

# 氢气还原制备一氧化钒试验研究

于杰<sup>1</sup>, 黄青云<sup>1\*</sup>, 钟大鹏<sup>2</sup>, 裴贵尚<sup>3</sup>, 苏丽佳<sup>1</sup>, 徐海铭<sup>1</sup>, 向俊一<sup>1</sup>

(1. 重庆科技大学冶金与动力工程学院, 重庆 401331; 2. 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044; 3. 首尔国立大学材料科学与工程系, 韩国首尔 08826)

**摘要:** 一氧化钒(VO)作为高能量和高功率锂离子电池(LIBs)的潜在负极材料, 其现有合成方法存在纯度低、成本高、工艺复杂等问题, 限制了其在电极材料上的应用。笔者提出了采用氢气还原  $V_2O_3$  制备 VO 新工艺, 以  $V_2O_3$  为原料、 $H_2$  为还原剂, 系统研究了还原温度、还原时间等因素的影响。通过 V-H-O 多相反应实现 VO 的制备, 制得的 VO 粉体颗粒表面较为平整, 呈现出近似球或椭球的形状; XRD 衍射图谱与标准衍射图谱呈现高度一致性, 峰位对应精准, 峰形尖锐且半峰宽较窄, 表明其结晶程度优良。通过优化参数, 确定最佳 VO 还原条件, 当还原温度 1 500 °C、还原时间 5.5 h、氢气流速 0.264 cm/s 时, 钒含量约 78.27%, 符合  $VO_{0.80}$ - $VO_{1.20}$ 。

**关键词:**  $H_2$ ; VO; 负极材料; 热还原

中图分类号: TF841.3

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2026)01-0010-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2026.01.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音  
与作者互动  
聊科研

## Experimental study of vanadium monoxide synthesis via hydrogen reduction

YU Jie<sup>1</sup>, HUANG Qingyun<sup>1\*</sup>, ZHONG Dapeng<sup>2</sup>, PEI Guishang<sup>3</sup>, SU Lijia<sup>1</sup>, XU Haiming<sup>1</sup>, XIANG Junyi<sup>1</sup>

(1. School of Metallurgical and Power Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China; 2. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. Department of Materials Science and Engineering, Seoul National University, Seoul 08826, South Korea)

**Abstract:** Vanadium monoxide (VO), recognized as a potential anode material for high-energy and high-power lithium-ion batteries (LIBs), is limited in its application as an electrode material due to its low purity, high cost and complex process in existing synthesis process. The authors propose a novel hydrogen reduction process for VO synthesis using  $V_2O_3$  as the raw material and  $H_2$  as the reducing agent. The key parameters such as reduction temperature, reaction duration, and others were systematically investigated. The preparation of VO is achieved through the V-H-O multiphase reaction, and the resulting VO powder particles have relatively smooth surfaces, presenting an approximating spherical or ellipsoidal shape. The XRD diffraction pattern closely matches with the reference diffraction pattern, with accurate peak positions, sharp profiles, and narrow full widths at half maximum, indicating excellent crystallinity. By optimizing parameters, the optimal reduction conditions were determined. When the reduction temperature is 1 500 °C, the reaction time is 5.5 h, hydrogen flow rate is 0.264 cm/s, the vanadium content is about 78.27%, which is consistent with  $VO_{0.80}$ - $VO_{1.20}$ .

**Key words:**  $H_2$ ; VO; anode material; thermal reduction

收稿日期: 2025-04-16; 修回日期: 2025-05-25; 接受日期: 2025-05-30

基金项目: 国家自然科学基金(52404314, 52425408); 重庆市自然科学基金(cstc2021jcyj-msxmX0882); 重庆科技大学硕士研究生创新计划项目(YKJXC2420208)。

作者简介: 于杰, 2000 年出生, 男, 山西大同人, 硕士研究生, 研究方向为高纯金属钒制备, E-mail: 2023202007@cqust.edu.cn; \*通信作者: 黄青云, 1982 年出生, 女, 博士, 长期从事冶金物化基础研究工作, E-mail: qyhuang08@126.com。

## 0 引言

在全球致力于实现可持续发展与应对气候变化的大背景下,我国能源结构由传统化石能源向清洁化、低碳化方向加速转型,各类储能技术得以快速发展<sup>[1-3]</sup>。锂离子电池(LIBs)等储能技术凭借高能量密度、循环寿命良好以及产业成熟等显著优势,成为推动新能源汽车实现爆发式增长的核心动力<sup>[4-6]</sup>。

目前,商业化 LIBs 主要采用石墨负极<sup>[7]</sup>,但理论容量仅为 372 mA·h/g,成为制约电池能量和功率进一步提升的关键瓶颈<sup>[8-9]</sup>。一氧化钒(VO)因其高达 800 mA·h/g 的理论容量,被视为替代石墨负极实现高能量和高功率 LIBs 的潜在候选材料<sup>[10-11]</sup>。然而,VO 的电化学性能优势需突破低成本及可规模化制备的技术壁垒。FRANDSEN 等<sup>[12]</sup>将金属钒、炭黑和 V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的混合物压制成型并作原料,在 1 755 °C、1 h、真空的条件下首次合成了 VO,反应体系对真空度、温度要求严苛,实际操作难度大。TODD 等<sup>[13]</sup>采用固相反应法,即以 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和金属钒的混合物作为原料,在 1 350 °C、H<sub>2</sub> 气氛下进行多次还原反应制备 VO,但金属钒价格昂贵,生产成本高,且所制得产物 VO 的纯度仅为 98.2%,难以推广应用。BAUSCHLICHER 等<sup>[14-15]</sup>通过特制的单碰撞反应装置,利用 2 327 °C 的钒原子束与 27 °C 氧化剂气体 NO<sub>2</sub> 成功制备了 VO,但其在稳态环境中难以实现,推广应用困难。因此,现有合成方法存在产物纯度不足、反应条件苛刻、工艺复杂等问题,严重制约其在电极材料上的应用,亟需寻求高效、清洁、低成本的 VO 制备工艺。

