

钒离子浓度和硫酸浓度对负极电解液 电化学性能的影响

韩慧果

(攀钢集团研究院有限公司, 钒钛资源综合利用国家重点实验室, 四川 攀枝花 617000)

摘要: 为了改善负极电解液的电化学活性, 提高其能量密度, 研究了钒离子浓度和硫酸浓度对电解液粘度、电导率和电化学活性的影响。结果表明, 钒离子浓度和硫酸浓度通过改变电解液中的氢离子浓度和钒离子的聚集状态而影响电解液的粘度、电导率和电化学活性。负极电解液的粘度随着钒离子浓度和硫酸浓度的增加而增大; 电导率随着硫酸浓度的增加而增大, 但增加钒离子浓度降低溶液电导率。合适的硫酸浓度可以改善电解液的电化学活性, 而提高钒离子浓度抑制了电解液传质和电荷传递过程。当钒离子浓度为 2.0 mol/L, 硫酸浓度为 2.0 mol/L 时, 电解液的电化学活性和可逆性最好, 其传质速率为 $(1.39 \sim 2.25) \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, 电荷传递速率为 $1.74 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 。

关键词: 全钒液流电池; 负极电解液; 钒离子浓度; 硫酸浓度; 电化学活性

中图分类号: TF841.3 文献标志码: A 文章编号: 1004-7638(2019)05-0016-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2019.05.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
聊科研
与作者互动

Effects of Vanadium Concentration and Sulfuric Acid Concentration on the Electrochemical Properties of Negative Electrolyte for Vanadium Redox Flow Battery

Han Huiguo

(Pangang Group Research Institute Co., Ltd., State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Panzhihua 617000, Sichuan, China)

Abstract: In order to improve the electrochemical activity and energy density of negative electrolyte of vanadium redox flow battery, the viscosity, conductivity and electrochemical performances of the negative electrolytes at different compositions were investigated. The results show that the vanadium concentration and sulfuric acid concentration affect the viscosity, conductivity and electrochemical activity of the negative electrolyte by changing the hydrogen ions concentration and aggregation state of vanadium ions. The viscosity of the negative electrolyte increases with increase of the vanadium concentration and sulfuric acid concentration, and the conductivity increases with increase of the sulfuric acid concentration but decreases with increase of vanadium concentration. Appropriate sulfuric acid concentration can improve the electrochemical activity of the electrolyte, while increasing the vanadium concentration restrains the mass transfer and charge transfer processes for the negative electrolyte. When the vanadium concentration is 2.0 mol/L and sulfuric acid concentration is 2.0 mol/L, the electrolyte shows the best electrochemical activity and reversibility, with the mass transfer rate of $(1.39 \sim 2.25) \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ and the charge transfer rate of $1.74 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$.

Key words: vanadium redox flow battery, negative electrolyte, vanadium concentration, sulfuric acid concentration, electrochemical activity

收稿日期: 2019-08-08

作者简介: 韩慧果(1988—), 男, 硕士, 研究方向为全钒液流储能电池, E-mail: hhg742910379@126.com。

0 引言

钒电池作为长周期、大容量、安全性高、寿命长、环境友好的储能技术,可用于削峰填谷、调频调峰、新能源发电储能、偏远地区供电等,应用前景广阔^[1-2]。全钒液流电池的活性物质储存于电解液中,电解液与电堆具有独立性,电池的能量密度取决于电解液中有效活性物质钒的浓度。目前,钒电池存在的主要问题包括两个方面,首先电解液的能量密度低($<25\text{ Wh/kg}$),导致工程化应用占地面积大,这是由于 $V(V)$ 离子在高温下易水解, $V(II)$ 、 $V(III)$ 和 $V(IV)$ 离子在低温下结晶析出,提高酸度可以增加 $V(V)$ 离子的稳定性,但由于同离子效应使 $V(II)$ 、 $V(III)$ 和 $V(IV)$ 离子易沉淀^[3],商业化应用的电解液中钒离子浓度通常为 $1.6\sim 1.7\text{ mol/L}$;其次,负极电解液的电化学活性差,大量研究表明,负极电化学反应是整个反应的控制步骤^[4-6]。总之,如何提高负极电解液中活性钒离子的浓度及电化学活性,是亟待解决的问题之一。

目前,电解液的研究主要集中于添加剂和新支持电解质体系,加入碱金属盐等无机添加剂和含有 $-SH$ 、 $-NH_2$ 、 $-SO_3H$ 、 $-OH$ 、 $-COOH$ 、 $-C=O$ 等基团的有机化合物可以用于提高电解液的稳定性及改善电化学活性^[7-10],但加入添加剂通常只能延长钒离子沉淀诱导时间,不能从根本上提升电解液中钒离子的浓度^[11]。新的支持体系如 HCl 体系^[12]、 $HCl-H_2SO_4$ 混酸体系^[13]、 $H_2SO_4-CH_3HSO_4$ 混酸体系^[14],可以显著地提高电解液的浓度和电化学活性,但存在 HCl 易挥发、不稳定, CH_3HSO_4 成本高等问题,限制了其应用。赵建新^[15]等研究了 $V_2(SO_4)_3$ 的溶解性规律,在相对较低的 H_2SO_4 浓度下, $V(III)$ 浓度可以在大于 2.0 mol/L 下长时间稳定存在,但未系统地研究高浓度负极电解液的电化学活性。笔者研究了钒离子浓度和硫酸浓度对高浓度负极电解液(钒离子浓度 $\geq 2.0\text{ mol/L}$)的理化性质和电化学活性的影响,揭示了钒离子浓度和硫酸浓度对负极电解液电化学活性的影响规律。

