

有序介孔碳材料的制备及应用

马秀花 袁 红* 王云杰 张 泓

(北方民族大学化学与化学工程学院,银川 750021)

摘 要 有序介孔碳材料因具有较高的比表面积、均匀的孔径分布、有序的孔道结构排列等特性,成为催化、吸附、分离和电化学等领域的研究及应用热点。这里主要介绍了有序介孔碳的两种主要制备方法硬模板法和软模板法,以及其在催化、吸附及电化学等领域中的应用。

关键词 有序介孔碳材料,模板法,碳源,应用

Preparation and application of ordered mesoporous carbon material

Ma Xiuhua Yuan Hong Wang Yunjie Zhang Hong

(School of Chemistry and Chemical Engineering, North Minzu University, Yinchuan 750021)

Abstract Ordered mesoporous carbon materials have become a research and application hotspot in the fields of catalysis, adsorption, separation, and electrochemistry due to their high specific surface area, uniform pore size distribution, and well-ordered arrangement of channels. Two main preparation methods of ordered mesoporous carbon—hard template method and soft template method, and its application in the fields of catalysis, adsorption and electrochemistry were mainly introduced.

Key words ordered mesoporous carbon material, template method, carbon source, application

20 世纪以来,碳材料的不断发展给科学研究拓展了新的领域,也不断带来新的进展。在自然界中存在最早的碳是石墨和金刚石。1985 年发现了富勒烯^[1],1991 年研究开发了碳纳米管^[2],再到后期石墨烯^[3]的出现,将整个碳材料再次推向了高峰。具有工业重要性的传统碳材料在过去 30 年中一直是日本的竞争产品。尽管如此,他们的研究和发展在学术界很少被讨论,被现代纳米碳所淹没。但是包括冶金焦炭、活性炭和炭黑在内的传统碳材料在今天仍占主导地位^[4]。新型碳材料包括介孔碳、碳纳米管和碳纤维等碳材料^[5]。

新型碳材料中使用最多的就属活性炭和碳纤维了,它们的孔径分布很广泛,大多数以微孔为主,主要应用于小分子的吸附,对于大分子的吸附性能较差。因此,这也是它们在许多大分子吸附领域应用受限的原因^[6]。介孔碳材料具有较大的孔径,比表面积及孔隙体积也较大,并且具有良好的导电性等特点,在催化、吸附及能量储存等领域具有广泛的应用前景。介孔碳材料可分为有序介孔碳(OMC)材

料和无序介孔碳材料^[7]。相对于无序介孔碳材料来说,有序介孔碳材料孔道排列规则、孔径分布单一且大小可调、导电性好、水热稳定性也好,并且比表面积及孔容很大,已成为催化、吸附、分离和电化学等^[8-11]许多领域的研究热点。

1 有序介孔碳材料的制备方法

有序介孔碳材料的合成方法主要有硬模板法和软模板法^[12]。

1.1 硬模板法

硬模板法指一种介孔材料作为另外一种介孔材料合成的模板,介孔 SiO₂ 材料一般是介孔碳材料的合成模板,将表面活性剂与碳的前驱体通过纳米浇铸法加到介孔 SiO₂ 模板材料中,前驱体和表面活性剂在模板的孔道中自组装成与孔道大小相当的棒状胶束,通过高温煅烧去除表面活性剂后得到了介孔碳。

1999 年,Ryoo 等^[13]以介孔分子筛 MCM-48 为模板,蔗糖为碳源,将蔗糖和硫酸的混合溶液反复浸

基金项目:宁夏自然科学基金(NZ17094);国家自然科学基金(21266001);宁夏科技创新领军人才计划项目(KJT2017006)

