Material Sciences 材料科学, 2026, 16(11), 14-21
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/ms
https://doi.org/10.12677/ms.2026.1611206

Hans汉斯

氧化钒@聚吡咯复合电极的制备及其超级电容性能研究

陈虹羽，冯一卿，何虹臣，李彤，李歆诺，郭东涛，冯东阳*

沈阳航空航天大学理学院，辽宁 沈阳

收稿日期：2026年10月4日；录用日期：2026年11月4日；发布日期：2026年11月16日

摘　要

作为一种新兴的电化学储能器件，超级电容器具有充电/放电速率快、循环稳定性好及绿色环保等特点，应用前景广泛，其中，电极材料显著影响器件的性能。氧化钒是一种具有发展潜力的电极材料，具有理论比容量高、电化学窗口宽及储量丰富的优点，但其存在导电性差、循环稳定性弱等问题，实际性能仍需提高。本文利用循环伏安电沉积技术制备了氧化钒电极，研究了沉积电位下限对氧化钒电极电化学性能的影响，并于优化后的氧化钒表面，借助吡咯的原位电化学聚合，制备了氧化钒@聚吡咯复合电极，分析了聚吡咯包覆对复合电极的性能影响。研究表明，当循环伏安沉积电位下限为−0.5 V时，所制备的氧化钒具有纳米花形貌，与聚吡咯的复合后，所制备的氧化钒@聚吡咯复合电极在1 mA/cm²的电流密度下的质量比电容高达303.52 F/g，经5000次循环后电容维持率达61.3%，展现出了良好的电化学性能。

关键词

超级电容器，氧化钒，聚吡咯，电化学沉积

Preparation of Vanadium Oxide@Polypyrrole Composite Electrode and Investigation of Its Supercapacitor Performance

Hongyu Chen, Yiqing Feng, Hongchen He, Tong Li, Xinnuo Li, Dongtao Guo, Dongyang Feng*

College of Science, Shenyang Aerospace University, Shenyang Liaoning

Received: October 4, 2026; accepted: November 4, 2026; published: November 16, 2026

*通讯作者。

文章引用: 陈虹羽, 冯一卿, 何虹臣, 李彤, 李歆诺, 郭东涛, 冯东阳. 氧化钒@聚吡咯复合电极的制备及其超级电容性能研究[J]. 材料科学, 2026, 16(11): 14-21. DOI: 10.12677/ms.2026.1611206

Abstract

As an emerging electrochemical energy storage device, supercapacitors are characterized by fast charging and discharging rates, good cycling stability and environmental friendliness, and thus hold broad prospects for application. Among these factors, electrode materials play a crucial role in determining device performance. Vanadium oxide is an electrode material with significant development potential, offering advantages such as high theoretical specific capacity, a wide potential window and abundant reserves; however, it suffers from issues such as poor conductivity and weak cycling stability, and its practical performance still requires improvement. In this study, vanadium oxide electrodes were fabricated on a carbon cloth substrate using cyclic voltammetric electrodeposition. The effect of the lower limit of the deposition potential on the electrochemical performance of the vanadium oxide electrodes was investigated. Furthermore, utilizing in situ electrochemical polymerization of pyrrole on the optimized vanadium oxide surface, a vanadium oxide@polypyrrole composite electrodes on the optimized vanadium oxide surface via in situ electrochemical polymerization of polypyrrole, and analyzed the effect of polypyrrole coating on the performance of the composite electrodes. The results indicate that when the lower limit of the cyclic voltammetric deposition potential is set at −0.5 V, the prepared vanadium oxide exhibits a nanoflower morphology; following composite formation with polypyrrole, the resulting vanadium oxide@polypyrrole composite electrode exhibited a mass-specific capacitance as high as 303.52 F/g at a current density of 1 mA/cm², with a capacitance retention rate of 61.3% after 5000 cycles, demonstrating excellent electrochemical performance.

