

· 双清论坛:变革性储能技术的化学工程科学问题 ·

流体电池的化学工程科学问题*

赵天寿^{1**} 蒋浩然² 李文甲¹

1. 南方科技大学 机械与能源工程系, 深圳 518055

2. 天津大学 机械工程学院, 天津 300350

[摘要] 流体电池以可流动物质作为能量载体,具有能量与功率解耦、设计灵活、可扩展性好、不受地形地质限制等优点,是推动长时间能量存储、支撑可再生能源大规模并网、构建新型电力系统、实现双碳目标的关键技术。本文基于国家自然科学基金委员会举办的第311期双清论坛,阐述了储能技术的战略意义,总结了流体电池的分类与现状,探讨了流体电池中热流科学和化学工程的学科交叉问题,提出了同时提升流体电池传输性能和电化学性能的有效途径,并为促进流体电池的发展提供了政策建议。

[关键词] 流体电池;储能;传热传质;电化学;结构设计;学科交叉

1 储能技术的战略意义

自工业革命以来,以化石能源为主体的能源消费结构为人类社会带来了高速发展,但过量使用化石能源造成了一系列气候、能源与环境问题,全球性能源消费结构向低碳多能融合方向转变已成为必然趋势。2020年9月22日,习近平总书记在第七十五届联合国大会一般性辩论中指出“二氧化碳排放力争2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和”。双碳目标不仅是我国的发展方向更是一场全球性的能源革命,将深刻影响全球能源形势以及环境问题走向,目前已有超过120个国家制定了碳中和的目标与路线图^[1]。

实现双碳目标的关键是转换可再生能源与化石能源作为补充能源和主体能源的角色。据《世界能源发展报告2021》统计,2020年全球石油和天然气产量下降,煤炭消费量波动性加强,报告预计可再生能源发电将成为全球能源增长的主力军。针对可再生能源发电,我国颁布了诸多政策,《“十四五”现代能源体系规划》指出“到2025年,非化石能源消费比重提高到20%左右,非化石能源发电量比重达到39%左右”;《“十四五”可再生能源发展规划》中也强



赵天寿 中国科学院院士、能源科学与工程热物理专家。现任南方科技大学碳中和能源研究院院长、美国机械工程师学会(ASME) Fellow、英国皇家化学学会(RSC) Fellow、中国化学学会会士。曾任香港科技大学工程及环境学冠名讲席教授。曾获Croucher资深研究成就奖、何梁何利基金科学与技术进步奖、国家自然科学基金二等奖两项、香港科大工程学杰出研究成就奖。入选Clarivate/Thomson Reuters全球高被引科学家和最有影响力科学思想名录。任国际期刊*International Journal of Heat and Mass Transfer* 主编与*Energy & Environmental Science* 顾问编委。

调“2025年可再生能源年发电量达到3.3万亿千瓦时左右,‘十四五’期间,可再生能源发电量增量在全社会用电量增量中的占比超过50%,风电和太阳能发电量实现翻番”。然而,风能、太阳能等可再生能源在时间上的间歇性、不稳定和空间上的分散性等固有缺陷仍是其规模化利用的关键瓶颈。

储能是利用专门装置与系统将能量储存,并在需要时将能量释放,实现能量在时间和/或空间上的转移,是推动可再生能源大规模接入、促进传统电力系统调峰提效、助力实现双碳目标的关键环节。具体而言,储能能够显著提高风、光等可再生能源的消

收稿日期:2022-12-01;修回日期:2023-03-24

* 本文根据第311期“双清论坛”讨论的内容整理。

** 通信作者,Email: zhaots@sustech.edu.cn

本文受到国家自然科学基金项目(52293414)的资助。

纳水平,是推动主体能源由化石能源向可再生能源转换的关键技术;储能能够为电网运行提供调峰、调频、备用、黑启动、需求响应支撑等多种服务,是提升传统电力系统灵活性、经济性和安全性的重要手段;储能能够促进能源生产消费开放共享和灵活交易、实现多能协同,是构建能源互联网、推动电力体制改革和促进能源新业态发展的核心基础。

我国高度重视储能领域的发展。2009年,《可再生能源法修正案》首次将储能行业发展写进法案;2011年,《国家能源科技“十二五”规划(2011—2015)》明确了布局储能产业,重点支持储能技术的研发;2017年,《关于促进储能产业与技术发展的指导意见》成为我国大规模储能技术及应用发展的首个指导性政策,提出了“十三五”期间储能由研发示范向商业化初期过渡、“十四五”期间实现商业化初期向规模化发展的路线。2021年,《关于加快推动新型储能发展的指导意见》指出“储能是支撑新型电力系统的重要技术和基础装备”,对电力系统各环节储能的应用给予了规划引导和保障支持,为未来储能产业的发展指明了道路。

综上所述,储能技术的规模化发展是大幅度提高可再生能源在能源结构中的占比、构建以新能源为主体的新型电力系统的必然要求。大力发展新型储能技术、突破核心技术瓶颈对我国实现双碳目标和保障能源安全具有重要战略意义。

