

面向超级电容器的干法工艺电容极片规模化制备技术及性能一致性研究

费鹏扬

天津普兰能源科技有限公司 天津 300000

摘要:为解决超级电容器干法工艺极片规模化制备中的性能一致性难题,本文系统研究干法工艺极片制备技术基础、原理体系、关键技术及调控策略。阐述干法工艺核心流程与性能一致性影响因素,分析主流制备工艺原理、规模化生产体系构成,剖析制备关键技术与瓶颈。从原料预处理、工艺参数、设备检测、微观界面四方面提出优化方法,以提升极片性能稳定性。研究表明,多维度协同调控可有效改善极片微观结构与界面性能,破解规模化生产瓶颈。该研究为干法工艺极片产业化应用提供技术支撑,助力超级电容器绿色高效生产与性能提升。

关键词:超级电容器;干法工艺;电容极片;规模化制备;性能一致性

引言:超级电容器作为新型储能器件,凭借充放电速度快、循环寿命长等优势,在新能源领域应用广泛。极片作为核心组件,其性能与一致性直接决定器件整体效能。干法工艺因无溶剂、低能耗、环保等特性,逐步替代湿法工艺成为极片制备主流方向,但规模化生产中性能一致性差、制备瓶颈突出等问题制约其发展。本文围绕干法工艺极片规模化制备技术及性能一致性展开研究,梳理技术基础与生产体系,分析关键技术瓶颈及影响因素,提出针对性调控优化策略,为推动超级电容器干法工艺产业化、提升产品竞争力提供理论与实践参考。

1 干法工艺电容极片制备技术基础

1.1 干法工艺核心流程

干法工艺电容极片制备是无需溶剂参与的绿色制备技术,核心流程围绕活性物质、导电剂、粘结剂的协同成型展开。首先通过机械混合设备将三者按特定配比均匀搅拌,利用剪切力与挤压力使各组充分接触,形成均一混合粉体。随后将混合粉体送入辊压机进行预压成型,初步压实为具有一定厚度与密度的坯体,去除粉体间隙中的空气,提升结构稳定性。接着经连续辊压工艺精准调控极片厚度与压实密度,确保极片力学性能达标^[1]。最后通过裁切、除尘与预处理工序,得到符合规格的电容极片。相较于湿法工艺,该流程省去溶剂溶解、烘干除杂等步骤,不仅降低能耗与环保成本,还能避免溶剂残留对极片性能的影响,是当前绿色储能器件制备的主流方向之一,广泛应用于超级电容器等储能设备的生产。

1.2 性能一致性关键影响因素

干法工艺电容极片性能一致性直接决定储能器件的整体运行稳定性,其核心影响因素贯穿制备全流程。原

料层面,活性物质的粒径分布、比表面积均匀性,导电剂的导电性与分散性,粘结剂的粘度与粘结强度波动,均会导致极片性能差异。工艺操作中,混合工序的转速、时间参数控制不当,会造成各组分混合不均,形成局部导电通路缺陷或粘结失效区域。辊压过程中压力、速度的稳定性不足,会使极片厚度、压实密度出现偏差,进而影响比电容与循环寿命。此外,设备精度不足导致的物料输送量波动、环境温湿度变化对粉体流动性的影响,也会加剧性能离散性。性能一致性差会导致器件组串时局部过热、容量衰减不均,降低整体使用寿命,因此需针对各影响因素建立精准控制体系。

2 超级电容器干法工艺极片的制备原理与规模化生产体系

2.1 主流干法制备工艺原理与特性

超级电容器干法极片主流制备工艺以干混成型、静电复合与热压成型为核心原理,不同工艺各具特性适配不同应用场景。干混辊压工艺依托机械力使粉体组分紧密结合,原理是通过压力诱导颗粒间形成物理吸附与机械咬合,具有流程简单、产能高的优势,适合大规模量产,但对粉体流动性要求较高。静电复合工艺利用不同组分颗粒的静电吸附特性,使活性物质、导电剂与粘结剂在电场作用下定向复合,形成结构均一的极片,其优势在于组分分散性好,极片比电容与倍率性能优异,但电场参数调控难度大,生产成本较高^[2]。热压成型工艺则通过加热使粘结剂软化熔融,结合压力实现颗粒间的紧密粘结,成型极片力学强度高、结构稳定,适用于高功率超级电容器,但加热温度与压力的协同控制要求严格,易出现局部过热导致活性物质失效。三种工艺均无需溶剂,绿色环保,需根据