1 试验

1.1 负极电解液的制备

将硫酸氧钒溶解于去离子水中,加入硫酸,置于钒电池正负极储液罐中,在恒压条件下电解。在正

极得到 $V(V)$ 电解液,在负极得到墨绿色的 $V(III)$ 电解液,电解液中钒离子的浓度和价态通过电位滴定仪测量(785 DMP Titrino, Metrohm),硫酸根通过重量法测量。

1.2 粘度测试

采用运动粘度自动测定仪(ZTND 2000型,上海平轩科学仪器有限公司)测定电解液的粘度。所用粘度计毛细管直径为 1.0 mm ,粘度常数为 $0.067\text{ mm}^2/\text{s}$,测试温度为 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 。多次记录电解液通过毛细管所需的时间,取平均值计算溶液粘度。

1.3 电导率测试

采用电导率仪(IS228型,上海仪迈仪器有限公司)测量电解液的电导率,测量温度为 $25\text{ }^\circ\text{C}$,所使用的电导电极YE303型,电导电极系数为 10 ± 2 ,多次测量电解液的电导率,取平均值。

1.4 电化学性能测试

采用电化学工作站(PGSTAT302N型,autolab)进行循环伏安和稳态极化曲线测试。以232型饱和甘汞电极为参比,铂电极为对电极,石墨棒为工作电极,工作电极的有效面积为 1 cm^2 ,其余部分用绝缘胶布密封。为了防止不同离子在石墨电极表面产生污染,在每次测试之前,分别用800目($18\text{ }\mu\text{m}$)和1000目($13\text{ }\mu\text{m}$)的碳化硅砂纸对石墨棒电极进行打磨,然后用去离子水冲洗3~5次。循环伏安扫描电压范围为 $-0.9\sim 0\text{ V}$;稳态极化曲线测试溶液扫描电压范围为 $-0.8\sim 0\text{ V}$,扫描速度为 1 mV/s 。

2 结果与讨论

2.1 钒离子浓度和硫酸浓度对电解液电导率和粘度的影响

由图1(a)可知,在 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下,电解液的粘度随着钒离子浓度和硫酸浓度的增高而增大,随着硫酸浓度由 0.5 mol/L 增加到 2.5 mol/L ,钒离子浓度为 2.0 mol/L 的电解液的粘度由 $5.32\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 增加到 $6.62\text{ Pa}\cdot\text{s}$,电解液的粘度增加24.44%;钒离子浓度为 2.5 mol/L 的电解液,其粘度由 $8.72\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 增加到 $12.16\text{ Pa}\cdot\text{s}$,电解液的粘度增加39.45%。但从整体上看,钒离子浓度为 2.5 mol/L 的电解液的粘度远高于钒离子浓度为 2.0 mol/L 电解液。因此,钒离子浓度是影响电解液粘度的主要因素,这是由于增大钒离子浓度,更有利于钒离子的缔合,形成多聚体,使电解液的粘度更大^[16]。

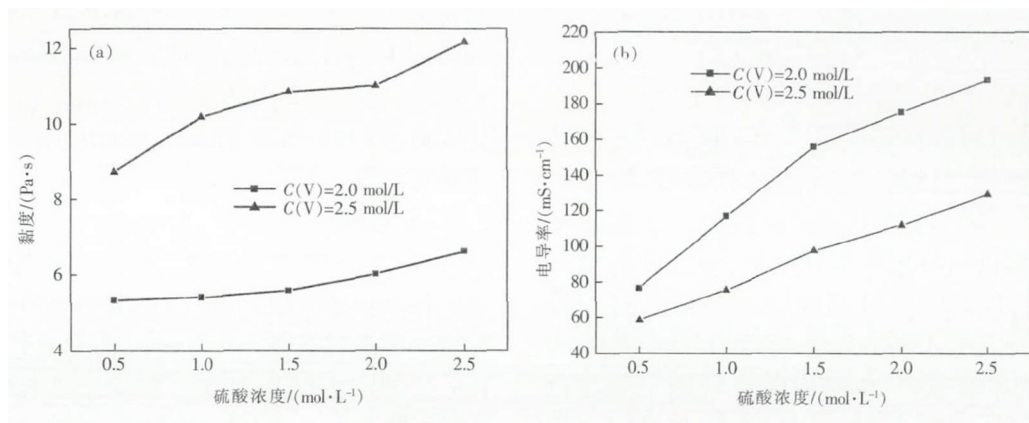


图1 不同钒离子和硫酸浓度对电解液电导率(a)和粘度(b)的影响(测量温度: 25 °C)

Fig.1 Effects of vanadium concentration and sulfuric acid concentration on

(a) conductivity (b) viscosity of the negative electrolyte (measurement temperature: 25 °C)

