全钒液流电池电堆技术研究现状与趋势展望

文汉伟,叶国华*,洪家兴,王钧树,杨曦锐,敖鸿鹏
(昆明理工大学国土资源工程学院,云南 昆明 650093)

摘要:系统综述了电极与离子交换膜的技术研究进展。电极方面,重点探讨了碳基材料的含氧基团活化、杂原子掺杂、金属及其氧化物修饰和纳米碳材料修饰策略,以提升电化学活性和反应动力学。离子交换膜方面,围绕Nafion膜的改性及非氟型阳离子交换膜、阴离子交换膜、两性离子交换膜和微孔膜新体系,分析了其在离子选择性与传导率方面的优化路径。最后展望了材料-结构协同设计的发展方向,以推动全钒液流电池的规模化储能应用。

关键词:全钒液流电池;电堆;电极;离子交换膜;材料改性
中图分类号:TQ425.36;TM912 **文献标志码**:A **文章编号**:0253-4320(2026)11-0036-06
DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.11.007

Research status and trend prospects of all-vanadium redox flow battery stack technology

WEN Han-wei, *YE Guo-hua**, *HONG Jia-xing*, *WANG Jun-shu*, *YANG Xi-rui*, *AO Hong-peng*
(Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: The research progress of electrode and ion exchange membrane technology was systematically reviewed. In the aspect of electrode, the strategies of oxygen-containing group activation, heteroatom doping, metal and its oxide modification and nano-carbon material modification of carbon-based materials were mainly discussed to improve the electrochemical activity and reaction kinetics. In the aspect of ion exchange membrane, the optimization path of ion selectivity and conductivity was analyzed around the modification of Nafion membrane and the new systems of non-fluorinated cation exchange membrane, anion exchange membrane, zwitterionic exchange membrane and microporous membrane. Finally, the development direction of material-structure collaborative design is prospected to promote the large-scale energy storage application of all-vanadium redox flow battery.

Key words: all-vanadium redox flow battery; stack; electrode; ion exchange membrane; material modification

在全球能源结构加速向低碳化、清洁化转型的背景下,高效、稳定地储存具有间歇性与波动性的可再生能源成为了重要的研究课题。在众多储能技术中,液流电池因具有容量和功率灵活可调、循环寿命长、可深度放电、安全性高等优势,被普遍认为是大规模储能应用的理想选择[1-2]。

全钒液流电池(VRFB,简称钒电池)作为液流电池体系中商业化程度最高、技术最为成熟的一种,采用同一元素钒的不同价态作为正负极活性物质,从根本上避免了不同金属离子交叉污染导致的不可逆容量衰减问题,在安全性、可维护性和寿命方面具有显著优势[3]。经过近30年的持续发展,钒电池已在电网调峰、可再生能源并网以及应急能源等领域展现出良好的应用前景[2-4]。然而,受限于系统成本偏高、能量效率和功率密度仍有提升空间,钒电池的大规模推广仍面临诸多技术瓶颈,其中电堆作为连接单体电池与系统集成的核心部件,其性能影响着电池系统的效率、寿命和经济效益[2]。

电堆中的电极和离子交换膜是影响电化学反应动力学和离子传输行为的关键功能部件,其材料特性和结构设计在很大程度上决定了电堆的综合性能[2,5]。因此,系统梳理电极与离子交换膜的研究进展,对明确当前技术瓶颈、指导材料与结构优化方向、推动钒电池规模化应用具有重要意义。

1 钒电池电堆

电堆是决定钒电池功率的核心部分,可通过调

收稿日期:2026-02-06;**修回日期**:2026-09-08
基金项目:国家自然科学基金项目(52464029,51964028)
作者简介:文汉伟(2001-),男,硕士生;叶国华(1981-),男,博士,教授,研究方向为钒资源全产业链利用技术,通讯联系人,ghye581@kust.edu.cn。

