

文章编号: 1671-6612 (2025) 03-381-07

全钒液流电池电解液制备技术研究进展

严腾飞¹ 曾义凯¹ 许 刚²

(1. 西南交通大学机械工程学院 成都 610031;

2. 四川化工集团有限责任公司成都工程分公司 成都 610041)

【摘 要】 针对钒电解液制备的难题, 评述了其还原、电解、萃取及离子交换等方法的研究进展。还原法制备电解液时, 其优点是易于实现规模化生产, 但还原剂易引入杂质, 影响电解液储能性能, 且生产成本较高。电解法制备电解液时, 可以有效地控制杂质元素的引入, 去除原料中部分重金属离子, 同时精确控制钒离子的价态。但能耗较高, 设备要求也较为严格。采用萃取法时, 高效低能耗、工艺简单, 但萃取过程中存在的乳化等问题亟待解决。离子交换法操作简便、选择性强, 但离子交换树脂的再生和处理较为复杂。总结了近年来钒电解液的制备方法, 概述其原理、进展及优缺点, 给相关课题的学者提供简要参考。

【关键词】 钒电解液; 还原; 电解; 萃取; 离子交换

中图分类号 TK124 文献标志码 A

Research Progress on Electrolyte Preparation Technologies for All-Vanadium Redox Flow Battery

Yan Tengfei¹ Zeng Yikai¹ Xu Gang²

(1. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031;

2. Sichuan Chemical Industry Group Co., Ltd, Chengdu Engineering Branch, Chengdu, 610041)

【Abstract】 Addressing the challenges in the preparation of vanadium electrolyte, this paper reviews the research progress of methods, such as reduction, electrolysis, extraction and ion exchange methods. When preparing electrolyte through the reduction method, it boasts advantages in easy realization of large-scale production, but the reductant tends to introduce impurities, which affects the energy storage performance of electrolyte, and the production cost is relatively high. During the preparation of electrolyte by electrolysis method, the introduction of impurity elements can be effectively controlled, and some heavy metal ions in raw materials can be removed, while the valence state of vanadium ions can be precisely controlled. However, the energy consumption is high and the equipment requirements are strict. When the extraction method is adopted, it has high efficiency, low energy consumption and simple process. However, problems such as emulsification in the extraction process need to be resolved. The ion exchange method is easy to operate and highly selective, but the regeneration and treatment of ion exchange resins are complicated. This paper summarizes the preparation methods of vanadium electrolyte in recent years, outlining their principles, progress, advantages and disadvantages, providing a brief reference for scholars working on related topics.

【Keywords】 Vanadium electrolyte; Reduction; Electrolysis method; Extraction; Ion exchange

0 引言

随着“双碳”目标的全面推进, 在全社会低碳

转型的大背景下, 以可再生能源为主体的新型电力系统成为关注焦点, 风电、光伏作为绿色能源的代

作者简介: 严腾飞 (1997-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: 18811171355@163.com

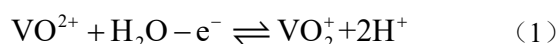
通讯作者: 曾义凯 (1990-), 男, 博士, 副研究员, E-mail: ykzeng@swjtu.edu.cn

收稿日期: 2024-11-11

表,更是备受瞩目。然而风电和光伏都存在着间歇性、随机性等问题,很难对其进行人为控制,而采用大规模储能技术可有效解决上述问题,实现电力连续、稳定的输出,保证电网安全^[1]。根据不同应用场景的需要,研究人员开发了多种形式的储能技术。其中全钒液流电池(以下简称钒电池)具有长循环寿命、无交叉污染、响应快、可深度放电以及灵活的选址设计等优点,是最适合于大规模储能的技术方案之一^[2-5],在大规模储能领域的应用前景广阔。如图1所示,钒电池主要由端板、集流板、石墨板、多孔电极、质子交换膜、电解液及储罐、泵回路系统等部分组成。其工作原理示意图如图2所示:以多孔的碳毡或石墨毡作为电极,其具有良好的导电性和较大的比表面积,能够为电化学反应提供充足的反应场所。在两极之间放置一张隔离膜,该膜具有选择性透过性,只允许氢离子等特定