由图1(b)可知,钒离子浓度和硫酸浓度均对电解液的电导率具有较大的影响。随着硫酸浓度的升高,电解液的电导率逐渐升高,在钒离子浓度为2.0 mol/L的条件下,随着硫酸浓度从0.5 mol/L逐渐增加到2.5 mol/L,电解液的电导率由76.4 mS/cm逐渐增加到193.3 mS/cm,电导率增加了1.53倍;对比不同钒离子浓度的电解液,在相同的硫酸浓度下,将钒离子浓度从2.0 mol/L提高到2.5 mol/L时,电解液的电导率反而下降。

电解液的电导率主要是由氢离子的数量和电迁移速率决定的,在钒离子浓度一定的条件下,提高硫酸浓度,溶液中的氢离子浓度增加,故电导率增加;在相同硫酸浓度的条件下,提高电解液中钒离子的浓度,溶液中总的硫酸根浓度升高,抑制了硫酸的一级电离和二级电离,从而使得电解液中氢离子浓度降低;另一方面,提高溶液中钒离子的浓度,溶液粘度增大,影响了氢离子的扩散^[17]。因此,在这两方面的影

响之下,增加钒离子浓度降低了电解液的电导率。

2.2 钒离子浓度和硫酸浓度对电解液循环伏安特性的影响

图2(a)和(b)分别为钒离子浓度为2.0 mol/L和2.5 mol/L下,不同硫酸浓度下钒电解液的循环伏安曲线,扫速均为10 mV/s。相应的电化学参数如图3所示。

V^{2+}/V^{3+} 氧化还原电对的氧化峰和还原峰分别在-0.4 V和-0.7 V左右,随着硫酸浓度的增加,钒离子浓度为2.0 mol/L和2.5 mol/L的电解液,其峰电流和峰电流之比均呈先增加后降低的趋势,而相应的峰电位差呈现先降低后升高的趋势。钒离子浓度为2.0 mol/L和2.5 mol/L的电解液,在硫酸浓度分别为2.0 mol/L和1.5 mol/L时,峰电位差(ΔE)最小,分别为0.176 V和0.239 V,氧化还原峰电流(峰电位比)最大,电化学活性最佳。这说明电解液的电化学活性和可逆性受到钒离子浓度和硫酸浓度的影响。

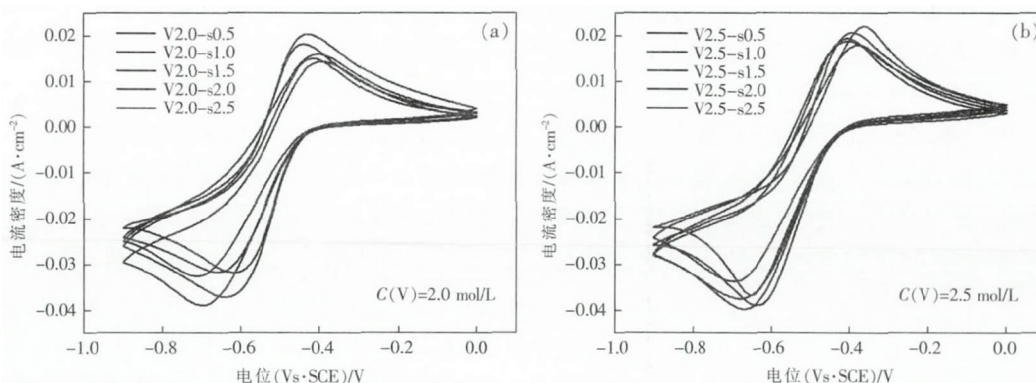


图2 不同硫酸浓度的电解液的循环伏安曲线

Fig.2 CV curves of the negative electrolyte with different sulfuric acid concentrations at scan rate of 10 mV/s

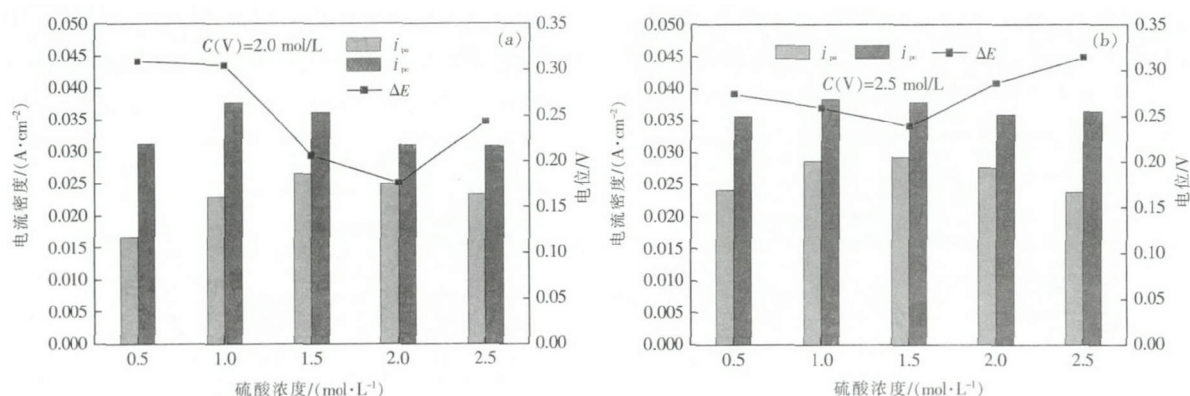
图3 不同硫酸浓度的电解液的 i_{pa} 、 i_{pc} 和 ΔE

Fig.3 The i_{pa} i_{pc} and ΔE of the negative electrolyte with different sulfuric acid concentrations at scan rate of 10 mV/s

