原子($(0.13/12) \times 6.023 \times 10^{23}/570 \times 10^{18} = 11.5$ 碳原子/平方纳米)。理论计算暗示如此多的碳原子足以在 MCM-41 的中孔孔道中形成均匀的炭涂层^[25]。另外,笔者先前的研究表明,在没有浓硫酸预处理时,中孔中表面活性剂直接在氮气保护下原位炭化,得到的最大积炭量的质量分数约为 8 %,产品的颜色呈灰黑色。根据表面活性剂中的含碳量计算,表明仅有 38.8 % 的表面活性剂转变为碳,其余的均转变为挥发性物质而损失掉。这些碳不能在其孔道内壁形成均匀涂层,此时刻蚀除去氧化硅模板,大多得到的是片状、含微孔的无有序结构的无定形的碳物种^[26]。

使用浓硫酸预处理 12 h 后,样品颜色由白色变为褐色,表明样品中的表面活性剂部分已被炭化;然后在 550 °C 氮气保护下焙烧 4 h,样品颜色转变为黑色,得到的积炭量为直接炭化积炭量的近 2 倍。因此可以说炭化前的预处理步骤,对最终产品中的含碳量和碳的存在形态有直接的影响;反映到脱除模板后的炭产品的形态上,这时得到的炭便大多为管状的类碳纳米管材料。对于 C-M41N 而言,从其热重曲线中可看出,炭燃烧后剩余的灰烬的质量分数大约为 1.5 %,表明二氧化硅模板的去除是较为完全的,同时亦证明,在 TEM 图中看到的管状结构的物质只可能来源于碳。

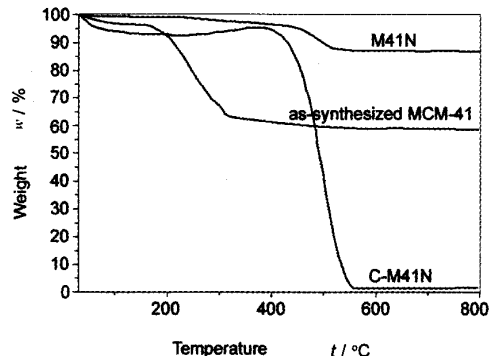


图 6 三个样品的热重曲线图
Fig. 6 TGA for three samples (The samples are the same as in Fig. 1)

4 结论

以含表面活性剂的MCM-41为模板,与占据其中孔孔道的结构导向剂为碳源,可以制备出一种类碳纳米管材料。浓硫酸预处理后再炭化表面活性剂,能使得到的碳类物质在中孔孔壁上形成涂层;能否在模板的中孔孔道中形成均匀涂层或管状的炭材料,在很大程度上取决于表面活性剂炭化后得到的炭量和炭化的方式。由于实验设备的限制,在所研究的温度下,没能得到石墨化的炭材料,仅得到无定形的炭材料。

