

证券研究报告·行业深度报告

固态电池：潮涌先立樁，设备启新章

分析师：朱玥

zhuyue@csc.com.cn

SAC 编号:S1440521100008

SFC 编号:BTM546

分析师：许琳

xulin@csc.com.cn

SAC 编号:S1440522110001

SFC 编号:BVU271

分析师：屈文敏

quwenmin@csc.com.cn

SAC 编号:S1440524050004

发布日期：2025年06月27日

内容摘要

核心观点：2026-2030固态电池年产业化快速导入电池端CAGR139%，考虑干法工艺导入液态电池，设备端CAGR151%快于电池端，2030年设备端空间看至533亿元。当下节点我们认为固态电池产业化看设备，设备看法工艺环节，主要系1)设备端最先受益行业资本开支提升，订单兑现较快，2)当前已处于技术方案即将落地中试线推进关键时期；3)干法工艺技术路线共识及确定性强，同时受益液态电池导入；4)设备要求提升，价值量中长期看较液态电池仍存20-30%空间，建议关注具备干法电极、等静压设备等固态电池核心差异化工序的设备自供能力，客户深度绑定、验证进展快的高弹性标的。

◆ 固态电池生产工艺及流程与液态电池的核心差异点：

- 1) **干法电极制备工艺：**难点在于固态电解质膜的厚度、材料分散的均匀性和负极的平整度的控制，要求为微米甚至纳米级别。
- 2) **等静压工艺：**目前多采用中温等静压工艺，温度（80-120℃）、压力（百兆帕）要求远高于液态电池。
- 3) **叠片+软包工艺：**叠片可有效解决电解质柔韧性问题，与全固态电池的固-固界面处理相兼容，软包封装在能量密度上具备优势

◆ 空间及增速：2026-2030年产业化快速导入电池端CAGR139%，考虑干法工艺导入液态电池，设备端CAGR151%快于电池端，2030年设备端空间看至533亿元

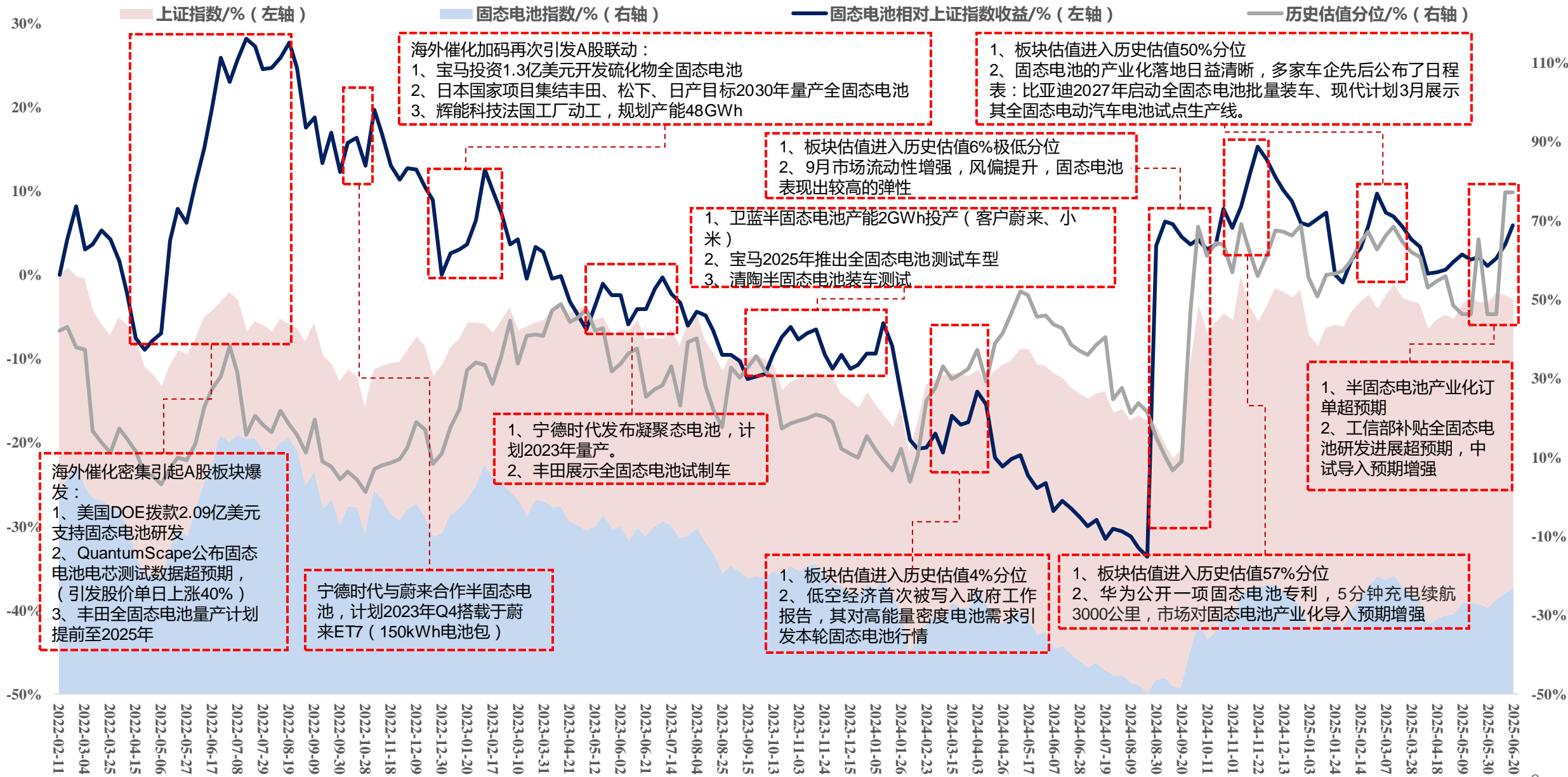
- 1) **固态电池空间：**我们预计2030/2040/2050年固态电池需求将从2026年的GW级进入212GW、2.0TWh、5.5TWh，2026-2030年CAGR139%。
- 2) **固态电池设备空间：**考虑干法工艺在固态及液态电池端导入，2030年固态电池设备市场将从13亿元进入533亿元，2026-2030年CAGR151%。

◆ 当下节点看好设备端的逻辑：固态电池产业化看设备，设备看干法工艺环节

- 1) **最先受益资本开支提升：**设备端是产业导入及落地的率先受益环节，订单最快兑现
- 2) **已进入设备导入节点：**基于工信部60e研发专项资金结题要求，27年样车落地，**当前节点已处于技术方案即将落地中试线推进建设的关键时期**
- 2) **技术路线共识强：**干法电极工艺适配多种电解质路线，且该工艺同时受益液态电池端工艺导入
- 3) **价质量提升：**纤维化设备是干法电极特有设备，辊压设备精度及压力要求提升下较液态电池短期存在2-3倍，中期存在20-30%溢价空间

