

· 双清论坛:变革性储能技术的化学工程科学问题 ·

变革性储能技术的化学工程科学问题^{*}

张锁江^{1**} 张海涛¹ 张 兰¹ 朱艳丽² 王笑楠³
李 焱¹ 董 陶¹ 张国俊⁴ 杨俊林⁴

1. 中国科学院 过程工程研究所, 北京 100190
2. 北京理工大学 机电学院, 北京 100081
3. 清华大学 化学工程系, 北京 100084
4. 国家自然科学基金委员会 化学科学部, 北京 100085

[摘要] 本文归纳总结了变革性储能技术的研发现状和发展趋势。从化学工程学科的角度,分析了变革性储能技术发展面临的主要挑战,凝练了储能材料—器件—系统亟需解决的关键科学问题,提出了“新能源化工”发展的新思路及未来的研究重点,助力推动我国变革性储能技术的研发能力提升,为促进绿色低碳发展发挥战略性、基础性和先导性作用。

[关键词] 电化学储能; 新能源化工; 科学问题; 研究重点

1 储能技术的现状与挑战

能源是人类社会赖以生存和发展的重要物质基础。能量、材料及信息共同维系着世界的存在并推动人类文明的进步,同时又在不断的自我发展,最典型的特征就是存储能力的不断增强^[1]。当前,我国社会主义现代化建设正处于关键时刻,在“双碳”战略背景下,面临着能源结构转型、科技竞争加剧等诸多挑战,而我国能源禀赋呈现富煤少油贫气的特点,可再生能源已成为我国能源结构转型发展的重要方向。我国能源资源与需求呈逆向分布,80%以上的能源资源主要集中在西北部,但70%以上的需求却集中在东南部和中部地区。可再生能源发电规模将快速增长,预计到2060年占比将达到80%,其中太阳能和风电装机容量将达6.3 TW。然而,可再生能源普遍具有随机性、波动性、不确定性和地域分布不均等特点,迫切需要发展高效变革性储能技术,以保证能源供需的时空匹配。

当前,储能研究十分活跃,发表论文及专利数量呈级数增长;储能材料及器件制造规模快速增长,产业化应用蓬勃发展,对社会经济发展的推动作用日益



张锁江 中国科学院院士,中国科学院过程工程研究所所长,河南大学校长,中国化工学会副理事长。主要从事绿色能源、材料及化工过程研究。突破了离子液体规模制备、工艺创新和系统集成的重大技术及工程化难题,实现了多项绿色技术的示范及工业应用。获国家自然科学基金二等奖、何梁何利科学与技术进步奖、中国科学院科技促进发展奖、侯德榜化工科技成就奖、发展中国家科学院(TWAS)化学奖等奖项。

凸显。电化学储能由于能效高、响应快、灵活性强而备受关注,目前约占所有储能装机容量的12%(图1a)^[2],预计到2060年将上升到30%。以锂离子电池为代表的电化学储能领域,我国在制造规模和研发水平等方面居世界前列。经过产学研各界多年来的共同努力,对其所涉及的热力学、动力学和电化学储能过程有了较为系统的认识。但是,随着储能规模的快速增长和储能系统的日趋复杂,在关键材料、器件、系统等方面都面临着诸多新问题和新的挑战。当前电化学储能领域的研究主要集中在材料修饰改性和器件结构优化方面,对储能过程及系统所涉及的多尺度构效关系、反应—传递耦合机制的研究还

收稿日期:2023-04-17;修回日期:2023-04-20

* 本文根据第311期“双清论坛”讨论的内容整理。

** 通信作者,Email: sjzhang@ipe.ac.cn

不够充分,亟需进行深入系统研究。

从化学工程的角度看,电化学储能过程可被视为电场作用下的一种特殊的跨尺度“三传一反”过程。以锂离子电池为例,其区别于一般化工过程的主要特点在于电场环境中电荷/物质/热量传递与电化学反应相互耦合和制约:一方面,反应(锂离子的脱嵌和转化)集中在 $\text{\AA} \sim \mu\text{m}$ 尺度的电极/电解质界面(图 1b)^[3],这直接关系到电池储能机制、能量密度、动力学性能等,而电极/电解质界面膜与双电层则通过改变离子的溶剂化结构、传输机制等对这一过程产生影响;另一方面,热量与荷电状态在纳微米(电极)、厘米(电池)甚至米(电池组及储能系统)尺度上存在差异,极片内部的离子和电子传输机制可通过内阻影响热量与荷电状态的局部均一性,进而与单体电芯、电池包结构一起影响储能器件的寿命和安全性(图 1c, d)^[4,5]。同时,由于电池结构自身的相对封闭性,致使其内部储能过程长期处于“黑箱”状态。尽管近年来由于原位检测和机器学习等技术的进步^[6],人们对电池的能量存储与转化过程有了更深入的认识,但仍有诸多化学工程基础科学问题亟需解决。为构建具有经济性、可靠性和安全性的大规模电化学储能系统,需要厘清材料—器

