

NbTe₂/MXene 超结构钾离子电池负极的制备及其性能研究

董臻¹, 吴邦军¹, 王重权¹, 许冠南², 刘争¹, 张业龙^{1*}

(1. 五邑大学应用物理与材料学院, 广东 江门 529020;

2. 澳门大学应用物理及材料工程研究院, 澳门 999078)

摘要: 针对较大尺寸的钾离子在钾离子电池充放电过程中导致负极扩散动力学缓慢并伴随着剧烈的体积变化问题, 制备了 NbTe₂ 纳米针垂直生长在 MXene 纳米片上的三维超结构 NbTe₂/MXene。结果表明, 该三维超结构具有优异的循环稳定性和倍率性能, 在 0.2 A/g 的电流密度下循环 150 圈后, 可逆比容量仍达到 306.8 mAh/g, 容量保持率为 68.4%, 平均每圈容量损耗率仅为 0.21%。即使在 20 A/g 的大电流密度下仍展现出 139.8 mAh/g 的可逆容量。该超结构具有比表面积大、良好的电子导电性和多活性位点等诸多优势, 能够提高钾离子电池的性能, 为高性能负极材料的开发提供参考。

关键词: 钾离子电池; 负极材料; MXene; NbTe₂

中图分类号: O646

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2025)01-0112-04

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.01.021

Preparation and property of NbTe₂/MXene superstructure anode for potassium ion battery

DONG Zhen¹, WU Bang-jun¹, WANG Zhong-quan¹, HUI Kwun-nam²,
LIU Zheng¹, ZHANG Ye-long^{1*}

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

2. Institute of Applied Physics and Materials Engineering, University of Macau, Macau SAR 999078, China)

Abstract: The relatively large size of potassium ions can lead to slow diffusion kinetics and accompany dramatic volume changes for anodes during the charge-discharge process of potassium-ion battery. In order to solve these problems, NbTe₂/MXene with three-dimensional superstructure is prepared through NbTe₂ nanoneedles vertically growing on MXene nanosheets, which exhibits excellent cycling stability and rate performance. After it has been cycled over 150 cycles at a current density of 0.2 A·g⁻¹, its reversible specific capacity still reaches 306.8 mAh·g⁻¹ with a capacity retention of 68.4% and an average capacity loss of only 0.21% per cycle. Even at a high current density of 20 A·g⁻¹, it still achieves a reversible capacity of 139.8 mAh·g⁻¹. This superstructure possesses numerous advantages such as a large specific surface area, good electronic conductivity, and multiple active sites, which can improve the performance of potassium ion batteries and provide valuable references for the development of high-performance anode materials.

Key words: potassium ion battery; anode material; MXene; NbTe₂

钾离子电池 (PIBs) 作为能源储存系统中锂离子电池的潜在替代品, 具有资源丰富、氧化还原电位接近于锂、离子导电性优越^[1-3]。然而, 钾离子本身较大的尺寸通常导致其扩散动力学缓慢, 并伴随着充放电过程中严重的体积变化, 从而导致电池倍率性能和循环性能不令人满意^[4-6]。因此, 负极材料是决定全电池性能的重要因素, 合理设计高性能负极材料对于提升钾离子电池性能至关重要。

到目前为止, 用于电池负极的材料主要有碳基材料^[7-8]、钛基材料^[9-10]、合金材料^[11-13]、磷基材料^[14-15]、有机化合物^[16]和过渡金属二硫化物

(TMDs)^[17-18]材料。过渡金属硫化物/硒化物由于其独特的结构特征和高理论比容量, 在能源存储领域引起了广泛关注。与过渡金属硫化物和硒化物相比, 过渡金属碲化物通常展示出更高的导电性^[19-20]。在各种碲化物中, 六方相 NbTe₂ (H-NbTe₂) 由于其出色的电导率而成为一种有潜力的 PIBs 负极材料^[21]。然而, 类似于其他 TMDs 材料, NbTe₂ 的性能仍受限于巨大的体积变化和缓慢的离子扩散动力学。MXene 作为一类过渡金属碳化物/氮化物, 具有高稳定性的二维结构和出色的导电性, 在 PIBs 中广泛应用^[22-24]。