Keywords

Supercapacitors, Vanadium Oxide, Polypyrrole, Electrochemical Deposition

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

作为一种极具发展潜力的电化学储能设备，超级电容器具有充放电速度快、循环寿命长、环境友好等突出优点，在航空航天、交通运输及能量存储等领域展现出良好的发展潜力[1] [2]。超级电容器一般由集流体、电极材料、电解液和隔膜等部分组成，其中电极材料的性能是决定器件整体性能的核心因素[3]。其中，氧化钒电极材料具有理论容量大、价格低廉及环境友好等优点，具有广阔的应用前景[4]。然而，此类电极材料的电子导电性差，且在充放电过程中易出现结构坍塌的现象，导致其循环稳定性和倍率性能不理想[5]。不同制备方法对氧化钒电极材料性能影响显著，其中，电化学沉积法具有操作简便、安全环保及反应高效等特点，通过调节沉积过程中的参数，可对电极的形貌、结构及化学组成进行精准调控，从而有效提升电极材料的电容性能[6]。此外，将导电聚合物材料(如聚苯胺、聚吡咯及聚噻吩等)包覆于氧化钒材料外部，形成聚合物缓冲层，可有效改善电极整体的导电性，抑制氧化钒材料在电化学循环中的结构的崩塌[7]。

本文旨在对氧化钒的储能性能和电化学循环表现进行优化。利用循环伏安电沉积法，于导电碳纸表面进行氧化钒电极材料的制备，研究不同沉积方法对电极材料电化学性能的影响。在此基础上，于优化后的氧化钒电极材料表面进行吡咯的原位电化学聚合，制备了核壳结构的氧化钒@聚吡咯复合电极，进

一步优化电极材料的储能性能和循环稳定性，为性能优异的超级电容器负极材料的制备提供借鉴经验。

2. 实验部分

2.1. 试剂及材料

本文所有实验中均使用分析纯化学试剂，所有实验均使用自制去二次蒸馏水配制所需溶液，化学试剂和材料的具体情况见表 1。

Table 1. Chemical reagents and materials
表 1. 化学试剂及材料

名称	化学式	规格/纯度	生产厂家
碳纸	C	40 × 40 cm^2	北京晶龙特碳科技有限公司
硫酸氧钒	$VOSO_4$	AR	国药集团化学试剂有限公司
乙酸铵	NH_4AC	AR	国药集团化学试剂有限公司
吡咯	C_4H_5N	AR	国药集团化学试剂有限公司
2-萘磺酸	$C_{10}H_8O_3S$	AR	国药集团化学试剂有限公司
氯化钾	KCl	AR	国药集团化学试剂有限公司

2.2. 实验仪器

本实验中所涉及的主要仪器如表 2 所示。

Table 2. Laboratory equipments
表 2. 实验仪器

仪器名称	型号	生产厂商
电化学工作站	CHI660E	上海辰华电化学仪器有限公司
电子分析天平	FA224C	上海力辰仪器科技有限公司
真空烘箱	DZF-6020	上海力辰仪器科技有限公司
电热磁力搅拌器	LC-MSA-D	上海力辰仪器科技有限公司
X 射线衍射仪	PW3040/60	荷兰帕纳科公司
扫描电子显微镜	Ultra Plus	德国蔡司集团
红外光谱仪	Spectrum One	美国珀金埃尔默股份有限公司
电解池、电极夹	C002	武汉高仕睿联科技有限公司
饱和甘汞电极	232 型	武汉高仕睿联科技有限公司

2.3. 电极材料的制备

2.3.1. 不同循环伏安沉积电位下限下的氧化钒电极材料制备

利用电化学工作站，以饱和甘汞电极为参比电极，碳纸分别为对电极和工作电极(工作面积 1 × 1 cm^2)，在含有 0.1 M $VOSO_4$ 和 0.1 M NH_4Ac 的溶液中，在 20 mV/s 的扫描速率下，在工作电极表面进行氧化钒

的循环伏安电化学沉积。为了研究沉积电位下限对氧化钒材料的影响，设定沉积电位上限为 1 V，在沉积电位下限为−0.1 V、−0.5 V 和−1 V 处制备了氧化钒电极材料，分别命名为 CV-0.1V、CV-0.5V 和 CV-1.0V 电极。将制备好的所有电极置于流动的二次蒸馏水下反复冲洗，静置晾干，再将样品放置真空干燥箱中，在 60℃的条件下进行 6 h 的烘干处理。采用电子分析天平对工作电极沉积前后的质量进行称量，控制 CV-0.1V、CV-0.5V 和 CV-1.0V 电极中的氧化钒沉积量均约为 0.50 mg/cm^2。