件—系统间的多尺度构效关系,从消费端出发进行“逆向设计”,同时需要揭示储能过程中“三传一反+X”的共性科学问题,研发变革性储能技术及系统,引领储能科学国际前沿,支撑国家“双碳”战略。

2 电化学储能技术研究进展

2.1 储能材料及器件

高效安全的电化学能源存储系统始终是储能研究追求的目标^[7]。在当前广泛应用电化学储能中,锂离子电池占 90% 以上,但也面临诸多挑战:(1) 能量密度低、电池续航短、充电慢及循环寿命短;(2) 宽温适应性差、在高低温环境下存在效率及安全问题;(3) 锂资源储量少,且分布不均匀。因此,储能材料和器件的创新对于大规模高效储能技术发展至关重要。

(1) 高电压、高比容量、长循环寿命电极材料

脱锂电压平台低、比容量低、循环寿命短是制约高效储能系统进一步发展的“瓶颈”,研发高性能新型电极材料是实现其突破的关键。目前新材料的开发主要包括三大类:转化型、嵌脱型以及合金型,包括具有优异循环性能的功能碳材料,具有高比容量和高脱锂电压平台的各类金属氧化物、硫化物和复合

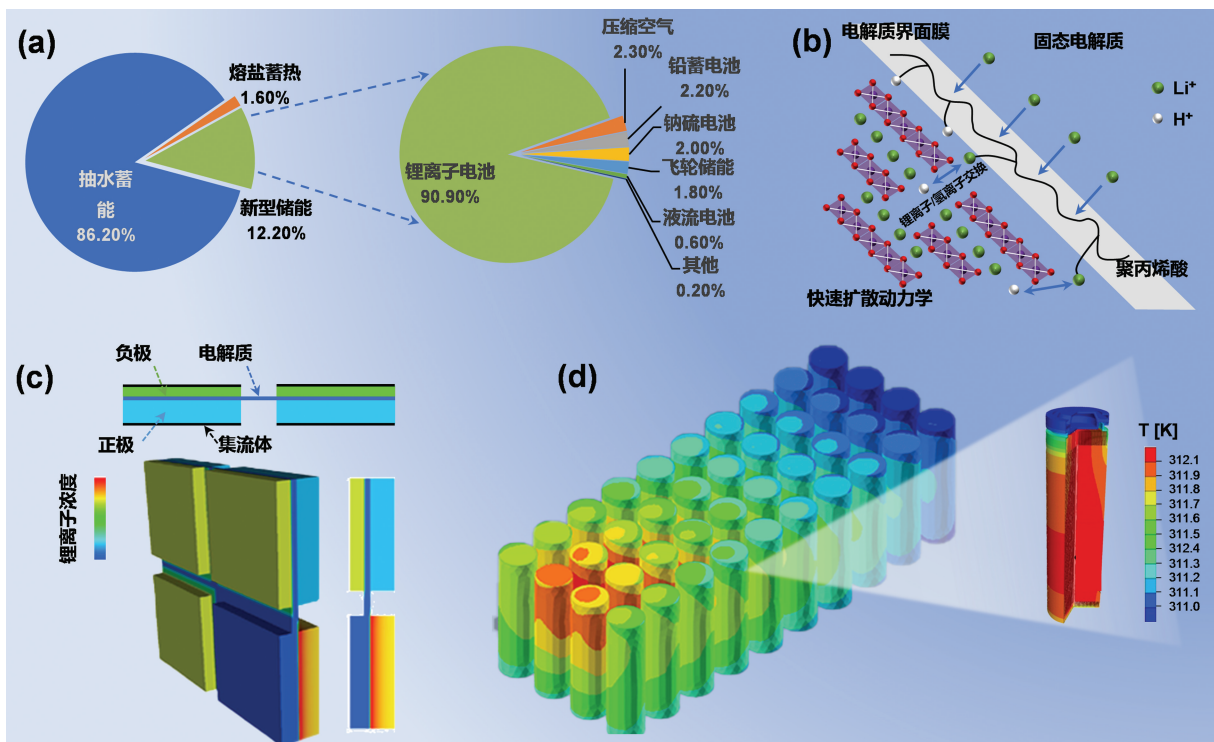


图 1 (a) 截止到 2021 年全球主要储能形式及其占比,新型储能中锂离子电池占比在 90% 以上^[2]; (b) 锂电池脱嵌锂(反应)过程发生在电极/电解质的纳微界面,界面膜对该过程有显著影响^[3]; (c) 集流体、电极涂层微米级的局部间断对脱嵌锂速度、产热速率均有一定影响^[4]; (d) 放电过程中电芯内部、电池包中不同位置的电芯^[5]的热分布在特定尺度上均呈现显著差异。

