

# 极致高安全锂离子电池生产工艺及体系构建关键技术研究

王 兵<sup>1,3</sup> 陈 玮<sup>1</sup> 李纾黎<sup>1</sup> 兰亚林<sup>2</sup> 南俊民<sup>3</sup>

1. 广州鹏辉能源科技股份有限公司 广东广州 511483

2. 沈阳化工大学分析测试中心 辽宁沈阳 110141

3. 华南师范大学 化学学院 广东广州 511483

**摘要:** 随着动力电池与储能系统的迅猛发展, 锂离子电池的安全性已成为制约产业可持续扩张的核心瓶颈。尤其在新能源汽车、分布式储能及轨道交通等应用场景中, 电芯在高倍率、高温、低温及极端环境下运行频次日增, 传统安全设计体系难以支撑“零失效”目标。本文聚焦极致高安全锂离子电池生产中的关键技术瓶颈与工艺壁垒, 以320Ah容量的磷酸铁锂电池测试数据为支撑, 系统梳理其在容量保持、热失控抑制、结构可靠性等方面的制造技术路径, 并基于当前锂电行业工艺控制体系特征提出具备工程可实施性的生产工艺关键技术与系统性构建措施, 为建立面向极端场景应用的高安全锂离子电池制造平台提供理论依据与工艺支撑。

**关键词:** 极致高安全锂离子电池; 生产工艺; 关键技术; 体系构建

近年来, 随着人们生活水平的提高和效率要求的增加, 电子行业正以惊人的速度发展。在这个快速变化的环境中, 锂离子电池作为一种重要的电池类型, 已经成为电子设备领域的主力。其在电动车、电脑、手表、航空和卫星等领域的广泛应用, 彰显了其在安全性、性能和成本等方面的优势。特别值得关注的是电动汽车市场的迅猛增长。随着电动汽车市场的蓬勃发展, 对锂离子电池生产工艺规范和安全性能的要求也越来越高。确保锂离子电池产品的质量和安全已成为业界亟待解决的问题。为此, 下文就极致高安全锂离子电池生产工艺的关键技术及体系构建进行研究, 以供参考。

## 一、极致高安全锂离子电池概述

近年来, 锂离子电池在能量密度提升与成本控制方面取得显著进展, 然而由热失控、结构破裂、电解液泄露等引发的安全事件仍时有发生, 特别在大容量电芯( $\geq 300\text{Ah}$ )批量应用场景中尤为突出。提升电芯安全性的核心不在于单一设计点的优化, 而在于材料、制造、装配及系统级协同中的极致控制<sup>[1]</sup>。320Ah测试数据的系统分析可见, 该系列电芯在多项安全测试中, 包

括过充、过放、热失控、挤压、跌落、外短路等均无起火、爆炸或结构破坏, 不仅表现出极高的安全容错边界, 并且在如此极限条件下均维持优良安全边界与能量回收能力, 其生产体系与工艺控制具备极高研究价值。从中国电芯制造体系来看, 实现上述指标的关键并非依赖单一环节, 而是源于在材料筛选、电极涂布均匀性控制、极片压实、壳体成型一致性及高温存储后结构应力管理等方面的系统性优化。当前, 推动构建系统级高安全制造体系, 已成为中国锂电产业技术提升与品牌突破的核心路径之一。

## 二、极致高安全锂离子电池生产工艺的关键技术

### (一) 高均匀性电极浆料制备与分散控制

为实现极致高安全锂离子电池电极材料在全生命周期内的电化学一致性与微观结构稳定性, 需从电极浆料分散均匀性与粘度控制环节入手, 构建可精控的制浆工艺路径。正极采用磷酸铁锂粉体与导电炭黑(SuperP)复配体系, 负极以中高比表面积人造石墨为主, 分别在双段真空密闭捏合装置中实施分段剪切分散操作: 初段以低速浆叶实现粉体预润湿及团聚初步破碎, 剪切速率控制在, 次段利用高剪切涡流分散头对浆料进行均质化分散处理, 处理时长依物性设定在15-25min。全过程中采用动态旋转粘度计进行在线监测, 并引入PID控制调节剂添加速率与搅拌转速, 实现浆料黏度精确控制。要达到气泡剔除彻底目的, 则须双阶段真空脱泡放在分散

**基金项目:** 国际锂离子电池储能安全评价关键技术合作研发(2022YFE0207400)。

**作者简介:** 王兵(1991年5月), 汉族, 女, 辽宁省铁岭市, 博士研究生, 超级电容器, 锂离子电池。

末期，脱泡真空度要保证 $\leq -0.095\text{MPa}$ ；若浆料系统含有片层状导电剂（石墨烯或者碳纳米管），则需要先通过表面张力调节来避免其结构坍塌。分散剂体系选择聚羧酸盐为主体成分，用界面张力调节剂做辅剂，总量不超过 $0.7\text{wt}\%$ ，根据活性物质批号的不同，采用先导电剂后活性物料分散方式。批间的一致性可通过MES系统的精细化路径设置和数据回溯管理，浆料抽样检查，并使用激光粒径分析仪做粒径监控，控制其范围，从而保证浆料粒径分布较为集中、分散体系稳定，避免颗粒团聚造成的涂布缺陷和极片脱粘问题<sup>[2]</sup>。

