

新能源正极材料增效节本策略探究

黄利俊

浙江巴莫科技有限责任公司, 浙江 衢州 324000

DOI:10.61369/ER.2024050002

摘要： 新能源技术的快速发展推动了对高效能源存储系统的迫切需求，正极材料作为锂离子电池等储能装置的核心组件，其性能与成本直接决定了电池的能量密度、循环寿命及商业化前景。当前主流正极材料包括层状氧化物、聚阴离子化合物和尖晶石结构等类型，虽在比容量与稳定性方面各有优势，但普遍面临原材料价格波动、制备工艺复杂、供应链效率不足等问题。为应对全球能源转型与市场竞争的双重压力，围绕正极材料的增效与降本成为产业升级的关键突破口。通过优化材料微观结构提升电化学活性，改进合成工艺降低能耗与废品率，整合供应链资源压缩中间环节成本，以及开发闭环回收技术减少资源依赖，已成为学术界与工业界共同探索的方向。这些策略不仅关乎技术突破，更涉及产业链协同创新，对推动新能源产业可持续发展具有重要意义。

关键词： 新能源；正极材料；增效节本；策略探究

New Energy Anode Material Efficiency Saving Strategy Research

Huang Lijun

Zhejiang Bamo Technology Co., LTD., Quzhou, Zhejiang 324000

Abstract： The rapid development of new energy technologies has promoted the urgent demand for efficient energy storage systems. As the core component of lithium-ion batteries and other energy storage devices, the performance and cost of cathode materials directly determine the energy density, cycle life and commercialization prospects of batteries. At present, the mainstream cathode materials include layered oxides, polyanionic compounds and spinel structures, etc., although they have advantages in specific capacity and stability, they generally face problems such as raw material price fluctuations, complex preparation process, and insufficient supply chain efficiency. In order to cope with the dual pressure of global energy transformation and market competition, the efficiency and cost reduction of positive electrode materials have become the key breakthrough for industrial upgrading. By optimizing the microstructure of materials to enhance the electrochemical activity, improve the synthesis process to reduce energy consumption and scrap rate, integrate supply chain resources to reduce the cost of intermediate links, and develop closed-loop recycling technology to reduce resource dependence, it has become a common direction of exploration by academia and industry. These strategies are not only related to technological breakthroughs, but also involve collaborative innovation of the industrial chain, which is of great significance to promote the sustainable development of the new energy industry.

Keywords： new energy; positive electrode material; increase efficiency and save cost; strategy exploration

引言

能源结构转型背景下，动力电池作为新能源汽车与储能系统的“心脏”，其核心材料研发始终处于技术竞争的前沿。正极材料因承担电荷存储与释放的核心功能，成为制约电池能量密度和成本控制的关键因素。现有材料体系虽能满足基本应用需求，但在高电压稳定性、低温性能及长循环寿命方面仍存在短板，同时钴、镍等稀缺金属的依赖推高了原料成本，限制了大范围普及。生产环节中，传统固相法能耗高、纳米材料合成工艺复杂等问题进一步加剧了产业矛盾。面对日益严苛的市场需求与环保法规，单一维度的技术创新已难以实现突破，需从材料设计、工艺革新、供应链协同及资源循环等多角度构建系统性解决方案。本文聚焦正极材料全生命周期内的增效节本路径，旨在揭示技术优化与产业协同的潜在关联，为构建更具竞争力的新能源材料体系提供理论支撑。

一、新能源正极材料概述

（一）正极材料的性能要求

在新能源电池体系设计中，正极材料的性能要求作为其技术迭代的核心驱动力，需兼顾电化学活性、结构稳定性及规模化生产的可行性，直接决定了储能装置的能量密度、循环寿命与安全边界^[1]。电化学稳定性是材料在充放电过程中维持晶格完整性的关键，直接影响电压平台与容量衰减速率；离子扩散效率则制约着倍率性能，需通过优化晶体通道设计降低传输势垒。结构耐久性要求材料在锂离子反复脱嵌时避免相变或颗粒破碎，而界面兼容性涉及与电解液的副反应抑制，需借助表面包覆或元素掺杂形成钝化层^[2]。此外，热力学安全性要求材料在极端工况下抑制氧释放或热失控，这对过渡金属氧化物的成分设计提出挑战。规模化生产还需平衡原料成本与工艺复杂性，例如高纯度前驱体的合成能耗控制及废弃物处理成本。如表1所示，不同正极材料在比容量、循环寿命等维度呈现显著差异，需根据应用场景权衡性能优先级。

