

# 盐模板法制备多孔碳材料的研究进展

陈俊秀, 李金昊, 代 钢, 阿古拉\*

内蒙古师范大学化学与环境科学学院, 内蒙古自治区绿色催化重点实验室, 内蒙古 呼和浩特

收稿日期: 2022年2月4日; 录用日期: 2022年2月18日; 发布日期: 2022年2月23日

## 摘 要

多孔碳材料因其稳定性高、成本低、孔隙率可调控等优点成为了吸附剂领域的研究热点。多孔碳的孔结构的排列主要取决于其制备方式, 因此找到一个制备过程绿色无污染且原材料成本低的制备方式是十分重要的。本文中主要总结了各种盐模板制备多孔碳材料的方法的优点并列举了目前人们使用盐模板制备多孔碳材料的案例。

## 关键词

盐模板, 多孔碳, 孔结构

# Research Progress of Porous Carbon Materials Prepared by Salt Template Method

Junxiu Chen, Jinhao Li, Gang Dai, Bao Agula\*

Inner Mongolia Key Laboratory of Green Catalysis, College of Chemistry and Environmental Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot Inner Mongolia

Received: Feb. 4<sup>th</sup>, 2022; accepted: Feb. 18<sup>th</sup>, 2022; published: Feb. 23<sup>rd</sup>, 2022

## Abstract

Porous carbon material has become a hot research topic in the field of adsorbents because of its high stability, low cost and controllable porosity. The arrangement of porous carbon hole structure mainly depends on its preparation method, so it is very important to find a preparation process which is environmentally friendly and easy to operate, and the low raw material cost. In

\*通讯作者。

**this paper, the advantages of various salt templates for the preparation of porous carbon materials are summarized and the cases of people using salt templates to prepare porous carbon materials are listed.**

## Keywords

Salt Template, Porous Carbon, Pore Structure

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着全球环境问题日益严峻，人们的环保意识越来越强。各种解决环境问题的材料被学者们研究，其中多孔碳材料因其在污水净化、有害气体吸附、能量储存等方面的应用优势得到了广泛的关注[1] [2]。多孔碳材料是指主要由碳材料组成，有不同尺寸孔结构的碳素材料。多孔碳材料的热稳定性和化学稳定性很高，具有高度发达的孔隙结构和比表面积，还具备了疏水表面和高防潮性[3] [4] [5]。根据其孔径结构的大小多孔碳材料主要可以分为三种：孔径  $< 2 \text{ nm}$  的微孔碳材料，孔径在  $2\sim 50 \text{ nm}$  的介孔碳材料，孔径  $> 50 \text{ nm}$  的大孔碳材料[6] [7] [8]。

多孔碳材料的比表面积、孔体积和孔径分布(PSD)在内的表面特性对材料的性能有决定性影响即材料的结构决定了其性质，材料的制备方式决定了材料的结构，因此多孔碳材料的制备方法成为了近几年学者们的研究热点。目前，制备多孔碳材料的方法主要有直接碳化法[9]、活化法[10]和模板法[11]。直接碳化法是指通过热能来破坏材料(前驱体)中的化学键，在高温下分解有机材料的过程。但是由于大多有机材料是不耐高温的，因此可以作为前驱体来制备多孔碳材料的有机物质微乎其微。活化法可以分为物理活化法和化学活化法[12] [13]。物理活化法是以烟道气、水蒸气、空气等混合气体作为活化剂在高温下与材料接触进行活化，进而产生更多孔隙的方法。修东超等人[14]使用二氧化碳和水蒸气作为活性致孔剂以木质素为原料制备了多孔碳材料发现二氧化碳相对于水蒸气具有更丰富的孔结构，但是物理活化法通常需要较高的活化温度，并且具有制备时间过长，所得的碳材料比表面积小等缺点。化学活化法是指将活化剂和原料混合后，在惰性气体中加热，同时进行碳化和活化的方法，通常采用酸、碱、碳酸盐等。苕柳娜[15]等人使用沥青作为碳源，通过 KOH 活化制备了高比表面积的杂多孔碳材料。此方法对实验设备具有很强的腐蚀性，并且对样品的孔径尺寸很难把控。模板法是指通过将制备碳材料的前驱体注入到模板的孔隙中，然后高温煅烧后去除模板制备可调控性的多孔碳材料。其最为突出的特点是具备良好的结构调控性，提供了能够控制和改善材料的孔结构的排列的有效方案。目前，常用的模板法有硬模板法[16] [17]、软模板法[18] [19] [20]、自牺牲模板法[21] [22]和盐模板法[23] [24]。硬模板通常是以沸石、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、介孔  $\text{SiO}_2$  为模板，是获得具有微孔或介孔的多孔碳材料的方法。所得的样品的孔结构主要以硬模板的结构为形，其缺点是模板需要用强酸强碱去除，会造成环境污染和资源浪费。软模板通常使用表面活性剂或嵌段共聚物作为模板，它们价格昂贵且不可再生。自牺牲模板是用生物质自身的模板与碳质前驱体一体化来制备多孔碳，其反应步骤少，制备过程简单但是模板需要用酸碱来去除会造成环境污染[25] [26]。因此，寻找一种绿色、成本低、对环境友好的方法来制备多孔碳材料是迫在眉睫的。盐模板则有效的避免了上述方法中的问题，该方法是采用可溶性盐为模板与碳源高温煅烧制备多孔碳材料。比较其它模板，

