

竹基硬炭负极材料不同除杂工艺及其储钠性能研究^①

杜浩杰^{1,2}, 张磊^{1,2}, 王亲猛^{1,2}, 郭学益^{1,2}, 田庆华^{1,2}, 童汇^{1,2}, 薛志强³, 罗跃成⁴

(1.中南大学 冶金与环境学院, 湖南 长沙 410083; 2.中国有色金属工业协会 中国清洁冶金工程研究中心, 湖南 长沙 410083; 3.承德亚欧果仁有限公司, 河北 承德 067506; 4.湖南省长城新能源科技有限公司, 湖南 邵阳 422000)

摘要: 以竹子为原料,通过不同除杂工艺制备硬炭材料,考察了除杂工艺对硬炭材料杂质含量、物性结构和储钠性能的影响。结果表明,经过除杂处理,竹基硬炭材料中杂质含量有效降低,材料比表面积降低、层间距增大。综合考虑硬炭材料制备成本及其储钠性能,确定酸浸为适宜的硬炭材料除杂工艺,在 30 mA/g 电流密度下,制备的硬炭材料首次库仑效率为 83.87%,可逆比容量为 308.96 mAh/g;在 300 mA/g 电流密度下循环 100 圈容量保持率为 96.57%,表现出良好的储钠性能。

关键词: 钠离子电池; 负极材料; 硬炭; 竹子; 除杂; 储钠性能

中图分类号: TM911

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2025.04.029

文章编号: 0253-6099(2025)04-0158-06

Sodium Storage Performance of Bamboo-Derived Hard Carbon Materials Prepared by Different Impurity Removal Processes

DU Haojie^{1,2}, ZHANG Lei^{1,2}, WANG Qinmeng^{1,2}, GUO Xueyi^{1,2}, TIAN Qinghua^{1,2},
TONG Hui^{1,2}, XUE Zhiqiang³, LUO Yuecheng⁴

(1.School of Metallurgy and Environment, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 2.China Clean Metallurgical Engineering Research Center, China Nonferrous Metals Industry Association, Changsha 410083, Hunan, China; 3.Chengde Yaou Nuts & Seeds Co., Ltd., Chengde 067506, Hebei, China; 4.Hunan Great Wall New Energy Co., Ltd., Shaoyang 422000, Hunan, China)

Abstract: With bamboo as a raw material, different hard carbon materials were prepared by different impurity removal processes, and the effects of those processes on the impurity content, physical structure and sodium storage performance of hard carbon were explored. The results show that after impurity removal treatment, the bamboo-derived hard carbon has reduced impurity content and specific surface area, and increased interlayer spacing. With the preparation cost and the sodium storage performance of hard carbon comprehensively taken into consideration, acid leaching is chosen as the impurity removal process for hard carbon. It is shown that at a current density of 30 mA/g, the anode material with prepared hard carbon can have an initial Coulombic efficiency of 83.87% and a reversible specific capacity of 308.96 mAh/g; it demonstrates a capacity retention rate of 96.57% after 100 cycles at a current density of 300 mA/g, showing excellent sodium storage performance.

Key words: sodium-ion battery; anode material; hard carbon; bamboo; impurity removal; sodium storage performance

与锂离子电池相比,钠离子电池具有钠资源丰富、成本低廉、稳定性好等优势^[1-4],是极具潜力的新型储能体系^[5-6]。硬炭具有低储钠电位及较高可逆比容量^[7-9],是目前钠离子电池负极材料的研究重点^[10]。生物质基硬炭材料具有原材料资源丰富、成本低廉、孔隙结构丰富等优点^[11-13],研究人员广泛研究了不同生

物质制备的硬炭材料电化学性能^[14-17]。但是生物质含有大量杂质元素(如 Fe、Ca、Si 等),杂质会影响硬炭材料的可逆比容量和首次库仑效率^[18]。目前硬炭的除杂工艺复杂多样^[19-20],选择合适的除杂工艺是实现生物质基硬炭材料工业化生产的关键^[21-22]。本文以竹子为原料,采用不同除杂工艺制备硬炭材料,探究了

① 收稿日期: 2025-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(52404373); 湖南省重大科技攻关项目(2023ZJ1060)

作者简介: 杜浩杰(1996—),男,山东烟台人,博士研究生,主要研究方向为新能源材料。E-mail: duhaojiecsu@163.com

通信作者: 张磊(1991—),男,湖南益阳人,博士,特聘副教授,主要研究方向为新能源材料。E-mail: zhang_lei@csu.edu.cn

除杂工艺对竹基硬炭材料杂质含量、物性结构及储钠性能的影响,为低成本生物质基硬炭材料的制备提供技术指导。

1 实验部分

1.1 竹基硬炭材料的制备

将竹子(产地为湖南益阳)用蒸馏水多次浸泡洗涤,随后置于鼓风干燥箱中,80℃干燥24h。在氮气气氛下,将竹子置于箱式炉中进行低温碳化。低温碳化条件为:以5℃/min升温至500℃,保温3h,继续通氮气,随炉冷却至室温后得到低温碳化产物。将低温碳化产物磨细后过200目(75μm)筛,所得材料的 D_{50} 为7.178μm,然后分别进行碱浸除杂、酸浸除杂、碱浸加酸浸除杂处理,将不除杂、碱浸除杂、酸浸除杂、碱浸加酸浸除杂后的样品分别命名为KB、JJ、SJ、JJSJ。