表1. 典型正极材料性能对比

材料类型	比容量（mAh/g）	循环寿命（次）	热稳定性	成本等级
钴酸锂（LiCoO ₂ ）	140-160	500-800	低	高
三元材料（NCM）	160-220	1000-2000	中	中高
磷酸铁锂（LiFePO ₄ ）	140-160	2000-3000	高	低
锰酸锂（LiMn ₂ O ₄ ）	100-120	800-1200	中低	中低

（二）正极材料的生产流程

在新能源电池正极材料的工业化制备中，生产流程的精细化设计与工艺协同优化是保障材料性能与成本可控的核心环节。从原料预处理到终产品封装，各阶段需严格遵循晶体结构定向调控、杂质抑制及能耗平衡原则，以应对高纯度化合物合成的复杂性。原料混合环节依赖机械力化学或湿法共沉淀技术，确保活性元素均匀分布；高温固相反应则通过梯度升温与气氛调控，促进晶粒生长并降低缺陷密度。后续的粉碎与分级工艺需精确控制颗粒尺寸分布，避免二次团聚对电极涂布均匀性的干扰。表面包覆与掺杂改性作为提升界面稳定性的关键步骤，通常采用原子层沉积或溶液浸渍法构建保护层。如表2所示，不同工艺阶段的能耗与质量控制指标存在显著差异，需通过参数迭代优化实现效率与品质的平衡^[3]。

表2. 正极材料生产流程关键参数对比

生产阶段	关键技术点	典型能耗水平	质量控制核心指标
原料混合	元素分散均匀性	中等	粒径分布、化学计量比
高温煅烧	晶相纯度与结晶度	高	晶格常数、缺陷密度
粉碎分级	颗粒形貌控制	低	D50值、比表面积
表面改性	包覆层厚度与覆盖率	中等	界面阻抗、循环稳定性
成品检测	电化学性能验证	低	首效、容量衰减率

二、新能源正极材料增效节本策略

（一）材料结构优化

新能源正极材料的结构优化作为提升电化学性能与降低综合成本的核心路径，需从原子尺度至微观形貌层面构建多级协同设计框架。晶体结构的精确调控聚焦于扩大锂离子扩散通道并抑制晶格畸变，例如通过过渡金属层有序化排布或引入空位缺陷增强结构稳定性，从而缓解高电压下的相变应力与容量衰减。微观形貌工程则针对颗粒尺寸、孔隙率及表面粗糙度进行定向设计，缩短离子传输路径的同时增加活性位点暴露比例，实现动力学性能与能量密度的双重提升。元素梯度化分布策略在材料内部构建浓度缓变的化学环境，利用异质元素间的协同效应平衡体积膨胀与电荷转移阻抗。界面钝化技术通过原位生成或外延生长非活性包覆层，有效隔绝电解液副反应并降低界面阻抗，延长循环寿命。此外，缺陷工程在特定晶面引入可控的氧空位或阳离子无序度，可调节费米能级位置以优化电子导电性。这类结构设计需兼顾热力学稳定性与工艺可行性，在避免引入额外合成难度的前提下，系统性解决能量密度、安全性与成本之间的固有矛盾，为下一代正极材料的商业化应用提供底层支撑^[4]。

