

量化颗粒管控：在线监测数据如何直接驱动电池生产良率提升与成本优化

摘要：随着电池对能量密度、循环寿命和安全性的要求日益严苛，微米乃至纳米尺度的颗粒管控已成为电池制造的核心挑战。粒径一致性是决定电池安全、循环寿命与制造成本的核心变量，传统离线检测方式存在数据滞后、响应迟缓等固有缺陷，难以支撑高比能电芯规模化制造。本文以 Entegris 旗下的在线监控设备 AccuSizer MINI 为基础，系统阐述在线设备在电池生产流程中的应用，为电池良率提升与成本优化提供合理方案。

关键词：在线颗粒监测；电池良率；成本优化；Entegris；在线控制

引言

电池的电化学性能与安全性取决于电极材料微观结构的均匀性，其中颗粒尺寸及其分布是最核心的物性参数之一。在镍钴锰（NCM）三元前驱体的共沉淀合成过程中，颗粒的成核与生长行为直接影响最终产物的振实密度、比容量及循环寿命^[1,2]。研究表明，颗粒尺寸的细微变化可能导致振实密度的显著差异，进而影响电极的压实密度和能量密度^[3]。其中，材料中大于 10 μm 的颗粒会带来严重的质量隐患，这些大颗粒在电极涂布过程中可能导致涂层表面缺陷或厚度不均，影响电极的机械完整性和电化学一致性^[4]；除此之外，这些颗粒还会穿透厚度仅为 10-30 μm 的电池隔膜，从而引发内部短路、热失控等严重安全事故。

电极浆料是由活性物质、导电剂、粘结剂和溶剂组成的固液悬浮体系，其中颗粒的尺寸与分布直接影响浆料品质及电池性能。

颗粒粒径过小虽利于倍率性能，但易团聚导致黏度升高、涂布困难；大颗粒（Large particle counts, LPC）则会造成涂层划痕、厚度不均，干燥后形成应力集中点。导电剂若发生团聚会破坏导电网络，导致内阻增大；活性物质颗粒过大则接触电阻增加，过小则副反应加剧。大颗粒还会因粘结剂锚固不足形成弱结合区，在循环中率先脱粘并诱发微裂纹，造成容量衰减。因此，对浆料中颗粒尺寸分布的精准管控，是保障电池性能与安全的关键前提。

长期以来，电池制造业对颗粒的管控主要依赖离线取样和实验室分析，离线监测的方法通常需要数小时才能获得结果。这种时间滞后可能会影响大量不合格品的生产，造成原材料与产能的极大浪费。在大规模电池材料生产中，批次间质量波动导致的返工与报废可占生产成本的相当比例。因此，将颗粒检测从实验室移至生产线，实现实时、在

线的粒度分布监控，已成为电池制造业的必然选择。

1 前端制造监控

前驱体是由镍、钴、锰、铝等金属元素通过化学反应形成的氢氧化物或碳酸盐混合物，是制造电池材料的关键前体物质，通常为黑色或褐绿色的微米级粉末颗粒。前驱体的振实密度是决定最终材料能量密度的关键参数之一，而 LPC 的存在会显著破坏颗粒体系的堆积均匀性。当粒径分布过宽时，尽管理论上小颗粒可填充于大颗粒间隙中，但若 LPC 尺寸过大或数量占比高，则会引起架桥效应，导致颗粒间孔隙率上升、整体堆积密度下降。若此时通过监控得到粒径分布均匀、无过大颗粒的前驱体，可获得更高的振实密度和压实密度。当前驱体材料中存在 LPC 时，其在电极涂布过程中可能导致涂层表面缺陷或厚度不均匀；在电池循环过程中，这些 LPC 若从电极基体脱落或发生破碎，其尺寸可能接近甚至超过商用聚烯烃隔膜的厚度，存在刺穿隔膜、引发正负极直接接触从而导致内部微短路甚至热失控的严重安全隐患。

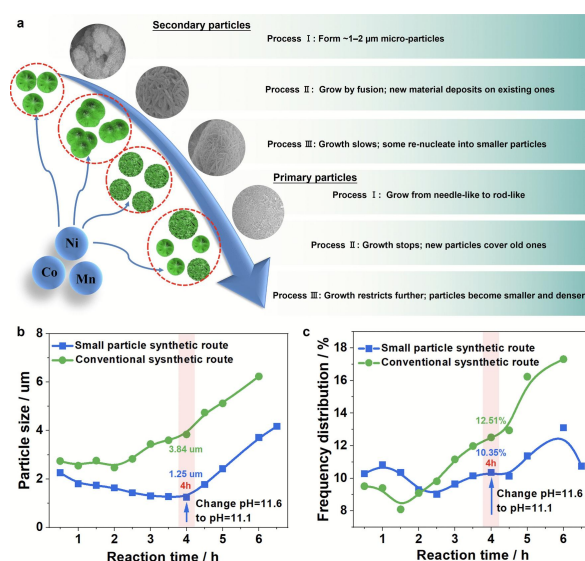


图 1-1 电池前驱体合成过程中颗粒的演化情况

[5]