将除杂产物在氮气气氛下置于管式炉中进行高温碳化。高温碳化条件为:以5℃/min升温至1400℃,保温2h,继续通氮气,随炉冷却至室温后得到竹基硬炭材料,不同除杂工艺制备的硬炭材料分别命名为KB-HC、JJ-HC、SJ-HC、JJSJ-HC。

碱浸条件为:将待碱浸物料按照固液比0.1g/mL进行碱浸处理,氢氧化钠浓度5mol/L,温度90℃,处理时间3h,反应结束后抽滤,用去离子水洗涤至中性。酸浸条件为:将待酸浸物料按照固液比0.1g/mL进行酸浸处理,盐酸浓度1.5mol/L,温度40℃,处理时间3h,反应结束后抽滤,用去离子水洗涤至中性。

1.2 材料表征

通过电感耦合等离子体光谱仪(ICP)测试杂质含量;采用X射线衍射仪(XRD)表征材料物相结构;采用扫描电子显微镜(SEM)表征材料微观形貌;采用透射电子显微镜(TEM)观察材料晶体结构;采用比表面积及孔径分析仪(BET)测试材料比表面积和孔径。

1.3 电化学性能测试

将硬炭材料、聚偏氟乙烯(Super P)按质量比90:5:5均匀研磨混合,加入适量N-甲基吡咯烷酮作为溶剂调节黏度,将浆料均匀涂覆在铝箔表面,在90℃真空干燥箱中干燥12h。将干燥后的电极片冲切成直径12mm的圆形电极片,作为扣式电池的正极,并称量极片质量。采用直径15.6mm的钠片作为对电极和参比电极,玻璃纤维为隔膜,以1mol/L NaPF₆+100% DME为电解液,在充满氩气的手套箱中组装成2032型扣式半电池。将组装好的电池静置12h,使电解液充分渗透后进行储钠性能测试。用CT2001A蓝电测试系统进行充放电测试,电压0.001~2.0V。采用恒电流间歇滴定技术测

量钠离子的扩散系数,脉冲电流密度为30mA/g,持续30min后休息1h。用东华DH7000C电化学工作站进行循环伏安(CV)测试。

2 实验结果与讨论

2.1 除杂效果分析

不同除杂工艺所得硬炭材料的主要杂质元素含量见表1。由表1可知,未除杂的材料中含有Si、K、Na、Fe等杂质元素;碱浸除杂后,Si杂质含量降至0.033%,K杂质含量降至0.049%;酸浸除杂后,Fe、Ca、Na杂质含量分别降至0.042%、0.028%、0.066%。

表1 不同除杂工艺所得硬炭材料的主要杂质元素含量(质量分数)

样品编号	Fe	Ca	K	Na	Cr	P	Si
KB-HC	0.081	0.050	0.90	0.12	0.002 0	0.063	0.043
JJ-HC	0.070	0.055	0.049	0.23	0.001 2	0.060	0.033
SJ-HC	0.042	0.028	0.12	0.066	0.001 3	0.051	0.042
JJSJ-HC	0.033	0.028	0.053	0.062	/	0.050	0.034

注:“/”表示杂质含量低于检测浓度下限。

2.2 理化性质分析

图1为不同除杂工艺制备的硬炭材料SEM和TEM图片。SEM分析结果表明,不同除杂工艺制备的硬炭材料形状不规则,尺寸在5~50μm之间。TEM分析结果表明,所有样品均为无序结构,由短程的石墨化畴及其围绕而成的闭孔结构组成。

不同除杂工艺制备的硬炭材料XRD图谱、吸脱附等温线及孔径分布见图2,不同除杂工艺制备的硬炭材料物性参数见表2。由图2(a)可知,所有硬炭材料在23°和43°附近有2个明显宽化的衍射峰,分别对应(002)和(100)的衍射晶面,是典型的非晶碳材料,表明硬炭材料中存在大量无序结构。经过除杂后,(002)晶面角度变小,层间距增大,基于Bragg方程和Scherrer公式计算,KB-HC、JJ-HC、SJ-HC、JJSJ-HC的层间距 d 和微晶尺寸 L_c 分别为0.380、0.385、0.381、0.386nm和1.205、1.133、1.120、1.094nm。结果表明,经过碱浸处理,硬炭材料层间距变大,因为NaOH作为还原剂会与含氧官能团(—OH、—COO⁻等)反应生成气体^[23]。由图2(b)、(c)可知,所有样品均为典型的Ⅲ型等温曲线,KB-HC、JJ-HC、SJ-HC和JJSJ-HC的比表面积分别为4.68、1.61、1.88和1.67m²/g。由表2可知,酸浸和/或碱浸除杂均能降低比表面积和总孔体积。

