

新能源储能系统用活性炭电极材料的制备工艺创新与性能提升

韩琍君

广东韩研活性炭科技股份有限公司 广东广州 511400

摘要: 新能源储能系统高效性和稳定性取决于电极材料优化设计和制备。作为一种被广泛使用的电极材料,活性炭因其卓越的比表面积和出色的化学稳定性,在储能领域占据了非常重要的位置。文章在活性炭电极材料制备工艺创新的基础上,从原料选择、活化和改性、成型和后处理等方面论述了其对电极性能影响的机理。通过优化孔隙结构、提升导电性及改善电极的界面稳定性,材料的比容量、功率密度与循环稳定性得到了显著提高。文章对电化学性能改善的内在机理进行了分析,构建了一整套性能表征体系,旨在为研发高性能活性炭电极材料提供理论支持和实践指导。

关键词: 活性炭电极; 新能源储能; 制备工艺; 性能提升

一、活性炭电极材料的微观结构与宏观性能关系

(一) 微观孔隙结构特征及其在电极功能中的作用

活性炭电极材料的孔隙结构异常关键,其微孔($<2\text{ nm}$)、介孔($2\text{--}50\text{ nm}$)与大孔($>50\text{ nm}$)所构成的多尺度网络共同决定材料内离子与电子的传输效率,进而影响储能系统性能。尽管比表面积是一个关键参数,但它的增加并不一定导致比电容线性上升,过细的微孔由于电解质离子难以进入而变成“无效表面积”^[1]。构造合理孔径分布特别关键:中孔可以起到离子传输通道的作用,大孔对电解质和溶剂的分布有促进作用,而微孔具有电荷存储能力。电极材料若只具有高比表面积而缺乏合适的中大孔通道时,在快速充放电或者高功率密度情况下,会产生扩散瓶颈现象,使其实际储能性能大大低于理论预期。

孔隙结构与电极对电解质润湿性能、离子扩散路径的长短和电子/离子耦合反应界面密切相关。在新能源储能系统的应用场景中,需要考虑电极材料的能量密度和功率密度,即既要使孔隙内储存大量的电荷,还要使离子能够以高速状态快速出入。为了满足这一双重需求,制备工艺需要对活化过程的孔径生成、孔壁结构以及它们之间的连通性进行精细的调控。孔隙结构设计不仅是提高材料性能的根本,还是电极材料功能化研究的起点。

(二) 电导性、界面电阻与材料整体性能的耦合机制

活性炭材料的电导性和界面电阻状况对电极性能起

着决定性作用。好的电子传导路径确保电荷能快速地从集流体通过活性炭颗粒、穿过其孔壁,最终到达电解质界面;若电子或者离子的传输被阻断,即使孔隙结构优异,其存储潜力仍然不能完全发挥。活性炭的高比表面积通常会伴随着较薄的碳壁或者较多的断裂边缘,这可能会造成导电率降低^[2]。界面电阻包括电极—电解质界面、电极—集流体界面以及颗粒间接触处阻抗,这些阻抗会在高倍率或循环过程中放大会影响功率输出与寿命。

在材料整体性能的耦合机制中,只有当电子、离子和界面反应这三个路径同时得到优化,才能实现宏观指标比容量、功率密度和循环稳定性的最大化。从微观结构视角来看,增强导电网络的方法可以通过异质元素掺杂、碳化处理、表面功能化或者复合导电骨架来实现;当界面电阻下降时,可以通过优化粘结剂、活性炭颗粒表面改性、以及调整羟基或氧官能团的方式来实现。将上述微观调整与孔隙结构优化结合起来,实现电极材料“导电+传输+储存”三位一体的性能跃升,这种耦合机制正是系统提升活性炭电极性能的核心所在。

(三) 长期循环稳定性与失效机制分析

电极材料在新能源储能系统中非仅要求初期性能优异,更需具备长期运行下的稳定性。活性炭电极经过多次充放电后,会面临孔隙结构塌陷、电子导体骨架断裂、界面化学副反应或者电解质浸润不理想的问题,其结果通常是容量衰减、内阻增大、功率输出减小。从微观上看,孔隙壁剥落或挤压使离子扩散路径变短或者离子通道被堵塞,导电路径若因颗粒接触失效遭中断,电子的传输就会被阻断;界面若因电解质分解、气体析出

作者简介: 韩琍君(1991.10-),女,汉,福建,本科,助理工程师,研究方向:生态环境工程。

或者沉积物生成发生劣化,电极的整体性能就会收到严重影响。

从一个更广泛的视角来看,循环寿命与稳定性的提升取决于材料在高倍率、宽温区内能否保持其结构和电化学活性。设计中需要考虑热应力、机械压缩、反复膨胀收缩和电化学腐蚀作用对材料的影响。唯有在制备工艺、结构优化、电导骨架完善、表面稳定化多个维度同步发力,才能形成具备长寿命、高可靠性的活性炭电极体系,满足了新能源储能系统对寿命和性能双重苛刻需求。