收稿日期: 2024-03-11; 修回日期: 2024-11-07

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (22005223); 五邑大学港澳联合研发基金项目 (2019W GALH10); 广东普通高校创新团队资助项目 (2017KCXTD031)

作者简介: 董臻 (1997-), 女, 硕士生, 研究方向为钾离子电池, dzz1362355@163.com; 张业龙 (1988-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为锂空气电池, 通讯联系人, zhangyelong2008@126.com。

笔者通过溶剂热法将 NbTe₂ 纳米针垂直生长在 MXene 纳米片上 (NbTe₂/MXene)。并考察了垂直生长的 NbTe₂ 纳米的循环性能及倍率性能。

1 实验材料与方法

1.1 药品

MAX 粉末 (Ti₃AlC₂, 纯度 99.0%), 先丰纳米生产; 氢氟酸溶液 (HF, AR, 48%)、无水乙醇 (C₂H₄O₂, AR)、草酸铌 (C₁₀H₅NbO₂₀)、十六烷基三甲基溴化铵 (CTAB)、Te 粉、*N,N*-二甲基甲酰胺 (DMF)、聚偏二氟乙烯 (PVDF, 99.9%)、*N*-甲基吡咯烷酮 (NMP)、KPF₆ [V(EG):V(DEC)=1:1], 阿拉丁生产。电池隔膜采用 Whatman 的 GF/F。

1.2 分析测试仪器

德国 ZEISS 生产的 GEMINISEM 300 扫描电子显微镜 (SEM); 德国 Bruker 生产的 D8 Advance X 射线衍射能谱仪 (XRD); 上海 Micromeritics Instrument Corp 生产的 ASAP2460 比表面积测试仪 (BET); 美国 Thermo Fisher Scientific Inc 生产的 Escalab250Xi X 射线光电子能谱仪 (XPS); 武汉 CT2001A 蓝电测试仪。

1.3 MXene 材料的制备

MXene 制备: 将 2 g MAX 缓慢浸入 40% HF 溶液 (30 mL) 中, 在室温下磁力搅拌 24 h。所得产物在 3 000 r/min 的转速下离心 5 min, 用去离子水洗涤数次。最后在 60℃ 真空烘箱中干燥 12 h, 得到 MXene 粉末。

1.4 NbTe₂/MXene 及纯 NbTe₂ 的制备

NbTe₂/MXene 及纯 NbTe₂ 制备: 将 0.04 g MXene、0.538 g C₁₀H₅NbO₂₀ 和 0.02 g CTAB 加入 20 mL 超纯水中, 再将 0.255 g Te 粉加入 20 mL DMF 中, 室温搅拌 10 h。将以上溶液倒入 50 mL 反应釜中, 在 200℃ 保持 24 h。冷却后用离子水和乙醇进行多次洗涤, 并在 60℃ 真空干燥 10 h。若不添加 MXene 则合成为纯 NbTe₂。

1.5 电池组装和电化学性能测试

电池组装: 以 7:2:1 的质量比将活性物质、碳黑和聚偏氟乙烯 (PVDF) 混合, 随后滴入适量 NMP 搅拌 12 h。将所得混合物作为浆料涂覆在铜箔上, 后真空烘干得到极片。在充满氩气的手套箱中进行电池组装, 将金属钾片作为对电极, Whatman 的 GF/F 玻璃纤维作为隔膜, 0.8 mol/L KPF₆ [V(EG):V(DEC)=1:1] 作为电解液组装成 CR2032 型电池。

