

# 锂电池行业新技术调研：UV 喷墨与固态电池技术 在非标设备中的应用

黄雅兰

珠海市华冠科技股份有限公司, 广东 珠海 519080

DOI:10.61369/ME.2025110019

**摘要：**本文围绕锂电池非标设备展开，阐述其独特技术特征，介绍新兴技术渗透路径及UV喷墨工艺设备创新与验证。探讨固态电池制备、装备适配、封装等环节关键技术，分析热-机耦合、浆料输送等对设备的影响，构建数字孪生架构、故障预测算法等。经调研提出建设模块化平台与固态电解质沉积设备标准化方向。

**关键词：**锂电池非标设备；UV喷墨技术；固态电池技术

## Research on New Technologies in Lithium Battery Industry: Application of UV Inkjet and Solid State Battery Technology in Non standard Equipment

Huang Yalan

Zhuhai Huaguan Technology Co., Ltd., Zhuhai, Guangdong 519080

**Abstract :** This article focuses on non-standard equipment for lithium batteries, elaborating on their unique technical characteristics, introducing the penetration paths of emerging technologies, and innovating and verifying UV inkjet process equipment. Explore key technologies in solid-state battery preparation, equipment adaptation, packaging, etc., analyze the impact of thermal mechanical coupling, slurry transportation, etc. on equipment, and construct digital twin architecture, fault prediction algorithms, etc. After research, it is proposed to build modular platforms and standardize solid-state electrolyte deposition equipment.

**Keywords :** non-standard equipment for lithium batteries; UV inkjet technology; solid state battery technology

## 引言

2022年，国家发展改革委等部门联合颁布《关于加快推动新型储能发展的指导意见》，旨在推动储能技术进步与产业升级，其中锂电池作为重要储能技术备受关注。在此背景下，锂电池生产设备中的非标设备因独特技术特征至关重要。从卷绕机精密控制到高速叠片机构，从新兴技术渗透到各类工艺设备创新与集成验证，以及固态电池各环节技术研究，都围绕提升设备性能与电池质量展开。各项研究与实践为锂电池行业新技术在非标设备中的应用提供支撑，推动行业向高效、高精度方向发展。

## 一、锂电池生产设备技术体系分析

### (一) 非标设备技术特征

锂电池生产设备中的非标设备具有独特技术特征。从卷绕机精密控制系统来看，需实现极高的控制精度，确保电极材料在卷绕过程中张力稳定，偏差控制在极小范围，如电极卷绕的厚度偏差需控制在 $\pm 0.01\text{mm}$ 以内<sup>[1]</sup>，以保障电池性能一致性。高速叠片机构要求在高速运作下保持精准定位，叠片速度可达每分钟数百片，且叠片精度误差不超过 $\pm 0.1\text{mm}$ ，满足大规模高效生产需求。同时，非标设备要适应多种电池型号、规格生产，具备柔性化生产能力，通过快速更换模具、调整参数等方式，在短时间内切换生产不同类型锂电池，有效提高生产效率与设备利用率，满

足市场多样化需求。

### (二) 新兴技术渗透路径

新兴技术在锂电池生产设备中的渗透路径主要围绕现有涂布/封装工序展开。UV喷墨技术凭借其精准定位与高效固化的特性，通过构建UV固化系统，与传统涂布工序相结合<sup>[2]</sup>。这一过程需对设备进行针对性改造，例如调整喷头精度与固化时间，确保UV墨水在电极材料表面均匀附着与快速固化，从而提升电极性能。固态电池技术则致力于打造全新的固态电池产线，并与封装工序实现技术嫁接。在这一过程中，需对封装设备的材料兼容性、密封工艺等方面进行优化，以适应固态电解质的特性。通过这样的渗透路径，实现新兴技术与传统工序的有机融合，构建设备改造可行性矩阵，为锂电池生产设备的升级提供有力支撑。