投资建议：我们认为设备环节资本开支是固态电池产业化的先行指标，设备端将成为产业导入的率先受益环节，建议关注具备干法电极、等静压设备等固态电池核心差异化工序的设备自供能力，且客户绑定深入、验证进展快的高弹性标的。

固态电池板块走势复盘及跟踪



固态电池空间测算：2030年预计固态电池需求212GWh

图：固态电池空间测算

| 分类 | 锂电需求/GWh | yoy/% | 动力/GWh | 储能/GWh | 消费/GWh | evtol/GWh | 机器人/GWh | 小动力等其他/GWh |
|--------------|--------------|------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|------------|
| 2026E | 2195 | // | 1501 | 503 | 117 | 3 | 2 | 70 |
| 固态电池/GWh | 6 | // | 4 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 渗透率/% | 0.3% | // | 0.3% | 0.3% | 1.0% | 1.0% | 1.0% | 0.0% |
| 半固态/GWh | 5 | // | 3 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 占比/% | 77.0% | // | 70.0% | 100.0% | 70.0% | 70.0% | 70.0% | 100.0% |
| 全固态/GWh | 1 | // | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 占比/% | 23.0% | // | 30.0% | 0.0% | 30.0% | 30.0% | 30.0% | 0.0% |
| 2030E | 4153 | 17% | 2643 | 1054 | 128 | 200 | 50 | 78 |
| 固态电池/GWh | 212 | 139% | 106 | 5 | 38 | 50 | 13 | 0 |
| 渗透率/% | 5.1% | // | 4.0% | 0.5% | 30.0% | 25.0% | 25.0% | 0.5% |
| 半固态/GWh | 109 | 116% | 53 | 5 | 19 | 25 | 6 | 0 |
| 占比/% | 51.3% | // | 50.0% | 100.0% | 50.0% | 50.0% | 50.0% | 100.0% |
| 全固态/GWh | 103 | 189% | 53 | 0 | 19 | 25 | 6 | 0 |
| 占比/% | 48.7% | // | 50.0% | 0.0% | 50.0% | 50.0% | 50.0% | 0.0% |
| 2040E | 9313 | 8% | 5654 | 2662 | 230 | 400 | 250 | 117 |
| 固态电池/GWh | 1957 | 25% | 1414 | 133 | 115 | 180 | 113 | 2 |
| 渗透率/% | 21.0% | // | 25.0% | 5.0% | 50.0% | 45.0% | 45.0% | 2.0% |
| 半固态/GWh | 796 | 22% | 565 | 126 | 29 | 45 | 28 | 2 |
| 占比/% | 40.7% | // | 40.0% | 95.0% | 25.0% | 25.0% | 25.0% | 95.0% |
| 全固态/GWh | 1161 | 27% | 848 | 7 | 86 | 135 | 84 | 0 |
| 占比/% | 59.3% | // | 60.0% | 5.0% | 75.0% | 75.0% | 75.0% | 5.0% |
| 2050E | 12324 | 3% | 8119 | 2516 | 415 | 600 | 500 | 175 |
| 固态电池/GWh | 5485 | 11% | 4059 | 252 | 332 | 450 | 375 | 18 |
| 渗透率/% | 44.5% | // | 50.0% | 10.0% | 80.0% | 75.0% | 75.0% | 10.0% |
| 半固态/GWh | 1620 | 7% | 1218 | 214 | 50 | 68 | 56 | 15 |
| 占比/% | 29.5% | // | 30.0% | 85.0% | 15.0% | 15.0% | 15.0% | 85.0% |
| 全固态/GWh | 3865 | 13% | 2842 | 38 | 282 | 383 | 319 | 3 |
| 占比/% | 70.5% | // | 70.0% | 15.0% | 85.0% | 85.0% | 85.0% | 15.0% |

数据来源：公司公告，高工锂电、鑫椏锂电、中信建投

固态电池空间测算：2030年预计液态电池干法电极需求76GWh

图：液态电池干法电极空间测算

| 分类 | 锂电需求/GWh | yoy/% | 动力/GWh | 储能/GWh | 消费/GWh | evtol/GWh | 机器人/GWh | 小动力等其他/GWh |
|--------------|--------------|------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|------------|
| 2026E | 2195 | // | 1501 | 503 | 117 | 3 | 2 | 70 |
| 液态电池/GWh | 2188 | // | 1497 | 501 | 115 | 3 | 1 | 70 |
| 渗透率/% | 99.7% | // | 99.8% | 99.7% | 99.0% | 99.0% | 99.0% | 100.0% |
| 干法电极电池/GWh | 1 | // | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 渗透率/% | 0.0% | // | 0.1% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| 固态电池/GWh | 6 | // | 4 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 渗透率/% | 0.3% | // | 0.3% | 0.3% | 1.0% | 1.0% | 1.0% | 0.0% |
| 2030E | 4153 | 17% | 2643 | 1054 | 128 | 200 | 50 | 78 |
| 液态电池/GWh | 3940 | // | 2537 | 1049 | 90 | 150 | 38 | 77 |
| 渗透率/% | 94.9% | // | 96.0% | 99.5% | 70.0% | 75.0% | 75.0% | 99.5% |
| 干法电极电池/GWh | 76 | 218% | 76 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 渗透率/% | 1.9% | // | 3.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| 固态电池/GWh | 212 | 139% | 106 | 5 | 38 | 50 | 13 | 0 |
| 渗透率/% | 5.1% | // | 4.0% | 0.5% | 30.0% | 25.0% | 25.0% | 0.5% |
| 2040E | 9313 | 8% | 5654 | 2662 | 230 | 400 | 250 | 117 |
| 液态电池/GWh | 7357 | // | 4241 | 2529 | 115 | 220 | 138 | 114 |
| 渗透率/% | 79.0% | // | 75.0% | 95.0% | 50.0% | 55.0% | 55.0% | 98.0% |
| 干法电极电池/GWh | 339 | 10% | 339 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 渗透率/% | 4.6% | // | 8.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| 固态电池/GWh | 1957 | 25% | 1414 | 133 | 115 | 180 | 113 | 2 |
| 渗透率/% | 21.0% | // | 25.0% | 5.0% | 50.0% | 45.0% | 45.0% | 2.0% |
| 2050E | 12324 | 3% | 8119 | 2516 | 415 | 600 | 500 | 175 |
| 液态电池/GWh | 6839 | // | 4059 | 2264 | 83 | 150 | 125 | 158 |
| 渗透率/% | 55.5% | // | 50.0% | 90.0% | 20.0% | 25.0% | 25.0% | 90.0% |
| 干法电极电池/GWh | 406 | 2% | 406 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 渗透率/% | 5.9% | // | 10.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| 固态电池/GWh | 5485 | 11% | 4059 | 252 | 332 | 450 | 375 | 18 |
| 渗透率/% | 44.5% | // | 50.0% | 10.0% | 80.0% | 75.0% | 75.0% | 10.0% |

