引用格式：刘秋月，孙琪，吴静怡，等．镁离子电池正极材料VS_4制备及电化学性能[J]．材料工程，2026，54(6)：160-167.
LIU Qiuyue，SUN Qi，WU Jingyi，et al.Preparation and electrochemical performance of VS_4 cathode material for magnesium ion battery[J].Journal of Materials Engineering，2026，54(6)：160-167.

镁离子电池正极材料VS_4制备及电化学性能

刘秋月[1,2]，孙　琪[1,2]，吴静怡[1,2]，闫　欣[1,2]，滕　飞[1,2*]，罗绍华[1,2*]
（1 东北大学秦皇岛分校 资源与材料学院，河北 秦皇岛 066004；
2 东北大学 材料科学与工程学院，沈阳 110819）

摘要：本研究旨在通过溶剂热法合成具有特殊原子链结构的VS_4，并优化其制备条件以提升镁离子电池的电化学性能。为此，设计了四因素三水平正交实验，系统研究了水热温度、时间、原料和溶剂比例对VS_4微观形貌和尺寸的影响。研究结果表明，S3样品在所有测试样品中表现出最优的电化学性能，其首次放电比容量达到369.1 mAh/g，显著高于其他样品，并且在经过110次充放电循环后，比容量仍能保持在80.1 mAh/g，显示出良好的循环稳定性。这些结果表明，不同制备条件可以显著影响材料的微观结构和尺寸，进而影响其作为镁离子电池正极材料的电化学性能。本研究为开发高性能镁离子电池正极材料提供了实验依据和理论指导。

关键词：镁离子电池；正极材料；正交实验；VS_4；电化学性能
doi：10.11868/j.issn.1001-4381.2025.000253　**CSTR**：32421.14.j.issn.1001-4381.2025.000253
中图分类号：TB34；TM912　**文献标识码**：A　**文章编号**：1001-4381(2026)06-0160-08

Preparation and electrochemical performance of VS_4 cathode material for magnesium ion battery

LIU Qiuyue[1,2]，SUN Qi[1,2]，WU Jingyi[1,2]，YAN Xin[1,2]，TENG Fei[1,2*]，LUO Shaohua[1,2*]
（1 College of Resources and Materials，Northeastern University at Qinhuangdao，Qinhuangdao 066004，Hebei，China；
2 School of Materials Science and Engineering，Northeastern University，Shenyang 110819，China）

Abstract：Recent progress in the field of energy storage has led to growing interest in magnesium ion batteries (MIBs). As an emerging energy storage technology, magnesium is abundant in resources, cost-effective, environmentally friendly, and less prone to dendrite formation during charging and discharging, making it a promising alternative to traditional lithium-ion batteries with better safety. Sulfide-based positive electrode materials typically exhibit high theoretical specific capacitance and good conductivity, making their research crucial for enhancing the performance of magnesium ion batteries. VS4 has a special atomic chain structure, a unique structure, high capacity, and long cycle life, which has attracted much attention. This study syntheses VS_4 using the solvothermal method. A four-factor three-level orthogonal experiment is designed to investigate the effects of hydrothermal temperature, hydrothermal time, raw material ratio, and solvent ratio on the microstructure and size of the material. Nine groups of synthesized materials are made into electrode sheets, and magnesium foil is used as the negative electrode. A fully phenyl complex (APC) has been used as the electrolyte to assemble a magnesium ion battery for electrochemical performance testing. It is revealed that sample S3 exhibits the most compact particle size and superior electrochemical properties, reaching 369.1 mAh/g in the first discharge process. Even after 110 charge and discharge cycles, the specific capacity of the material can still be maintained at 80.1 mAh/g, showing good cycle stability. Experimental results have shown that different preparation conditions affect the microstructure and size of materials. Optimizing preparation conditions is beneficial for improving the electrochemical performance of magnesium ion batteries.

Key words：magnesium ion battery；cathode material；orthogonal experimental；VS_4；electrochemical

随着全球能源需求的不断增长和环境问题的日益严峻，研发高性能的新型能源存储系统显得尤为重要。在众多能源存储技术选项中，可充电电池凭借其显著的能量密度优势以及可循环利用的特性，成为研究和应用的焦点[1-2]。锂离子电池(LIBs)作为当前最主流的二次电池技术，在便携式电子设备、电动汽车以及大规模储能系统等领域得到了广泛应用[3-4]。然而，LIBs在循环过程中易产生枝晶，导致安全性低，且锂资源的有限性，限制了其大规模应用。因此，寻找替代能源存储技术，特别是那些基于丰富元素的电池系统，成为研究的热点[5]。镁离子电池(MIBs)因其高理论能量密度、丰富的镁资源、低成本和良好的安全性，被认为是一种有前景的替代技术[6]。镁离子具有较高的电荷密度和较小的离子半径，理论上可以提供更高的体积能量密度。此外，镁金属的电化学电位较低(−2.37 V *vs.* SHE)，有助于实现高电压输出。然而，Mg^{2+}表现出强极化，导致插入动力学缓慢，且很少有正极材料既能提供快速的Mg^{2+}扩散通道，又能与当前的电解质兼容，导致镁离子电池循环性能和倍率性能较差。因此，开发高效的正极材料是提升镁离子电池性能的关键[7]。

