

# N-TiO<sub>2</sub>/MXene 超结构钾离子电池负极的制备及其性能研究

王重权<sup>1</sup>, 吴邦军<sup>1</sup>, 刘争<sup>1\*</sup>, 张业龙<sup>2\*</sup>

(1. 五邑大学应用物理与材料学院, 广东 江门 529020;

2. 内蒙古工业大学新能源学院, 内蒙古 鄂尔多斯 010051)

**摘要:** K<sup>+</sup> 离子较大的尺寸使得钾离子电池 (PIBs) 负极在充放电过程中电化学动力学较差, 并伴随严重的体积变化。因此, 采用原位氧化掺杂法制备了氮掺杂二氧化钛/MXene (N-TiO<sub>2</sub>/MXene) 超结构 PIBs 负极材料。结构表征显示, N-TiO<sub>2</sub>/MXene 超结构具有丰富的氧缺陷、高效的离子扩散通道、良好的电子导电性和较大的比表面积等优点。电池测试结果表明, N-TiO<sub>2</sub>/MXene 具有优异的储钾性能, 在 0.2 A/g 电流密度下循环 150 圈后其可逆容量为 160.1 mAh/g; 即便在 10 A/g 的大电流密度下, 仍能保持 58.1 mAh/g 的可逆容量。

**关键词:** TiO<sub>2</sub>; MXene; 负极材料; 钾离子电池

中图分类号: O646

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2025)S1-0326-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.S1.059

## Preparation and performance study of N-TiO<sub>2</sub>/MXene superstructure-based anode for potassium-ion battery

WANG Zhong-quan<sup>1</sup>, WU Bang-jun<sup>1</sup>, LIU Zheng<sup>1\*</sup>, ZHANG Ye-long<sup>2\*</sup>

(1. School of Applied Physics and Materials, Wuyi University, Jiangmen 529020, China;

2. School of Renewable Energy, Inner Mongolia University of Technology, Ordos 010051, China)

**Abstract:** The larger size of K<sup>+</sup> ions results in poor electrochemical kinetics and serious volume changes during the charge and discharge processes of potassium-ion batteries (PIBs). To address these issues, an N-TiO<sub>2</sub>/MXene superstructure anode material for PIBs is prepared via an in-situ oxidation doping method. Structural characterization shows that N-TiO<sub>2</sub>/MXene possesses advantages such as abundant oxygen vacancies, efficient ion diffusion channels, good electronic conductivity, and a large specific surface area. Battery testing results reveal that N-TiO<sub>2</sub>/MXene anode exhibits excellent potassium storage performance, delivering a reversible capacity of 160.1 mAh·g<sup>-1</sup> after 150 cycles at a current density of 0.2 A·g<sup>-1</sup>. Even at a high current density of 10 A·g<sup>-1</sup>, it retains a reversible capacity of 58.1 mAh·g<sup>-1</sup>. This study provides new insights for the design of novel anode materials for PIBs.

**Key words:** TiO<sub>2</sub>; MXene; anode material; potassium ion battery

当今社会, 能源紧缺与环境污染问题日益加剧。发展可再生能源可以有效解决这一问题, 但是可再生能源的发展需要低成本的大规模储能设备来解决分布不均与间断性问题<sup>[1-2]</sup>。锂离子电池在储能领域有着广泛应用, 但是由于锂的成本过高, 严重限制了锂离子电池的大规模应用<sup>[3]</sup>。钾离子电池 (PIBs) 因其资源丰富、氧化还原电位接近锂和与锂离子电池相似的储能机理等优势, 逐渐受到人们的广泛关注<sup>[4-6]</sup>。然而, K<sup>+</sup> 较大的离子尺寸在充放电过程中会严重影响电池的倍率性能和循环稳定性<sup>[7-8]</sup>。因此, 开发高性能 PIBs 负极材料至关