数据来源：公司公告，高工锂电、鑫椏锂电、中信建投

设备端空间测算：2030年预计固态相关设备市场空间533亿元

图：固态电池设备需求空间测算

| 年度 | 2026E | 2030E | 2040E | 2050E | 备注 |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------------------------------------|
| 锂电总需求 | 2195 | 4153 | 9313 | 12324 | |
| yoy/% | /// | 17% | 8% | 3% | 平均复合增速 |
| 固态电池需求/GWh | 6 | 212 | 1957 | 5485 | |
| yoy/% | /// | 139% | 25% | 11% | |
| 固态电池渗透率/% | 0.3% | 5.1% | 21.0% | 44.5% | |
| (4年) 10年累计新增固态电池需求/GWh | /// | 206 | 1744 | 3528 | 2026-2030年为4年新增产能 |
| 理论新增产能需求/GWh/年 | 3 | 165 | 174 | 353 | 30年投产占比26-30年扩产的80%，其余阶段平均分布于10年间 |
| 实际新增产能需求/GWh/年 | 4 | 215 | 227 | 460 | 按照85%稼动率计算，95%良率，95%收率，实际订单早于达产1-2年 |
| 液态干法电池需求/GWh | 1 | 76 | 339 | 406 | |
| yoy/% | /// | 218% | 16% | 2% | |
| (4年) 10年累计新增固态电池需求/GWh | /// | 75 | 263 | 67 | 2026-2030年为4年新增产能 |
| 理论新增产能需求/GWh/年 | 1 | 60 | 26 | 7 | 30年投产占比26-30年扩产的80%，其余阶段平均分布于10年间 |
| 实际新增产能需求/GWh/年 | 1 | 79 | 34 | 9 | 按照85%稼动率计算，95%良率，95%收率，实际订单早于达产1-2年 |
| 设备市场空间/亿元 | 13 | 533 | 414 | 688 | 2026-2030年CAGR约151% |
| 价值量/亿元/GWh | 3.16 | 2.24 | 1.75 | 1.49 | |
| 前道产线空间/亿元 | 5 | 196 | 119 | 163 | |
| 价值量/亿元/GWh | 1.12 | 0.67 | 0.45 | 0.35 | |
| 占比/% | 35% | 30% | 26% | 23% | |
| 中道产线空间/亿元 | 6 | 247 | 227 | 409 | |
| 价值量/亿元/GWh | 1.50 | 1.15 | 1.00 | 0.89 | |
| 占比/% | 47% | 51% | 57% | 60% | |
| 后道产线空间/亿元 | 2 | 90 | 68 | 115 | |
| 价值量/亿元/GWh | 0.55 | 0.42 | 0.30 | 0.25 | 长期来看可对标方形产线价值量，短期较液态电池价格+30%-40% |

数据来源：公司公告，高工锂电、鑫椏锂电、中信建投

目录

- 01. 固态电池设备核心要点总结
- 02. 前段工艺：核心变化为引入干法电极技术
- 03. 中段工艺：取消注液工艺，电池集成多采用叠片软包方式
- 04. 后段工艺：升温升压下进行，降低能耗成为竞争要点
- 05. 产业化导入设备端率先受益，关注具备核心竞争力的高弹性标的

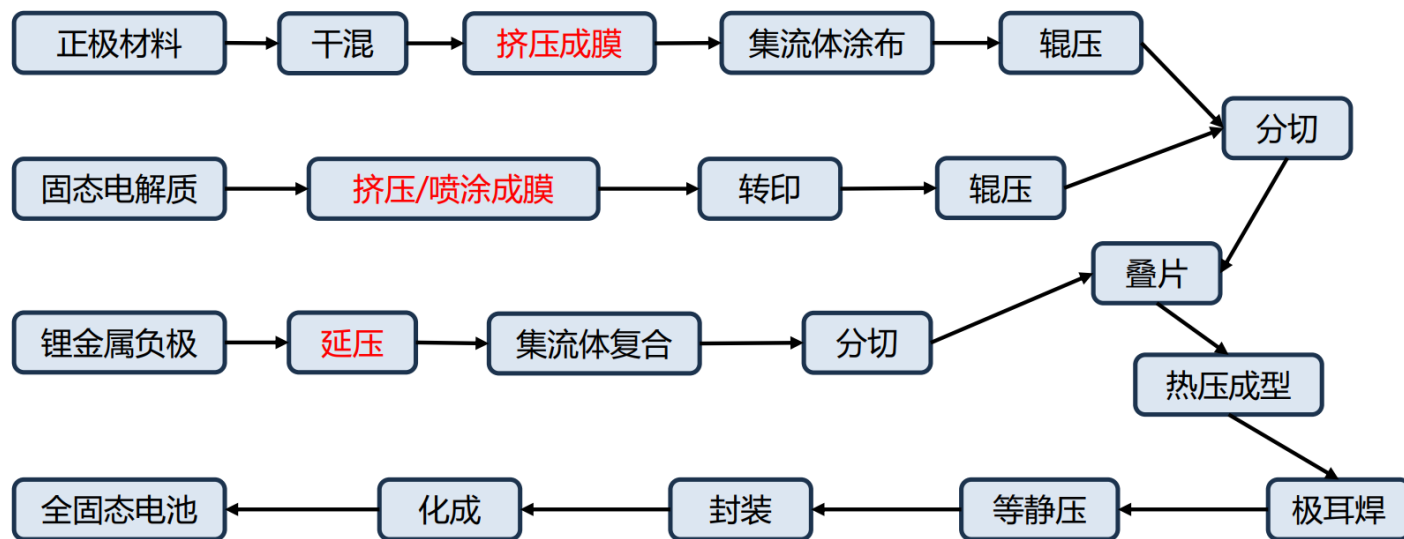
PART 1

固态电池设备核心要点总结

1.1 固态电池生产流程：难点在于固态电解质成膜工艺、电池集成

- 全固态电池生产流程的难点在于固态电解成膜、固态电池集成，其中最核心的环节为固态电解质成膜，相比液态电池设备的精度和能力要求大幅提升。
- 固态电解质成膜需使用干法工艺，难点在于固态电解质膜的厚度、材料分散的均匀性和负极的平整度的控制，要求为微米甚至纳米级别。固态电解质层厚度为30-40 μm ，对于PTFE原纤维化后的取向性和均匀性要求极高，才能减少缺陷和孔洞的产生，因此对设备的精度和均匀度要求较高，主流通过挤压流延、静电喷涂等方式生产
- 负极侧锂金属平整度极其关键，直接影响到循环和快充性能，若无法达到纳米级平整度，可能容易产生锂枝晶问题，电池性能进而极速衰减跳水