2 流体电池的分类与现状

储能主要分为物理储能(如抽水蓄能、压缩空气储能、飞轮储能等)、化学储能(如二次电池、合成燃料等)、热储能(如显热储热、潜热储热等)等。其中,化学储能利用化学反应进行化学能与电能之间的相互转化以实现电能的存储和释放,具有模块化、响应快、可靠性好、负荷调节能力强、建设周期短等优点,成为了新型储能领域的重要发展方向。目前,我国以锂离子电池、铅酸电池为代表的化学储能在新型储能技术的装机中占比超过90%,截至2021年底装机规模已经超过5GW,并仍在保持高速增长。

据预测,为了实现碳中和目标,风电与光电发电量占总发电量的比例将超过70%,而风能、太阳能受天气和气候影响,存在日内、日间至季节间的波动。维持风电和光电高占比时能源供应的稳定可控,需要对应时长的储能技术支撑。因此,能源系统对于数小时甚至更长时间能量储存的需求将不断增加。麦肯锡的建模研究结果表明,到2040年,长时

储能行业可以部署85~140TWh的储能容量,并且储存高达总用电量10%的电能。然而,在锂离子电池、铅酸电池、镍氢电池等系统中,活性物质被涂覆或沉积在正负极集流体上存在于电池内部,电池的能量与功率相互影响,且均与电池的尺寸大小紧密联系。也就是说,无论需要高功率还是高能量都需要增加单体电池的尺寸和数量,无法实现能量和功率的单独提高。所以,锂离子电池等系统储释能时长(能量/功率)的调节范围较小,难以满足数小时、数天乃至数月的长时储能需求。

回顾化石能源的发展历程不难发现,石油、天然气由于具有能量密度高、可流动、便于储存和运输的特点,可以随时随地、源源不断地在锅炉、内燃机等装置中将化学能转化为热能,在经济社会中扮演了至关重要的作用。受此启发,如图1所示,将可再生能源产生的电能存储于流动的储能介质并在流体电池中进行充放电是实现长时储能的有效方式。流体电池通过以流动物质为能量载体,突破了传统锂离子电池等能量仅可存在于电池内部的限制,实现了储能容量与储能功率的解耦。因此,理论上,流体电池储能时长不再受到限制,适合于数小时甚至跨季节的能量储存。

根据能量转化方式和储能介质特征,流体电池主要分为两类:一类是以液态的活性物质进行储能,在液流电池和电燃料系统中进行充电和放电;另一类则是以氢气、甲醇等合成燃料进行储能,分别在电解池中进行燃料制取和在燃料电池中进行燃料利用。流体电池在未来的能源结构转型和双碳目标实现中起着至关重要的作用,因此接下来着重介绍液流电池、电燃料系统、电解池、燃料电池等典型流体电池的主要发展现状。

2.1 液流电池

液流电池于1974年由Taller提出^[2],其通过溶液中的活性物质在电极上发生氧化还原反应实现

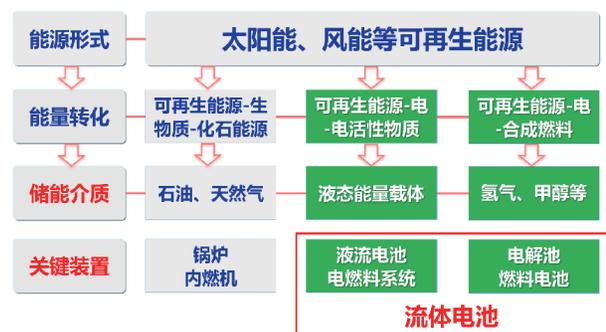


图1 可再生能源的转化过程与装置

电能和化学能的相互转化,达到能量存储和释放的目的。根据正负极活性物质不同,液流电池主要分为全钒液流电池、铁铬液流电池、锌溴液流电池、锌铁液流电池等,其中全钒液流电池由于具有无活性物质交叉污染、循环寿命长等优势,是目前液流电池储能首选的技术方案,但仍受到建设成本较高的限制。

近年来,研究人员通过改进电极、隔膜等关键部件以及整个电池的结构,提高了全钒液流电池的运行电流密度和效率,降低了系统成本。在基础研究层面,高性能电极^[3]、隔膜^[4]、流道^[5]大幅降低了全钒液流电池的活化损失、欧姆损失和浓差损失,使全钒液流电池在 600 mA/cm^2 的高电流密度下可以保持80.83%的能量效率并稳定循环超过20 000圈,是公开文献中的最高充放电性能和循环寿命^[6]。在工程应用层面,全钒液流电池电堆的工作电流密度由原来的 $60\sim 80\text{ mA/cm}^2$ 提高到了 $200\sim 300\text{ mA/cm}^2$,初次投资成本可降至约3 000元/kWh^[7],推动了技术的产业化发展。全钒液流电池的应用示范正稳步由千瓦级、百千瓦级规模向兆瓦级、百兆瓦级规模升级,2022年100 MW/400 MWh大连液流电池储能调峰电站并网运行,是目前世界最大的液流电池储能调峰电站^[8]。全钒液流电池的发展仍需开发新一代关键材料和新型结构从而突破性能、可靠性、成本的限制,并推动关键技术“单电池—电堆—系统—示范”的全链条发展。

