

# 新能源电力系统中储能材料的性能发展前景

李世尊

北京市华电科工股份有限公司 北京丰台 100070

**摘要:** 新能源电力系统规模化发展给储能材料性能提出了多元化、高标准的要求, 储能材料是能量存储和调节的核心载体, 其性能的好坏直接决定了电力系统的稳定性、经济性和适配性。本文从储能材料的核心性能优化、新型材料技术突破、场景适配发展三个方面入手, 探究能量密度和循环稳定性协同提升的途径、极端环境适应性和安全性同步优化的方法、非锂体系、复合杂化等新型储能材料性能突破的潜力、分布式和大规模储能场景下材料性能定制化的发展趋势。储能材料正朝着多性能协同优化、新型体系创新突破、场景精准适配方向发展, 其性能提升为新能源电力系统高效消纳、安全运行、规模化发展提供重要支撑, 未来有望形成多元技术协同的储能材料生态系统, 推动新型电力系统高质量、可持续发展。

**关键词:** 新能源电力系统; 储能材料; 性能优化; 发展前景; 新型储能材料

## 引言

在全球能源转型以及“双碳”目标的驱动下, 新能源电力系统正在快速向高比例可再生能源、源网荷储深度互动的方向转型, 风能、太阳能等波动性、间歇性电源的大规模并网, 给能量存储和灵活调控能力提出了严峻的考验。储能材料是储能系统的重要组成部分, 它的能量密度、循环寿命、安全性能、环境适应性等重要指标, 直接决定新能源电力系统消纳效率和运行稳定性。随着电力系统对储能需求由单一的能量存储向电网支撑、应急备用、多能互补等多元功能拓展, 储能材料的性能发展成了突破技术瓶颈、激活储能市场潜力的关键抓手。

## 一、新能源电力系统中储能与储热材料的性能协同优化前景

### 1. 核心储能指标与储热指标的协同提升

储能、储热材料的性能优化要集中于核心指标的平衡突破, 依靠材料结构设计、成分调控来达成性能提升, 这是适配新能源电力系统的第一要务。电化学储能方面, 能量密度和循环稳定性同时提高依靠纳米结构工程以及界面优化技术。硅基负极材料中, 硅纳米线阵列或者多孔硅结构可以缓冲锂离子嵌入/脱嵌时300%的体积膨胀, 减少电极粉化; 硅碳复合材料形成的三维导电网络, 可以在保持800mAh/g以上的比容量的同时, 实现1000次循环后容量保持率大于85%。锂硫电池用多孔碳-金属有机框架(MOF)复合正极固定多硫化锂中

间体, 循环寿命已经突破2000次, 弥补了高理论能量密度(2600Wh/kg)下稳定性不足的缺陷。

储热材料领域储热密度和传热效率的协同优化是主要课题, 熔盐材料的改性技术成了研究重点。传统的纯熔盐(硝酸钠等)虽然储热密度较高(约174J/g), 但是导热系数低( $0.5\text{--}1.0\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ), 影响换热效率。通过纳米复合改性, 在硝酸钠中掺入1.0wt%石墨烯纳米片形成的GNS@NaNO<sub>3</sub>复合体系, 可以构建连续导热网络, 使导热系数提高30%以上, 同时利用石墨烯的分散稳定作用, 避免熔盐凝固时出现相分离的问题。对于共晶熔盐体系, 比如KNO<sub>3</sub>-NaNO<sub>3</sub>二元共晶盐(质量比50:50), 改变成分比例, 将熔点降到220℃, 储热密度大于150J/g的情况下, 拓宽了使用温度范围, 适合于中低温工业余热回收。

### 2. 安全性与环境适应性的同步优化

全生命周期风险防控、多场景兼容能力, 是储能和储热材料应用范围的拓展。电化学储能领域, 固态电解质技术正在取代传统的液态电解液, 石榴石型LLZO(Li<sub>7</sub>La<sub>3</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>12</sub>)或者硫化物Li<sub>10</sub>GeP<sub>2</sub>S<sub>12</sub>固态电解质可以彻底消除电解液泄漏燃烧的风险, 基于LLZO的全固态锂电池在1C倍率下循环500次之后库伦效率仍然保持在99.5%以上, 高温下没有热失控的风险。低温环境下, 氟代碳酸乙烯酯混合电解液使锂电池工作温度扩大到-40℃, 碳纳米管复合电极保证-30℃下容量保持率大于70%。