图：全固态电池生产流程图



1.2 固态/液态电池设备异同点一览

图：一图看懂固态/液态电池设备及工艺的区别

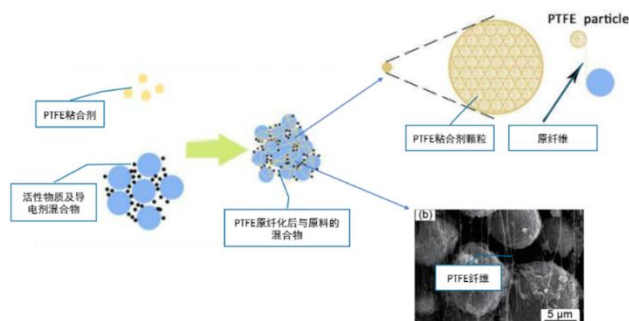
| 环节 | | 正负极片&电解质制备（前段） | | | | | | 电芯组织（中段） | | | | | | 后段 | | |
|-------------|--------|--|---------------------|-------------|----------------------------------|--|---|---|---|--|------------------------------|---|----------------------------|---|---------|--|
| 工艺 | | 匀浆搅拌 | 干料混合 | 涂布&烘烤 | 干法涂布 | | | 分条&模切 | 胶框印刷 | 电芯集成 | 等静压 | 极耳焊接 | 封装 | 注液 | 原位固化 | 化成内容 |
| 用途 | | 活性物质均匀化 | 搅拌后进一步减小固体颗粒尺寸并二次分散 | 混合材料涂覆于集流体上 | 1、纤维化-使粘合剂在干燥状态下发挥出类似于湿法中的液态粘结效果 | 2、自成膜-压实已成型的电极薄膜或粉体自支撑膜 | 3、热复合-将干法电极膜与集流体牢固结合 | 将带材按特定长度、形状冲切成电芯所需的尺寸/图案 | 在极片上印刷胶框以形成支撑并保持干燥避免短路 | 将正负极、隔膜层叠以形成电池堆实现电芯装配 | 实现电芯活性组件的充分接触 | 将电芯的正负极耳与电芯叠片体可靠连接，确保低接触电阻与电流高效传输 | 保护电芯免受外部环境的影响，确保电池的安全性和稳定性 | | | 激发电池活性物质实现初始化/标准化充放电循环测量实际容量和性能 |
| 液态锂电 | | √ | | √ | | √ | | √ | | | | √ | | √ | | |
| 半固态 | 固液混合工艺 | √ | | √ | | √ | | √ | | | | √ | | √ | | |
| | 原位固化工艺 | √ | | √ | | √ | | √ | | | | √ | | √ | √ | |
| 全固态 | 硫化物 | 可采用 | √ | 可采用 | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | | | √ |
| | 氧化物 | 可采用 | √ | 可采用 | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | | | √ |
| | 聚合物 | 可采用 | √ | 可采用 | √ | √ | √ | √ | | √ | √ | √ | √ | | | √ |
| 设备名称 | | 搅拌机 | 强力混合机 | 涂布机 | 纤维化设备 | 辊压机 | 热复合设备 | 分条模切机 | 胶框印刷机 | 无隔膜叠片机 | 等静压设备 | 激光/超声焊接机 | 软包 | 注液机 | 烘烤/UV设备 | 成分容机 |
| 固态/液态电池应用区别 | | 半固态电池使用湿法电极，全固态电池使用干法工艺。其中： 1) 搅拌、混合机：固态电池采用干法搅拌、混合技术，相比液态电池需保证电解质粉体干燥并惰性气氛中温和搅拌、振动并结合碰撞、剪切等高能机械作用混合，最终实现纳米量级的均匀分散； 2) 涂布机：全固态采用干法涂布技术，与传统湿法涂布存在较大不同 | | | 固态特有的纤维化工艺 | 1、液态电池：常温进行以免影响电解液性能； 2、固态电池：加热条件，固态电解质在特定温度下具有更好可塑性/流动性。 | 高温使固态电解质在特定温度下实现更好的可塑性和流动性，便于与电极材料更好贴合，最终将电解质膜压到正负极集流体上 | 固态电解质脆性及硬度高等，对分条模切精度和稳定性，刀具硬度、耐磨性和锋利度要求更高 | 由于固态电池制备需保持干燥，在极片上印刷出定位点或胶框，为后续叠片、组装等工艺提供精准定位基准。阻隔水汽，保证电机和电解质干燥 | 1、固态电池：多采用无隔膜碟片工艺 2、液态电池：可采用叠片、卷绕方式 | 温度（80-120℃）、压力（百兆帕）要求远高于液态电池 | 1、液态电池：常用高频焊接等工艺；多采用方壳封装以提升机械强度 2、固态电池：常用激光焊接等精密焊接工艺 | 多采用软包封装缓冲内部应力减少机械损伤 | 固态电池无需注液程序 原位固化工艺需要通过加热/紫外线实现部分化学反应并去除水分 | | 1、固态电池要求大压力化成，较液态3-10吨压力提升至60-80吨； 2、同时分容过程通常需要在升温环境中进行，以提高离子迁移速率 |

数据来源：粉体网，中信建投

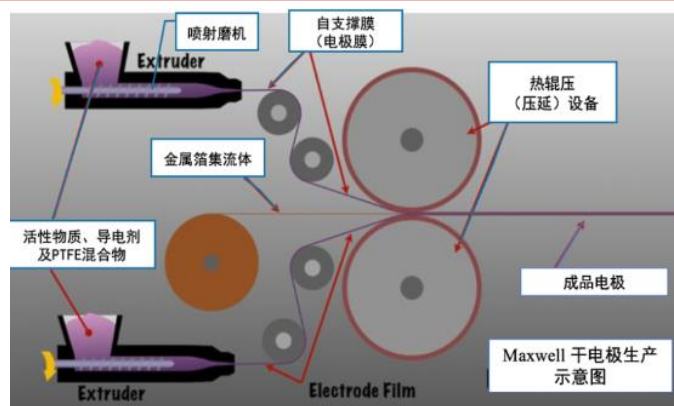
1.2.1 干法工艺：粘接剂原纤维化是目前主流的干法路线

- **干法制膜工艺包括：粘接剂原纤化法和静电喷涂法，其中粘接剂原纤化是主流**，静电喷涂法在后续的可加工性、粘连稳固性、电极柔韧和耐久上表现不如粘接剂原纤化法。2019年特斯拉收购 Maxwell 公司，Maxwell主要采用粘接剂原纤化制膜，而特斯拉目前也是采用粘接剂原纤化法制造自支撑膜。
- ✓ 粘接剂原纤化法是将活性物质粉末与导电剂混合后加入PTFE等粘接剂，然后对干混合物施加外部的高剪切力，由于PTFE范德华力较低，堆积松散，在外部剪切力的作用下会从团聚物变成原纤维，原纤维呈网状粘合电极粉末，最终挤压混合物形成自支撑膜。
- ✓ 静电喷涂法是用高压气体预混活性物质、导电剂以及粘接剂颗粒，在静电喷枪的作用下使粉末带负电荷并喷至带有正电荷的金属箔集流体上，然后对载有粘接剂的集流体进行热压，粘接剂融化后会粘连其他粉末并被挤压成自支撑膜。
- **粘接剂：常用的原纤化粘接剂包括PTFE、ETEF以及FEP，传统PVDF由于不可进行原纤化因此不适配干电极工艺。**PVDF仍可以利用静电喷枪将PVDF和其他活性颗粒喷到集流体上，对混合物热处理后进行压延制膜。但是粘连效果不佳，PVDF的粘附强度不到FEP的1/4。其原因是 PVDF 较活性颗粒的粒径太大，削弱了粘连效果，且会降低电极膜的稳定性。
- ✓ PTFE是最优粘接剂选择。原因如下：1) 聚合分子量较大，可形成更长的原纤维；2) 惰性且抗腐蚀；3) 机械性能良好。但目前国内电池级PTFE占比较少，量产仍需2-5年。