钙钛矿材料。各类材料都具有自身的优缺点,因此未来对储能材料的设计将向不同类材料的复合方向发展,以实现储能器件性能的最优。另外,由于电池循环寿命和容量与电极材料微观结构密切相关,但是微观结构的调控往往伴随着繁琐的合成方法,因此未来需要研发绿色、低成本、相对简单的储能材料可控制备技术。目前,商业锂离子电池的能量密度几乎达到极限,仍无法满足市场对高能量密度储能的需求,故新一代高比容锂离子电池正极材料正在向高容量层状或高熵材料发展,同时,负极材料正在向高比容、长寿命的改性石墨、硅碳、锂金属、黑磷等发展。进而,采用固态电解质与富锂锰正极、锂金属负极组装的全固态锂电池,不仅具有高能量密度、长周期稳定性,而且还具有良好的安全性^[8]。

(2) 高安全电解质

储能电池中的热失控等安全问题主要源于所使用的有机电解质,因此,开发新的电解质材料至关重要。离子液体具有电化学窗口宽、热稳定性好等优势,其与高电压正极、金属锂负极均有良好的相容性,也可减少锂硫电池的穿梭效应,因此在提升电池安全性、极端环境储能应用等方面倍受关注。中国科学院过程工程研究所研发了国内首套离子液体电解质规模化制备装置,并对离子液体在准固态、固态电池中的应用进行了系统创新^[9, 10]。目前,国内外相继研发出多种高电导率的固态电解质,并通过调控界面相来进一步提升电池的性能。固态锂电池同时具有高能量密度和高安全性等优势,有望成为未来混合动力汽车、柔性灵活储能器件等的重要选择。然而,全固态体系的离子电导率相对于液态电解质体系仍然比较低,倍率性能低成为“瓶颈”,因此,开发新型固态电解质、调控电极/电解质界面将是重要的研究方向。此外,水系电解质比传统的有机电解质更安全,但也存在诸多挑战,如电化学窗口窄、对极端环境的适应性差、储存寿命短等。通过合理的界面设计、电极三维化、电解质添加剂等措施,可解决水系电池中电解质分解、电极结构稳定性差等问题,促进水系电解质商业应用^[11]。

(3) 新型非锂储能器件

为应对锂资源储量的日益稀缺,开发新型非锂储能器件已成为解决这一问题的重要途径。钠离子电池因其资源丰富、成本低廉、安全性好等优势,有望应用于大规模储能。目前,国内钠离子电池产业链已逐步成熟,国内外众多公司积极投入钠电产业。为进一步提升钠离子电池的性能,重点是通过优化

电极材料、电解质和隔膜的性能,提升电荷传输效率和界面稳定性^[12]。为了促进其商业化应用,开发钠离子电池的无模组技术以提高系统能量密度是钠离子电池的一个重要研究方向。此外,锌离子电池也是具有较大潜力的电化学储能体系,兼具水基电解液安全性高和锌电极充放电快的双重优势,未来研究重点主要集中在设计电极结构抑制枝晶生长、开发大阴离子型弱酸性电解液等^[13]。

2.2 储能过程及调控机制

储能是一个涉及固固/固液界面、电子/离子/分子传输、热量传递及电化学反应的复杂过程。深入研究传递—电化学反应耦合机制(如电荷存储机制、容量退化机制、结构演化过程和电极/电解质界面反应等)将有助于构建高效储能器件及系统。

与锂离子电池相比,流体储能易放大,可实现大规模储能,主要包括液流(均相)和浆料(多相)两种体系。我国在流体储能技术领域的研发处于世界领先水平,其中全钒液流电池技术和示范取得诸多进展,包括深入揭示了电极、电解液、双极板、离子交换膜等关键材料的构效机制,研发了高效电池单体及集成系统,建成了全球规模最大的200 MWh/800 MWh 储能调峰示范并成功并网。由于钒价格飙升,为降低成本、减少环境影响,国内外也在积极探索锌溴、铁铬、全铁等低成本液流电池体系,但如何提升其能量密度、功率密度及稳定性等仍是亟待解决的难题。无隔膜液流电池可进一步简化反应器结构,且有更高的比能量,但沉积型金属电极也会带来枝晶及安全性问题,需要对电解液成分和电极结构进行优化。