参考文献

- [1] Iijima P. Helical microtubules of graphitic carbon[J]. *Nature*, 1991, **354**(6348): 56-58.
- [2] Ebbesen T W, Ajayam P M. Large-scale synthesis of carbon nanotubes[J]. *Nature*, 1992, **358**(6383): 220-222.
- [3] Thess A, Lee R, Nikolaev P, et al. Crystalline ropes of metallic carbon nanotubes[J]. *Science*, 1996, **273**(5274): 483-487.
- [4] Amelinckx S, Zhang X B, Bernaerts D, et al. A formation mechanism for catalytically grown helix-shaped graphite nanotubes[J]. *Science*, 1994, **265**(5172): 635-639.
- [5] 李新生,徐杰,林励吾. 催化新反应与新材料[M]. 郑州:河南科学技术出版社, 1996. 299. (LI Xin-sheng, XU Jie, LIN Li-wu. *Advanced Reactions and Materials in Catalysis* [M]. Zhengzhou: Henan Scientific and Technical Press, 1996. 299.)
- [6] Sun H D, Tang Z K, Chen J, et al. Synthesis and Raman characterization of mono-sized single-wall carbon nanotubes in one-dimensional channels of ALPO₄-5 crystals[J]. *Appl Phys A*, 1999, **69**(4): 381-384.
- [7] Sun H D, Tang Z K, Wang J N. Conductance of mono-sized carbon nanotubes in channels of zeolite crystal[J]. *J Magnetism Magnetic Mater*, 1999, **198-199**: 255-257.
- [8] Tang Z K, Sun H D, Wang J, et al. Mono-sized single-wall carbon nanotubes formed in channels of ALPO₄-5 single crystal[J]. *Appl Phys Lett*, 1998, **73**(16): 2287-2289.
- [9] Jun S, Joo S H, Ryoo R, et al. Synthesis of new, nanoporous carbon with hexagonally ordered mesostructure[J]. *J Am Chem Soc*, 2000, **122**(43): 10712-10713.
- [10] Ryoo R, Joo S H, Jun S, et al. Ordered mesoporous carbon molecular sieves by templated synthesis: the structural varieties[J]. *Stud Surf Sci Catal*, 2001, **135**: 150-157.
- [11] Ryoo R, Joo S H, Kurk M, et al. Ordered mesoporous carbons[J]. *Adv Mater*, 2001, **13**(9): 677-681.
- [12] Lu An-hui, Schmidt W, Sch th F. Simplified novel synthesis of ordered mesoporous carbon with a bimodal pore system[J]. *New Carbon Materials*, 2003, **18**(3): 181-185. (陆安慧, Schmidt W, Schüth F. 结构有序-双重孔隙中孔炭材料的合成表征[J]. *新型炭材料*, 2003, **18**(3): 181-185.)
- [13] HOU Zhao-hui, Li Xin-hai, Liu En-hui, et al. New mesoporous carbons prepared by a simultaneous synthetic template carbonization method for electric double layer capacitors[J]. *New Carbon Materials*, 2004, **19**(1): 11-15. (侯朝辉,李新海,刘恩辉,等. 同步合成模板炭化法制备双电层电容器电极用中孔炭材料的研究[J]. *新型炭材料*, 2004, **19**(1): 11-15.)
- [14] 刘贵阳,黄正宏,康飞宇. 沸石矿为模板制备多孔炭的研究[J]. *新型炭材料*, 2005, **20**(1): 13-17. (LIU Gui-yang, HUANG Zheng-hong, KANG Fei-yu. An investigation on the preparation of porous carbons with zeolite minerals as templates[J]. *New Carbon Materials*, 2005, **20**(1): 13-17.)
- [15] Liu Xian-bin, Chang Fu-xiang, Xu Lei, et al. Synthesis and characterization of a new nanoporous carbon material with a bimodal pore system[J]. *Carbon*, 2006, **44**(1): 184-187.
- [16] Sing K S W, Everett D H, Haul R A W, et al. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity[J]. *Pure Appl Chem*, 1985, **57**(4): 603-619.
- [17] Kresge C T, Leonowicz M E, Roth W J, et al. Ordered mesoporous molecular sieves synthesized by a liquid-crystal template mechanism[J]. *Nature*, 1992, **359**(6397): 710-712.
- [18] Beck J S, Vartuli J C, Roth W J, et al. A new family of mesoporous molecular sieves prepared with liquid crystal templates[J]. *J Am Chem Soc*, 1992, **114**(27): 10834-10843.
- [19] Marler B, Oberhagemann U, Vortmann S, et al. Influence of the sorbate type on the XRD peak intensities of loaded MCM-41[J]. *Microporous Mater*, 1996, **6**(5-6): 375-383.
- [20] Fröba M, Köhn R, Bouffaud G, et al. Fe₂O₃ nanoparticles within mesoporous MCM-48 silica: in situ formation and characterization[J]. *Chem Mater*, 1999, **11**(10): 2858-2865.
- [21] Lee J, Yoon S, Oh S M, et al. Development of a new mesoporous carbon using an HMS aluminosilicate template[J]. *Adv Mater*, 2000, **12**(5): 359-362.
- [22] Liu Xianbin, Chang Fuxiang, Xu Lei, et al. Preparation of ordered carbon/silica hybrid mesoporous materials with specific pore size expansion[J]. *Microporous Mesoporous Mater*, 2005, **79**(1-3): 269-273.
- [23] Voegtlin A C, Matijasic A, Patarin J, et al. Room-temperature synthesis of silicate mesoporous MCM-41-type materials: influence of the synthesis pH on the porosity of the materials obtained[J]. *Microporous Mater*, 1997, **10**(1-3): 137-147.
- [24] Huwe H, Fröba M. Iron (III) oxide nanoparticles within the pore system of mesoporous carbon CMK-1: intra-pore synthesis and characterization[J]. *Microporous Mesoporous Mater*, 2003, **60**(1-3): 151-158.
- [25] Ribeiro G M M L, Candeias A J E, Carrott P J M, et al. Stabilization of MCM-41 by pyrolytic carbon deposition[J]. *Langmuir*, 2000, **16**(24): 9103-9105.
- [26] Liu Xianbin, Liu Zhongmin, Chang Fuxiang, et al. Preparation and characterization of the ordered carbon-silicon hybrid material from in-situ graphitization of the structure direct agent[A]. Abstract of 4th International Mesostructured Materials Symposium[C]. Cape Town, South Africa. May 1-4, 2004.