相比于全钒液流电池,其它液流电池体系多数处于实验室研究和初步示范阶段,距离实际应用尚有诸多挑战。例如,铁铬液流电池需要克服析氢副反应和较低的反应动力学,其高功率、长时间稳定运行尚未得到充分验证;锌基液流电池面临着面容量受限、锌枝晶和功率密度较低的挑战;有机液流电池普遍存在实际能量密度低、稳定性差、反应动力学低等问题,进一步筛选合适的有机电对仍是其发展的首要目标。

2.2 电燃料储能系统

2019年,香港科技大学赵天寿院士团队提出了电燃料储能系统的新概念^[9],如图2所示。电燃料储能系统以可充放电的液态能量载体(简称电燃料)为储能介质,通过彼此独立的充、放电装置完成电燃料的充电与放电。在充电过程中通过电燃料充电器将可再生能源产生的间歇性电能存储在液态电燃料中,在放电过程中通过电燃料电池随时随地产生电能。

电燃料储能新概念的提出为突破传统储能技术

面临的瓶颈提供了新思路。一是,电燃料储能综合了电池储能与燃料储能的优点。电燃料以可充放电的液态能量载体为储能介质,使其既具有电池储能高效率、易规模化的优点,又具有燃料储能可长时储存、便于运输的优点。二是,电燃料储能为充放电装置的设计开发提供了更大空间,有利于电池性能的突破。电燃料充放电装置相互独立,破解了以往电池因充放电共用同一装置相互制约的难题。充放电装置既可以独立优化,又可以互不干扰地运行,获得了更高的性能和更灵活的运行模式。三是,电燃料储能大幅拓宽了储能介质的选择范围。在常规电池中氧化还原电对的选择范围通常要权衡可逆性与能量密度、电池电势、成本和稳定性之间的关系,因此,电池储能介质的选择受制于其在同一电极上的可逆性。在电燃料技术中,充电和放电过程发生在不同的装置中,消除了常规电池对储能介质可逆性的严格要求,为储能介质的选择提供了更大的空间。

电燃料根据活性物质种类,可以分为无机电燃料、有机电燃料、纳米流体电燃料三类。以无机电燃料为例,电燃料储能系统实现了高达94%的充电效率和 3.4 W/cm^2 的峰值功率密度。当在 1000 mA/cm^2 的超高电流密度运行时,电燃料储能系统仍可以保持80.0%的充放电效率和83.0%的活性物质利用率,是目前最高效的储能技术之一^[9]。

未来,电燃料储能系统的研究仍需集中在开发高比容量电燃料以及进一步提高电燃料充电器和电燃料电池的效率和长期稳定性,并开展从百千瓦级到兆瓦级的应用示范。

2.3 电解池

电解池是将电能转化为化学能的设备,其中电解水制氢技术利用电能使水分解产生氢气,包括碱性电解水制氢、质子交换膜电解水制氢、固体氧化物电解水制氢和阴离子交换膜电解水制氢。碱性电解水制氢技术商业化程度最高,装机量占全球电解水装机容量首位。但由于碱性电解水制氢技术启动和

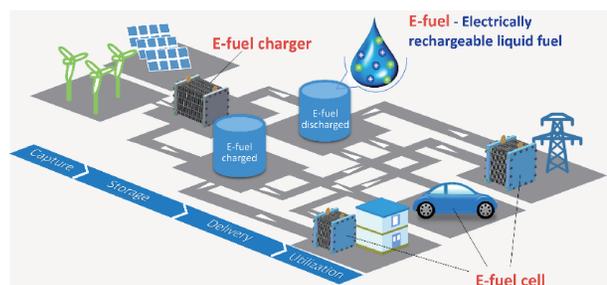


图2 电燃料储能系统示意图^[9]

变载速度慢、制氢速度难以快速调节等因素导致其响应能力较差,与可再生能源发电的适配性较差^[10]。

相比之下,其它三种电解水制氢技术更能适应可再生能源发电的波动性。质子交换膜电解池于 1967 年由美国通用电气公司成功开发,其常规运行电流密度已超过 1 A/cm^2 ,但单槽制氢规模、运行寿命以及整体系统成本方面距离商业化应用还存在一定差距,因此提高反应动力学、降低贵金属催化剂负载量、开发低成本质子交换膜、改善双极板材料、优化双极板涂层仍是目前的主要发展方向^[11]。固体氧化物电解水制氢技术工作温度高,具有较快的反应动力学,可以采用非贵金属催化剂催化反应,但受高温运行工况下电极稳定性差、关键组件造价较高等因素制约,目前国内外研究仍处于初期示范阶段。阴离子交换膜电解水技术结合了碱性电解水低成本与质子交换膜电解水运行灵活、系统高效的优势,但阴离子交换膜稳定性较差、离子导电性较差,系统整体反应动力学较慢,该技术整体处于实验室研发阶段^[12]。