2.3 钒离子浓度和硫酸浓度对电解液传质步骤动力学的影响

为了进一步探究钒离子浓度和硫酸浓度对V(II) /

V(III) 氧化还原电对反应动力学的影响, 进行了一系列不同扫速的循环伏安测试, 扫速范围为 5、10、15、20、25、30 mV/s, 测试结果如图 4.5 所示。

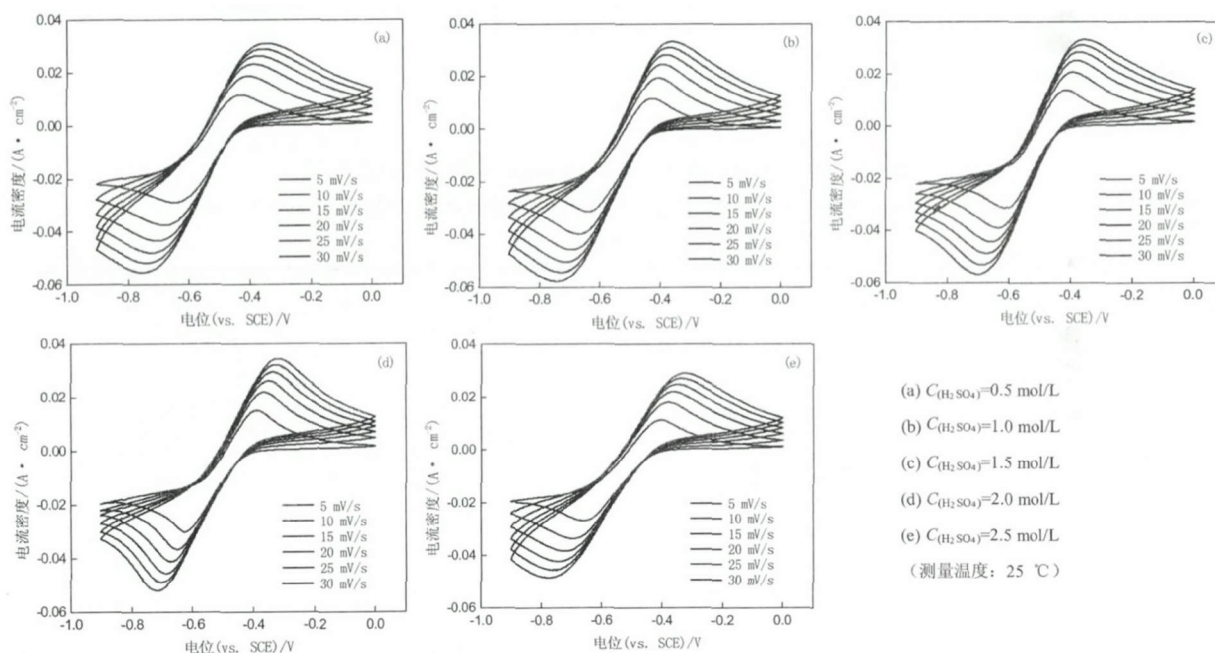


图4 不同扫速下 2 mol/L V(III) 电解液的循环伏安曲线

Fig.4 CV curves of 2.0 mol/L V(III) electrolyte at different scan rates

不同钒离子浓度和硫酸浓度下的电解液的循环伏安测试曲线中, 峰电流与电位差都随着扫速的增大而增加, 同时峰电位 (ΔE) 差均大于 59 mV, 循环伏安曲线呈现出准可逆体系的典型特征, V(II) / V(III) 电对反应在石墨电极上为准可逆单电子反应过程。

将不同扫速下峰电流 i_p 与 $\nu^{1/2}$ 的关系进行线性拟合, 对于准可逆反应, 钒离子的扩散系数可通过 Randles-Sevcik 方程求出^[18]。由于 V(II) / V(III)

电对为准可逆体系, 计算的扩散速率应介于可逆与不可逆体系之间。图 6 为电流 (i_p) 与扫速的平方根 ($\nu^{1/2}$) 的关系。

对于可逆反应, 活性物质的扩散系数 (D_0) 根据公式 (1) 计算得到:

$$i_p = 2.69 \times 10^5 n^{3/2} A C D_0^{1/2} \nu^{1/2} \quad (1)$$

对于不可逆反应, 活性物质的扩散系数 (D_0) 根据公式 (2) 计算得到:

$$i_p = 2.99 \times 10^5 n^{3/2} \alpha^{1/2} A C D_0^{1/2} \nu^{1/2} \quad (2)$$