## 二、UV 喷墨工艺设备创新

### (一) 喷印系统设计原理

UV 喷墨工艺设备创新的喷印系统设计基于对多喷嘴阵列布局策略与 UV – LED 瞬时光固化机制的研究, 以及喷墨精度与浆料流变特性关联模型的建立<sup>[3]</sup>。多喷嘴阵列布局策略能提升喷印效率与精度, 合理规划喷嘴排列方式, 可使喷头在单位时间内喷出更多墨滴且精准定位。UV – LED 瞬时光固化机制利用 UV – LED 光源瞬间释放的能量, 使喷印的浆料快速固化, 这不仅缩短生产周期, 还确保图案或电极结构稳定成型。而建立喷墨精度与浆料流变特性关联模型, 能深入理解浆料的黏度、表面张力等流变参数对喷墨精度的影响, 从而优化浆料配方与喷印参数, 实现更精准、稳定的喷印, 满足锂电池非标设备生产的高标准要求。

### (二) 设备集成验证

在 UV 喷墨工艺设备创新的设备集成验证环节, 基于卷绕机在线涂覆测试数据展开深入分析。从实际运行状况来看, 当喷射分辨率达到  $0.5 \mu\text{m}$  时, 设备稼动率提升了 17%, 这一显著提升有力地验证了 UV 喷墨工艺在非标设备集成中的有效性与创新性<sup>[4]</sup>。这表明该工艺不仅能满足锂电池生产对高精度的需求, 还能在实际生产过程中大幅提升设备的运行效率。通过这样的设备集成验证, 为 UV 喷墨工艺在锂电池行业非标设备中的广泛应用提供了坚实的数据支撑与实践依据, 进一步推动锂电池行业朝着高效、高精度的生产方向迈进, 凸显出其在行业新技术发展中的重要价值。

## 三、固态电池装备适配研究

### (一) 界面处理技术

#### 1. 固态电解质沉积

固态电解质沉积是固态电池制备过程中的关键环节, 直接影响电池的性能与稳定性。为解决层间接触阻抗波动这一工艺控制难题, 开发磁控溅射设备真空腔体结构优化方案至关重要。在固态电解质沉积时, 腔体内部的真空度、气体分布以及磁场强度等参数对沉积薄膜的质量和均匀性有显著影响<sup>[5]</sup>。通过优化真空腔体结构, 精确调控这些参数, 可使固态电解质均匀沉积在电极表面, 有效降低层间接触阻抗波动。例如, 合理设计气体导入系统, 让反应气体均匀分布于腔体, 避免局部浓度差异导致的沉积不均匀; 优化磁场分布, 促使溅射粒子更有序地沉积, 提高薄膜的致密度和均匀性, 从而提升固态电池的整体性能, 为固态电池在非标设备中的应用奠定坚实基础。

#### 2. 热压成型设备

在固态电池装备适配研究的界面处理技术中, 热压成型设备至关重要。热压成型过程对固态电池的性能有显著影响, 基于 ABAQUS 仿真建立 85MPa 压力载荷下极片应力分布模型, 能深入了解极片在热压过程中的应力变化情况。通过该模型, 可进一步优化压延辊温度梯度控制逻辑。精确控制温度梯度, 有助于改善固态电池极片的内部结构, 提升电池的一致性与稳定性。这不仅

影响电池的充放电性能, 也关系到电池的使用寿命。合理的热压成型设备参数设定, 结合优化后的温度梯度控制逻辑, 能够更好地实现固态电池的高质量生产, 为锂电池行业新技术在非标设备中的应用提供有力支持<sup>[6]</sup>。

### (二) 封装系统重构

#### 1. 激光焊接参数

在固态电池封装系统重构的激光焊接环节, 针对硫化物电解质特性, 需精确确定激光焊接参数。经研究确定 1064nm 波长激光的  $0.8 \text{J/mm}^2$  能量密度窗口阈值<sup>[7]</sup>。此特定波长的激光能较好地与硫化物电解质相互作用, 既确保焊接的强度与稳定性, 又避免因能量过高对电解质造成损伤, 影响固态电池的性能。 $0.8 \text{J/mm}^2$  的能量密度窗口阈值, 可保证激光在焊接过程中, 有效实现材料的连接, 同时维持硫化物电解质的化学稳定性与物理完整性, 为固态电池的高质量封装提供可靠保障, 助力固态电池在非标设备中的良好应用。