2.3.2. 氧化钒@聚吡咯复合电极的制备

采用三电极体系，以饱和甘汞电极为参比电极，碳纸为对电极，CV-0.5V 电极为工作电极，在含有 0.1 M 吡咯和 0.05 M 2-萘磺酸的溶液中，借助恒电流电沉积技术，在 1 mA/cm^2 的电流密度下，进行 30 分钟的吡咯电化学聚合，制备氧化钒@聚吡咯复合电极，命名为 CV-0.5V-30P 电极。将制备好的电极置于流动的二次蒸馏水下反复冲洗，静置晾干，再将样品放置真空干燥箱中，在 60℃的条件下进行 6 h 的烘干处理。采用电子分析天平对工作电极沉积前后的质量进行称量，在 CV-0.5V-30P 电极中，聚吡咯的质量为 0.51 mg/cm^2，总活性物质质量约为 1 mg/cm^2。

2.4. 样品表征

2.4.1. 形貌与组成的表征

采用扫描电子显微镜(SEM)在不同放大倍数下观察样品的微观形貌；利用 X 射线衍射仪(XRD)分析电极材料的晶型组成，测试条件为：Cu Kα 辐射(λ = 1.54718 nm)，2θ 扫描范围 5˚~80˚，扫描速率 0.12˚/s；采用 KBr 压片法，利用红外光谱仪上测定样品的红外光谱(FT-IR)。

2.4.2. 电化学性能测试

电化学测试均在三电极体系中进行：以待测样品为工作电极，碳纸为对电极，饱和甘汞电极(SCE)为参比电极，电解液为 1.0 M KCl 溶液。文中电位若无特殊说明，均相对于 SCE。通过循环伏安(CV)、恒电流充放电(GCD)及交流阻抗(EIS)测试评价电极材料的电化学性能。

2.5. 相关计算公式

采用给定电流下的恒电流充放电测试结果，对电极材料的面积比电容和质量比电容进行定量评估：

$$C_a = \frac{I \times \Delta t}{S \times \Delta U} \tag{1}$$

$$C_m = \frac{I \times \Delta t}{m \times \Delta U} \tag{2}$$

式中，C_a (mF/cm^2)为电极材料的面积比电容，C_m (F/g)为电极材料的质量比电容，Δt (s)为放电时间，I (mA)为充放电电流，S (cm^2)为电极材料的投影面积，m (mg)为活性物质的质量，ΔU (V)为电极材料的工作电压。

3. 结果与讨论

3.1. 循环伏安沉积电位下限对氧化钒材料电化学性能的影响

为了分析循环伏安沉积电位下限对氧化钒材料电化学活性的影响，在 1.0 M KCl 电解质溶液中，在−1.2~0.5 V 电位区间内，检测了所有电极的电化学性能。图 1(a)为 CV-0.1V、CV-0.5V 和 CV-1.0V 电极在 20 mV/s 的扫描速率下的循环伏安(CV)曲线。由观察可得，所有电极的 CV 曲线均呈现出两对可逆的氧化峰和还原峰，该氧化还原峰分别对应不同价态氧化钒之间的相互转化[8] [9]。在活性物质质量相同的

前提下，随着 CV 沉积电位下限由−0.1 V 逐渐减小至−1 V 时，所制备的样品的 CV 曲线的峰电流呈现先增大后减小的趋势，其中，CV-0.5V 电极的 CV 曲线中的峰电流最大，说明适宜的 CV 沉积电位下限有利于提高电极的电化学活性。