盐模板的原料简单易得、经济和能源成本低、后处理操作简单方便，通过水洗涤可以很容易将模板去除，节能环保[27] [28]。

本文主要详细的综述了 NaCl 模板，混合盐模板和 ZnCl<sub>2</sub> 模板法制备多孔碳材料的方法并介绍了三种模板的优点。

## 2. 盐模板制备多孔碳材料的方法

盐模板法是将碳质前驱体注入到模板的孔结构中，然后通过高温煅烧后，用去离子水去除模板后制备出高比表面积的多孔碳材料的方法不仅操作步骤简洁方便，对环境友好还可以有效的改善和控制多孔碳材料孔结构的排列，制备多孔碳材料常用的盐模板有 NaCl 模板法、混合盐模板法和伯胺盐酸盐模板法。

### 2.1. NaCl 模板法

NaCl 是一种简单易得、价格低廉、稳定、无毒对环境污染小的盐类，是制备多孔碳材料的良好模板的选择。氯化钠熔点较低在加热过程中会形成大量的小液滴，从而对碳源起到了造孔的作用，从而可以提高碳材料的比表面积并可以对样品的孔结构进行调控。谢亚桥等人[29]，使用木质素为碳源，NaCl 为模板得到了具有微孔、介孔混合的高比表面积的多孔碳材料并测试了不同温度下氯化钠对样品的影响。通过氮气吸附脱附实验可知随着温度的升高，样品的介孔孔面积是先增加后减少的，这是由于温度到了氯化钠的熔点之后，造成了氯化钠的融化从而导致了介孔模板骨架的坍塌。因此通过此方法制备的多孔碳材料的孔结构是可以随着温度的变化而调节的。

Li 等人[30]将 NaCl、聚乙烯吡咯烷酮、硫酸锂和硫酸锰的混合物溶解在去离子水中，形成均匀的水溶液。将溶液冷冻后，形成小的氯化钠晶体并将它组装成了模板，随后通过冷冻干燥辅助的方法去除水，氯化钠晶体和碳源经过高温煅烧最后用去离子水去除氯化钠模板之后，成功的获得了微、介、大孔共存的多孔碳薄片。在此项研究中氯化钠作为模板促进了多孔结构的形成并抑制了碳源的团聚。大量的研究表明了 NaCl 作为模板制备多孔碳材料对其有造孔的作用，可以大大的提高材料的比表面积。

Shi [31]等人以氯化钠为模板，通过木质素磺酸钠和尿素混合物的碳化，得到了氮硫共掺杂碳材料并分析了氯化钠模板对碳形态、孔隙率和化学成分的影响。研究中分别对比了添加和不添加氯化钠样品的比表面积，发现添加氯化钠的样品的比表面积远高于不添加氯化钠样品的比表面积。这证实了氯化钠模板的有效成孔功能。样品中随着氯化钠添加量的逐渐增加，木质素磺酸钠不能完全覆盖氯化钠颗粒表面，碳化后形成裂纹。不添加尿素的样品的孔结构较为松散，具有大量的大孔和空隙这可能是由于尿素的加入限制了大孔的产生。