氢气作为一种清洁能源,具有环境友好、还原性能佳的优势<sup>[16-17]</sup>,是我国实现“双碳”目标和能源转型不可或缺的助力<sup>[18-19]</sup>。随着电解水制氢技术的发展,未来氢能源的生产成本有望实现进一步降低,氢气将在未来清洁能源体系中占据关键地位<sup>[20-21]</sup>。在先前的研究工作中<sup>[22]</sup>,通过等温还原法研究了氢气还原 V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 制备 VO 的反应动力学行为,证实了其可行性。以此为基础,提出以 V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为原料、H<sub>2</sub> 作还原剂,通过 V-H-O 多相反应制备满足性能需求的 VO。

## 1 试验部分

### 1.1 试验材料

V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉末(99.9%,上海麦克林生物化学有限公司提供)加入到立式真空管式电炉中,设置温度

100 °C,以 Ar 为保护气焙烧 2 h 脱除水分。焙烧后 V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉末进行研磨至 50 μm (200 目) 以下。通过 X 射线衍射仪(XRD)测定其物相组成,结果如图 1 所示。V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 峰位对应精准,峰形尖锐且半峰宽较窄,结晶程度优良。

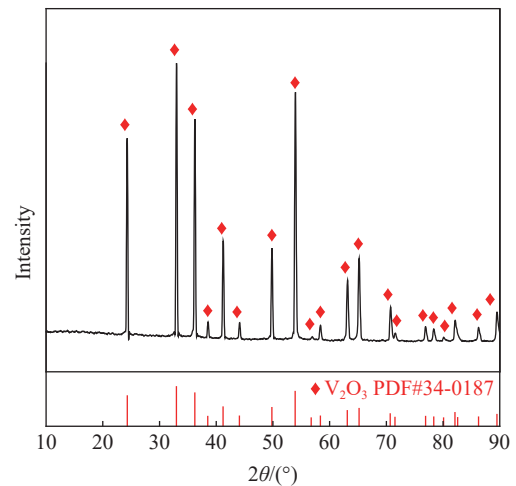


图 1 以 V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉末为原料的 XRD 谱图  
Fig. 1 XRD pattern with V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powder as the raw material

### 1.2 试验方法

在 H<sub>2</sub> 气氛下进行气基还原 V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 制备 VO。首先,取干燥后的 6 g V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 在玛瑙研磨钵中研磨至 50 μm (200 目) 以下,然后置于刚玉坩埚中,一并放入立式真空管式电炉(图 2)。焙烧前进行气密性测试,保证整个炉体及进出气管道无漏气点,再通入 Ar 保持 2~3 h 去除炉内空气。经脱水脱氧后的 H<sub>2</sub> 全程以一定流速通入炉内,以 5 °C/min 的升温速率加热至指定温度并保持一段时间。保温结束后,将炉体温度以 10 °C/min 的冷却速率冷却至 500 °C,随后自然冷却至室温。其中,出气管道连接两级干燥装置(冷凝除湿+分子筛吸附),保证氢气纯度。干燥后气体通过防爆电点火头点燃,确保排放气体符合《GB 16297-1996》标准。即反应后尾气 H<sub>2</sub> 通过脱水、点燃,避免浓度过高引发爆炸或直接排入空气造成安全隐患。将焙烧后产物研磨至 50 μm (200 目) 以下,真空封存。

### 1.3 表征

研究借助 FactSage 8.2 热力学软件计算各钒氧化物不同温度下反应平衡时的氧势;通过 X 射线衍射(XRD-7000,日本岛津)技术对产物的物相组成及其转变进行表征,并利用 GSAS 精修 XRD 数据,确定各物相含量;采用扫描电子显微镜-能谱仪(SEM-EDS, SU8020,日立高新技术公司)观测产物的微观结构形态;运用电感耦合等离子体发射光谱仪/质谱

仪(iCAP TQ ICP-MS, 赛默飞世尔科技)分析产物的钒含量。

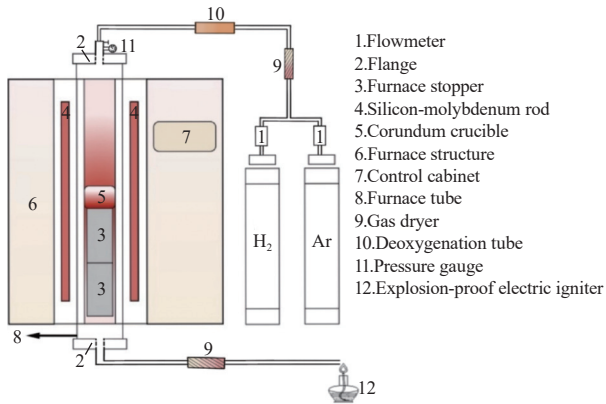


图2 VO制备试验装置

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental device for the preparation of vanadium monoxide

## 2 结果与讨论

### 2.1 热力学分析

研究团队在先前的工作中<sup>[22]</sup>计算了各钒氧化物不同温度下反应平衡时的氧势,如图3所示,在气相中,温度为 $T$ ,氧分压为 $p'_{O_2}$ ,氧的相对化学势<sup>[23]</sup>如式(1)所示。

$$\pi_{O_2} = RT \ln p_{O_2} = RT \ln \left( \frac{p'_{O_2}}{p^\theta} \right) \quad (1)$$

式中, $R$ 为摩尔气体常数,  $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ;  $p_{O_2}$ 为氧分压,量纲为一,  $p_{O_2} = p'_{O_2}/p^\theta$ ;  $p^\theta$ 为标准态压力,  $100 \text{ kPa}$ 。