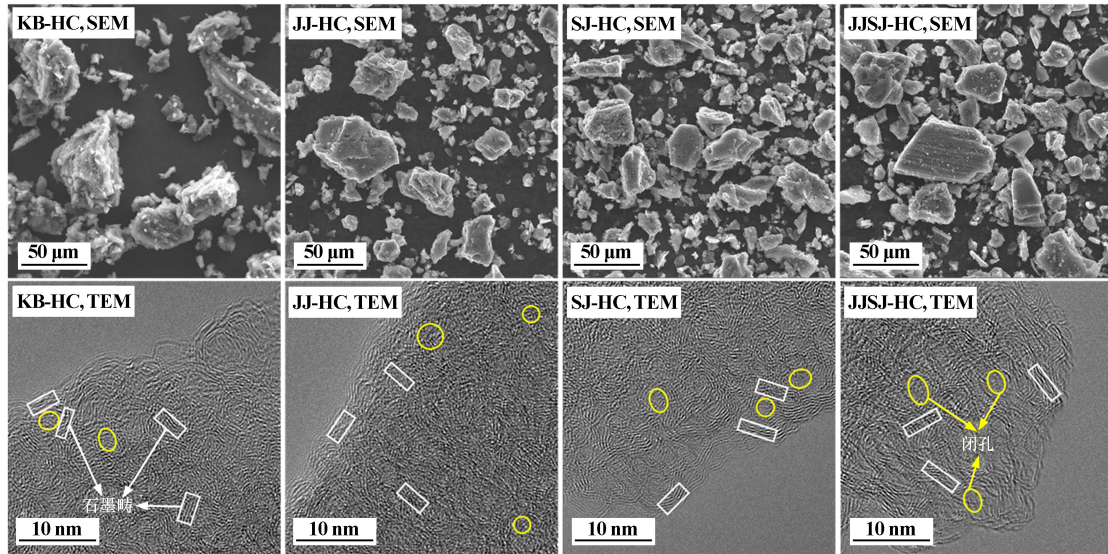
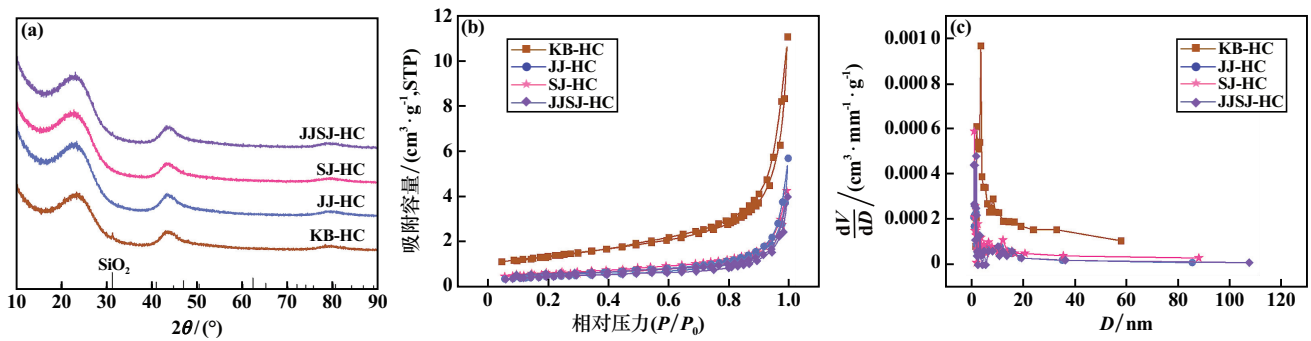


图1 不同除杂工艺制备的硬炭材料 SEM 图和 TEM 图

Fig.1 SEM and TEM images of hard carbon materials prepared by different impurity removal treatment



(a) XRD 图谱; (b) 吸脱附等温线; (c) 孔径分布图

图2 不同除杂工艺制备的硬炭材料 XRD 图谱、吸脱附等温线及孔径分布

Fig.2 XRD patterns, adsorption-desorption isotherms and pore size distribution curves of hard carbon materials prepared by different impurity removal treatment

表2 不同除杂工艺制备的硬炭材料物性参数

Table 2 Physical parameters of hard carbon materials prepared by different impurity removal treatment

样品	XRD 分析		BET 分析		
	层间距 d/nm	微晶尺寸 L_c/nm	比表面积 $S/(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	孔径 D/nm	孔体积 $V/(\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$
KB-HC	0.380	1.205	4.68	12.65	0.014 8
JJ-HC	0.385	1.133	1.61	16.14	0.006 5
SJ-HC	0.381	1.120	1.88	13.20	0.006 2
JJSJ-HC	0.386	1.094	1.67	12.71	0.005 3