### （二）高压实极片辊压与结构形变抑制技术

高压实极片辊压和结构形变抑制技术是极致高安全锂离子电池生产工艺里一项重中之重的技术。使用4辊联动温控辊压机，并且配备高精度温控系统使上下辊温差保持在 $\pm 2^\circ\text{C}$ 之内，从而使正负极片双面厚度差在可控公差内，避免由于厚度过大或过小引起的局部应力集中。将在线X射线厚度扫描系统运用到生产线中，实现对辊压厚度的实时监测及反馈校准。辊压后的极片要在恒温恒湿环境下静置，以释放极片的内部应力，避免出现极片卷绕时出现卷绕翘曲或者层间脱开的情况。卷绕过程运用恒张力闭环控制，并借助高精度张力传感器测量并实时调整卷绕张力，确保极片受力均匀，可以有效抑制极片的微裂纹。极耳区域采取定向多层辊压强化极耳与极片的结合度，并采用高介电强度包覆膜，提升局部绝缘性能，降低微短路风险。辊压过程辅以高分辨率红外热成像与X射线缺陷检测，监控极片结构均匀性及潜在微缺陷，保障材料致密性和均匀分布。整体工艺通过温度、压力、张力等多参数精准协同控制，实现极片结构致密稳定，有效抑制形变，满足极致高安全锂离子电池对极片机械与电化学性能的严苛要求。

### （三）隔膜热稳定处理与多段干热热封技术

隔膜热稳定处理采用复合膜作基材，在热定型过程中不断将膜层内应力释放且晶区结构得到优化。按顺序划分不同温区（ $90\text{--}120^\circ\text{C}$ ）每个温区不同的保温时长。借助于3个温区不仅使聚合物链段排列更整齐与结晶度更高，同时降低隔膜层微观结构的不均匀收缩程度，提高隔膜整体的耐热收缩温度 $145^\circ\text{C}$ 以上。严格控制隔膜的热收缩率，确保热失控初始阶段隔膜孔隙自封闭能力和形态的稳定不变。采用三级分段温压递增的热封方式，边缘加固段温度 $160\pm 2^\circ\text{C}$ 、压力 $300\pm 10\text{kPa}$ ；封合时长 $\leq 2.8\text{s}$ ，确保封合界面的熔融扩散，不允许烧焦烧黑，

且封合压力由气动伺服联动装置自动调节，波动范围 $\pm 3\%$ 以内，保证封合边缘的平整和一致性<sup>[3]</sup>。极耳与封装膜交接区域过渡层采用高模量增强型聚丙烯（PP）粘结胶进行铺设，如此一来能够利用后者较强力学性能和热稳定性确保热封界面结合强度及密封持续性。此复合封装技术显著提升结构完整性和电解液密闭效果，进而降低在外力冲击或高温失控时电解液喷涌风险。

## 三、极致高安全锂离子电池生产体系构建

### （一）全过程高温作业工位独立隔离与热干燥联动机制

为有效控制生产过程中可能因水分残留、电解液挥发或操作热干扰造成的安全隐患，需构建全过程高温关键工序物理隔离与联动管理体系。具体做法是在极片干燥、极耳烘烤、壳体预热、注液预热与热封等工位设置独立温控隔间，各隔间通过高性能无尘风帘与正压密闭舱室进行区隔，确保局部升温不影响其他工艺段的热稳定性。在空间布局上，将五大热源工序布置于一条线性流向路径上，热风流向与作业方向一致，降低热扰动回流风险。同时，干燥与热封环节设立联动信号系统，采用热干燥排气热回收设备将部分热能反馈至前段烘烤工位，并配置专用排气管路引流热分解产物，避免局部浓度堆积形成燃爆风险。操作规范中明确规定任何带电芯工件进入热区之前必须完成24小时恒温脱湿程序（ $<1.0\text{ppm}$ 水分），所有热工序必须配备本地热敏报警装置与氮气联动保护装置，联动响应时间不超过 $1.5\text{s}$ 。该机制通过空间隔离与工艺联动，实现对高温风险源的局部化封闭与路径优化，增强热过程中的整体工艺控制闭环能力。

### （二）制造全过程湿度闭环控制与静态吸附强化系统

极致高安全锂离子电池的制造全过程中对水分的控制必须实施绝对闭环管理，特别在涂布干燥、卷绕组装、注液、化成等关键环节。建议在所有工艺段导入独立露点控制系统，湿度控制目标应设置为 $-50^\circ\text{C}$ 露点以下，并以每5分钟采样周期进行动态趋势修正。干燥房、注液房与静置室必须配备独立分区的全金属除湿系统，每个系统设置三重过滤结构：预过滤、精过滤与高效分子筛吸附。为确保吸附效率，在每班作业后需对分子筛进行 $150^\circ\text{C}$ 真空再生处理，并每季度更换一次分子筛筒体。卷绕区域通过地面嵌入式除湿盘与高密封导轨配合，将空气湿度控制在 $\leq 0.5\%RH$ ；工艺设备裸露部件表面须喷涂微孔陶瓷防潮膜层以抑制水汽滞留。对

