

# 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

王中华<sup>1</sup>, 董臻<sup>1</sup>, 吴邦军<sup>1</sup>, 王重权<sup>1</sup>, 许冠南<sup>2</sup>, 刘争<sup>1</sup>, 张业龙<sup>1\*</sup>

(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:** 正极缓慢的氧还原/析氧反应动力学限制了锂空气电池 (LABs) 的实际应用。开发了 Te、N 共掺杂 MXene 锚定单原子 Cu ( $\text{Cu}_{\text{SA}}\text{-Te/N-MXene}$ ) 用于 LABs 的正极催化剂。分散的少层 MXene 纳米片增大了存储放电产物所需的空位, 分散的 Cu 单原子可以有效催化放电产物的形成和分解, 从而大大提高氧化还原动力学。结果表明,  $\text{Cu}_{\text{SA}}\text{-Te/N-MXene}$  正极表现出超高放电容量 (500 mA/g 电流密度下放电容量达到 16 694 mAh/g)、较低的充电过电压 (限定容量为 1 000 mAh/g, 500 mA/g 电流密度下充电过电压为 0.48 V) 和出色的循环稳定性 (500 mA/g 电流密度下稳定循环 425 圈)。

**关键词:** 锂空气电池; Cu 单原子; 碲掺杂; 氮掺杂

**中图分类号:** TM911.41; TB34

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0253-4320(2024)12-0110-06

**DOI:** 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.12.021

## Preparation and performance study of Cu single-atom anchored on Te-N co-doped MXene-based cathode for non-aqueous lithium-air batteries

WANG Zhong-hua<sup>1</sup>, DONG Zhen<sup>1</sup>, WU Bang-jun<sup>1</sup>, WANG Zhong-quan<sup>1</sup>,

HUI Kwun-nam<sup>2</sup>, LIU Zheng<sup>1</sup>, ZHANG Ye-long<sup>\*</sup>

(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 sluggish kinetics of the oxygen reduction/oxygen evolution reactions at the cathode limits the practical application of non-aqueous lithium-air batteries (LABs). Herein, Cu single-atom anchored on Te-N co-doped MXene ( $\text{Cu}_{\text{SA}}\text{-Te/N-MXene}$ ) is developed as a catalyst for LABs. Dispersed few-layer MXene nanosheets increase the space required for storage of discharging products, while the dispersed Cu single atoms can effectively catalyze the formation and decomposition of discharging products, thereby significantly accelerating the electrochemical kinetics of redox processes. It is indicated that  $\text{Cu}_{\text{SA}}\text{-Te/N-MXene}$  cathode shows a discharge capacity as high as 16 694 mAh·g<sup>-1</sup> at a current density of 500 mA·g<sup>-1</sup>, a charge overvoltage as low as 0.48 V at a current density of 500 mA·g<sup>-1</sup> as well as a limited capacity of 1 000 mAh·g<sup>-1</sup>, and an excellent cycling stability that represents 425 stable cycles at a current density of 500 mA·g<sup>-1</sup>.

**Key words:** lithium-air battery; single-atom Cu; Te doping; N doping

随着全球对可持续能源需求的不断增长, 传统的锂离子电池远远无法满足未来电动汽车续航里程的需求, 开发新型电化学储能装置是解决能源危机的有效途径<sup>[1-2]</sup>。非水溶剂锂空气电池 (LABs) 由于其极高的理论能量密度 (~3 505 Wh/kg) 引起了全世界的广泛关注<sup>[3-4]</sup>。然而, 缓慢的氧还原反应 (ORR) 和析氧反应 (OER) 动力学导致的库伦效率低、循环稳定性差等问题, 限制了其大规模商业化<sup>[5]</sup>。因此, 开发新型高效催化剂被认为是提高 LABs 性能的关键。

近年来, 过渡金属碳化物 (MXene) 在能量存储

和转换系统中展现出巨大的潜力<sup>[6-7]</sup>。少层 MXene 具有一定还原性, 可与外来原子建立强相互作用<sup>[8]</sup>。因此, MXene 可以被认为是单原子催化剂的理想基底。然而, 纯 MXene 用于 LABs 时, 催化性能不尽人意, 主要原因是其自身催化能力有限<sup>[9-10]</sup>。杂原子共掺杂 MXene 可增大材料比表面积, 调控基底与放电产物的相互作用, 加快 LABs 中的 ORR/OER 过程<sup>[11-13]</sup>。

笔者在 Te、N 共掺杂的 MXene 基底上成功锚定了 Cu 单原子。少层 MXene 为放电产物的沉积提供了更大的存储空间; N 掺杂可以有效地增加了活性

收稿日期: 2024-03-07; 修回日期: 2024-09-25

基金项目: 国家自然科学基金青年基金 (22005223); 五邑大学港澳联合研发基金 (2019WGalH10); 广东普通高校创新团队资助项目 (2017KCXTD031)

