

MXene负载棉花生物炭作为锂离子电池负极材料的电化学性能^①

白世伟¹, 唐正芳², 蔡向兵², 覃子皓², 杨波¹, 吴千惠¹, 廖芝建¹, 刘洁群^{1,2}, 钟胜奎^{1,2}

(1.海南热带海洋学院 海洋科学技术学院, 崖州湾创新研究院, 海南 三亚 572022; 2.广西机电职业技术学院绿色建筑与低碳技术学院, 广西 南宁 530007)

摘要: 采用改性酸刻蚀法和高温碳化法分别制备了MXene材料及棉花生物炭材料。通过SEM与XRD表征,筛选出MXene修饰棉花生物炭的适宜质量比,并进一步对材料进行充放电测试、循环伏安测试及交流阻抗测试,研究材料的电化学性能。结果显示, MXene材料在0.1 A/g电流密度下的首次放电比容量为434.3 mAh/g,而MXene/棉花生物炭(质量比1:3)复合材料在0.1 A/g电流密度下的首次放电比容量可达到1486.60 mAh/g,该复合材料具有优异的电化学循环性能、倍率性能以及电导率,为MXene在锂离子电池中的应用提供了借鉴。

关键词: 锂离子电池; MXene; 生物炭材料; 负极材料; 复合材料

中图分类号: TM911

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2025.03.030

文章编号: 0253-6099(2025)03-0180-05

Electrochemical Performance of MXene-Coated Cotton-Derived Biochar as Anode Material for Lithium-Ion Batteries

BAI Shiwei¹, TANG Zhengfang², CAI Xiangbing², QIN Zihao², YANG Bo¹, WU Qianhui¹, LIAO Zhijian¹,
LIU Jiequn^{1,2}, ZHONG Shengkui^{1,2}

(1. School of Marine Science and Technology, Yazhou Bay Innovation Institute, Hainan Tropical Ocean University, Sanya 572022, Hainan, China; 2. School of Green Building and Low-Carbon Technology, Guangxi Technological College of Machinery and Electricity, Nanning 530007, Guangxi, China)

Abstract: MXene and cotton-derived biochar were prepared by modified acid etching and high-temperature carbonization, respectively. Based on their characterization with SEM and XRD, a suitable mass ratio of MXene to the cotton-derived biochar for modification purpose was determined. The electrochemical properties of the materials were further explored by performing charge-discharge and cyclic voltammetry tests, and using electrochemical impedance spectroscopy. It is shown that the MXene delivers an initial discharge specific capacity of 434.3 mAh/g at a current density of 0.1 A/g. A composite with MXene and cotton-derived biochar in a mass ratio of 1:3 can deliver an initial discharge specific capacity of 1486.60 mAh/g at 0.1 A/g, exhibiting excellent cycling performance, rate capability and electrical conductivity, which can provide a reference for application of MXene in lithium-ion batteries.

Key words: lithium-ion battery; MXene; biochar; anode material; composite material

MXene是2D过渡金属碳(氮)化物,属于新型二维材料家族的一员^[1-3],具有与石墨烯相似的层状结构以及金属化合物的特性^[4-7]。得益于化学稳定性高、导电性高、离子扩散快、与Li的转化反应电位低等优势,金属碳/氮化物MXene具有良好的市场应用前景。尽

管如此,单一MXene材料能量密度较低,无法满足锂离子电池日益增长的高能量密度要求^[8-12]。因此,在研究MXene材料锂储存特性的同时,许多学者将研究重点放在复合材料上,并取得了一些重要进展,从而使MXene材料能够更好地用于锂离子电池电极材料。

① 收稿日期: 2024-12-26

基金项目: 国家自然科学基金(52164029,52464033)

作者简介: 白世伟(2000—),男,山西朔州人,硕士研究生,主要研究方向为锂离子电池负极材料。E-mail: Baisv4827@163.com

通信作者: 钟胜奎(1974—),男,湖南邵阳人,教授,主要研究方向为海洋船舶动力电池材料、新能源材料电催化等。E-mail: zskui74@163.com

生物炭作为碳材料的一种,继承了传统碳材料安全性高和循环寿命长的优势,同时保留了生物炭所独有的能量密度大、比容量高、导电性好的特点^[12-15]。棉花生物炭作为生物质衍生炭材料的一种,因其表面孔隙结构丰富、表面功能基团多、离子交换能力强、价格低廉受到广泛关注^[15-18]。因此,用 MXene 负载棉花生物炭有望改善 MXene 的理论容量低、易氧化、易堆积的问题。