目前相关研究主要集中于过渡金属的硫化物[8-11]、过渡金属氧化物[12-15]、聚阴离子化合物等[16]。钒基材料因其在氧化还原反应中表现出的多电子转移特性而被广泛研究，在众多钒基化合物中，VS_4因其独特的结构以及高容量和长循环寿命而备受关注[17]。VS_4具有特殊原子链结构，由V^{4+}离子与沿c轴延伸的硫二聚体(S_2^{2-})配位组成，原子链之间的间隔为5.83 Å，远远大于Mg^{2+}的有效离子直径(1.44 Å)，可以为镁离子的嵌入和储存提供丰富的活性位点，且单个原子链通过弱范德瓦耳斯力结合，加快Mg^{2+}的扩散动力学[18]。此外，VS_4在电化学过程中的体积变化较小，有助于提高电池的循环稳定性。尽管VS_4在镁离子电池中的应用已经取得了一定的进展，但其电化学性能仍有待进一步优化，特别是在高电流密度和长循环寿命方面[19]。

本研究旨在通过溶剂热法制备VS_4正极材料，并系统地研究其作为正极材料在镁离子电池中的电化学性能。通过优化合成条件，制备了一系列不同形貌和尺寸的VS_4正极材料，并评估了这些材料的充放电比容量和循环稳定性。本研究对VS_4基础材料制备工艺的细化研究为设计和开发高性能镁离子电池正极材料提供了一定的指导。

1　实验材料与方法

1.1　实验材料

偏钒酸铵(NH_4VO_3)、聚偏氟乙烯(PVDF)、N-甲基吡咯烷酮(NMP)、乙二醇(EG)，均为分析纯，购自上海阿拉丁化学试剂有限公司；硫代乙酰胺C_2H_5NS(TAA)，试剂级，购自上海麦克林生化科技股份有限公司。

1.2　实验方法

材料具体制备过如程图1，将NH_4VO_3溶于去离子水，在60 ℃的水浴搅拌30 min；将TAA溶于EG中；将上述两种溶液混合，搅拌至溶液完全溶解，此时混合溶液呈现黑绿色。将溶液倒入反应釜中进行水热反应，按照正交实验设计严格控制反应的温度和时间。保温结束后随炉冷却至室温，此时获得含VS_4的均匀溶液。将反应后的溶液离心并用EG和去离子水反复清洗，收集沉淀。最后，在烘箱中干燥一夜后获得VS_4粉末。

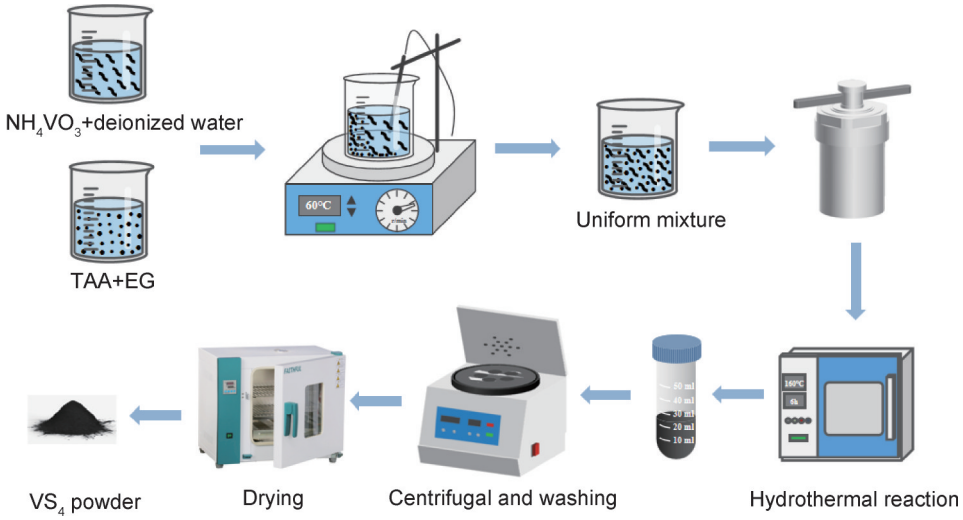


图1　VS_4样品的制备流程示意图

Fig.1　Schematic diagram of the preparation process of VS_4 sample

1.3 正交实验设计

本实验选择4个因素设计正交实验，分别为水热时间、水热温度、NH_4VO_3和TAA的摩尔比、乙二醇和去离子水的体积比，每个因素分别选择3个水平值。依据表1的因素和水平选择，进行9组正交实验，将不同条件下合成的产物依次命名为S1～9号，根据实验结果分析各因素水平的作用趋势，分析判定最优的工艺条件。

表1 正交实验设计

Table 1 Orthogonal experimental design

Samples	Hydrothermal time(*A*)/h	Hydrothermal temperature(*B*)/℃	Molar ratio of NH_4VO_3:TAA(*C*)	Volume ratio of EG:deionized water(*D*)
S1	6	160	1:4	1:1
S2	6	180	1:6	2:1
S3	6	200	1:8	3:1
S4	12	160	1:6	3:1
S5	12	180	1:8	1:1
S6	12	200	1:4	2:1
S7	18	160	1:8	2:1
S8	18	180	1:4	3:1
S9	18	200	1:6	1:1