作者简介: 王中华 (1998-), 男, 硕士生, 研究方向为新能源电池材料, wangzhonghua011@163.com; 张业龙 (1988-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为锂空气电池, zhangyelong2008@126.com。

位点并捕获 Cu 单原子; Te 掺杂可有效改善 MXene 的比表面积。Cu<sub>SA</sub>-Te/N-MXene 正极具有优异的催化性能:在 500 mA/g 的电流密度下,首次完全放电比容量高达 16 694 mAh/g;在限定容量为 1 000 mAh/g 以及 500 mA/g 的电流密度下,充电过电压为 0.48 V,并且能稳定循环 425 圈。

## 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%) 采购于先丰纳米; 氟化锂 (LiF, 99%) 和盐酸 (HCl, 30%)、二甲基亚砜 (DMSO, 99%)、碲粉 (Te, 99%)、无水乙醇 (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O<sub>2</sub>, AR)、聚偏二氟乙烯 (PVDF, 99.9%)、N-甲基吡咯烷酮 (NMP)、三聚氰胺 (C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>N<sub>6</sub>, 99%)、双三氟甲烷磺酰胺锂 (LITFSI, AR)、四乙二醇二甲醚 (TEGDME, AR) 采购于阿拉丁试剂有限公司; 碳纸 (TGP-H-060) 为日本东丽公司生产; 电池隔膜采用的是 Whatman 的 GF/F 1821。

### 1.2 分析测试仪器

利用扫描电子显微镜 (SEM, JSM-6700F, JEOL, 日本) 进行形貌观测。利用透射电子显微镜 (TEM, JEM-2010, JEOL, 日本) 对样品晶体结构进行表征。利用球差校正透射电子显微镜 (HAADF-STEM, Themis Z, 美国) 拍摄样品单原子相。利用同步辐射 (EXAFS, XANES, JEM-2100PLUS, 日本) 分析样品的原子配位数。利用 X 射线衍射仪 (XRD, Rigaku SmartLab 9 kW, 日本) 对样品进行组分分析。利用 X 射线光电子能谱仪 (XPS, Axis Ultra DLD, 美国) 进行结构分析。利用比表面积测试仪 (BET, ASAP2460, Micromeritics Instrument Corp, 德国) 对样品比表面积进行测定。

### 1.3 MXene 材料的制备

少层 MXene 的制备: 首先, 将 20 mL 的 HCl 溶液和去离子水 1:1 等体积混合得到盐酸溶液。搅拌加热并将 1.8 g 的 LiF 粉末缓慢加入盐酸溶液中, 当温度升至 60℃ 加入 Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> 粉末, 磁力搅拌 24 h。超声离心后用离子水洗涤后加入 DMSO 溶液并搅拌超声 2 h, 随后离心 3 次获得黑色沉淀, 最后在真空干燥箱中 60℃ 干燥 12 h 获得少层 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> MXene 粉末。

### 1.4 Te/N-MXene 和 Cu<sub>SA</sub>-Te/N-MXene 的制备

Te/N-MXene 的合成: 将 50 mg 少层 MXene 粉末加入到 30 mL 去离子水中搅拌 1 h, 得到 MXene 悬浊液。将 100 mg C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>N<sub>6</sub> 加入到 MXene 悬浊液

中超声搅拌 1 h。随后在 4 000 r/min 转速下离心 30 min, 静置后倒出部分溶剂, 放入冷冻干燥机中干燥 48 h。将所得的粉末放入管式炉出气端, Te 粉放置于进气端, 在 600℃ 保温 2 h。最后通过去离子水洗涤干燥后获得 Te/N-MXene。

Cu<sub>SA</sub>-Te/N-MXene 的制备: 与 Te/N-MXene 合成方法类似, 只需在加入 C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>N<sub>6</sub> 的同时加入 2 mg 的二水氯化铜 (CuCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O) 即可。

### 1.5 电池组装和性能测试

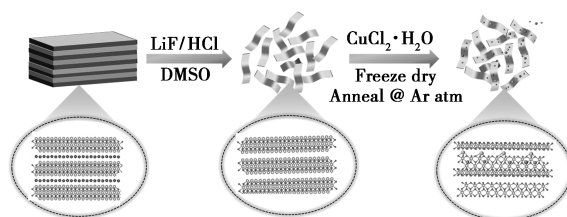
电极制作: 将粉末样品、碳黑和聚偏二氟乙烯 (PVDF) 以 7:2:1 的质量比混合, 滴入适量 N,N-二甲基甲酰胺 (NMP), 搅拌 6 h 后得到浆料涂布在碳纸上, 60℃ 真空烘干制得工作电极, 负载量约为 2 mg/cm<sup>2</sup>。