为了分析氧化钒材料在不同电流密度下的储能表现，对所有电极在 1、3、5、7、9 和 11 mA/cm^2 的电流密度下分别进行恒电流充放电(GCD)测试。图 1(b)为 CV-0.1V、CV-0.5V 和 CV-1.0V 电极在 1 mA/cm^2 电流密度下的 GCD 曲线。观察可知，随着 CV 沉积电位下限由−0.1 V 逐渐减小至−1 V 时，CV-0.1V、CV-0.5V 和 CV-1.0V 电极的放电时间呈现出先增大后减小的趋势。由式 1 计算可知，在 1 mA/cm^2 电流密度下，CV-0.1V、CV-0.5V 和 CV-1.0V 电极的面积比电容分别为 113.29、118.76 和 76.71 mF/cm^2。CV-0.1V、CV-0.5V 和 CV-1.0V 电极在不同电流密度下的面积比电容曲线如图 1(c)所示。由图可见，CV-0.5V 电极在 1~11 mA/cm^2 区间内的面积比电容值均高于 CV-0.1V 和 CV-1.0V 电极。当电流密度增大至 11 mA/cm^2 时，CV-0.1V、CV-0.5V 和 CV-1.0V 电极的面积比电容分别下降到 24.20、28.92 和 16.01 mF/cm^2。CV-0.1V 和 CV-1.0V 电极在 1~11 mA/cm^2 电流密度下的面积比电容维持率曲线如图 1(d)所示。由图可知，与 CV-0.1V 和 CV-1.0V 电极相比，CV-0.5V 电极在全部区间内的面积比电容维持率最高，且在较高电流密度(11 mA/cm^2)下，CV-0.1V、CV-0.5V 和 CV-1.0V 电极的面积比电容维持率分别为 21.36%、24.35%和 20.87%。以上结果说明，在电沉积时采用适宜的 CV 沉积电位下限有助于氧化钒材料储能性能及倍率性能的提升。

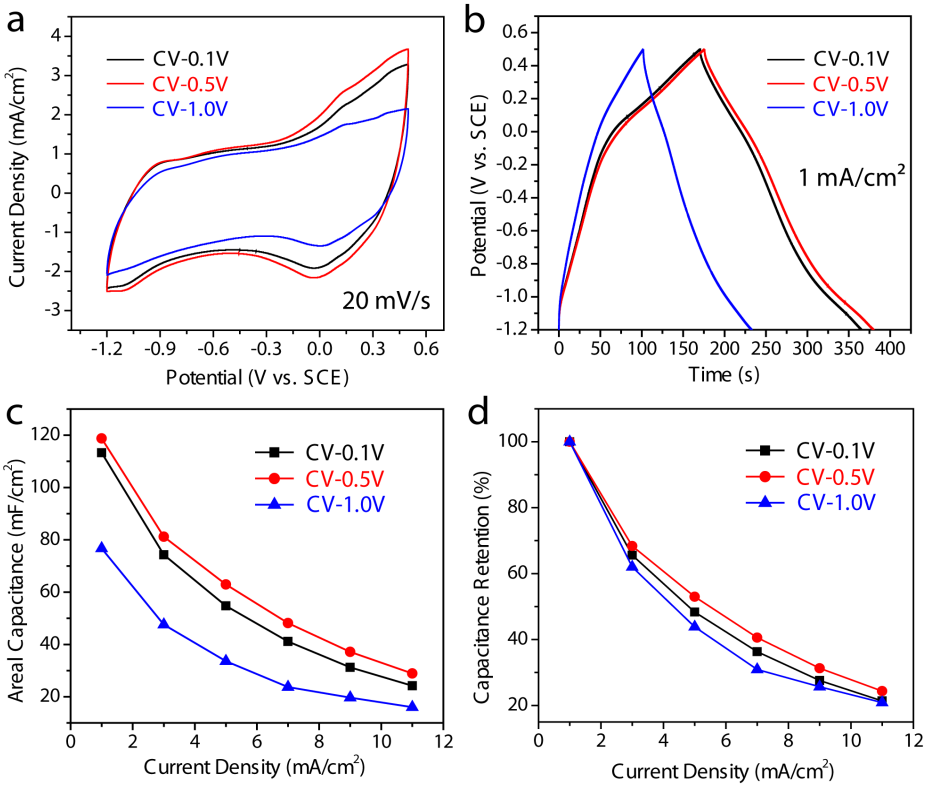


Figure 1. Electrochemical properties of CV-0.1V, CV-0.5V and CV-1.0V electrodes: (a) CV curves at 20 mV/s, (b) galvanostatic charge/discharge curves at a current density of 1 mA/cm^2, (c) areal capacitance and (d) areal capacitance retention from 1 to 11 mA/cm^2