整电堆尺寸及连接数量灵活调控钒电池的功率,这一特性扩宽了钒电池的应用范围[2]。电堆是由若干单电池按照一定方式串并联组成的功能模块,基本作用是在保证电解液稳定流动和离子高效传输的前提下,实现多单体电池的高效集成与能量输出。典型的单体钒电池由正负极电极、离子交换膜和双极板等构成,组成如图 1 所示,正极发生 VO^{2+}/VO_2^+ 电对的氧化还原反应,负极为 V^{2+}/V^{3+} 氧化还原反应,电堆通过双极板的流道结构将电解液均匀分配至各反应区域[5]。

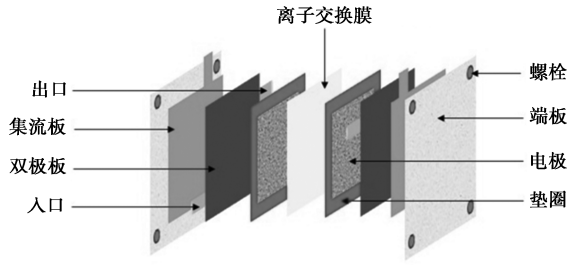


图 1　钒电池电堆组件

电堆的设计需综合考虑电化学性能、流体力学特性和机械稳定性等多重因素,其中任何一个关键部件性能不足,都会在高倍率运行或长周期循环过程中被放大,从而影响系统整体的可靠性。当前电堆普遍面临的问题包括功率密度偏低、能量效率受限、内部阻抗较大以及长期运行中性能衰减明显等,而这些问题很大程度上与电极反应活性不足和离子交换膜选择性有限密切相关。一方面,电极作为钒离子氧化还原反应的发生场所,其比表面积、表面化学性质和孔结构直接影响反应动力学和活性物质利用率;另一方面,离子交换膜不仅决定了离子的传输效率,还控制着钒离子的交叉扩散行为,对电池库伦效率(CE)、能量效率(EE)和容量保持率具有显著影响[5]。因此,围绕电极与离子交换膜开展材料改性和结构优化研究,是提升钒电池电堆性能的核心技术路径之一。

2　电极

电极是钒电池电堆中最直接参与电化学反应的部件,目前商业化和实验室研究中最常用的电极材料以碳基材料为主,主要包括碳毡和石墨毡等。这类材料具有良好的导电性、较高的化学稳定性以及在强酸电解液环境中的耐腐蚀性,同时其三维多孔结构有利于电解液渗透和反应界面扩展。然而,原始电极普遍存在表面惰性强、反应活性位点数量有限以及对与电解液反应动力学适配性不足等问题,导致在高电流密度条件下极化严重、EE 下降。针对上述问题,研究者从微观结构调控和表面化学改性 2 个层面开展了大量工作。碳基电极改性策略的主要方向有含氧基团活化、杂原子掺杂、金属及其氧化物修饰、纳米碳材料修饰等[6]。

2.1　含氧基团活化

含氧基团活化是最典型的碳基电极改性策略之一,通过在电极表面引入或增加含氧官能团(如羧基、羟基、羰基等),改善电极的电化学性能、亲水性和表面活性。常用的含氧基团活化方法包括热处理、酸处理、电化学氧化等。其中,热处理工艺简单、易于规模化实施,通过调控处理温度和时间可在一定范围内实现官能团含量与电极导电性之间的平衡;化学氧化和电化学处理则能够更精准地调控表面官能团的类型和密度,但过度氧化可能导致碳骨架结构受损,增加电极电阻,因此需要对处理条件进行严格优化。

Mukhopadhyay 等[7]研究了室温电化学剥离法对石墨毡电极进行表面改性,在硫酸铵水溶液中对石墨毡进行电化学剥离,通过阴离子嵌入使石墨层膨胀,增加了电极表面积,并引入足够的含氧官能团,得到亲水性与传质能力强、反应位点丰富的核壳结构,改性后电极的氧含量由 3.66%增至 25.48%,主要以羟基和羰基形式存在,在电池测试中,优化后的剥离石墨毡电极在 100 mA/cm^2 电流密度下,电压效率(VE)和 EE 分别达 89.72%和 86.41%,且连续循环 100 次后,电极表现出稳定的 CE(约 96%),平均每循环容量衰减率仅为 0.23%。王泓等[6]研究确认了低温长时处理能可控增加碳纤维缺陷程度,从而能够在碳毡表面引入适量的含氧基团,发现在 450℃条件下处理 6 h 的碳毡电极对钒电池中的电化学反应具有最佳活化效果。