本文通过 MXene 负载棉花生物炭材料,获得了一种兼具高比容量以及高稳定性的复合材料,为开发高性能锂离子电池电极材料提供了新思路。

1 实验

1.1 材料制备

1.1.1 MXene($Ti_3C_2T_x$)和棉花生物炭材料的制备

本文通过改性酸刻蚀法制备 $Ti_3C_2T_x$ 。在 40 mL HCl(9 mol/L)溶液中加入 2.0 g LiF,搅拌 30 min 使其充分溶解。接着在溶液中缓慢加入 2.0 g Ti_3AlC_2 粉末搅拌 24 h。对所得溶液用去离子水离心至上清液 $pH \geq 6$,最后将沉淀物在 60 °C 下真空干燥,可得到产物 $Ti_3C_2T_x$ 。

将棉花剪碎并放入管式炉中,在 450 °C 的氮气气氛下保温 1 h 后,继续在 850 °C 的氮气气氛中保温 2 h,冷却至室温,得到棉花生物炭材料。

1.1.2 MXene/棉花生物炭材料的制备

首先向 50 mL 十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)中加入 0.1 g $Ti_3C_2T_x$,超声 30 min 使其充分混合。超声完成后向混合溶液中加入 0.1 g 棉花生物炭,搅拌 2 h 后用去离子水和无水乙醇交替离心至上清液呈中性($pH \geq 6$)。最后将沉淀物在 60 °C 下真空干燥,得到 MXene/Cotton Carbon[记作 $M@CC(1:1)$]。 $M@CC(1:2)$ 与 $M@CC(1:3)$ 的制备条件相同,只需将棉花生物炭质量分别替换为 0.2 与 0.3 g。

1.2 材料表征及电化学性能测试

采用 X 射线衍射仪(XRD)对材料的物相和结构进行分析,采用扫描电子显微镜(SEM)观察样品的微观形貌。

将所需组件(正极壳、电极片、隔膜、负极壳)置于手套箱的过渡舱中清洗 3 次,以确保手套箱内环境的 O_2 、 H_2O 含量均小于 1×10^{-6} ,防止锂片与电解液($LiPF_6$)氧化失效。按顺序叠放正极片、隔膜和负极片,注入适量电解液,确保充分浸润极片和隔膜。盖上盖,确保密封圈到位,使用压片机将上下壳压紧密封,防止电解液泄漏或外部污染物进入,完成电池组装。将装配完成的电池取出静置 8 h 后置于测试装置上进

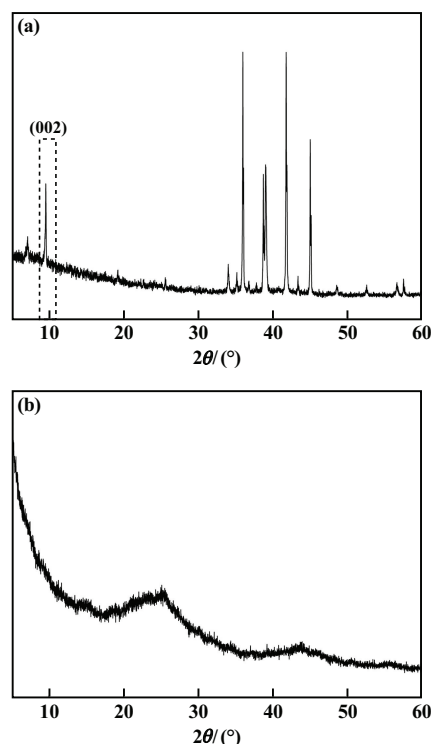
行测试。

采用 Neware CT3008 型电池测试系统在 25 °C 下进行充放电循环测试。采用辰华 CHI760E 型电化学工作站进行循环伏安测试(CV)以及交流阻抗测试(EIS)。