离子通过,防止正负极电解液中的钒离子相互混合,保证电池的正常工作。通过泵和管道把电解液和电极进行连接,使电解液能够在电极表面流动。钒电池电解液储能实质是将正负极电解液中的 VO^{2+} 、 V^{3+} 电解为 VO_2^+ 、 V^{2+} ,而释能过程则正好相反,电极表面进行的主要化学反应如式(1)~(3)所示:

正极反应方程式:



负极反应方程式:



总反应方程式:

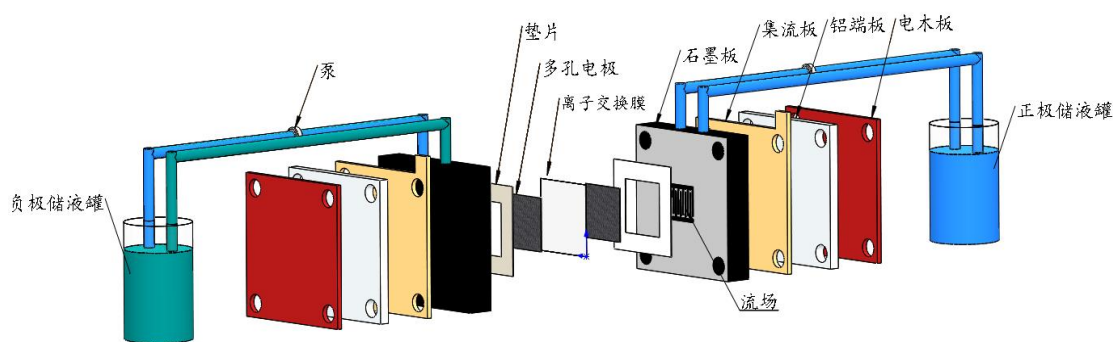
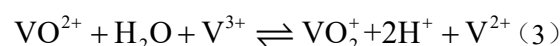


图1 全钒液流电池结构示意图^[6]

Fig.1 Structural diagram of all-vanadium redox flow battery^[6]

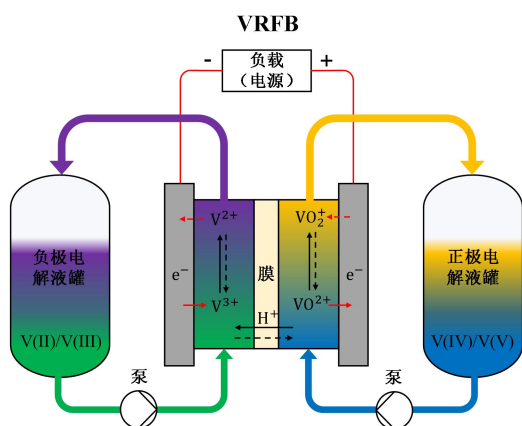


图2 全钒液流电池工作原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of the working principle of all-vanadium redox flow battery

其中,钒电解液是钒电池中的核心材料,其直

接影响电池的能量密度和电化学性能,同时,电解液成本占钒电池总成本的40%^[7],因此高效低成本的制备工艺对钒电池发展至关重要。传统钒电解液制备工艺主要以高纯度硫酸氧钒(VOSO_4)为原料,通过其在硫酸介质中的直接溶解来实现。然而,该制备方法成本高昂,工艺经济性差^[8],因此研究者们致力于开发替代性制备路线。本文总结分析了近年来多种创新性制备技术,包括化学还原法、电解法、溶剂萃取法以及离子交换法等工艺,通过对比分析各类方法的反应机理、技术路线及产业化可行性,旨在为钒电解液制备新技术的开发提供重要参考。

