

电化学储能技术在多场景应用背景下的创新和实践

文/姜炎君¹ 王金锋¹ 孙晓晨¹ 曹敏² 徐晓³

1.国网陕西省电力有限公司经济技术研究院；2.国网陕西省电力有限公司市场营销部（农电工作部）

3.国网电力科学研究院（武汉）能效测评有限公司

电化学储能技术是解决以太阳能、风能为基础的新能源发电的不稳定性、不连续性和随机性导致其所发的电能不能直接稳定地并入电网而使用的关键技术，也是推动实现“双碳减排”目标、优化能源产业结构的重要抓手。从电化学储能的技术特点出发，系统分析了典型的电化学储能电池种类及其储能材料的应用，以及电化学储能技术在发电侧、输配电侧、用户侧的典型应用场景和未来发展的重点方向。

2022年是我国实施国家能源战略的关键之年，也是实现“双碳减排”目标的重要之年。优化产业和能源结构作为实现“双碳减排”目标的核心驱动力，减少煤电消耗并大力发展以风能、太阳能及水能为代表的可再生能源刻不容缓。但由于以太阳能为代表的可再生能源发电具有不稳定性、不连续性和随机性特点，所产生的电能难以直接稳定地并入电网使用。要想大规模使用风、光、水等新能源发电，必须借助储能技术将电能进行有效存储，再经过一定的转换、输出和并网。因此，储能技术的规模化发展奠定了新能源领域高质量发展的可能性和应用性，而储能技术的提升和突破又决定了电网安全、电能质量以及能源利用效率。据统计，2021年我国储能市场新增储能装机为7 397.9 MW，累计装机规模达43.44 GW。其中，以抽水储能为代表的传统储能方式累计装机规模占比超总量的86%，电化学储能等新型储能方式占比不足1/7。

储能技术按照能量存储方式与转换形式的不同，可分为机械储能、电化学储能、电磁储能和相变储能等类型。机械储能包括抽水蓄能、压缩空气储能及飞轮储能，其主要优点是技术成熟、能量存储规模大及储能效率较高，缺点是对选址要求高、

建设周期长且投资成本大；电磁储能包括超导储能、超级电容储能及高能密度电容储能等，其优点是放电毫秒级、功率密度高且响应速度极快，但存在能量密度低、投资成本高及存在自放电等缺点；相变储能包括熔融盐储能和冰蓄冷储能等，其优点是储能密度高、稳定性好、寿命长及环境友好，但对材料抗腐蚀性要求极高。电化学储能是将化学能和电能进行相互转化的储能方式，也称为电池储能，在储能中主要利用二次电池作为能量转换的主要载体，相比前三种技术，电化学储能技术更成熟、成本更低、效率更高且受限更小，更适合应用于大规模储能领域。

本文从电化学储能的技术特点出发，系统分析了各类电化学储能技术的优缺点、材料应用领域及其在发电侧、输配电侧及用户侧的典型应用场景，并对电化学储能技术的创新发展路径提出了若干思考，为电化学储能的创新发展之路提供借鉴意义。

电化学储能技术及其储能材料

目前主流的电化学储能技术主要包括铅酸电池、镍氢电池、镍镉电池、锂离子电池、钠硫电池及液流电池等，种类众多且部分已经应用到大规模

储能示范项目。

1. 锂离子电池及其储能材料

(1) 锂离子电池

锂离子电池的原理是利用锂离子在正负极之间迁移实现充放电，按照类型可细分为传统锂离子电池和新型锂离子电池。其优点是能量密度大、循环寿命长及工作电压高等；缺点是在高温、大电流工作环境下及锂枝晶刺破隔膜时可能会造成短路，存在严重的安全隐患。锂离子电池的具体分类情况见表1。

表1 锂离子电池技术对比

电池类型	电压/V	比能/(w·h/kg)	充电C率/C	放电C率/C	循环寿命/次	热失控/℃
钴酸锂	3.0~4.2	150~200	0.7~1	1~2.5	500~1 000	150
锰酸锂	3.0~4.2	100~150	0.7~1	1~2.5	300~700	250
镍钴锰酸锂	3.0~4.2	150~220	0.7~1	1~2.5	1 000~2 000	210
镍钴铝酸锂	3.0~4.2	200~260	0.7	1~3	500	150
磷酸铁锂	2.5~3.65	90~120	0.7	1~2.5	1 000~2 000	270
钛酸锂	1.8~2.85	50~80	1	1~1.8	3 000~7 000	安全性高