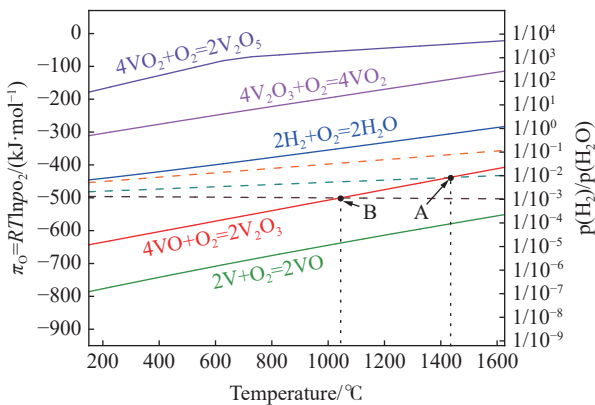


图3 钒氧化物氧势<sup>[22]</sup>

Fig. 3 Oxygen potential diagram of vanadium oxide<sup>[22]</sup>

氢气还原 $V_2O_3$ 制备VO反应方程如式(2)所示。



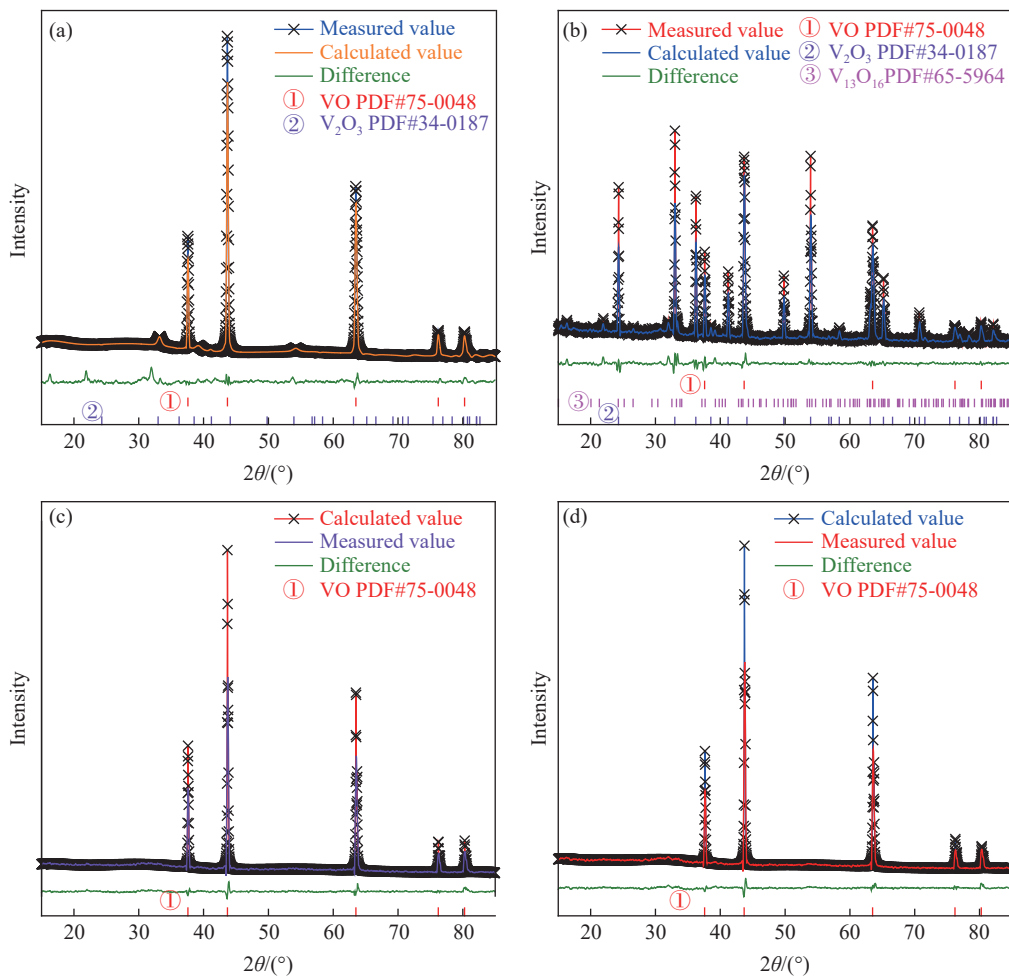
理论而言,钒氧化物的还原路径能够表述为: $V_2O_5 \rightarrow VO_2 \rightarrow V_2O_3 \rightarrow VO$ 。反应温度 $T$ 和 $p_{H_2}/$

$p_{H_2O}$ 是影响反应物相形成的核心要素,在标准状态下, $H_2O$ 的氧势明显低于 $VO_2$ 和 $V_2O_5$ ,但高于 $V_2O_3$ ,意味着此时氢气还原 $V_2O_5$ 或 $VO_2$ 只能制备出 $V_2O_3$ 。然而,通过调控反应温度和 $p_{H_2}/p_{H_2O}$ 可降低 $H_2O$ 的氧势,促进反应(2)向右进行,即通过调控 $p_{H_2}/p_{H_2O}$ 可降低反应开始的温度。如图3中的A点,当 $p_{H_2}/p_{H_2O}=1/10^{-2}$ 时,反应平衡温度为 $1427 \text{ }^\circ\text{C}$ ;如图3中的B点,当 $p_{H_2}/p_{H_2O}=1/10^{-3}$ 时,反应平衡温度为 $1027 \text{ }^\circ\text{C}$ ,此时还原产物为VO。由于反应持续进行,产物 $H_2O$ 挥发进入气相,实际氢分压无法精确控制。因此,为保证充足的热力学条件,工艺尝试在 $1427 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上进行。