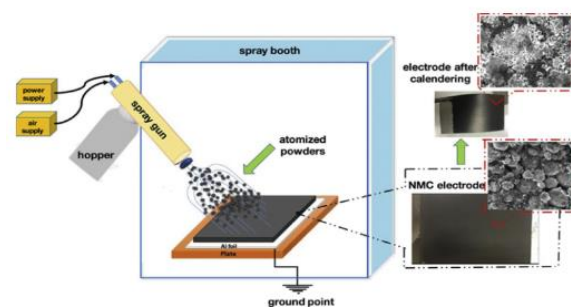
图：粘接剂原纤维化法示意图



图：Maxwell干电极生产示意图



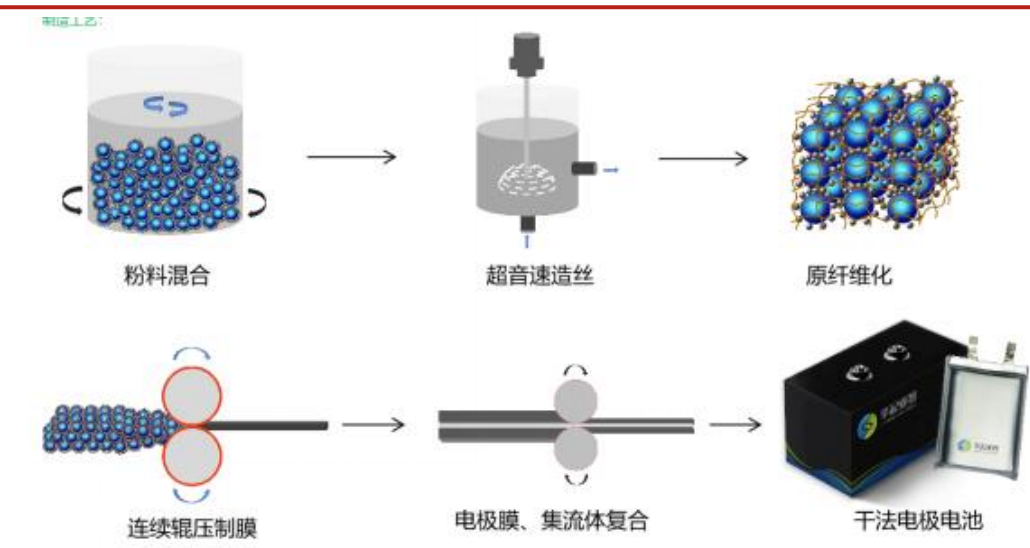
图：静电喷涂法示意图



1.2.2 干法电极及固态电解质膜工艺：与全固态电池相容，粘结剂更换为PTFE等材料

- 全固态电池以干法工艺为主，优势是提升生产效率、降低成本，难点在于混合均匀，粘结剂更换为PTFE等材料。传统湿法电极工艺存在成本较高、工艺复杂、NMP溶剂有毒等问题，而干法电极工艺是一种无溶剂化的生产技术，使用高剪切和/或高压加工步骤来破碎和混合材料，电极膜结构形成更厚，粘结剂则以纤维状态存在，不会阻碍电子和离子传导，导电性好，节省了材料、时间和人工等生产成本。但其难点在于市售的粘结剂颗粒较大，难以均匀分散，进而造成了干法电极良品率低等问题。在干法技术的赋能下，固态电池的极片、电解质膜制造更适配规模化量产。
- 半固态电池仍以湿法电极工艺为主，而全固态电池需更换干法电极工艺。成膜工艺是固态电池制造的核心，不同的工艺会影响固体电解质膜的厚度和离子电导率。半固态电池中，材料体系变化有限，因此主要使用传统湿法电极工艺。而全固态电池中，硫化物电解质对极性有机溶剂极为敏感，同时金属锂与易于溶剂反应，此外膨胀更加严重，传统的PVDF-NMP体系粘结强度有限，而干法电极中由PTFE原纤维化构成的二维网络结构，可以抑制活性物质颗粒的体积膨胀，防止其从集流体表面脱落，预计主要使用干法电极工艺。

图：辊压法制备干法电极



图：干法湿法电极各阶段对比

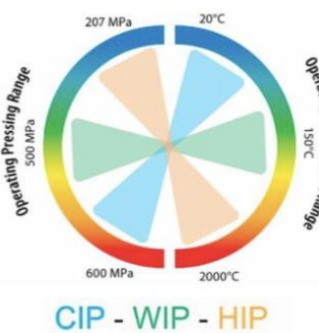
| 项目 | 干法工艺 | 湿法工艺 |
|-----------|---------------|--------------------------|
| 原料混合环节 | | |
| 活性颗粒 | 需要 | 需要 |
| 导电剂 | 需要 | 需要 |
| 粘接剂 | 需要（正负极均为PTFE） | 需要（正极为PVDF，负极为SBR与CMC复合） |
| 溶剂 | 无需 | 需要（正极NMP，负极去离子水） |
| 第一环节成品形态 | 纤维化后粉体 | 混合浆料 |
| 极片涂布环节 | | |
| 自支撑膜/浆料涂布 | 需要 | 需要 |
| 烘烤 | 无需 | 需要 |
| 溶剂回收 | 无需 | 需要 |
| 第二环节成品形态 | 自支撑膜+金属集流体 | 混料+金属集流体 |
| 极片辊压环节 | | |
| 辊压机 | 需要 | 需要 |
| 第三环节成品形态 | 宽极片 | 宽极片 |

数据来源：粉体网，中国化工报，汽车工艺师，Yangtao Liu, et al. Current and Future Lithium-Ion Battery Manufacturing，中信建投