重要。

目前, 应用于 PIBs 负极的材料主要包括碳基材料<sup>[9]</sup>、过渡金属硫化物<sup>[10]</sup>、过渡金属磷化物<sup>[11]</sup>和过渡金属氧化物<sup>[12]</sup>。二氧化钛 (TiO<sub>2</sub>) 具有高稳定性、低成本、环保等优点, 是潜在的 PIBs 负极材料<sup>[13]</sup>。然而, TiO<sub>2</sub> 缓慢的 K<sup>+</sup> 扩散、较低的本征导电性以及钾化/脱钾化过程中具有较大的体积形变, 严重制约了其倍率和循环性能<sup>[14]</sup>。与导电基底复合可以有效增强负载物质的导电性, 掺杂工程能有效提升本体的反应活性。新型过渡金属碳/氮化物 (MXene) 具有独特的二维层状结构, 拥有优异的机

收稿日期: 2025-01-20; 修回日期: 2025-03-25

基金项目: 广东省自然科学基金 (2023A1515012774)

作者简介: 王重权 (2000-), 男, 硕士生, 研究方向为钾离子电池, wang1278942537@outlook.com; 刘争 (1987-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为锂离子电池, 通讯联系人, zhengliucn@sina.com; 张业龙 (1988-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为钾离子电池, 通讯联系人, zhangyelong2008@126.com。

械性能和出色的导电性<sup>[15]</sup>。将 TiO<sub>2</sub> 与 MXene 复合,并引入杂原子,可有效改善其储钾性能。

本文采用原位氧化掺杂法,以水作为氧化剂、稀硝酸作为 N 源,在高温、高压的水热反应釜中,纯 MXene 被氧化为 N-TiO<sub>2</sub>/MXene。N-TiO<sub>2</sub>/MXene 作为 PIBs 负极具有以下优势:①MXene 与 TiO<sub>2</sub> 之间牢固而紧密的接触增强了 TiO<sub>2</sub> 的导电性,有助于发生快速的电化学反应;②杂原子 N 的引入,使得 TiO<sub>2</sub> 产生了大量氧缺陷,增加了反应活性位点;③N-TiO<sub>2</sub>/MXene 具有的三维层级结构和较大的比表面积,有利于电解液渗透,有效缓冲了 K<sup>+</sup> 离子嵌入/脱出过程产生的体积变化,稳定了电极结构。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 药品

MAX 粉末 (Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub>, 99.0%) 购于先丰纳米公司;氢氟酸 (HF, 48%)、稀硝酸 (HNO<sub>3</sub>, 65%)、二氧化钛 (TiO<sub>2</sub>) 购于麦克林公司;无水乙醇 (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O<sub>2</sub>)、聚偏氟乙烯 (PVDF, 99.9%)、N-甲基吡咯烷酮 (NMP) 购于上海阿拉丁生化科技股份有限公司;电池隔膜 (GF/F) 购于 Whatman 公司;电解液:0.8 mol/L 的六氟磷酸钾 (KPF<sub>6</sub>) 溶于乙烯碳酸酯 (EC)-碳酸二乙酯 (DEC) (体积比 1:1), 购于多多试剂。

### 1.2 分析测试仪器

扫描电子显微镜 (SEM, 德国 ZEISS GEMINISEM 300); 投射电子显微镜 (TEM, 日本 JEOLJFM-2100F); X 射线衍射仪 (XRD, 德国 Bruker D8 Advance); 比表面积测试仪 (BET, 上海 Micromeritics Instrument Corp ASAP 2020 V4.00); X 射线光电子能谱仪 (XPS, 美国 Axis Ultra DLD); 蓝电测试仪 (武汉 CT2001A)。

### 1.3 MXene 材料的制备

MXene 制备:称取 2.0 g Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> MAX 粉末缓慢加入到 30 mL HF 溶液中,并在室温下搅拌 24 h。将所得产物以 3 000 r/min 的转速离心 10 min,并用去离子水多次洗涤。最后,将产物在 60℃ 的真空烘箱中干燥 12 h,得到 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> MXene 粉末。