(2) 锂离子电池储能材料

为解决锂离子电池因能量密度高而可能在高温与大电流工作条件下及锂枝晶刺破隔膜时存在的安全隐患，需要在高能量密度条件下仍能保持原有特性的材料来提升该应用的安全性。例如，高容量、长循环寿命的聚合物衍生碳基负极材料，高吸附阴离子的金属有机骨架/聚合物复合隔膜、高安全三元锂离子电子电解液成膜添加剂，氧化铜纳米花包裹钛网结构三维集流体，金属氰胺化合物及富氧多孔炭等材料。

2. 钠离子电池及其储能材料

(1) 钠离子电池

钠离子电池的工作原理与锂离子电池类似，如图1所示（充电时，钠离子从正极脱出经过电解液嵌入负极中，为平衡电荷电子，从外电路向负极移动；放电时，则完全相反）。

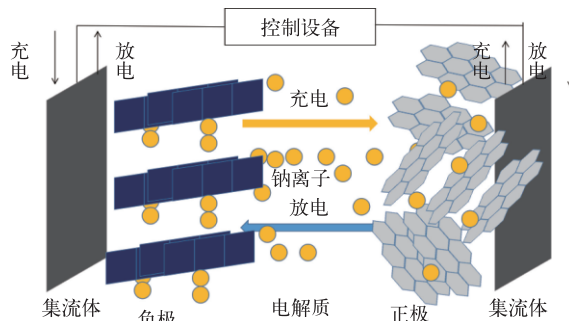


图1 钠离子电池工作原理示意图

相较锂离子电池，钠离子电池能量密度低，动力学速率较慢，电池储能倍率性能较差，对材料要求较高。其优势在于成本低、无过放电且较锂离子电池安全性能较好，能量密度为100~150 W·h/kg，在零下20℃的低温条件下仍然能达到88%以上的放电保持率。

(2) 钠离子电池储能材料

目前，先进的钠离子储能材料主要有三大类：一是新型聚阴离子正极材料，因其化合物结构具有结构稳定、可调性强、循环性能好及环境友好等特点被广泛应用，如近年来兴起的铁基混合聚阴离子化合物（ $\text{Na}_4\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2\text{P}_2\text{O}_7$ ）、钠超离子导体等；二是硫掺杂黑磷-二氧化钛复合负极材料，其最大的优点是理论容量高、结构稳定，是目前应用潜力较大的钠离子电池负极材料，如以 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 为碳源制备的多级多孔杂化纳米片（NSs-APAM），是以高能球磨法制备的抗氧化、高容量的硫掺杂黑磷和二氧化钛复合物；三是富氧多孔炭，由于具有表面活性好、结构稳定性高、价格低廉及获取渠道广泛等优点，常作为钠离子电池储能材料。

3. 锂硫电池及其储能材料

(1) 锂硫电池

锂硫电池是指采用硫或硫复合物为正极，金属锂或含锂材料为负极，以硫-硫键的断裂和生成实现电能与化学能相互转换的一类电池系统。锂硫电池最大的特点是能量密度高，高出一般传统锂离子电池的7倍左右，但由于其电子/离子导电性差，氧化还原动力学迟缓，电极结构容易被破坏，腐蚀金属“穿梭效应”破坏大，具有能量衰减快、循环寿命短等缺陷。锂硫电池的结构示意图如图2所示。