1 钒电解液制备要求

钒电解液的国家标准(GB/T 37204-2018)规

定了三种不同价态钒离子的最低浓度, 如表 1 所示, 同时规定了电解液中杂质元素含量, 如表 2 所示。杂质离子对电解液的电化学性能、离子传输性能和稳定性等方面具有显著影响, 因此在电解液制备过程中, 不仅要保证钒离子浓度达到标准, 同时杂质离子的浓度不大于国标要求。

表 1 产品中钒含量、硫酸根含量、不同价态钒离子比例表^[9]

Table 1 Table of vanadium content, sulfate content and proportion of vanadium ions in different valence states in the product^[9]

产品品种	成分	允许偏差
3 价电解液	V	≥1.50mol/L
	SO ₄ ²⁻	≥2.30mol/L
	V ³⁺ :V	≥0.95
3.5 价电解液	V	≥1.50mol/L
	SO ₄ ²⁻	≥2.30mol/L
	V ³⁺ :VO ²⁺	1.0
4 价电解液	V	≥1.50mol/L
	SO ₄ ²⁻	≥2.30mol/L
	VO ²⁺ :V	0.95

表 2 产品中杂质元素含量表^[9]

Table 2 Content table of impurity elements in products^[9]

杂质元素	一级品不大于	二级品不大于
Al	50	80
As	1	1
Au	1	1
Ca	30	70
Cl	100	—
Cr	15	30
Cu	1	5
Fe	50	200
K	100	200
Mg	30	50
Mn	5	30
Mo	20	30
NH ₄ ⁺	20	50
Na	80	200
Ni	20	60
Pd	1	1
Pt	1	1
Si	10	—

2 电解液的制备现状

2.1 还原法制备电解液

在还原法制备钒电解液工艺中, 通常以五氧化二钒 (V₂O₅) 或偏钒酸铵 (NH₄VO₃) 为原料。由于两者在硫酸溶液中的溶解性较差, 需通过添加还原剂 (如草酸、乙醇、酒石酸、甲酸、乙酸等无机试剂, 或 H₂S、SO₂、H₂、CO 等无机气体) 并辅以加热处理^[10,11], 利用氧化还原反应实现钒离子的溶解与电解液制备。此外, 实验研究中亦可采用过氧化氢、三氧化二钒 (V₂O₃) 等作为还原剂, 反应方程式如表 3 所示, 该方法的工艺流程如图 3 所示。

表 3 化学还原法典型还原剂及反应^[7]

Table 3 Typical reducing agents and reactions of chemical reduction methods^[7]

还原剂	产物	反应过程	杂质离子
SO ₂	V(IV)	SO ₂ +V ₂ O ₅ =2VO ₂ +SO ₃	无
草酸	V(IV)	V ₂ O ₅ +3H ₂ C ₂ O ₄ =2VOC ₂ O ₄ +2CO ₂ ↑+3H ₂ O	C ₂ O ₄ ²⁻
V ₂ O ₃	V(IV)	V ₂ O ₅ +2V ₂ O ₃ +4H ₂ SO ₄ =4VOSO ₄ +4H ₂ O	无
CO	V(III)	V ₂ O ₅ +2CO=V ₂ O ₃ +2CO ₂	无
H ₂	V(III)	V ₂ O ₅ +2H ₂ =V ₂ O ₃ +2H ₂ O	无

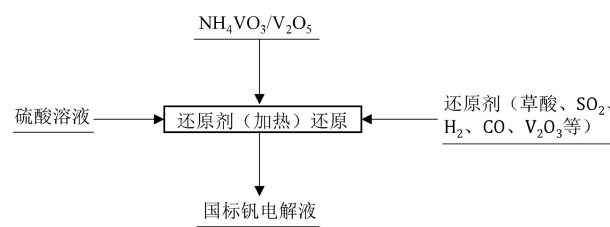


图 3 钒电解液还原法制备工艺流程

Fig.3 The process flow of vanadium electrolyte reduction method for preparation

高崇^[12]等人以偏钒酸铵为原料, 采用 H₂ 焙烧还原制备得到 V₂O₃, 然后控制 V₂O₃ 与 V₂O₅ 摩尔比为 3:1, 按比例加入浓硫酸和纯水, 反应得到钒浓度为 1.68mol/L, 硫酸根浓度为 4.6mol/L 的钒电解液并满足杂质离子浓度要求。