### 1.4 N-TiO<sub>2</sub>/MXene 的制备

N-TiO<sub>2</sub>/MXene 的制备:将 50 mg MXene 加入到 35 mL 超纯水中,再加入 1 mL 稀 HNO<sub>3</sub>,搅拌 1 h 后转移至 50 mL 水热反应釜中,并在 200℃ 下反应 12 h。随后,将所得产物以 3 000 r/min 的转速离心 10 min,用离子水和乙醇多次洗涤溶液,最后,在 70℃ 的真空环境中干燥 8 h。

### 1.5 电池组装和电化学性能测试

电池组装:按 8:1:1 的质量比将活性物质、碳黑和 PVDF 混合,然后加入适量 NMP,搅拌 10 h。将混合物涂布于铜箔表面,随后在真空条件下烘干,得到极片。在手套箱内,使用金属钾片作为对电极、Whatman GF/F 玻璃纤维作为隔膜,以 0.8 mol/L KPF<sub>6</sub> [V( EC ):V( DEC ) = 1:1] 的电解液组装 CR2032 型电池。

电化学测试:在蓝电电池测试仪上进行充放电测试,电压范围为 0.01 ~ 2.6 V。在电化学工作站 (VMP3, Bio-Logic SAS) 上进行电化学阻抗谱 (EIS) 测试,频率范围为 100 kHz 到 0.01 Hz。

## 2 结果与讨论

### 2.1 材料的形貌和结构分析

#### 2.1.1 扫描电子显微镜 (SEM)、高分辨率透射电镜 (HRTEM) 和能量色散 X 射线谱 (EDS) 表征

从图 1(a) 和图 1(b) 可以观察到,经过 HF/HNO<sub>3</sub> 溶液刻蚀处理,MAX 转变为具有独特二维手风琴层状结构的 MXene。经过水热反应釜高温反应后,MXene 原位生成 N-TiO<sub>2</sub>/MXene 超结构,N-

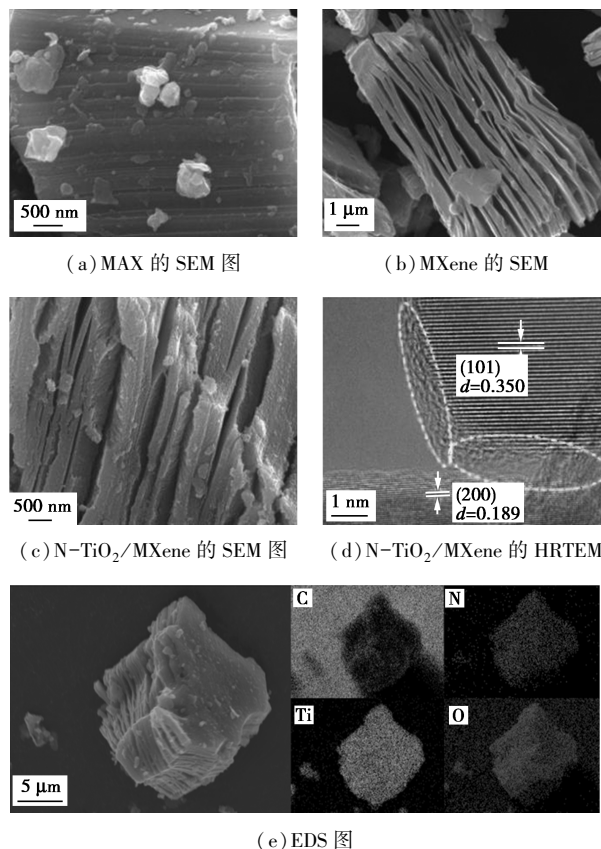


图 1 N-TiO<sub>2</sub>/MXene、MXene 和 MAX 的 SEM、HRTEM 和 EDS 图像

TiO<sub>2</sub> 纳米颗粒牢牢地生长在 MXene 表面 [图 1(c)]。图 1(d) 中可以观察到 0.35 nm 和 0.19 nm 的晶格条纹, 对应于 TiO<sub>2</sub> 的 (101) 和 (200) 晶面<sup>[16]</sup>。此外, N-TiO<sub>2</sub>/MXene 含有大量的缺陷 (虚线圆圈), 可以为电化学反应提供潜在的活性位点; 而层级 MXene 可以为有效改善 N-TiO<sub>2</sub> 导电性, 促进离子的快速传递。EDS 分析显示了 C、N、Ti 和 O 元素在 N-TiO<sub>2</sub>/MXene 中均匀分布, 确认了 N-TiO<sub>2</sub>/MXene 的成功合成 [图 1(e)]。