浆料电池被认为是一种新的变革性储能技术,其能量存储于悬浮的固体活性颗粒中,兼具液流电池的可拓展性、功率与能量解耦,以及锂离子电池能量密度高的优点。然而,浆料流动、反应过程是复杂的多相化学工程问题,目前对浆料电极、电荷传输、流场结构等已有一定的认识,但对反应器和系统层次的研究较少。对于浆料电池反应器,最重要的是悬浮液与集流体间电子传输的连续性、特殊泵结构设计、电池模块设计、以及电极活性材料的固有特性等对器件性能的影响^[14]。中国科学院过程工程研究所在该领域有所突破,初步阐明了复杂多相浆料体系中电荷传递及多物理场耦合规律,构筑了高稳定高比容浆料、高离子电导隔膜和大容量电化学反应器,并设计了浆料储能集成系统^[15-17]。

总之,流体储能特别是浆料储能,是涉及多场、

多尺度、跨时空反应—传递等因素的十分复杂的系统工程,亟需采用化学工程的原理和方法对材料、反应器及系统进行创新,提高其工作和极限电流密度^[18]。例如,当电活性物质流经多孔电极时,强制对流(压力梯度)、扩散(浓度梯度)和迁移(电位梯度)等因素会影响电化学反应动力学,研究相应的流变性、流场调控机制,并进行流场优化设计,有利于降低流体储能体系的欧姆损耗、增强传质、提高极限电流密度和峰值功率密度^[19]。因此,围绕流体储能电化学反应器中复杂的物质传递、电荷传输和电化学反应调控规律,研究电荷/物质/热量传递规律及电化学反应动力学,揭示其耦合调控机制,进而提出强化电化学反应—传递的新策略,将推动高比能流体储能技术创新及系统变革^[20]。

2.3 智慧储能系统

储能系统涉及多个尺度和多个子系统,因而可利用大数据和智能技术进行跨尺度建模和优化,并与能源系统的其它设备进行协调,以便有效弥补分布式能源系统中能源供需在时间和空间上的不平衡,实现安全、高效、低碳的运行^[21]。随着计算机技术的发展,机器学习等智能技术在储能研发、服役工况下实时监测、以及多能互补系统智能调控等方面发挥着越来越重要的作用^[22]。

(1) 智能研发

在研发阶段,人工智能可有效加速储能材料的逆向设计、化工过程和器件层面的优化设计,从传统的“试错式”转变为由大数据、人工智能、自动高通量实验等为支撑的“智能设计”模式(图 2)。例如,在材料层面,通过量子计算、实验数据和机器学习的结

合,可快速设计并创制有潜力的聚合物材料,用于新型储能器件及系统^[23]。此外,目前储能的重要研究领域还包括多子传递、反应—反应耦合、传递—反应耦合、多场驱动等。结合先进表征、模拟计算、理论分析、大数据、人工智能和机器学习等方法,可以开展多场驱动、多子传递与电化学反应的协同优化,辅助跨尺度反应—传递过程的建模。通过各个层面的耦合,可实现处于开发阶段储能的全局智能研发。例如,目前已开展利用人工智能对特定场景的储能系统进行性能预测、优化设计、控制和运行的研究^[24]。

(2) 智能监控

在使用阶段,电池管理系统可以保障电池使用的安全性、延长电池寿命、降低成本、保障供电质量。其中,对荷电状态和健康状态的预测是关键。电池状态一般通过电池的电压、电流、温度等参数间接预测,且与运行条件和电池老化情况相关。针对上述两点,早期的电池管理系统主要基于启发式规则的策略,难以实现最优控制,而后又催生了一系列基于电化学模型、等效电路模型、卡尔曼滤波模型的优化策略,但存在计算成本较高的问题。而人工智能可以辅助理论模型和机制的创新,为能量转换动态过程的原位高时空分辨表征与分析创建新原理与新方法,实现实际工况下的电池原位监测和管理^[25]。最新研究正在积极探索基于机器学习和强化学习的控制策略,这类人工智能方法不需要模型,而且可以快速响应。例如,采用机器学习和贝叶斯优化开发的闭环电池测试系统,可保证实验结果与预测吻合,有效减少实验测试时间^[26]。