电化学测试: 在蓝电电池测试平台进行恒电流

充放电测试, 电压为 0.01 ~ 2.6 V。电化学阻抗谱 (EIS) 使用电化学工作站 (VMP3, Bio-Logic SAS) 进行测试。

2 结果与讨论

2.1 材料的形貌和结构分析

2.1.1 SEM、SAED 和 EDS 表征

NbTe₂/MXene 和 MXene 的 SEM、SAED 和 EDS 图如图 1 所示。从图 1(a) 中可以看出, MXene 呈现出三维分层的“手风琴”结构。从图 1(b) 中可以看出, NbTe₂ 纳米针成功垂直生长于 MXene 表面, 形成 NbTe₂/MXene 超结构。从图 1(c) 中可以看出, 利用选区衍射 (SEAD) 发现, NbTe₂/MXene 中存在属于 NbTe₂ 的衍射环, 对应 (-310)、(600) 和 (-913) 晶面^[25]。从图 1(d) 中可以看出, EDS 证实 Nb、Ti 和 Te 元素在 NbTe₂/MXene 中均匀分布。

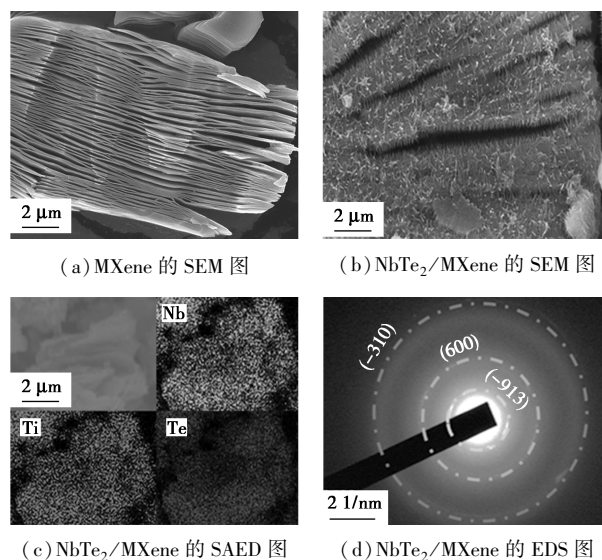
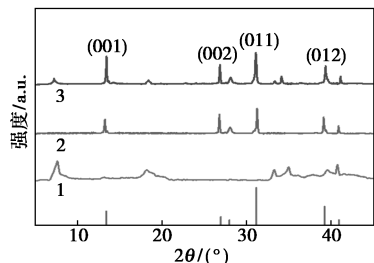


图 1 NbTe₂/MXene 和 MXene 的 SEM、SAED 和 EDS 图

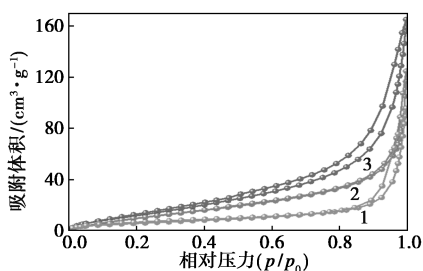
2.1.2 XRD、BET 和 XPS 分析

NbTe₂/MXene 和对照组的 XRD、BET 和 XPS 测试结果如图 2 所示。从图 2(a) 中可以看出, NbTe₂/MXene 的衍射峰来自于 NbTe₂ (PDF 21-0605-1111) 的 (001)、(002)、(100) 和 (011) 晶面, 分别位于 13.4、27.28、31.1° 和 39.2°。MXene 的 (002) 向较低角度明显移动^[26-27]。从图 2(b) 中可以看出, NbTe₂/MXene 的比表面积相较于 NbTe₂ 和 MXene 有一定的增大, 表明 NbTe₂ 纳米针的负载一定程度上增大了 MXene 层间距, 有助于容纳体积膨胀。计算得出 NbTe₂/MXene、NbTe₂ 和 MXene 比表面积分别为 72.5、49.9 m²/g 和 36.5 m²/g。通过 NbTe₂ 纳

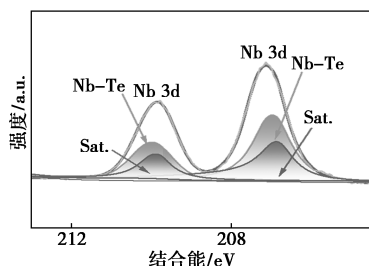
米针均匀覆盖 MXene, 该超结构暴露出更多的活性位点, 并有利于电极液浸润^[28]。从图 2(b) 中可以看出, NbTe₂/MXene 内存在 Nb、Te 和 Ti 元素。