2.2　杂原子掺杂

杂原子掺杂是通过在碳材料中引入非碳元素(如氮、氧、硫、磷、硼等),以调节电子结构、表面化学性质和电化学性能的方法。杂原子的存在能够改善碳毡电极的局部电荷密度,有利于提升导电性。此外,杂原子与碳原子成键产生结构缺陷,既为氧化还原反应提供活性位点,又可以充当电子传输路径,促进电化学反应的进行[8]。

Zhang 等[9]基于原位界面共聚策略成功在碳毡上构建了均匀性好、氮掺杂量高、氮型转化可控的微绒毛氮掺杂碳,促进了正氧化还原反应 V(Ⅴ)/

V(Ⅳ)的快速转化。郝亚玲等[8]探究发现五元杂环结构的掺氮剂制备出来的氮掺杂石墨烯气凝胶具有较高的氮掺杂含量,为 V^{2+}/V^{3+} 提供了更多的活性位点,且使材料具有更好的导电性以及更小的内阻,促进了电荷转移,其中氮掺杂以吡啶氮、吡咯氮及石墨氮形式存在。Yu 等[10]通过重氮化学在室温下实现吡啶分子的共价接枝,以增强石墨毡电极,单电池测试表明,在 350 mA/cm² 下平均 EE 为 72.8%,峰值功率密度达到 694 mW/cm²,分别比原始 H-GF 基线提高了 7.5%和 32.0%。此外,该电极在 500 个循环中表现出卓越的长期稳定性,容量衰减率仅为每循环 0.099%。

2.3 金属及其氧化物修饰

金属及其氧化物修饰是提升碳基电极电催化活性的有效手段之一,尤其在改善正极 VO^{2+}/VO_2^+ 反应动力学方面表现突出。通过在碳基电极表面负载过渡金属或金属氧化物,如钛、钨、锰、铁等及其氧化物,可以降低反应活化能,这主要在于它们结构中的不成对 d 轨道电子通过电子接触能与反应物分子形成吸附键。

Tang 等[11]将 Ti_xO_y(包含 TiO_2 和 Ti_4O_7)均匀负载在碳毡上,Ti_4O_7 导电性好,拥有优良的耐酸性和电化学稳定性,可以作为钒氧化还原反应的催化剂,TiO_2 具有优于 V(Ⅲ)/V(Ⅱ)的上级电化学活性,Ti_xO_y 碳毡在 200 mA/cm² 下显示出 82.0%的 EE,并且在 260 mA/cm² 下保持 77.9%的 EE。Singh 等[12]开发了 MXene-SnO_2 复合电极,MXene 是一种二维过渡金属碳化物,具有高电导率、亲水性及丰富的表面官能团,SnO_2 具有良好的催化活性和润湿性,MXene 和 SnO_2 的协同作用增强了离子扩散、电子传递和界面电荷转移,在 100 mA/cm² 的电流密度下,能效达到 85%,与原始碳毡相比,EE 提高了 5%,VE 提高了 6%。

2.4 纳米碳材料修饰

纳米碳材料修饰是通过在碳基电极表面引入碳纳米管、石墨烯等多种高比表面积、高导电性的碳材料得到复合电极,以改善电化学活性的一种改性策略。纳米碳材料具有优异的电子传输能力和丰富的表面活性位点,可以显著提高电极的比表面积和导电性,从而改善电极整体的反应动力学性能。同时,纳米碳材料之间及其与基体之间形成的多级孔结构,有利于电解液渗透和反应物扩散。常见的纳米碳材料结构如图 2 所示[13]。

