

离子液体辅助水热合成 1T-MoS₂ 及其 锌离子储存性能

王 璐

(沈阳城市建设学院市政与环境工程学院, 沈阳 110167)

摘要 采用离子液体辅助水热法, 在碳布(CC)上合成了具有扩大层间距的 1T-MoS₂ 纳米片阵列, 对其结构形貌进行了表征, 并研究了其锌离子储存性能. 研究发现, 作为水系锌离子电池正极材料, 1T-MoS₂/CC 在 0.1 A/g 电流密度下呈现出 194.2 mA·h/g 的放电比容量, 且在 1 A/g 大电流密度下经 750 次循环后, 仍可保持 95.5% 的容量保持率. 1T-MoS₂/CC 具有优异的锌离子储存性能可归因于: 离子液体促进了 1T 相的形成, 纳米阵列中的 1T-MoS₂ 相含量约为 78%, 而高浓度 1T 相使其具有良好的电荷转移速率; 离子液体插入 1T-MoS₂ 层间使其层间距增至 1.06 nm, 可降低水合锌离子嵌入过程的能垒; 碳布的三维结构可抑制 MoS₂ 纳米片的聚集, 从而促进了 1T-MoS₂/CC 与电解液间的充分接触.

关键词 二硫化钼; 1T 相; 离子液体; 锌离子电池; 水热合成

中图分类号 O646; O611.4

文献标志码 A

doi: 10.7503/cjcu20240145

Ionic Liquid-assisted Hydrothermal Synthesis of 1T-MoS₂ and Its Zinc Ion Storage Performance

WANG Lu*

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Urban Construction University, Shenyang 110167, China)

Abstract A 1T-MoS₂ nanosheets array with expanded interlayer spacing was synthesized on carbon cloth (CC) using an ionic liquid-assisted hydrothermal method. As a positive electrode material for zinc ion batteries, 1T-MoS₂/CC exhibits a discharge specific capacity of 194.2 mA·h/g at 0.1 A/g current density, and can still maintain a capacity retention rate of 95.5% after 750 cycles at a high current density of 1 A/g. The excellent zinc ion storage capacity of 1T-MoS₂/CC can be attributed to: (1) ionic liquids promote the formation of 1T phase, with a 1T-MoS₂ phase content of about 78% in the nanoarray, and a high concentration of 1T phase content gives it a good charge transfer rate; (2) the insertion of ionic liquids between 1T-MoS₂ layers increases the interlayer spacing to 1.06 nm, which can reduce the energy barrier during the insertion process of hydrated zinc ions; (3) the three-dimensional structure of carbon cloth can inhibit the aggregation of MoS₂ nanopages and promote sufficient contact between 1T-MoS₂/CC and electrolyte.

Keywords MoS₂; 1T phase; Ionic liquid; Zinc ion battery; Hydrothermal synthesis

水系锌离子电池具有高安全性、相对较低的氧化还原电位 (-0.76 V vs. SHE)、高理论容量

收稿日期: 2024-03-26. 网络首发日期: 2024-08-12.

联系人简介: 王 璐, 女, 硕士, 工程师, 主要从事水处理技术及新能源材料研究. E-mail: luluwang328@163.com

基金项目: 2022 年辽宁省一流本科课程“环境导论”(批准号: 辽教办[2022]251 号)、2024 年度辽宁省民办教育协会教育科学“十四五”规划项目(批准号: LMX2024224)和沈阳城市建设学院科研发展基金(批准号: XKJ-YB-202411)资助.

Supported by the Top Undergraduate Courses of Liaoning Province “Introduction to Environment” in 2022, China (No. Liaoning Education Office [2022] 251), the 14th Five-Year Plan Project of Education Science of Liaoning Provincial Private Education Association in 2024, China (No. LMX2024224) and the Research Development Foundation of Shenyang Urban Construction University, China (No. XKJ-YB-202411).

(820 mA·h/g)、无毒和低成本等特点,作为新型二次电池受到普遍关注^[1-3]。迄今,已研制出多种正极材料用于水系锌离子电池,主要有锰基氧化物^[4]、钒基氧化物^[5]和普鲁士蓝类似物^[6,7]等材料。这些材料体系虽各具优势,但仍存在诸多问题,如,锰基氧化物的锰组分在水系电解质中的溶解、钒基氧化物在锌离子嵌入/脱出过程中形成不可逆的含锌杂相、普鲁士蓝类正极材料的本征容量较低等问题^[8,9]。因此,开发容量高和稳定性好的新型正极材料仍是水系锌离子电池亟待解决的关键问题。