王远望^[13]以高纯 V₂O₅ 为原料, SO₂ 为还原剂, 制备钒电池用 VOSO₄ 溶液, 具有良好的充放电性能, 可以作为钒电池电解液的活性材料。毛凤娇^[14]等人用 V₂O₃ 在硫酸溶液中还原 V₂O₅, 制备出

1.65mol/L 的硫酸氧钒溶液。杨亚东^[15]等以多种还原剂分别还原 V_2O_5 制备电解液。结果表明, 草酸还原制备的电解液具有较高的转化率与还原率及较好的电化学性能。电化学分析结果表明, 用草酸制备的电解液能有效抑制副反应的发生, 同时能促进电极反应的传质过程和传荷过程。

还原法作为目前行业生产电解液的主要工艺, 具有大规模、高效等优点, 但还原剂易引入杂质, 影响电解液储能性能, 且高纯 V_2O_5 导致生产成本较高, 这也是当前钒电解液价格居高不下的主要原因。

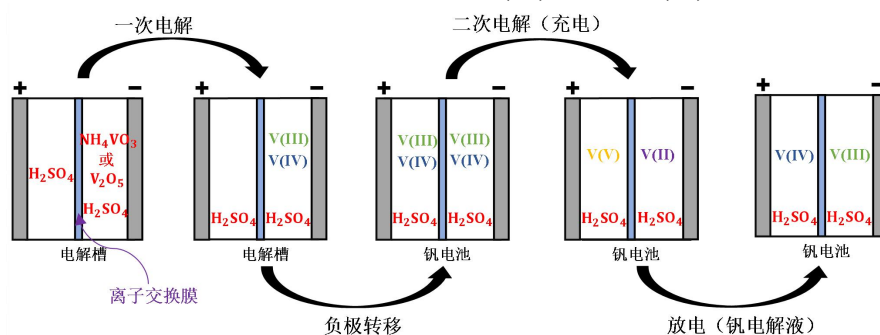


图4 钒电解液电解法制备流程

Fig.4 The process of preparing vanadium electrolyte by electrolysis

Johnson^[17]等人在带隔膜的电解池正极加入 H_2SO_4 , 负极加入含 NH_4VO_3 的同浓度 H_2SO_4 , 通过电解制备得到高性能的钒电解液。

刘然^[18]等人采用 V_2O_5 代替 $VOSO_4$ 制备钒电池电解液。将高纯度 V_2O_5 同分析纯浓 H_2SO_4 按照比例混合, 将悬浊液稀释后作为阴极电解液, 取同浓度硫酸溶液作为正极电解液, 以 $RuIr/Ti$ 为阳极, 多孔铅板为阴极, 在 $40mA/cm^2$ 电流密度下恒流电解, 制得的电解液具有很好的循环性能和较高的能量效率, 完全可以满足全钒液流电池的工作需求。

毛凤娇^[19]等人将五氧化二钒直接溶解在浓硫酸中, 后将混合物加入到去离子水中进行溶解并过滤, 得到含有五价钒离子和硫酸的溶液, 以上述溶液为负极电解质, 以硫酸溶液作为正极电解质, 进行除杂恒流电解, 然后进行恒压电解, 得到硫酸氧钒溶液, 通过蒸发结晶制备 $VOSO_4$ 晶体。将得到的硫酸氧钒晶体制成电解液, 满足钒电解液要求。

电解法制备电解液时, 可以有效地控制杂质元素的引入, 去除原料中部分重金属离子, 同时精确控制钒离子的价态。但生产效率低下、能耗较高, 设备要求也较为严格, 无法满足产业生产需求。