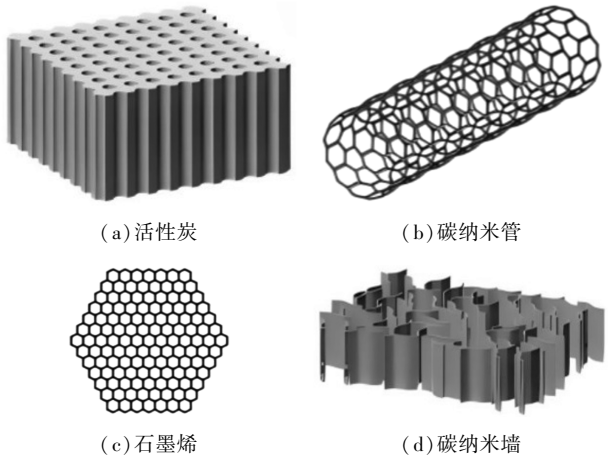


图 2 几种典型纳米碳材料的结构

Zhang 等[14]制备了氮掺杂碳纳米管改性碳毡电极,具有足够的传质通道和高活性催化界面,能够增强氧化还原动力学和 V(Ⅴ)/V(Ⅳ)、V(Ⅲ)/V(Ⅱ)氧化还原反应的可逆性,并使传质变得更容易。Zhang 等[15]将聚乙烯吡咯烷酮(PVP)添加到前驱体溶液中,通过调节前驱体溶液中 PVP 的浓度,获得了氮含量和孔结构呈梯度分布的碳纳米纤维电极材料(PG-ECNFs),组装有 PGH-ECNFs 的 VRFB,在 200 mA/cm² 电流密度下的 EE 为 80.34%,比非梯度电池高出 5.13%,电池的功率密度增加超过 25%。

综上,碳基材料电极的改性策略各有侧重,如含氧基团活化更有利于提高电极表面的亲水性,杂原子掺杂更侧重于提高电极的电化学反应动力学等,主要目的基本都是为了解决碳基材料本身亲水性和电化学活性的问题,从而实现钒电池性能的优化。目前也有不少学者将多种改性方法结合起来,如通过热处理等方式对碳基电极进行杂原子掺杂,既调整了含氧基团,提高了电极表面的亲水性,也引入了杂原子,提供了更多的活性位点。又如上文提及的氮掺杂碳纳米管改性碳毡电极,既进行了杂原子掺杂,也进行了纳米碳材料修饰。因此,对于碳基电极改性研究还可以朝着更综合的改性方向进行探索。

3 离子交换膜

离子交换膜(IEM)是钒电池的重要组件,选择性、稳定性和生产成本等是影响电池性能和应用的重要因素[4]。如图 3 所示,根据 IEM 的官能团不同,分为阳离子交换膜(CEM)、阴离子交换膜(AEM)、两性离子交换膜(AIEM),此外钒电池用隔

膜还有非离子型微孔膜[5]。其中,CEM 是研究最多的离子交换膜种类。

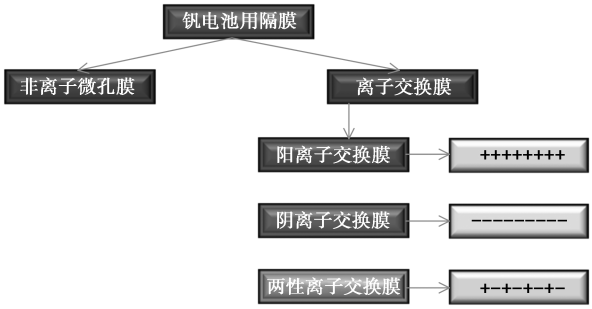


图 3　常见钒电池用隔膜种类

3.1　阳离子交换膜

CEM 中应用最多的是全氟磺酸型 CEM,以 Nafion 膜为代表,但 Nafion 膜离子选择性较差,有钒离子渗透的现象,此外,Nafion 膜价格相对高昂,也限制了其发展[3-4],对此,不少研究者对 Nafion 膜的改性和非氟磺酸型 CEM 进行了研究。