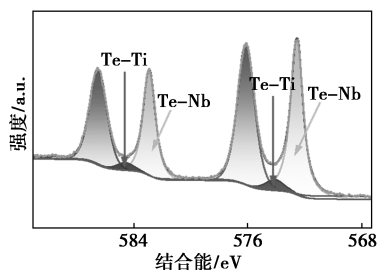
1—MXene; 2—NbTe₂; 3—NbTe₂/MXene
(a) NbTe₂/MXene 及其对比样品的 XRD 图谱



1—MXene; 2—NbTe₂; 3—NbTe₂/MXene
(b) NbTe₂/MXene 及其对比样品的 N₂ 吸/脱附曲线



(c) NbTe₂/MXene 的 Nb 3d 的高分辨 XPS



(d) NbTe₂/MXene 的 Te 3d 的高分辨率 XPS

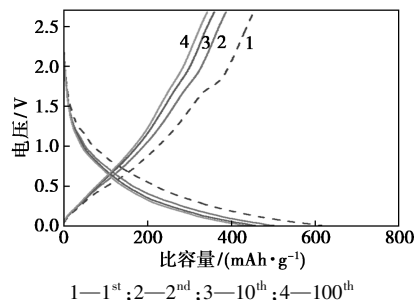
图 2 NbTe₂/MXene 和对照组的 XRD、BET 和 XPS 测试

从图 2(c) 中可以清晰地看到 2 个明显的分裂峰, 分别位于 207.1 eV 和 209.8 eV, 对应于 Nb 3d 核心峰, 归属于 Nb 3d_{5/2} 和 Nb 3d_{3/2}^[29]。从图 2(d) 中可以看出, 572.7 eV 和 583.1 eV 处为 Nb—Te 键的峰, 576.4 eV 处的峰为 Te 3d_{5/2}, 586.8 eV 处的峰为 Te 3d_{3/2}^[30]。值得注意的是, 在 574.1 eV 和 584.7 eV 处观察到 2 个属于 Ti—Te 键的峰, 证实了

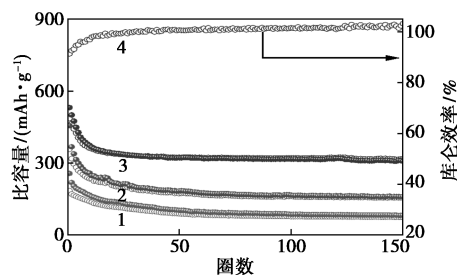
MXene 和 NbTe₂ 之间通过化学键连接。综上所述, XRD、BET 和 XPS 的结果表明, 材料成功合成且具有较大的比表面积和丰富的化学键。

2.2 电化学性能分析

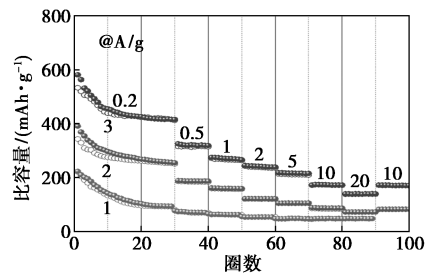
NbTe₂/MXene 基钾离子电池电化学性能测试结果如图 3 所示。从图 3(a) 中可以看出, NbTe₂/MXene 在 0.2 A/g 电流密度下, 第 1、2、10 和 100 圈



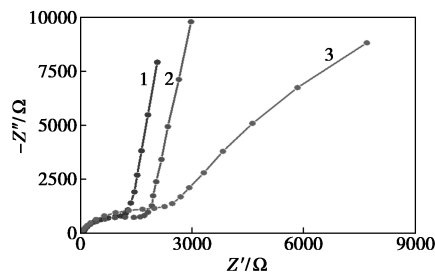
1—1st; 2—2nd; 3—10th; 4—100th
(a) NbTe₂/MXene 在第 1、2、10 和 100 圈充放电循环曲线