过渡金属二硫化物因其独特的层状结构和物理化学性质,在能量存储和转换领域中有广阔的应用前景^[10]。MoS₂被认为是最具潜力的离子嵌入材料,作为锂(钠)离子电池的正极材料已被广泛研究^[11-13]。MoS₂为六方晶系,层间距为0.65 nm,因MoS₆八面体链接方式不同,可有1T, 2H和3R 3种晶型^[13]。其中,2H-MoS₂是热力学稳定相,带隙为1.2 eV的半导体;1T-MoS₂为金属性亚稳相,3R-MoS₂则为比2H-MoS₂多一个Mo-S单位的亚稳态结构,且两种亚稳相高温下均可转化为2H-MoS₂^[13]。因Zn²⁺离子的水合离子半径(0.404~0.430 nm)较大,MoS₂层间距尚不能满足Zn²⁺离子的快速嵌入^[14,15]。研究发现,可通过扩大MoS₂层间距^[16]、相变工程^[17]及与导电材料复合^[18]等策略改善MoS₂的储锌能力。最近, Yang等^[19]报道了以碳布为衬底,通过离子液体辅助水热法合成出1T-MoS₂纳米片阵列,并呈现出优异的析氢反应性能。为此,我们开展了离子液体辅助水热合成1T-MoS₂纳米阵列及其锌离子储存性能研究。

本文采用离子液体辅助水热法在导电碳布(CC)上合成具有扩展层间距的1T-MoS₂纳米片阵列,并研究了产物作为水系锌离子电池正极材料的性能。研究发现,扩展层间距的1T-MoS₂纳米片阵列的储锌性能明显优于2H-MoS₂,原因可归结为:合成产物中1T-MoS₂的含量约为78%,高浓度的金属性1T相改善了MoS₂的电荷迁移动力学;离子液体插入到1T-MoS₂的层间,使(002)晶面的层间距由0.63 nm扩展至1.06 nm,使水合锌离子的嵌入反应更为容易;导电碳布衬底不仅抑制了1T-MoS₂纳米片的团聚,也促进了正极材料与电解液的良好接触,且有利于催化剂和集电极间的电荷迁移。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

二水合钼酸钠(Na₂MoO₄·2H₂O),天津希恩思生化科技有限公司;硫脲[CS(NH₂)₂],凯玛特(天津)化工科技有限公司;1-丁基-3-甲基咪唑四氟硼酸盐([BMIM][BF₄]),1-丁基-3-甲基咪唑四氟硼酸盐([EMIM][BF₄]),1-己基-3-甲基咪唑四氟硼酸盐([HMIM][BF₄])和1-辛基-3-甲基咪唑四氟硼酸盐([OMIM][BF₄]),兰州雨陆精细化工有限公司;导电碳布(CC),天津艾利安电子科技有限公司;三氟甲烷磺酸锌[Zn(CF₃SO₃)₂],格如思(天津)科技有限公司;无水乙醇(CH₃CH₂OH)、丙酮(CH₃COCH₃)和浓硝酸(HNO₃),天津试剂三厂。所有试剂均为分析纯。去离子水(电导率≤0.1 μS/cm);高纯铝箔和科晶 Whatman 玻璃纤维隔膜,北京明宸中寰科技有限公司。

D/max-2200PC型X射线粉末衍射仪(XRD),日本理学公司;JEOL JSM-7500F型场发射扫描电子显微镜(FESEM),日本电子公司;Tecnai G2 F20型透射电子显微镜(TEM),美国FEI公司;Agilent 5110 ICP-OES型电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES),美国安捷伦公司;ESCALAB 250Xi型X射线光电子能谱仪(XPS),美国赛默飞世尔科技公司;XploRA Nano型拉曼光谱仪(Raman),法国HORIBA公司;Nicolet iS50型傅里叶变换红外光谱仪(FTIR),美国赛默飞世尔科技公司;Zennium型电化学工作站,德国Zahner公司;LAND电池测试系统,武汉蓝博公司。

1.2 实验过程

1.2.1 碳布衬底预处理 将碳布裁成1.5 cm × 2.5 cm的矩形,依次浸泡于丙酮、乙醇和去离子水中。经超声处理10 min后,将碳布浸泡于浓HNO₃中超声活化30 min,再用去离子水和乙醇反复冲洗,以除去残留的硝酸。最后,于60 °C下真空干燥3 h。

1.2.2 1T-MoS₂/CC的合成 将1.5 mmol Na₂MoO₄·2H₂O、4.5 mmol CS(NH₂)₂和7.5 mmol [BMIM][BF₄]溶解于50 mL去离子水中,剧烈搅拌30 min以获得均匀的溶液。将溶液转移至80 mL聚四氟乙烯为内衬的高压釜中,将处理好的碳布垂直浸入溶液中,密封后置于200 °C烘箱中,反应24 h。反应结束后,

产物经去离子水和乙醇交替洗涤数次,于65 °C下真空干燥6 h,所得产物记为1T-MoS₂/CC.

2H-MoS₂/CC的合成步骤与1T-MoS₂/CC完全相同,只是反应物中不加入离子液体.