因。

2.2 电解法制备电解液

Michael^[16]等人提出利用电解法还原制备钒电解液, 工艺流程如图4所示, 在电解槽中, 以 V_2O_5 或 NH_4VO_3 与硫酸的悬浊液为负极反应溶液, 硫酸为正极反应溶液, 通入直流电, 使钒离子在电极表面发生氧化还原反应, 然后将负极电解得到的 3.5 价钒电解液转移至钒电堆组成钒电池。对钒电池先恒流充电后放电, 直至在正负半电池中分别产生 $V(IV)$ 溶液和 $V(III)$ 溶液, 即制得所需钒电解液。

2.3 萃取法制备电解液

有科研人员提出利用含钒溶液短流程制备钒电解液的研究思路^[20], 该溶液中钒浓度较低, 且含有较多的金属杂质如铁、锰、铝、铜、钙、钾等, 非金属杂质如硅等, 可向含钒溶液中加入特定的萃取剂, 使钒离子选择性地转移至萃取相中, 再经过反萃取等操作, 将钒离子转移至反萃取液中, 进一步处理后得到钒电解液。

用于分离和富集钒的萃取剂种类有很多, 包含碱性胺类萃取剂中的伯、仲、叔胺和季胺等; 中性萃取剂中的磷酸三丁酯; 酸性磷类萃取剂则以二(2-乙基己基)磷酸(简称 P204)^[21,22]、2-乙基己基磷酸单 2-乙基己基酯(简称 P507)^[23,24]和 Cyanex212^[25]为代表。萃取剂对钒离子的选择性因类型而异: 胺类仅在碱性条件下对 $V(V)$ 有效; 中性类适用于盐酸体系, 兼具助萃和分相功能; 酸性磷类则对 $V(IV)$ 和 $V(V)$ 均有效, 且在酸性条件下对 $V(IV)$ 选择性更强^[26]。以上三种萃取剂均适用于生产合金级的钒产品, 但胺类萃取剂和中性萃取剂无法满足在硫酸水溶液中直接生产钒电解液要求, 只有在酸性环境下, 利用 P204、P507 等酸性萃取剂才可通过酸化-还原-萃取-反萃等流程直接制备电

解液, 其工艺流程如图 5 所示。

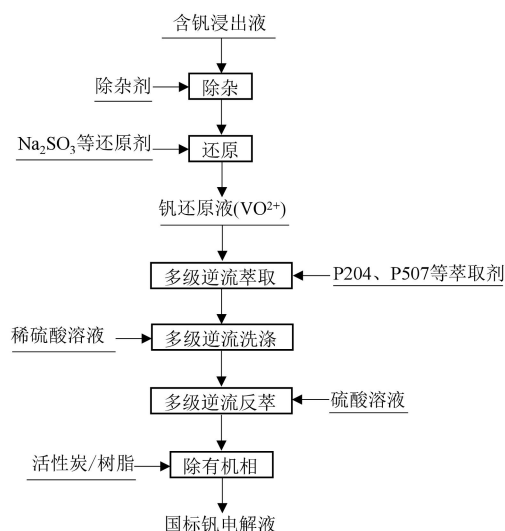


图 5 P204/P507 制备钒电解液工艺流程

Fig.5 Process flow for vanadium electrolyte preparation using P204/P507

Liu^[27]以钒渣钙化焙烧酸浸沉钒废水为研究对象, P204 为萃取剂, 反萃剂为 H_2SO_4 , 经过两段萃取短流程制备钒电解液。最终得到浓度为 76.52g/L 的钒电解液, 且杂质离子均符合国标要求。

Li^[28,29]以含钒氯化物溶液为原料, P507 为萃取剂, 硫酸为反萃剂, 一次萃取-反萃分离钒+五次硫酸盐溶液萃取-反萃分离钒、铁、铝, 最终得到高纯硫酸氧钒溶液, 其含钒 76.5g/L , 杂质总含量小于 50mg/L 。