1.2.3 等静压工艺：全固态设备的压力和温度要求高于液态电池

- 固态电池的生产需要施加极高的压力并结合高温来使其致密化，以便去除孔隙和空隙，确保活性组分之间的界面充分接触。电芯组装堆叠后，需要致密化电池层以降低孔隙率，并增加电极和SSE界面之间的物理接触。等静压是将待致密化的样品封装于模具内，置于充满液体介质的高压压腔中，通过液体将压力均匀传递给样品，使材料在塑性流动条件下重排、消除孔隙与裂纹，实现“各向同性”压实。尤其适用于硫化物固态电解质层的成型。
- 按成型和固结时的温度高低，等静压技术主要分为冷等静压(CIP)、温等静压(WIP)、热等静压(HIP)三类。冷等静压机通常利用液体(如水或油)为压力介质，应用相对广泛;温等静压机利用液体或气体作为工作介质，在工作过程中会加热介质或工件，以达到特定的温度条件，从而促进材料的致密化、扩散或相变等过程;热等静压机在固态电池生产中的均匀性优势明显，且适用于各种材料和结构的固态电池，但需要以较为昂贵的氦气、氮气、氩气等惰性气体或其他混合气体作为压力介质。
- 等静压技术的选择直接影响成本和性能，温等静压或更适合固态电池量产。对于固态电池规模化生产情况下等静压技术的经济性分析，CIP循环时间短、单次循环成本最低，综合成本最优；WIP在中等温度(150℃)和压力(500MPa)下，兼顾效率与材料致密化需求；HIP性能优异但成本过高，难以满足大规模生产需求。实际生产中，或可采用CIP+WIP工艺组合的方式兼顾效率、成本和性能。

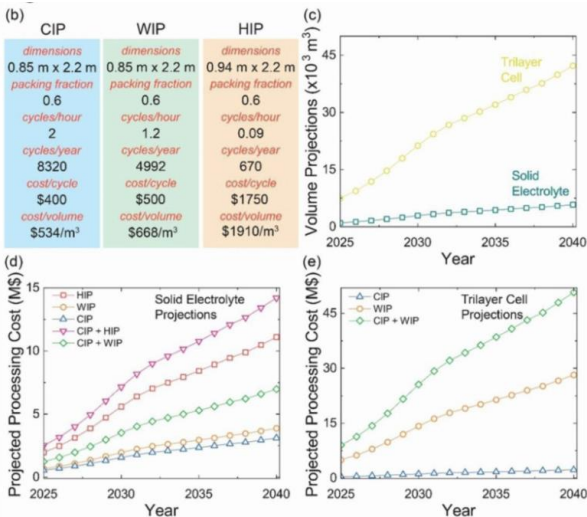
图：三种等静压技术对比



| ISP technique | CIP | WIP | HIP |
|-------------------------------------|----------------|---------------------|-----------------------|
| pressure medium | liquid - water | liquid - oil/ water | gas - argon/ nitrogen |
| standard temperature rating (°C/°F) | 20/68 | 150/302 | 2000/3632 |
| standard pressure rating (MPa/ksi) | 600/87 | 500/72.5 | 207/30 |
| cycle time | o | + | +++ |
| equipment cost | o | + | +++ |

^aQualitative values are represented by o, +, and +++, where o < + < ++.

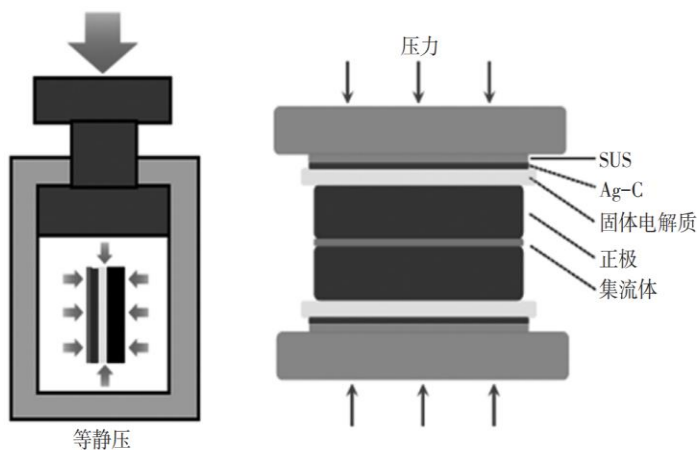
图：固态电池规模化生产情况下等静压技术的经济性分析



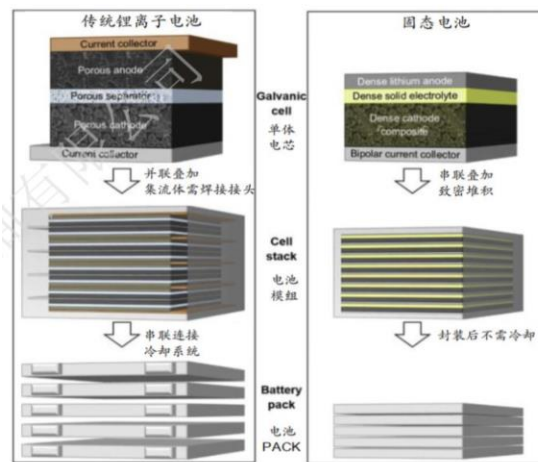
1.2.4 制造/封装方式：高温等静压复合处于实验室阶段，叠片+软包集成方式更优

- **正极、电解质和负极的复合过程，是固态电池制备的关键工序，其中高温等静压为重要复合方式。** 固态电池可将电极单元直接堆叠内串，因此无需内部极耳，从而提高制造效率，降低包装成本。但一体化叠片存在固-固界面接触问题，需通过施加压力等手段来进行改善。传统辊压等方法可能导致颗粒的重新堆积与变形，目前一种优选的方法是采用高温等静压法，利用气/液体介质均匀传递压力的性质，从各个方向对试样进行均匀加压，进而获得坚实的坯体，根据头部厂商反馈：高温等静压设备目前实验室级别，不一定是最终方案，高压+高温可能破坏活性物质。高温等静压路线适合叠片结构，卷绕路线暂时不适合。
- **全固态电池向叠片+软包的方向迭代。** 与液态锂离子电池相比，固态电池后段工序不需要注液，但需要加压或者烧结；制造/封装方式看，氧化物及硫化物电解质柔韧性较弱，更适用于叠片工艺，其内部变形、弯曲或断裂的概率低，此外软包封装在能量密度上也具备优势，可容忍充放电过程中的体积变化，因此叠片+软包的封装方式最适合于固态电池。