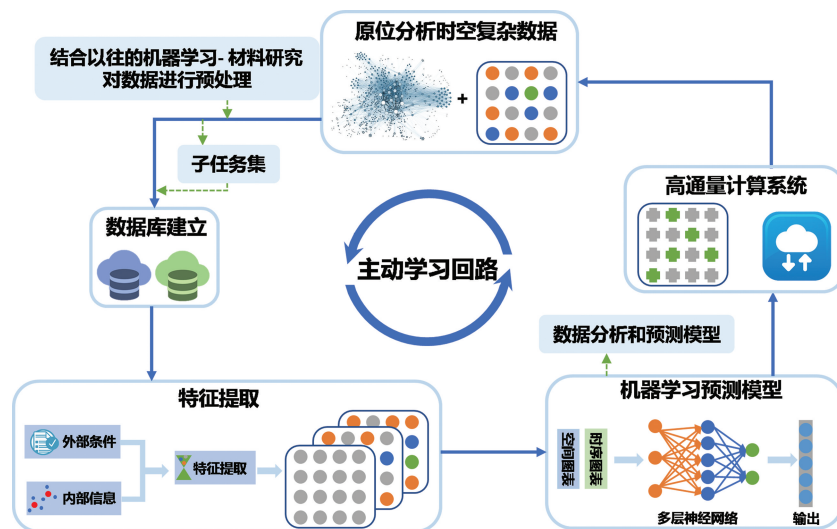


图 2 人工智能加速储能材料的逆向设计

(3) 智慧系统

在系统层面,利用人工智能与优化技术,可以通过对储能系统的控制实现整个能源系统各个尺度上的智能高效调度,实现经济、低碳、安全的运行。在区域能源系统尺度,已开发了深度学习的方法,根据预测的产能、负载、价格、荷电状态,利用储能充放电控制,实现多能互补系统的最优储能选型设计与调度,实现经济收益和运行稳定性的协调^[27]。除此以外,基于强化学习的调度策略,在应用于以储能为核心的多个实体之间的调度,可在区域能源系统中同时实现多个应用侧能源管理的全局优化。在工业和更大的尺度上,储能也将有助于克服可再生能源系统的波动问题,实现稳定、连续、安全的生产。此外,氢气储能将多余的可再生能源电力转化为氢能并存储,是一种被广泛认可的促进可再生能源主动参与电网调峰、提升新能源利用效率的化学储能方式(图3)。电化学储能可与氢气储能进行协同,通过氢电耦合,促进可再生能源主动参与电网调峰,提升新能源利用效率,基本可满足社会各行业不同形式的能源需求。利用人工智能技术对可再生能源—氢能混合系统与电网进行整合和优化,提高电力系统的弹性、可靠性和稳定性。在此基础上,还可以深入挖掘能源转型中能源—化工领域的耦合关系,通过可再生能源与化石燃料的协同利用,实现平稳过渡。此外,探索能源—化工多部门耦合系统,通过多能互补来生产电力、绿氢、甲醇和绿氨等能源载体以满足各类能源需求^[28]。

3 关键科学问题

近年来在储能机制解析、新材料开发、器件结构

优化、系统设计与管理等方面均取得了系列进展。但是,材料—器件—系统的贯通式研发模式尚未形成,储能过程中的“三传一反+X”也没有得到足够关注。主要原因在于储能过程是典型的跨时空、多学科交叉前沿领域,一方面,缺乏跨尺度的原位表征手段与模拟方法;另一方面,相关的基础研究与工业应用也呈现明显割裂。我国电化学储能尤其是锂电池产业目前处于全球前列,但欧美国家也在加紧布局,如美国 Battery 500 和欧洲 Battery 2030。美国更是将锂电池全产业链列入国家战略,在《2022年通胀削减法案》中提供 1 740 亿美元资金激励电动汽车的推广和电池工厂的建设。在此背景下,发展低资源依赖性的新型储能技术已成为必然趋势。传统的研发模式难以保证我国在储能领域的领先地位,而高污染、高能耗的生产模式也无法适应“双碳”战略的需求。因此必须建立系统性、协同性的研发模式,针对变革性电化学储能技术,重点突破制约其安全性、可持续性的化学工程科学问题,以期推动储能及可再生能源产业的发展。

针对基于可再生能源的智慧能源网络对储能技术在可靠性、规模、成本等方面的挑战,亟需解决涉及储能材料—器件—系统的四个关键科学问题:

(1) 面向储能工程的材料逆向设计与化工制备过程。传统的材料研发主要依赖于实验和经验尝试,难以满足不同储能场景对储能规模、功率/能量特性、响应时间等的特定要求。亟需基于大数据和人工智能技术,发展根据应用场景对储能系统—器件—材料进行逆向设计的新原理及新方法,加速新型能源材料设计,探索对材料结构及性能进行精准调控的新途径,形成材料的绿色低碳制备过程。

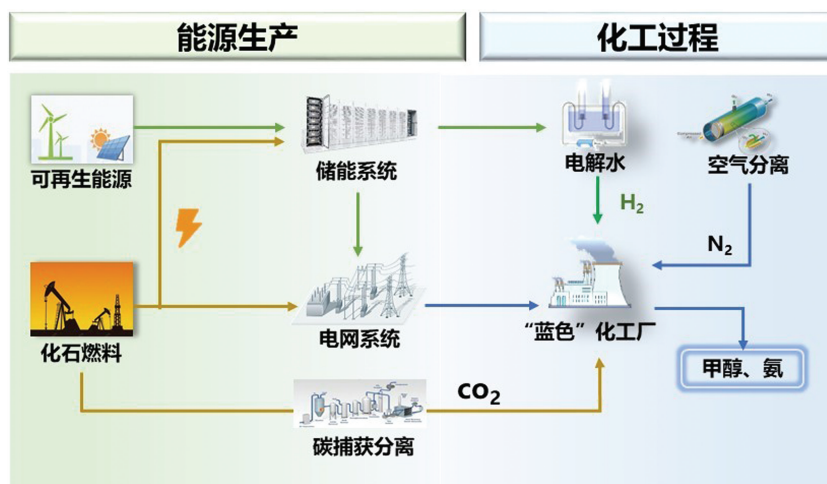


图3 氢电耦合促进可再生能源与化石燃料协同利用^[28]

(2) 电化学储能界面传递增强机制及其与反应的耦合机制。电极材料界面与体相的离子/电子传导机制有显著差异,从而对界面双电层结构、电场分布、离子的溶剂化/去溶剂化过程等均有显著影响,而离子穿过界面膜的速度、界面膜处的电势差进一步作用于电极和电解质,影响传递过程和电化学反应速率。双电层理论、Butler-Volmer 方程等经典理论无法准确描述这些过程,亟需发展适用于包含界面相的传递理论,厘清电化学储能过程中反应—传递的耦合机制。

(3) 储能系统的跨尺度关联与多能互补智能优化。电化学储能过程是典型的跨尺度问题,尤其在电—力—热耦合方面,微观尺度的应力分布与荷电状态不均衡在宏观上可表现为单体的热扩散甚至电池热失控。目前,无论是实验测试还是理论模拟,都缺乏从材料到器件再到储能系统的跨尺度关联性。亟需发展基于分子动力学、多物理场等的跨尺度模拟方法,并利用人工智能实现多能互补智能优化。

(4) 服役工况下储能系统、过程的原位表征与智慧管理系统。为更有效地推动源—网—荷—储一体化智慧能源系统的发展,需建立电化学储能器件和系统在服役工况下的原位实时表征方法,发展适配多种储能技术的高效实时智慧管理系统,实现主动均衡和智能管控,为构建多能互补的跨时空柔性智慧能源大系统提供支撑。

4 未来重点研究方向

为推动变革性电化学储能技术的进一步发展和应用,促进可再生能源的规模利用和能源结构优化,未来应重点关注以下研究方向。

4.1 新型储能材料

设计开发高性能、高安全、高稳定的储能材料是储能系统变革的源头和基础。建议的重点研究方向:高性能、低成本锂/钠离子电池电极材料;长寿命有机电极材料;高安全性、宽电压窗口、宽温程的新型电解质;适用固态储能、极端储能的离子液体电解质体系;高性能、低成本水系电池材料;超薄、轻质、耐热的隔膜材料;高电导率柔性固态电解质材料;高活性、高流动性、高安全性的正负极浆料体系;基于高丰度元素的低成本新型能源材料;储能材料的“基因组”设计及逆向设计。

4.2 新型电池结构及储能过程

电池及储能过程的解析是发展大容量、长寿命、高性能、低成本储能器件及系统的关键。建议的重点研究方向:电化学界面及其形成过程的新理论与新机制;电荷存储机制、容量退化机制及结构演变过程;多场下多子传递—电化学反应耦合模型及模拟方法;多相复杂流体电极中物质流动—电化学反应—电荷转移间的耦合规律及调控机制;储能过程的热—电—力等协同作用机制;储能过程的原位实时表征、安全性评估模型及预测方法;电池结构及器件构型对电化学性能的影响规律;大容量高稳定性浆料电池结构优化设计及其放大规律;高性能、低成本的水系大容量电池及液流储能新体系;高性能固态电池、金属—空气电池等新型储能体系。