作者简介:马秀花(1993-),女,硕士研究生,主要研究方向为介孔碳材料。

联系人:袁红,教授,硕士研究生导师。

入 MCM-48(此过程中硫酸作为催化剂,在催化作用下将蔗糖转化为碳),使蔗糖和硫酸完全充满 SiO_2 分子筛的孔道,然后在真空下或在惰性气体保护下加热到 $800\sim 1100^\circ\text{C}$ 下使碳固化。最后,将得到的样品溶解于含有 NaOH 或 HF 的水溶液中去除 SiO_2 骨架,首次合成了一种称为 CMK-1 的新型有序纳米多孔(或中孔)碳分子筛。

除了具有均一的孔道之外,孔径变化对于介孔碳的应用也很重要,因为没有有效的方法来控制 SiO_2 模板的孔壁厚度。面对这个问题,Jun 等^[14]报道了使用有序的介孔 SiO_2 分子筛 SBA-15 代替 MCM-48 作为模板,蔗糖作为碳源,合成的有序纳米介孔碳材料命名为 CMK-3。和 CMK-1 不同之处在于,CMK-3 的有序结构正好是模板的反向复制品,而且在去除 SiO_2 骨架期间结构也没有变化。已经证明有序的介孔 SiO_2 可以作为模板合成具有多种结构的有序介孔碳。例如:Gokulakrishnan 等^[15]以 SiO_2 SBA-15 为模板,2,3-二羟基萘为熔融芳香碳为前驱物,采用纳米浇铸法合成了大比表面积和孔径的六方阵列棒状有序介孔碳。Chandrasekar 等^[16]在酸性条件下,采用碱熔法从电厂煤粉煤灰中提取硅酸盐物种的上清液制备介孔 SiO_2 SBA-15。将其作为模板,使用蔗糖作为碳源,合成了具有有序六角形介观结构的碳材料 CMK-3。Lin 等^[17]以介孔分子筛 MCM-41 为模板,蔗糖为碳源,合成了高表面积、大孔容的有序介孔碳材料。Che 等^[18]报道了以有序介孔分子筛 SBA-15 为模板,碳源由蔗糖变为糠醇,同样还可以得到不同于介孔碳材料 CMK-1 的介孔碳材料 CMK-5。

其次,碳源的选择也是很重要的,要考虑碳前驱体是否与所用的模板符合,碳含量是否较高。Lang 等^[19]以 SBA-15 为模板,蔗糖为碳源,采用硬模板法在酸性条件下合成了高比表面积、大孔径的有序介孔碳材料。同样,Lu 等^[20]也以 SBA-15 为模板,以糠醇来代替蔗糖作为碳源,草酸为催化剂,成功合成了具有双孔管状结构的有序介孔碳 CMK-5。由于 CMK-5 具有独特的双孔结构,具有高达 $2500\text{m}^2/\text{g}$ 的比表面积和高达 $2\text{cm}^3/\text{g}$ 的孔体积。Yang 等^[21]以乙烯作为碳前体时,在较低温度($550\sim 750^\circ\text{C}$)下获得高比表面积 $800\sim 1300\text{m}^2/\text{g}$ 的有序介孔碳材料。由此看来,所用的碳前驱体必须保证充分填满模板剂的孔道,且它们之间不会发生反应,这样才能保证在去除模板剂后碳材料结构完好无损。当然还

要考虑碳化温度以及碳化时间的影响,在最佳温度和最佳时间下固体碳的结构才会保持有序性,这需要科研工作者不断地去探索。

上述所报道的方法能够合成不同结构的有序介孔碳材料,但是硬模板法合成周期比较长,过程繁琐,还会用到价格昂贵的表面活性剂,不能有效控制碳源在孔道中的填充,很难保证得到的介孔碳材料的有序性。而且,碳材料的结构可能会由于去除掉模板剂骨架而发生改变。因此硬模板法成本高、效率低,很难满足工业大量生产。所以,采用简单的方法制备介孔碳材料成为该领域的研究热点。