熔盐储热材料的安全性优化主要从高温腐蚀防控、热稳定性提高两方面入手。高温氯化物熔盐(MgCl<sub>2</sub>-NaCl-KCl体系)适用温度可达700℃以上,但是对金属结构腐蚀性很强。添加1wt%的镁作为腐蚀抑制剂,在合金表面形成致密的MgO保护层,使Hastelloy® C-276合金的腐蚀率降低94%;预氧化处理的Fe-Cr-Al合金表面形成的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>氧化膜,也能有效阻挡熔盐的侵蚀,500小时高温服役后结构完整。极端环境适配,高纬度地区光热电站采用硝酸盐-氟化物复合体系,用LiF降低熔盐凝固点到180℃,防止冬季低温冻堵;沙漠地区加入纳米Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>颗粒提高熔盐热稳定性,使565℃下的热分解率降到0.02%/年以下。

## 二、新能源电力系统中储能与储热材料的性能突破方向

### 1. 非锂体系与高温储热材料的性能拓展

非锂体系储能材料和高温储热材料凭借资源优势 and 性能特点,成为多元化储能体系的重要支撑。钠基储能材料依靠钠元素2.75%的地壳丰度(锂的400倍),实现成本降低30%-50%,碳包覆硬碳负极配合低温电解液,使钠电池可以在-40℃至60℃宽温域工作,解决高寒地区储能难题。全钒液流电池用多孔碳毡电极和离子液体电解质优化,能量转化效率由原来的75%提高到85%,循环寿命大于15000次,可以满足新能源基地长时调峰的需求。

熔盐储热材料已经形成了多体系分类和结构化发展的格局,根据成分可分为硝酸盐、氯化物、氟化物和混合盐四大类:硝酸盐体系(Solar Salt: 60%NaNO<sub>3</sub>+40%KNO<sub>3</sub>)成熟度最高,工作温度290℃到565℃,三峡恒基能脉瓜州光热电站就采用这种熔盐,可以储存10万千瓦机组6小时满负荷发电的热能,实现24小时连续供电;氯化物体系(MgCl<sub>2</sub>-NaCl-KCl)工作温度500℃到800℃,储热密度达到300kJ/kg以上,适合下一代高效光热电站;氟化物体系(LiF-NaF-KF)虽然熔点高(454℃),但是高温稳定性非常好,可以用于核能-光热联合系统。

### 2. 复合杂化与协同储能材料的创新应用

复合杂化技术可以克服单一材料性能的不足,使得储能和储热系统互相配合共同发展。纳米复合储能材料中,纳米硅碳复合负极和三维石墨烯网络相结合,使锂电池比容量达到2500mAh/g,充放电速率提高到5C,目前已经实现吨级量产。有机无机杂化材料如聚吡咯/二

氧化锰电极,用核壳结构设计使离子扩散系数提高3倍,弯曲5000次后容量保持率仍达95%,适合于柔性储能。

储热材料的复合化发展具有“功能叠加”的特点,相变复合熔盐通过在硝酸盐里掺入5%到10%的脂肪酸甲酯来提高储热密度至200J/g,并利用相变潜热来实现热量的稳定释放;导热增强复合熔盐使用“石墨烯和碳纳米管”双填充体系构建三维导热网络来解决纯熔盐导热系数低的固有缺陷。更加有突破性的是电化学-储热协同材料体系,钠电池和熔盐储热的集成系统共用散热装置,将电池运行温度控制在25-40℃,回收的废热用来预热熔盐,使系统的综合能效提高15%。

## 三、新能源电力系统中储能与储热材料的场景适配发展趋势

### 1. 分布式储能场景的材料性能定制化

由于分布式场景多元化的需求,储能、储热材料趋向于定制化发展。户用场景下,用户对储能装置的安装便捷性、安全性、经济性要求很高,钠离子电池由于资源优势成为首选,采用普鲁士蓝类似物正极和硬碳负极的组合,用界面包覆技术减少充放电过程中的副反应,能量密度达到120Wh/kg,成本比传统锂电低30%-40%。配合一体化集成封装技术,把电池模组、散热系统、管理系统高度融合,简化结构、降低终端成本的同时,优化电解质配方减少气体析出,实现近乎零噪音运行,适合家庭安静的居住环境。户用储热主要满足生活热水和冬季采暖的需求,以石蜡-熔盐复合相变材料为主,利用纳米分散技术提高石蜡和熔盐的相容性,材料工作温度稳定在40℃到60℃之间,储热密度达到80J/g,远高于传统的水储热材料。

工业级分布式场景要实现负荷匹配和工况适应,就要达到高功率输出、高频充放电、恶劣环境耐受的目的。工业园区存在大量的电机启停、生产线负载波动等情况,采用超级电容和锂电池、中温熔盐混合系统形成优势互补:超级电容完成瞬时功率补偿,锂电池提供持续电能,中温熔盐实现余热回收。锂电池电极掺入石墨烯纳米片之后,形成了高效的导电通路,倍率性能提高到10C以上,可以短时间内达到兆瓦级功率输出,应对负载突变;中温熔盐采用NaNO<sub>3</sub>-NaNO<sub>2</sub>-KNO<sub>3</sub>三元盐体系,工作温度150-350℃,可以高效回收锅炉、窑炉等设备的余热,通过板式换热器实现热量梯级利用,为车间供暖或者生产用热,降低企业化石能源消耗。数据中心对供电稳定性和散热效率要求很高,全钒液流电