式中 i_p 为峰电流, $\mu\text{A}/\text{cm}^2$; n 为电极反应转移的电子数; A 为工作电极面积, cm^2 ; C 为电活性物质浓度,

mol/L ; D_0 为活性物质的扩散系数, cm^2/s ; ν 为循环伏安扫速, V/s ; α 为电荷转移系数 ($\alpha \approx 0.5$)。

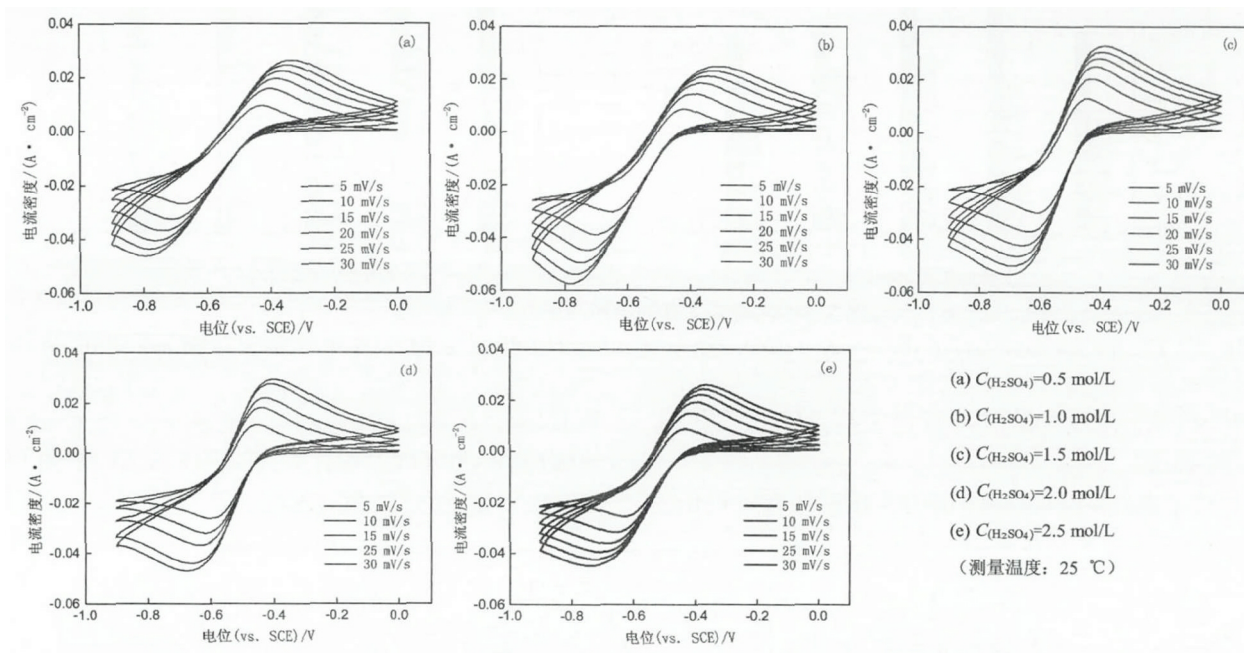


图5 不同扫速下 2.5 mol/L V(III) 电解液的循环伏安曲线

Fig.5 CV curves of 2.5 mol/L V(III) electrolyte at different scan rates

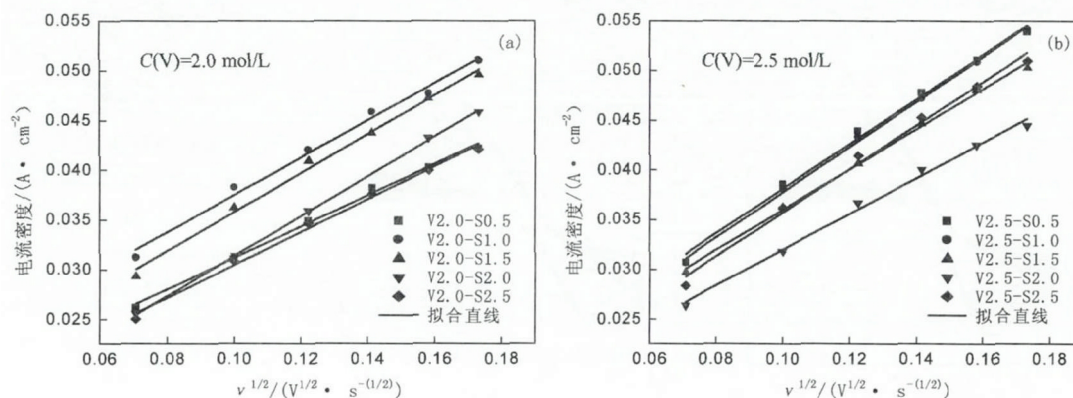


图6 扫速平方根与峰电流的线性关系

Fig.6 Linear relationship between peak current and square root of scanning rate ($\nu^{1/2}$) from CV curves