1.4 电极片制备及电池的组装

以活性物质(S1～9)、乙炔黑和PVDF进行混合研磨，质量比严格设置为7:2:1。随后，向混合物中加入NMP搅拌形成均匀的浆料，涂覆在铜箔表面，并在80 ℃的条件下干燥10 h。干燥完成后，将电极裁剪为直径10 mm的圆形片。以金属镁箔作为对电极，采用全苯基络合物(APC，即0.4 mol/L $(MgPhCl)_2$-$AlCl_3$/四氢呋喃(THF)溶液)作电解液，玻璃纤维隔膜(GF/D，Whatman)作隔膜材料，在手套箱组装成CR2032型扣式电池。

1.5 材料结构表征与电化学性能测试

采用X射线粉末衍射仪(DX-2500型，Cu Kα射线)确定样品的晶体结构和相组成；SEM(S-4800型)和TEM(JEM-F200型)观察样品的表面形貌、微观结构和元素组成；上海辰华仪器有限公司制造的电化学工作站(CHI760E型)用于对电极进行循环伏安法(CV)和电化学阻抗谱测试(EIS)，CV测试电压范围为0.2～2.1 V，EIS在0.01～100 kHz的频率范围内进行；比表面积分析(KUBO-X1000型)评估样品的比表面积和孔隙结构；通过电化学性能评估(BTS-610型)，来测试样品的电化学活性和稳定性，电压区间为0.2～2.1 V。

2 结果与分析

2.1 产物的XRD测试结果分析

图2为正交实验下制备的VS_4样品的XRD图。在不同实验条件下制备的9个样品(S1～9)的X射线衍射测试结果与标准PDF卡片对比发现，9个样品的衍射峰位置相同，主峰均出现在衍射角2θ为15.8°和17.1°位置处，分别对应四硫化钒标准卡片(PDF# 21-1434)的(011)、(020)晶面，且9个样品的主峰尖锐，峰宽较窄，说明样品具有良好的结晶度。此外S4和S6两个样品在36.3°的峰表现出比其他样品更强，说明这两个样品在$(\bar{4}02)$晶面结晶度也较好。除上述主要峰之外，2θ在30.1°、33.1°、40.6°、44.2°分别对应(400)、$(\bar{2}22)$、$(\bar{4}22)$、(042)晶面，且未出现杂相峰，表明制备产物均为纯相VS_4。

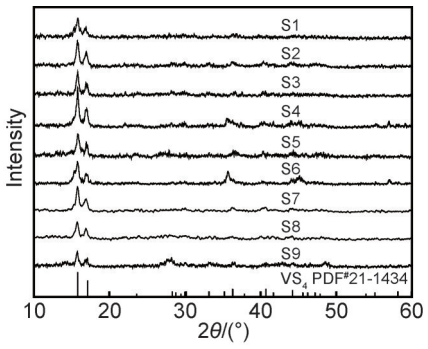


图2 正交实验下制备的VS_4样品的XRD图谱

Fig.2 XRD pattern of VS_4 sample prepared under orthogonal experiment

2.2 产物的SEM形貌和BET分析

9组正交实验样品的SEM图如图3所示。通过SEM图像可以观察到VS_4正极材料在不同合成条件下的微观结构差异，S1和S2样品微球表面相对光滑，

S3样品由亚微球组成，在9个样品中尺寸最小（约0.5～1 μm）。S4样品是由纳米片自组装成的微球（约9～12 μm）以及亚微球颗粒组成，其中虽然亚微球尺寸较S3样品小，但可以看到组成微球的纳米片层间粘连，该结构会严重影响离子的传输。其余几个样品均由微球组成，微球的直径约1～3 μm，微球表面有黏结物，S6和S8样品表面粗糙，存在大量形状不规则的絮状物。