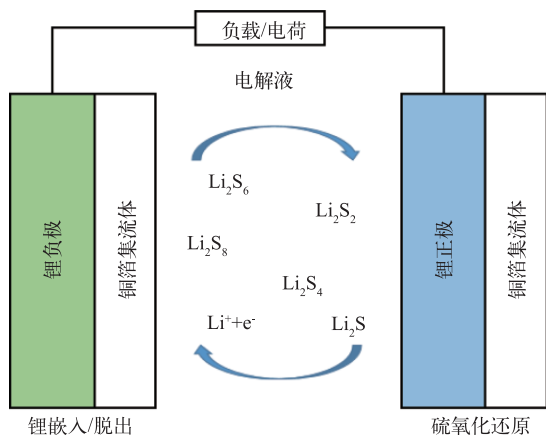


图2 锂硫电池结构示意图

(2) 锂硫电池储能材料

为消除锂硫电池在充放电过程中正负极材料体积变大、电极结构容易遭到破坏而导致的容量衰减快、电池寿命短等缺点，目前应用广泛的材料有：具有高孔隙率、高稳定性及高比表面积的纳米碳-金属氧化物复合正极材料（如富氮碳纳米球等）；能够减少多硫化物溶解并有效降低“穿梭效应”的硫化亚锡纳米片复合多孔碳纳米片修饰隔膜（如SnS/PCNS等）；能够增强电子传输的多孔炭基质木材纳米材料等。

4. 液流电池及其储能材料

(1) 液流电池

液流电池的原理是通过电池将化学能转化为电能，再将液体泵出反应室。主要组成部分有点堆单元、电解液、存储供给单元及管理控制单元等，具有使用周期长、效率高及容量高等特点，常用于独立的电网系统中。

(2) 液流电池储能材料

目前应用于液流电池储能材料较多，主流的储能材料主要有：①生物质衍生碳材料，如玉米蛋白合成的新型氮原子电极催化剂；②复合型导电塑料电极，如一般聚合物（尼龙、聚乙烯等）和导电物质（石墨粉、石墨纤维等）按一定比例混合转换；③由深圳先进院成功制备的具有高效电化学活性的新型石墨烯/碳毡分级全钒液流电池电极材料。

5. 超级电容器及其储能材料

(1) 超级电容器

超级电容器是20世纪七八十年代兴起的一种介于传统电容器和二次电池之间的新型储能装置，

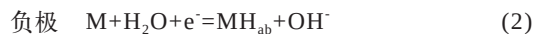
具有快速充放电和二次储能特点，也具有使用寿命长、温度特性好、充电时间短、节约能源和绿色环保等优势，最大特点是电容容量超高，是电解电容器的2 000~6 000倍。不足之处在于能量密度偏低、漏电流较大且工作电压低。

(2) 超级电容器储能材料

目前，应用于超级电容器的材料较多，如氟掺杂纳米多孔碳电极，具有高比表面积和高电导率特点；高性能相变型复合电解质具有多功能性、高离子电导率及高安全性等优点；再如金属氰胺化合物、富氧多孔炭、木基/碳材料复合电极材料、木基/金属氧化物复合电极材料及木基/导电聚合物复合电极材料等。

6. 镍基电池及其储能材料

镍基电池的基本原理是分别将氢氧化镍作为正极，锌、铁、氢及镉等作为负极材料，氢氧化钾作为电解质，具有寿命长、能量密度高且记忆高等特点，但低环保性和高价格在一定程度上影响其应用。以镍氢电池为例，镍氢电池正极活性物质为Ni(OH)₂（称NiO电极），负极活性物质为金属氢化物，其充放电化学反应过程如下：



7. 金属空气电池及其储能材料

金属空气电池的原理是以锂、钙、镁、铁、铝和锌等金属电极作为阳极，以氧气作为阴极。其中，锂-空气（Li-空气）电池理论能量密度非常高（11.14 kW·h/kg），比能量超过其他类型电池的100倍以上，应用前景最为广阔。但由于金属空气电池起火风险高，在水汽较高的情况下可能引起火灾。

典型应用场景

1. 电化学储能在发电侧的应用场景

电化学储能在光伏发电领域以能量型应用为主，在风力发电领域以功率型应用为主。一方面，利用电化学电池的充放电双向性，当新能源发电量超出电力系统上限时，储能系统能够及时存储产量过剩的电能；当新能源发电量受天气等因素影响低于电力系统下限时，储能系统能够及时释放存储