不同钒离子浓度和硫酸浓度条件下电解液的扩散系数如表1所示,随着硫酸浓度的增加,电解液的扩散系数均呈现先增大后减小的趋势。对于钒离子浓度为 2.0 mol/L 的电解液,当硫酸浓度为 2.0 mol/L 时,钒离子的扩散系数最大,为 $(1.39 \sim 2.25) \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$,随着钒离子浓度的进一步增加,扩散系数降低,当硫酸浓度为 2.5 mol/L 时,扩散系数仅为 $(0.94 \sim 1.53) \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$; 钒离子浓度为 2.5 mol/L 的电解液,当硫酸浓度为 1.5 mol/L 时,

扩散系数最大,为 $(1.13 \sim 1.84) \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$,继续增加硫酸浓度到 2.5 mol/L 时,其扩散系数降为 $(0.87 \sim 1.41) \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ 。对比钒离子浓度对钒离子扩散系数的影响,在相同硫酸浓度条件下,提高钒离子的浓度,钒离子的扩散系数降低。当电解液的组分为钒离子浓度 2.0 mol/L、硫酸浓度 2.0 mol/L 时,具有最高的扩散系数,其电化学反应传质过程最快。钒离子浓度和硫酸浓度影响电解液中钒离子的聚合状态和水合半径,进而影响钒离

子的传质过程。

2.4 钒离子浓度和硫酸浓度对电解液电子转移步骤动力学的影响

电子转移步骤是电活性物质在电极表面得失电子,发生氧化还原反应形成新物质的过程。为了研究 V(II) /V(III) 电对的电子转移动力学,对不同钒离子浓度和硫酸浓度的电解液进行了稳态极化曲线测试。在相对低的过电位范围内,电流密度与过电位成线性关系,如图 7 所示。电化学动力学参数如极化电阻 R_{ct} 、交换电流密度 j_0 及电化学反应速率常数 k_0 可以通过稳态极化曲线求出。电化学参数可通过公式 (3) 得出。

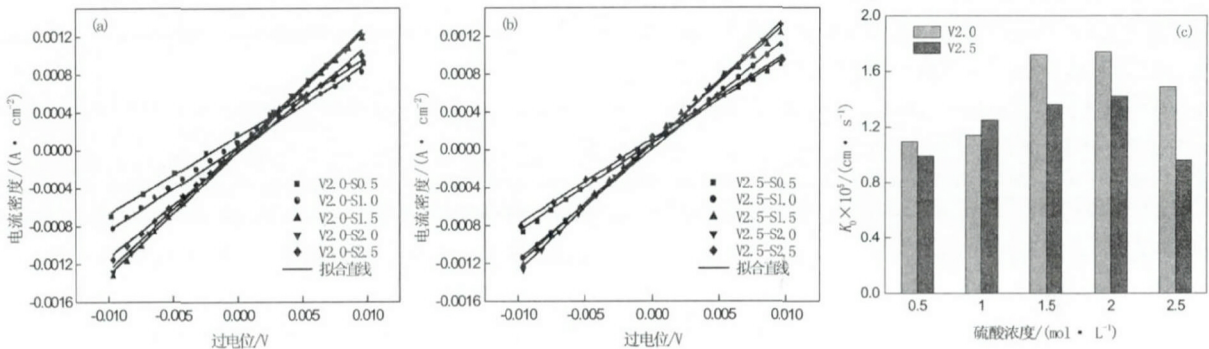
$$R_{ct} = \frac{\eta}{i} \quad j_0 = \frac{RT}{nFR_{ct}} \quad k_0 = \frac{j_0}{nFC_0} \tag{3}$$

式中 R_{ct} 为电荷转移电阻, Ω/cm^2 ; j_0 为交换电流密度, mA/cm^2 ; k_0 为电化学反应速率, cm/s ; R 为气体

常数 $J/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为开氏温度, K ; n 为电子转移数目,个; F 为法拉第常数, C/mol ; C_0 为溶液中活性物质的浓度, $\mu\text{mol}/\text{L}$ 。

表 1 不同钒离子浓度和硫酸浓度条件下电解液的扩散系数
Table 1 The diffusion coefficients of negative electrolyte at different vanadium concentrations and sulfuric acid concentrations

编号	$C_V/(\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$	$C_{\text{H}_2\text{SO}_4}/(\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$	$D_0 \times 10^7/(\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
1	2.0	0.5	0.86~1.39
2	2.0	1.0	1.22~1.97
3	2.0	1.5	1.33~2.15
4	2.0	2.0	1.39~2.25
5	2.0	2.5	0.94~1.53
6	2.5	0.5	1.07~1.73
7	2.5	1.0	1.12~1.81
8	2.5	1.5	1.15~1.85
9	2.5	2.0	0.91~1.47
10	2.5	2.5	0.72~1.16



(a) $C(V) = 2.0 \text{ mol/L}$; (b) $C(V) = 2.5 \text{ mol/L}$; (c) 电化学反应速率 K_0

图 7 稳态极化曲线

Fig.7 Steady polarization curves for solutions with different vanadium concentrations and sulfuric acid concentrations at a scan rate of 1 mV/s

相应的电化学反应动力学参数如表 2 所示,随着硫酸浓度的增加,电解液的电荷转移电阻均先降

低后增加,相应的交换电流密度和电化学反应速率常数先增加后降低。

表 2 不同钒离子浓度和酸度电解液的电化学动力学参数
Table 2 Electrochemical kinetics parameters of negative electrolyte with different vanadium concentrations and sulfuric acid concentrations