2.4 燃料电池

燃料电池是把燃料中的化学能通过电化学反应直接转换为电能的发电装置,在系统中氢气、甲醇等燃料被存储于储气/液罐内并源源不断地供给电堆进行放电,具有典型的流体电池特征。燃料电池具有启动迅速、功率密度高、排放低等优势,包括中国、日本和欧盟在内的诸多国家和地区将燃料电池作为未来重点发展方向。预期在 2030 年燃料电池的功率密度将提升至 $6\sim 9 \text{ kW/L}$ 左右,然而目前我国开发的车用燃料电池电堆额定功率密度在 4 kW/L 左右,距离该目标仍有差距,因此开发高功率密度、低成本的质子交换膜燃料电池技术被视为未来的研究热点。高功率密度质子交换膜燃料电池的开发依赖于对包括膜电极和双极板在内的关键部件进行优化设计。膜电极由扩散层、催化层和质子交换膜构成,“有序化”设计强化跨尺度和跨组件传输,从而提高超低催化剂负载下的功率密度是其重要发展方向。双极板需要重点解决耐腐蚀性、制造成本和界面接触电阻问题,双极板—膜电极“一体化”设计有望成为超高功率密度的有效途径^[13]。

甲醇燃料电池以液态甲醇为燃料,克服了氢气难以储存和运输的难题,具有体积能量密度高、结构简单等优势,是目前燃料电池极具潜力的发展方向之一。直接甲醇燃料电池为车载燃料电池燃料的存储提供了解决方案,且甲醇作为液态燃料可以基于现有的汽油分配基础设施从而有效减少资金投入和

研发难度。甲醇燃料电池快速补给和超长时间续航的特点使其在便携式电子产品领域和军用单兵作战系统中也具备极强的竞争力。目前主要有两方面因素制约甲醇燃料电池的性能提升:一是甲醇燃料电池电化学活性较低,且一氧化碳等中间产物会使催化剂中毒;二是传统离子交换膜甲醇渗透率高,造成甲醇利用率下降和阴极极化增加。

3 流体电池的热流科学和化学工程耦合问题

流体电池实现了储能容量与储能功率的解耦,是长时储能领域的理想选择,未来发展空间巨大。推动流体电池发展的关键在于进一步提高其性能从而降低成本,然而如图 3 所示,流体电池是一个从微观到宏观的电化学反应和物质传输、离子传输、电子传输相耦合的多尺度、多相复杂体系,其性能由热流科学的空间能质传递特性和化学工程的界面电化学反应特性共同决定,具有典型的学科交叉特点:一方面,界面活性面积、界面电荷转移和界面温度浓度决定了电化学反应速率的快慢;另一方面,空间传输机理、空间尺度效应、空间结构特征影响了物质、离子、电子的耦合传输速率和反应界面的构建。在流体电池中,仅当某一区域同时拥有物质、离子、电子三种传输通道时才可以作为电化学反应的场所,而且电化学反应速率受到其中最低传输速率的限制。因此,高性能流体电池的开发需要强化物质、离子、电子跨尺度耦合传递,并实现传输性能和电化学性能的协同提升。

流体电池的空间能质传递是一个涉及电极、流道、隔膜等各关键部件的复杂过程,而界面电化学反应通常发生在多孔电极内部。然而在流体电池各部件中,物质传输性能—离子传输性能—电子传输性能、以及传输性能—电化学性能间往往存在着内在矛盾,难以实现协同提高,制约了流体电池的性能突破。以液流电池的反应过程为例,电解液在流道中流动并在压差作用下进入多孔电极,电解液中的活性物质在浓度场、电场、速度场的驱动下传输,到达电极表面与跨膜传输来的载流子和电极内部传输来的电子形成固—液反应界面,发生氧化还原电化学反应实现能量的储存和释放。在多孔电极内,为了得到电解液和活性物质的高传输性能,需要高孔隙率和渗透率保证宏观传输通道,但是高孔隙率和渗透率会减小电极比表面积,制约反应界面的构建和电化学性能的提高。在流道内,相邻流道间的高压

差可以加强电解液向多孔电极传输,同时提高局部速度促进活性物质传输,但是高压差通常意味着电解液在流道内的沿程损失增加,使得进出口压降增大、泵功损失增大。在隔膜内,为了实现高载流子传输从而降低其跨膜传输阻力,需要高离子电导率,但是高离子电导率将同时提高活性物质的跨膜穿梭,降低放电容量;载流子传输还通常伴随水迁移,使正负极电解液体积不匹配,进一步加快放电容量的衰减。