3.1.1　Nafion 膜改性研究

对于 Nafion 膜改性的方法主要有添加填料再铸改性修饰、形成层状复合膜法、接枝/辐射诱导法。对 Nafion 膜的改性修饰最常用的就是添加填料再铸改性修饰,通过添加有机或无机材料可以调控复合膜的性能,增强膜的离子选择性。Cui 等[16]将叔氨基改性氧化石墨烯(TAGO)作为 Nafion 膜改性的填料,制得了 Nafion-TAGO 复合膜。TAGO 拥有良好的分散性且与 Nafion 膜更加相容,避免了如一些无机填料与 Nafion 相容性差而影响复合膜的微观结构从而降低膜性能的问题。

在 Nafion 膜表面涂覆一层功能性膜,可以提高膜的阻钒性和离子传导性能。Wang 等[17]采用强缠结的超长碳纳米管(CNT)薄膜对 Nafion 膜表面进行修饰,制备了 CNT/N 复合膜,该膜表现出更低的面积阻力和更好的尺寸稳定性。Bukola 等[18]采用单层石墨烯修饰的 Nafion 膜,显著提高了离子交换的选择性,且质子通过单层石墨烯比钒离子快 4 个数量级以上。

接枝/辐射诱导法通过改变 Nafion 膜聚合物链的结构,用特定的官能团对不同种类的材料进行改性,在不显著影响本体聚合物优点的前提下提高膜的综合性能。An 等[19]通过化学接枝氨丙基异丁基多面体低聚倍半硅氧烷(NH_2-POSS),尽管质子传导率有所下降,但增强了离子选择性和尺寸稳定性,有效阻断 VO^{2+}通过。

3.1.2　非氟磺酸型阳离子交换膜

通过磺化、季铵化等方法可以将聚苯并咪唑(PBI)、聚砜(PSF)、聚醚醚酮(PEEK)等价格低廉、机械性能好的树脂材料制备成非氟型 CEM[20]。

叶洲麟等[21]对非氟磺酸型 CEM 进行了探索,成功合成了一系列具有不同离子交换容量的磺化聚芴醚酮(SPFEK-x)。其中 SPFEK-40 膜表现出优异的综合性能,质子传导率为 113.3 mS/cm,高于 Nafion212 膜的 101.5 mS/cm。此外以 SPFEK-40 膜组装成的钒电池 EE 为 88.2%,也高于用 Nafion212 膜组成的钒电池的 EE(84.3%)。并且在 30 次以上的循环充放电测试中,SPFEK-40 膜组装的钒电池的电容量保持率也优于 Nafion212 膜组成的钒电池。

3.2　阴离子交换膜

AEM 内部含有季胺、吡啶、咪唑、哌啶等阳离子基团,通过 Donnan 排斥效应能有效阻挡钒离子,具有优异的阻钒性能。然而,AEM 也存在明显短板:一方面,其结构特性会抑制氢离子迁移,导致膜的面电阻偏大;另一方面,磺酸基团本征传导率较低,使得质子传导率难以提升。针对这些问题,不少学者对此开展了研究,如以季铵化聚苯醚(QPPO)、聚醚砜(QPE)、聚苯并咪唑(QPBI)等材料为代表的探索,旨在优化 AEM 的性能,平衡其阻钒性与离子传导效率。

Sharma 等[22]通过室温交联溴化聚中卤素端基的亲水改性,并构建具有不同程度亲水端基修饰的三级离子结构,实现了氧化稳定性和电化学性能的协同改善。Duburg 等[23]探索了六甲基对三苯基聚苯并咪唑膜(HMT-PMBI)在钒电池中的应用,发现伴随着甲基化程度的增加,离子电导率也随着增加,但电池容量保持性会下降,最终认为 65%甲基化 HMT-PMBI 膜性能更加平衡,EE 相较 Nafion212 提高了 5%

3.3　两性离子交换膜

AIEM 含有阴、阳离子交换基团,具备 AEM 和 CEM 的的优点,低离子渗透性和高离子传导性。不过,渗透性和导电性存在对立关系,两者性能受到阴阳离子交换基团比例控制。同时,阴、阳离子基团间易发生离子交联,这给设计具有良好微相分离形貌的 AIEM 带来了较大困难,而且制备过程复杂,价格高昂。