Liu^[30]等人以钒页岩钠化焙烧水浸液为原料, D2EHPA (P204) 为萃取剂, 4mol/L 的 H_2SO_4 为

反萃剂, 通过四级逆流萃取和三级逆流反萃取, 在碱性高氯溶液体系中制备了 1.77mol/L 的 VOSO_4 钒电解液。溶液化学和 FTIR 分析表明, 氯离子可与进料溶液中的钒离子形成复合物, 促进钒的萃取。循环伏安法、电化学阻抗谱和充放电测试表明, 所制备电解质的氧化还原峰电流密度、溶液电阻和充放电容量均优于标准电解质。

胡幼文^[31]采用酸性页岩富钒液作为原料, 选用“皂化 P204+磺化煤油”作为萃取体系。通过五级逆流萃取和四级逆流反萃 (使用 4mol/L 硫酸), 实现了钒与杂质的有效分离以及钒浓度的富集。最终制备出 2.0mol/L 的硫酸氧钒电解液, 可直接用作钒电解液。

溶剂萃取法因其对钒具有较高的选择性, 能够有效分离和富集钒离子, 得到高纯度的电解液。该工艺可处理低品位的含钒原料, 提高资源利用率, 同时操作条件相对温和, 对设备的腐蚀性较小。但萃取剂价格较高, 增加了生产成本; 萃取和反萃取过程中会产生一定量的有机相废弃物, 需要进行妥善处理, 以避免对环境造成污染。

2.4 离子交换法制备电解液

离子交换法是指采用离子交换树脂作为分离介质, 让溶液中的钒离子在离子交换树脂上发生吸附反应, 由于吸附反应的作用, 钒离子被吸附在了离子交换柱上, 于是实现了钒元素和杂质金属元素的分类; 再经过脱吸附操作, 使钒进入洗脱液中, 从而可很好地从水溶液中选择性地提取钒并获得钒电解液^[32,33]。

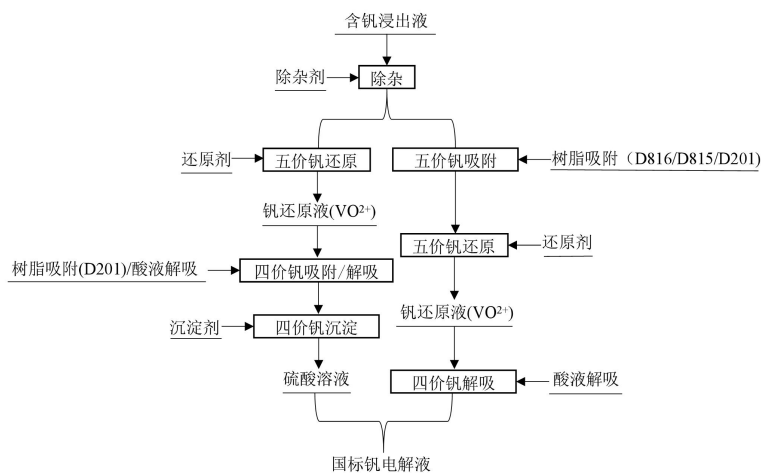


图 6 钒电解液的离子交换制备工艺流程

Fig.6 Process flow for ion exchange preparation of vanadium electrolyte

徐从美^[34]等人调节经过除杂的含可溶性钒酸盐的溶液的 pH，然后经离子交换树脂吸附和碱液解吸附后得到五价钒解吸液，再加入沉钒剂进行沉钒反应，静置，得到钒酸铵沉淀，进行煅烧和还原得到高纯度高浓度钒电池电解液。白云龙^[35]等人用硫酸转型后的阴离子交换树脂吸附富集传统钒渣提钒或石煤提钒过程中浸出液中的五价钒后，直接用还原剂还原解吸五价钒，得到钒电池电解液，上述两种制备方法工艺流程如图 6 所示。

以上方法适用于低浓度钒溶液，该方法工艺流

程短、操作简便、选择性强，但缺点是离子交换树脂的再生和处理较为复杂且吸附能力有限，反应过程慢，生产效率低下，整个反应流程会产生大量废水，增加对应的处理成本，故对于工业应用，仍需要更全面的研究。