### 2.2 反应温度的影响

为满足充分的热力学条件,设定在保温时间为6h,氢气流速 $0.264 \text{ cm/s}$ 的条件下,分别进行 $1450$ 、 $1475$ 、 $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $1525 \text{ }^\circ\text{C}$ 的还原试验。利用GSAS软件对反应后不同反应温度的还原产物进行X射线衍射(XRD)数据精修,结果如图4所示。其中, $Rwp$ 、 $Rp$ 和 $\chi^2$ 是衡量精修质量的关键指标。 $Rwp$ 是加权剩余因子,表示试验数据与计算模型之间的加权残差。 $Rwp$ 越小,表明模型与试验数据的拟合越好; $Rp$ 是未加权剩余因子,表示直接比较试验值与计算值的绝对差异,不考虑数据点的权重。 $Rp$ 反映模型的整体拟合质量,但对低强度数据的敏感性较低; $\chi^2$ 是卡方统计量,用于衡量模型与数据的匹配程度是否在统计误差范围内; $\chi^2$ 越接近1表示拟合越完美,因拟合存在误差, $\chi^2$ 值处于 $2 \sim 4$ 的范围都可接受。

在 $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $1525 \text{ }^\circ\text{C}$ 的条件下,还原产物物相与VO标准卡片(PDF#75-0048)对应,且未观测到其他杂峰,窄而强的衍射峰表明还原产物结晶性好。在反应温度 $1450 \text{ }^\circ\text{C}$ 的还原试验中,还原产物物相与 $V_2O_3$ (PDF#34-0187)和VO(PDF#75-0048)的标准卡片相对应,GSAS精修结果表明其中VO的含量为 $32.08\%$ , $V_2O_3$ 含量为 $67.92\%$ ;温度升至 $1475 \text{ }^\circ\text{C}$ ,还原产物物相与 $V_{13}O_{16}$ (PDF#65-5964)、 $V_2O_3$ (PDF#34-0187)和VO(PDF#75-0048)的标准卡片相对应,VO含量为 $38.09\%$ , $V_2O_3$ 含量为 $60.09\%$ , $V_{13}O_{16}$ 含量为 $1.82\%$ 。不同温度的VO还原度如图5所示,随着温度的升高,VO还原度由 $1450 \text{ }^\circ\text{C}$ 的 $32.08\%$ 升至 $1475 \text{ }^\circ\text{C}$ 的 $38.09\%$ ,最后在 $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ 达到 $100\%$ 。因此,还原工艺的最佳反应温度为 $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ ,此时 $V_2O_3$ 完全转变为VO,与理论计算结果<sup>[22]</sup>相符,即反应过程中,实际氢分压无法精确控制,当反应温度为 $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,可实现反应的热力学平衡。



(a) 1450 °C,  $R_{wp}=3.66\%$ ,  $R_p=2.63\%$ ,  $\chi^2=1.92$ ; (b) 1475 °C,  $R_{wp}=7.04\%$ ,  $R_p=4.43\%$ ,  $\chi^2=2.62$ ; (c) 1500 °C,  $R_{wp}=3.08\%$ ,  $R_p=2.53\%$ ,  $\chi^2=1.32$ ; (d) 1525 °C,  $R_{wp}=3.29\%$ ,  $R_p=2.87\%$ ,  $\chi^2=1.46$ .