池加低温熔盐方案可以精准匹配，液流电池充放电平稳、循环寿命长，给服务器提供不间断供电，低温熔盐（ $\text{LiNO}_3\text{-NaNO}_3$ 二元盐）流经服务器散热通道，高效吸收废热，再通过换热装置将热量转移到室外，使数据中心PUE值稳定降到1。

## 2. 大规模储能场景的材料性能规模化适配

大规模储能系统是电网的调节中枢，对材料有规模化、长效化的要求，在沙漠戈壁等极端环境的风光基地，材料性能直接影响到电站连续运行的能力以及投资回报。沙漠戈壁风光基地光照强、昼夜温差大，塔式光热电站由于能量集中度高而成为主流选择，三峡恒基能脉项目采用“双塔一机”创新模式，近2.7万面定日镜把太阳光准确地聚焦到两个吸热塔上，加热熔盐到 $565^\circ\text{C}$ 后储存在高温罐里。项目选用Solar Salt熔盐（60%  $\text{NaNO}_3$ 、40%  $\text{KNO}_3$ ），经过特殊的提纯处理，去除了钙、镁等杂质离子，高温下不产生沉积堵塞管道，镜场光学效率因此提高24%，可以产生18亿千瓦时年发电量，减少二氧化碳排放153万吨。此类场景的熔盐材料要达到低成本、高一一致性的要求，通过规模化连续结晶提纯技术使硝酸盐纯度达到99.9%以上，单罐储盐量超过1万吨，配合双罐加强制循环系统，即使在夜间或者阴雨天也能通过熔盐放热驱动汽轮机发电，保证电力持续输出，满足大规模可再生能源消纳和电网调峰需求，度电成本比早期光热电站降低30%以上。

材料标准化、绿色化是规模化发展的主要方向，可以降低产业协作成本，也可以符合新能源电力系统低碳的特点。国际电工委员会（IEC）已经牵头制定了熔盐储热系统接口标准，要求熔盐的成分偏差、熔点波动范围、导热系数稳定性等指标必须统一，国内也同步推进《光热发电用熔盐》系列标准的制定，规范材料的生产 and 检测流程。使用标准化电芯和熔盐模块之后，储能电站的设计周期缩短30%，建设周期缩短40%，运维时可以实现模块快速更换，效率提高50%。全生命周期环保上，熔盐材料正快速向低毒化、可循环转变，取代含重金属的传统盐类，回收利用技术取得突破性进展，特斯拉Megapack储能系统创建的电池回收闭环体系，利用湿

法冶金技术分离退役电池中的锂、镍等元素，材料回收率超92%，熔盐可以简单蒸馏提纯去除降解产物，实现100%循环利用。

## 结束语

新能源电力系统高质量发展的广阔应用场景和强劲发展动力，使得储能材料性能升级演进方向逐渐走向核心指标协同优化、新型体系创新突破、场景需求精准适配三个方面。能量密度与循环稳定性的协同提高、安全性与环境适应性的同步加强，将为储能材料打下核心竞争力；非锂体系和复合杂化材料的技术突破，将使储能材料更加多样化；对分布式和大规模储能场景的性能定制化和规模化适配，将会使材料性能和电力系统需求更加契合。随着材料科学、电化学、能源工程等多个学科技术的相互融合，储能材料的性能会在边界、应用场景以及产业生态三个方面取得新的突破，发展出的新性能不仅能破解新能源电力系统所受的储能瓶颈问题，而且会促使建立一个多元协同、安全高效、可持续的新型能源存储系统，从而为全球能源转型及“双碳”目标的实现奠定基础。

## 参考文献

- [1] 李者, 龙宇, 王雅伟, 陈祎然, 李学春. 储能辅助下热电解耦对电力系统稳定性的影响[J]. 电力设备管理, 2025, (11): 168-170.
- [2] 云红红, 解寅琬, 白韡, 白健美, 张轩. 电力系统储能中的多孔碳电池材料及应用实验研究[J]. 化学工程师, 2023, 37(09): 94-99.
- [3] 许传博, 刘建国. 氢储能在我国新型电力系统中的应用价值、挑战及展望[J]. 中国工程科学, 2022, 24(03): 89-99.
- [4] 王鹏. 超疏水材料及其在电力系统中的应用[M]. 化学工业出版社: 202201.197.
- [5] 李向超. 超级电容器在电力电子系统中的应用——评《超级电容器及其在储能系统中的应用》[J]. 电池, 2021, 51(02): 217-218.