产品性能需求选择适配方案。

2.2 规模化生产体系构成

超级电容器干法极片规模化生产体系由原料供应、核心生产、质量检测与仓储物流四大模块构成，各模块协同运作保障产能与品质稳定。原料供应模块包含粉体预处理、配比计量与自动化输送系统，通过精准控制原料纯度、粒径等指标，实现标准化进料。核心生产模块是体系核心，集成干混、辊压、热压、裁切等自动化设备，采用连续化生产线设计，可实现每小时数千片的产能，同时配备工艺参数实时监控系統，确保生产过程可控。质量检测模块涵盖在线检测与离线抽检，在线检测设备实时监测极片厚度、密度、外观等指标，离线检测则针对比电容、循环寿命、力学强度等核心性能进行精准测试，形成全流程质量管控。仓储物流模块采用智能化仓储设备，实现成品、半成品的分区存放与高效转运，结合追溯系统，可实现产品全生命周期追溯。

3 干法工艺极片规模化制备的关键技术与瓶颈分析

3.1 核心关键技术

干法工艺极片规模化制备的核心关键技术集中在组分分散、成型控制与性能调控三大领域。组分分散技术通过优化混合设备结构与搅拌参数，结合粉体预处理工艺，解决多组分粉体混合不均的问题，常用高速剪切混合与气流混合协同技术，实现活性物质、导电剂与粘结剂的微观均匀分散，构建连续导电网络。成型控制技术核心是辊压与热压参数精准调控，采用伺服控制辊压机与智能温控热压设备，实现极片厚度、压实密度的高精度控制，误差控制在 $\pm 0.01\text{mm}$ 以内，同时通过压力梯度优化，避免极片内部结构疏松或裂纹产生。性能调控技术依托微观结构设计，通过调整原料配比与工艺参数，调控极片孔隙率、比表面积等指标，结合界面改性技术，提升极片与电解液的相容性，增强离子传输效率。此外，数字化工艺监控技术作为辅助关键技术，实现生产过程参数的实时采集与反馈调节，为规模化生产的稳定性提供保障。

3.2 规模化制备瓶颈

干法工艺极片规模化制备面临技术、设备与成本三大核心瓶颈。技术层面，多组分粉体的规模化均匀分散难度大，随着产能提升，混合设备内部物料受力不均问题加剧，易导致极片性能离散性增大，且微观孔隙结构调控精度不足，难以兼顾高比电容与高倍率性能。设备层面，现有规模化生产设备的精度与稳定性有待提升，辊压机压力波动、热压设备温度均匀性差等问题，限制了极片品质的一致性，且专用设备依赖进口，设备购置

与维护成本较高，制约中小企业规模化布局^[3]。成本层面，高性能粘结剂与导电剂的价格偏高，且干法工艺对原料纯度与粒径要求严格，原料预处理成本较高，导致极片单位生产成本高于湿法工艺。另外，规模化生产中废料回收利用技术不成熟，资源浪费问题突出，进一步加剧成本压力，这些瓶颈共同制约了干法工艺的产业化推广速度。

3.3 极片性能一致性的核心影响因素

规模化制备中极片性能一致性的核心影响因素可分为原料、工艺与设备三大维度，各因素相互关联、叠加影响。原料维度，活性物质批次间的比表面积、粒径分布差异，导电剂的导电性波动，粘结剂的粘度与粘结强度不稳定，会直接导致极片性能基准值出现偏差，且难以通过后续工艺弥补。工艺维度，混合时间、转速、辊压压力、热压温度等参数的微小波动，在规模化生产中会被放大，导致极片厚度、密度、孔隙率等结构指标不一致，进而影响比电容、循环寿命等电化学性能。设备维度，设备精度不足导致的物料输送量波动、辊面磨损造成的压力分布不均、检测设备的系统误差，会使极片生产过程与质量评估出现偏差，无法及时发现性能异常。环境温湿度变化对粉体流动性、粘结剂活性的影响，以及操作人员的技能差异，也会进一步加剧性能一致性问题的。

4 极片性能一致性的调控策略与规模化制备优化方法

4.1 原料与预处理环节优化

原料与预处理环节的优化是提升极片性能一致性的关键基石，必须从原料筛选与标准化预处理两个核心方面精准发力。在原料筛选阶段，构建一套严谨细致的供应商准入机制至关重要。对活性物质、导电剂、粘结剂等关键原料，实施严格的批次检测流程，详细检测粒径分布、纯度、比表面积等关键指标，确保每一批次原料都严格符合标准化要求。同时积极采用混批处理技术，通过科学合理的混合方式，有效减小不同批次原料之间的性能差异，为后续生产提供稳定可靠的原料基础。进入预处理环节，针对活性物质，运用先进的气流粉碎与分级技术，实现对粒径的精准调控与均匀化处理，有效去除其中的杂质与大颗粒，显著提升粉体的流动性。对于导电剂，开展表面改性工作，增强其与活性物质、粘结剂之间的相容性，提升整体性能。对粘结剂则采用恒温干燥处理，彻底去除水分与挥发性杂质，稳定其粘度与粘结性能。建立原料预处理全流程追溯体系，详细记录各环节的参数信息，实现对原料性能的可预测与可控制，从源头上降低极片性能的离散性，为规模化生产的