2 结果与讨论

2.1 材料的结构和形貌表征

MXene 和棉花生物炭的 XRD 图谱如图 1 所示。MXene 的 XRD 图谱在 10° 处出现了明显的衍射峰,对应于 $Ti_3C_2T_x$ 的(002)晶面(PDF#52-0875), $35^\circ \sim 45^\circ$ 之间的峰归属于前驱体中 Al 元素的峰^[3]。刻蚀过程中难免会存在刻蚀不完全的情况,从而使得一部分 Al 元素得以保存。此外 XRD 图谱中衍射峰普遍较为尖锐,说明 MXene 材料的结晶度高。棉花生物炭的 XRD 图谱在 25.0° 处存在明显的衍射峰,对应于棉花生物炭的(002)晶面(PDF#47-1743)^[12]。



(a) MXene; (b) 棉花生物炭

图 1 不同材料的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD patterns of different materials

$M@CC$ 复合材料的 XRD 图谱如图 2 所示。3 种样品在 10° 处都出现了明显的衍射峰,该峰主要由 MXene 提供。 $M@CC(1:3)$ 样品在 25° 处也出现了较为明显的衍射峰,根据之前的分析,该峰由棉花生物炭提供,这也证明复合材料的成功制备。 $M@CC(1:2)$

样品在 25° 处的衍射峰强度明显降低,这可能是棉花生物炭含量减少,使得此处峰值强度降低。M@CC(1:1) 样品该处的峰几乎消失。

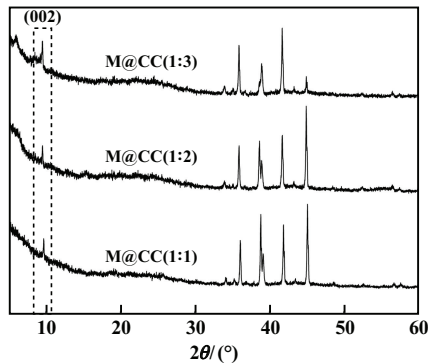
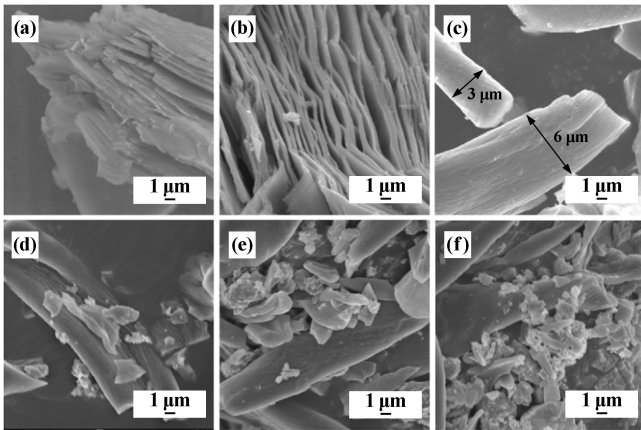


图2 M@CC复合材料的XRD图谱

Fig.2 XRD patterns of M@CC composites

不同样品的SEM图见图3。由图3可见, MXene样品是分布均匀的手风琴状材料, 粒径大小 3 μm。棉花生物炭表面光滑, 直径 3~6 μm, 呈圆柱形貌, 其表面纹理盘根交错, 为MXene的附着提供了更稳定的活性位点。MXene与棉花生物炭复合之后, 随着棉花生物炭比例增加, 复合材料呈现更加均匀的分布, MXene锚定在光滑的纤维状棉花生物炭表面。



(a), (b) MXene; (c) 棉花生物炭; (d) M@CC(1:1);

(e) M@CC(1:2); (f) M@CC(1:3)