LABs 的组装: 在充满氩气的手套箱中, 使用 CR2032 型 19 孔电池壳, 金属锂为负极, 玻璃纤维 (Whatman, GF/F) 为隔膜, 所制备工作电极作为正极, 电解液为 1 mol/L TEGDME/LITFSI 混合电解液。充放电测试在蓝电平台 (Land CT 2001A) 进行, 测试电压范围为 2~4.5 V。循环伏安 (CV) 用电化学工作站 (VMP3, Bio-Logic SAS, 法国) 进行测试。

## 2 结果与讨论

### 2.1 材料的形貌和结构分析

Cu<sub>SA</sub>-Te/N-MXene 催化剂的合成示意图如图 1 (a) 所示。首先, 以 Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> MAX 相为原料, 用 HCl 和 LiF 的混合溶液进行刻蚀制备了少层 MXene 纳米片 [如图 1 (b) 所示]。随后, 在 MXene 悬浮液中加入 CuCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O 和 C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>N<sub>6</sub>, 连续超声、搅拌, 并伴有 Cu<sup>2+</sup> 的自还原过程。最后, 将前驱体在 600℃ 下退火以引入 N 和 Te。Cu<sub>SA</sub>-Te/N-MXene 正极的 SEM 图如图 1 (c) 所示, 没有观察到明显的 Cu 的颗粒和团聚, 表明 Cu 单原子在 MXene 上分散良好。图 1 (d) 中透射电镜 (TEM) 显示了 Cu<sub>SA</sub>-Te/N-MXene 的少层形貌, 这种分散的少层 MXene 有利于锚定 Cu 单原子。高角度环形暗场扫描透射电子显



(a) Cu<sub>SA</sub>-Te/N-MXene 的合成示意图

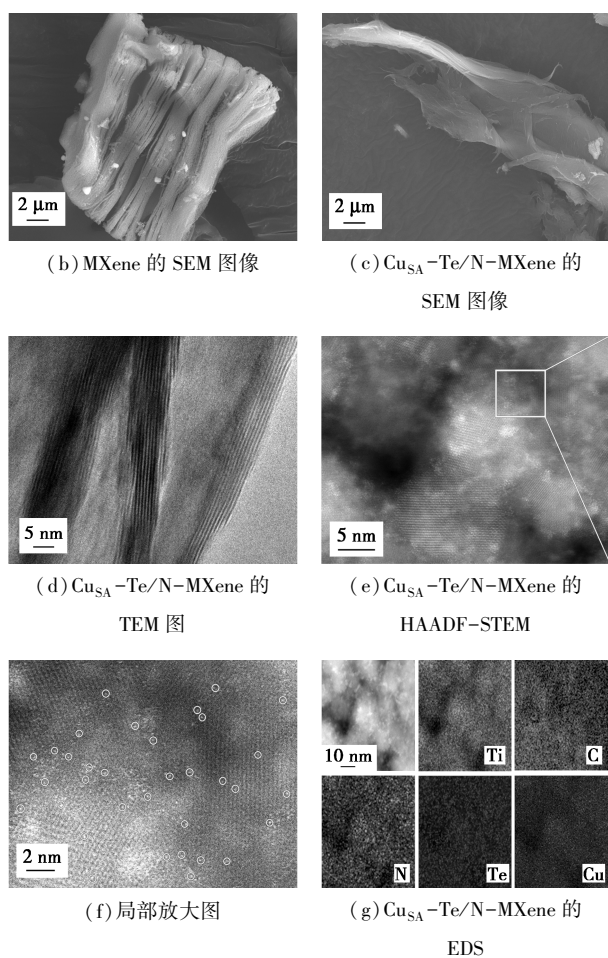


图 1  $\text{Cu}_{\text{SA}}\text{-Te/N-MXene}$  的 SEM、HRTEM、EDS 和 HAADF-STEM 图像

显微镜(HAADF-STEM)清楚地显示了合成的  $\text{Cu}_{\text{SA}}\text{-Te/N-MXene}$  纳米片形貌,从图 1(e)和图 1(f)中可以看出,单个 Cu 原子(亮点)均匀地分散在 MXene 晶格条纹上。从图 1(g)中可以看出,能量色散 X 射线能谱(EDX)表明 Ti、C、N、Te 和 Cu 元素在  $\text{Cu}_{\text{SA}}\text{-Te/N-MXene}$  中均匀分布。