图：全固态电池温等静压法示意图



图：传统电池和固态电池叠片对比图



数据来源：《阳如坤董事长-固态电池大规模制造初探》，《全固态电池生产工艺分析》，中信建投

1.3 设备端空间测算：前道产线占比30-35%，干法电极设备是核心变量

图：固态电池分环节设备需求空间测算

| 年度 | 2026E | 2030E | 2040E | 2050E | 备注 |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|----------------------------------|
| 设备市场空间/亿元 | 13 | 533 | 414 | 688 | 2026-2030年CAGR约151% |
| 价值量/亿元/GWh | 3.16 | 2.24 | 1.75 | 1.49 | |
| 前道产线空间/亿元 | 5 | 196 | 119 | 163 | |
| 价值量/亿元/GWh | 1.12 | 0.67 | 0.45 | 0.35 | |
| 占比/% | 35% | 30% | 26% | 23% | |
| 其中：匀浆搅拌设备空间/亿元 | 0 | 15 | 14 | 26 | |
| 价值量/亿元/GWh | 0.07 | 0.07 | 0.06 | 0.06 | |
| 其中：干法电极设备-纤维化空间/亿元 | 2 | 43 | 27 | 44 | |
| 价值量/亿元/GWh | 0.40 | 0.20 | 0.12 | 0.10 | |
| 其中：干法电极设备-辊压设备空间/亿元 | 2 | 43 | 27 | 44 | |
| 价值量/亿元/GWh | 0.40 | 0.20 | 0.12 | 0.10 | |
| 其他设备及集成空间/亿元 | 1 | 43 | 34 | 46 | |
| 价值量/亿元/GWh | 0.25 | 0.20 | 0.15 | 0.10 | |
| 中道产线空间/亿元 | 6 | 247 | 227 | 409 | |
| 价值量/亿元/GWh | 1.50 | 1.15 | 1.00 | 0.89 | |
| 占比/% | 47% | 51% | 57% | 60% | |
| 其中：分条&模切设备空间/亿元 | 1 | 32 | 31 | 56 | |
| 价值量/亿元/GWh | 0.20 | 0.15 | 0.14 | 0.12 | |
| 其中：胶框印刷设备空间/亿元 | 1 | 21 | 14 | 22 | |
| 价值量/亿元/GWh | 0.13 | 0.10 | 0.06 | 0.05 | |
| 其中：叠片设备空间/亿元 | 2 | 64 | 61 | 112 | |
| 价值量/亿元/GWh | 0.39 | 0.30 | 0.27 | 0.24 | |
| 其中：等静压设备空间/亿元 | 1 | 32 | 31 | 56 | |
| 价值量/亿元/GWh | 0.20 | 0.15 | 0.14 | 0.12 | |
| 其中：焊接设备空间/亿元 | 2 | 64 | 61 | 112 | |
| 价值量/亿元/GWh | 0.39 | 0.30 | 0.27 | 0.24 | |
| 其中：封装设备空间/亿元 | 1 | 21 | 20 | 37 | |
| 价值量/亿元/GWh | 0.13 | 0.10 | 0.09 | 0.08 | |
| 其他设备及集成空间/亿元 | 0 | 11 | 9 | 15 | |
| 价值量/亿元/GWh | 0.07 | 0.05 | 0.04 | 0.03 | |
| 后道产线空间/亿元 | 2 | 90 | 68 | 115 | |
| 价值量/亿元/GWh | 0.55 | 0.42 | 0.30 | 0.25 | 长期来看可对标方形产线价值量，短期较液态电池价格+30%-40% |
| 占比/% | 17% | 19% | 17% | 17% | |
| 其中：化成分容设备空间/亿元 | 1 | 30 | 27 | 47 | |
| 价值量/亿元/GWh | 0.18 | 0.14 | 0.12 | 0.10 | |
| 其他设备及集成空间/亿元 | 1 | 60 | 41 | 68 | |
| 价值量/亿元/GWh | 0.36 | 0.28 | 0.18 | 0.15 | |

1.4 设备端标的进展：产业链整体处于验证阶段，部分企业获GW级订单

图：设备端标的进展

| 简称 | 产品 | 验证进展 |
|------|------------|--|
| 宏工科技 | 搅拌机、干法电极设备 | 1、固态电池上料、输送及搅拌工序设备 已签订数千万元的固态电池产线及设备订单 2、与清研电子合作“原料纤维化”设备和混合均质一体机 |
| 纳科诺尔 | 干法电极设备 | 1、推出干法电极设备八辊、十辊等系列产品，支持三元、磷酸铁锂、硅碳等多种材料的极片生产， 并已获得客户订单 |
| 曼恩斯特 | 干法电极设备 | 1、400型干法复合制膜一体机可以实现电极膜片成型，以及电极膜片与集流体复合的一体化功能 2、固态电池干法搅拌混合设备送样 广汽、蔚来、太蓝 等国内企业 |
| 科恒股份 | 干法设备 | 1、开发干法涂布及辊压设备 |
| 先惠技术 | 干法设备、pack线 | 1、 清陶 签署核心设备合作协议，布局辊压设备 |
| 海目星 | 前中道产线 | 1、2024年8月已经 实现量产订单签署，约4亿元 ，是行业内首个锂金属固态设备量产订单 |
| 赢合科技 | 前中道产线 | 1、基于干法搅拌纤维化+干法成膜全固态工艺，覆盖粉体搅拌、纤维化、均匀铺粉、多辊电极转移、电极切边及复合 2、 2024年11月首台干法搅拌设备交付国内头部客户 |
| 新益昌 | 中段设备 | 1、以提供固态电池制片、卷绕、叠片等设备 |
| 联赢激光 | 中段设备及产线 | 1、整线方案涵盖预焊、裁切、终焊和整形 |
| 福能东方 | 整线 | 1、公司子公司超业精密持续推进固态电池生产线研发，包含制片、叠片、焊接、封装等设备，还未形成订单 |
| 先导智能 | 整线 | 1、干法工艺覆盖电极/电解质膜/复合/电芯组装/化成分容等设备 2、 已获韩国头部电池/向欧美日韩客户订单 |
| 利元亨 | 整线 | 1、等静压设备供货 国轩高科、广汽埃安 等客户；激光焊接设备供货 清陶能源 ，覆盖从分条、模切到焊接、装配的全流程设备 |
| 大族激光 | 整线 | 1、中标 东风鸿泰控股集团有限公司的固态电池中试线测试段工艺设备和固态电池中试线组装段工艺设备 |
| 星云股份 | 后道设备 | 1、向 国内某头部电池 企业交付高精度固态电池检测设备 |
| 杭可科技 | 后道设备及产线 | 1、公司已与国内外多个固态电池厂商合作，共同研发固态、半固态后端产线，已经完成多个试验线和量产线投产 |
| 信宇人 | 前道设备 | 1、涵盖涂布机、分辊分一体机等核心设备 |

数据来源：公司公告，高工锂电、鑫椏锂电、中信建投

核心观点

➤ 基本面催化：

- 1) **半固态**：evtol、消费等领域半固态及凝聚态电池商业化导入超预期
- 2) **全固态**：工信部60e研发专项资金投向全固态电池研发，在27年4000台车行驶10000公里以上的结题要求下，带动25年技术方案落地、26年产线落地、27年样车落地，当前节点处于技术方案即将落地中试线推进建设的关键时期。

➤ 环节：优选设备：

- 1) 新产业导入预期下设备端最先受益行业资本开支增长，订单落地将快于材料端
- 2) 干法工艺获得国内外企业共识确定性强，相较传统液态电池湿法涂布工艺具备价值量提升逻辑

➤ 标的选择：

- 1) **进展快**：部分企业在evtol等领域已获GW级别订单，动力端当前多处于中试导入前的验证阶段，产业进度快的企业具备先发卡位优势
- 2) **客户绑定能力**：与电池端、整车端企业合作开发、传统业务中在头部企业供应份额高的企业具备强客户绑定能力
- 3) **布局差异化核心设备**：干法电极设备、等静压等核心差异化设备前期具备价值量及毛利率提升逻辑