图 1. CV-0.1V、CV-0.5V 和 CV-1.0V 电极的电化学性能测试：(a) 20 mV/s 下的 CV 曲线、(b) 1 mA/cm^2 下的恒电流充放电曲线、1~11 mA/cm^2 下的(c) 面积比电容曲线和(d) 面积比电容维持率曲线

3.2. 氧化钒@聚吡咯复合电极的制备及其性能分析

3.2.1. 复合电极的表征

为了分析氧化钒@聚吡咯复合电极的结构与组成，借助扫描电子显微镜(SEM)、X 射线衍射(XRD)仪及红外光谱(FT-IR)仪，分别对 CV-0.5V 和 CV-0.5V-30P 电极进行分析。如图 2(a)和图 2(b)可见，在 CV-0.5V 电极中，氧化钒纳米片交织堆叠，形成纳米花结构。进行吡咯原位电化学聚合后，在所制备的 CV-0.5V-30P 电极中，聚吡咯(PPy)均匀地包裹在氧化钒纳米花的表面，这种过渡金属氧化物与导电聚合物的纳米复合结构有利于提升电极材料内部的电子迁移效率及离子传递速率，进而提升电极材料的电化学反应速率。图 2(c)为 CV-0.5V 和 CV-0.5V-30P 电极的 XRD 谱图。如图所示，除在 26.4˚和 54.6˚处均出现了碳纸基底的特征衍射峰外，所制备的两个电极中无其它衍射峰出现，说明电极中的氧化钒均为无定型氧化钒材料。图 2(d)为 CV-0.5V 和 CV-0.5V-30P 电极的 FT-IR 谱图。由图可见，CV-0.5V 电极在 1626 cm^{-1} 和 1401 cm^{-1} 处的特征吸收峰均与氧化钒－碳材料有关[10]，在 993 cm^{-1} 和 539 cm^{-1} 处的特征吸收峰分别与 V-O-V 和 V=O 的伸缩振动有关[11]。在 CV-0.5V-30P 电极中，除了在 1401 cm^{-1} 处的出现与氧化钒有关的特征吸收峰外，还在 1559 cm^{-1} 和 1033 cm^{-1} 处出现了聚吡咯的典型特征吸收峰，分别与吡咯环中 C=C 的伸缩振动和 C-H 的面内变形振动有关[12]，说明氧化钒与聚吡咯已成功复合。

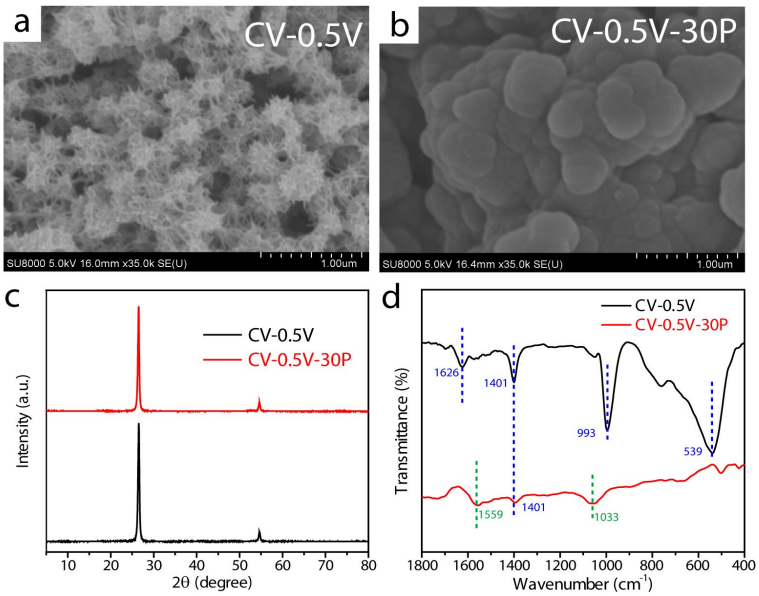


Figure 2. SEM images of (a) CV-0.5V and (e) CV-0.5V-30P electrodes. (c) XRD patterns and (d) FT-IR spectra of these electrodes
图 2. (a) CV-0.5V 和(b) CV-0.5V-30P 电极的 SEM 图像；CV-0.5V 和 CV-0.5V-30P 电极的(c) XRD 谱图和(d) FT-IR 谱图