1.2.3 电化学性能表征 将1T-MoS₂/CC样品裁剪为直径10 mm的圆片并作为正极,活性物质负载量约4 mg. 负极采用厚度为0.08 mm的锌箔,使用前用1200目砂纸打磨抛光,并裁剪成直径为12 mm的圆片,然后置于无水乙醇中超声清洗. 隔膜采用直径为19 mm的Whatman玻璃纤维隔膜. 电解液选用3 mol/L Zn(CF₃SO₃)₂. 将上述材料组装成CR2032纽扣电池,在室温下静置6 h备用. 进行电化学性能测试前,用0.1 A/g电流密度循环几次以激活电池. 所有电极制备及电池组装过程均在空气中进行. 电池的循环伏安曲线(CV)和电化学阻抗谱(EIS)采用电化学工作站测试. CV扫描速率分别设置为0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 mV/s, EIS的频率范围为0.1~100 kHz,电压振幅为5 mV. 恒流充放电(GCD)采用电池测试系统测得;电池的恒电流间歇滴定(GITT)采用电池测试系统,电流密度为0.2 A/g,脉冲时间为20 min,间隔时间为2 h.

2 结果与讨论

2.1 1T-MoS₂/CC的结构形貌表征

如图1所示,2H-MoS₂/CC位于 $2\theta=14^\circ$, 33.4° 和 58.7° 处的衍射峰分别对应于六方MoS₂的(002), (100)和(110)晶面(PDF#37-1492),而 $2\theta=25^\circ$ 和 44° 处的宽衍射峰则为碳布的衍射峰. 1T-MoS₂/CC的(002)晶面衍射峰位于 $2\theta=8.6^\circ$ 处,明显向低角度方向偏移,且出现了一个新的(004)衍射峰^[19]. 由Bragg方程可知,1T-MoS₂/CC的层间距由0.63 nm扩大至1.06 nm.

图2(A)为1T-MoS₂/CC和2H-MoS₂/CC的Raman光谱. 可见,1T-MoS₂/CC在149, 201, 283, 339和410 cm⁻¹处的吸收峰分别对应1T-MoS₂的J₁, J₂, E_{1g}, J₃和A_{1g}振动模式^[19,20],而2H-MoS₂/CC在373和404 cm⁻¹处的吸收峰则分

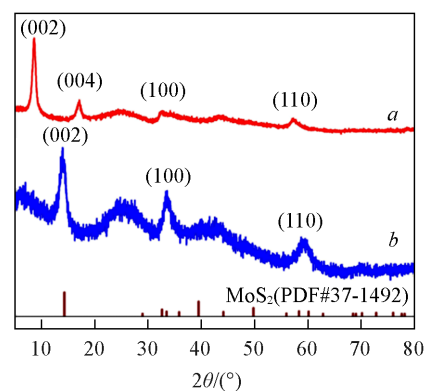


Fig. 1 XRD patterns of 1T-MoS₂/CC(a) and 2H-MoS₂/CC(b)

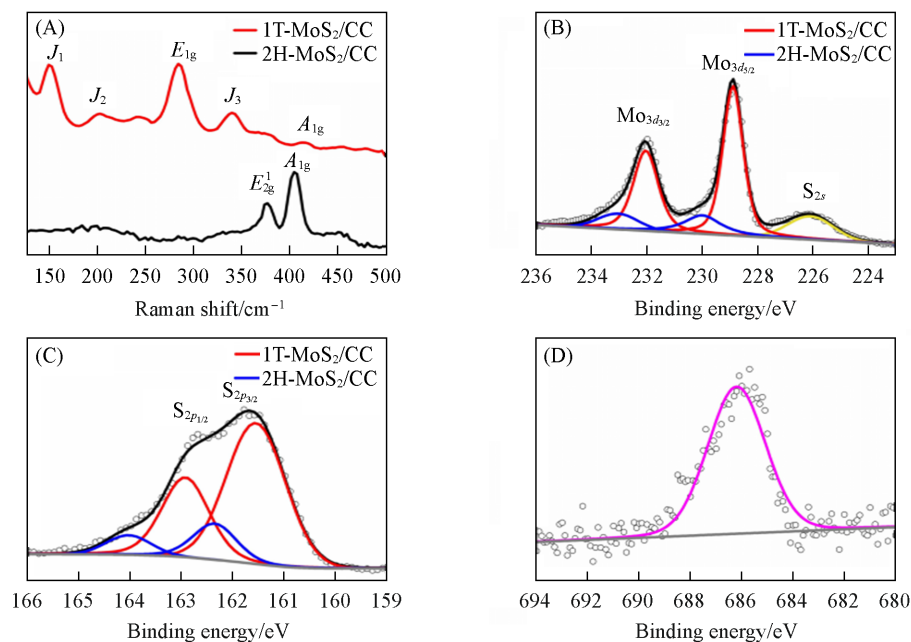


Fig. 2 Raman spectra of 1T-MoS₂/CC and 2H-MoS₂/CC(A), deconvoluted Mo(B) and S(C) XPS spectra of 1T-MoS₂/CC and 2H-MoS₂/CC, and deconvoluted F_{1s} XPS spectrum of 1T-MoS₂/CC(D)