### 2.1.2 X 射线衍射 (XRD)、X 射线光电子能谱 (XPS) 和 N<sub>2</sub> 物理吸附分析 (BET) 分析

图 2 为样品的 XRD、BET 和 XPS 测试结果。图 2(a) 显示了样品的 XRD 图, N-TiO<sub>2</sub>/MXene 的衍射峰分别位于 25.2、36.9、37.7、38.4° 和 47.9°, 对应于 TiO<sub>2</sub> (PDF No.21-1272) 的 (101)、(103)、(004)、(112) 和 (220) 晶面<sup>[17]</sup>。此外, MXene 的 (002) 峰明显向低角度移动, 表明其沿 c 轴的层间距增大, 有助

于离子的迁移<sup>[18]</sup>。图 2(b) 的 XPS 全谱图, 进一步证明了材料中 Ti、O、C 和 N 元素的存在。Ti 2p 高分辨 XPS 图谱中 [图 2(c)] 存在 Ti—C (455.1 eV 和 460.8 eV)<sup>[19]</sup>、Ti—N (456.6 eV 和 462.2 eV)<sup>[20]</sup> 和 Ti—O (458.9 eV 和 464.6 eV)<sup>[21]</sup> 的特征峰。O 1s 高分辨 XPS 图谱中 [图 2(d)] 位于 529.5、530.9 eV 和 532.2 eV 的特征峰, 分别归属于 O—Ti、Ti—C—O<sub>x</sub> 和 Ti—C—(OH)<sub>x</sub><sup>[22]</sup>。值得注意的是, 在 531.8 eV 处存在明显的 O 缺陷特征峰<sup>[23]</sup>, 和 HRTEM 的结果相对应。N 1s 高分辨 XPS 图谱 [图 2(e)] 位于 401.8、400.1、399.2 eV 和 397.3 eV 的特征峰, 分布归属于 Graphitic N、Pyrolic N、Pyridinic N 和 N—Ti<sup>[24]</sup>。BET 测试表明 [图 2(f)], N-TiO<sub>2</sub>/MXene 的比表面积 (92.7 m<sup>2</sup>/g) 远大于 TiO<sub>2</sub> (64.3 m<sup>2</sup>/g) 和 MXene (57.9 m<sup>2</sup>/g)。这种原位合成的 N-TiO<sub>2</sub>/MXene 超结构具有更多的原子缺陷、较强的化学键连接和丰富的比表面积, 从而提供了更多活性位点, 有助于电子和离子的迁移<sup>[25]</sup>。

### 2.2 电化学性能分析

图 3 展示了 N-TiO<sub>2</sub>/MXene 在 PIBs 负极中的电化学性能测试结果。如图 3(a) 所示, 在第 1、20、50 圈和 100 圈循环时, 充电比容量分别为 289.9、187.4、172.3 mAh/g 和 165.6 mAh/g。即使循环 150 圈后 [图 3(b)], 该 N-TiO<sub>2</sub>/MXene 仍能够提供 160.1 mAh/g 的可逆容量, 远大于 TiO<sub>2</sub> (107.0 mAh/g) 和 MXene (57.9 mAh/g)。倍率性能测试显示 [图 3(c)], N-TiO<sub>2</sub>/MXene 在 0.2、0.5、1、2、3、5、8 A/g 和 10 A/g 的电流密度下, 可逆容量分别为 191.8、148.5、119.6、102.3、87.2、76.7、66.7 mAh/g 和 58.1 mAh/g, 明显大于 TiO<sub>2</sub> 和 MXene 材料。当电流密度恢复到 0.2 A/g 时, 可逆容量恢复至 163.3 mAh/g, 表明 N-TiO<sub>2</sub>/MXene 具有优异的倍率性能和电化学稳定性。EIS 测试表明 [图 3(d)], N-TiO<sub>2</sub>/MXene 电子转移电阻为 1 250.7 Ω, 明显小于 TiO<sub>2</sub> (2 921.5 Ω), 表明其具有更快的电子转移动力学<sup>[26]</sup>。