稳定推进奠定坚实基础。

4.2 工艺参数协同调控策略

工艺参数协同调控策略需紧密围绕多参数耦合关系展开,构建一套动态优化体系,以实现各环节参数的精准匹配。在混合工序中,采用正交实验法这一科学方法,对搅拌转速、时间以及物料投放顺序等关键参数进行系统优化,确定在不同原料配比下的最优参数组合。引入先进的在线混合均匀度检测技术,实时反馈混合过程中的各项参数信息,并据此及时调节混合参数,确保粉体混合的一致性,为后续工序提供高质量的混合物料。在辊压与热压工序中,构建压力、速度、温度的协同调控模型,根据极片厚度、密度等目标值,动态调整辊压压力与热压温度。采用分段加压、梯度升温等先进工艺,有效避免局部结构缺陷的产生,提升极片成型的均匀性与一致性。此外,建立工艺参数数据库,整合不同生产批次的参数与性能数据,运用机器学习算法深入挖掘参数与性能之间的关联规律,实现参数的自适应调节。针对环境温湿度变化等外部因素,设置合理的补偿参数,有效减小外部环境对工艺稳定性的影响,确保在规模化生产中极片性能的均匀一致,提升产品质量与生产效率。

4.3 设备与检测体系优化

设备与检测体系优化是保障规模化生产稳定性与性能一致性的关键。设备优化方面,对辊压机、混合机等核心设备进行精度升级,采用伺服控制系统替代传统控制系统,提升压力、转速、温度的控制精度,同时对辊面进行耐磨处理,减少设备磨损带来的参数波动;引入自动化物料输送设备,实现原料与半成品的精准定量输送,避免人工操作误差。检测体系优化方面,构建“在线检测+离线校准+全流程监控”的立体化检测网络,在线检测设备实时监测极片厚度、密度、外观等指标,发现异常立即反馈并触发设备参数调整;离线检测增加微观结构与电化学性能抽检频次,采用扫描电镜、电化学工作站等设备精准分析极片性能;同时建立检测设备定期校准机制,确保检测数据的准确性,通过检测数据与工艺参数的联动分析,实现生产过程的闭环管控,提升极片性能一致性。

4.4 极片微观结构与界面性能优化

极片微观结构与界面性能优化可显著提升其电化学

性能与一致性,需从结构设计与界面改性两方面开展。微观结构优化方面,通过调整工艺参数调控极片孔隙率与孔径分布,构建“大孔运输+微孔储能”的多级孔隙结构,提升离子传输效率与活性物质利用率,同时采用模板法、造孔剂法等技术,实现孔隙结构的均匀化设计,避免局部孔隙拥堵或疏松^[4]。界面性能优化方面,对极片表面进行等离子体改性,增强其与电解液的润湿性,降低界面阻抗;在活性物质与导电剂界面引入偶联剂,提升两者结合强度,构建连续稳定的导电网络,减少界面接触电阻的波动。通过分子模拟技术预测微观结构与界面性能的关联,优化工艺参数与改性方案,确保规模化生产中极片微观结构与界面性能的一致性,进而提升超级电容器的整体运行稳定性与循环寿命。

结束语

本文围绕超级电容器干法工艺极片规模化制备技术及性能一致性展开全面研究,明确了制备流程、影响因素、核心技术与瓶颈,提出多维度协同优化策略。研究证实,原料预处理优化、工艺参数调控、设备检测升级及微观界面改性的结合,可有效破解性能一致性难题,突破规模化生产瓶颈。该研究完善了干法工艺极片制备理论体系,为产业化应用提供技术支撑。未来可聚焦高效低成本改性剂研发、智能化设备升级,进一步提升极片性能与生产效率。随着技术不断迭代,干法工艺将推动超级电容器在新能源领域实现更广泛的应用,助力绿色储能产业高质量发展。

参考文献

- [1] 杨紫博,杨丽霞,王林玉,等.多形貌可控ACF/NiCo₂S₄电极材料的绿色制备及其电容性能研究[J].广州化工,2025,53(12):28-31.
- [2] 徐桂培,刘浩,赖洁文,等.干法电极技术在超级电容器和锂离子电池中的研究进展[J].储能科学与技术,2025,14(4):1445-1460.
- [3] 李爱红,张艺,柳俊辰,等.一种基于三维立体成膜技术的超级电容器的干法电极[J].电力电容器与无功补偿,2025,46(4):13-19.
- [4] 张国磊,张克良,安亚斌,等.干法电极在超级电容器和锂离子电池中的应用[J].工程科学学报,2025,47(4):897-909.