围绕以上流体电池中热流科学和化学工程耦合问题,在流体电池研究和应用中,存在以下难点:(1)如何实现电极传输性能和电化学性能的同时提高;(2)如何实现流道高活性物质均布和低流动阻力;(3)如何实现隔膜高离子电导率和高选择透过性。针对以上理论和技术难点,以液流电池为例,下面拟从电极结构设计、流道结构设计、隔膜结构设计等三个方面展开讨论。

3.1 电极结构设计

电极是实现电能与化学能相互转换的核心场所,电极内空间能质传递与界面电化学反应相耦合,对流体电池性能具有决定性影响。高性能电极开发的关键在于阐明物质、电子、离子传输与电化学反应的相互关系,打破各因素间的强关联,以空间能质传递与界面电化学反应协同最优为目标,开发微观、宏观有序的电极结构。

在微观层面,构建多级尺度电极结构和复合电极结构可以打破电极渗透率和比表面积的强关联。在多级尺度电极结构中,如图 4a 所示,一级孔由碳纤维搭接而成,孔径通常为几十到几百微米,用于提供宏观电解液流动和传输通道;二级孔存在于碳纤维表面,孔径通常为几十到几百纳米,用于提供活性物质在电极表面的扩散、迁移、对流通道;三级孔存在于二级孔内,孔径通常为 1~2 纳米,用于增加电极比表面积和提供电化学反应场所^[14-16]。在复合电极结构中,如图 4b 所示,一级孔由碳纤维搭接而成,孔径通常为几十到几百微米,用于提供宏观电解液

流动和传输通道;纳米颗粒均匀附着在碳纤维表面,直径通常为几到几十纳米,一方面有效增加了电极表面活性位点数量,另一方面作为高效催化剂提高了反应动力学^[17,18]。在以上设计中,二级孔、三级孔和纳米颗粒的存在不会影响一级孔的尺寸,从而不影响电极的孔隙率和渗透率,实现了渗透率和比表面积的解耦。

在宏观层面,构建梯度电极结构和定向排列电极结构可以提高渗透率并精确调控电化学反应区域。在梯度电极结构中,如图 5a 所示,孔隙率和渗透率从隔膜侧到流道侧逐渐提高,从而促进了活性物质从流道侧到隔膜侧的高效传输;比表面积从流道侧到隔膜侧逐渐提高,保证了主要电化学反应区域的高反应面积。梯度电极结构有效匹配了电极各

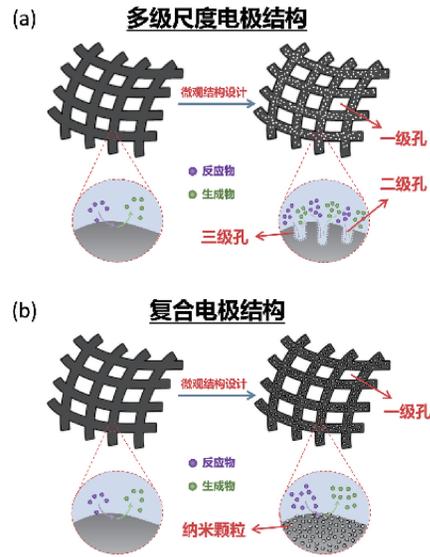


图 4 电极微观结构设计路线

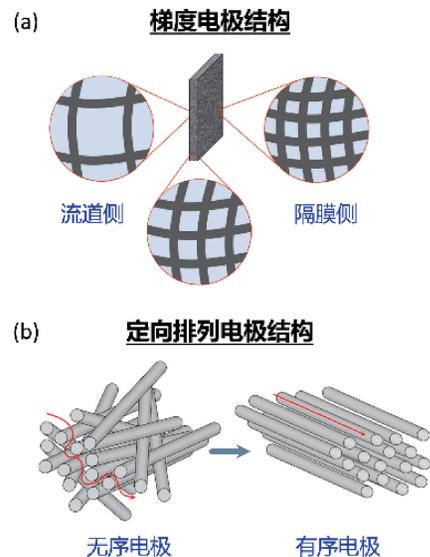


图 5 电极宏观结构设计路线

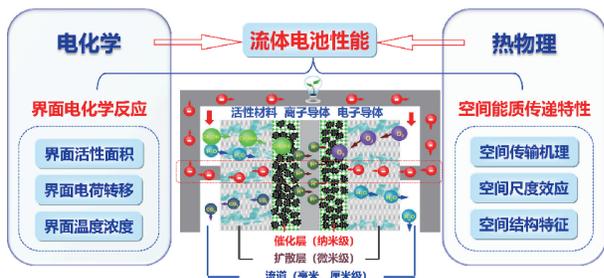


图 3 流体电池内的热物理和电化学耦合特性

区域传输速率和电化学反应速率,实现了各区域的分开设计和电化学反应区域在垂直平面方向的调控^[19]。在定向排列电极结构中,如图 5b 所示,打破了传统无序结构对电极传输性能的制约,采用碳纤维沿同一方向排列的有序结构,最大化减小电极扭曲度、传输阻力和传输距离:一方面促进了活性物质沿垂直平面方向的传输,另一方面调控了面内方向肋下对流强度,实现了局部电流密度在电极内的均匀分布^[20]。