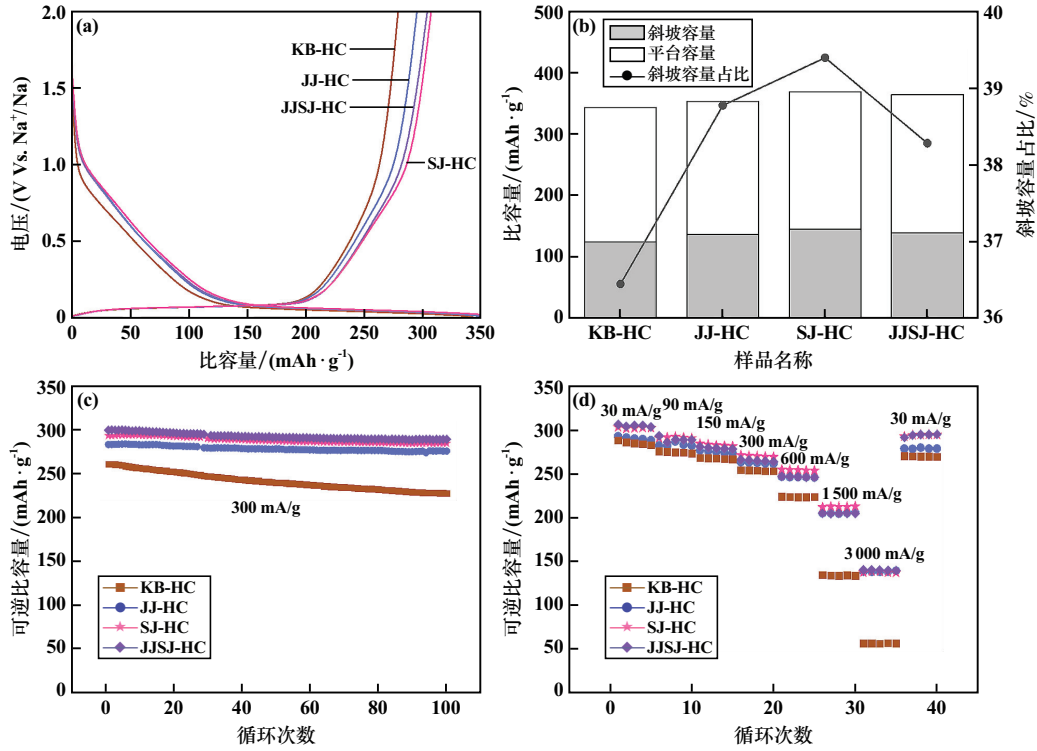
酸碱处理后,预碳化料的微孔结构被破坏、孔隙结构被刻蚀^[18],导致总孔体积减小、比表面积降低、孔径增大。除此之外,K元素在高温碳化阶段会逸出形成孔隙^[24],除杂处理后去除了大量的K元素,有效避免了比表面积的增加。

2.3 硬炭材料的储钠性能

不同除杂工艺制备的硬炭材料储钠性能见图3和表3。由图3和表3可知,在30 mA/g电流密度下,KB-HC、JJ-HC、SJ-HC、JJSJ-HC的首次库仑效率和可逆比容量分别为81.95%、84.12%、83.87%、83.98%和280.52、296.59、308.96、305.66 mAh/g。相对未除杂样品,经过碱浸、酸浸、碱浸+酸浸处理,可逆比容量分别提高了16.07、28.44、25.14 mAh/g。这是由于酸碱处理后,硬炭材料比表面积降低,可减少固体电解质界面的形成,提高首圈库仑效率。此外,除杂过程去除了Fe、Ca、Si等杂质元素,提高了可逆比容量。KB-HC、JJ-HC、SJ-HC和JJSJ-HC的斜坡容量(电压高于0.1 V)分别为124.78、136.70、145.02和139.24 mAh/g,斜坡容量占比分布为36.45%、38.77%、39.39%和38.28%。经过酸碱刻蚀,材

料表面活性位点增加^[21],斜坡容量提升,平台容量基本不变,斜坡容量占比提高,可逆比容量提升。在 300 mA/g 电流密度下循环 100 圈,KB-HC、JJ-HC、SJ-HC 和 JJSJ-HC 的可逆比容量分别为 228.45、275.81、284.59 和 289.03 mAh/g,容量保持率分别为 87.51%、97.42%、96.57% 和 97.03%。经过酸碱处理,去除对循环性能影响较大的

Si、Ca 等元素^[18],材料循环性能有所提升。3 000 mA/g 电流密度下,KB-HC、JJ-HC、SJ-HC 和 JJSJ-HC 的可逆比容量分别为 57.60、138.94、138.20 和 140.66 mAh/g。相比 KB-HC,经过酸碱处理制备的硬碳材料倍率性能得到了改善,归因于层间距增大(与 TEM 分析结果相一致)和表面活性位点增加(斜坡容量提升)。



(a) 首圈充放电曲线; (b) 首圈放电容量分布; (c) 循环性能; (d) 倍率性能
图 3 不同除杂工艺制备的硬碳材料储钠性能

Fig. 3 Sodium storage performance of hard carbon materials prepared by different impurity removal treatment