图 4 不同反应温度下还原产物的 XRD 谱图

Fig. 4 XRD patterns of reduction products at different reaction temperatures

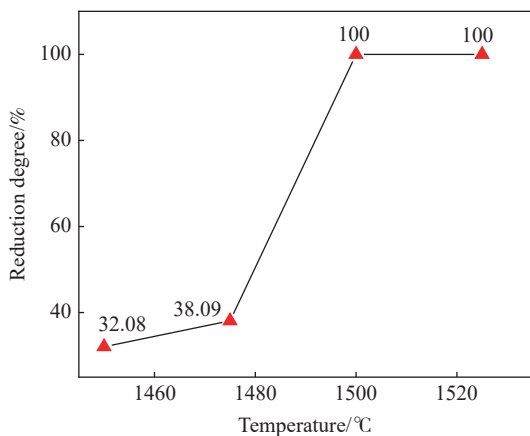


图 5 不同反应温度的 VO 还原度

Fig. 5 Reduction degree of VO at different reaction temperatures

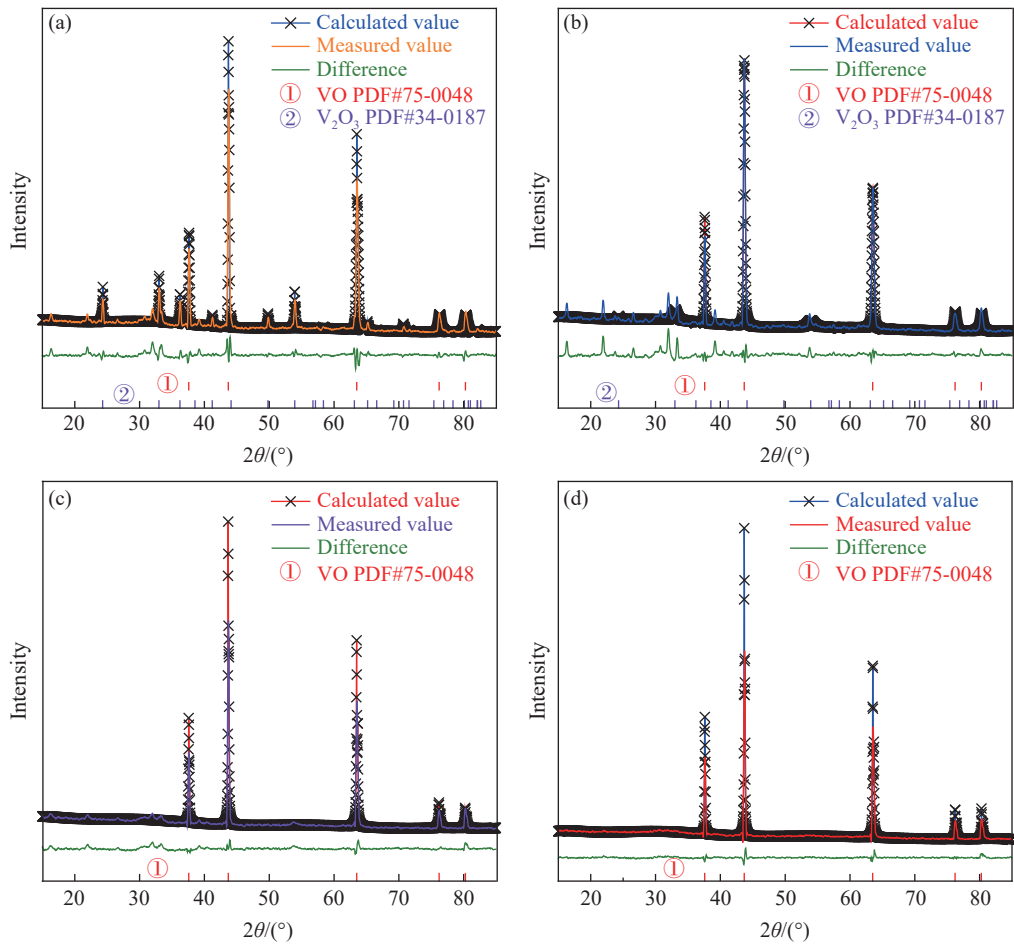
### 2.3 反应时间的影响

保持反应温度 1500 °C, 氢气流速 0.264 cm/s 不变, 分别进行反应时间 4.5、5、5.5 h 和 6 h 的试验

研究。反应时间对产物物相组成的影响如图 6 所示。当保温时间不低于 5.5 h 时, 还原产物物相仅为 VO(PDF#75-0048); 保温时间不足 5.5 h 时, 还原产物依旧存在  $V_2O_3$ (PDF#34-0187); 在保温时间 4.5 h 的还原试验中, VO 的含量为 37.58%,  $V_2O_3$  含量为 62.42%; 保温时间延长至 5 h, VO 的含量为 47.42%,  $V_2O_3$  含量为 52.58%。不同保温时间的 VO 还原度如图 7 所示, 随着保温时间的延长, VO 还原度由 4.5 h 的 37.58% 提升至 5 h 的 47.42%, 最后在 5.5 h 达到 100%, 为降低反应能耗, 确定最佳还原时间为 5.5 h。

### 2.4 氢气流速的影响

保持反应温度 1500 °C, 反应时间 5.5 h 不变, 分别进行氢气流速 0.15、0.188、0.226 cm/s 和 0.264 cm/s 的试验研究。氢气流速对产物物相组成的影响如图 8 所示。



(a)4.5 h,  $R_{wp}=6.01\%$ ,  $R_p=4.77\%$ ,  $\chi^2=3.12$ ; (b)5 h,  $R_{wp}=6.22\%$ ,  $R_p=4.86\%$ ,  $\chi^2=2.89$ ; (c)5.5 h,  $R_{wp}=4.52\%$ ,  $R_p=2.34\%$ ,  $\chi^2=1.87$ ; (d)6 h,  $R_{wp}=3.08\%$ ,  $R_p=2.53\%$ ,  $\chi^2=1.32$

图 6 不同反应时间下还原产物的 XRD 谱图

Fig. 6 XRD patterns of reduction products under different reaction time

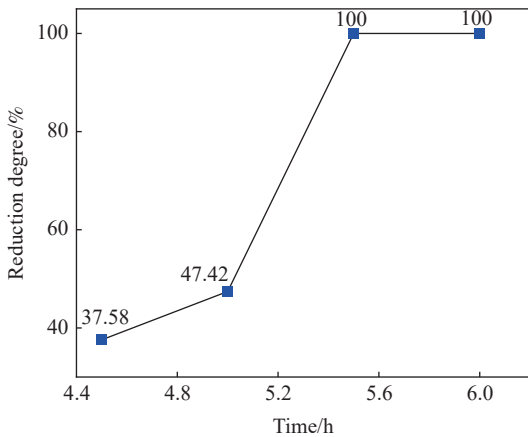


图 7 不同保温时间的 VO 还原度

Fig. 7 Reduction degree of VO under different heat preservation times

当氢气流速为 0.15 cm/s 时, 还原产物物相与  $V_{13}O_{16}$ (PDF#65-5964)、 $V_2O_3$ (PDF#34-0187) 和 VO (PDF#75-0048) 的标准卡片相对应, 其中  $V_{13}O_{16}$  含量为 56.68%,  $V_2O_3$  含量为 30.88%, VO 含量为 12.44%;