1—MXene; 2—NbTe₂; 3—NbTe₂/MXene;
4—NbTe₂/MXene 的库仑效率
(b) NbTe₂/MXene 及其对比样品在 0.2 A/g 电流密度下 150 圈循环测试图



1—MXene; 2—NbTe₂; 3—NbTe₂/MXene
(c) NbTe₂/MXene 及其对比样品的倍率性能



1—NbTe₂/MXene; 2—NbTe₂; 3—MXene
(d) NbTe₂/MXene 及其对比样品的 EIS 阻抗测试曲线

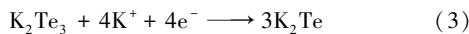
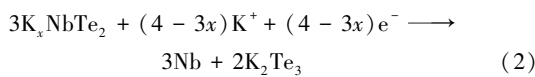
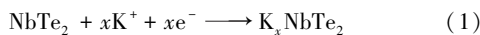
图 3 NbTe₂/MXene 基钾离子电池电化学性能

循环时的充电比容量分别为 457.8、387.9、362.2 mAh/g 和 345.5 mAh/g。从图 3(b) 中可以看出, 即使经过 150 圈循环之后, NbTe₂/MXene 的可逆容量为 306.8 mAh/g, 明显大于 NbTe₂ (158.9 mAh/g) 和 MXene (81.4 mAh/g)。在前 150 圈循环中, NbTe₂/MXene 显示了 68.4% 的容量保持率, 平均每圈损耗约 0.21%。

从图 3(c) 中可以看出, NbTe₂/MXene 电极在电流密度为 0.2、0.5、1、2、5、10 A/g 和 20 A/g 的可逆容量分别为 412.96、318.72、266.04、239.04、215.28、172.2 mAh/g 和 139.8 mAh/g, 明显大于 NbTe₂ 和 MXene 材料。当电流密度恢复到 10 A/g 时, 可逆容量与之前 10 A/g 时没有明显变化, 展现出优异的倍率性能和电化学稳定性。

从图 3(d) 中可以看出, NbTe₂/MXene 负极的电子转移电阻 (R_{ct}) 为 1 212.4 Ω , 明显小于与 NbTe₂ (1 674.3 Ω) 和 MXene (2 275.7 Ω), 该结果证明 NbTe₂/MXene 具有最快的电子转移动力学^[31]。

根据 Nb 基硫族化物在锂离子电池和钠离子电池的充放电机理, 结合测得的 NbTe₂/MXene 电化学性能, 推测 NbTe₂/MXene 的钾储存机制为:



3 结论

利用水热法合成了 NbTe₂/MXene 超结构钾离子电池负极。该超结构具有优异的循环稳定性和出色的倍率性能, 在 0.2 A/g 的电流密度下循环 150 圈后, 保持可逆容量为 306.8 mAh/g, 当电流密度达到 20 A/g 时, 其可逆容量仍保持 139.8 mAh/g。该超结构钾离子电池负极的优点在于大的比表面积、良好的导电性和丰富的活性位点。该研究将为高性能钾离子电池负极的设计提供新的思路。

参考文献

- [1] Wang B, Ang E H, Yang Y, *et al.* Post-lithium-ion battery era: Recent advances in rechargeable potassium-ion batteries[J]. Chemistry-A European Journal, 2020, 27(2): 512-536.
- [2] Zhang J, Liu T, Cheng X, *et al.* Development status and future prospect of non-aqueous potassium ion batteries for large scale energy storage[J]. Nano Energy, 2019, 60: 340-361.
- [3] 陈港欣, 孙现众, 张熊, 等. 高功率锂离子电池研究进展[J]. 工程科学学报, 2022, 44(4): 612-624.
- [4] Ding J, Wang Y, Huang Z, *et al.* Toward theoretical capacity and su-

perhigh power density for potassium-selenium batteries via facilitating reversible potassiation kinetics [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(5): 6828-6840.