4.3 智慧能源系统

研发基于大数据和人工智能的智慧能源系统是构建以新能源为主体的多能互补新型能源系统的根本。建议的重点研究方向:服役工况下电化学储能器件和系统的原位动态实时表征技术及快速响应策略;适应于新能源波动性及多种储能方式的多尺度大系统模拟优化技术;多源高通量储能实时监测及大数据平台;基于大数据、人工智能、5G 的储能单体—器件—系统智能管理及调配软硬件系统;基于氢电耦合、多能互补、适用于多种应用场景的未来能源大系统的构筑及可行性评估。

4.4 储能产业链

构建包括关键原材料、智能装备、多能多场景系统的储能产业链是促进新能源产业可持续健康发展的重要保障。建议的重点研究方向:面向未来的储能全产业链顶层设计与系统规划;储能关键原材料的绿色低碳生产技术与安全供给系统;退役电池的全组分经济性循环利用技术及工艺;关键材料及核心器件的先进智能制造设备;储能产业链的全生命周期及碳足迹评估。

5 结语

本文从化学工程的角度,系统分析电化学储能技术的现状、挑战及趋势,凝练了储能材料—器件—系统中的关键共性科学问题,提出了未来的重点研发方向。储能具有典型的多学科交叉及跨部门、跨行业特征,也是电场作用下特殊的化工过程,希望更多的化学工程科研人员能够积极投入到储能技术的

研发中来,共同推动储能技术的变革及大规模产业化应用。

建议加强多学科交叉融合,支持建设储能科学与工程交叉团队;在高校、研究机构设立储能科学与工程专业,设立“新能源化工”科学中心;设立新能源及储能企业联合基金,构建应用导向、问题导向、成果导向的协同研发新模式,推动储能技术及产业不断进步,为实现双碳目标和能源绿色低碳转型发展提供科技支撑。

参 考 文 献

- [1] 胡森林. 能源的进化: 变革与文明同行. 北京: 电子工业出版社, 2019.
- [2] 中关村储能产业技术联盟. 《储能产业研究白皮书 2022》. (2022-04-20)/[2023-04-17]. http://www.esresearch.com.cn/pdf/?id=289&type=report&file=remark_file.
- [3] Zhang QP, Zhang NN, Yu TH, et al. High-performance PEO-based solid-state LiCoO₂ lithium metal battery enabled by poly(acrylic acid) artificial cathode electrolyte interface. *Materials Today Energy*, 2022, 29: 101128.
- [4] Naguib M, Allu S, Simunovic S, et al. Limiting internal short-circuit damage by electrode partition for impact-tolerant Li-ion batteries. *Joule*, 2018, 2(1): 155—167.
- [5] Kremer P, Cigarini F, Göhlich D, et al. Active cell balancing for life cycle extension of lithium-ion batteries under thermal gradient. 2021 IEEE/ACM International Symposium on Low Power Electronics and Design (ISLPEDE). Boston, MA, USA. IEEE, 2021: 1—6.
- [6] Li JZ, Sharma N, Jiang ZS, et al. Dynamics of particle network in composite battery cathodes. *Science*, 2022, 376(6592): 517—521.
- [7] Goodenough JB. Evolution of strategies for modern rechargeable batteries. *Accounts of Chemical Research*, 2013, 46(5): 1053—1061.
- [8] Zhang X, Wang XG, Xie ZJ, et al. Recent progress in rechargeable alkali metal-air batteries. *Green Energy & Environment*, 2016, 1(1): 4—17.
- [9] Yao, M, Ruan QQ, Pan SS, et al. An ultrathin asymmetric polymer electrolyte with intensified ion transport regulated by biomimetic channels enabling wide-temperature high-voltage lithium-metal battery. *Advanced Energy Materials*, 2023, 13(12): 2203640.
- [10] Song XL, Wang CL, Chen JW, et al. Unraveling the synergistic coupling mechanism of Li⁺ transport in an “ionogel-in-ceramic” hybrid solid electrolyte for rechargeable lithium metal battery. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(10): 2108706.
- [11] Bin D, Wen YP, Wang YG, et al. The development in aqueous lithium-ion batteries. *Journal of Energy Chemistry*, 2018, 27(6): 1521—1535.
- [12] Sun Y, Shi PC, Xiang HF, et al. High-safety nonaqueous electrolytes and interphases for sodium-ion batteries. *Small*, 2019, 15(14): 1805479.
- [13] Zhao K, Fan GL, Liu JD, et al. Boosting the kinetics and stability of Zn anodes in aqueous electrolytes with supramolecular cyclodextrin additives. *Journal of the American Chemical Society*, 2022, 144(25): 11129—11137.
- [14] Smith KC, Chiang YM, Craig Carter W. Maximizing energetic efficiency in flow batteries utilizing non-Newtonian fluids. *Journal of the Electrochemical Society*, 2014, 161(4): A486—A496.
- [15] Wang RJ, Yang LP, Li J, et al. High rate lithium slurry flow batteries enabled by an ionic exchange Nafion composite membrane incorporated with LLZTO fillers. *Nano Energy*, 2023, 108: 108174.
- [16] Pan SS, Yang LP, Su PP, et al. Robust multiscale electron/ion transport and enhanced structural stability in SiO_x semi-solid anolytes enabled by trifunctional artificial interfaces for high-performance Li-ion slurry flow batteries. *Small*, 2022, 18(33): 2202139.
- [17] Yang K, Xiong SP, Zhang HT. A comprehensive 3D multiphysics coupled simulation model of slurry redox flow batteries. *Journal of Power Sources*, 2022, 531: 231315.
- [18] Marschewski J, Brenner L, Ebejer N, et al. 3D-printed fluidic networks for high-power-density heat-managing miniaturized redox flow batteries. *Energy & Environmental Science*, 2017, 10(3): 780—787.
- [19] Ke XY, Prah JM, et al. Rechargeable redox flow batteries: flow fields, stacks and design considerations. *Chemical Society Reviews*, 2018, 47(23): 8721—8743.
- [20] Chayambuka K, Fransaer J, Dominguez-Benetton X. Modeling and design of semi-solid flow batteries. *Journal of Power Sources*, 2019, 434: 226740.
- [21] 何雅玲, 严俊杰, 杨卫卫, 等. 分布式能源系统中能量的高效存储. *中国科学基金*, 2020, 34(3): 272—280.