别对应2H-MoS₂的 E_{2g}^1 和 A_{1g} 振动模式^[21]. 为了明确离子液体[BMIM][BF₄]对1T-MoS₂形成的可能影响, 进行了1T-MoS₂/CC的XPS表征. 如图2(B)所示, 228.9和232.0 eV处的双峰分别对应于1T-MoS₂中Mo⁴⁺的 $3d_{5/2}$ 和 $3d_{3/2}$, 而230.0和233.08 eV处的双峰则可分别归属为2H-MoS₂中Mo⁴⁺的 $3d_{5/2}$ 和 $3d_{3/2}$ ^[22]. 2H-MoS₂的Mo_{3d}电子结合能约比1T-MoS₂高1 eV, 这一结果与文献[22]一致. 如图2(C)所示, 161.6和163.0 eV处的吸收峰可分别归属为1T-MoS₂的 $S_{2p_{3/2}}$ 和 $S_{2p_{1/2}}$, 而162.5和164.1 eV处的吸收峰则可归属为2H-MoS₂, 而2H-MoS₂的 S_{2p} 电子结合能略高于1T-MoS₂^[19,22]. 由1T-MoS₂和2H-MoS₂的Mo_{3d}峰面积估算可得1T-MoS₂/CC中1T相的比例约为78%. 此外, 在1T-MoS₂/CC的XPS谱图中可观察到较强的F_{1s}吸收峰[图2(D)], 可能是[BMIM][BF₄]嵌入到1T-MoS₂层间所致.

为了证明离子液体的嵌入作用, 用不同侧链长度的离子液体合成了MoS₂样品. XRD分析结果表明, 不同侧链的离子液体均可合成出1T-MoS₂[图3(A)], 且离子液体侧链长度增长导致(002)衍射峰呈现出向低角度方向的规律性偏移[图3(B)]. 由此可见, 离子液体可以嵌入1T-MoS₂的(002)层间, 且层间距随离子液体的嵌入而增大.

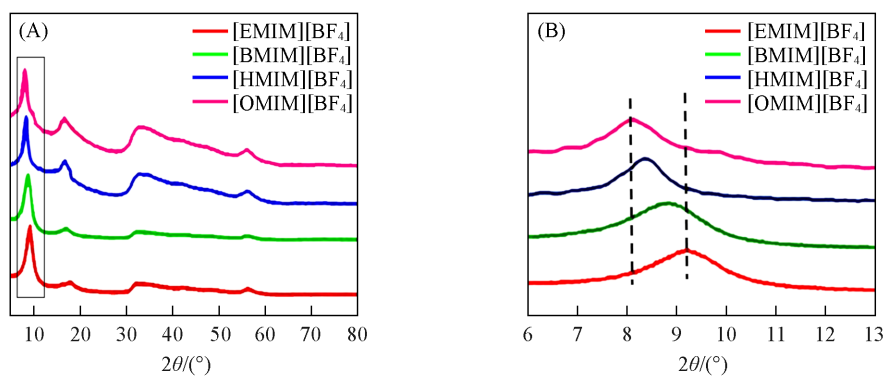


Fig. 3 XRD patterns(A) and the zoom-in view in the low-angle range of (A)(B) of the MoS₂ sample prepared with [EMIM]SCN, [BMIM]SCN, [HMIM]SCN and [OMIM]SCN

1T-MoS₂/CC的FESEM照片表明, 1T-MoS₂纳米片均匀地生长在碳布上[图4(A)]. 1T-MoS₂/CC的TEM表征结果如图4(B)和(C)所示, 产物呈现出的波纹与褶皱证明其具有纳米片的特征, 且纳米片为多层1T-MoS₂沿 c 轴堆叠而成. 由图4(B)矩形区域的HRTEM照片可知, 1T-MoS₂/CC具有扩大的层间距(约为1.06 nm)[图4(C)], 与XRD结果吻合. 图4(D)~(G)为1T-MoS₂/CC的EDS元素分布图像. 可见,