（二）制备工艺改进

在新能源正极材料的产业化进程中，制备工艺的革新被视为突破性能瓶颈与压缩生产成本的核心杠杆，其技术路径需深度融合热力学控制、动力学优化及过程智能化理念。原料合成阶段通过湿法共沉淀或溶胶-凝胶技术提升前驱体元素分布的均一性，减少后续煅烧过程的能量耗散与杂质生成；高温固相反应环节引入微波辅助烧结或梯度控温技术，可在缩短晶化时间的同时抑制晶粒异常生长，保障晶体结构完整性^[2]。粉碎分级工序采用气流粉碎与多级筛分协同策略，精准调控颗粒形貌与粒径分布，降低电极涂布过程中的溶剂消耗与加工损耗。表面改性工艺中，原子层沉积与化学气相沉积技术的结合可构建超薄且致密的包覆层，有效平衡界面保护与离子传输效率的矛盾。此外，原位掺杂与气氛调控技术的耦合应用，能够在材料合成初期嵌入稳定元素，避免额外后处理工序带来的成本上升。生产流程的智能化升级通过引入机器视觉与自适应反馈系统，实时监测工艺参数波动并动态调整设备运行状态，显著提升批次一致性及良品率。此类工艺改进不仅从源头降低能耗与废料生成，更通过缩短生产周期与提升设备稼动率，系统性重构正极材料的成本结构，为规模化降本提供可复制的技术范式^[5]。

（三）供应链管理优化

新能源正极材料的供应链管理优化作为系统性降本增效的关键支撑，需从资源整合、流程协同及风险管控维度重构价值链的动态平衡机制。原材料采购环节依托数字化溯源平台与供应商分级管理体系，提升锂、镍、钴等战略资源的品质稳定性与议价能力，同时降低地缘政治波动引发的供应中断风险。物流环节借助智能仓储与多式联运技术，压缩运输周期并减少中间环节的能源损耗，确保前驱体与辅料的批次一致性。生产计划与库存管理的联动优化需基于需求预测模型动态调整产能分配，避免原料积压

或产线闲置导致的资金占用。在供应商协同开发中，技术协议与知识产权共享机制的建立可加速新型正极材料的产业化验证，缩短研发周期与试错成本。针对废弃材料的逆向回收网络，需集成物理分选与湿法冶金技术，实现金属元素的高效提纯与闭环再利用，降低对原生矿产的依赖。此外，区块链技术的嵌入能够增强供应链透明度，追溯碳排放路径并满足国际环保法规要求。此类管理策略通过全链条的精细化运营与技术创新融合，不仅削减显性成本，更从资源配置效率与抗风险能力层面构建长期竞争优势，为新能源材料产业的可持续发展注入底层动能^[6]。

（四）回收与再利用

新能源正极材料的回收与再利用作为构建资源闭环体系的核心环节，需深度融合物理化学分离提纯技术与再生合成工艺，以破解金属资源稀缺性与环境负荷间的矛盾。退役材料的预处理聚焦于高效解离电极组分与集流体，采用机械粉碎与热解技术剥离黏结剂并保留活性物质骨架，为后续浸出工序奠定基础。湿法冶金工艺通过优化酸碱体系配比与选择性萃取条件，定向提取锂、镍、钴等高价值金属元素，同时抑制杂质离子对浸出液的污染，提升再生原料的化学纯度。再生合成阶段借助共沉淀或固相烧结技术重构正极材料的晶体结构，借助晶格缺陷修复与元素比例调控恢复其电化学活性。针对磷酸铁锂等低残值体系，氢氧化物共沉淀与碳热还原联用可重构材料微观形貌，兼顾成本优势与性能稳定性。回收流程的低碳化升级需集成膜分离与电化学沉积技术，减少酸碱消耗与废水排放，实现能耗与环保指标的双向优化^[7]。闭环供应链的构建要求回收网络与正极材料生产体系深度耦合，通过逆向物流标准化与再生原料认证机制，确保回收产物的品质可追溯性与批次一致性。此类技术路径通过全生命周期资源循环与工艺协同创新，不仅降低对原生矿产的依赖，更从产业链韧性维度重构新能源材料的成本竞争壁垒，为行业可持续发展提供底层技术支撑^[8]。