表 3 不同除杂工艺制备的硬碳材料储钠性能

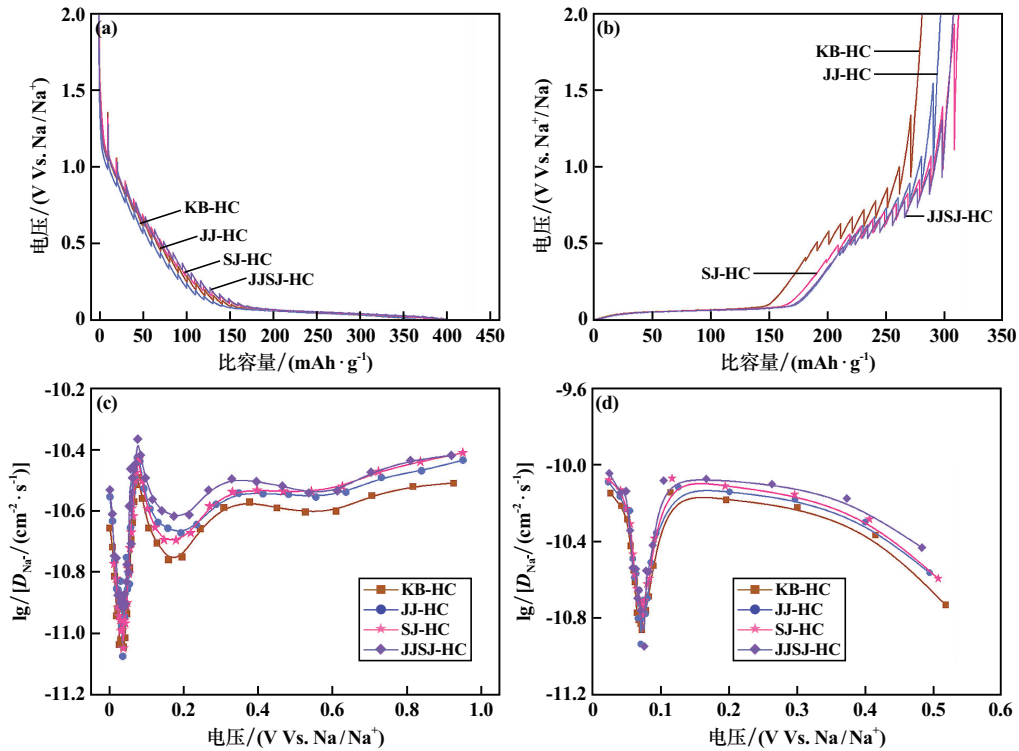
Table 3 Sodium storage performance of hard carbon materials prepared by different impurity removal treatment

样品	首次库仑效率/%	可逆比容量/ (mAh · g ⁻¹)	斜坡容量/ (mAh · g ⁻¹)	容量保持率 (300 mA/g, 100 圈)/%	3 000 mA/g 平均可逆比容量/ (mAh · g ⁻¹)
KB-HC	81.95	280.52	124.78	87.51	57.60
JJ-HC	84.12	296.59	136.70	97.42	138.94
SJ-HC	83.87	308.96	145.02	96.57	138.20
JJSJ-HC	83.98	305.66	139.24	97.03	140.66

不同除杂工艺制备的硬碳材料 GITT 曲线和钠离子扩散系数见图 4。充放电过程 GITT 电位曲线可以表征材料充放电过程的动力学特性。Na⁺ 扩散系数 (D_{Na^+}) 可根据 Fick 第二定律计算得到。从图 4 可以看出,放电过程中,在电压高于 0.1 V 的斜坡区域, D_{Na^+} 相对较大,在电压低于 0.1 V 的平台区域, D_{Na^+} 呈现先下降后升高的趋势。相比 KB-HC,在电压高于 0.1 V 的斜坡区域,经过除杂处理制备的硬碳材料钠离子扩