Qiu [32]等人采用了两种软硬碳质前驱体制备了三维多孔软硬复合碳。碳前驱体分别是酚醛树脂(硬碳前驱体)和沥青(软碳过氧化物)其结构式如图 1 所示，并且采用 NaCl 模板法制备了此材料。文章中通过调节 NaCl 的碳源的质量比来调节了材料的石墨晶体结构和孔隙率，他们分别制备了 NaCl 和碳源的比例为 2:1、4:1 和 6:1 的样品和不添加 NaCl 的样品并且通过各种表征手段研究了材料的特征。通过 SEM 对样品的形貌进行了表征，发现没有添加 NaCl 的样品颗粒表面光滑，形状不规则，而添加了 NaCl 的三个样品呈现了三维互联多孔结构。通过 BET 法计算四个样品的比表面积分别为 3.63、100、119、234 m<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup>，表明 NaCl 模板有效的提高了材料的比表面积。在比较三个添加了 NaCl 的样品时发现，虽然质量比为 4:1 的样品的中孔和打孔更多，但其比表面积非常接近且相对较小。随着 NaCl 质量的增加，质量比为 6:1 的样品中引入了更多的微孔、中孔和大孔因此其样品的比表面积得到了显著的增加，但是由于此文章中的多孔材料是用于钠离子的储存过大的比表面积会导致钠的存储过程中发生不可逆反应因此适当的 NaCl 配比可形成适宜的中孔和大孔，促进钠离子快速扩散，有利于钠离子的存储。从以上例子我们可以得知

盐模板和前驱体的质量比对所得的多孔碳材料的孔结构有很大的影响，因此我们可以通过改变盐模板和前驱体的质量比来调节材料的孔径大小。

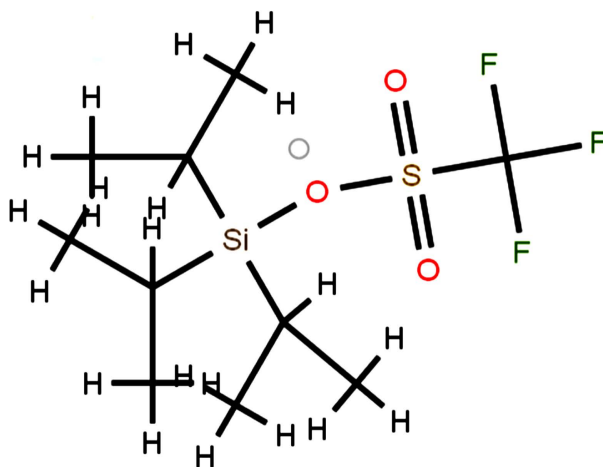


Figure 1. Asphalt structural formula  
图 1. 沥青结构式

## 2.2. 混合盐模板法

混合盐模板法与单一的盐模板相比，具有较低的共晶点，可以在低活化温度下增加了与活化剂的接触面积，大大提高了活化剂的利用效率。与其他技术相比可以避免显著的质量损失、混合熔盐可以回收利用，是一种简单、廉价且可持续的技术，可以获得高比表面积的碳材料的方法。Wang 等人[33]分别以  $\text{LiCl-ZnCl}_2$  熔盐  $\text{LiCl}$ 、 $\text{ZnCl}_2$  为模板，以壳聚糖为原料制备了三个不同的样品，通过氮气吸附脱附实验发现以  $\text{LiCl-ZnCl}_2$  熔盐为模板的碳材料在三个样品中具有最高的比表面积和最大的孔体积，并发现这个样品是具有微孔和介孔的分级多孔碳材料。还研究了不同质量比(1:2、3、4)的混合盐模板和壳聚糖对样品的影响。通过研究发现在三个样品中壳聚糖和混合盐的质量比为 1:3 时其比表面积和孔体积是最好的，随着混合盐与壳聚糖初始重量比从 2/1 增加到 4/1，样品的中孔体积比在增加。这一结果表明，过量的混合盐可能形成小簇，并作为模板促进中孔的形成。随后又选择了质量比为 1:3 的样品测定了其在不同温度(800℃、1000℃、1200℃)下的性能，其中 1000℃下制备的样品具有最高的比表面积和孔体积，其微孔和介孔都是最为丰富的。