3.2 流道结构设计

流道作为流体储能介质的重要传输通道,主要作用是保障活性物质均匀且连续地进入电极,其传输性能将直接影响电极内部的电化学反应过程和系统净输出功率。目前典型的流道结构包括平行流道、蛇形流道和叉指形流道,但仍难以同时实现最小化压降损失和最大化活性物质均布的目标,因此设计高均匀、低流阻的新型流道是重要的发展方向。

针对叉指形流道,如图 6a 所示,引入分级结构是降低流动阻力、促进活性物质均匀分布的有效手段^[21]。一级流道主要用于传输电解液,具有大横截面积,减小了电解液传输阻力从而降低了泵功损失;二级流道均匀分布于一级流道周围,主要用于分配活性物质,具有小横截面积,使电解液从一级流道进入二级流道时具有较高流速,从而强化了肋下对流和活性物质传输。

针对蛇形流道,如图 6b 所示,调控流道路径从而增大相邻流道之间的压差,可以强化肋下对流、促进活性物质传输,从而提高了局部电流密度并促进了其在多孔电极内的均匀分布^[22,23]。为了进一步

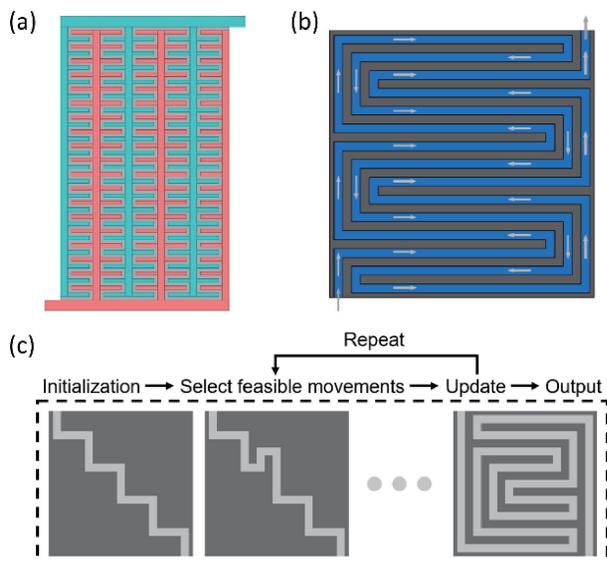


图 6 流道结构设计路线^[5,21,23]

寻找最优化流道路径,亟需打破传统人工直觉设计和实验试错验证的局限,开发基于机器学习辅助的流道结构设计方法^[5]。基于哈密顿路径寻优算法,如图 5c 所示,构建包含大量新型流道的数据库;基于多物理场仿真模型和机器学习模型,模拟流体电池内部电解液流动、活性物质传输和电化学反应过程,计算不同流道结构对应的活性物质均布系数和压降;将新型流道结构与传统流道结构进行对比,基于启发式原则和协作筛选原则得到优于现有流道的新型结构,并揭示流体电池流道的定量设计规则。

3.3 隔膜结构设计

在流体电池中,隔膜主要起到物理绝缘、提供载流子传输通道和防止活性物质跨膜传输的作用。首先,高性能隔膜需要具有高载流子电导率:一是直接决定载流子跨膜传输阻力和电池欧姆损失,二是影响电化学反应区域和局部电流密度在垂直平面方向的分布。同时,需要具有低活性物质电导率和高选择性,从而降低混合电势损失和容量损失。然而,高载流子电导率通常伴随着高活性物质渗透率,随着隔膜的溶胀这一现象愈发明显,传统隔膜难以平衡二者传输性能的相互矛盾。因此,隔膜结构设计对提高流体电池充放电性能和稳定性有着重要作用。

隔膜结构设计中最直接的方式就是对隔膜的厚度进行调控,减小隔膜厚度能减小离子传输路径从而降低电池欧姆损失,但由于传统全氟磺酸膜的低离子选择性,厚度减小后活性物质跨膜传输速度快速提高,大幅降低了流体电池的库伦效率和活性物质利用率^[24]。与全氟磺酸膜不同,聚苯并咪唑膜具有优异的离子选择性但是低离子电导率,因此调控聚苯并咪唑膜的厚度并保持高机械强度可以有效平衡离子电导率和离子选择性。如图 7a 所示,三明治结构的聚苯并咪唑膜由两层多孔纳米纤维层和一层薄致密层组成。在该结构中,多孔纳米纤维层具有较高的电解液渗透率,既提供了机械强度,又保证了电解液与内层致密膜的充分接触;薄致密层能有效降低载流子传输距离和阻力,其高选择性抑制了活

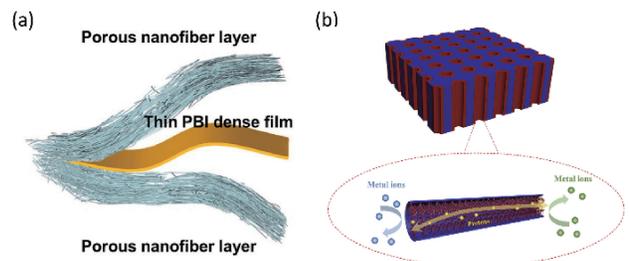


图 7 隔膜结构设计路线^[26,27]