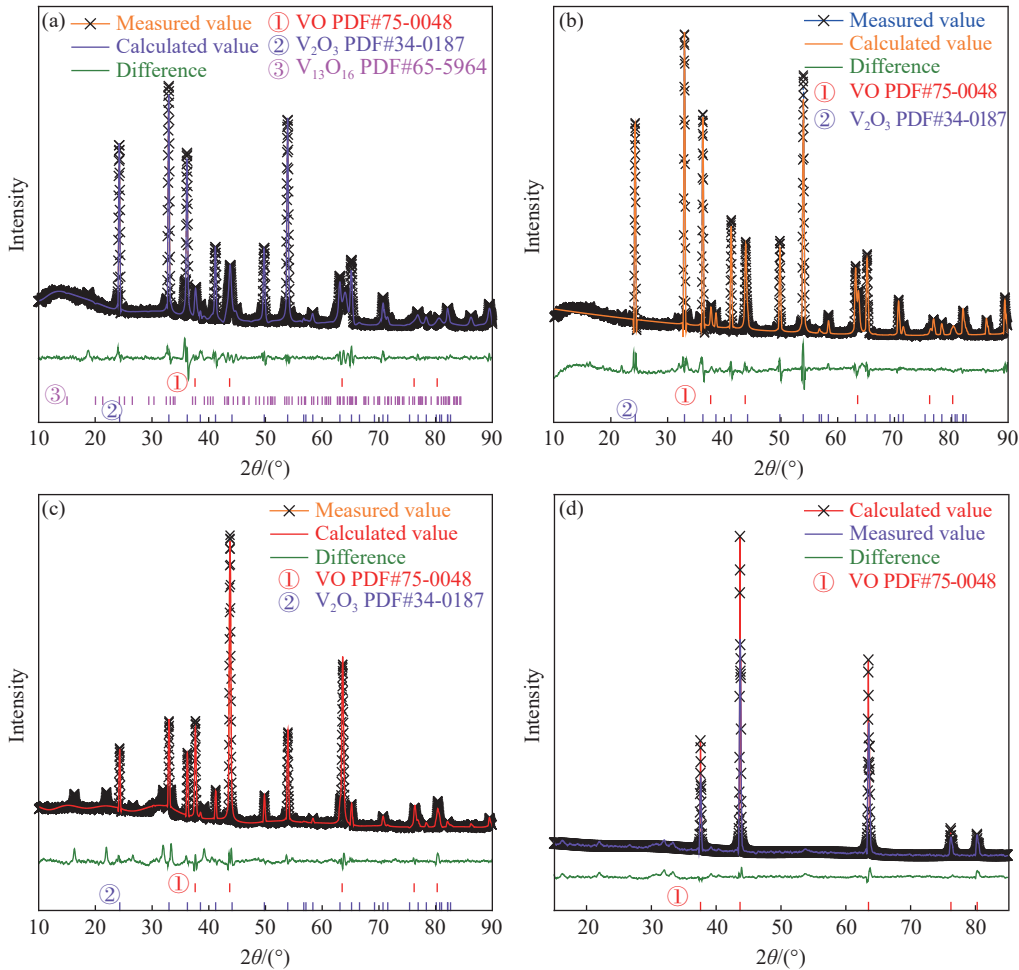
在 0.188 cm/s 和 0.226 cm/s 的条件下, 还原产物物相为  $V_2O_3$ (PDF#34-0187) 和 VO(PDF#75-0048); 氢气流速 0.188 cm/s 中,  $V_2O_3$  含量为 66.03%, VO 含量为 33.97%; 氢气流速 0.226 cm/s 中,  $V_2O_3$  含量为 24.35%, VO 含量为 75.65%; 氢气流速扩大至 0.264 cm/s, 还原产物仅为 VO(PDF#75-0048)。不同氢气流速的 VO 还原度如图 9 所示, 随着氢气流速的增大, VO 还原度由 0.15 cm/s 的 12.44% 升至 0.188 cm/s 的 33.97%, 继而升至 0.226 cm/s 的 75.65%, 在 0.264 cm/s 时还原完全为 100%。因此, 还原工艺的最佳氢气流速为 0.264 cm/s, 此时  $V_2O_3$  完全转变为 VO。

### 2.5 表征分析

对最佳工艺制得的还原产物 VO 进行表征。利用 ICP-OES/MS 分析产物的钒含量, 结果如表 1 所示。VO 中 V 含量的理论计算值约为 76.11%, 表 1 中样品的实际测量值略大, 与 SCHONBERG 等<sup>[24]</sup> 研究相符, VO 中 O/V 原子比并非严格意义上的 1:1。由于 VO 相存在晶格缺陷, 高温还原过程中  $H_2$  的渗

透动力学存在差异, 会导致晶格氧脱除不一致, 因而 VO 相的极限边界表现为 VO<sub>0.80</sub>-VO<sub>1.20</sub>。通过 SEM-EDS 表征研究还原产物表面微观结构和形貌特征, 不同放大倍数的显微图像如图 10 所示, VO 粉体颗

粒呈现出多样化的形貌特征, 部分颗粒表面较为光滑, 呈现出近似球或椭球的形状。在微观尺度上的分布呈现出一定规律性和随机性。此外, 在某些区域, 小尺寸颗粒聚集一起, 形成了较为密集的区域。



(a) 0.15 cm/s, Rwp=7.53%, Rp=4.30%,  $\chi^2=3.07$ ; (b) 0.188 cm/s, Rwp=6.14%, Rp=3.95%,  $\chi^2=1.99$ ; (c) 0.226 cm/s, Rwp=6.71%, Rp=4.44%,  $\chi^2=2.28$ ; (d) 0.264 cm/s, Rwp=4.52%, Rp=2.34%,  $\chi^2=1.87$ 。

图 8 不同氢气流速下还原产物的 XRD 谱图  
Fig. 8 XRD patterns of reduction products at different hydrogen flow rates