编号	钒离子浓度/ $(\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$	硫酸浓度/ $(\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$	$R_{ct}/(\Omega \cdot \text{cm}^{-2})$	$j_0/(\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2})$	$K_0 \times 10^5/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$
1	2.0	0.5	12.17	2.11	1.09
2	2.0	1.0	11.67	2.20	1.14
3	2.0	1.5	7.73	3.33	1.72
4	2.0	2.0	7.64	3.36	1.74
5	2.0	2.5	8.93	2.88	1.49
6	2.5	0.5	10.81	2.38	0.99
7	2.5	1.0	8.51	3.02	1.25
8	2.5	1.5	7.81	3.29	1.36
9	2.5	2.0	7.49	3.43	1.42
10	2.5	2.5	11.11	2.31	0.96

钒离子浓度为 2.0 mol/L 和 2.5 mol/L 的电解液,在硫酸浓度为 2.0 mol/L 条件下,具有最高的电化学反应速率常数,分别为 1.74 cm/s 和 1.42 cm/s;在相同硫酸浓度条件下,随着钒离子浓度的升高,电解液的电化学反应速率降低,当硫酸浓度为 2.0 mol/L,钒离子浓度为 2.5 mol/L 电解液的电化学反应速率较钒离子浓度为 2.0 mol/L 的电解液降低 18.39%。这说明钒离子浓度的升高增加了电化学反应极化。

3 结论

1) 钒离子浓度和硫酸浓度影响溶液中钒离子

的聚集状态和水合半径,进而影响负极电解液的电导率和粘度。随着硫酸浓度的增加,电解液的电导率和粘度增大;提高溶液中钒离子浓度,增加电解液的粘度,但电导率降低。

2) 提高溶液中硫酸浓度可以改善电解液的电化活性性和可逆性,当硫酸浓度大于 2.0 mol/L 时,提高硫酸浓度抑制电解液的电化活性;提高钒离子浓度抑制电解液的传质和电荷传递过程。当电解液中钒离子浓度为 2.0 mol/L,硫酸浓度为 2.0 mol/L 时,电解液的电化活性性和可逆性最好,其传质速率为 $(1.39 \sim 2.25) \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$,电荷传递速率为 $1.74 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 。

参考文献

- [1] Mani Ulaganathan, Vanchiappan Aravindan, Yan Qingyu *et al.* Recent advancements in all-vanadium redox flow batteries [J]. *Advanced Materials Interfaces* 2016, 3(1): 1500309.
- [2] Ding Cong, Zhang Huamin, Li Xianfeng *et al.* Vanadium flow battery for energy storage: Prospects and challenges [J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters* 2013, 4(8): 1281–1294.
- [3] Skyllas-Kazacos M, Cao L, Kazacos M *et al.* Vanadium electrolyte studies for the vanadium redox battery—A review [J]. *Chem Sus Chem* 2016, 9(13): 1521–1543.
- [4] Pezeshki A M, Sacci R, Delnick L *et al.* Elucidating effects of cell architecture, electrode material, and solution composition on overpotentials in redox flow batteries [J]. *Electrochim. Acta* 2017, 229: 261–270.
- [5] Langner J, Bruns M, Dixon D *et al.* Surface properties and graphitization of polyacrylonitrile based fiber electrodes affecting the negative half-cell reaction in vanadium redox flow batteries [J]. *Journal of Power Sources* 2016, 321: 210–218.
- [6] Dixon D, Babu D J, Langner J *et al.* Effect of oxygen plasma treatment on the electrochemical performance of the rayon and polyacrylonitrile based carbon felt for the vanadium redox flow battery application [J]. *Journal of Power Sources* 2016, 332: 240–248.
- [7] Li Yanlong, Wang Wei. Negative electrolyte modification in the all vanadium redox flow battery [J]. *Chemical Industry and Engineering* 2016, 33(1): 66–70.
(李彦龙, 王为. 钒流电池负极电解液改性研究 [J]. *化学工业与工程* 2016, 33(1): 66–70.)
- [8] Maria Skyllas-Kazacos, Peng C. Evaluation of precipitation inhibitors for supersaturated vanadyl electrolytes for the vanadium redox battery [J]. *Electrochemical and Solid-State Letters*, 1999, 2(3): 121–122.
- [9] Liu Jianlei, Liu Suqin, He Zhangxing *et al.* Effects of organic additives with oxygen and nitrogen containing functional groups on the negative electrolyte of vanadium redox flow battery [J]. *Electrochimica Acta* 2014, 130: 314–321.
- [10] Yang Yang, Liu Na, Wei Yanhong *et al.* Research progress of all-vanadium redox flow battery electrolyte [J]. *Chinese Journal of Power Sources* 2019, 43(4): 706–709.
(杨洋, 刘纳, 韦延宏, 等. 全钒液流电池电解液研究进展 [J]. *电源技术* 2019, 43(4): 706–709.)
- [11] Asem Mousa, Maria Skyllas-Kazacos. Kinetics of VIII and VII sulfate precipitation processes in negative Half-Cell electrolyte of the vanadium redox flow battery [J]. *Journal of The Electrochemical Society* 2016, 163(1): 5023–5028.
- [12] Soowhan Kim, Vijayakumar M, Wang Wei *et al.* Chloride supporting electrolytes for all-vanadium redox flow batteries [J]. *Physical Chemistry Chemical Physics* 2011, 13: 18186–18193.
- [13] Li Liyu, Soowhan Kim, Wang Wei *et al.* A stable vanadium redox-flow battery with high energy density for large-scale energy storage [J]. *Advanced Energy Materials* 2011, 1: 394–400.
- [14] Peng Sui, Wang Nanfang, Wu Xiaojuan *et al.* Vanadium species in $\text{CH}_3\text{SO}_3\text{H}$ and H_2SO_4 mixed acid as the supporting electrolyte for vanadium redox flow battery [J]. *International Journal of Electrochemical Science* 2012, 7: 643–649.