焦帅等人[34]以煤沥青为碳源，以  $\text{NaCl-Na}_2\text{CO}_3$  为模板，使用  $\text{K}_2\text{CO}_3$  活化在氨气氛围下制备了多孔碳，并通过表征研究了模板中  $\text{NaCl}$  和  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  的不同质量比对样品微观形貌的影响： $\text{Na}_2\text{CO}_3$  质量不变，随着  $\text{NaCl}$  质量的增加样品结构中的空腔变大，孔隙结构的尺寸增大并样品的微观结构出现了很多褶皱，这提高了孔隙的利用率。又用氮气吸附脱附、XPS 实验测定了模板中  $\text{NaCl}$  和  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  的不同质量比对样品孔隙结构的影响：随着  $\text{NaCl}$  质量的增加，样品的比表面积出现了先增大后减小的趋势，这表明碳材料的孔结构参数是可以通过改变盐模板中  $\text{NaCl}$  和  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  的质量而调控的。样品的孔结构主要是由微孔和介孔组成的，其中介孔为离子提供了传输通道，而微孔则是提供了大量的活性位点去吸附离子。

Zhang [35]等人使用银杏叶为碳前体，通过调整  $\text{KCl}$  和  $\text{CaCl}_2$  的比例来制备了互连多孔碳纳米片。在他们的研究中  $\text{KCl}$  作为模板渗透到碳前驱体中形成中孔，而  $\text{CaCl}_2$  是用来固定氨前驱体分解产生的氨，从而合成高氮含量的碳材料，还可以作为致孔剂，在碳化过程中将孔引入碳基体材料中。他们分别测定了不同比例的盐模板制备出的样品和不同温度下制备出的材料的特征。在不同温度(700℃、800℃和

900°C)下的电化学性能中 0.75PCNS800 样品的 CV 廓线闭合面积和充放电时间是三个样品中最大的。因此进一步研究了样品 0.75PCNS800 的微观形貌,有超薄互连的碳片,并且 0.75PCNS800 样品中存在大量的微孔和介孔,证明  $\text{CaCl}_2/\text{KCl}$  熔盐对碳基高孔隙率的产生至关重要。此外,还分别测了三个不同比例的盐模板( $\text{KCl}/\text{CaCl}_2$ : 0.25:0.75、0.5:0.5、0.75:0.25)的比表面积和孔体积发现随着  $\text{KCl}$  的增加,碳材料的比表面积从  $255.4 \text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$  到了  $395.1 \text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ ,表面熔融盐对比表面积有良好的影响。此外,0.75PCNS800 样品的微孔、总体积也是最大的,这是由于 75% mol  $\text{KCl}$  组成的盐的共晶点低,以及  $\text{CaCl}_2$  和  $\text{KCl}$  模板的影响。

Noel Díez [36]等人以  $\text{KCl}$  为模板,以  $\text{K}_2\text{CO}_3$  为模板和活化剂,利用生物质衍生物葡萄糖和豆粕为碳前体,通过冷冻干燥过程制备了三维多孔碳。采用  $\text{N}_2$  物理吸附的方法分析了碳材料的多孔结构,发现以葡萄糖为碳源在  $800^\circ\text{C}$  下制备的样品表现出 I 型等温线,表明样品中存在微孔,而以葡萄糖为碳源在  $850^\circ\text{C}$  下制备的样品和以豆粕为碳源制备的样品不仅有微孔,在  $2.5\sim 4 \text{ nm}$  范围内也有孔隙。所有材料都有较大的 BET 表面积,在  $2000\sim 2600 \text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$  范围内,孔隙体积在  $0.8\sim 1.4 \text{ cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$  范围内。与仅以  $\text{KCl}$  颗粒为模板制备的材料相比,其孔发育较差( $S_{\text{BET}} < 500 \text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$  和  $V_p < 0.4 \text{ cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$ ),这表明了  $\text{K}_2\text{CO}_3$  在活化过程中会发生碳腐蚀。