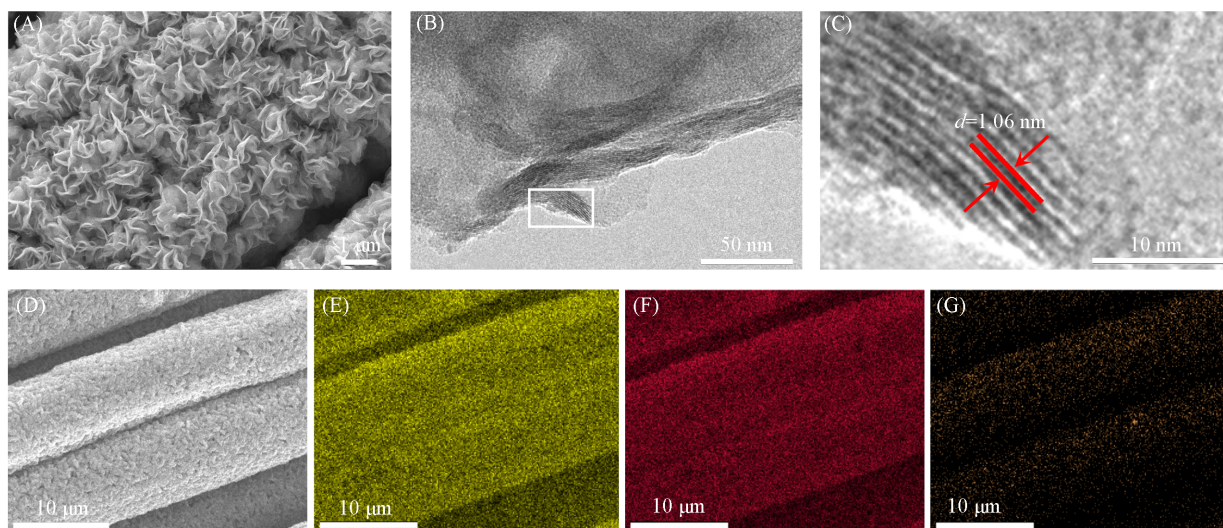


Fig. 4 SEM image(A), TEM(B) and HRTEM(C) images, FESEM(D) and EDS element mappings(E—G) of 1T-MoS₂/CC (E) S; (F) Mo; (G) F.

Mo, S, F元素在1T-MoS₂/CC纳米片阵列中均匀分布. EDS结果表明, [BMIM][BF₄]均匀地插入到1T-MoS₂层中, 并导致了层间距的增大.

2.2 1T-MoS₂/CC的电化学性能

为了表征1T-MoS₂/CC作为水系锌离子电池正极材料的Zn²⁺离子储存能力, 以3 mol/L Zn(CF₃SO₃)₂为电解质, 进行了初步表征. 图5(A)为1T-MoS₂/CC前3次循环伏安(CV)曲线, 可见, 对应于Zn²⁺离子在1T-MoS₂/CC嵌入和脱出的氧化峰和还原峰分别出现在1.1和0.6 V左右, 且前3次的CV曲线具有相似的形状和电流强度, 即所发生的电化学反应具有较高的可逆性. 图5(B)示出了1T-MoS₂/CC的倍率性能. 电流密度分别为0.1, 0.2, 0.5, 1.0和2.0 A/g时, 1T-MoS₂/CC的放电比容量分别为194.2, 165.5, 142.3, 122.1和75.9 mA·h/g; 当电流密度由2.0 A/g变回0.1 A/g时, 比容量也由74.8 mA·h/g恢复至185.6 mA·h/g, 表明1T-MoS₂/CC在大电流密度下仍具有较好的可逆性. 图5(C)比较了1T-MoS₂/CC和2H-MoS₂/CC在0.1 A/g电流密度下的充放电曲线, 2H-MoS₂/CC的比容量为21.4 mA·h/g, 仅约为1T-MoS₂/CC的11.1%. 图5(D)和(E)分别示出了1T-MoS₂/CC在1.0 A/g和0.1 A/g电流密度下的循环稳定性. 可见, 在1.0 A/g大电流密度下循环750次之后, 1T-MoS₂/CC仍有95.5%的容量保持率; 0.1 A/g电流密度下, 1T-MoS₂/CC的充放电容量明显高于1.0 A/g条件下, 循环750次之后, 仍有98.3%的容量保持率, 但稳定性和衰减速率均较差.