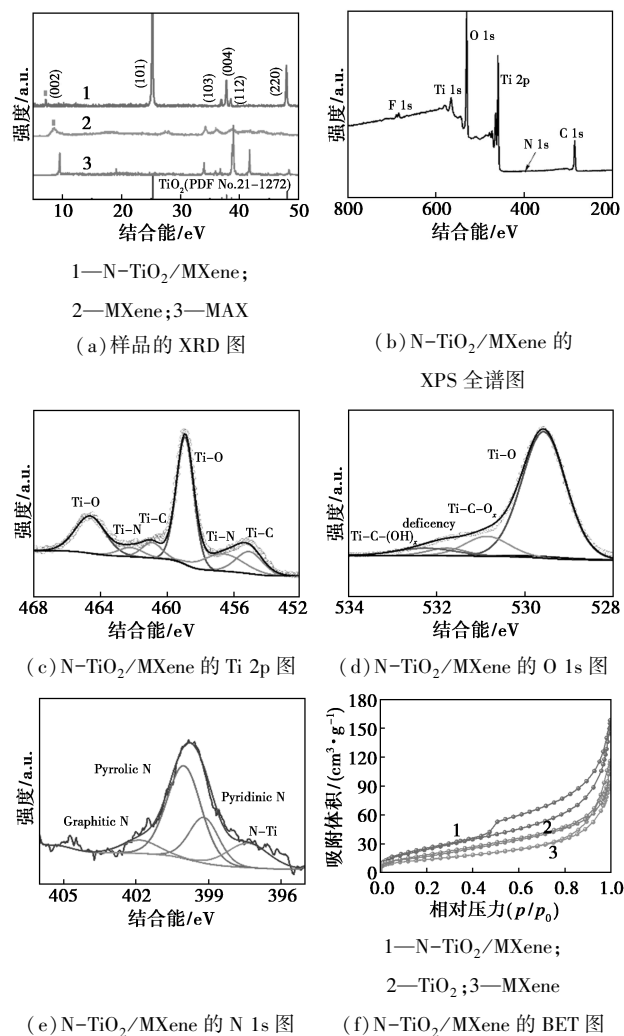
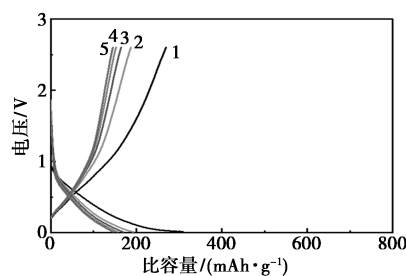


图 2 N-TiO<sub>2</sub>/MXene、MXene 和 TiO<sub>2</sub> 的 XRD、XPS 和 BET 表征



1—第 1 圈; 2—第 20 圈; 3—第 50 圈; 4—100; 5—150  
(a) N-TiO<sub>2</sub>/MXene 在 0.2 A/g 的电流密度下的充放电曲线