### 2.3. $\text{ZnCl}_2$ 模板法

Prauchner [37]等人使用椰子壳为制备碳材料的前驱体,分别制备了用  $\text{CO}_2$  活化法和  $\text{ZnCl}_2$  为模板(或  $\text{H}_3\text{PO}_4$ )的碳材料用于储存  $\text{CH}_4$ 。通过  $\text{N}_2$  吸附脱附实验比较了材料的 BET 比表面积和孔结构。其相关数据表明,在  $\text{CO}_2$  物理活化过程中,孔隙率随着燃烧量的增加而不断增加;在用  $\text{ZnCl}_2$  为模板的过程中,孔隙率随着化学负载的增加而不断增加。使用  $\text{CO}_2$  活化法制备的材料的孔隙大多为大孔,而在模板法制备过程中, $\text{ZnCl}_2$  的攻击导致材料进入类塑料状态,分子有足够的流动性来重组。在这个阶段,前体的植物结构崩溃,从而阻止相关大孔的发生。大孔的产生是不利于碳材料储存  $\text{CH}_4$  的。 $\text{ZnCl}_2$  模板法制备的材料的比表面积接近  $800 \text{ m}^2/\text{cm}^3$  而活化法制备的碳材料的比表面积仅为  $650 \text{ m}^2/\text{cm}^3$ 。因此  $\text{ZnCl}_2$  模板法制备的材料更有利于  $\text{CH}_4$  的储存。

## 3. 展望

多孔碳材料可以应用于储存、 $\text{CO}_2$  捕获、电极材料等多种领域,是具有广大前景的材料,因此找到一个绿色环保、制备简单的方法是十分重要的。通过盐模板法我们可以制备出孔体积大,比表面积高,孔隙结构可以调控的优异的多孔碳,而且其制备过程简单易操作,不会对设备和环境造成伤害,作为模板使用的大多数盐对环境友好并价格低廉。通过改变盐模板和碳源的比例可以对材料的孔径分布和孔隙大小进行调整,通过改变碳化温度、掺杂元素等条件我们可以根据实际应用来调节材料的性能。总之,盐模板法是制备多孔碳材料的理想方法,此方法多孔材料领域显示出重要的应用潜力。

## 致 谢

本人写作过程中,阿古拉老师给予了很大帮助和指导,在此深表感谢。同时也感谢其他指导过我的老师和同学。

## 基金项目

国家自然科学基金(41967047); 内蒙古自治区自然科学基金(2016MS0212); 内蒙古自治区水环境安全协同创新培育中心(XTCX003); 内蒙古自治区科技计划(2020PT0003)。