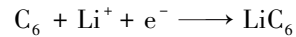
图3 不同样品的SEM图

Fig.3 SEM images of different samples

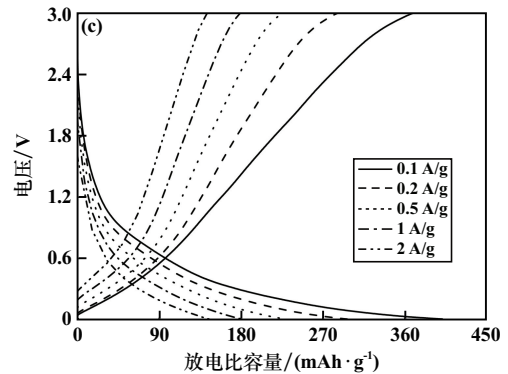
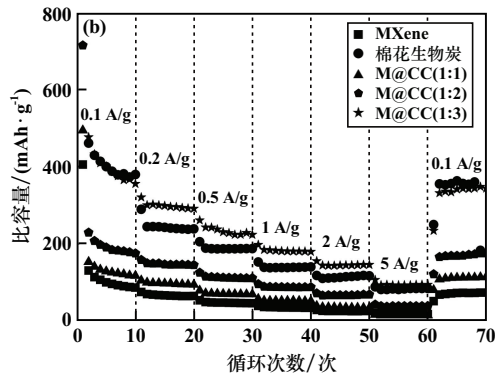
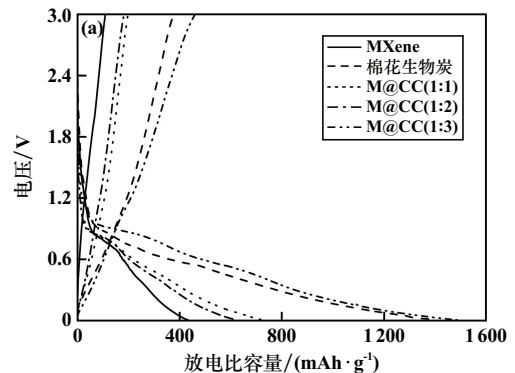
2.2 恒电流充放电测试

各材料的循环性能图如图4所示。从图4(a)可见, 在 0.1 A/g 电流密度下, MXene 的首次放电比容量为 434.3 mAh/g, 棉花生物炭的首次放电比容量为 1384.2 mAh/g; M@CC(1:3) 材料的首次放电比容量最高, 达到了 1486.6 mAh/g。这可能归因于MXene的末端非活性位点在合成过程中被取代, 从而使得材料的比容量得到

显著提升, 同时棉花生物炭多孔的特性也得以保存, 两者的协同作用使得复合材料的比容量远高于单一材料^[6,12]。从图4(b)可以看到, M@CC(1:3) 材料表现出最高的比容量; M@CC(1:2) 和 M@CC(1:1) 材料的比容量反而低于棉花生物炭的比容量, 这是由于在两材料复合比例没有达到 1:3 时, MXene 的非活性位点没有充分与棉花生物炭材料表面丰富的活性位点相结合。由图4(c)可见, 在 0.4~0.8 V 之间出现了倾斜的放电平台。该放电平台反映了锂离子从复合材料中脱出的过程, 化学反应^[17]如下:



M@CC(1:3) 材料的放电比容量较该材料的首次放电比容量显著降低, 这可以归因于SEI膜的形成。



(a) 各材料的首次充放电曲线; (b) 各材料的倍率性能图;