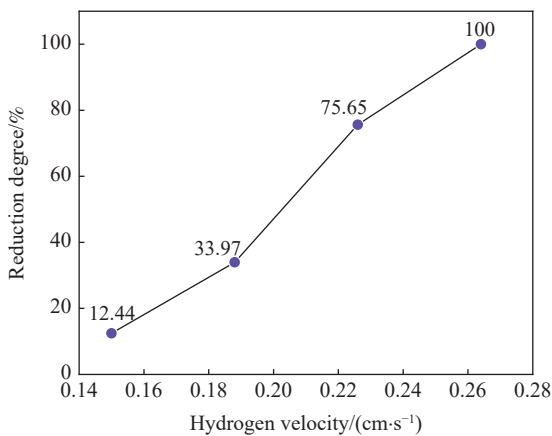
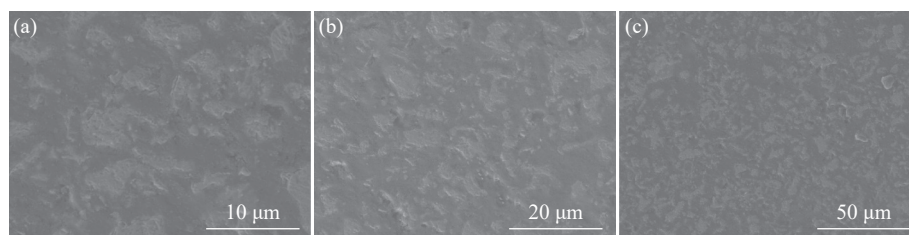


图 9 不同氢气流速的 VO 还原度  
Fig. 9 Reduction degree of VO at different hydrogen flow rates

表 1 VO 粉末中钒含量分析  
Table 1 Analysis of vanadium content in vanadium monoxide (powder)

Sample number	Element content/%
1	78.27
2	78.22
3	79.97
4	79.89

综上, 对于氢气还原 V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 制备 VO 工艺, 原料来源广泛且价格相对合理, 大规模生产 VO 经济可行。在反应过程中, 氢气还原法流程短, 反应条件易达成, 因而无需使用复杂昂贵的设备, 进一步降低了生产成本与技术门槛。



(a)10 μm; (b) 20 μm; (c) 50 μm

图 10 不同放大倍数下 VO 粉末的 SEM-EDS 图

Fig. 10 SEM-EDS analysis of VO powder at different magnification levels

### 3 结论与展望

氢作为清洁燃料能源的来源和重要还原剂,能有效减少使用传统燃料带来的碳排放。笔者提出的氢气还原  $V_2O_3$  制备 VO 清洁新工艺能够精准调控还原温度、反应时间和氢气流速,成功制得 VO,为绿色制备 VO 提供了新思路。主要结论如下:

1) 氢基还原  $V_2O_3$  制备 VO 的最佳工艺条件为: 焙烧温度 1 500 °C, 焙烧时间 5.5 h, 氢气流速 0.264 cm/s;

2) 产物 VO 结晶性好,其钒含量为 78.27% ~ 79.89%,表明 O/V 原子比并非严格意义上的 1:1,而是符合  $VO_{0.80}\text{-}VO_{1.20}$ 。

工艺在简化流程、降低成本的同时,有效减少了能源消耗与污染物排放,有望推动其在高性能 LIBs 领域的产业化进程。未来可利用 VO 制备工艺进行规模化试验,探究不同钒含量的 VO 在 LIBs 负极材料上的应用及其电化学性能,如理论容量、循环稳定性和电子电导率等。

### 参考文献

- [1] CHEN H B, YANG L. Path selection for China's hydrogen industry development under the goal of carbon neutrality[J]. China Population, Resources and Environment, 2024, 34(10): 94-105.  
(陈洪波, 杨来. 碳中和目标下中国氢能产业发展的路径选择[J]. 中国人口·资源与环境, 2024, 34(10): 94-105.)
- [2] ZUBI G, DUFO-LÓPEZ R, CARVALHO M, *et al.* The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives[J]. Renewable & sustainable energy reviews, 2018, 89: 292-308.
- [3] LI J, LU Y, YANG T, *et al.* Water-based electrode manufacturing and direct recycling of lithium-ion battery electrodes—A green and sustainable manufacturing system[J]. iScience, 2020, 23(5): 101081.
- [4] RAO L, HUANG Z Z. Research progress on lithium-ion battery energy storage technology[J]. Light Industry Standards and Quality, 2024(5): 118-119.  
(饶蕾, 黄镇泽. 锂离子电池储能技术研究进展[J]. 轻工标准与质量, 2024(5): 118-119.)
- [5] HAO K L. Application and development of electrochemical energy storage technology in clean-energy vehicles[J]. Chemical Fiber and Textile Technology, 2023, 52(5): 26-28.  
(郝康乐. 电化学储能技术在清洁能源汽车中的应用与发展[J]. 化纤与纺织技术, 2023, 52(5): 26-28.)
- [6] AZAM M A, SAFIE N E, AHMAD A S, *et al.* Recent advances of silicon, carbon composites and tin oxide as new anode materials for lithium-ion battery: A comprehensive review[J]. Journal of energy storage, 2021, 33: 102096.
- [7] SHI F, SONG Z, ROSS P N, *et al.* Failure mechanisms of single-crystal silicon electrodes in lithium-ion batteries[J]. Nature communications, 2016, 7(1): 11886.
- [8] LIU J, SHI H, HU X, *et al.* Critical strategies for recycling process of graphite from spent lithium-ion batteries: A review[J]. The Science of the total environment, 2022, 816: 151621.
- [9] YAO Y, YAN C, ZHANG Q. Emerging interfacial chemistry of graphite anodes in lithium-ion batteries[J]. Chemical communications (Cambridge, England), 2020, 56(93): 1457-14584.
- [10] DING J, DU Z, GU L, *et al.* Ultrafast  $Zn^{2+}$  intercalation and deintercalation in vanadium dioxide[J]. Advanced materials (Weinheim), 2018, 30(26): 1800762.
- [11] NI S, LIU J, CHAO D, *et al.* Vanadate-based materials for Li-ion batteries: The search for anodes for practical applications[J]. Advanced energy materials, 2019, 9(14): 1803324.
- [12] FRANDSEN M. Preparation of vanadium monoxide[J]. Journal of the American Chemical Society, 1952, 74(20): 5046.
- [13] TODD S S B K R. Low temperature heat capacities and entropies at 298.16 K of ferrous oxide, manganous oxide and vanadium monoxide[J]. Journal of the American Chemical Society, 2002(73): 3894-3895.
- [14] BAUSCHLICHER C W J, LANGHOFF S R. Theoretical studies of the low-lying states of ScO, ScS, VO, and VS[J]. The Journal of chemical physics, 1986, 85(10): 5936-5942.