1.2 软模板法

软模板法指的是将前驱体、模板剂及碳源共组装后合成的有序介孔碳材料。软模板法主要将碳前驱体和表面活性剂进行自组装,表面活性剂有不会相互作用的亲水端和疏水端。进入到水中后,疏水端会对水产生排斥,形成一个外边为亲水基,内部形成疏水端的胶束,通过控制浓度使胶束的形状为棒状,胶束的外面为亲水的碳前驱体,棒状胶束聚集在一起组成均匀结构。再通过水热作用除去胶束内部的表面活性剂,则只剩下均匀排布的碳前驱体,最后经过碳化得到有序介孔碳。

软模板法合成介孔碳材料的条件:前驱体可以自组装成纳米结构,至少有一种造孔和产碳的组分,而且形成孔的组分必须稳定,碳组分要高。软模板法制备有序介孔碳材料步骤比较简单、成本较低。主要方法有溶剂挥发诱导自组装法(EISA)和水热合成法。

1999 年,Moriguchi 等^[22]用苯酚-甲醛聚合物作为碳源,阳离子表面活性剂十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)为结构导向剂,然后进行自组装,形成的聚合物去除表面活性剂得到了无序的介孔碳材料。2004 年,Liang 等^[23]用一个简单的方法将吡啶基团和间苯二酚等逐步自组装合成高度有序中孔碳膜。Zhang 等^[24]用溶剂挥发诱导自组装法合成了掺硼的有序介孔碳(B-OMCs)。并研究了在 HCl 条件下 B-OMCs 的自组装机理。结果发现低分子量硼改性酚醛树脂(BPF)和三嵌段共聚物 F127 都可以被 HCl 质子化,这样只会增强前驱体和模板之间的作用。控制酸的浓度在一定量,介孔碳材料 B-OMC 的结构会更有序,且比表面积可达到 $690\text{m}^2/\text{g}$,硼含量可达到 96%。Yuan 等^[25]以 F127 为模板剂,苯酚和甲醛的聚合物作为碳源,通过自组装法得到了

孔径为 6.8nm, 比表面积为 $2255\text{m}^2/\text{g}$ 和孔隙体积为 $2.17\text{m}^3/\text{g}$ 的有序介孔碳材料。Tripathi 等^[26]以 F127 为模板剂, 硅酸四乙酯为硅源, 苯酚甲醛的聚合物作为碳源, 自组装后得到了高比表面积、大孔容的有序介孔碳材料。Wang 等^[27]以同样的模板剂、碳源, 在里面掺杂了 Fe 和 N 元素, 合成了高比表面积的掺杂 Fe/N 的有序介孔碳。

Fang 等^[28]报道了以酚醛树脂作为碳源, 三嵌段共聚物为模板剂, 用水热合成法合成了比表面积为 $1131\text{m}^2/\text{g}$, 孔体积为 $1.52\text{cm}^3/\text{g}$, 且具有球形形态和均匀尺寸的高度有序的体心立方 (Im3m) 中孔碳纳米粒子。通过改变反应物的浓度, 碳纳米球的粒径可以变得均匀, 可从 20nm 调整到 140nm。得到的有序介孔碳纳米球具有低细胞毒性和优异的细胞渗透性。结果表明, 这种材料可用于生物领域, 如细胞成像和细胞药物输送。García 等^[29]以 F127 为模板剂, $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 为镍源, 酚醛树脂为碳源, 通过低温 (50°C) 水热法合成了具有金属镍 (Ni) 纳米颗粒的有序介孔碳。他们发现用等摩尔间苯二酚和甲醛获得具有高度有序介观结构的 Ni/碳材料, 而用过量的甲醛不形成有序的碳结构。Feng 等^[30]报道了一种水热合成法, 以环境友好的 β -环糊精作为碳前体, 它是由具有疏水空腔的多孔状结构和羟基组成的亲水边缘组成的介孔碳材料, 其具有二维有序的六角形中间结构。