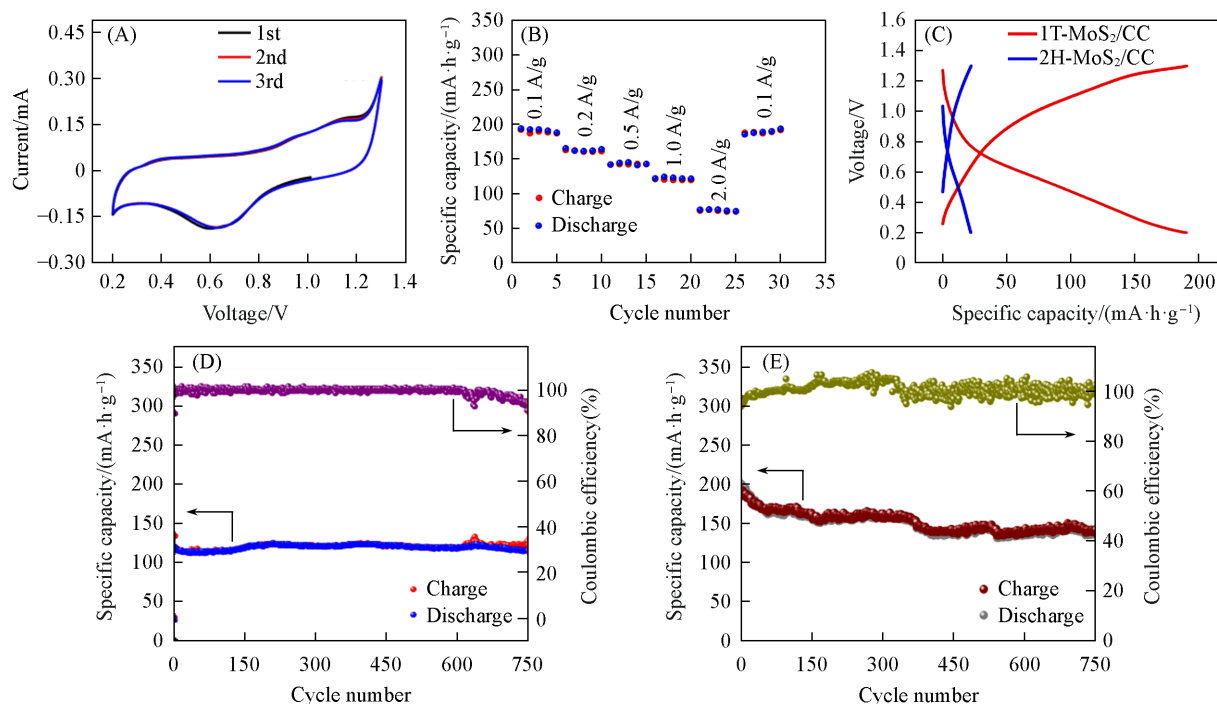


Fig. 5 CV curves of 1T-MoS₂/CC measured at 0.1 mV/s(A), rate performance of 1T-MoS₂/CC at 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 0.1 A/g current density(B), galvanostatic charge-discharge curves of 1T-MoS₂/CC and 2H-MoS₂/CC at the 0.1 A/g(C), cycle performance at 1.0 A/g(D) and 0.1 A/g(E) of 1T-MoS₂/CC

1T-MoS₂/CC 电化学阻抗的 Nyquist 图和等效电路如图 6(A) 所示. Nyquist 图由低频区的直线和高频区的半圆组成. 低频区直线通常归结为锌离子电极界面扩散的 Warburg 阻抗, 而高频区半圆则可归结为电极界面电荷转移反应的电阻^[23]. 1T-MoS₂/CC 在高频区的电荷转移电阻(R_{ct})约为 205 Ω , 明显低于 2H-MoS₂/CC 的 583 Ω , 且 1T-MoS₂/CC 在低频区的直线斜率也明显小于 2H-MoS₂/CC. 由此可见, 因 1T-MoS₂ 的金属性, 1T-MoS₂/CC 高的 1T 比例导致 R_{ct} 和 Warburg 阻抗均较低, 而呈现出更高的电荷转移速率. 为了评估电极反应的可逆性, 在 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 mV/s 扫描速率下, 测定了 1T-MoS₂/CC 的 CV 曲线. 如图 6(B) 所示, 在不同扫描速率下的 CV 曲线形状相似, 表明 1T-MoS₂/CC 具有良好的可逆性. 扫描速率是研究电极反应机理和可逆程度的重要手段, 高扫描速率时的研究尚需进一步深入

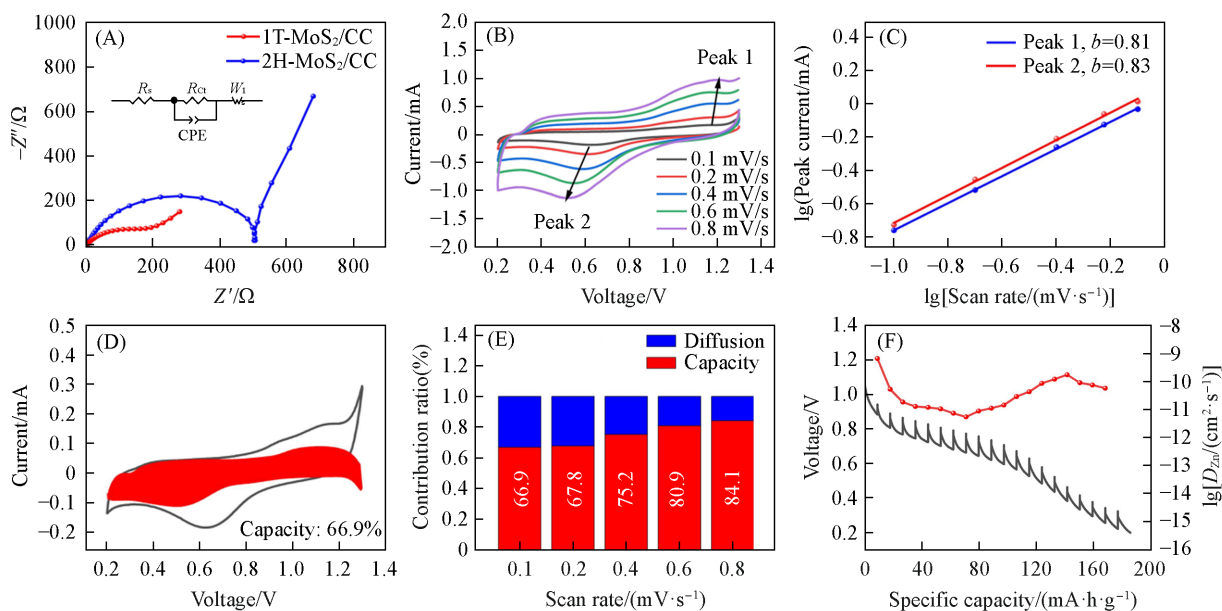


Fig. 6 Nyquist plots of 1T-MoS₂/CC and 2H-MoS₂/CC(inset: equivalent circuit)(A), CV curves of 1T-MoS₂/CC measured at different scan rates(0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 mV/s)(B), correlation between the peak currents and scan rates of 1T-MoS₂/CC(C), the contribution of capacitive current of 1T-MoS₂/CC at 0.1 mV/s(D), the contribution of capacitive current of 1T-MoS₂/CC at different scan rates(E), GITT analysis results for 1T-MoS₂/CC, and GITT obtained Zn²⁺ diffusion coefficient at different states of charge/discharge(F)