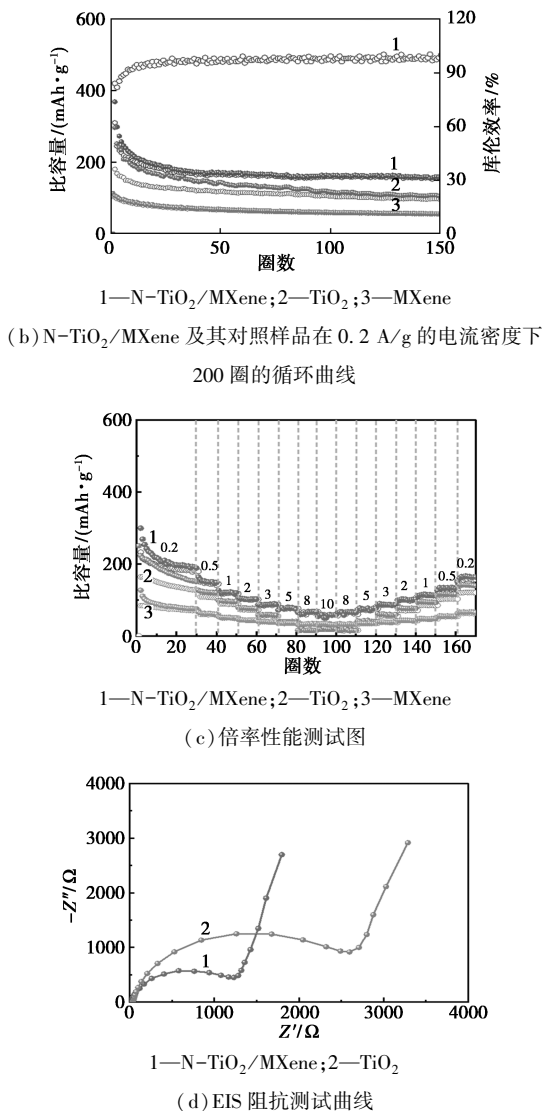


图 3 N-TiO<sub>2</sub>/MXene、MXene 和 TiO<sub>2</sub> 的 PIBs 电化学性能图

N-TiO<sub>2</sub>/MXene 优异的储钾性能来源于以下几个方面(图 4):首先, MXene 与 TiO<sub>2</sub> 之间的紧密结合显著增强了 TiO<sub>2</sub> 的本征导电性。优异的导电性使得电荷转移更加快速,促进了电化学反应的快速进行。其次,通过引入杂原子 N,使 TiO<sub>2</sub> 中产生了大量的氧缺陷,为电化学反应提供了额外的活性位点,提升了钾离子的嵌入/脱出反应动力学。此外,

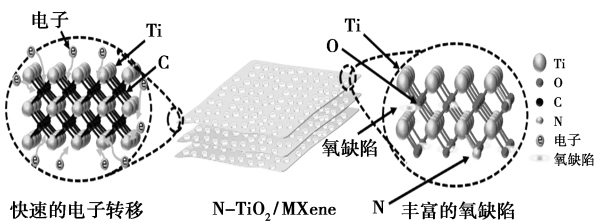


图 4 N-TiO<sub>2</sub>/MXene 的储钾机理

N-TiO<sub>2</sub>/MXene 展现出独特的三维层级结构和较大的比表面积,有利于容纳更多的电解液,并为离子传输提供了额外路径,而且这种结构能够有效缓冲钾离子嵌入/脱出过程中产生的体积变化,保持电极结构的稳定性。

### 3 结论

对 MXene 采用原位氧化掺杂法合成了 N-TiO<sub>2</sub>/MXene 超结构作为 PIBs 的负极材料。电池测试表明, N-TiO<sub>2</sub>/MXene 拥有较好的循环稳定性(在 0.2 A/g 的电流密度下循环 150 圈后,保持可逆容量为 160.1 mAh/g)和优异的倍率性能(当电流密度达到 10 A/g 时,其可逆容量仍保持 58.1 mAh/g)。这种出色的储钾性能来自于 N-TiO<sub>2</sub>/MXene 优异导电性、较大的比表面积、丰富的层级结构、和增加的反应活性位点。本文为构建和设计高性能 PIBs 负极提供了新的启示。