3.2.2. 复合电极的电化学性能测试

为了分析聚吡咯复合对氧化钒电极的电化学性能影响，在 1 M KCl 电解液中，在−1.2~0.5 V 电位范围内，对所制备电极的电化学性能进行测试。CV-0.5V 和 CV-0.5V-30P 电极在 20 mV/s 的扫描速率下的 CV 曲线见图 3(a)。由图可见，与 CV-0.5V 电极相比，CV-0.5V-30P 电极中的峰电流显著增加，说明氧化钒与聚吡咯复合后提升了电极整体的电化学活性。图 3(b)为所制备电极在 1 mA/cm^2 电流密度下的恒电流充放电曲线。如图所示，在质量归一化后，较 CV-0.5V 电极而言，CV-0.5V-30P 电极的放电时间更长，表明其电容性能更为优异。CV-0.5V 和 CV-0.5V-30P 电极在不同电流密度下的质量比电容值如图 3(c)所

示。由图可知，当电流密度在 1~11 mA/cm^2 后内变化时，CV-0.5V-30P 电极的质量比电容值在整个电流范围内均高于 CV-0.5V 电极。结合式 2 计算可知，当电流密度从 1 mA/cm^2 电增至 11 mA/cm^2 时，CV-0.5V 和 CV-0.5V-30P 电极的质量比电容分别由 237.52 和 303.52 F/g 降低至 57.84 和 225.17 F/g，说明 CV-0.5V-30P 电极展现了较高的倍率性能。CV-0.5V 和 CV-0.5V-30P 电极的电化学阻抗(EIS)谱图和等效电路如图 3(d)所示。由图可见，两个电极的 EIS 谱图中均在高频区出现与电荷转移电阻(R_2)有关的半圆弧，结合等效电路图拟合可得，CV-0.5V 和 CV-0.5V-30P 电极的电荷转移电阻分别为 17.13 Ω 和 7.29 Ω，说明后者具有快速反应动力学特征，这可能与该电极中氧化钒－聚吡咯的纳米复合结构有关，导电聚合物的引入有利于提升电极整体的导电性，进而加速复合电极的电化学反应速率，CV-0.5V-30P 电极与近期报道的氧化钒基材料相比，展现出了优异的储能性能和倍率性能(表 3)。图 3(e)和图 3(f)为 CV-0.5V 和 CV-0.5V-30P 电极的电化学循环稳定性曲线及库轮效率曲线。由图可见，经 5000 次充放电循化后，CV-0.5V 和 CV-0.5V-30P 电极的电容维持率分别为 9.2%和 61.3%，且库伦效率分别为 117.2%和 110.3%，说明聚吡咯的包覆有助于提升氧化钒电极的电化学循环稳定性。