(c) M@CC(1:3) 在不同电流密度下的首次充放电曲线

图4 各材料的循环性能图

Fig.4 Cycling performance diagrams of each material

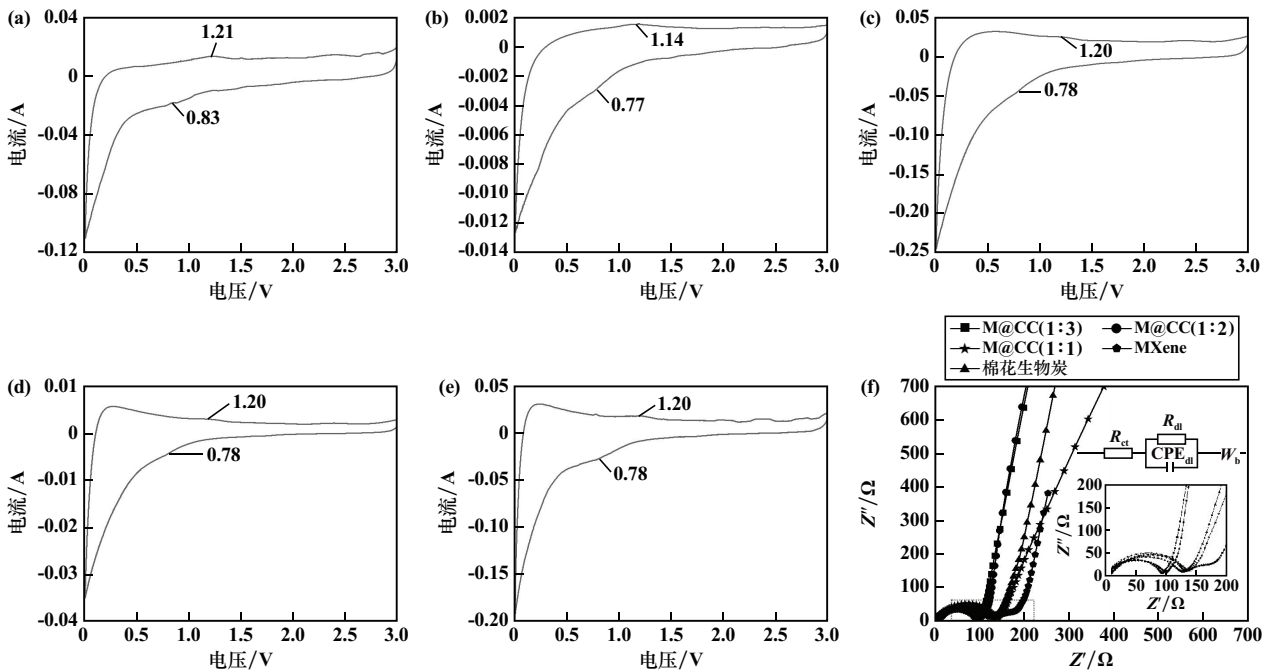
该材料在 0.1 A/g 电流密度下可逆比容量达到了 380 mAh/g。M@CC(1:3) 材料在 0.1、0.2、0.5、1 和 2 A/g 电流密度下的首次放电比容量分别为 1486.6、321.1、261.3、198.1 和 155.5 mAh/g,倍率性能优异。随着棉花生物炭材料增加,其与 MXene 表面官能团的连接点增加,同时 MXene 具有高的电子电导率和离子扩散速率,有利于电子和离子的快速传输,因此该复合材料拥有优异的倍率性能。而按其他比例制备的 M@CC 复合材料比容量低于 M@CC(1:3) 材料比容量。

2.3 循环伏安和交流阻抗测试

图 5 为各样品在扫描速率 0.2 mV/s 下的循环伏安曲线和交流阻抗图谱。MXene 材料有 1 个还原峰 (1.21 V) 和 1 个氧化峰 (0.83 V),棉花生物炭材料有 1 个还原峰 (1.14 V) 和 1 个氧化峰 (0.77 V)。通常 CV 曲线中的每个氧化峰都对应放电曲线中的一个放电平台,这一点在图 4 中也能明显看到, MXene 在 0.83 V 处出现了倾斜放电平台,而棉花生物炭在 0.77 V 左右出现倾斜平台。3 种复合材料的 CV 曲线图像基本相

似,还原峰的位置都出现在 1.20 V 左右,氧化峰则出现在 0.78 V 左右。这一点在图 4 中的放电曲线中也能够观察到,三者都在 0.78 V 左右都出现了缓慢倾斜的放电平台;其中 M@CC(1:3) 材料的氧化峰强度最高,说明该材料的放电效果最好,放电平台最明显。

图 5(f) 中 R_{ct} 代表离子扩散电阻, R_{dl} 代表双电层电阻, CPE_{dl} 代表双电层电容, W_b 代表韦伯阻抗。可以观察到 5 种材料的图谱基本一致,都由一个圆弧加一条直线构成。一般情况下低频区域出现的容抗弧反映电荷转移过程,该过程主要由传荷控制,代表离子从材料向电解液转移的过程。出现在高频区的直线代表离子在电解液中的扩散过程,主要由扩散控制,能够反映离子扩散速率的快慢。M@CC(1:1) 材料的容抗弧半径几乎与棉花生物炭和 MXene 的容抗弧半径相同。M@CC(1:3) 材料的容抗弧半径最小,说明其阻抗值最小,在高频区的直线斜率最大,说明其离子扩散速率最快;可能是由于 MXene 出色的电导率提高了 M@CC(1:1) 材料的离子扩散速率。