2 介孔碳材料的应用

2.1 催化领域

介孔碳材料可作为固体酸催化剂来代替传统的硫酸催化剂。Tamborini 等^[31]通过磺化纳米多孔碳 (NPC) 制备非均相酸催化剂。介孔碳材料作为催化剂载体, 在酯化反应中, 显示出高活性、高稳定性的特点^[32-37]。它也曾用作碱性催化剂来替代传统的液体催化剂^[38]。有序介孔碳材料具有较大的比表面积, 不同形貌的结构, 也有很多文献报道了其本身作为催化剂的应用。介孔碳材料在很多加氢反应中表现出了较好的选择性以及催化活性^[39-43]。

2.2 吸附领域

介孔碳材料在吸附领域也有良好的应用前景。对于大分子的吸附, 介孔碳是最合适的吸附材料。介孔碳材料具有高比表面积和高孔体积, 可吸附水溶液中的各种有机物质。此外, 它们具有尺寸均匀的孔, 并且具有高的热稳定性和化学惰性。介孔碳

材料表面活性好可以很容易地进行改性, 可以合成各种性能的吸附剂。介孔碳材料可以作为气相吸附剂, 净化空气, 回收溶剂和 CO_2 、 CH_4 等气体^[44-47]的吸附。也可以作为液相吸附剂, 在染料大分子吸附^[48-52]、生物大分子吸附^[53-55]、金属离子吸附^[56-57]、水中污染物吸附^[58]等领域具有良好的应用前景。

2.3 电化学领域

有序介孔碳材料因其具有大比表面积和孔容、孔道结构丰富且导电性良好, 在电化学方面有良好的应用前景, 例如: 制作高能电池^[59-60]、电极材料和传感器^[61-62]等。严欣^[63]以三嵌段共聚物 F127 为模板剂, 正丁醇为助模板剂, 制得了具有三维立方结构 (Im3m) 的球形有序介孔炭材料。所得球形有序介孔碳孔径为 3.55nm, 比表面积为 $1273\text{m}^2/\text{g}$, 孔体积为 $1.13\text{cm}^3/\text{g}$ 。球形有序介孔碳作为电极材料具有理想的双电层电容行为。

3 结语

介孔碳材料成为研究的热点, 而合成有序介孔碳材料的主要方法就是模板法, 包括硬模板法和软模板法。两种方法有各自的优缺点, 但是相对来说软模板法制备介孔碳材料更简单, 成本也较低。许多研究也证明了有序介孔碳材料具有高比表面积、大孔容和孔径分布单一等特点, 而且用不同方法可以合成不同形貌的介孔碳材料, 所以有序介孔碳材料成为催化、吸附、分离和电化学等多领域的研究热点。

参考文献

- [1] Kroto H W, Heath J R, O'Brien S C, et al. C₆₀: buckminsterfullerene[J]. Nature, 1985, 318(6042): 162-163.
- [2] Iijima S. Helical microtubes of graphitic carbon[J]. Nature, 1991, 354(6348): 56-58.
- [3] Geim A K, Novoselov K S. The rise of graphene[J]. Nature Materials, 2007, 6(3): 183-191.
- [4] Mochida I, Yoon S H, Jin M. Current features of traditional carbon materials[J]. Carbon, 2015, 93(268): 1079.
- [5] Li J. Review on new carbon materials as catalyst supports of direct methanol fuel cells[J]. New Chemical Materials, 2011, 39(2): 7-9, 15.
- [6] 李世斌, 施培俊, 田永杰, 等. 活性炭纤维在水处理中的应用现状[J]. 环境科学与管理, 2007, 32(3): 159-161.
- [7] 刘玉荣. 介孔碳材料的合成及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012, 2-3.
- [8] Corma A. From microporous to mesoporous molecular sieve