三、增效节本实施效果评估与分析

作为贯穿新能源正极材料研发至产业化全流程的系统性工程，增效节本策略的成效评估需构建多维动态分析框架，将技术

性能提升、经济性优化及环境效益纳入统一评价体系。评估模型的建立需融合材料本征特性与工艺参数耦合关系，基于电化学阻抗谱、循环伏安曲线等表征手段量化结构优化对离子扩散动力学的影响，同时结合热重-质谱联用技术追踪合成工艺改进对能耗与排放的削减效果。成本分析维度引入全生命周期成本核算方法，涵盖原材料采购、生产损耗、设备折旧及回收再生的隐性成本变量，揭示供应链管理与回收技术对综合降本边际贡献。环境效益评估依托碳足迹追踪与毒性浸出测试，解析工艺低碳化升级与废弃物资源化对生态负荷的缓解程度^[9]。动态反馈机制的构建需整合实时生产数据与市场波动参数，借助机器学习算法预测不同技术路线的成本敏感性与性能衰减趋势，为策略迭代提供决策依据。技术经济性分析中，材料克容量提升与电压平台稳定性的改善需与单位产能投资强度形成交叉验证，平衡技术先进性与规模化生产的经济阈值。此类评估体系通过多尺度、多目标的量化关联，不仅验证策略落地的可行性，更从技术成熟度与产业链协同角度挖掘潜在优化空间，为新能源材料产业的持续升级提供科学决策基座^[10]。

四、结语

新能源正极材料的增效节本是一项涵盖技术研发与产业生态优化的系统工程。通过微观结构设计提升材料本征性能，结合绿色制备工艺降低生产能耗，优化供应链资源配置压缩流通成本，以及建立高效回收网络实现资源再生，这些策略的协同实施可显著增强正极材料的市场竞争力。实践证明，结构优化与工艺创新能够同步提升电池的能量输出与经济性，而循环经济模式的引入则从源头缓解了资源约束问题。未来，随着材料基因组学加速新型正极材料的筛选，以及智能制造技术推动生产流程精细化，新能源产业链有望在性能与成本之间达成更优平衡。这一进程不仅关乎企业经济效益，更是全球碳中和目标实现的重要支撑，持续深化多学科交叉与产学研合作将成为行业发展的必然选择。

参考文献

[1] 凌仕刚,张曦予,朱卫泉.新能源动力电池材料质量分级评价标准评析 [C]//“蒙”字标团体标准研讨培训会.天津国安盟固利新材料科技股份有限公司,2023.

[2] 郑向益.层状高镍正极材料改性策略及其储锂性能研究 [D].中国地质大学,2023.

[3] 蔚敬斌,梁卫强.新能源汽车动力型锂离子电池锰酸锂正极材料循环性能的改性 [J].粉末冶金工业,2023,33(5):106-112.DOI:10.13228/j.boyuan.issn1006-6543.20220047.

[4] 王郝为,张利娟,孔东波,等.新能源汽车锂电池富锂锰基正极材料掺杂改性研究 [J].中国科技期刊数据库 工业 A,2022(4):252-255.

[5] 胡义华.新能源电池正极材料前驱体——单晶四氧化三锰制备方法研究 [J].当代化工研究,2022(21):174-176.

[6] 娄世菊,李晨.新能源汽车用动力磷酸铁锂电池正极材料研究进展 [C]//第十届河南省汽车工程科学技术研讨会.2013.DOI:ConferenceArticle/5af1a362c095d71bc8c922ad.

[7] 彭文杰.顺应电池正极材料的市场特点 助推新能源汽车产业发展 [J].电动自行车,2018(3):2.DOI:CNKI:SUN:JSQG.0.2018-03-010.

[8] 杨宜.浅谈锂离子电池正极材料供应链质量管理 [J].魅力中国,2020(30):472.

[9] 杨世红.锂离子正极材料磷酸铁锂的制备及改性研究 [D].辽宁:沈阳理工大学,2021.

[10] 丁玲.锂离子动力电池正极材料发展综述 [J].电源技术,2015,39(8):4.DOI:10.3969/j.issn.1002-087X.2015.08.063.