性物质的跨膜传输^[25,26]。

调控隔膜孔结构尺寸、构建基于尺度效应的选择性通道是实现高质子电导率和高离子选择性的有效方法。如图7b所示,由于质子等载流子的斯托克斯半径(如质子 ~ 0.13 nm)小于活性物质(如钒离子、锌离子、铁离子、甲醇等 >0.4 nm),通过构建垂直于平面方向的有序、具有特定尺寸的均匀贯通孔结构,既保证了载流子的低传输阻力和短传输距离,又避免了活性物质的跨膜传输^[27,28]。

4 促进流体电池发展的建议

针对流体电池研究中存在的化学工程问题,为促进流体电池的进一步发展和应用,提出以下建议。

4.1 学科交叉,破解耦合难题

流体电池是一个涉及热流科学和化学工程学科交叉的新兴复杂体系,仅从单一学科出发难以实现其传输性能和电化学性能的同时最大化,制约了高性能流体电池的开发。推动流体电池发展需要阐明热物理和电化学耦合特性,明晰跨尺度多子传递与电化学反应机理,实现多场驱动多子传递与电化学反应的协同优化。

4.2 需求牵引,促进产研融合

流体电池的开发需以推进储能技术大规模应用为导向,根据不同应用场景、不同应用领域、不同应用需求完善不同种类、不同层次、不同规模的系统开发。研发过程中以低成本、长寿命、高效率、高安全为目标,加速技术迭代,注重产学研深度结合,形成“研发—示范—规模化”全链条式发展路线。

4.3 矢志创新,开发新型体系

流体电池的发展既需要深化和加速液流电池、电燃料储能系统、电解池、燃料电池等现有体系的研发,也依赖于对新原理、新机制、新体系的探索。以创新为驱动,构建流体电池热、质、离子、电子在连续和非连续界面的迁移、转化、存储新原理,发展耦合热流科学、电化学、材料学的能量存储新机制,开发基于新型流动能量载体的高性能新体系。

4.4 兼收并蓄,深化体制改革

积极听取电源侧、电网侧、用户侧各方建议,深化能源体制改革。一是加速能源法制建设,为流体电池发展提供法律保障;二是完善市场体制机制,激发流体电池发展的内生动力,明确流体电池在不同场景下的成本回收方式;三是健全能源技术标准体系,建立健全覆盖流体电池设计、安装、运营等全环节的技术标准体系,保障流体电池的安全稳定运行。

5 结语

变革性储能技术对我国实现双碳目标和保障能源安全具有重要战略意义。以液流电池、电燃料储能系统、电解池、燃料电池为代表的流体电池以可流动物质作为能量载体,具有能量与功率解耦、设计灵活、不受地形地质限制的优点,将在未来能源体系中发挥至关重要的作用。流体电池的研究是一个多学科、多领域、多体系深度融合的问题,依赖于基础理论的创新、新型机制的探索和产学研的深度融合。基于本次双清论坛,本文总结了储能技术的战略意义,明确了流体电池发展内涵,聚焦流体电池中热流科学和化学工程的学科交叉问题,提出了流体电池的发展建议,以期为推动能源结构转型和经济社会可持续发展提供科学和技术支撑。

参考文献

- [1] 胡文娟. 中国长期低碳发展战略与转型路径研究成果发布. 可持续发展经济导刊, 2020(10): 12.
- [2] Thaller LH. Electrically rechargeable redox flow cells. Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 1974: 924—928.
- [3] Zhou XL, Zeng YK, Zhu XB, et al. A high-performance dual-scale porous electrode for vanadium redox flow batteries. Journal of Power Sources, 2016, 325: 329—336.
- [4] Wan YH, Sun J, Jiang HR, et al. A highly-efficient composite polybenzimidazole membrane for vanadium redox flow battery. Journal of Power Sources, 2021, 489: 229502.
- [5] Wan SB, Jiang HR, Guo ZX, et al. Machine learning-assisted design of flow fields for redox flow batteries. Energy & Environmental Science, 2022, 15(7): 2874—2888.
- [6] Jiang H, Sun J, Wei L, et al. A high power density and long cycle life vanadium redox flow battery. Energy Storage Materials, 2019, 24: 529—540.
- [7] 张华民. 全钒液流电池的技术进展、不同储能时长系统的价格分析及展望. 储能科学与技术, 2022, 11: 2772—2780.
- [8] 袁治章, 刘宗浩, 李先锋. 液流电池储能技术研究进展. 储能科学与技术, 2022, 11: 2944—2958.
- [9] Jiang H, Wei L, Fan X, et al. A novel energy storage system incorporating electrically rechargeable liquid fuels as the storage medium. Science Bulletin, 2019, 64: 270—280.
- [10] 曹军文, 张文强, 李一帆, 等. 中国制氢技术的发展现状. 化学进展, 2021, 33(12): 2215—2244.
- [11] 李亮荣, 彭建, 付兵, 等. 碳中和愿景下绿色制氢技术发展趋势及应用前景分析. 太阳能学报, 2022, 43(6): 508—520.
- [12] 王培灿, 万磊, 徐子昂, 等. 碱性膜电解水制氢技术现状与展望. 化工学报, 2021, 72(12): 6161—6175.
- [13] Jiao K, Xuan J, Du Q, et al. Designing the next generation of proton-exchange membrane fuel cells. Nature, 2021, 595(7867): 361—369.