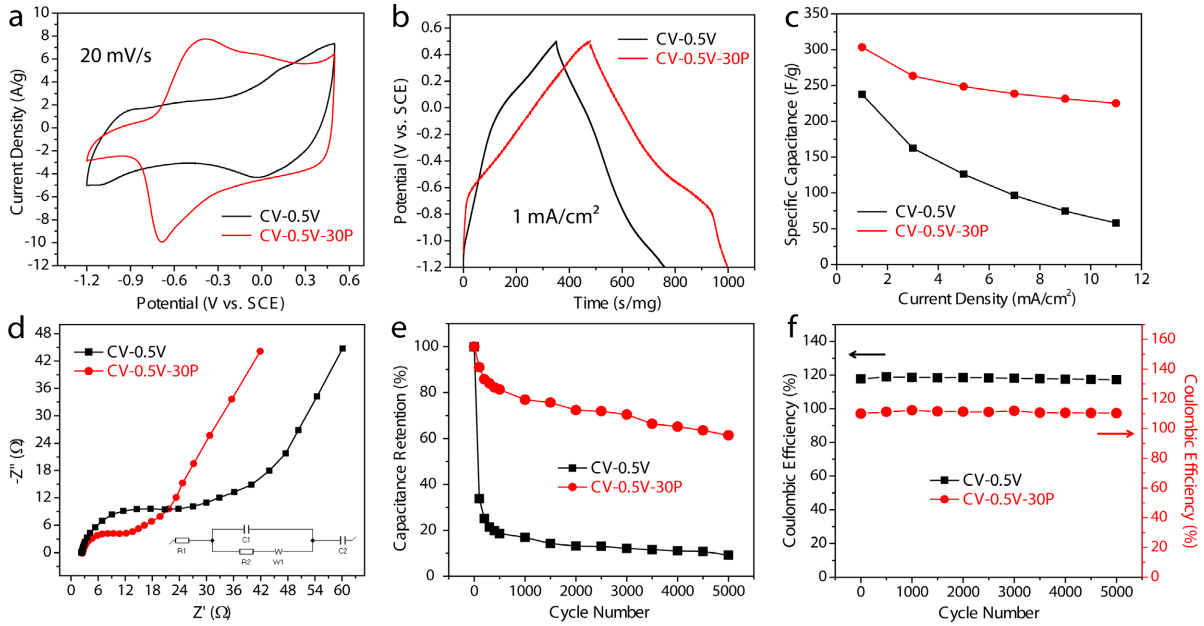


Figure 3. Electrochemical properties of CV-0.5V and CV-0.5V-30P electrodes: (a) CV curves at 20 mV/s; (b) galvanostatic charge/discharge curves at 1 mA/cm^2; (c) specific capacitance and from 1 to 11 mA/cm^2; (d) nyquist plots and equivlent circuit; (e) cycling stability; (f) coulombic efficiency at a current density of 11 mA/cm^2 for 5000 cycles

图 3. CV-0.5V 和 CV-0.5V-30P 电极的电化学性能测试：(a) 20 mV/s 下的 CV 曲线；(b) 1 mA/cm^2 下的恒电流充放电曲线；(c) 1~11 mA/cm^2 下的质量比电容曲线；(d) 阻抗谱图；(e) 稳定性测试和(f) 库伦效率曲线

Table 3. Electrochemical performances of recently reported vanadium oxide based electrodes

表 3. 近期报道的氧化钒基电极材料的电化学性能

材料	质量比电容	倍率性能
V_3O_7/carbon cloth [13]	198 F/g (1 A/g)	30.30% (1~15 A/g)
二维氧化钒纳米带[14]	213.1 F/g (0.5 A/g)	50.16% (0.5~5 A/g)
rGO/V_2O_5 纳米带[15]	310.1 F/g (1 A/g)	62.94% (1~10 A/g)
rGO-V_3O_7-PANI [16]	74 F/g (0.8 A/g)	12.78% (0.2~0.8 A/g)
CV-0.5V-30P (this work)	303.52 F/g (1 A/g)	74.18% (1~11 A/g)

4. 结论

采用循环伏安电沉积技术，于碳布表面制备了氧化钒电极材料，研究了沉积电位下限对氧化钒材料的电化学性能的影响，并进一步通过电化学聚合法在氧化钒表面复合聚吡咯，系统研究了复合电极的储能性能、倍率性能及循环稳定性的影响。研究表明，当循环伏安沉积电位为−0.5~1.0 V 时，所制备的氧化钒电极的性能最优，展现出纳米花形貌，表面包裹聚吡咯后，所制备的氧化钒@聚吡咯复合电极的电化学性能得到进一步提升，这种过渡金属氧化物与导电聚合物的核壳状结构有利于同时提升电极的储能性能和电化学循环稳定性。

基金项目

2026 年沈阳航空航天大学大学生创新创业训练计划项目(X202510143183)。
2024 年辽宁省高校基本科研业务费专项：青年项目(LJ212410143007)。

参考文献

[1] 黄晓斌, 张熊, 韦统振, 等. 超级电容器的发展及应用现状[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(11): 63-70.