- [5] Lu C, Sun Z, Yu L, *et al.* Enhanced kinetics harvested in heteroatom dual-doped graphitic hollow architectures toward high rate printable potassium-ion batteries [J]. Advanced Energy Materials, 2020, 10(28): 2001161.
- [6] Wang B, Peng Y, Yuan F, *et al.* A comprehensive review of carbons anode for potassium-ion battery: Fast kinetic, structure stability and electrochemical [J]. Journal of Power Sources, 2021, 484: 229244.
- [7] Wu X, Chen Y, Xing Z, *et al.* Advanced carbon-based anodes for potassium-ion batteries [J]. Advanced Energy Materials, 2019, 9(21): 1900343.
- [8] Zheng J, Wu Y, Tong Y, *et al.* High capacity and fast kinetics of potassium-ion batteries boosted by nitrogen-doped mesoporous carbon spheres [J]. Nano-micro Letters, 2021, 13(1): 174.
- [9] Liu S, Kang L, Henzie J, *et al.* Recent advances and perspectives of battery-type anode materials for potassium ion storage [J]. ACS Nano, 2021, 15(12): 18931-18973.
- [10] Zhang K Y, Gu Z Y, Ang E H, *et al.* Advanced polyanionic electrode materials for potassium-ion batteries: Progresses, challenges and application prospects [J]. Materials Today, 2022, 54: 189-201.
- [11] Qi S H, Deng J W, Zhang W C, *et al.* Recent advances in alloy-based anode materials for potassium ion batteries [J]. Rare Metals, 2020, 39(9): 970-988.
- [12] 褚绅旭, 杨倩, 李思远, 等. 钾离子电池合金负极与电解液界面作用的研究进展 [J]. 工程科学学报, 2023, 45(7): 1101-1115.
- [13] Lei K X, Wang J, Chen C, *et al.* Recent progresses on alloy-based anodes for potassium-ion batteries [J]. Rare Metals, 2020, 39: 989-1004.
- [14] Zhang W, Mao J, Li S, *et al.* Phosphorus-based alloy materials for advanced potassium-ion battery anode [J]. Journal of the American Chemical Society, 2017, 139(9): 3316-3319.
- [15] 徐汝辉, 姚耀春, 梁凤, 等. 磷基负极材料在金属离子电池中的现状与趋势 [J]. 化工进展, 2019, 38(9): 4142-4154.
- [16] Desai A V, Morris R E, Armstrong A R. Advances in organic anode materials for Na-/K-ion rechargeable batteries [J]. ChemSusChem, 2020, 13(18): 4866-4884.
- [17] Luo M, Zhao Z, Zhang Y, *et al.* PdMo bimetallic for oxygen reduction catalysis [J]. Nature, 2019, 574(7776): 81-85.
- [18] Zhang Y, Mu Z, Yang C, *et al.* Rational design of MXene/1T-2H MoS₂-C nanohybrids for high-performance lithium-sulfur batteries [J]. Advanced Functional Materials, 2018, 28(38): 1707578.
- [19] Ko J K, Jo J H, Kim H J, *et al.* Bismuth telluride anode boosting highly reversible electrochemical activity for potassium storage [J]. Energy Storage Materials, 2021, 43: 411-421.
- [20] Soares D M, Singh G J N. Weyl semimetal orthorhombic T_d-WTe₂ as an electrode material for sodium-and potassium-ion batteries [J]. Nanotechnology, 2021, 32(50): 505402.
- [21] Zhang X, Luo T, Hu X, *et al.* Superconductivity and fermi surface anisotropy in transition metal dichalcogenide NbTe₂ [J]. Chinese Physics Letters, 2019, 36(5): 057402.