### 参考文献

- [1] 王中华,董臻,吴邦军,等.锚定在 Te、N 共掺杂 MXene 的 Cu 单原子非水溶剂锂空气电池正极制备及其性能研究[J].现代化工,2024,44(12):110-115.
- [2] 李浩,杨帆,王中华,等.氮硫共掺杂 MXene 非水溶剂锂空气正极的制备及其性能研究[J].现代化工,2023,43(S2):106-109,114.
- [3] 杨帆,刘争,汪达,等.P-Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>/MXene 超结构钾离子电池负极制备及其性能[J].物理化学学报,2024,40(2):84-90.
- [4] Ge J M, Fan L, Wang J, et al. MoSe<sub>2</sub>/N-doped carbon as anodes for potassium-ion batteries [J]. Advanced Energy Materials, 2018, 8(29):1801477.
- [5] Sang Z, Su D, Wang J, et al. Bi-continuous nanoporous carbon sphere derived from SiOC as high-performance anodes for PIBs[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 381:122677.
- [6] 董臻,吴邦军,王重权,等.NbTe<sub>2</sub>/MXene 超结构钾离子电池负极的制备及其性能研究[J].现代化工,2025,45(1):112-115,122.
- [7] Xia Z, Chen X, Ci H, et al. Designing N-doped graphene/ReSe<sub>2</sub>/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> MXene heterostructure frameworks as promising anodes for high-rate potassium-ion batteries[J]. Journal of Energy Chemistry, 2021, 53:155-162.
- [8] Yang C, Feng J, Lv F, et al. Metallic graphene-like VSe<sub>2</sub> ultrathin nanosheets: Superior potassium-ion storage and their working mechanism[J]. Advanced Materials, 2018, 30(27):1800036.
- [9] Zhang E, Jia X, Wang B, et al. Carbon dots@ rGO paper as free-standing and flexible potassium-ion batteries anode[J]. Advanced Science, 2020, 7(15):2000470.
- [10] Zhou J, Shen Y, Lv F, et al. Ultrathin metallic NbS<sub>2</sub> nanosheets with unusual intercalation mechanism for ultra-stable potassium-ion storage[J]. Advanced Functional Materials, 2022, 32(34):2204495.