(下转第 27 页)

- (刘国鹏, 尤静琳, 王建, 等. 气动悬浮无容器激光加热技术的应用: MgTi<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 晶体及其熔体微结构的原位超高温拉曼光谱研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43(8): 2507-2513.)
- [ 44 ] CHENG K G, WAN J L, LIANG K M, *et al.* Differential thermal analysis on the crystallization kinetics of K<sub>2</sub>O-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>-F glass[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1999, 82(5): 1212-1216.
- [ 45 ] LIU H H. Study on preparation of rich titanium material from electric furnace titanium slag by oxidation-reduction roasting followed acid and alkali leaching[D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.  
(刘宏辉. 电炉渣氧化-还原浸出除杂制备富钛料的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2015.)
- [ 46 ] SUN X G, WANG H L, XING J, *et al.* Effect of TiO<sub>2</sub> on crystallization activation energy of gold tailings microcrystalline foam glass[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(1): 151-156.  
(孙晓刚, 王海龙, 邢军, 等. TiO<sub>2</sub> 对黄金尾砂微晶泡沫玻璃非等温析晶活化能的影响[J]. 矿产综合利用, 2021(1): 151-156.)
- [ 47 ] SUN K, ZHANG L. Measurement of the thermodynamic properties of Fe<sub>2</sub>Ti<sub>3</sub>O<sub>9</sub> and Fe<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub>[J]. Transactions of nonferrous metals society of china, 1996, 6(1): 25-31.
- [ 48 ] MELO M A, CENTURION H A, MACHADO G, *et al.* Binary transition metal NiFeO<sub>x</sub> and CoFeO<sub>x</sub> cocatalysts boost the photodriven water oxidation over Fe<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub> nanoparticles[J]. Chemnanomat, 2022, 8(4): e202100510.
- [ 49 ] ZHAO B, LIN L, CHEN C, *et al.* Research progress on crystal growth mechanism of titania/titanate nano-powder materials[J]. Journal of Inorganic Materials, 2013, 28(7): 683-690.  
(赵斌, 林琳, 陈超, 等. 二氧化钛/钛酸盐纳米粉体的晶体生长机理研究进展[J]. 无机材料学报, 2013, 28(7): 683-690.)
- [ 50 ] WILSON G J, MATIJASEVICH A S, MITCHELL D R G, *et al.* Modification of TiO<sub>2</sub> for enhanced surface properties: finite ostwald ripening by a microwave hydrothermal process[J]. Langmuir, 2006, 22(5): 2016-2027.
- [ 51 ] LI G, LI L, BOERIO-GOATES J, *et al.* Grain-growth kinetics of rutile TiO<sub>2</sub> nanocrystals under hydrothermal conditions[J]. Journal of Materials Research, 2003, 18(11): 2664-2669.

编辑 邓淑惠

~~~~~  
(上接第 16 页)

- [ 15 ] JONES R W, GOLE J L. Single collision oxidation of vanadium with NO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>[J]. The Journal of chemical physics, 1976, 65(9): 3800-3802.
- [ 16 ] ZHENG S B. Basic research on hydrogen metallurgy and new ironmaking idea-process[J]. China Metallurgy, 2012, 22(7): 1-6.  
(郑少波. 氢冶金基础研究及新工艺探索[J]. 中国冶金, 2012, 22(7): 1-6.)
- [ 17 ] ZHOU M J, AI L Q, HONG L K, *et al.* Basic research on hydrogen metallurgy and exploration of new technology[J]. MATERIALS REPORTS, 2023, 37(13): 164-169.  
(周美洁, 艾立群, 洪陆阔, 等. 氢冶金基础研究和新工艺探索[J]. 材料导报, 2023, 37(13): 164-169.)
- [ 18 ] WANG L, GUO P, KONG L, *et al.* Industrial application prospects and key issues of the pure-hydrogen reduction process[J]. International journal of minerals, metallurgy and materials, 2022, 29(10): 1922-1931.
- [ 19 ] YAN Z, ZHANG Y, ZHENG S, *et al.* Preparation of titanium mineral from vanadium titanomagnetite concentrates by hydrogen reduction and acid leaching[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2022, 32(9): 3099-3109.
- [ 20 ] ZHANG Y, ZHANG Y, LI Z, *et al.* A review of hydrogen production via seawater electrolysis: Current status and challenges[J]. Catalysts, 2024, 14(10): 691.
- [ 21 ] AMINI HORRI B, OZCAN H. Green hydrogen production by water electrolysis: Current status and challenges[J]. Current opinion in green and sustainable chemistry, 2024, 47: 100932.
- [ 22 ] PEI G, XIANG J, ZHONG D, *et al.* A clean process of preparing VO as LIBs anode materials via the reduction of V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> powder in a H<sub>2</sub> atmosphere: Thermodynamic assessment, isothermal kinetic analysis, and electrochemistry performance evaluation[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 845: 156305.
- [ 23 ] HUANG X H. Principles of ferrous metallurgy (4th ed. )[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2013.  
(黄希祐. 钢铁冶金原理 第 4 版[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2013.)
- [ 24 ] SCHNBERG N O W G M. An X-ray study of the tantalum-nitrogen system[J]. Acta Chem Scand, 1954(8): 199-203.

编辑 唐肖