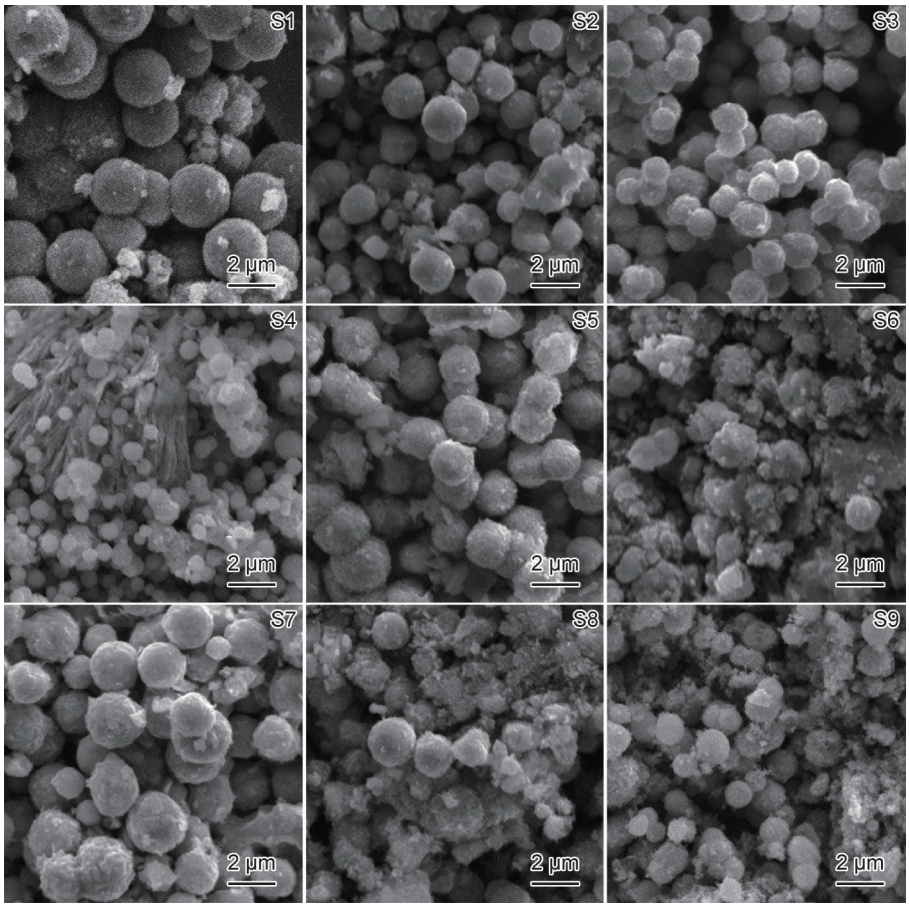


图3　正交实验下制备的VS_4样品的SEM图片

Fig.3　SEM images of VS_4 samples prepared under orthogonal experiment

图4为S3样品的TEM图片，图4(a)显示VS_4为球形结构，且表面较粗糙，从样品的边缘位置采集的HRTEM图像（图4(b)）显示样品具有0.65 nm的清晰晶格间距，该间距略大于单斜VS_4的(110)晶面(≈0.56 nm)，较大的间隙可以加速Mg^{2+}的扩散。高角环形暗场(HAADF)和相应能量色散光谱(EDS)证明了VS_4中V和S的均匀分布(图4(c)。

S3样品的氮吸附-脱附等温线和孔径分布曲线如图5所示。图5(a)的BET测试表明S3样品的比表面积为31.77 m^2/g，高于已发表文献[20]报道的原始固体微球VS_4的表面积，表明这将暴露出更多的Mg^{2+}反应活性位点，以提高比容量。所示的孔径分布表明，材料主要拥有中孔，孔径分布主要集中在6～13 nm左右。S3样品较大的层间距与高比表面积结构协同优化了离子扩散动力学与界面电荷转移效率，可以显著提升电极材料的倍率性能与循环稳定性。

2.3　VS_4正极材料的电化学性能

以VS_4为正极材料，组装了扣式电池，评估样品的电化学特性。图6展示了样品S1至S9的首次恒流充放电曲线，9组样品的首圈充电容量明显低于放电容量，其中S3样品首次放电比容量为369.1 mAh/g，高于其他正极材料，表明材料尺寸大小对电化学性能有一定影响，材料尺寸越小，表现出越高的放电比容量。S4样品的放电比容量为26.83 mAh/g，尽管该样品由尺寸更小的亚微球构成，但材料内部大量粘连现象显著影响了其电化学性能，导致放电比容量较低。

首圈放电比容量和各因素水平的关系如图7所示。各因素极差值分别为142.2、131.9、68.2、159.1 mAh/g，由极差数值可知，影响比容量的各因素主次顺序为：EG:水(体积比)＞水热时间＞水热温度＞NH_4VO_3:

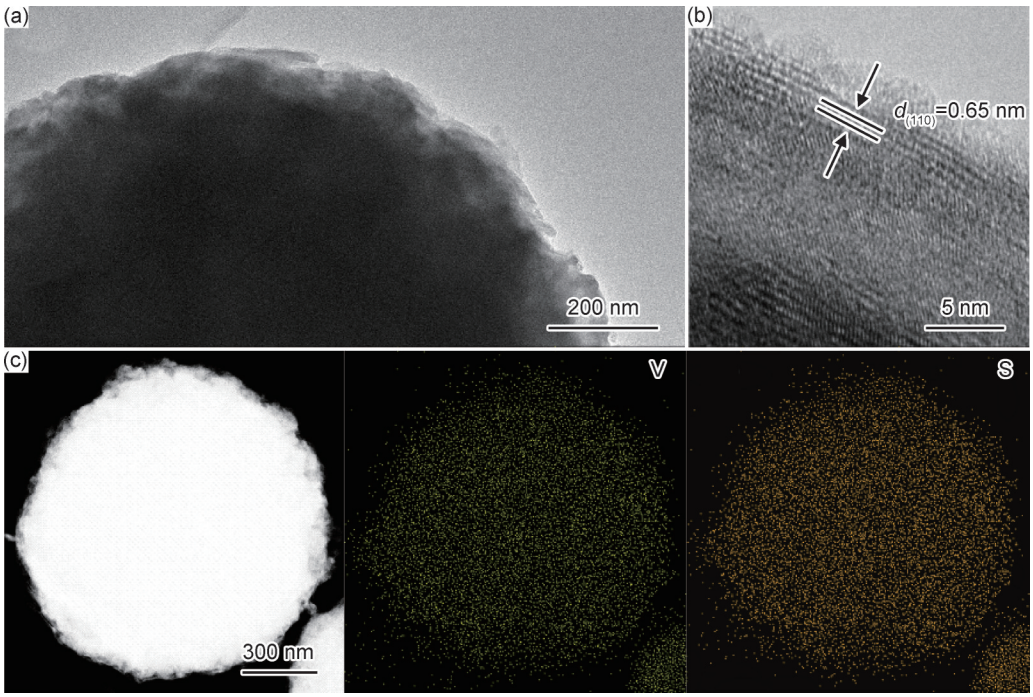


图4 VS_4的TEM照片

(a)低倍形貌图;(b)高分辨晶格条纹图;(c)高角环形暗场和能谱元素图

Fig.4 TEM photographs of VS_4

(a)low-magnification photograph;(b)high-magnification lattice fringe photograph;(c)HAADF image and EDS elemental map

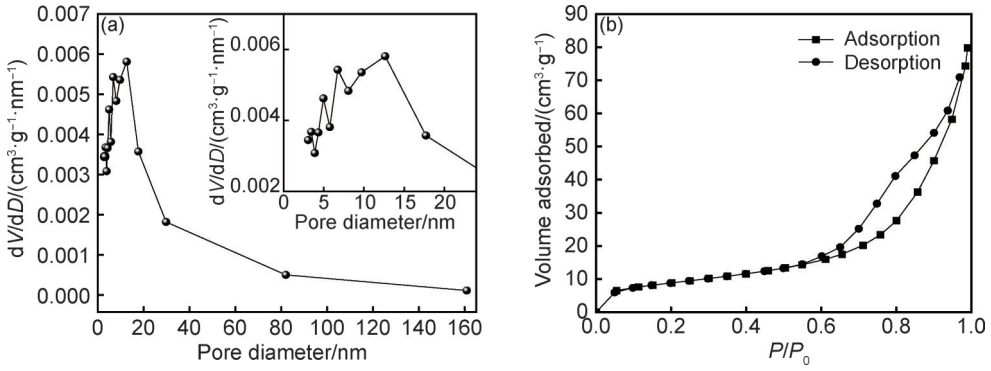


图5 S3样品的氮气吸附-脱附等温线(a)和孔径分布曲线(b)

Fig.5 Nitrogen adsorption-desorption isotherms(a) and pore size distribution curve(b) of S3 sample

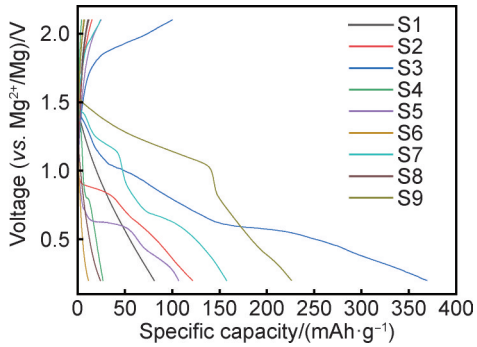


图6 电流密度为20 mA/g时S1~9样品首圈恒流充放电曲线

Fig.6 First cycle constant current charge discharge curve of S1-9 samples at current density of 20 mA/g

TAA(摩尔比),最优制备条件为水热时间6 h,水热温度200 ℃,NH_4VO_3和TAA摩尔比为1∶6,乙二醇和去离子水体积比为3∶1。

通过对不同样品进行充放电测试,筛选出正交实验的条件下最优的实验条件,实验结果表明S3具有优于其他8个样品的性能,结合样品的SEM可见,尺寸小且不存在大量粘连的样品,拥有高的充放电比容量。

在此基础上对S3继续进行电化学性能测试,图8(a)为S3样品在1 mV/s扫描速率下CV曲线,图中可见一对明显的氧化还原峰:氧化峰位于较高电位(约1.7~1.9 V),对应Mg^{2+}从VS_4中脱出;还原峰位于较低电

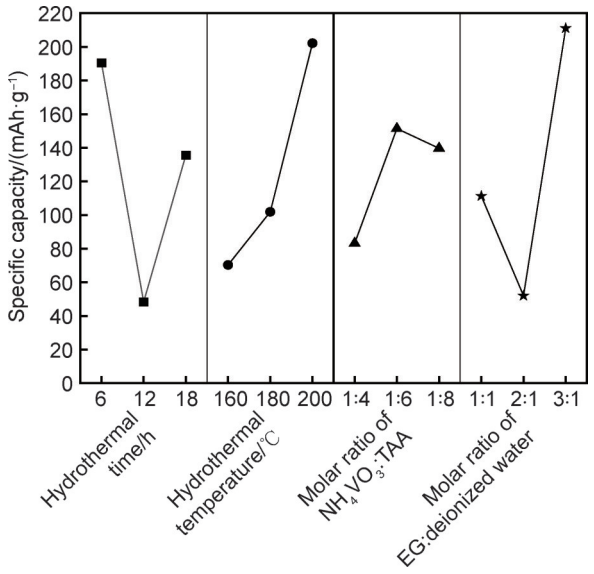


图7　首圈放电比容量和因素水平关系

Fig.7　Relationship between first cycle discharge specific capacity and factor level