二、制备工艺创新路径及其对性能的提升作用

(一) 原料选择与预处理策略

原料选择构成活性炭电极材料性能提升的基础环节,故应在原料的碳含量、杂质清除及前驱物结构等方面作出精细判断。优选碳质前驱物其天然结构应具备较高的碳固定度与潜在孔隙形成能力,且其杂质(灰分、金属氧化物)含量需被限定至极低水平,方能产生具有高纯度的多尺度孔隙结构,应用于后续的激活过程。预处理阶段宜包含除杂、脱水、热解等工序,以便将天然原料中包含的非碳元素(锌、硫、氯残留)剔除,并促使预炭化中固体碳骨架初步成形^[1]。高端活性炭材料在其制造过程中强调原料高纯性和杂质控制等特点,对于后续电极功能化来说尤其关键。

预处理后的碳化工序应兼顾温度、气氛、炭化速率等因素,以确保碳基骨架既保留有利于活化的前置孔隙,避免因过度裂解造成骨架坍塌或者结构失稳。炭化温度设置需要综合考虑脱挥发组分和维持原始结构,使后续活化阶段能够更加高效的生成目标孔隙分布。预处理还包括对导电剂、粘结剂和粒径分布的调控考虑,这一阶段过程决定着粉体在压片或者涂布电极配制过程中的后期行为特性,间接地影响了整体电极循环稳定性和内部传输阻力。

(二) 活化及改性工艺的优化创新

活性炭电极材料活化和改性环节对其性能提升起着决定作用,需从物理活化、化学活化和掺杂改性等多路径整合。物理活化的典型方式是利用蒸汽或者二氧化碳气氛,使得碳骨架的孔隙得到进一步的形成,孔径也是逐级扩大;在化学活化过程中,通常会使用如KOH、磷酸或磷化剂碱金属,在高温条件下对碳前体进行处理,增加其比表面积和孔隙体积。激活剂的种类、激活温度、用量及保温时间对孔隙结构、纯度、导电性和灰分含量都有显著的影响。

改性工艺包括异质元素掺杂(氮、硫、磷)、碳骨架石墨化或复合导电网络(碳纳米管、石墨烯)等措施,目的是提高电导率、缩短电子/离子迁移路径、降低界面电阻。活性炭材料若具备极高比表面积但未有效形成连续导电通路,在快速充放电或者高倍率时,性能会受到严重制约。活化与改性协同优化并不是单纯的孔隙增容,还需要提高导电与界面特性,才能使得电极从宏观上表现出高比容量、高功率及优异的循环性能。

(三) 电极成型与后处理工艺控制

把粉体活性炭材料改造成可以用于储能系统的电极结构,其形成和后处理工艺同样关键。活性炭粉末、导电炭黑以及PVDF分别作为活性物质、导电剂和粘结剂,通过真空搅拌使其混合均匀,这是成型过程的关键步骤之一,有助于保证后续电极结构的性能。采用锂离子电池的涂布工艺,在涂布机上将浆料均匀地涂覆在铝箔集流体上,这一步骤实现了将混合好的材料涂布在集流体上,符合把活性炭粉体等材料涂布在集流体上的成型过程要求。接着将极片在120℃真空干燥12h,经对辊机压制成型,分切、用刺铆机进行铆接极耳。真空干燥可以去除极片中的水分等挥发物,对辊机压制成型则可以对电极的厚度、密度等进行调控,确保电极的性能。若密度过低,电极体积活性差异大;密度太大,孔隙通道受限、离子扩散受阻,压制成型过程中对这些参数的准确调控至关重要。高端活性炭产业后处理工艺的改进是产品性能稳定的保证。

从整个工艺链条上看,电极成型与后处理构成承上启下的重要环节:原料进行预处理和活化改性奠定了材料的本质特性,成型和后处理又把这些特性转化成可利用电极的组织与功能表达。若忽略成型结构和后处理情况的优化,即使物料孔隙结构、电导率都达到优良状态,储能系统最终也会陷入循环衰减快、倍率性能低、寿命不达标的困境。成型和后处理不宜视为辅助工具,应将其看作是制备体系必不可少的环节,才能保证过程—结构—性能闭环高效运转。

三、性能提升机制解析与评价方法

(一) 电化学性能提升机理剖析

在新能源储能系统中,活性炭电极材料电化学性能的提高表现为容量、功率和循环寿命同步改进,其机制可以从电子/离子传输通道优化、电极—电解质界面反应两个角度进行探究。电子沿着活性炭的导电网络从集流体开始,经过碳颗粒到达电解质界面,产生双电层或者赝电容效应;这一过程需要碳材料具有良好的导电通道