Pang 等[24]探索了一种羟基溴丙烷阴离子前体侧链及其在膜中的后季铵化的策略,以实现在

AIEMs 中形成良好的选择性离子导电通道和可调的阴阳离子比。制备了具有硫酸酯/季铵盐两性离子对的两性聚苯并咪唑离子导电膜,很好地平衡了 VRFB 的 EE 和放电容量保持率。羟基溴丙烷阴离子前驱体侧链在流延过程中与硫酸酯基团一起参与离子簇的聚集,通过膜季铵化将季铵离子掺入离子簇中,形成选择性离子导电通道,而不产生任何沉淀。用该膜组装的钒电池展现出了优异的性能,CE 为 99.2%,EE 为 85.9%,放电衰减效率为 0.31%,均优于 Nafion212 膜组装的钒电池。

3.4 非离子微孔膜

离子交换膜主要通过聚合物上的固定基团来实现离子的选择性,而微孔膜则是通过孔径的尺寸来实现离子选择性[25]。Iskhakova 等[26]在液相分散状态下直接制备了大面积(2.0 μm^2)和纳米厚度(60 nm)的预活化 MFI 型沸石纳米片(ZN)层板,合成了多层 ZNs 的预活化 ZN 片(ZNPs)的悬浮液,并通过直接将多孔聚偏氟乙烯(PVDF)膜与开孔 ZNPs 堆叠来制备 ZN 膜。研究了 PVDF 支撑体上的 ZNP-tilted(ZNPT)膜在水溶液中的离子选择性与质子传导率。研究结果表明,ZNPT-PVDF 膜对钒离子表现出高选择性,并且在水溶液中对质子传导的阻力较低。

综上,CEM 研究最多,相关研究也相对成熟,以 Nafion 膜的改性研究为主要方向,旨在提高 Nafion 膜的离子选择性。非氟型 CEM 是基于对不同于 Nafion 膜材料的探索,在材料价格低廉的同时保证 CEM 的性能。AEM 的优缺点明显,高选择性低电化学性能,需进一步提升质子传导率。AIEM 兼顾了阳离子交换膜和阴离子交换膜的优点,是目前潜力最大的离子交换膜,但阴、阳离子交换基团比例调控,设计良好的微相分离形貌,以及控制成本是未来发展亟待解决的问题。微孔膜本质上成本低,可选材料范围广,但对微孔结构以及孔径尺寸要求较高,并且化学稳定性等方面研究薄弱,此外还可以在微孔膜中引入离子基团,进一步提升微孔膜的选择性[27],故还有较大的发展空间。4 种隔膜主要特征和优缺点如表 1 所示。

表 1 4 种隔膜主要特征和优缺点

隔膜种类	离子交换机理与特征	主要优势	主要缺陷
CEM	含有阴离子基团,通过静电吸引和浓度梯度驱动阳离子(主要是 H^+)传输,以 Nafion 膜为代表	质子传导率高,化学稳定性和机械稳定性好	钒离子渗透率高,成本高
AEM	含有阳离子基团,选择性传输阴离子(如 SO_4^{2-}、HSO_4^-);钒离子(阳离子)被膜内正电荷静电排斥	阻钒性能优异,钒离子渗透率低	离子传导率相对较低
AIEM	同时含有阴阳离子基团;带正电荷的固定基团可借助 Donnan 效应与钒离子产生静电排斥,有效提升阻钒性;带负电荷的固定基团则能促进 H^+传输,保障膜具有良好的导电性	有望突破“选择性与传导率”的矛盾,实现高离子选择性的同时保证离子传导率	分子结构设计复杂,长期化学稳定性仍需验证
微孔膜	不带固定电荷离子基团,依赖孔径筛分分离离子	制造成本低,原料可选范围广	孔径控制精度要求高,化学稳定性等方面研究薄弱

4 结语与展望

钒电池作为大规模、长时储能体系的重要技术,具有极其广阔的前景,而要充分实现其商业化价值,还需要进一步的研究和探索。电堆作为钒电池中的第二大成本支出,也作为决定钒电池功率的关键部分,对其进行新材料探索与结构的协同创新十分有必要。