位(约0.6～0.8 V),对应Mg^{2+}嵌入VS_4。该循环伏安曲线中的氧化还原峰电位与恒流充放电曲线的特征电压平台具有一致性,分别对应于电极反应中镁离子的脱嵌相变过程(图8(b))。峰形较宽且分离明显,表明镁离子存储过程存在显著极化,可能与Mg^{2+}的缓慢固态扩散相关[7]。图8(b)为S3样品在20 mA/g电流密度时的前3圈恒流充/放电曲线,可见第2圈放电比容量为146.4 mAh/g,相比于首圈比容量衰减严重,说明材料存在首次充放电过程中容量不可逆的问题,根据以往的探究,这表明在第1次充电步骤后,一些Mg^{2+}离子仍被困在VS_4晶格中无法脱出,不能重新沉积在Mg负极上。而第3圈相比于第2圈容量衰减明显减小,趋于稳定。图8(c)可知,在20 mA/g电流密度时S3样品从第10圈开始趋于稳定,循环110圈后依然还有80.1 mAh/g的放电比容量,可逆容量保持率为95.41%(与第10次循环相比),具有优异的循环稳定性,材料的库仑效率大于100%可能是由于电解质分解造成的[21]。如图8(d)所示,S3样品的电极在不同电流密度的可逆比容量变化关系表明,在20、50、100、200、500 mA/g的电流密度下,其稳定可逆比容量分别为84.5、60.2、43.1、25.6、18.1 mAh/g。当电流密度重新返回至20 mA/g时,比容量仍可达到69.5 mAh/g。循环初期(前10圈)观察到比容量先升后降的现象,但随着电流密度增大,复合材料容量趋于稳定。值得注意的是,即使在高倍率循环后返回低倍率20 mA/g,其比容量仍保持较高水平(69.5 mAh/g)。综上,S3电极在宽倍率范围内表现出优异的倍率性能

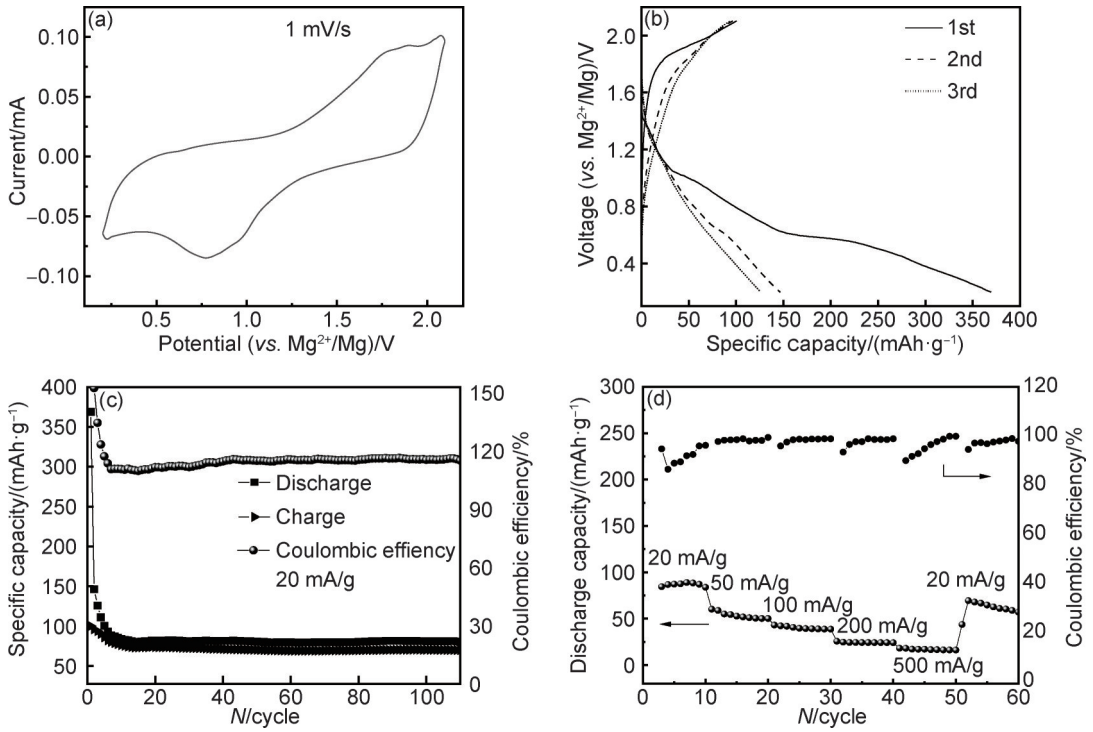


图8　S3样品的电化学性能

(a)在1 mV/s扫描速率下CV曲线;(b)前3次恒流充/放电曲线;(c)循环性能;(d)倍率性能

Fig.8　Electrochemical properties of the S3 samples

(a)CV curve at a scanning rate of 1 mV/s;(b)first three constant current charge/discharge curves;(c)cycling performance;(d)rate performance