(a) MXene; (b) 棉花生物炭; (c) M@CC(1:1); (d) M@CC(1:2); (e) M@CC(1:3); (f) 交流阻抗图谱及其等效电路图

图 5 各样品的循环伏安曲线和交流阻抗图谱

Fig.5 Cyclic voltammetry curves and AC impedance spectra of each material

3 结论

1) 采用改性酸刻蚀法制备了二维层状 MXene 材料,其形貌结构为均匀分布的多层状材料,在 0.1 A/g 电流密度下首次放电比容量达到 434.3 mAh/g,且具有

良好的倍率性能和较高的离子电导率;通过高温碳化法制备了棉花生物炭材料,其形貌结构为直径 3~6 μm 的光滑纤维状材料,在 0.1 A/g 电流密度下首次放电比容量达到 1384.2 mAh/g。

2) 通过调控 MXene 与棉花生物炭的质量比,得

到不同质量比的 MXene/棉花生物炭复合材料,棉花生物炭表面附着 MXene,使得复合材料展现出优异的电化学性能和循环稳定性。其中 M@CC(1:3) 复合材料具有良好的电化学性能,在 0.1 A/g 电流密度下首次放电比容量高达 1 486.6 mAh/g。该复合材料的电化学性能和循环稳定性相较于 MXene 或棉花生物炭材料均得到了显著提升。

3) 循环伏安测试结果表明, MXene 材料有 1 个还原峰(1.21 V)和 1 个氧化峰(0.83 V),棉花生物炭材料有 1 个还原峰(1.14 V)和 1 个氧化峰(0.77 V)。MXene 在 0.83 V 处出现了倾斜放电平台,而棉花生物炭在 0.77 V 左右出现倾斜平台。3 种不同质量比的 MXene/棉花生物炭复合材料还原峰的位置都出现在 1.2 V 左右,氧化峰则出现在 0.78 V 左右,均在 0.78 V 左右出现缓慢倾斜的放电平台。M@CC(1:3) 复合材料氧化峰强度最高,材料的放电效果最好;电荷转移电阻值最小,其离子扩散速率最快, MXene 出色的电导率提高了该复合材料的离子扩散速率。

参考文献(References):