## 参考文献

- [1] Jin, S.S., Nan, F.Y., Hong, M.C., *et al.* (2019) Salt Template Synthesis of Nitrogen and Sulfur Co-Doped Porous Carbons as CO<sub>2</sub> Adsorbents. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **7**, 19513-19521. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b04574>
- [2] Luo, L., Luo, L.C., Deng, J.P., *et al.* (2021) High Performance Supercapacitor Electrodes Based on B/N Co-Doped Biomass Porous Carbon Materials by KOH Activation and Hydrothermal Treatment. *International Journal of Hydrogen Energy*, **46**, 31927-31937. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.06.211>
- [3] Cui, Y.P., Feng, W.T., Wang, D.D., *et al.* (2021) Water-Soluble Salt Template-Assisted Anchor of Hollow FeS<sub>2</sub> Nanoparticle inside 3D Carbon Skeleton to Achieve Fast Potassium-Ion Storage. *Advanced Energy Materials*, **11**, 210343. <https://doi.org/10.1002/aenm.202101343>
- [4] 李臻, 刘洁, 肖惠宁, 等. 硬模板法合成介孔材料及其铬吸附性能研究[J]. 广州化工, 2016, 44(18): 105-109.
- [5] Zhang, F., Liu, H.C., Wu, Z.F., *et al.* (2021) Polyacrylamide Gel-Derived Nitrogen-Doped Carbon Foam Yields High Performance in Supercapacitor Electrodes. *ACS Applied Energy Materials*, **4**, 6719-6729. <https://doi.org/10.1021/acsaem.1c00777>
- [6] Pan, D., Li, Q.M., Zhang, W., *et al.* (2021) Highly Thermal Conductive Epoxy Nanocomposites Filled with 3D BN/C Spatial Network Prepared by Salt Template Assisted Method. *Composites Part B*, **209**, Article ID: 108609. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108609>
- [7] 米红宇, 张校刚, 吕新美, 等. 种子模板法制备镍盐掺杂聚吡咯纳米纤维及其电化学电容性质[J]. 高分子材料科学与工程, 2008, 24(3): 155-158.
- [8] 蔡文波, 李桂菊, 刘笑研, 等. 软模板法碳电极制备及在废水脱盐中的应用[J]. 环境工程学报, 2015, 9(12): 5927-5933.
- [9] Sun, J., Gao, L., Hyungsun, K., *et al.* (2012) Effect of Temperature and Carbon Contents on the Synthesis of  $\beta$ -SiC from Silicon Sludge by Direct Carbonization Method. *Materials Science Forum*, **724**, 45-48. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.724.45>
- [10] 吴有龙, 徐嘉龙, 马中青, 等. KOH 活化法制备气化稻壳活性炭及其吸附性能[J]. 生物质化学工程, 2021, 55(1): 31-38.
- [11] 程昊, 樊静静, 刘永逸, 等. 硬模板法制备氮掺杂有序介孔碳修饰电极检测盐酸奈福泮[J]. 分析测试学报, 2021, 40(7): 1049-1054.
- [12] 黄锦波, 邵灵达, 祝成炎, 等. 活性炭纤维的制备及其应用进展[J]. 棉纺织技术, 2020, 48(10): 11-14.
- [13] Sun, Z.W., Liang, J.S., Duan, X.H., *et al.* (2019) Preparation and Characterization of Shiitake Mushroom-Based Activated Carbon with High Adsorption Capacity. *Arabian Journal for Science and Engineering*, **44**, 5443-5456. <https://doi.org/10.1007/s13369-019-03746-5>
- [14] 修东超, 高丽娟, 杨国明, 等. 水蒸汽活化法制备外墙保温板残料活性炭[J]. 化学工程与装备, 2016(4): 13-14.
- [15] 裴柳娜. 化学活化法制备活性炭/纳米碳掺杂材料的研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京化工大学, 2012.
- [16] Chen, X.L., Lim, J.S.K., Yan, W.L., *et al.* (2020) Salt Template Assisted BN Scaffold Fabrication toward Highly Thermally Conductive Epoxy Composites. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **12**, 16987-16996. <https://doi.org/10.1021/acsaami.0c04882>
- [17] Elmaani, A.A., Tomic, N., Radovic, I., *et al.* (2019) Salt Template Zirconia Reinforcing Particles as Possible Reinforcement for PMMA Matrix Composite. *Advanced Composites Letters*, **28**, 1-7. <https://doi.org/10.1177/0963693519879696>
- [18] Chen, A.L., Yi, Q.F., Sheng, K., *et al.* (2021) Mesoporous N-P Codoped Carbon Nanosheets as Superior Cathodic Catalysts of Neutral Metal-Air Batteries. *Langmuir*, **37**, 12616-12628. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.1c01947>
- [19] He, H.Z., Zhang, Y., Zhang, W.Q., *et al.* (2021) Dual Metal-Loaded Porous Carbon Materials Derived from Silk Fibroin as Bifunctional Electrocatalysts for Hydrogen Evolution Reaction and Oxygen Evolution Reaction. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **13**, 30678-30692. <https://doi.org/10.1021/acsaami.1c07058>
- [20] Meng, Q.D., Yan, S.M., Cen, W., *et al.* (2018) A Simple Synthesis of Nitrogen-Sulfur Co-Doped Porous Carbon Using Ionic Liquids as Dopant for High Rate Performance Li-Ion Batteries. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, **834**, 17-25. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2018.12.042>
- [21] 吴博文, 黎燕荣. 熔融盐模板法制备燃料电池氧还原催化剂的研究[J]. 山东化工, 2018, 47(5): 53-54.
- [22] Chong, L., Wei, L., Ya, Q.D., *et al.* (2017) A Dual-Function Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> Template Directed Formation of Cathode Materials with a High Content of Sulfur Nanodots for Lithium-Sulfur Batteries. *Small*, **13**, Article ID: 1700358. <https://doi.org/10.1002/smll.201700358>