- [14] Jiang HR, Shyy W, Zeng L, et al. Highly efficient and ultra-stable boron-doped graphite felt electrodes for vanadium redox flow batteries. *Journal of Materials Chemistry A*, 2018, 6(27): 13244—13253.
- [15] Jiang HR, Shyy W, Wu MC, et al. A bi-porous graphite felt electrode with enhanced surface area and catalytic activity for vanadium redox flow batteries. *Applied Energy*, 2019, 233/234: 105—113.
- [16] Sun J, Jiang HR, Zhao C, et al. Holey aligned electrodes through *in-situ* ZIF-8-assisted-etching for high-performance aqueous redox flow batteries. *Science Bulletin*, 2021, 66(9): 904—913.
- [17] Jiang HR, Zeng YK, Wu MC, et al. A uniformly distributed bismuth nanoparticle-modified carbon cloth electrode for vanadium redox flow batteries. *Applied Energy*, 2019, 240: 226—235.
- [18] Wei L, Zhao TS, Zeng L, et al. Highly catalytic and stabilized titanium nitride nanowire array-decorated graphite felt electrodes for all vanadium redox flow batteries. *Journal of Power Sources*, 2017, 341: 318—326.
- [19] Jiang HR, Zhang BW, Sun J, et al. A gradient porous electrode with balanced transport properties and active surface areas for vanadium redox flow batteries. *Journal of Power Sources*, 2019, 440: 227159.
- [20] Sun J, Jiang HR, Zhang BW, et al. Towards uniform distributions of reactants via the aligned electrode design for vanadium redox flow batteries. *Applied Energy*, 2020, 259: 114198.
- [21] Zeng YK, Li FH, Lu F, et al. A hierarchical interdigitated flow field design for scale-up of high-performance redox flow batteries. *Applied Energy*, 2019, 238: 435—441.
- [22] Xu C, Zhao TS. A new flow field design for polymer electrolyte-based fuel cells. *Electrochemistry Communications*, 2007, 9(3): 497—503.
- [23] Wei L, Guo ZX, Sun J, et al. A convection-enhanced flow field for aqueous redox flow batteries. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 179: 121747.
- [24] Zhou XL, Zhao TS, An L, et al. Critical transport issues for improving the performance of aqueous redox flow batteries. *Journal of Power Sources*, 2017, 339: 1—12.
- [25] Zeng L, Ren YX, Wei L, et al. Asymmetric porous polybenzimidazole membranes with high conductivity and selectivity for vanadium redox flow batteries. *Energy Technology*, 2020, 8(10): 2000592.
- [26] Wan YH, Sun J, Jian QP, et al. A detachable sandwiched polybenzimidazole-based membrane for high-performance aqueous redox flow batteries. *Journal of Power Sources*, 2022, 526: 231139.
- [27] Yan XH, Jiang HR, Zhao G, et al. Preparations of an inorganic-framework proton exchange nanochannel membrane. *Journal of Power Sources*, 2016, 326: 466—475.
- [28] Yan XH, Zhou XL, Zhao TS, et al. A highly selective proton exchange membrane with highly ordered, vertically aligned, and subnanosized 1D channels for redox flow batteries. *Journal of Power Sources*, 2018, 406: 35—41.

Chemical Engineering Scientific Issue in Flow Cells

Tianshou Zhao^{1*} Haoran Jiang² Wenjia Li¹

1. Department of Mechanical and Energy Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055

2. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350

Abstract Flow cells, which adopt flowable materials as energy carriers, offer the advantages of decoupled energy and power, flexible design, good scalability and site-independence. They are regarded as the key technologies to promote long-term energy storage, support large-scale grid integration of renewable energy, build novel power systems, and achieve dual carbon goals. Based on the 311th Shuangqing Forum hosted by National Natural Science Foundation of China, this paper introduces the significance of energy storage, and summarizes the classification and recent advances of flow cells. Attentions are then focused on the coupled thermophysics and chemical engineering issues in flow cells to discuss effective strategies to simultaneously improves their transport and electrochemical performances. Additionally, recommendations for promoting the development of flow cells in the future are provided.

Keywords flow cells; energy storage; heat and mass transfer; electrochemistry; structure design; interdisciplinary

(责任编辑 姜钧译)

* Corresponding author, Email: zhaots@sustech.edu.cn