(下转第 122 页)

- reforming of CH_4 [J]. *Chinese Rare Earths*, 2009, 30(5): 34–38.
- [12] Dieterich V, Buttler A, Hanel A, *et al.* Power-to-liquid via synthesis of methanol, DME or Fischer-Tropsch-fuels; A review [J]. *Energy & Environmental Science*, 2020, 13(10): 3207–3252.
- [13] Sousa-Aguiar E F, Noronha F B, Faro A. The main catalytic challenges in GTL (gas-to-liquids) processes [J]. *Catalysis Science & Technology*, 2011, 1(5): 698–713.
- [14] 朱雪峰, 杨维慎. 混合导体透氧膜反应器 [J]. *催化学报*, 2009, 30: 801–816.
- [15] 于鹤, 李法社, 祝星, 等. Ce-Fe-Zr-O/MgO 整体型氧载体用于化学链部分氧化甲烷制合成气 [J]. *燃料化学学报*, 2015, 43: 499–506.
- [16] 李芳, 李其明. 基于 Ba-Ce-Co-Fe-O 膜反应器的甲烷部分氧化反应研究 [J]. *化学工程*, 2010, 38: 48–51.
- [17] 张恒, 王婷婷, 聂毅, 等. $\text{SrFe}_{0.6}\text{Cu}_{0.3}\text{Ti}_{0.1}\text{O}_{3-\delta}$ 透氧膜反应器中甲烷部分氧化反应工艺及膜稳定性考察 [J]. *化工学报*, 2014, 65: 1660–1666.
- [18] Wang Z G, Chen T J, Dewangan N, *et al.* Catalytic mixed conducting ceramic membrane reactors for methane conversion [J]. *Reaction Chemistry & Engineering*, 2020, 5(10): 1868–1891.
- [19] Zhu X, Sun S, Cong Y, *et al.* Operation of perovskite membrane under vacuum and elevated pressures for high-purity oxygen production [J]. *Journal of Membrane Science*, 2009, 345(1): 47–52.
- [20] Shubnikova E V, Bragina O A, Nemudry A P. Mixed conducting molybdenum doped BSCF materials [J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2018, 59: 242–250.
- [21] Yoon J S, Yoon M Y, Lee E J, *et al.* Influence of $\text{Ce}_{0.9}\text{Gd}_{0.1}\text{O}_{2-\delta}$ particles on microstructure and oxygen permeability of $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ composite membrane [J]. *Solid State Ionics*, 2010, 181(29): 1387–1393.
- [22] Ma X Y, Yang C L, Chen H, *et al.* Hydrogen permeation and chemical stability of Ni-Ba $\text{Ce}_{0.7}\text{In}_{0.2}\text{Ta}_{0.1}\text{O}_{3-\delta}$ cermet membrane [J]. *Separation and Purification Technology*, 2020, 236: 116276.
- [23] Steil M C, Fouletier J, Geffroy P M. Surface exchange polarization vs. gas concentration polarization in permeation through mixed ionic-electronic membranes [J]. *Journal of Membrane Science*, 2017, 541: 457–464.
- [24] Tang J, Wei Y Y, Zhou L Y, *et al.* Oxygen permeation through a CO_2 -tolerant mixed conducting oxide ($\text{Pr}_{0.9}\text{La}_{0.1}$) $_2$ ($\text{Ni}_{0.74}\text{Cu}_{0.21}\text{Ga}_{0.05}$) $\text{O}_{4+\delta}$ [J]. *AIChE Journal*, 2012, 58(8): 2473–2478.
- [25] Santacruz I, Zayas-Rey M J, Porras-Vázquez J M, *et al.* Colloidal processing and characterisation of lanthanum tungstate sheets, $\text{La}_{5.5}\text{WO}_{11.25}$, prepared by tape casting and reaction sintering [J]. *Ceramics International*, 2015, 41(9): 11334–11340.
- [26] Gao J, Li Y, Li H, *et al.* Symmetric structured porous supported mixed conductor ceramic membrane boosting oxygen permeation flux [J]. *Separation and Purification Technology*, 2023, 316: 123760.
- [27] Luo J M, Wang Z S, Li Y, *et al.* An effective strategy to boost hydrogen separation performance through stable mixed proton-electron conducting membrane [J]. *AIChE Journal*, 2023, 69(11): e18199.
- [28] Tao M, Xin Z, Meng X, *et al.* Highly dispersed nickel within mesochannels of SBA-15 for CO methanation with enhanced activity and excellent thermostability [J]. *Fuel*, 2017, 188: 267–276.