Preparation of a carbon nanotube analog from surfactant-containing MCM-41 silica

LIU Xian-bin^{1,2}, LIU Zhong-min¹, CHANG Fu-xiang^{1,2}
QU Li-hong^{1,2}, SANG Shi-yun^{1,2}, ZHANG Yang-yang^{1,2}

(1. Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

Abstract: A carbon nanotube analog was prepared using the structure-directing agent cetyltrimethylammonium bromide locked in the channels of MCM-41 as a carbon source. The structures and properties of the resulting samples were characterized by powder XRD, nitrogen adsorption-desorption measurement, TEM and TGA. It was found that the carbon nanotube analog obtained by this method is amorphous. Pretreatment with concentrated sulfuric acid is a key step in its formation.

Keywords: MCM-41; Template; Analogous carbon nanotube

Corresponding author: LIU Zhong-min, Professor. Tel: +86-411-84685510; E-mail: zml@dicp.ac.cn

Author introduction: LIU Xian-bin (1973-), male, Doctor Student, engaged in the synthesis of porous carbons and their applications.

E-mail: liu_xb@dicp.ac.cn

炭专业文献中的关键词 (Keywords for carbons) —性质和现象 (Properties and phenomend)

| | | |
|----------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| Acoustical properties 声学性质 | Fracture 断裂 | Phase transitions 相变 |
| Activation energy 活化能 | Frictional properties 摩擦性质 | Phonons 声子 |
| Adsorption properties 吸附性质 | Functional groups 官能团 | Photoconductivity 光导性 |
| Aggregation 聚集作用 | Galvanomagnetic properties 电磁性质 | Porosity 空隙率 |
| Biocompatibility 生物相容性 | Gas storage 气体储存 | Radiation damage 辐射损伤 |
| Carbon yield 炭产率 | Heat of adsorption 吸附热 | Reaction kinetics 反应动力学 |
| Catalytic properties 催化性质 | Immersion enthalpy 浸渍焓 | Reactivity 反应性 |
| Chemical structure 化学结构 | Intercalation reactions 插层反应 | Specific heat 比热 |
| Crystal structure 晶体结构 | Interfacial properties 界面性质 | Superconductivity 超导 |
| Crystallite size 微晶尺寸 | Lattice constant 晶格常数 | Superlattices 超晶格 |
| Defects 缺陷 | Lattice dynamics 晶格动力学 | Surface areas 表面积 |
| Density 密度 | Luminescence 冷(发)光 | Surface oxygen complexes 表面氧化物 |
| Dielectric properties 介电性质 | Magnetic properties 磁性质 | Surface properties 表面性质 |
| Diffusion 扩散 | Mechanical properties 力学性质 | Texture 纹理结构 |
| Elastic properties 弹性性质 | Microporosity 微孔率 | Thermal conductivity 热导率 |
| Electrical properties 电学性质 | Microstructure 微结构 | Thermal diffusivity 热扩散 |
| Electrochemical properties 电化学性质 | Mossbauer effect 穆斯保尔效应 | Thermal expansion 热膨胀 |
| Electronic properties 电子性质 | Optical properties 光学性质 | Thermodynamic properties 热力学性质 |
| Electronic structure 电子结构 | Particle size 粒子尺寸 | Transport properties 传输性质 |
| Field emission 场发射 | Phase equilibria 相平衡 | Viscoelasticity 粘弹性 |

(李 峰, 王茂章 供稿)