- materials and their use in catalysis[J]. *Cheminform*, 1997, 28(52):2373-2420.
- [9] 万颖,于超,汪微,等.有序介孔碳基材料在环境污染治理与控制中的应用[C].北京:全国环境催化与环境材料学术会议, 2011.
- [10] 洪周琴.铁掺杂有序介孔碳的合成及其在中药吸附、电化学检测和工业催化的应用[D].上海:华东理工大学, 2014.
- [11] 李猛.有序介孔碳材料的合成及其应用研究[D].福州:福州大学, 2011.
- [12] Liang C, Li Z, Dai S. Mesoporous carbon materials: synthesis and modification[J]. *Angew Chem Int Ed Engl*, 2010, 47(20): 3696-3717.
- [13] Ryoo R, Hoon Joo S, Jun S. Synthesis of highly ordered carbon molecular sieves via template-mediated structural transformation[J]. *Cheminform*, 1999, 30(50):7743-7746.
- [14] 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.
- [15] Gokulakrishnan N, Kania N, Léger B, et al. An ordered hydrophobic P6mm, mesoporous carbon with graphitic pore walls and its application in aqueous catalysis[J]. *Carbon*, 2011, 49(4):1290-1298.
- [16] Chandrasekar G, Son W J, Ahn W S. Synthesis of mesoporous materials SBA-15 and CMK-3 from fly ash and their application for CO₂ adsorption [J]. *Journal of Porous Materials*, 2009, 16(5):545-551.
- [17] Lin C F, Zhang X, Lin H, et al. Synthesis of ordered mesoporous carbon using MCM-41 mesoporous silica as template [J]. *Advanced Materials Research*, 2006, 11-12:543-546.
- [18] Che S N, Lund K, Tatsumi T, et al. Direct observation of 3D mesoporous structure by scanning electron microscopy (SEM); SBA-15 silica and CMK-5 carbon [J]. *Angew Chem Int Ed*, 2003, 42(19):2182-2185.
- [19] Lang J W, Yan X B, Liu W W, et al. Influence of nitric acid modification of ordered mesoporous carbon materials on their capacitive performances in different aqueous electrolytes[J]. *Journal of Power Sources*, 2012, 204(1):220-229.
- [20] Lu A H, Li W C, Schmidt W, et al. Easy synthesis of an ordered mesoporous carbon with a hexagonally packed tubular structure[J]. *Carbon*, 2004, 42(14):2939-2948.
- [21] Yang Z, Xia Y, Sun X, et al. Preparation and hydrogen storage properties of zeolite-templated carbon materials nanocast via chemical vapor deposition: effect of the zeolite template and nitrogen doping[J]. *Journal of Physical Chemistry B*, 2006, 110(37):18424-18431.
- [22] Moriguchi I, Ozono A, Mikuriya K, et al. Micelle-templated mesophases of phenol-formaldehyde polymer [J]. *Chemistry Letters*, 1999, 28(11):1171-1172.
- [23] Liang C, Hong K, Guiochon G A, et al. Synthesis of a large-scale highly ordered porous carbon film by self-assembly of block copolymers [J]. *Angewandte Chemie*, 2004, 43(43): 5785-5789.
- [24] Zhang Y, Dai W, Liu Y, et al. Synthesis and characterization of boron-doped ordered mesoporous carbon by evaporation induced self-assembly under HCl conditions[J]. *Rsc Advances*, 2017, 7(14):8250-8257.
- [25] Yuan B, Wu X F, Chen Y X, et al. Adsorption of CO₂, CH₄, and N₂ on ordered mesoporous carbon: approach for greenhouse gases capture and biogas upgrading[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(10):5474-5480.
- [26] Tripathi P K, Liu M, Xu Z, et al. High surface area ordered mesoporous carbon for high-level removal of rhodamine B[J]. *Journal of Materials Science*, 2013, 48(22):8003-8013.
- [27] Wang Y, Sui L. Preparation of Fe/N-doped ordered mesoporous carbon and its properties for adsorption of methyl orange[J]. *Materials Review*, 2016, 30(27):379-382.
- [28] Fang Y, Gu D, Zou Y, et al. A low-concentration hydrothermal synthesis of biocompatible ordered mesoporous carbon nanospheres with tunable and uniform size [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2010, 49(43):7987-7991.
- [29] García A, Nieto A, Vila M, et al. Easy synthesis of ordered mesoporous carbon containing nickel nanoparticles by a low temperature hydrothermal method [J]. *Carbon*, 2013, 51(1): 410-418.
- [30] Feng S, Li W, Wang J, et al. Hydrothermal synthesis of ordered mesoporous carbons from a biomass-derived precursor for electrochemical capacitors [J]. *Nanoscale*, 2014, 6(24): 14657.
- [31] Tamborini L H, Militello M P, Balach J, et al. Application of sulfonated nanoporous carbons as acid catalysts for Fischer esterification reactions [J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2015, doi:10.1016/j.arabjc.2015.08.018.
- [32] Peng L, An P, Ke X, et al. Preparation of sulfonated ordered mesoporous carbon and its use for the esterification of fatty acids [J]. *Catalysis Today*, 2010, 150(1):140-146.
- [33] Chen T. One-pot generation of mesoporous carbon supported nanocrystalline HPWO heteropoly acid with high performance in microwave esterification of acetic acid and isoamyl alcohol [J]. *Journal of Porous Materials*, 2013, 20(5):1225-1230.
- [34] Wang L, Dong X, Jiang H, et al. Ordered mesoporous carbon supported ferric sulfate: a novel catalyst for the esterification of free fatty acids in waste cooking oil [J]. *Fuel Processing Technology*, 2014, 128(46):10-16.
- [35] Geng L, Yu G, Wang Y, et al. Ph-SO₃H-modified mesoporous carbon as an efficient catalyst for the esterification of oleic acid [J]. *Applied Catalysis A General*, 2012, 427-428(11):137-144.
- [36] Zeng D, Zhang Q, Chen S, et al. Synthesis porous carbon-based solid acid from rice husk for esterification of fatty acids [J].