的电，从而提升新能源发电接入电力系统的稳定性。另一方面，电化学储能设备能够在发电侧辅助火电参与调峰调频并依靠电力电子设备调节电力系统功率，调节范围远大于传统火电，爬坡速度快、调节精度高且响应迅速，具有削峰填谷的双向调节作用，有效提高设备稳定性与利用率。

2. 电化学储能在输配电侧应用场景

电化学储能技术可以有效解决地理环境限制、配电紧张及电力资源分配浪费等问题，应用于全年最大负荷时间短或存在明显的季节性负荷高峰，变电站站址空间和输电走廊受限，大规模电源供入需求通道阻塞，大电网无法延伸的偏远地区等场景中，是解决电网“窝电”、提升新能源消纳水平的重要手段。电化学储能因具有功率和能量时间迁移能力强、控制和响应速度快等优点，可以解决新能源从电网吸收无功时造成的系统无功裕度降低、静态电压稳定性下降及新能源出力波动性变大等问题，有效改善发电静态出力特性和动态响应特性，帮助新能源发电的无功功率双向流动、无功功率的交流，是电网无功电压支撑的首选。

3. 电化学储能在用户侧应用场景

电化学储能在用户侧的应用主要包括电力自发自用、峰谷价差的商业模式带来的利润、容量电费管理及供电可靠性的提升等方面，一般在各类大型企业和产业园区应用较为广泛。其主要应用场景模式包括用户储能、光储一体化、储能一体化及备用电源等，如兼具削峰填谷、需求响应及应急供电等功能的无锡新加坡工业园储能电站项目；兼具储能电站与光伏电站的南通河口集装箱群储能电站光储一体化典型项目；上海嘉定国际汽车城投资的充换储一体化电站项目等。

电化学储能的创新路径思考

1. 突破锂电池技术瓶颈

从目前全球电动汽车的快速发展趋势来看，突破锂离子电池技术已经成为电化学储能技术领域的重中之重。锂离子电池技术相对成熟，产业链健全。但对我国而言，锂资源储备的地理位置相对偏远，开采难度较大，生产成本较高，且电池安全性能需要提升等问题依旧较为突出。因此，要聚焦当前技术难题，从锂离子电池现有技术产业链基础

出发，突破源头、生产及应用的全过程技术瓶颈。

2. 提升新材料应用水平

电化学储能技术大规模推广和应用的前提是储能材料的安全性与稳定性。因此，进一步开发高安全性、长寿命的锂离子电池，高稳定性和高倍率性能的锂硫电池，高能量密度的超级电容器以及着重设计固态电解质，探究负极的金属沉积机理，并实现抑制枝晶生长，电化学储能材料在低位、柔性条件下的适用性至关重要。

3. 延长变流器寿命时间

变流器是连接电源、电池及电网的关键环节，既决定了输出电量的质量，也是延长电池使用寿命的重要载体，是储能变流器的核心部件。目前我国储能变流器产业基础相对薄弱，市场竞争力不强。因此，要提升储能电池充放电的能力，必须要丰富储能变流器的应用场景，实现变流器技术从单一的储能备用向光储一体的变流器转变。

4. 加强智慧化管理运营

要实现电化学的大规模储能，必须要实现管理的智能化，利用自动化、信息化、大数据及人工智能等技术达到储能的“供、储、送、管”的全过程动态智能管理和数字化运营，实现储能的可追溯、可监控、可预测。具体来说，需要建立能量管理系统，通过运营管理平台，整合分散的储能系统，打造虚拟电厂，提升储能电站精细化管理以及调度电网服务和电力交易的水平。

结束语

电化学储能技术是实现“双碳减排”目标、优化产业能源结构的重要抓手。从电化学储能的技术特点出发，系统分析了电化学储能电池种类与储能材料应用，及其在发电侧、输配电侧及用户侧的典型应用场景和未来发展的重点方向，对电化学储能技术创新路径发展提供借鉴意义。EA

参考文献

- [1] 余民，杨旻宸，蒋传文，等．风电并网后电力系统可靠性评估和备用优化研究[J]．电力系统保护与控制，2012，40(12)：6．
- [2] 张森．我国储能行业2021年发展情况分析与发展趋势展望[J]．电气时代，2022(6)：4．