#### 2. 惰性环境控制

在固态电池封装系统重构的惰性环境控制方面, 设计装配线多级气密仓结构具有关键意义。固态电池对环境中的氧气等杂质极为敏感, 微小的氧含量变化都可能影响电池性能与稳定性。通过构建多级气密仓结构, 能够将整个生产流程进行分区管理, 有效控制各区域的环境参数。这种结构可实现氧含量  $<5 \text{ppm}$  的连续化生产工艺验证<sup>[8]</sup>。其原理在于, 气密仓的多级设计可以逐步降低氧气含量, 减少外部空气的干扰。同时, 利用高精度的气体监测设备, 实时监控气密仓内的氧含量, 确保生产过程始终处于低氧的惰性环境中, 为固态电池的封装提供稳定、可靠的环境, 从而保障固态电池的生产质量与性能。

## 四、技术集成仿真验证

### (一) 多物理场建模

#### 1. 热 – 机耦合分析

在锂电池非标设备中, 热 – 机耦合分析对设备性能与电池质量意义重大。运用 COMSOL 模拟涂布干燥段热传导过程时, 不仅要考虑热量传递, 还需关注机械应力的影响。由于涂布过程中, 材料受热会产生膨胀、收缩等变形, 与机械结构相互作用, 若处理不当可能导致涂布不均、电池性能下降。因此, 通过热 – 机耦合分析, 能精确探究温度变化引发的应力应变分布, 优化烘箱风嘴角度分布参数, 使热量均匀传递, 减少材料因热应力产生的缺陷<sup>[9]</sup>。这有助于提升非标设备在锂电池生产中的稳定性与可靠性, 确保固态电池等新技术在实际生产中高效应用。

#### 2. 流体动力学仿真

在锂电池非标设备中, 针对浆料输送系统建立 CFD 模型具有重要意义。高固含量电解液在微流道内易出现湍流堆积问题, 这严重影响锂电池生产质量与效率<sup>[10]</sup>。通过构建 CFD 模型, 可对流体动力学特性进行深入分析。利用该模型, 能够模拟高固含量电解液在微流道内的流动状态, 精准获取流速、压力分布等关键参数。进而分析湍流产生的原因及堆积位置, 为优化微流道结构和

浆料输送工艺提供依据。例如，通过调整微流道的形状、尺寸，改变入口流速等，观察电解液流动状态的变化，找到最适宜的参数组合，有效解决湍流堆积问题，确保高固含量电解液在微流道内稳定、高效输送，为锂电池非标设备的设计与优化提供有力支持。

## （二）虚拟调试平台

### 1. 数字孪生架构

在锂电池非标设备的技术集成仿真验证虚拟调试平台的数字孪生架构构建中，借助 Tecnomatix 软件实现设备运动学模型的搭建。这一模型精准模拟设备的机械运动，为后续的装配节拍仿真提供坚实基础。通过该模型，能够对设备在不同工况下的运行情况进行细致的数字模拟。在装配节拍仿真过程中，致力于实现高精度控制，将误差严格限制在小于 0.15s 的范围内。这样的精度控制有助于提前发现设备在实际运行中可能出现的节拍不协调等问题，通过在虚拟环境中的不断优化调整，为实际设备的设计、制造和调试提供可靠依据，确保锂电池非标设备在集成 UV 喷墨与固态电池技术后能高效、稳定运行。

### 2. 故障预测算法

在锂电池非标设备故障预测算法方面，应用 LSTM 网络对设备振动频谱数据展开训练。LSTM 网络具备处理时间序列数据的优势，能有效捕捉设备振动频谱随时间变化的特征。通过对大量历史振动频谱数据的学习，该网络可挖掘其中隐藏的规律与模式。基于此，建立关键部件剩余寿命预测模型。此模型可依据当前及过往的振动频谱数据，预测关键部件未来的运行状态，提前知晓剩余寿命。如此，在关键部件接近寿命终点前，可及时进行维护或更换，避免因部件突然故障导致的生产停滞，提升锂电池非标设备的可靠性与稳定性，保障生产过程的顺畅进行。