- [1] 刘琦,郝思雨,冯东,等. 锂离子电池负极材料研究进展[J]. 复合材料学报, 2022,39(4):1446-1456.
LIU Qi, HAO Siyu, FENG Dong, et al. Research progress of anode materials for lithium ion battery[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(4):1446-1456.
- [2] 孙璇. $Ti_3C_2T_x$ MXene 基锂离子电池负极材料的制备、表征及其电化学性能研究[D]. 济南:济南大学, 2021.
SUN Xuan. Preparation, characterization and electrochemical performance study of $Ti_3C_2T_x$ MXene-based anode materials for lithium-ion batteries[D]. Jinan: University of Jinan, 2021.
- [3] 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.
- [4] 孟禄超,陈庆荣,吴春桃,等. 锂离子电池 $Li_2FeP_2O_7$ 正极材料的制备及其电化学性能[J]. 矿冶工程, 2022,42(1):136-139.
MENG Luchao, CHEN Qingrong, WU Chuntao, et al. Preparation and electrochemical performance of $Li_2FeP_2O_7$ as cathode materials for lithium-ion batteries[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022,42(1):136-139.
- [5] 朱晓泉. $Ti_3C_2T_x$ MXene 基复合物的制备及其性能研究[D]. 天津:天津大学, 2020.
ZHU Xiaoquan. Preparation and application of $Ti_3C_2T_x$ MXene-based composites[D]. Tianjin: Tianjin University, 2020.
- [6] 李江鹏,张晓萍,伍凌. Ti_3C_2 MXene 的制备及其电化学性能研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(6):198-201.
LI Jiangpeng, ZHANG Xiaoping, WU Ling. Preparation and electrochemical properties of Ti_3C_2 MXene[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021,41(6):198-201.
- [7] 罗茜,陆诗淇,徐泳康,等. 生物质炭复合材料 TiO_2/C 的一步制备及光催化性能[J]. 广东化工, 2021,48(22):32-33.
LUO Xi, LU Shiqi, XU Yongkang, et al. One-step preparation and photocatalytic properties of biomass carbon composite TiO_2/C [J]. Guangdong Chemical Industry, 2021,48(22):32-33.
- [8] 李辉,朱刚,张建卫,等. 二维 MXene 负载纳米金属及其氧化物构筑新型复合材料的研究进展[J]. 材料导报, 2022(9):1-17.
LI Hui, ZHU Gang, ZHANG Jianwei, et al. Recent advancement of novel composites based on two-dimensional MXene-supported nanometals and its oxides[J]. Materials Reports, 2022(9):1-17.
- [9] 孙丹,李伟,刘峥. 二维纳米材料 MXene 及其在锂离子电池中的应用研究进展[J]. 材料导报, 2021,35(15):15047-15055.
SUN Dan, LI Wei, LIU Zheng. Two-dimensional nanomaterial MXene and its research advances on applications in lithium-ion batteries[J]. Materials Reports, 2021,35(15):15047-15055.
- [10] 赵瑞正. MXene 基复合材料的可控制备及其电化学储能研究[D]. 济南:山东大学, 2020.
ZHAO Ruizheng. Controllable preparation and electrochemical energy storage performance on MXene-based composites[D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [11] 茹皓辉. 生物质碳源用作电极材料的可行性研究[D]. 株洲:湖南工业大学, 2017.
RU Haohui. Feasibility study of biomass carbon source used as electrode material[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2017.
- [12] 邹艳玲. 棉花生物炭磁改性及耦合菌藻共生反应器处理含抗生素废水研究[D]. 济南:山东师范大学, 2021.
ZOU Yanling. Study on the magnetic modification of cotton biochar and its enhancement to the bacterial-algal symbiosis reactor regards to the treatment of antibiotics containing wastewater[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2021.
- [13] 梁晨. 用于超级电容器电极的生物质炭及其复合材料的制备与性能研究[D]. 长春:吉林大学, 2019.
LIANG Chen. Research on the preparation and property of biochar and their composites used in supercapacitor electrode[D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [14] 傅寒立. 虾壳源生物质炭及其 MnO_2 复合材料的制备与超级电容特性[D]. 杭州:浙江工业大学, 2020.
FU Hanli. Preparation and supercapacitor properties of shrimp shell-derived carbons and their MnO_2 composites[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2020.
- [15] 李喜德,熊烈强,孙亮波,等. 类石墨烯 MXene 材料制备及相关性能研究现状[J]. 化工新型材料, 2020,48(8):258-262.
LI Xide, XIONG Lieqiang, SUN Liangbo, et al. Research on status of preparation and related property of graphene-like MXene material[J]. New Chemical Materials, 2020,48(8):258-262.
- [16] 刘蕊,别永超,王媛,等. 二维晶体 MXene 的制备与研究进展[J]. 化学与黏合, 2018,40(4):294-297.
LIU Rui, BIE Yongchao, WANG Yuan, et al. Preparation and research progress of two-dimensional crystal MXene[J]. Chemistry and Adhesion, 2018,40(4):294-297.

(下转第 190 页)