在电极方面,碳基材料是当前研究与应用的主流。通过含氧基团活化、杂原子掺杂、金属及其氧化物修饰和纳米碳材料复合等多种改性手段,可显著提升电极的亲水性、电化学活性与反应动力学性能。未来电极研究应进一步注重多策略协同改性,构筑具有分级孔隙、高活性位点密度与优异传质特性的复合电极体系。同时,开发新型非碳基材料电极、设计具有三维结构的电极、推动电极制备工艺的低成本化,也是重要的发展方向。

在离子交换膜方面,Nafion 膜的研究以改性为主,通过添加填料再铸改性修饰、形成层状复合膜法、接枝/辐射诱导法等方法可有效提升其离子选择性,其中添加填料再铸改性修饰也是其他种类的离子交换膜常用的改性手段。非氟型 CEM、AEM、AIEM 及微孔膜等新兴体系展现出良好潜力,尤其在降低材料成本、提升阻钒性能及质子传导率方面各有侧重。未来应着力于探究膜微观结构的精确调控、复合膜的制备工艺以及低成本优性能的新材料,实现高离子选择性、高传导性与长期稳定性的统一,推动低成本、易加工膜材料的开发。

参考文献

[1] 丁静怡,吴玉淋,王一兴,等."双碳"目标下液流电池技术进展与展望[J].科学通报,2026,71(2):339-354.

[2] 刘涛,葛灵,张一敏.全钒液流电池关键技术进展与发展趋势[J].中国冶金,2023,33(4):1-8,133.

[3] 曲大为,杨帆,范鲁艳,等.钒氧化还原流电池技术综述[J].吉林大学学报:工学版,2022,52(1):1-24.

[4] 魏甲明,刘召波,陈宋璇,等.全钒液流电池技术研究进展[J].中国有色冶金,2022,51(3):14-21.

[5] Kamakshi B,Ratikanta N,Sushil K V,*et al*.Recent advances in development and application of polymer nanocomposite ion exchange membrane for high performance vanadium redox flow battery[J].Journal of Energy Storage,2024,97:112850.

[6] 王泓,张开悦.全钒液流电池碳毡电极的热处理活化研究[J].储能科学与技术,2025,14(2):488-496.

[7] Mukhopadhyay A,Yang Y,Li Y,*et al*.Mass transfer and reaction kinetic enhanced electrode for high-performance aqueous flow batteries[J].Advanced Functional Materials,2019,29(43):1903192.

[8] 郝亚玲,李春丽,周楠,等.不同氮源掺杂石墨烯电极材料的制备及电化学性能[J].化工进展,2025,44(9):5150-5160.

[9] Zhang K,Yan C,Tang A.Interfacial co-polymerization derived nitrogen-doped carbon enables high-performance carbon felt for vanadium flow batteries[J].Journal of Materials Chemistry A,2021,9(32):17300-17310.

[10] Yu Q Q,Liu J Q,Han H J,*et al*.Room-temperature diazonium grafting of pyridinic-N onto graphite felt enhances electrode kinetics in vanadium redox flow batteries[J].Journal of Colloid and Interface Science,2026,705:139503.

[11] Tang Z,Zou J,Zhang D,*et al*.Ti_xO_y loaded carbon felt as high performance negative for vanadium redox flow battery[J].Journal of Power Sources,2023,566:232925.

[12] Singh G,Kaur A,Lim J W.MXene-SnO_2 modified carbon felt electrode for enhanced performance in vanadium redox flow batteries[J].Composite Structures,2026,379:120001.

[13] 白明雨,金也,苏士焜,等.全钒液流电池电极材料改性策略的研究进展[J].石油学报:石油加工,2026,42(3):725-736.

[14] Zhang K,Wang H,Zhang X,*et al*.Controlled construction of a N-doped carbon nanotube network endows carbon felt with superior performances for high-rate vanadium flow batteries[J].ACS Sustainable Chemistry & Engineering,2024,12(19):7318-7328.