3 不同制备工艺对比

还原法、电解法、萃取法和离子交换法各有优劣，其所需原料的种类与优缺点如表 4 所示。

表 4 四种制备电解液方法对比

Table 4 Comparison of four methods for preparing electrolyte

制备方法	所需原料	优点	缺点
还原法	V ₂ O ₅ /NH ₄ VO ₃ 还原剂：草酸、SO ₂ 、过氧化氢、V ₂ O ₃ 等	易实现规模化生产、生产效率较高、还原剂种类多	反应速度慢、生产成本较高
电解法	V ₂ O ₅ /NH ₄ VO ₃	有效控制杂质元素引入、去除部分重金属离子	生产效率低下、耗能巨大、生产成本高
萃取法	P204/P507/Cyanex212、含钒浸出液	单级萃取率高、循环成本低廉、对钒的富集程度高、除杂彻底、操作便捷	选择性差、易乳化、萃取剂损失严重
离子交换法	离子交换树脂、含钒浸出液	工艺流程短、原材料使用量小、钒的回收率高	吸附能力有限、产生大量废水

4 结语与展望

(1) 钒电解液制备方法主要包括还原、电解、萃取及离子交换等方法。综合上述四种制备方法结合制备难度及工艺经济性，目前主流制备钒电解液主要以草酸等有机物还原高纯度 V₂O₅ 为主，操作简单，易于控制。但高纯度 V₂O₅ 价格高昂，导致电解液生产成本低，目前 2.2 万元/立方米的钒电解液市场价格也导致钒电池在市场上推广开来存在较大难度。

(2) 电解法工艺简单，但其生产效率低下、耗能巨大、对设备要求高，且高纯度 V₂O₅ 价格高昂，被企业生产较少考虑；关于离子交换法的相关研究较少，该方法虽然工艺简单，但存在树脂的吸附能力有限，离子交换树脂的再生和处理较为复杂，且反应过程慢，生产效率低下，整个反应流程会产生大量废水，增加对应的处理成本。总体而言，工艺经济性差，推广开来存在较大难度。

(3) 溶剂萃取法是未来最具有潜力的电解液制备方法。通过优化萃取流程可实现钒元素与其他

杂质元素的高效分离，开发新的萃取剂可进一步提升钒离子单级萃取率，具有短流程制备钒电解液潜力的特性。其原料成本低、萃取剂获取容易，但在溶剂分离工艺中，乳状液的形成往往引发两相界面处分相困难，致使相分离效率显著降低且有机相回收困难，且该方法对含钒溶液的组分稳定性要求很高，原料组分构成变化大且工艺未及时调整时，电解液浓度及杂质含量也会随之波动。

未来钒电解液制备将趋向原料多元化和流程集约化，以钒矿浸出液为原料，通过优化分离介质构建短流程绿色生产工艺。这种工艺将实现资源高效利用、能耗显著降低和环境友好性提升的协同优化。随着能源结构转型加速，全钒液流电池将在可再生能源储能领域发挥关键作用，推动储能产业向高效、安全、可持续方向发展，为构建清洁低碳能源体系提供重要支撑。