$\text{Cu}_{\text{SA}}\text{-Te/N-MXene}$  及其对比样品的 XRD、BET、XPS 图如图 2 所示。从图 2(a)中可以看出, MXene 的(002)峰从  $8.7^\circ$  移动至  $6.2^\circ$ , 表明 MXene 的层间距因 C 原子被 Te 原子取代而变宽<sup>[14-15]</sup>。根据布拉格方程,  $\text{Cu}_{\text{SA}}\text{-Te/N-MXene}$  层间距相较于 MXene 由  $1.01\text{ nm}$  变为  $1.42\text{ nm}$ <sup>[16]</sup>。并且在  $\text{Cu}_{\text{SA}}\text{-Te/N-MXene}$  中未观察到 Cu 金属的衍射峰,表明 Cu 原子呈现分散状态。从图 2(b)中可以看出,  $\text{Cu}_{\text{SA}}\text{-Te/N-MXene}$  层状结构的比表面积为  $163.8\text{ m}^2/\text{g}$ , 远大于 MXene 的  $79\text{ m}^2/\text{g}$ , 大的比表面积主要归因于分散的 MXene 层结构以及 Te 原子较大的原子半径。

从图 2(c)中可以看出,  $\text{Cu}_{\text{SA}}\text{-Te/N-MXene}$  样品包含 Cu、N、Te、Ti、C 和 O 等元素。从图 2(d)可知, Cu  $2p_{1/2}$  和  $2p_{3/2}$  轨道的结合能分别为  $932.5\text{ eV}$  和  $952.4\text{ eV}$ , 与  $\text{Cu}^0$  或  $\text{Cu}^+$  的结合能接近<sup>[17-18]</sup>。从图 2(e)中可以看出, Te  $3d$  高分辨 XPS 图谱中存在位于  $584.8\text{ eV}$  和  $573.9\text{ eV}$  的 Ti-Te 键<sup>[19]</sup>。从图 2(f)可知, N  $1s$  的 XPS 能谱显示存在吡啶 N ( $398.1\text{ eV}$ ) 和吡咯 N ( $400.6\text{ eV}$ ),  $397.4\text{ eV}$  和  $399.0\text{ eV}$  的特征

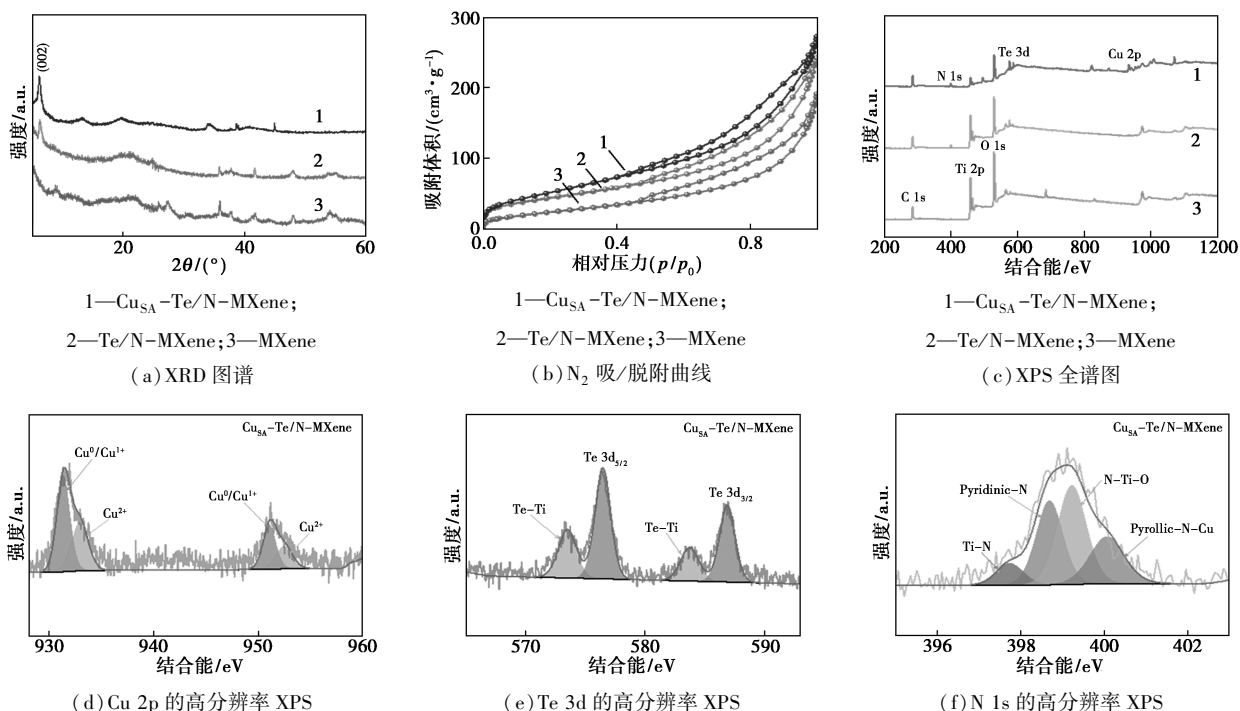
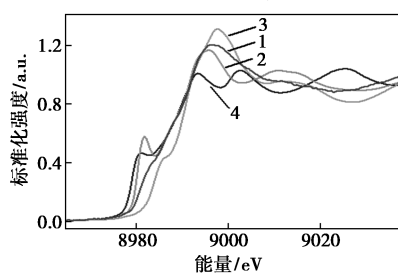