[15] Zhang Z,Jiang S,Zhang A,*et al*.Construction of gradient-structured carbon nanofiber electrodes utilizing polyvinylpyrrolidone as a gradient inducer for vanadium redox flow batteries[J].Journal of Energy Storage,2026,145:119944.

[16] Cui Y,Hu Y,Wang Y,*et al*.Tertiary amino-modified GO/Nafion composite membrane with enhanced ion selectivity for vanadium redox flow batteries[J].Radiation Physics and Chemistry,2022,195:110081.

[17] Wang T,Lee J,Wang X,*et al*.Surface-engineered Nafion/CNTs nanocomposite membrane with improved voltage efficiency for vanadium redox flow battery[J].Journal of Applied Polymer Science,2022,139(7):51628.

[18] Bukola S,Li Z,Zack J,*et al*.Single-layer graphene as a highly selective barrier for vanadium crossover with high proton selectivity[J].Journal of Energy Chemistry,2021,59:419-430.

[19] An H,Zhang R,Li W,*et al*.Surface-modified approach to fabricate nafion membranes covalently bonded with polyhedral oligosilsesquioxane for vanadium redox flow batteries[J].ACS Applied Materials & Interfaces,2022,14(6):7845-7855.

[20] 肖伟,孟昭函,宋云东.全钒液流电池用质子交换膜的研究进展[J].辽宁大学学报:自然科学版,2024,51(1):16-23.

[21] 叶洲麟,熊雷,林起浪,等.全钒液流电池用磺化聚芴醚酮质子交换膜的制备及性能[J].精细化工,2024,41(2):348-357,380.

[22] Sharma J,Khan H,Upadhyay P,*et al*.Stable poly(2,6-dimethyl-1,4-phenylene ether) based cross-linked cationic polyelectrolyte membrane with Ionic microstructure modification for efficient VRFB performance[J].ACS Applied Energy Materials,2023,6(1):447-460.

[23] Duburg J C,Chen B,Holdcroft S,*et al*.Design of polybenzimidazolium membranes for use in vanadium redox flow batteries[J].Journal of Materials Chemistry A,2024,12(11):6387-6398.

[24] Pang B,Wu X,Yang M,*et al*.Anionic conductive group tunable amphoteric polybenzimidazole ion conductive membrane for vanadium redox flow battery[J].Journal of Membrane Science,2023,670:121351.

[25] 张佳璇,蒋峰景.液流电池用多孔离子膜的研究进展[J].电池,2023,53(3):333-337.

[26] Iskhakova L,Cao Z,Sun X,*et al*.Preactivated zeolite nanosheet plate-tiled membrane on porous PVDF film:Synthesis and study of proton-selective ion conduction[J].Journal of Membrane Science,2023,669:121328.

[27] Zhang D,Zhang X,Luan C,*et al*.Zwitterionic interface engineering enables ultrathin composite membrane for high-rate vanadium flow battery[J].Energy Storage Materials,2022,49:471-480.■

(上接第 35 页)

[25] Qi H,Zhang L,Zhang C,*et al*.Highly efficient acidic electrosynthesis of hydrogen peroxide in air-fed conditions accelerated by a three-dimensional cross-linked carbon nanoweb catalyst[J].ACS Sustainable Chemistry & Engineering,2025,13(24):9021-9029.

[26] Xia L,Luo M,Shao C,*et al*.Highly efficient metal-free coal-based carbon aerogel catalyst for oxygen reduction to produce hydrogen peroxide[J].Industrial & Engineering Chemistry Research,2025,64(9):4870-4881.

[27] Zhang D,Tsounis C,Peng L,*et al*.Nitrogen-doped vertical graphene for highly efficient hydrogen peroxide electrosynthesis in acidic environment[J].Chemical Engineering Journal,2024,496:154221.

[28] Lee K,Lim J,Lee M J,*et al*.Structure-controlled graphene electrocatalysts for high-performance H_2O_2 production[J].Energy & Environmental Science,2022,15(7):2858-2866.

[29] Tian Q,Jing L,Du H,*et al*.Mesoporous carbon spheres with programmable interiors as efficient nanoreactors for H_2O_2 electrosynthesis[J].Nature Communications,2024,15(1):983.■