参考文献：

[1] 陈晖.液流电池储能模块的设计和优化[D].合肥:中国

- 科学技术大学,2019.
- [2] 丁木清.杂质离子对钒电池电解液性能影响机理及调控机制研究[D].武汉:武汉科技大学,2021.
- [3] Chen B, Bao S, Zhang Y. Synergetic strengthening mechanism of ultrasound combined with calcium fluoride towards vanadium extraction from low-grade vanadium-bearing shale[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2021,31(6):1095-1106.
- [4] Bhattacharjee, Ankur Saha, Hiranmay. Development of an efficient thermal management system for Vanadium Redox Flow Battery under different charge-discharge conditions[J]. *Applied Energy*, 2018,230:1182-1192.
- [5] Huang Z B, Mu A L, Wu L X, et al. Electrolyte flow optimization and performance metrics analysis of vanadium redox flow battery for large-scale stationary energy storage[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2021,46(63):31952-31962.
- [6] Zhou X L, Zhao T S, An L, et al. A vanadium redox flow battery model incorporating the effect of ion concentrations on ion mobility[J]. *Applied Energy*, 2015,158:157-166.
- [7] 王程,王少娜,祁健,等.3.5 价全钒液流电池用电解液研究现状与展望[J].*河北冶金*,2024(9vo):8-13,21.
- [8] Ding M Q, Liu T, Zhang Y M, et al. Physicochemical and Electrochemical Characterization of Vanadium Electrolyte Prepared with Different Grades of V_2O_5 Raw Materials[J]. *Energies*, 2021,14.
- [9] GB/T 37204-2018,全钒液流电池用电解液[S].北京:中国标准出版社,2018.
- [10] Skyllas-Kazacos M, Cao L, Kazacos M. Vanadium Electrolyte Studies for the Vanadium Redox Battery-a Review[J]. *Chemistry and Sustainable Chemistry*, 2016,9(13):1521-1543.
- [11] El Hage R, Chauvet F, Biscans B, et al. Kinetic study of the dissolution of vanadyl sulfate and vanadium pentoxide in sulfuric acid aqueous solution[J]. *Chemical Engineering Science*, 2019,199:123-136.
- [12] 高崇,白连强,孙珂娜,等.氢气焙烧还原制备全钒液流电池用 V_2O_3 [J].*有色金属(冶炼部分)*,2024(7):124-132.
- [13] 王远望,官清.高纯 V_2O_5 制备钒电池用 $VOSO_4$ 的工艺研究[J].*广东化工*,2014,41(23):62-63.
- [14] 毛凤娇.钒电池用硫酸氧钒的制备研究[J].*四川化工*,2015,18(1):1-4.
- [15] 杨亚东,张一敏,黄晶,等.化学还原法制备钒电池电解液中还原剂选择及性能[J].*化工进展*,2017,36(1):274-281.
- [16] Michael K, Skyllas K M. High energy density vanadium electrolyte solutions, methods of preparation thereof and all-vanadium redox cells and batteries containing high energy vanadium electrolyte solutions: CA2220075A1[P]. 1996-11-07.
- [17] Johnson D A, Reid M A. Chemical and Electrochemical Behavior of the Cr(III)/Cr(II) Half-Cell in the Iron-Chromium Redox Energy Storage System[J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 1985,132(5):1058-1062.
- [18] 刘然,潘建欣,谢晓峰,等.五氧化二钒电解制备全钒液流电池 V^{3+} 电解液[J].*高校化学工程学报*,2014,28(6):1275-1280.
- [19] 毛凤娇,孙朝晖,李道玉,等.高纯硫酸氧钒的制备方法及其电解液和钒电池:CN103466704A[P].2013-12-25.
- [20] 杨莉花.基于溶剂萃取法制备钒电池用高纯硫酸氧钒与机理研究[D].广州:广东工业大学,2022.
- [21] Xingbin L, Zhigan D, Chang W, et al. Solvent extraction of vanadium from a stone coal acidic leach solution using D2EHPA/TBP: continuous testing[J]. *Hydrometallurgy*, 2015,154:40-46.
- [22] CHEN De-sheng, ZHAO Hong-xin, HU Guo-ping. An extraction process to recover vanadium from low-grade vanadium-bearing titanomagnetite[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015,294:35-40.
- [23] NGUYEN T H, LEE M S. Solvent extraction of vanadium(V) from sulfate solutions using LIX 63 and PC 88A[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2015,31:118-123.
- [24] Li X, Wei C, Wu J, et al. Co-extraction and selective stripping of vanadium (IV) and molybdenum (VI) from sulphuric acid solution using 2-ethylhexyl phosphonic acid mono-2-ethylhexyl ester[J]. *Separation and Purification Technology*, 2012,86:64-69.
- [25] Tavakoli M R, Dreisinger D B. Separation of vanadium from iron by solvent extraction using acidic and neutral organophosphorus extractants[J]. *Hydrometallurgy*, 2014:17-23.