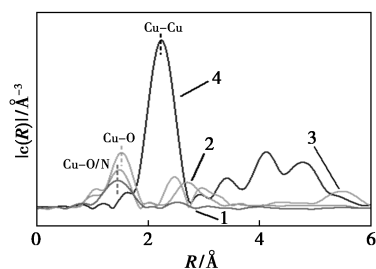
图 2  $\text{Cu}_{\text{SA}}\text{-Te/N-MXene}$  及其对比样品的 XRD、BET、XPS 图

峰分别归属于Ti—N和N—Ti—O键<sup>[20-22]</sup>。

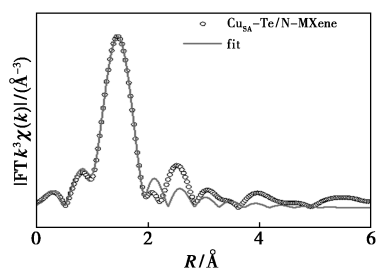
利用X射线吸收近边结构(XANES)和扩展X射线吸收精细结构(EXAFS)技术对Cu单原子在K边的电子结构和配位环境进行研究,结果如图3所示。从图3(a)中可以看出,Cu<sub>SA</sub>-Te/N-MXene的近边吸收能位于标准参比Cu<sub>2</sub>O和CuO之间,表面Cu的价态高于金属Cu<sup>0</sup>,但低于金属Cu<sup>2+</sup><sup>[17,23]</sup>。利用Cu<sub>SA</sub>-Te/N-MXene在R空间的傅里叶变换(FT-EXAFS)曲线来阐明Cu原子锚定在MXene上的配位环境。从图3(b)可知,Cu<sub>SA</sub>-Te/N-MXene在1.44 Å处只有1个主峰,对应于Cu—N或Cu—O散射路径<sup>[24]</sup>。值得注意的是,没有观察到明显的



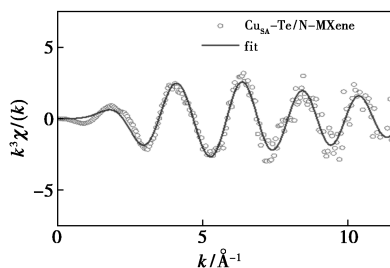
1—Cu<sub>SA</sub>-Te/N-MXene; 2—Cu<sub>2</sub>O; 3—CuO; 4—Cu箔  
(a) XANES 光谱



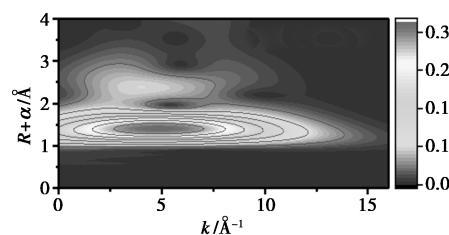
1—Cu<sub>SA</sub>-Te/N-MXene; 2—Cu<sub>2</sub>O; 3—CuO; 4—Cu箔  
(b) Cu的K边FT EXAFS  $k^3$  加权函数光谱