- [29] Zhang Y, Xiong G, Kou Y, *et al.* Influence of the sol-gel method on a NiO/ Al_2O_3 catalyst for CH_4/O_2 to syngas reaction [J]. *Reaction Kinetics and Catalysis Letters*, 2000, 69(2): 325–329.
- [30] Luo H, Wei Y, Jiang H, *et al.* Performance of a ceramic membrane reactor with high oxygen flux Ta-containing perovskite for the partial oxidation of methane to syngas [J]. *Journal of Membrane Science*, 2010, 350(1): 154–160.
- [31] Zhang S D, Li T, Wang B, *et al.* Coupling water splitting and partial oxidation of methane (POM) in Ag modified $\text{La}_{0.8}\text{Ca}_{0.2}\text{Fe}_{0.94}\text{O}_{3-\delta}$ hollow fiber membrane reactors for co-production of H_2 and syngas [J]. *Journal of Membrane Science*, 2022, 659: 120772.
- [32] Li W P, Cao Z W, Li H B, *et al.* Asymmetric dual-phase MIEC membrane reactor for energy-efficient coproduction of two kinds of synthesis gases [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(8): 4218–4227.
- [33] Kniep J, Lin Y S. Partial oxidation of methane and oxygen permeation in SrCoFeO_x membrane reactor with different catalysts [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2011, 50(13): 7941–7948.
- [34] Yuan R H, He Z, Zhang Y, *et al.* Partial oxidation of methane to syngas in a packed bed catalyst membrane reactor [J]. *AIChE Journal*, 2016, 62(6): 2170–2176. ■
-
- (上接第 115 页)
- [22] Li J, Rui B, Wei W, *et al.* Nanosheets assembled layered $\text{MoS}_2/\text{MXene}$ as high performance anode materials for potassium ion batteries [J]. *Journal of Power Sources*, 2020, 449: 227481.
- [23] Cao Y, Chen H, Shen Y, *et al.* SnS_2 nanosheets anchored on nitrogen and sulfur co-doped MXene sheets for high-performance potassium-ion batteries [J]. *ACS Applied Materials*, 2021, 13(15): 17668–17676.
- [24] 申恒涛, 安永灵, 满泉言, 等. MXenes 在锂离子电池负极材料中的应用 [J]. *工程科学学报*, 2023, 45(2): 253–262.
- [25] Li J, Zhao B, Chen P, *et al.* Synthesis of ultrathin metallic MTe_2 ($\text{M}=\text{V}, \text{Nb}, \text{Ta}$) single-crystalline nanoplates [J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(36): 1801043.
- [26] Zhang X, Liu Y, Dong S, *et al.* Surface modified MXene film as flexible electrode with ultrahigh volumetric capacitance [J]. *Electrochimica Acta*, 2019, 294: 233–239.
- [27] Peng M, Wang L, Li L, *et al.* Manipulating the interlayer spacing of 3D MXenes with improved stability and zinc-ion storage capability [J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(7): 2109524.
- [28] Luo X, Zhou Q, Guo M, *et al.* Multiple structural defects in poor-crystalline In-doped NiCo_2O_4 nanoneedles synergistically and remarkably enhance supercapacitive performance [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 431: 134220.
- [29] Yang Z, Lu X, Tan W, *et al.* XPS studies of nitrogen doping niobium used for accelerator applications [J]. *Applied Surface Science*, 2018, 439: 1119–1126.
- [30] Arévalo-López E, Romero-Moreno P, Rosas-Huerta J, *et al.* Effect of Fe on Bi_2Te_3 : Structure, magnetic properties, and XPS valence band [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 899: 163297.
- [31] Magar H S, Hassan R Y, Mulchandani A J S. Electrochemical impedance spectroscopy (EIS): Principles, construction, and biosensing applications [J]. *Sensors*, 2021, 21(19): 6578. ■