- [22] Feng QK, Zhong SL, Pei JY, et al. Recent progress and future prospects on all-organic polymer dielectrics for energy storage capacitors. *Chemical Reviews*, 2022, 122(3): 3820—3878.
- [23] He ZY, Guo WM, Zhang P. Performance prediction, optimal design and operational control of thermal energy storage using artificial intelligence methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 156: 111977.
- [24] 程俊, 黄蕊, 雷惊雷, 等. 电化学能源核心技术的关键科学问题. *中国科学基金*, 2020, 34(3): 350—357.
- [25] Attia PM, Grover A, Jin N, et al. Closed-loop optimization of fast-charging protocols for batteries with machine learning. *Nature*, 2020, 578(7795): 397—402.
- [26] 杨勇平, 段立强, 杜小泽, 等. 多能源互补分布式能源的研究基础与展望. *中国科学基金*, 2020, 34(3): 281—288.
- [27] Li LY, Zhou TX, Li JL, et al. A machine learning-based decision support framework for energy storage selection. *Chemical Engineering Research and Design*, 2022, 181: 412—422.
- [28] Li YN, Lan S, Ryberg M, et al. A quantitative roadmap for China towards carbon neutrality in 2060 using methanol and ammonia as energy carriers. *iScience*, 2021, 24(6): 102513.

Scientific Viewpoints of Chemical Engineering for Transformative Energy Storage

Suojiang Zhang^{1*} Haitao Zhang¹ Lan Zhang¹ Yanli Zhu² Xiaonan Wang³
Yao Li¹ Tao Dong¹ Guojun Zhang⁴ Junlin Yang⁴

1. *Institutes of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190*

2. *School of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081*

3. *Department of Chemical Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084*

4. *Department of Chemical Sciences, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085*

Abstract This review summarizes the R&D status and trends of electrochemical energy storage technology. The main challenges related to the development of transformative energy storage technology are analyzed from the viewpoint of chemical engineering discipline, and the key scientific problems in materials, devices and systems of energy storage are put forward. “New Energy Chemical Engineering” and the future research priorities are proposed, which are expected to improve the R&D level of China’s transformative energy storage, and play strategic, fundamental and leading role in economic and social development.

Keywords electrochemical energy storage; new energy chemical industry; scientific problems; research focus

(责任编辑 崔国增 张强)

* Corresponding author, Email: sjzhang@ipe.ac.cn