与容量保持能力。

图 9 呈现了 S3 正极的 EIS 谱图及其等效电路拟合结果。低频区 Warburg 阻抗斜率与 Mg^{2+} 表观扩散系数呈正相关，斜率增大表明离子扩散动力学增强；高频区半圆特征可以反映电解液本征电阻（R_s）和电荷转移电阻（R_{ct}），从图中可以看出阻抗拟合效果较好，该结果证实 S3 电极具备一定的电荷转移动力学特性。此外，VS_4 卓越的循环性能优于已报道的其他 MIB 正极材料（表 2）[10-11,13,22-25]，这表明其是一种极具潜力的镁电池正极材料。

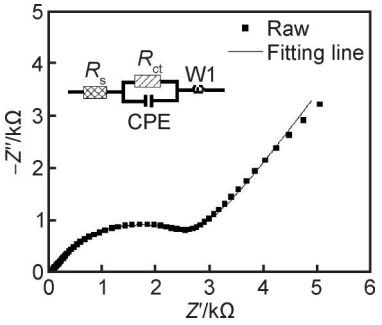


图 9 S3 电池的 EIS 光谱

Fig.9 EIS plots of S3 battery

表 2 VS_4 作为 MIBs 正极材料的性能对比

Table 3 Performance comparison of VS_4 as cathode material for MIBs

Active material	Electrolyte	Current density/($mA\cdot g^{-1}$)	Initial capacity/($mAh\cdot g^{-1}$)	Cycle number	Capacity retention/%	Ref.
VS_4	APC [0.4 $mol\cdot L^{-1}$ $(MgPhCl)_2$-$AlCl_3$/THF)]	20	369.1	110	95.41	This work
Bulk-MoS_2	APC	20	≈25	120	≈80	[10]
Expanded-MoS_2/graphene	APC	20	105	120	83.4	[10]
$Ti_3C_2T_x$	APC	100	170.5	60	29.3	[22]
V_2MoO_8	APC	20	199.1	50	≈33.3	[23]
$Li_4Ti_5O_{12}$	0.25 $mol\cdot L^{-1}$ $Mg(AlCl_2BuEt_2)_2$/THF	15	35	100		[24]
MoO_2	APC+1.0 $mol\cdot L^{-1}$ LiCl	20	50	50	50	[13]
V_2MoO_8	APC+1.0 $mol\cdot L^{-1}$ LiCl	20	312	50	72.5	[23]
MoS_2	APC+0.5 LiCl	100	≈135	200	85	[11]
MoS_2/graphene	APC+0.5 LiCl	100	225	200	90	[11]
Mo_6S_8	APC+LiCl	≈13	≈129			[25]
MoO_2 hollow microsphere	APC+1.0 $mol\cdot L^{-1}$ LiCl	20	217.2	50	≈69	[13]

3 结论

（1）采用简单的溶剂热法成功制备了 VS_4 正极材料。通过 XRD 测试、SEM 微观结构表征发现，不同条件制备的样品均为纯相 VS_4，且形貌和尺寸对 VS_4 材料性能有一定影响，结构完整、尺寸小的样品展现出更为出色的电化学性能。

（2）采用四因素三水平正交实验进行制备，测试表明，水热温度与水热时间是影响比容量的主要因素。当水热温度为 200 ℃、时间为 6 h 时，二者形成最优组合，性能最佳。较高的温度提供了充分的反应驱动力，促进了 VS_4 完整晶体的形成与生长；而适当的时间则在保证反应充分进行的同时，有效避免了晶粒的过度生长，从而协同优化了材料的比容量。

（3）S3 样品（水热时间 6 h，水热温度 200 ℃，NH_4VO_3 和硫代乙酰胺摩尔比 1∶8，乙二醇和去离子水体积比为 3∶1）在电化学性能方面表现最为突出，在首次放电过程中，达到了 369.1 mAh/g，即便在经过 110 次充放电循环后，该材料的比容量依然能够维持在 80.1 mAh/g，显示出良好的循环稳定性。

参考文献

[1] NIU H Z, ZHANG N, LU Y, et al. Strategies toward the development of high-energy-density lithium batteries[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 88: 111666.

[2] SHARMA R, KUMAR H, KUMAR G, et al. Progress and challenges in electrochemical energy storage devices: fabrication, electrode material, and economic aspects [J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 468: 143706.

[3] LI J L, FLEETWOOD J, HAWLEY W B, et al. From materials to cell: state-of-the-art and prospective technologies for lithium-ion battery electrode processing[J]. Chemical Reviews, 2022, 122(1): 903-956.

[4] ABU S M, HANNAN M A, HOSSAIN LIPU M S, et al. State of the art of lithium-ion battery material potentials: an analytical evaluations, issues and future research directions[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 394: 136246.

[5] WANG Q S, JIANG L H, YU Y, et al. Progress of enhancing the

safety of lithium ion battery from the electrolyte aspect[J]. Nano Energy, 2019, 55: 93-114.

[6] WANG D, ZHANG Z Y, HAO Y, et al. Challenges and progress in rechargeable magnesium-ion batteries: materials, interfaces, and devices[J]. Advanced Functional Materials, 2024, 34(51): 2410406.

[7] 袁佩玲, 丁星星, 郭鹏, 等. 新能源电池领域导电剂技术的研究与产业化[J]. 过程工程学报, 2023(8): 1118-1130.
YUAN P L, DING X X, GUO P, et al. Research and industrialization of conductive agent technology in the field of new energy batteries[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2023(8): 1118-1130.