- [11] Das D, Sarkar D, Nagarajan S, *et al.* Cobalt phosphide (Co<sub>2</sub>P) encapsulated in nitrogen-rich hollow carbon nanocages with fast rate potassium ion storage [J]. *Chemical Communications*, 2020, 56(94): 14889–14892.
- [12] Tu J, Tong H, Wang P, *et al.* Octahedral/Tetrahedral vacancies in Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> as k-storage sites: A case of anti-spinel structure material serving as high-performance anodes for PIBs [J]. *Small*, 2023, 19(34): 2301606.
- [13] Xu Y, Zhang H, Ding T, *et al.* Synthesis of yolk-shell Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>@TiO<sub>2</sub> submicrospheres with enhanced potassium storage [J]. *Science China Chemistry*, 2022, 65(9): 1807–1816.
- [14] Ling L, Wang X, Zhou M, *et al.* Carbon-coated flower-like TiO<sub>2</sub> nanosphere as an ultrastable anode material for potassium-ion batteries; Structure design and mechanism study [J]. *ACS Applied Energy Materials*, 2022, 5(12): 15586–15596.
- [15] Zhang Y, Mu Z, Yang C, *et al.* Rational design of MXene/1T-2H MoS<sub>2</sub>-C nanohybrids for high-performance lithium-sulfur batteries [J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(38): 1707578.
- [16] Fang W Q, Zhou J Z, Liu J, *et al.* Hierarchical structures of single-crystalline anatase TiO<sub>2</sub> nanosheets dominated by {001} facets [J]. *Chemistry-A European Journal*, 2011, 17(5): 1423.
- [17] Krishnan J, Mohamad E N, Sikirman A. Effect of calcination temperature of carbon doped TiO<sub>2</sub> (C-TiO<sub>2</sub>) on photocatalytic activity under visible light [J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 997: 292–296.
- [18] Xu X, Zhang Y, Sun H, *et al.* Orthorhombic cobalt ditelluride with Te vacancy defects anchoring on elastic MXene enables efficient potassium-ion Storage [J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(31): 2100272.
- [19] Oliveira C, Galindo R E, Palacio C, *et al.* Surface characterization of Ti-Si-C-ON coatings for orthopedic devices: XPS and Raman spectroscopy [J]. *Solid State Sciences*, 2011, 13(1): 95–100.
- [20] Shen Q, Huang L, Chen G, *et al.* One-step synthesis of titanium nitride/nitrogen-doped graphene nanocomposite as separator modifying material for advanced lithium-sulfur batteries [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 845: 155543.
- [21] Zhang W, Luo N, Huang S, *et al.* Sulfur-doped anatase TiO<sub>2</sub> as an anode for high-performance sodium-ion batteries [J]. *ACS Applied Energy Materials*, 2019, 2(5): 3791–3797.
- [22] Rao J, Lv Z, Yan X, *et al.* Nacre-inspired mechanically robust films for osmotic energy conversion [J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(2): 2309869.
- [23] Hou S, Pang F, Liu T, *et al.* Oxygen defect and strong interface effect triggered ZnO @ C with enhanced electrochemical performance [J]. *Surfaces and Interfaces*, 2022, 30: 101876.
- [24] Li L, Jiang G, An C, *et al.* Hierarchical Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>@TiO<sub>2</sub> MXene hybrids with tunable interlayer distance for highly durable lithium-ion batteries [J]. *Nanoscale*, 2020, 12(18): 10369–10379.
- [25] Wu B, Zhang Y, Wang Z, *et al.* A high-rate and ultrastable Re<sub>2</sub>Te<sub>5</sub>/MXene anode for potassium storage enabled by amorphous/crystalline heterointerface engineering [J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(44): 2407134.
- [26] Tan Y, Lin H, Chen Z, *et al.* Regulating the coordination microenvironment of atomic bismuth sites in nitrogen-rich carbon nanosheets as anode for superior potassium-ion batteries [J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2024, 99: 365–374. ■
- .....
- (上接第 325 页)
- [11] Chen X Y, Yang M Y, Cai X D, *et al.* Fabrication of wheat straw-based lignin containing nanofibril aerogels as recyclable absorbents for oil-water separation [J]. *Cellulose*, 2024, 31(1): 497–514.
- [12] Ye R C, Long J Y, Peng D, *et al.* Oil/water separation using elastic bio-aerogels derived from bagasse: Role of fabrication steps [J]. *J Hazard Mater*, 2022, 438: 129529.
- [13] 朱春山, 毛正鑫, 简凤梅, 等. 糠醛渣纤维素/丙烯酸/丙烯酰胺吸水树脂的制备研究 [J]. *化工新型材料*, 2021, 49(1): 175–179, 189.
- [14] De la Cruz L G, Abt T, León N, *et al.* Ice-template crosslinked PVA aerogels modified with tannic acid and sodium alginate [J]. *Gels*, 2022, 8(7): 419.
- [15] Zheng Q F, Cai Z Y, Gong S Q. Green synthesis of polyvinyl alcohol (PVA)-cellulose nanofibril (CNF) hybrid aerogels and their use as superabsorbents [J]. *J Mater Chem A*, 2014, 2(9): 3110–3118.
- [16] Mulyadi A, Zhang Z, Deng Y L. Fluorine-free oil absorbents made from cellulose nanofibril aerogels [J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2016, 8(4): 2732–2740.
- [17] Zhang Z, Sèbe G, Rentsch D, *et al.* Ultralightweight and flexible silylated nanocellulose sponges for the selective removal of oil from water [J]. *Chem Mat*, 2014, 26(8): 2659–2668.
- [18] Wan W B, Yang Z, Tan T, *et al.* Three-dimensional hydrophobic melamine@ methyl trichlorosilane/polydimethylsiloxane sponge for consecutive and long-term oil/water separation [J]. *Chem Eng J*, 2023, 476: 146824.
- [19] Zhang X X, Wang H K, Cai Z Y, *et al.* Highly compressible and hydrophobic anisotropic aerogels for selective oil/organic solvent absorption [J]. *ACS Sustain Chem Eng*, 2019, 7(1): 332–340.
- [20] Zhang X X, Liu M H, Wang H K, *et al.* Ultralight, hydrophobic, anisotropic bamboo-derived cellulose nanofibrils aerogels with excellent shape recovery via freeze-casting [J]. *Carbohydr Polym*, 2018, 208: 232–240.
- [21] Liao Q, Su X P, Zhu W J, *et al.* Flexible and durable cellulose aerogels for highly effective oil/water separation [J]. *RSC Adv*, 2016, 6(68): 63773–63781. ■