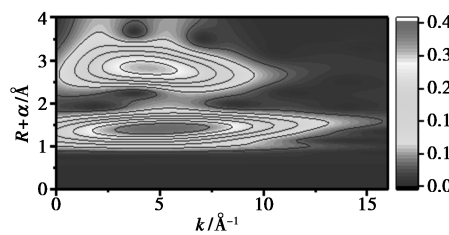
(c) R空间EXAFS拟合结果



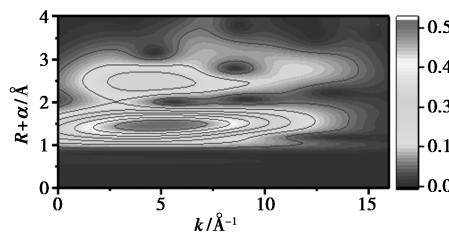
(d) K空间拟合结果



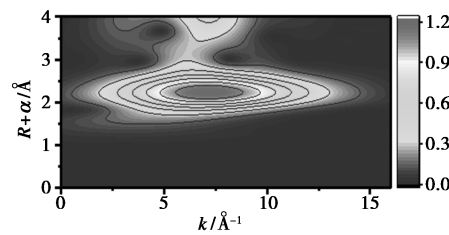
(e) Cu<sub>SA</sub>-Te/N-MXene的WT-EXAFS



(f) CuO的WT-EXAFS



(g) Cu<sub>2</sub>O的WT-EXAFS



(h) Cu箔的WT-EXAFS

图3 Cu<sub>SA</sub>-Te/N-MXene及其对比样品的同步辐射表征

Cu—Cu(2.20 Å)键。结果证明MXene表面Cu原子和N、O原子之间的相互作用。

通过EXAFS曲线拟合确定Cu<sub>SA</sub>-Te/N-MXene的定量配位构型。Cu原子与周围O原子和N原子的配位数分别为(2.0±0.1)和(1.0±0.1), Cu—N和Cu—O的平均键长分别为(1.97±0.01) Å和(1.91±0.01) Å。从图3(e)可知,根据Cu—O散射路径对第一壳层进行R空间的Cu K-edge EXAFS拟合,与K空间[如图3(d)所示]的拟合结果吻合较好。从图3(e)~图3(h)可知,对Cu的K边进行小波变换(WT)-EXAFS发现,Cu<sub>SA</sub>-Te/N-MXene的原子构型在4.74 Å<sup>-1</sup>处只有1个显著峰,表明Cu—N/Cu—O的形成,这与Cu箔(7.48 Å<sup>-1</sup>)不同(对应Cu—Cu路径),与Cu<sub>2</sub>O(5.36 Å<sup>-1</sup>)和CuO(5.14 Å<sup>-1</sup>)接近,

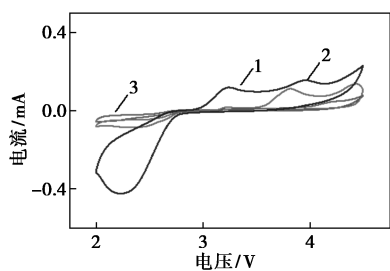
表明孤立的 Cu 原子分散在 MXene 中。

### 2.2 电化学性能分析

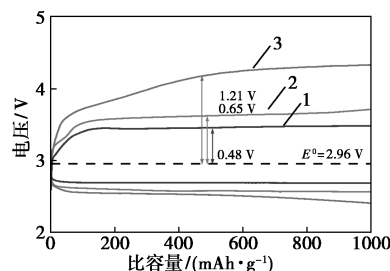
$\text{Cu}_{\text{SA}}-\text{Te}/\text{N}-\text{MXene}$  电极的电化学性能分析结果如图 4 所示。从图 4(a) 中可以看出, 与  $\text{Te}/\text{N}-\text{MXene}$ 、 $\text{MXene}$  正极相比,  $\text{Cu}_{\text{SA}}-\text{Te}/\text{N}-\text{MXene}$  正极具有更大的氧化还原峰面积以及更高的峰电流, 说明其具有更高的电化学活性<sup>[25-27]</sup>。

从图 4(b) 中可以看出,  $\text{Cu}_{\text{SA}}-\text{Te}/\text{N}-\text{MXene}$  正极展现出 0.48 V 的充电过电压, 表现出较好的 OER 活性。从图 4(c) 中可以看出, 与  $\text{MXene}$  (8 645/5 722 mAh/g) 和  $\text{Te}/\text{N}-\text{MXene}$  (12 900/10 880 mAh/g) 相比,  $\text{Cu}_{\text{SA}}-\text{Te}/\text{N}-\text{MXene}$  的放电/充电容量为 16 694/14 927 mAh/g。此外,  $\text{Cu}_{\text{SA}}-\text{Te}/\text{N}-\text{MXene}$  电极在 7 500 mAh/g 的超高容量下, 充电过电压仅为 0.82 V。

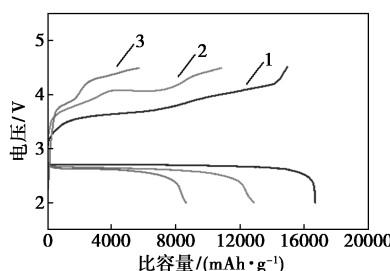
从图 4(d) 可知, 随着电流密度的增加,  $\text{Cu}_{\text{SA}}-\text{Te}/\text{N}-\text{MXene}$  电极的充电平台电压增加, 且放电平



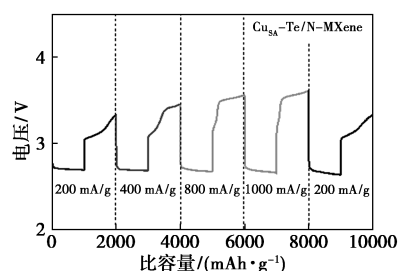
1— $\text{Cu}_{\text{SA}}-\text{Te}/\text{N}-\text{MXene}$ ; 2— $\text{Te}/\text{N}-\text{MXene}$ ; 3— $\text{MXene}$   
(a)  $\text{Cu}_{\text{SA}}-\text{Te}/\text{N}-\text{MXene}$  电极的 CV 循环图