开展. 提高扫描速率时, 因扩散阻力增加, 氧化峰(峰1)和还原峰(峰2)分别向电位更高和更低的方向移动. 因此, 电极的电化学行为可通过不同扫描速率下 CV 曲线的峰电流(i)和扫描速率(v)定性描述^[24,25]:

$$i = av^b \quad (1)$$

式中: a 和 b 是常数, b 值可通过 $\lg i - \lg v$ 曲线拟合求得. 当 $b=0.5$ 时, 电荷储存过程为由扩散控制的法拉第过程, 而 $b=1$ 时, 电荷储存过程则由表面电容控制^[24,25]. 如图 6(C) 所示, 1T-MoS₂/CC 的氧化峰(峰1)和还原峰(峰2)的 b 值分别为 0.81 和 0.83, 表明电荷储存过程主要受表面电容支配, 且与产物的纳米片形貌特征相吻合. 为了进一步评估特定扫描速率下的电容贡献, 可由下式计算^[24,25]:

$$i(v) = k_1v + k_2v^{1/2} \quad (2)$$

式中: k_1v 和 $k_2v^{1/2}$ 分别对应于电容和扩散的贡献(k_1 和 k_2 为常数)^[24]. 如图 6(D) 所示, v 由 0.1 mV/s 增大至 0.8 mV/s 时, 电容贡献则从 66.9% 提升至 84.1%, 即在测试范围内, 电荷储存过程主要为表面电容所支配. 图 6(E) 以柱状图汇总了各样品中扩散和表面电容对电荷储存过程的贡献.

Zn²⁺的扩散系数由 GITT 测定, Zn²⁺的扩散系数(D)可由下式计算^[26]:

$$D = \frac{4}{\pi\tau} \left(\frac{m_b V_m}{M_b S} \right)^2 \left(\frac{\Delta E_s}{\Delta E_r} \right)^2 \quad (3)$$

式中: τ (s) 为弛豫时间; m_b (g) 为电极活性物质负载量; V_m (cm³/mol) 为电极活性物质的摩尔体积; M_b (g/mol) 为电极活性物质的摩尔质量; S (cm²) 为电极的表面积; ΔE_s (V) 为稳态时电压的变化; ΔE_r (V) 为脉冲时电压的变化. 如图 6(F) 所示, 整个放电过程中 Zn²⁺ 的扩散系数约为 10⁻⁹~10⁻¹² cm²/s, 略高于文献值的 10⁻¹¹~10⁻¹³ cm²/s, 且明显高于 2H-MoS₂ 的文献值(10⁻¹³~10⁻¹⁵ cm²/s)^[27].

3 结 论

采用离子液体辅助水热法, 在导电碳布上合成了具有扩大层间距的 1T-MoS₂, 且 1T-MoS₂/CC 作为水系锌离子电池正极材料呈现出优异的储锌性能. 其在 0.1 A/g 的电流密度下的放电比容量为

194.2 mA·h/g, 在1.0 A/g大电流密度下, 750次循环后仍可呈现95.5%的容量保持率. 1T-MoS₂/CC的优异电化学性能可归结为: 离子液体有助于1T-MoS₂的形成, 产物中1T相的含量约为78%, 高浓度的1T相改善了产物的电化学活性; 离子液体插入到1T-MoS₂的(002)晶面中, 导致MoS₂层间距由0.63 nm扩展至1.06 nm, 降低了水合锌离子嵌入过程的能垒; 导电碳布的选择可以抑制MoS₂纳米片的聚集, 并有助于1T-MoS₂/CC与电解液之间的充分接触. 研究结果有望为水系锌离子电池正极材料研究提供有益的借鉴.