- Microporous & Mesoporous Materials, 2016, 219: 54-58.
- [37] Shu Q, Gao J, Nawaz Z, et al. Synthesis of biodiesel from waste vegetable oil with large amounts of free fatty acids using a carbon-based solid acid catalyst[J]. Applied Energy, 2010, 87(8): 2589-2596.
- [38] 宋晓岚, 曲鹏, 王海波, 等. 介孔材料的制备、表征、组装及其应用[J]. 材料导报, 2004, 18(10): 28-30, 53.
- [39] Li Zelong, Liu Jianhua, Xia Chungu, et al. Nitrogen-functionalized ordered mesoporous carbons as multifunctional supports of ultrasmall Pd nanoparticles for hydrogenation of phenol[J]. Acs Catalysis, 2013, 3(11): 2440-2448.
- [40] Gao P, Wang A, Wang X, et al. Synthesis and catalytic performance of highly ordered Ru-containing mesoporous carbons for hydrogenation of cinnamaldehyde[J]. Catalysis Letters, 2008, 125(3-4): 289.
- [41] Li B, Li X, Wang H, et al. Pt nanoparticles entrapped in ordered mesoporous carbon for enantioselective hydrogenation[J]. Journal of Molecular Catalysis A Chemical, 2011, 345(1): 81-89.
- [42] Ding Y, Li X, Li B, et al. Pt nanoparticles entrapped in ordered mesoporous carbons for liquid-phase hydrogenation of unsaturated compounds[J]. Catalysis Communications, 2012, 28(10): 147-151.
- [43] Liu Z, Mi J, Yang Y, et al. Synthesis of Pt-containing ordered mesoporous carbons and their catalysis for toluene hydrogenation[J]. Materials Letters, 2011, 65(23): 3548-3551.
- [44] Peng X, Zhang Q X, Cheng X, et al. Adsorption and separation of CO₂/CH₄/N₂ binary mixtures in an ordered mesoporous carbon material CMK-3[J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2011, 27(9): 2266-2276.
- [45] Li Peiyuan, Tezel F H. Adsorption separation of N₂, O₂, CO₂ and CH₄ gases by-zeolite[J]. Microporous & Mesoporous Materials, 2007, 98(1): 94-101.
- [46] Saha D, Deng S. Adsorption equilibrium and kinetics of CO₂, CH₄, N₂O, and NH₃ on ordered mesoporous carbon[J]. Journal of Colloid & Interface Science, 2010, 345(2): 402-409.
- [47] Yuan B, Wu X, Chen Y, et al. Adsorption of CO₂, CH₄, and N₂ on ordered mesoporous carbon: approach for greenhouse gases capture and biogas upgrading[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(10): 5474-5480.
- [48] Liu F, Guo Z, Ling H, et al. Effect of pore structure on the adsorption of aqueous dyes to ordered mesoporous carbons[J]. Microporous & Mesoporous Materials, 2016, 227: 104-111.
- [49] Zhuang X, Wan Y, Feng C, et al. Highly efficient adsorption of bulky dye molecules in wastewater on ordered mesoporous carbons[J]. Chemistry of Materials, 2009, 21(4): 706-716.