散系数更高,这是酸碱刻蚀使材料表面活性位点增加所致。

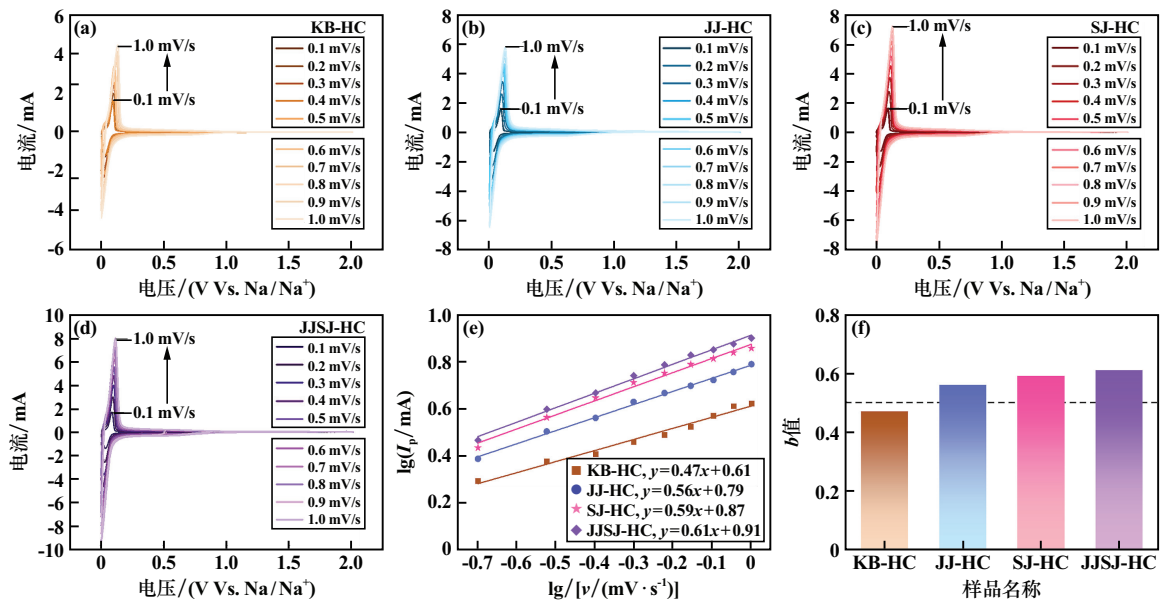
图 5 为不同除杂工艺制备的硬碳材料在不同扫描速率下的 CV 曲线及拟合关系。从图 5(a)~(d) 可以看出,经过除杂处理制备的硬碳材料表现出更高的电流强度,表明钠离子储存反应更强烈^[25],这与可逆比容量提升的规律一致。随着扫描速率增大,氧化还原峰强度增强。分析峰值电流 (I_p) 与扫描速率 (v) 之间的关系,经



(a) GITT 放电曲线; (b) GITT 充电曲线; (c) 放电过程钠离子扩散系数; (d) 充电过程钠离子扩散系数

图4 不同除杂工艺制备的硬炭材料 GITT 曲线和钠离子扩散系数

Fig. 4 GITT curves and Na^+ diffusion coefficient of hard carbon materials prepared by different impurity removal treatment



(a)~(d) 不同扫速的 CV 曲线; (e) $\lg I_p$ - $\lg v$ 线性关系; (f) b 值

图5 不同除杂工艺制备的硬炭材料 CV 曲线和拟合曲线

Fig. 5 CV curves and fitted curves of hard carbon materials prepared by different impurity removal treatment

过拟合计算,KB-HC、JJ-HC、SJ-HC 和 JJSJ-HC 的 b 值分别为 0.47、0.56、0.59 和 0.61, JJ-HC、SJ-HC、JJSJ-HC 的 b 值均高于 KB-HC,这归因于酸碱刻蚀使硬炭表面活性位点增加,钠离子扩散速率增大,与 GITT 结果一致。

3 结语

1) 经过除杂处理,竹基硬炭材料中杂质含量有效降低,材料比表面积降低、层间距增大。与未除杂硬炭

材料相比,除杂后硬碳材料可逆比容量更高、循环稳定性更好、倍率性能更佳、钠离子扩散速率更快。

2) 综合考虑生产成本、工艺流程和储钠性能等因素,确定酸浸为适宜的硬碳材料除杂工艺,在 30 mA/g 电流密度下,制备的硬碳材料可逆比容量为 308.96 mAh/g,首次库仑效率为 83.87%,在 300 mA/g 电流密度下循环 100 圈可逆比容量为 284.59 mAh/g,容量保持率为 96.57%,表现出良好的储钠性能。

参考文献(References):