于所有未封装电芯，在每一道工艺间隔期均须进入防潮静置舱，并设置密闭湿度监测探头，记录电芯表面实时环境数据<sup>[4]</sup>。在操作层面，要求每次物料转移过程中执行“三点检测”制度，即湿度采样点在出库、进入中间仓与上线前各一次，全程记录纳入工艺合规性审核系统。该系统以点一面一舱三级闭环结构保障全流程干燥环境一致性，从而有效避免因微量水分诱发的电解液分解、SEI膜劣化及气体析出等安全问题。

### （三）工序间温压过渡应力调和与多段缓释管理机制

大尺寸、高压实结构电芯由于不同工序之间的压力、温度、形变量变化等原因造成初始应力梯度巨大，因此，建立全流程工序间过渡缓释体系对有效降低电芯内应力梯度过大导致的早期失效和安全隐患具有重要意义。该体系主要是在辊压、卷绕、壳装以及热封这些具有很大应力变化的关键工序中间设置独立的缓释区段，每个缓释区段设置恒温调节舱与恒载平衡板静压系统，逐级调整材料以及电芯的应力状态，使材料与结构能够逐步地适应后续的工艺条件。卷绕完成后要放到恒压环境下静置，使其内部分子重新分布平衡；在壳体成型后引入低速压合的方法，在压合之后再静置恒温缓释，避免压合诱导应力集中；热封完成后利用强制冷却控制方法，减小密封区域与电芯本体温差，使应力变化处于温和的状态，从而防止因为热应力突变而导致密封面开裂。另外，每个缓释阶段都要配置应力检测传感装置，进行电芯结构变化的趋势数据采集，并且对有异常情况的产品实行人工复检。

### （四）封装后气密检与残余应力复核一体验证流程

安全电芯如果未能在封装时把残余应力释放掉，在长期循环或者进入极值工况等情况下会导致其产生机械破坏的现象，所以需要在整个封装后搭建气密检测和结构应力复核的一体化流程<sup>[5]</sup>。热封完成后立刻开展正压气密检测，用氦质谱检漏仪进行扫描判别；然后开展内腔微应力场复核，用激光轮廓仪+三轴压强测试模块进行电芯表面0.1mm级的精度扫描，得出应力梯度分布图谱，如果存在异常区域，则根据所测得电芯外表面红外热像图判断该部分是否出现热成像异常，如果出现应力

超阈值现象则对这部分进行局部二次热平衡处理之后重新复测。检查与复核须在干燥室里面进行，保持环境温度处于 $25 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度不大于0.5%RH，所有的检测数据都会录入到质量控制系统中，并且形成封装-验证-释压的闭环控制链路。所有步骤都要保证百分之百的实施抽样检验，且在电芯上设置全生命周期追溯编号，以便于确保一致性及后期失效分析工作。

### 结束语

极致高安全锂离子电池的制造不仅要求在电化学材料层面满足热稳定性与循环寿命，更需要在工艺设计与系统构建上形成全流程、高一致性的安全控制逻辑。本文基于320Ah容量的磷酸铁锂电芯的实际测试数据，系统梳理并提出了高均匀浆料制备、高压实辊压、热封复合工艺等三项生产关键技术，同时围绕湿度控制、热工位隔离、应力缓释与封装验证四个维度构建了高安全生产体系路径。这些措施不依赖信息化系统，仅通过物理工艺路径与流程逻辑即可支撑对大容量电芯的安全性实现闭环控制，具备强工程可行性与产业推广潜力，为我国锂离子电池行业实现安全性能的系统性提升提供了切实可落地的技术框架。

### 参考文献

- [1] 陈绍军, 翁少玲, 曾国辉, 等. 锂离子电池生产工艺规范及安全性能检测方法概述 [J]. 广州化工, 2024, 52(11): 4-6.
- [2] 张杨, 李波, 刘思, 等. 电动汽车锂离子电池制造工艺技术——评《锂离子电池制造工艺原理与应用》[J]. 化学工程, 2021, 49(10): 前插5.
- [3] 赵添婷, 朱德伦, 杨林, 等. 锂离子电池多孔硅负极材料制备及工艺优化 [J]. 无机盐工业, 2024, 56(5): 31-38.
- [4] 邓可. 锂离子电池用电解铜箔生产工艺技术及市场浅析 [J]. 有色金属加工, 2021, 50(6): 8-9.
- [5] 韩有军. 面向高一致性的锂离子动力电池制造过程关键技术研究 [D]. 华南理工大学, 2023.