- [23] Fu, Y.H., Xu, F.C., Weng, D.H., *et al.* (2019) Superhydrophobic Foams with Chemical- and Mechanical-Damage-Healing Abilities Enabled by Self-Healing Polymers. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **11**, 37285-37294. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b11858>
- [24] Yan, M.G., Xiong, Q.M., Huang, J.T., *et al.* (2021) Molten Salt Synthesis of Titanium Carbide Using Different Carbon Sources as Templates. *Ceramics International*, **47**, 17589-17596. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.03.077>
- [25] Nikolai, P.P., Kallioinen, M., *et al.* (2021) Synergy between Alkali Activation and a Salt Template in Superactive Carbon Production from Lignin. *Nanotechnology*, **32**, Article ID: 085605. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/abc9eb>
- [26] Zhang, S., Tian, K., Cheng, B.H., *et al.* (2017) Preparation of N-Doped Supercapacitor Materials by Integrated Salt Templating and Silicon Hard Templating by Pyrolysis of Biomass Wastes. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **5**, 6682-6691. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b00920>
- [27] 刘家冉, 郭思勤, 赵天畅, 等. 木质素高盐模板碳气凝胶制备及其电化学应用[J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(6): 142-148.
- [28] Wu, X.S., Su, R.H., Pei, B.B., *et al.* (2019) Pore Structure Control of Porous Carbon via the Synergistic Effect of Boric Acid and Divalent Metal Iron Salt. *Materials Letters*, **255**, 827-839. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.126539>
- [29] 谢亚桥, 赵佳欣, 李杰兰, 等. 氯化钠模板诱导木质素基多孔炭的制备及其超级电容器性能[J]. 应用化学, 2019, 36(4): 482-488.
- [30] Li, J.Z., Luo, S.H., Ding, X.Y., *et al.* (2018) NaCl-Template Assisted Synthesis of 3D Honeycomb-Like LiMnPO<sub>4</sub>. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **6**, 16683-16691. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b03935>
- [31] Shi, J.S., Yan, N.F. and Cui, H.M. (2019) Salt Template Synthesis of Nitrogen and Sulfur Co-Doped Porous Carbons as CO<sub>2</sub> Adsorbents. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **7**, 19513-19521. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b04574>
- [32] Qiu, D., Cao, T.F., Zhang, J., *et al.* (2019) Precise Carbon Structure Control by Salt Template for High Performance Sodium-Ion Storage. *Journal of Energy Chemistry*, **31**, 101-106. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2018.05.014>
- [33] Wang, P.Y., Zhang, G.H., Chen, W.J., *et al.* (2020) Molten Salt Template Synthesis of Hierarchical Porous Nitrogen-Containing Activated Carbon Derived from Chitosan for CO<sub>2</sub> Capture. *ACS Omega*, **5**, 23460-23467. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c03497>
- [34] 焦帅, 杨磊, 武婷婷, 等. 混合盐模板法制备超级电容器用氮掺杂分级多孔碳纳米片[J]. 化工学报, 2021, 72(5): 2869-2877.
- [35] Zhang, W., Lin, M.H., Cheng, R.R., *et al.* (2021) Molten Metal Chloride Salt Template Synthesis of N/S Co-Doped Porous Carbon Nanosheets for Supercapacitors C with High Rate and Stable Performance as Lithium-Ion Battery Cathodes. *Diamond and Related Materials*, **113**, Article ID: 108278. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2021.108278>
- [36] Noel, D., Guillermo, A., Antonio, B., *et al.* (2019) Sustainable Salt Template-Assisted Chemical Activation for the Production of Porous Carbons with Enhanced Power Handling Ability in Supercapacitors. *Batteries & Supercaps*, **2**, 701-711. <https://doi.org/10.1002/batt.201900037>
- [37] Prauchner, M.J., Sapag, K. and Rodríguez-Reinoso, F. (2016) Tailoring Biomass-Based Activated Carbon for CH<sub>4</sub> Storage by Combining Chemical Activation with H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> or ZnCl<sub>2</sub> and Physical Activation with CO<sub>2</sub>. *Carbon*, **110**, 138-147. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2016.08.092>