- [1] 王海波,张春强,林虹,等. 2024 年中国电池行业运行情况[J]. 电池, 2025,55(1):11-18.
WANG Haibo, ZHANG Chunqiang, LIN Hong, et al. Operation condition of Chinese battery industry in 2024[J]. Battery Bimonthly, 2025,55(1):11-18.
- [2] 宋婉静,张晓昱. 锂离子电池产业的成本与前景分析[J]. 电池, 2025,55(1):141-145.
SONG Wanjing, ZHANG Xiaoyu. Cost and prospect analysis of the Li-ion battery industry[J]. Battery Bimonthly, 2025,55(1):141-145.
- [3] 夏向阳,易浩民,陈向群,等. 配置储能装置的光伏预测配网优化研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018,49(10):2618-2624.
XIA Xiangyang, YI Haomin, CHEN Xiangqun, et al. Optimal operation of photovoltaic forecast distribution network based on information fusion theory[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018,49(10):2618-2624.
- [4] 周玉,侯晓川,王志杰,等. 磷掺杂硅碳负极材料的制备及性能研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(2):131-134.
ZHOU Yu, HOU Xiaochuan, WANG Zhijie, et al. Preparation and properties of phosphorus doped Si@C anode material[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(2):131-134.
- [5] 孙玉树,杨敏,师长立,等. 储能的应用现状和发展趋势分析[J]. 高电压技术, 2020,46(1):80-89.
SUN Yushu, YANG Min, SHI Changli, et al. Analysis of application status and development trend of energy storage[J]. High Voltage Engineering, 2020,46(1):80-89.
- [6] 陈国文,王畅,杨程响,等. 钠离子电池 P2 型层状金属氧化物研究进展[J]. 电池, 2025,55(1):172-177.
CHEN Guowen, WANG Chang, YANG Chengxiang, et al. Research progress in P2-type layered metal oxides for sodium-ion battery[J]. Battery Bimonthly, 2025,55(1):172-177.
- [7] 曹斌,李喜飞. 钠离子电池炭基负极材料研究进展[J]. 物理化学学报, 2020,36(5):89-104.
CAO Bin, LI Xifei. Recent progress on carbon-based anode materials for Na-ion batteries[J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2020,36(5):89-104.
- [8] 何蕊娜,王海燕,唐有根,等. 钠离子电池负极材料[J]. 化学进展, 2014,26(4):572-581.
HE Hanna, WANG Haiyan, TANG Yougen, et al. Current studies of anode materials for sodium-ion battery[J]. Progress in Chemistry, 2014,26(4):572-581.
- [9] 刘创,卢海燕,曹余良. 钠离子电池合金类负极材料的研究进展[J]. 中国材料进展, 2017,36(10):718-727.
LIU Chuang, LU Haiyan, CAO Yuliang. Research progress on alloy anode materials for sodium ion batteries[J]. Materials China, 2017,36(10):718-727.
- [10] 曹余良. 钠离子电池机遇与挑战[J]. 储能科学与技术, 2020,9(3):757-761.
CAO Yuliang. The opportunities and challenges of sodium ion battery[J]. Energy Storage Science and Technology, 2020,9(3):757-761.
- [11] 唐晶晶,李晓滢,陈言蹊,等. 钠离子电池生物质硬碳负极材料的研究进展[J]. 材料导报, 2024,38(15):87-99.
TANG Jingjing, LI Xiaoying, CHEN Yanxi, et al. Research progress of biomass based hard carbon anode materials for sodium ion batteries[J]. Materials Reports, 2024,38(15):87-99.
- [12] DING J, WANG H L, LI Z, et al. Peanut shell hybrid sodium ion capacitor with extreme energy: Power rivals lithium ion capacitors[J]. Energy & Environmental Science, 2015,8(3):941-955.
- [13] LUO W, SCHARDT J, BOMMIER C, et al. Carbon nanofibers derived from cellulose nanofibers as a long-life anode material for rechargeable sodium-ion batteries[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2013,1(36):10662-10666.
- [14] 左宇程,吉闫,张京涛,等. 花生壳硬碳孔结构调控及储钠性能研究[J]. 现代化工, 2024,44(8):110-114.
ZUO Yucheng, JI Yan, ZHANG Jingtao, et al. Study on regulation of pore structure and sodium storage performance of peanut shell-based hard carbon[J]. Modern Chemical Industry, 2024,44(8):110-114.
- [15] 邹飞杨,吉闫,左宇程,等. 竹基生物质硬碳的制备与储钠性能研究[J]. 现代化工, 2024,44(11):98-103.
ZOU Feiyang, JI Yan, ZUO Yucheng, et al. Preparation of bamboo-based biomass hard carbon and study on its sodium storage property[J]. Modern Chemical Industry, 2024,44(11):98-103.
- [16] 钟家宝,李瑀,王玲,等. 梧桐果壳衍生硬碳用作钠离子电池负极材料[J]. 功能高分子学报, 2022,35(5):408-416.
ZHONG Jiabao, LI Yu, WANG Ling, et al. Sycamore husk-derived hard carbon as anode material for sodium-ion batteries[J]. Journal of Functional Polymers, 2022,35(5):408-416.
- [17] 张舰,陈旭,史世和,等. 椰壳炭作为锂离子电池负极材料的电化学性能研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(4):169-173.
ZHANG Jian, CHEN Xu, SHI Shihe, et al. Electrochemical performance of coconut shell carbon as anode material for lithium-ion batteries[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(4):169-173.
- [18] LEI X H, ZHANG L, GUO X Y, et al. Regulation of composition, microstructure, and pore structure of biomass-based hard carbon to boost the sodium storage performance[J]. Journal of Energy Storage, 2024,101:113792.
- [19] WANG C C, SU W L. Understanding acid pretreatment of lotus leaves to prepare hard carbons as anodes for sodium ion batteries[J]. Surface and Coatings Technology, 2021,415:127125.

化物含量逐渐提高,碳化物尺寸增大,540 ℃回火的 W6Mo5Cr4V2 钢组织中碳化物尺寸细小、分布均匀。

3) 1 160 ℃淬火态 W6Mo5Cr4V2 钢经过 3 次 540 ℃回火处理后,其组织为马氏体、MC 和 M_6C 碳化物,硬度为 64.2HRC。W6Mo5Cr4V2 钢的最佳热处理工艺为:1 160 ℃×30 min 淬火+540 ℃×1 h 回火(3 次)。

参考文献(References):