[8] HE Y T, ZHONG Z Y, WU L, et al. Hollow porous Cu_2S nanospheres as high-rate magnesium battery cathode[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2024, 171(3): 030531.

[9] WANG J B, YANG G L, GHOSH T, et al. Hierarchical FeS_2 cathode with suppressed shuttle effect for high performance magnesium-ion batteries[J]. Nano Energy, 2024, 119: 109082.

[10] FAN X, GADDAM R R, KUMAR N A, et al. A hybrid Mg^{2+}/Li^+ battery based on interlayer-expanded MoS_2/graphene cathode[J]. Advanced Energy Materials, 2017, 7(19): 1700317.

[11] HSU C J, CHOU C Y, YANG C H, et al. MoS_2/graphene cathodes for reversibly storing Mg^{2+} and Mg^{2+}/Li^+ in rechargeable magnesium-anode batteries[J]. Chemical Communications, 2016, 52(8): 1701-1704.

[12] SETIAWAN D, CHAE M S, HONG S T. Re-evaluating the magnesium-ion storage capability of vanadium dioxide, VO_2(B): uncovering the influence of water content on the previously overestimated high capacity [J]. ChemSusChem, 2023, 16 (21): e202300758.

[13] PAN W J, LIU X L, MIAO X W, et al. Molybdenum dioxide hollow microspheres for cathode material in rechargeable hybrid battery using magnesium anode[J]. Journal of Solid State Electrochemistry, 2015, 19(11): 3347-3353.

[14] WANG J S, ZHANG Y Q, LIU G, et al. Improvements in the magnesium ion transport properties of graphene/CNT-wrapped TiO_2-B nanoflowers by nickel doping[J]. Small, 2024, 20(6): 2304969.

[15] SUN C Y, WANG H L, YANG F X, et al. Layered buserite Mg-Mn oxide cathode for aqueous rechargeable Mg-ion battery[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2023, 11(3): 840-850.

[16] TANG J J, XU F. Polyaniline cathode for dual-ion rechargeable Mg batteries[J]. Materials Letters, 2022, 320: 132365.

[17] ZHANG X, TU X, LIU Y N, et al. Morphology engineering of VS_4 microspheres as high-performance cathodes for hybrid Mg^{2+}/Li^+ batteries[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2023, 15(31): 37442-37453.

[18] WANG Y R, LIU Z T, WANG C X, et al. Highly branched VS4 nanodendrites with 1D atomic-chain structure as a promising cathode material for long-cycling magnesium batteries[J]. Advanced Materials, 2018, 30(32): 1802563.

[19] DING S Q, DAI X, LI Z J, et al. PVP-induced synergistic engineering of interlayer, self-doping, active surface and vacancies in VS_4 for enhancing magnesium ions storage and durability[J]. Energy Storage Materials, 2022, 47: 211-222.

[20] LI Z J, DING S Q, YIN J F, et al. Morphology-dependent electrochemical performance of VS_4 for rechargeable magnesium battery and its magnesiation/demagnesiation mechanism [J]. Journal of Power Sources, 2020, 451: 227815.

[21] TEPAVCEVIC S, LIU Y Z, ZHOU D H, et al. Nanostructured layered cathode for rechargeable Mg-ion batteries[J]. ACS Nano, 2015, 9(8): 8194-8205.

[22] ZHAO M-Q, REN C E, ALHABEB M, et al. Magnesium-ion storage capability of MXenes[J]. ACS Applied Energy Materials, 2019, 2(2): 1572-1578.

[23] MIAO X W, CHEN Z Y, WANG N, et al. Electrospun V_2MoO_8 as a cathode material for rechargeable batteries with Mg metal anode[J]. Nano Energy, 2017, 34: 26-35.

[24] WU N, YANG Z Z, YAO H R, et al. Improving the electrochemical performance of the $Li_4Ti_5O_{12}$ electrode in a rechargeable magnesium battery by lithium-magnesium co-intercalation[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2015, 54(19): 5757-5761.

[25] CHENG Y, SHAO Y, ZHANG J G, et al. High performance batteries based on hybrid magnesium and lithium chemistry [J]. Chemical Communications, 2014, 50(68): 9644-9646.

基金项目：国家自然科学基金面上项目(52274295)；河北省自然科学基金青年基金资助项目(E2022501028)；中央高校基本科研业务费资助项目(N2223010)；2025年河北省在读研究生创新能力培养资助项目(CXZZBS2025202, CXZZSS2025157)

收稿日期：2025-05-07；**录用日期**：2025-06-05

通讯作者：罗绍华(1973—)，男，教授，博士，研究方向为能源转换与存储材料、医用材料、冶金行业大宗固体废弃物综合利用，联系地址：河北省秦皇岛经济技术开发区泰山路143号(066004)，E-mail：tianyanglsh@163.com；滕飞(1987—)，女，高级实验师，博士，研究方向为矿物资源综合利用，联系地址：河北省秦皇岛经济技术开发区泰山路143号(066004)，E-mail：tengfei9131@126.com

(本文责编：齐　新)