参 考 文 献

- [1] Wan F., Zhou X., Lu Y., Niu Z. Q., Chen J., *ACS Energy Lett.*, **2020**, 5(11), 3569—3590
- [2] Chen Z., Yang Q., Mo F. N., Li N., Liang G. J., Li X. L., Huang Z. D., Wang D. H., Huang W. C., Fan J., Zhi C. Y., *Adv. Mater.*, **2020**, 32(42), 2001469
- [3] Ren Z. G., Sun Y. H., Yin Y. R., Zhang J. Q., Ren X. C., Zhao Y. X., Liang Z. F., Huai P., Song F., Jiang Z., Wen W., Li X. L., Tai R. Z., Zhu D. M., *Energy Storage Mater.*, **2021**, 42, 786—793
- [4] Xiong T., Zhang Y. X., Lee W. S. V., Xue J. M., *Adv. Energy Mater.*, **2020**, 10(34), 2001769
- [5] Wang X., Xi B. J., Ma X. J., Feng Z. Y., Jia Y. X., Feng J. K., Qian Y. T., Xiong S. L., *Nano Lett.*, **2020**, 20(4), 2899—2906
- [6] Kasiri G., Glenneberg J., Hashemi A. B., Kun R., La M. F., *Energy Storage Mater.*, **2019**, 19, 360—369
- [7] Ma L. T., Chen S. M., Long C. B., Li X. L., Zhao Y. W., Liu Z. X., Huang Z. D., Dong B. B., Zapfen J. A., Zhi C. Y., *Adv. Energy Mater.*, **2019**, 9(45), 1902446
- [8] Liu J. Y., Shen Z. R., Lu C. Z., *J. Mater. Chem. A*, **2024**, 12(5), 2647—2672
- [9] Zhou Z., Ma L. F., Tan C. L., *Chem. J. Chinese Universities*, **2021**, 42(2), 662—670(周战, 马录芳, 谭超良. 高等学校化学学报, **2021**, 42(2), 662—670)
- [10] Hu Z., Liu Q. N., Chou S. L., Dou S. X., *Adv. Mater.*, **2017**, 29(48), 1700606
- [11] Chen M. S., Zhang H. R., Zhang Q., Liu J. Q., Wu Y. C., *Chem. J. Chinese Universities*, **2021**, 42(8), 2540—2549(陈铭苏, 张会茹, 张琪, 刘家琴, 吴玉程. 高等学校化学学报, **2021**, 42(8), 2540—2549)
- [12] Feng H. J., Zheng W. J., *Chem. J. Chinese Universities*, **2017**, 38(7), 1134—1139(冯慧杰, 郑文君. 高等学校化学学报, **2017**, 38(7), 1134—1139)
- [13] Yun Q. B., Li L. X., Hu Z. N., Lu Q. P., Chen B., Zhang H., *Adv. Mater.*, **2020**, 32(1), 1903826
- [14] Kuc A., Heine T., *Chem. Soc. Rev.*, **2015**, 44(9), 2603—2614
- [15] Liang H. F., Cao Z., Ming F. W., Zhang W. L., Anjum D. H., Cui Y., Cavallo L., Alshareef H. N., *Nano Lett.*, **2019**, 19(5), 3199—3206
- [16] Liu H. Y., Wang J. G., Hua W., You Z. Y., Hou Z. D., Yang J. C., Wei C. G., Kang F. Y., *Energy Storage Mater.*, **2021**, 35, 731—738
- [17] Liu J. P., Xu P. T., Liang J. M., Liu H. B., Peng W. C., Li Y., Zhang F. B., Fan X. B., *Chem. Eng. J.*, **2020**, 389, 124405
- [18] Li S. W., Liu Y. C., Zhao X. D., Shen Q. Y., Zhao W., Tan Q. W., Zhang N., Li P., Jiao L. F., Qu X. H., *Adv. Mater.*, **2021**, 33(12), 2007480
- [19] Yang J. N., Xu Q. C., Zheng Y. T., Tian Z. M., Shi Y. Y., Ma C. X., Liu G. Y., Peng B., Wang Z., Zheng W. J., *ACS Nano*, **2022**, 16(9), 15215—15225
- [20] Yu Y. F., Nam G. H., He Q. Y., Wu X. J., Zhang K., Yang Z. Z., Chen J. Z., Ma Q. L., Zhao M. T., Liu Z. Q., Ran F. R., Wang X. Z., Li H., Huang X., Li B., Xiong Q. H., Zhang Q., Liu Z., Gu L., Du Y. H., Huang W., Zhang H., *Nat. Chem.*, **2018**, 10(6), 638—643
- [21] Shi S. L., Sun Z. X., Hu Y. H., *J. Mater. Chem. A*, **2018**, 6(47), 23932—23977
- [22] Wang S., Zhang D., Li B., Zhang C., Du Z. G., Yin H. M., Bi X. F., Yang S. B., *Adv. Energy Mater.*, **2018**, 8(25), 1801345
- [23] Chen F., Gao Y., Hao Q. F., Chen X. T., Sun X. D., Li N., *ACS Nano*, **2024**, 18(8), 6413—6423
- [24] Zhang G. F., Feng H. J., Ma C. X., Chen J. B., Wang Z., Zheng W. J., *ACS Appl. Nano Mater.*, **2021**, 4(4), 3397—3405
- [25] Liu Y., Lu C. J., Yang Y. T., Chen W. S., Ye F., Dong H. L., Wu Y. P., Ma R. Z., Hu L. F., *Adv. Mater.*, **2024**, 36(18), 2312982
- [26] Manthiram A., *Nat. Commun.*, **2020**, 11, 1550
- [27] Liu L., Yang W. J., Chen H. D., Chen X. T., Zhang K. Q., Zeng Q., Lei S. L., Huang J. J., Li S. J., Peng S. L., *Electrochim Acta*, **2022**, 410, 140016

(Ed.: Y, K, S)