- [1] YUAN K, WU H C, YANG L, et al. Experiments, analysis and parametric optimization of roll grinding for high-speed steel W6Mo5Cr4V2[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020,109(5):1275-1284.
- [2] RASTEGAEV I A, RASTEGAEVA I I, MERSON D L, et al. The wear features of a plasma thin-film coating on high-speed steel[J]. Journal of Friction and Wear, 2020,41(2):160-168.
- [3] 王琦,卢军,杨威,等. 高速钢降温淬火、回火工艺研究[J]. 热处理技术与装备, 2013,34(4):16-18.
WANG Qi, LU Jun, YANG Wei, et al. Study on cooling quenching and tempering process of high speed steel[J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2013,34(4):16-18.
- [4] 卢军,王琦,蔡红,等. W6Mo5Cr4V2 高速钢深冷处理研究[J]. 热处理, 2009,24(4):40-44.
LU Jun, WANG Qi, CAI Hong, et al. Influence of deep cryogenic treatment on properties of W6Mo5Cr4V2 high speed steel[J]. Heat Treatment, 2009,24(4):40-44.
- [5] 何星,李炎铮,雷雄辉,等. 热处理工艺对 CM2 高速钢组织性能的影响[J]. 上海金属, 2019,41(1):66-70.
-
- (上接第 163 页)
- [20] WANG X K, SHI J, MI L W, et al. Hierarchical porous hard carbon enables integral solid electrolyte interphase as robust anode for sodium-ion batteries[J]. Rare Metals, 2020,39(9):1053-1062.
- [21] WANG J C, ZHAO J H, HE X X, et al. Hard carbon derived from hazelnut shell with facile HCl treatment as high-initial-coulombic-efficiency anode for sodium ion batteries[J]. Sustainable Materials and Technologies, 2022,33:e00446.
- [22] 张畅,解强,沙雨桐,等. 低灰低硅竹炭的制备及衍生硬炭的电化学性能[J]. 化工学报, 2025,76(6):3073-3083.
ZHANG Chang, XIE Qiang, SHA Yutong, et al. Preparation of bamboo char with low ash and silicon content and electrochemical properties of its derived hard carbon[J]. CIESC Journal, 2025,76(6):3073-3083.
- [23] 汪昆平,徐乾前. 几种不同处理方法对活性炭表面化学性质的影响[J]. 环境工程学报, 2012,6(2):373-380.
WANG Kunping, XU Qianqian. Effect of several different treatment methods on surface chemical properties of activated carbon[J]. Chinese

- Journal of Environmental Engineering, 2012,6(2):373-380.
- [24] ZHANG Y H, WU C, CHEN Q H, et al. Revealing the structural influence mechanism of intrinsic potassium/calcium elements on bio-waste-derived hard carbon for sodium-ion batteries[J]. Chemical Communications, 2024,60(91):13380-13383.
- [25] 王磊,杨程,高彦峰,等. 菠萝蜜核衍生硬碳的制备与储钠机理[J]. 广州化学, 2024,49(4):36-41.
WANG Lei, YANG Cheng, GAO Yanfeng, et al. Preparation of hard carbon derived from jackfruit seeds and its mechanism of sodium storage[J]. Guangzhou Chemistry, 2024,49(4):36-41.
- HE Xing, LI Yanzheng, LEI Xionghui, et al. Effect of heat treatment process on microstructure and properties of CM2 high speed steel[J]. Shanghai Metals, 2019,41(1):66-70.
- [6] 李亮军,张家敏,迟宏宵,等. 热处理工艺对 M2 高速钢组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2021,46(9):72-79.
LI Liangjun, ZHANG Jiamin, CHI Hongxiao, et al. Influence of heat treatment process on microstructure and properties of M2 high speed steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2021,46(9):72-79.
- [7] 史术华,高擎,钱亚军. 低温回火对低碳马氏体超高强钢组织及力学性能的影响[J]. 矿冶工程, 2023,43(6):174-178.
SHI Shuhua, GAO Qing, QIAN Yajun. Effect of low-temperature tempering on microstructure and mechanical properties of low-carbon martensitic ultra-high strength steel[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(6):174-178.
- [8] LI J J, YAN X G, LIANG X Y, et al. Influence of different cryogenic treatments on high-temperature wear behavior of M2 steel[J]. Wear, 2017,376-377:1112-1121.
- [9] 李敏,姚玉梅,李俊杰,等. 淬火-配分处理对齿轮轴用钢组织性能的影响[J]. 矿冶工程, 2024,44(6):170-174.
LI Min, YAO Yumei, LI Junjie, et al. Effect of quenching and partitioning treatment on microstructure and properties of steel for gear shafts[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(6):170-174.

引用本文:刘冬,陶军,匡园. 热处理工艺对 W6Mo5Cr4V2 钢组织与硬度的影响[J]. 矿冶工程, 2025,45(4):164-167.

LIU Dong, TAO Jun, KUANG Yuan. Effect of heat treatment on microstructure and hardness of W6Mo5Cr4V2 steel [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(4):164-167.

引用本文:杜浩杰,张磊,王亲猛,等. 竹基硬炭负极材料不同除杂工艺及其储钠性能研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(4):158-163.

DU Haojie, ZHANG Lei, WANG Qimmeng, et al. Sodium storage performance of bamboo-derived hard carbon materials prepared by different impurity removal processes [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(4):158-163.