针对前驱体颗粒不均可能会造成的振实密度下降、烧结缺陷、循环微裂纹乃至隔膜刺穿等一系列问题，AccuSizer MINI FX 在线监控设备可以有效监测大颗粒情况。通常前驱体共沉淀反应在颗粒浓度较高的体系中进行，AccuSizer MINI FX 基于聚焦光束原理（Focused Extinction），检测范围覆盖 $0.70\mu\text{m}$ 至 $20\mu\text{m}$ ，且对于高浓度体系而言也可以做到极高的准确性及可重复性。传统光学方法在高浓度体系中会因多重散射而使数据失真，聚焦光束技术通过特殊光路设计，当激光光束垂直透过流动样品池时，颗粒经过光感区域时会形成遮挡，使得光信号强度衰减，检测器检测到光强信号的变化。

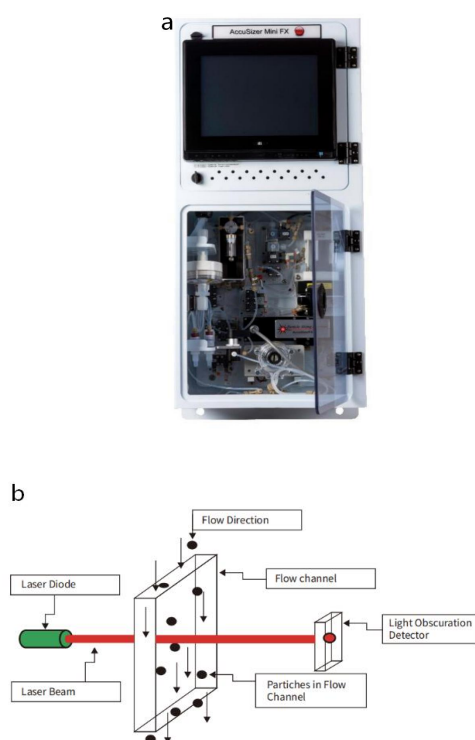


图 2.1 AccuSizer MINI FX

a: AccuSizer MINI FX 设备一览图; b: Focused Extinction

在大规模电池材料生产中，引入在线颗粒监测技术可将异常批次的检出与干预时间从数小时缩短至数分钟，缺陷批次数量相较于传统模式将显著降低并即使将问题反馈。同时，自动化的在线监测替代了人工取样、稀释、检测的全流程，降低了实验室成本与人为误差

2 浆料制备控制

电极浆料作为电池制造的核心中间产物，是由活性物质、导电剂、粘结剂和溶剂经混合分散形成的高黏度固液两相的悬浮体系，其中颗粒的尺寸、分布、形貌及表面特性对浆料性质及最终电池性能具有决定性影响。

颗粒粒径直接决定浆料黏度，尺寸越小、比表面积越大，颗粒间摩擦与相互作用力越强，导致黏度升高，纳米级颗粒虽能提升倍率性能却易团聚，需高剪切力分散；而 LPC 或直径大的团聚体则会导致涂布时无法均匀铺展，产生划痕、拖尾或厚度不均等现象，甚至堵塞模头形成纵向划痕与针孔，使得干燥后成为电极内部应力集中点。导电剂的分布状态同样关键，纳米级导电剂如炭黑、碳纳米管需均匀填充活性物质间隙以形成导电桥联，若发生团聚形成微米级大颗粒，则会破坏导电网络连续性^[6]，导致局部电导率下降、电池内阻增大、倍率性能降低；此外，活性物质的颗粒粒径过大会减少接触点、增大接触电阻，过小则副反应增多，因此保持均匀的颗粒尺寸是平衡内阻与副反应的关键。在机械稳定性方面，粘结剂会在颗粒间及颗粒与集流体间形成网状结构的锚定电极，大颗粒周围因比表面积小会使得锚固点不足，易形成弱结合区，在充放电循环中活性物质反复膨胀收缩时率先脱粘，造成活性物质脱落和不可逆容量损失^[7]；同时大颗粒作为结构缺陷，与周围小颗粒体积变化率不一致，会在界面处产生应力集中诱发微裂纹，切断导电通路导致容量衰减。