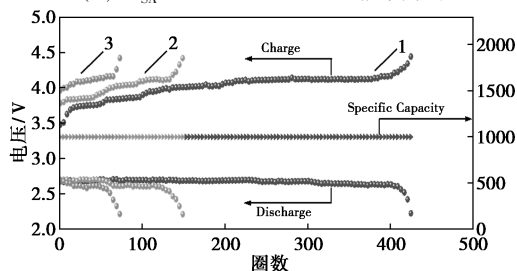
1— $\text{Cu}_{\text{SA}}-\text{Te}/\text{N}-\text{MXene}$ ; 2— $\text{Te}/\text{N}-\text{MXene}$ ; 3— $\text{MXene}$   
(b) 200 mA/g 电流密度以及限定容量为 1 000 mAh/g 的  $\text{Cu}_{\text{SA}}-\text{Te}/\text{N}-\text{MXene}$  电极首次充放电曲线



1— $\text{Cu}_{\text{SA}}-\text{Te}/\text{N}-\text{MXene}$ ; 2— $\text{Te}/\text{N}-\text{MXene}$ ; 3— $\text{MXene}$   
(c)  $\text{Cu}_{\text{SA}}-\text{Te}/\text{N}-\text{MXene}$  电极在 500 mA/g 电流密度下的完全充放电曲线



(d)  $\text{Cu}_{\text{SA}}-\text{Te}/\text{N}-\text{MXene}$  电极的倍率曲线



1— $\text{Cu}_{\text{SA}}-\text{Te}/\text{N}-\text{MXene}$ ; 2— $\text{Te}/\text{N}-\text{MXene}$ ; 3— $\text{MXene}$   
(e)  $\text{Cu}_{\text{SA}}-\text{Te}/\text{N}-\text{MXene}$  电极及其对比样品的长循环曲线

图 4  $\text{Cu}_{\text{SA}}-\text{Te}/\text{N}-\text{MXene}$  及其对比样品的电化学性能图

台电压降低。从图 4(e) 可知, 在循环稳定性方面,  $\text{Cu}_{\text{SA}}-\text{Te}/\text{N}-\text{MXene}$  正极能够稳定循环 425 圈, 循环圈数是  $\text{Te}/\text{N}-\text{MXene}$  (149 圈) 和  $\text{MXene}$  (73 圈) 的 2 倍以上。  $\text{Cu}_{\text{SA}}-\text{Te}/\text{N}-\text{MXene}$  电极的出色性能来源于较大的比表面积和较高的催化性能<sup>[8]</sup>。

### 3 结论

成功制备了 N、Te 共掺杂 MXene 锚定的 Cu 单原子。  $\text{Cu}_{\text{SA}}-\text{Te}/\text{N}-\text{MXene}$  用于 LABs 的正极时表现出优异的电化学性能, 在 200 mA/g 的电流密度、限定容量为 1 000 mAh/g 比容量下表现出 0.48 V 充电过电压, 在 500 mA/g 电流密度下完全放电容量达 16 694 mAh/g, 并且在 500 mA/g 电流密度下能稳定循环 425 圈。优异的电化学性能主要归因于分散性良好的  $\text{Cu}_{\text{SA}}-\text{Te}/\text{N}-\text{MXene}$  纳米片, 暴露出更多的活性位点, 为放电产物的储存提供了更多的空间。此外分散的 Cu 单原子与 N 之间的协同作用增强了材料的导电性, 使得放电产物更容易分解。

### 参考文献

[1] Qiu Q, Long J, Yao P, *et al.* Cathode electrocatalyst in aprotic lithium oxygen (Li-O<sub>2</sub>) battery: A literature survey [J]. *Catalysis Today*, 2023, 420: 114138.  
[2] Feng N, He P, Zhou H. Critical challenges in rechargeable aprotic Li-O<sub>2</sub> batteries [J]. *Advanced Energy Materials*, 2016, 6 (9): 1502303.  
[3] Liu L, Liu Y, Wang C, *et al.* Li<sub>2</sub>O<sub>2</sub> formation electrochemistry and