- 低碳钢组织和力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2023,48(1): 155-162.
- ZHANG Jincheng, SUN Shenghui, CAI Minghui, et al. Effect of TM-CP on microstructure and mechanical properties of Ti-Mo-Nb microalloyed low carbon steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2023,48(1): 155-162.
- [2] 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.
- [3] BIKMUKHAMETOV I, BELADI H, WANG J T, et al. Interface characteristics and precipitation during the austenite-to-ferrite transformation of a Ti-Mo microalloyed steel[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022(893):162224.
- [4] 张超铸,杨龙,高兴健,等. 卷曲温度对含 Nb 微合金高强度钢力学性能波动的影响[J]. 矿冶工程, 2019,39(6):138-142.
- ZHANG Chaozhu, YANG Long, GAO Xingjian, et al. Effect of curling temperature on fluctuation in mechanical properties of Nb-bearing high-strength low-alloy steel[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2019,39(6):138-142.
- [5] 宋丽英,王明明,邢俊芳,等. 钛微合金化 700 MPa 级高强耐候钢组织和性能研究[J]. 钢铁研究学报, 2022,32(12):1447-1456.
- SONG Liying, WANG Mingming, XING Junfang, et al. Study on microstructures and properties of 700 MPa Ti-microalloyed high strength weathering steels[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2022,32(12): 1447-1456.
- [6] 梁佰战,赵刚,徐浩,等. 轧后控制冷却对非调质钢 F45MnVS 组织和性能的影响[J]. 矿冶工程, 2023,43(3):176-179.
- LIANG Baizhan, ZHAO Gang, XU Hao, et al. Effect of controlled cooling after hot rolling on microstructure and properties of non-quenched and tempered steel F45MnVS[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(3):176-179.
- [7] 杨跃标,李宗强,邓深,等. 热轧钛微合金化高强度钢低温冲击韧性的控制[J]. 钢铁, 2021,56(3):41-50.
- YANG Yuebiao, LI Zongqiang, DENG Shen, et al. Low temperature impact toughness controlling for Ti-microalloyed high strength steel[J]. Iron and Steel, 2021,56(3):41-50.
- [8] 王德军,王彤. 基于不同焊材的超高强钢与 BS700 高强度钢焊接接头裂纹的试验研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(3):176-181.
- WANG Dejun, WANG Tong. Experimental study on cracks in welding joints of ultra-high strength steel and BS700 high strength steel with different welding materials[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(3):176-181.
- [9] 周建川,李红俊,李静,等. 夹杂物对高强度钢冲击性能影响及优化分析[J]. 四川冶金, 2022,44(2):52-55.
- ZHOU Jianchuan, LI Hongjun, LI Jing, et al. Influence of inclusions on impact properties of high strength steel and optimization analysis[J]. Sichuan Metallurgy, 2022,44(2):52-55.
- [10] WANG P, WANG B, LIU Y, et al. Effects of inclusion types on the high-cycle fatigue properties of high-strength steel[J]. Scripta Materialia, 2022,206:114232.
- [11] MAUGIS P, GOUNÉ M. Kinetics of vanadium carbonitride precipitation in steel: A computer model[J]. Acta Materialia, 2005,53(12): 3359-3367.
- [12] 邓永康. BOF-LF-VD-CC 流程生产 20CrMnTi 钢的工艺优化研究[D]. 重庆:重庆大学, 2019.
- DENG Yongkang. Study of production optimization of 20CrMnTi steel during BOF-LF-VD-CC process[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.
- [13] 郭伟,龙木军,吴家璐,等. 22MnB5 钢溶质分配系数及 TiN 析出对微观偏析的影响[J]. 钢铁, 2022,57(3):44-54.
- GUO Wei, LONG Mujun, WU Jialu, et al. Effect of solute partition coefficient and TiN precipitation on micro-segregation of 22MnB5 steel[J]. Iron and Steel, 2022,57(3):44-54.
- 引用本文:刘爱华,孔令男,李春辉,等. 钛微合金化高强度钢凝固过程中钛夹杂物的析出行为研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(3):185-190.
- LIU Aihua, KONG Lingnan, LI Chunhui, et al. Precipitation behavior of Ti-containing inclusions during solidification of Ti microalloyed high-strength steel[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(3):185-190.

(上接第 184 页)

- [17] BOONPRACHAI R, AUTTHAWONG T, NAMSAR O, et al. Natural porous carbon derived from popped rice as anode materials for lithium-ion batteries[J]. Crystals, 2022,12(2):223.
- [18] SUN N, GUAN Z, ZHU Q, et al. Enhanced ionic accessibility of flexible MXene electrodes produced by natural sedimentation[J]. Nano-Micro Letters, 2020,12:89.
- 引用本文:白世伟,唐正芳,蔡向兵,等. MXene 负载棉花生物炭作为锂离子电池负极材料的电化学性能[J]. 矿冶工程, 2025,45(3):180-184.
- BAI Shiwei, TANG Zhengfang, CAI Xiangbing, et al. Electrochemical performance of MXene-coated cotton-derived biochar as anode material for lithium-ion batteries[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(3): 180-184.