和孔隙连通性。高比表面积、低灰分和优良的导电性是电极材料得以升级的基本条件。离子在电解质溶液中迁移至活性炭孔隙，参与内壁或者表面的电荷累积，速率受到孔径分布、润湿性能和扩散路径长短的限制。若孔道设计合理，离子可迅速进入孔隙并均匀分布于活性位点，增强倍率性能并延缓极化。

界面反应机制也是影响性能改善的关键因素。电极表面功能基团、活性位点和电解质离子之间的相互作用，在充放电循环中会引发结构变化或副反应，导致容量衰减或者内阻增大。将上述的结构设计、导电网络的构建和界面调节时一并考虑，活性炭电极材料在宏观层面上呈现出“高比容量+高功率+寿命”的特性，从而能够满足新能源储能系统的性能要求。

（二）性能表征与评价技术体系

性能表征体系需涵盖多层次、多维度指标以实现电极材料的全面评估，结构层面可采用比表面积测定、孔径分布分析（BET、BJH）、碳骨架结构测量（XRD、Raman）以及表面官能团测定等方法。具备“超大的比表面积、高度集中的孔隙、低灰分，导电性良好”的活性炭电极材料特征更容易实现优异电化学表现。导电性及内阻状况可通过电导率测试与电化学阻抗谱（EIS）等方式获取，后者能够揭示电荷/离子在材料内部与界面处迁移所受的阻碍。电化学性能的评估主要集中在循环伏安（CV）、恒电流充放电（GCD）和循环寿命的测试上，这些结果直观地展示了材料在实际使用中的储能、功率输出和持久性。

评价体系中还需将宏观性能指标（比容量、功率密度、能量密度、循环衰减率等）纳入统一框架，从而对材料的实际应用潜力进行量化评估。储能材料评价需突破指标分散局限，将比容量、功率密度、能量密度、循环衰减率等核心宏观性能指标纳入统一量化框架，才能精准判断材料实际应用价值。若高比容量伴随着迅速衰减，其在储能系统中的应用价值受到限制。为了评价的统一化，测试条件要标准化、对照体系清晰，还需要对结构特征、导电网络状态、界面阻抗变化和电化学表现等进行关联分析，为制备工艺的完善提供可靠的依据。

（三）性能提升实例中的工艺—结构—性能闭环分析

在活性炭电极材料升级研究中，工艺—结构—性能三者形成闭环分析框架：制备工艺参数设置决定了材料

孔隙结构、导电网络和表面状态，进而影响其电化学性能表现，再由性能反馈指导工艺调整。原料预处理条件、活化温度和剂量、掺杂元素种类、成型密度以及脱气和热处理流程等都属工艺变量的范畴，其变化会在微观尺度上反映为孔隙体积变化、孔径分布的重建、碳骨架石墨化水平的提高、导电途径的连续性加强以及表面官能团的状态改善。结构变化在宏观性能方面进一步表现为比表面积的增加、孔隙通道的优化、电阻的减小以及界面稳定性的提高。上述结构特性表现出比容量增加、功率密度提高和循环衰减率降低的特点。

评价体系承担着这一闭环的反馈作用：电化学测量展示了性能改善的范围，结构和阻抗表征展示了改善背后的物理化学成因，工艺改进基于这些信息优化了参数。这一闭环若能够连续运行，活性炭电极材料的制备将由经验驱动转向体系化、可预测的流程化改善，从而更好地满足新能源储能系统对高性能、高功率、高寿命材料的要求。

结论

文章以活性炭电极材料用于新能源储能系统为研究对象，着重研究不同制备工艺对电极的作用机理。优化孔隙结构、导电网络和表面改性技术可显著增强电极比容量、功率密度和循环稳定性。特别是原料选择、活化过程和电极成型等工艺环节的革新，展现了提升活性炭电极性能的巨大潜力。性能评价体系不仅可以为优化制备工艺提供科学依据，而且还可为材料性能量化评估在实践中提供方法支撑。活性炭电极材料应用于新能源储能领域前景广阔，创新制备工艺和改善性能对于促进高效储能系统构建至关重要。

参考文献

- [1] 潘墨菲, 魏玉洁, 李培金, 等. 超级电容器活性炭电极材料制备方法的研究综述[J]. 广州化工, 2023, 51(21): 7-14.
- [2] 檀畅, 李蓓, 王傲, 等. 基于活性炭电极的电容去离子技术制备纯水应用研究[J]. 林产化学与工业, 2023, 43(01): 72-78.
- [3] 任双鑫, 安承中. 活性炭材料应用于超级电容器电极材料研究进展综述[J]. 新型工业化, 2022, 12(09): 186-189+194.