- its influence on oxygen reduction/evolution reaction kinetics in aprotic Li-O<sub>2</sub> batteries [J]. *Small Methods*, 2022, 6(1): 2101280.
- [4] Wu D, Wu S, Zhang G, *et al.* Boosting Li-O<sub>2</sub> battery performance via coupling of P-N site-rich N, P co-doped graphene-like carbon nanosheets with nano-CePO<sub>4</sub> [J]. *Small*, 2023(6): 2206455.
- [5] Cao J, Wang L, Li D, *et al.* Fundamental understanding and material challenges in rechargeable nonaqueous Li-O<sub>2</sub> batteries: Recent progress and perspective [J]. *Advanced Energy Materials*, 2018, 8(22): 1800348.
- [6] Nan J, Guo X, Xiao J, *et al.* Nanoengineering of 2D MXene-based materials for energy storage applications [J]. *Small*, 2021, 17(9): 1902085.
- [7] Li Yuqiong, Bing L, Bin G, *et al.* Review and recent advances in mass transfer in positive electrodes of aprotic Li-O<sub>2</sub> batteries [J]. *Acta Physico-chimica Sinica*, 2020, 3(3): 2258–2270.
- [8] Bao H, Qiu Y, Peng X, *et al.* Bimetal organic framework-Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> MXene with metalloporphyrin electrocatalyst for lithium-oxygen batteries [J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(1): 2210702.
- [9] Wen C, Zhu T, Li X, *et al.* Nanostructured Ni/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> MXene hybrid as cathode for lithium-oxygen battery [J]. *Chinese Chemical Letters*, 2020, 31(4): 1000–1003.
- [10] Zhao D, Wang P, Di H, *et al.* Single semi-metallic selenium atoms on Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> MXene nanosheets as excellent cathode for lithium-oxygen batteries [J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(29): 2010544.
- [11] Lin W, Lu Y R, Peng W, *et al.* Atomic bridging modulation of Ir-N, S co-doped MXene for accelerating hydrogen evolution [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2022, 10(18): 9878–9885.
- [12] Ramalingam V, Varadhan P, Fu H, *et al.* Porous materials applied in nonaqueous Li-O<sub>2</sub> batteries: Status and perspectives [J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(44): 2002559.
- [13] Cui J, Yao S, Ihsan-Ul-Haq M, *et al.* Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> MXene as a high capacity electrode material for metal (Li, Na, K, Ca) ion batteries [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2014, 6(14): 11173–11179.
- [14] Xu X, Zhang Y L, Sun H Y, *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.
- [15] Sun H, Zhang Y L, Xu X, *et al.* Strongly coupled Te-SnS<sub>2</sub>/MXene superstructure with self-autoadjustable function for fast and stable potassium ion storage [J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2021, 61: 416–424.
- [16] Wu B, Li M, Mazánek V, *et al.* In situ vanadium-deficient engineering of V<sub>2</sub>C MXene: A pathway to enhanced zinc-ion batteries [J]. *Small Methods*, 2024, 8(9): 2301461.
- [17] Yang P, Long Y, Huang W, *et al.* Single-atom copper embedded in two-dimensional MXene toward peroxymonosulfate activation to generate singlet oxygen with nearly 100% selectivity for enhanced Fenton-like reactions [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2024, 324: 2301461.
- [18] Ma Z, Bai R, Yu W, *et al.* Cu Single-atom decorated three-dimensional nitrogen-carbon framework as an oxygen reduction reaction catalyst for high-performance zinc-air batteries [J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2024, 7(1): 1108–1119.
- [19] Cao Y, Chen H, Shen Y, *et al.* SnS<sub>2</sub> nanosheets anchored on nitrogen and sulfur co-doped MXene sheets for high-performance potassium-ion batteries [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(15): 17668–17676.
- [20] Liu H, Hu Z, Liu Q, *et al.* Single-atom Ru anchored in nitrogen-doped MXene (Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>) as an efficient catalyst for the hydrogen evolution reaction at all pH values [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2020, 8(46): 24710–24717.
- [21] Chen Y, Li Z, Zhu Y, *et al.* Atomic Fe dispersed on N-doped carbon hollow nanospheres for high-efficiency electrocatalytic oxygen reduction [J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(8): 1806312.
- [22] Ying L, Yu S Z, Kai C, *et al.* Rational design of cross-linked N-doped C-Sn nanofibers as free-standing electrodes towards high-performance Li-ion battery anodes [J]. *Acta Physico-chimica Sinica*, 2024, 40(3): 2305007.
- [23] Han G, Zheng Y, Zhang X, *et al.* High loading single-atom Cu dispersed on graphene for efficient oxygen reduction reaction [J]. *Nano Energy*, 2019, 66: 104088.
- [24] Gu H, Yue W, Hu J, *et al.* Asymmetrically coordinated Cu-N<sub>1</sub>C<sub>2</sub> single-atom catalyst immobilized on Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> MXene as separator coating for lithium-sulfur batteries [J]. *Advanced Energy Materials*, 2019, 13(20): 2204014.
- [25] Ding S, Wu L, Yuan X, *et al.* Regulating d-orbital electronic configuration of Ni-based chalcogenides to enhance the oxygen electrode reactions in Li-O<sub>2</sub> batteries [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 478: 147473.
- [26] Chao M, Zeng K, Lu C, *et al.* Synergized N and P co-doped Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> mxene enabling high-performance Li-air batteries [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2024, 657: 46–53.
- [27] Du D, He H, Zheng R, *et al.* Single-atom immobilization boosting oxygen redox kinetics of high-entropy perovskite oxide toward high-performance lithium-oxygen batteries [J]. *Advanced Energy Materials*, 2024, 6(9): 2304238. ■