- [50] Liu N, Yin L, Zhang L, et al. Ferromagnetic Ni decorated ordered mesoporous carbons as magnetically separable adsorbents for methyl orange[J]. Materials Chemistry & Physics, 2011, 131(1): 52-59.
- [51] Jedynak K, Repelewicz M. Adsorption of acid red 114 and basic fuchsin from aqueous solutions on mesoporous carbon materials[J]. Environment Protection Engineering, 2016, 19(2): 227-239.
- [52] Cao Y, Zhu J Z, Ding Y, et al. Pore size control of ordered mesoporous carbons and adsorption performance of dye molecules[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 548-549: 38-42.
- [53] Su S. Preparation of ordered mesoporous carbon material and its excellent bilirubin adsorption property[J]. New Chemical Materials, 2011, 39(6): 81-83.
- [54] Guo Z, Zhu G, Gao B, et al. Adsorption of vitamin B12 on ordered mesoporous carbons coated with PMMA[J]. Carbon, 2005, 43(11): 2344-2351.
- [55] Xing, Zhuo W, Si S, et al. Preparation of magnetic ordered mesoporous carbon and its drug adsorption behavior[J]. Acta Chimica Sinica, 2009, 67(8): 761-766.
- [56] Wan Y, Wang H, Zhao Q, et al. Ordered mesoporous Pd/silica-carbon as a highly active heterogeneous catalyst for coupling reaction of chlorobenzene in aqueous media[J]. Journal of the American Chemical Society, 2009, 131(12): 4541-4550.
- [57] Barczak M, Michalak-Zwierz K, Gdula K, et al. Ordered mesoporous carbons as effective sorbents for removal of heavy metal ions[J]. Microporous & Mesoporous Materials, 2015, 211: 162-173.
- [58] 崔祥婷, 闻振涛, 万颖. 有序介孔碳用于吸附水相中的氯代芳香族化合物[J]. 上海师范大学学报(自然科学版), 2010, 39(3): 279-283.
- [59] Xu G L, Chen S R, Li J T, et al. A composite material of SnO₂/ordered mesoporous carbon for the application in lithium-ion battery[J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2011, 656(1): 185-191.
- [60] Li Z, Liu N, Wang X, et al. Three-dimensional nanohybrids of Mn₃O₄/ordered mesoporous carbons for high performance anode materials for lithium-ion batteries[J]. Journal of Materials Chemistry, 2012, 22(32): 16640-16648.
- [61] Zhou M, Shang L, Li B, et al. Highly ordered mesoporous carbons as electrode material for the construction of electrochemical dehydrogenase- and oxidase-based biosensors[J]. Biosensors & Bioelectronics, 2009, 24(3): 442-447.
- [62] Zhou M, Shang L, Li B, et al. The characteristics of highly ordered mesoporous carbons as electrode material for electrochemical sensing as compared with carbon nanotubes[J]. Electrochemistry Communications, 2008, 10(6): 859-863.
- [63] 严欣. 球形有序中孔炭的合成及其电化学应用[D]. 北京: 北京化工大学, 2009.