[2] Miller, J.R. and Simon, P. (2008) Electrochemical Capacitors for Energy Management. *Science*, **321**, 651-652. https://doi.org/10.1126/science.1158736

[3] 李艳梅, 郝国栋, 崔平, 等. 超级电容器电极材料研究进展[J]. 化学工业与工程, 2020, 37(1): 17-33.

[4] 赖晓璇, 黎秀镇, 许漫洁, 等. 基于碳布复合三维阵列 VO_x 纳米片的构筑及其电容性能的研究[J]. 合成材料老化与应用, 2023, 52(1): 37-39, 49.

[5] 陈帅, 陈灵, 江浩. 氮掺杂无定形氧化钒纳米片阵列用于快充型准固态超级电容器[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(3): 945-951.

[6] 冯谙, 范利军, 蔡陶, 等. 电沉积二氧化锰成核机理及其充放电性能[J]. 应用化学, 2015, 32(9): 1081-1087.

[7] 安颢瑗, 任丽, 王立新, 等. 五氧化二钒/聚吡咯的制备及其电化学性能[J]. 复合材料学报, 2006, 23(5): 58-62.

[8] Nagaraju, D.H., Wang, Q., Beaujuge, P. and Alshareef, H.N. (2014) Two-Dimensional Heterostructures of V_2O_5 and Reduced Graphene Oxide as Electrodes for High Energy Density Asymmetric Supercapacitors. *Journal of Materials Chemistry A*, **2**, 17146-17152. https://doi.org/10.1039/c4ta03731f

[9] Li, M., Sun, G., Yin, P., Ruan, C. and Ai, K. (2013) Controlling the Formation of Rodlike V_2O_5 Nanocrystals on Reduced Graphene Oxide for High-Performance Supercapacitors. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **5**, 11462-11470. https://doi.org/10.1021/am403739g

[10] Boukhalfa, S., Evanoff, K. and Yushin, G. (2012) Atomic Layer Deposition of Vanadium Oxide on Carbon Nanotubes for High-Power Supercapacitor Electrodes. *Energy & Environmental Science*, **5**, 6872-6879. https://doi.org/10.1039/c2ee21110f

[11] Choi, D., Blomgren, G. . and Kumta, P. . (2006) Fast and Reversible Surface Redox Reaction in Nanocrystalline Vanadium Nitride Supercapacitors. *Advanced Materials*, **18**, 1178-1182. https://doi.org/10.1002/adma.200502471

[12] Sun, R., Chen, H., Li, Q., Song, Q. and Zhang, X. (2014) Spontaneous Assembly of Strong and Conductive Graphene/Polypyrrole Hybrid Aerogels for Energy Storage. *Nanoscale*, **6**, 12912-12920. https://doi.org/10.1039/c4nr03322a

[13] Manikandan, R., Raj, C.J., Rajesh, M., Kim, B.C., Nagaraju, G., Lee, W., *et al*. (2018) Rationally Designed Spider Web-Like Trivanadium Heptaoxide Nanowires on Carbon Cloth as a New Class of Pseudocapacitive Electrode for Symmetric Supercapacitors with High Energy Density and Ultra-Long Cyclic Stability. *Journal of Materials Chemistry A*, **6**, 11390-11404. https://doi.org/10.1039/c8ta03011a

[14] 唐文涛, 王婧璐, 郑茵茵, 等. 基于二维 VO_x 纳米带超级电容器的印刷制备及性能研究[J]. 印刷与数字媒体技术研究, 2023(5): 100-114.

[15] Yao, L., Zhang, C., Hu, N., Zhang, L., Zhou, Z. and Zhang, Y. (2019) Three-Dimensional Skeleton Networks of Reduced Graphene Oxide Nanosheets/Vanadium Pentoxide Nanobelts Hybrid for High-Performance Supercapacitors. *Electrochimica Acta*, **295**, 14-21. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.10.134

[16] Yasoda, K.Y., Mikhaylov, A.A., Medvedev, A.G., Kumar, M.S., Lev, O., Prikhodchenko, P.V., *et al*. (2019) Brush Like Polyaniline on Vanadium Oxide Decorated Reduced Graphene Oxide: Efficient Electrode Materials for Supercapacitor. *Journal of Energy Storage*, **22**, 188-193. https://doi.org/10.1016/j.est.2019.02.010