(下转第 43 页)

性; 由于含有钼和锆, 具有与 TA10 相当的耐蚀性, 蚀耐热钛合金。
是一种在耐蚀行业同样具有潜在使用价值高性能耐

参考文献

- [1] Valentin N.Moiseyev.Titanium alloys: Russian aircraft and aerospace applications [M].Dong Baoming Zhang Sheng ,Guo Delun ,
et al(Translation) .Beijing: Aircraft Industry Press 2008.
(瓦利金 N 莫依谢耶夫.钛合金在俄罗斯飞机及航空航天上的应用 [M].董宝明,张胜,郭德伦,等,译.北京:航空工业出版社 2008.)
- [2] Huang Boyun.China material engineer canon: Nonferrous material engineer-Volume 1/2 [M].Beijing: Chemical Industry Press ,
2005: 582-583.
(黄伯云.中国材料工程大典: 有色金属材料工程 (上卷) [M].北京: 化学工业出版社 2005: 582-583.)
- [3] Wang Ting.The weldability evaluation of alloy Ti-6Al-3Nb-2Zr-0.8Mo [J].Material Development and Application 2003 ,18(6) :
35-37 42 46.
(汪汀.Ti-6Al-3Nb-2Zr-0.8Mo 合金的焊接性评价 [J].材料开发与应用 2003 ,18(6) : 35-37 42 46.)
- [4] Wen Zhigang ,Wang Weiqi ,Wang Xiaoxiang *et al*.Effects of heat treatment temperature on microstructure and mechanical proper-
ties of Ti-6Al-3Nb-2Zr-1Mo alloy plate [J].The Chinese Journal of Nonferrous Metals 2010 20 (Special 1) : 647-649.
(文志刚,王玮琪,王小翔,等.热处理温度对 Ti-6Al-3Nb-2Zr-1Mo 合金板材显微组织和性能的影响 [J].中国有色金属学
报 2010 20(专辑 1) : 647-649.)
- [5] Editorial Committee for Chemical Industry Equipment Design Encyclopedia.Titanium chemical industry equipment [M].Beijing:
Chemical Industry Press 2003.
(化工设备设计全书编辑委员会.钛制化工设备 [M].北京: 化学工业出版社 2003.)
- [6] Welding Society of Chinese Mechanical Engineer Society.Welding manual (Vol.2) [M].Beijing: China Mechine Press ,1993.
(中国机械工程学会焊接学会.焊接手册 (第 2 卷) [M].北京: 机械工业出版社 ,1993.)
- [7] Terminology and metallographs for titanium and titanium alloys [S].GB/T6611—2008.
(钛及钛合金术语和金相图谱 [S].GB/T6611—2008.)
- [8] Editorial committee for metallographs for metal materials.Metallographs for metal materials(Volume 2/2) [M].Beijing: Mechani-
cal Industry Press 2006.
(《金属材料金相图谱》编辑委员会.金属材料金相图谱 (下册) [M].北京: 机械工业出版社 2006.)

编辑 杨冬梅

(上接第 22 页)

- [15] Zhao Jianxin ,Wu Zenghua ,Xi Jingyu *et al*.Solubility rules of negative electrolyte $V_2(SO_4)_3$ of vanadium redox flow battery [J].
Journal of Inorganic Materials 2012 27(5) : 469-474.
(赵建新,武增华,席靖宇,等.钒电池负极电解液 $V_2(SO_4)_3$ 溶解性规律 [J].无机材料学报 2012 27(5) : 469-474.)
- [16] Xiao Shuibao ,Yu Lihong ,Wu Lantao *et al*.Broad temperature adaptability of vanadium redox flow battery—Part1: Electrolyte re-
search [J].Electrochimica Acta 2016 ,187: 525-534.
- [17] Sophia Suarez ,Meriam Sahin ,Yara Adam *et al*.A variable temperature study of the transport properties of aqueous solutions of
 $VOSO_4$ and NH_4VO_3 in 2 M H_2SO_4 [J].Journal of Power Sources 2015 276: 153-161.
- [18] Shinkle A A ,Pomaville T J ,Sleightholme A E S *et al*.Solvents and supporting electrolytes for vanadium acetylacetonate flow
batteries [J].Journal of Power Sources 2014 248: 1299-1305.

编辑 杨冬梅