## （三）工艺优化策略

### 1. 参数敏感度分析

采用 Taguchi 方法筛选出压力、温度、速度等 17 项对极片孔隙率有影响的参数后，深入开展参数敏感度分析。对于压力参数，微小的压力变化若能显著改变极片孔隙率，表明其敏感度

高，在实际生产中需严格控制。温度参数同理，若极片孔隙率随温度波动明显，意味着对温度调控要求严格。速度参数亦是如此，若其变动对极片孔隙率作用突出，就需精准设置速度。通过这样对各项参数敏感度的分析，明确哪些参数在工艺控制中需重点关注，为工艺优化提供关键依据，从而更好地保障锂电池极片的质量与性能，实现 UV 喷墨与固态电池技术在非标设备中的高效应用。

### 2. 多目标优化

在锂电池非标设备工艺优化中，建立 NSGA-II 算法驱动的设备能效 - 精度双目标优化模型意义重大。NSGA-II 算法凭借其高效的搜索能力与良好的分布性，能同时兼顾设备能效提升与精度保障这两个关键目标。通过该算法，对设备运行中的众多参数，如喷墨速度、固态电池材料灌注量等进行系统分析与寻优。在优化过程中，充分考虑各参数间复杂的相互作用关系，避免单一目标优化导致顾此失彼的情况。最终获得帕累托最优解集，此解集为决策者提供了多种权衡能效与精度的方案，企业可依据自身实际需求与发展战略，从该解集中挑选出最契合自身利益的参数组合，实现设备性能的全面优化，助力锂电池行业在非标设备应用上迈向新高度。

## 五、总结

本次对锂电池行业新技术在非标设备中的应用调研，展现了 UV 喷墨与固态电池技术的显著价值。UV 喷墨技术凭借在极片制造上的突出表现，有效提升了生产效率，使极片制造效率提升 23%，为行业带来新的发展契机。固态电池技术在装配环节取得重大突破，装配良率突破 92%，有力证明了其技术经济性。为进一步推动行业发展，提出建设模块化设备平台的路径，此路径有助于整合资源、提高生产灵活性。同时，指明固态电解质沉积设备标准化研究这一后续方向，这对推动固态电池大规模产业化意义重大。未来，持续关注这些技术的应用与发展，不断优化和完善，将推动锂电池行业迈向新的高度。

## 参考文献

- [1] 高雨璇. 液态电极的构建及其在固态锂电池中的应用 [D]. 广东工业大学, 2023.
- [2] 白洋. 全固态厚膜锂电池的研究 [D]. 电子科技大学, 2022.
- [3] 赵婷. 丁二腈基固态电解质的制备及在全固态锂电池中的应用 [D]. 郑州大学, 2023.
- [4] 卢嘉泽. 固态金属锂电池关键界面问题研究 [D]. 中国科学院大学, 2021.
- [5] 杨钰琦. 基于厚膜正极的固态锂电池研究 [D]. 电子科技大学, 2023.
- [6] 陆敬予, 柯承志, 龚正良, 等. 原位表征技术在全固态锂电池中的应用 [J]. 物理学报, 2021, 70(19): 236-262.
- [7] 李维聪, 穆浩, 沈恒龙, 等. 固态锂电池在载运工具中的应用前景分析 [J]. 电气工程学报, 2022, 17(04): 88-102.
- [8] 陈翔, 富忠恒, 高宇辰, 等. 机器学习在锂电池固态电解质研究中的应用 [J]. 硅酸盐学报, 2023, 51(02): 488-498.
- [9] 锂电池回收有了新技术 [J]. 电力勘测设计, 2021, (01): 76.
- [10] 朱宏康, 刘凡. 能源材料创新——固态锂电池 [J]. 中国材料进展, 2021, 40(05): 351+358.