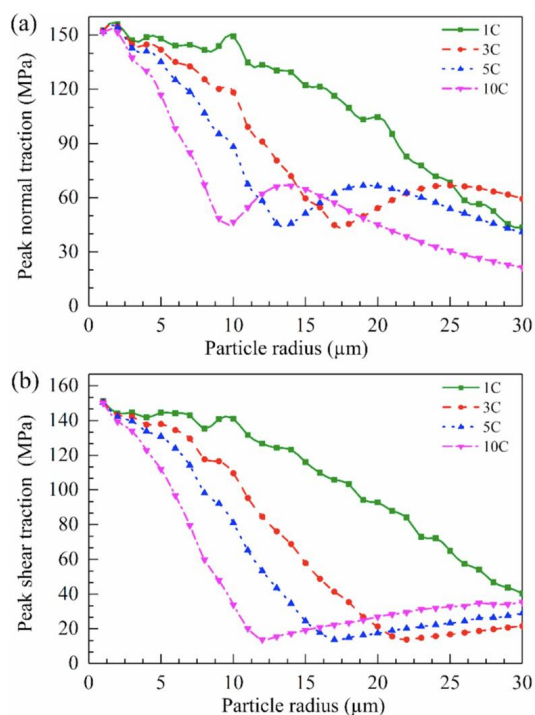


图 2.2 不同温度下不同方向受力状态和颗粒半径的变化关系

颗粒沉降行为遵循斯托克斯定律，粒径越大则沉降越快，在浆料储存或输送中，不同质量的颗粒将造成固含量分层，使上层极片容量偏低、下层极片应力过大，这种现象将缩短浆料可使用时间，影响生产连续性。若浆料中混入尺寸接近隔膜厚度的颗粒或团聚物，在电池震动、挤压或长期循环后可能刺穿隔膜引发内部微短路，甚至局部过热情形下触发热失控。

针对上述问题，AccuSizer MINI LE 基于单颗粒传感技术（SPOS）的原理，通过光阻法与光散射法结合，可精确检测 $0.5\mu\text{m}$ - $400\mu\text{m}$ 范围内的颗粒，同时自动稀释系统可监测高浓度样品。在涂布机前的浆料管路上安装在线颗粒计数器监测浆料，可在缺陷产生前捕

捉到异常颗粒信号，例如，当监测到 $>30\mu\text{m}$ 的大颗粒计数突增时，系统可判定为过滤芯破损或分散设备异常，立即触发报警并自动切换备用过滤器，避免缺陷极片流入下游工序。

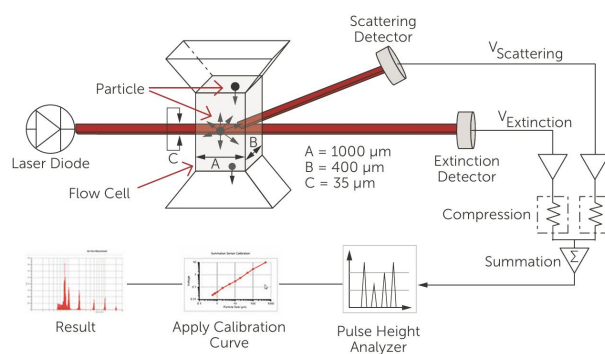


图 2.3 AccuSizer MINI LE 监测原理

3 结论与展望

电池制造过程中，颗粒尺寸及其分布的精准管控是保障最终性能一致性与安全性的核心技术前提。本文系统分析了颗粒在材料前驱体合成与电极浆料制备两个关键环节中的影响。在前驱体阶段，LPC 的存在会破坏颗粒堆积均匀性，降低振实密度，并在后续烧结过程中将结构缺陷传递至后续材料；在浆料制备阶段，颗粒的尺寸与分布直接决定浆料流变特性、导电网络完整性及机械稳定性，异常颗粒会导致涂布缺陷、内阻升高、活性物质脱落乃至隔膜刺穿等安全性问题。传统离线检测方法存在数小时的时间滞后，难以满足规模化生产对实时质量控制的需求。Entegris 的在线监控设备基于聚焦光束技术（Focused Extinction）与单颗粒光学传感技术

（SPOS）的原理，可将含有异常颗粒的批次检出与干预时间缩短至分钟级，从而降低废品率、提升材料利用率，并从根本上保障电池的生产良率并控制成本。

参考文献

- [1] Liu, W., Oh, P., Liu, X., Lee, M. J., Cho, W., Chae, S., ... & Cho, J. (2015). Nickel-rich layered lithium transition-metal oxide for high-energy lithium-ion batteries. *Angewandte Chemie International Edition*, 54(15), 4440-4457.
- [2] Kim, J., Lee, H., Cha, H., Yoon, M., Park, M., & Cho, J. (2019). Prospect and reality of Ni-rich cathode for commercialization. *Advanced Energy Materials*, 9(6), 1802264.
- [3] Li, W., Erickson, E. M., & Manthiram, A. (2020). High-nickel layered oxide cathodes for lithium-based automotive batteries. *Nature Energy*, 5(1), 26-34.
- [4] Wood, D. L., Li, J., & Daniel, C. (2015). Prospects for reducing the processing cost of lithium ion batteries. *Journal of Power Sources*, 275, 234-242.
- [5] ScienceDirect. (2025). Synthetic control guided by growth mechanism insights enable tailored precursors for layered oxide cathodes. *Chemical Science*, 16(34), 15714-15722.
- [6] Qi J, Bolag A, Nan D, Zhu X, Bao T, Li W, Li L. From Inert Spacer to Functional Conductor: A Paradigm Shift in Grinding Aids Enables Dual-Channel Conductive Networks for

High-Performance LiFePO Cathodes. *Langmuir*. 2025 Dec 9;41(48):32922-32933.

- [7] Zhang W, Li X, Wang Y, et al. Analysis of mechanical failure at the interface between graphite particles and polyvinylidene fluoride binder in lithium-ion batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 2020, 450: 227-236.