相关公司：核心工序设备自供、客户深入绑定、验证进展快的高弹性标的

➢ 我们认为设备环节资本开支是固态电池产业化的先行指标，设备端将成为产业导入的率先受益环节，建议关注具备干法电极、等静压设备等固态电池核心差异化工序的设备自供能力，且客户绑定深入、验证进展快的高弹性标的。相关公司包括【宏工科技、纳科诺尔、曼恩斯特、先导智能、先惠技术、利元亨、海目星】。

图：2030年设备环节弹性测算

| 代码 | 简称 | 产品 | 单GWh价值量 /亿元/gwh | 设备需求- 2030E/gwh | 固态电池市占率 /% | 固态电池环节营 收 /亿元 | 2024年主营业收入 /亿元 | 营收弹性 /% | 固态电池设备净 利率/% | 2024年主营业收入/ 亿元 | 业绩弹性 /% | PE-2024 |
|-----------|------|------------|--------------------|--------------------|---------------|---------------------|-------------------|------------|-----------------|-------------------|------------|---------|
| 301662.SZ | 宏工科技 | 搅拌机、干法电极设备 | 0.20 | 294 | 15% | 7 | 21 | 32% | 20% | 2.08 | 65% | 36 |
| 832522.BJ | 纳科诺尔 | 干法电极设备 | 0.20 | 294 | 15% | 7 | 11 | 64% | 20% | 1.62 | 83% | 40 |
| 301325.SZ | 曼恩斯特 | 干法电极设备 | 0.40 | 294 | 10% | 9 | 17 | 53% | 20% | 0.31 | 586% | 54 |
| 300340.SZ | 科恒股份 | 干法设备 | 0.40 | 294 | 5% | 5 | 21 | 21% | 20% | (1.92) | /// | /// |
| 688155.SH | 先惠技术 | 干法设备、pack线 | 0.40 | 294 | 5% | 5 | 25 | 18% | 20% | 2.23 | 40% | 20 |
| 688573.SH | 信宇人 | 前道辊压设备 | 0.20 | 294 | 5% | 2 | 6 | 36% | 20% | (0.63) | /// | #DIV/0! |
| 688559.SH | 海目星 | 前中道产线 | 1.82 | 215 | 5% | 20 | 45 | 45% | 20% | (1.63) | /// | /// |
| 300457.SZ | 赢合科技 | 前中道产线 | 1.92 | 215 | 5% | 22 | 85 | 25% | 20% | 5.03 | 86% | 18 |
| 688383.SH | 新益昌 | 中段设备 | 1.15 | 215 | 5% | 13 | 9 | 139% | 20% | 0.40 | 640% | 118 |
| 688518.SH | 联赢激光 | 中段设备及产线 | 1.15 | 215 | 5% | 13 | 31 | 41% | 20% | 1.66 | 156% | 26 |
| 300173.SZ | 福能东方 | 整线 | 2.24 | 215 | 5% | 25 | 13 | 189% | 20% | 0.83 | 606% | 52 |
| 300450.SZ | 先导智能 | 整线 | 2.24 | 215 | 20% | 101 | 119 | 85% | 20% | 2.86 | 705% | 27 |
| 688499.SH | 利元亨 | 整线 | 2.24 | 215 | 5% | 25 | 25 | 102% | 20% | (10.44) | /// | 93 |
| 002008.SZ | 大族激光 | 整线 | 2.24 | 215 | 5% | 25 | 148 | 17% | 20% | 16.94 | 30% | 31 |
| 300648.SZ | 星云股份 | 后道设备 | 0.20 | 215 | 5% | 2 | 11 | 21% | 20% | (0.82) | /// | 108 |
| 688006.SH | 杭可科技 | 后道设备及产线 | 0.42 | 215 | 20% | 19 | 30 | 63% | 20% | 3.26 | 116% | 21 |

数据来源：Wind，中信建投

PART 2

前段工艺：引入干法电极技术

2.1 前道工艺及设备：核心变化是引入干法电极

- **前道工艺：**核心变化是干法电极设备及固态电解质干法成膜设备有望逐步替代传统湿法设备，前段设备的价值量提升。干法工艺采用干法搅拌、混合技术，相比液态电池需保证电解质粉体干燥并惰性气氛中温和搅拌、振动；采用干法涂布技术，省去烘干设备而对辊压设备要求提升，同时通过热复合实现活性物质和集流体的整合。

图：前道工艺及设备一览



数据来源：中信建投

2.2 搅拌机：实现干法电极制备的先道设备，对密封、防潮性能要求高

- **干法搅拌**：由于固态电池采取干法电极工艺，其电解质制备环节需采用干法搅拌方法，即在真空或惰性气氛中，以机械搅拌及振动方式，使固态电解质粉体均匀化且与正负极材料充分接触。涉及到的设备是搅拌机，主要作用是进行干法搅拌+振动，实现电解质浆料的初步分散。
- **传统湿法搅拌机**：双行星搅拌机为主流工艺，实现电解质浆料或复合浆料的均匀分散。湿法搅拌多通过双行星搅拌机进行工作，其利用流体力剪切分散由活性材料、粘结剂、溶剂等配成的浆料，并通过行星齿轮传动实现公、自转，形成一个不随搅拌器转动而改变的湍流流场以实现物料的无死角均匀混合，最终实现浆料混合的过程。
- **干法工艺对搅拌机提出更高的要求**：在压实密度和能量密度上，干法搅拌工艺优于传统湿法工艺。为确保干法搅拌工艺的优越性能得以发挥需保证：1.无溶剂：保持粉体干燥，防止电解质性能退化。2.惰性气氛：对敏感材料（如硫化物）避免氧化。3.温和混合：避免破坏颗粒形貌与界面结构。

图：干法/湿法搅拌对比分析

| 特性 | 传统锂电湿法搅拌 | 固态电池干法搅拌 |
|-------|-----------------------|--------------------------|
| 介质类型 | 溶剂 + 粉体（活性材料、导电剂、粘结剂） | 干粉（陶瓷电解质颗粒 + 活性材料 + 添加剂） |
| 工艺要求 | 精确控制粘度、含量；后续需烘干 | 避免吸潮、惰性气氛、温和搅拌 |
| 危险/成本 | 溶剂回收、排放处理成本高；防爆要求 | 对设备密封、防潮性能要求更高 |

图：湿法/干法搅拌方法原理图



数据来源：《Mixing methods for solid state electrodes: Techniques, fundamentals, recent advances, and perspectives》，中信建投

2.2 搅拌机：国内外均进入中试线验证阶段

- 赢和科技干法搅拌设备已交付宁德时代、比亚迪等头部电池厂商，设备进入中试线验证阶段。
- 曼恩斯特2024年11月推出固态电池干法搅拌混合设备以及中试线解决方案，送样广汽、蔚来、太蓝等国内企业。
- 先导智能2024年6月发布全固态电池整线解决方案。以创新结构设计的高效混料机对原材料进行剪切混合，使电极制备摆脱溶剂带来的影响。实现整体投入成本降低30%，电池综合性能提升40%，工序数量减少15%，人力需求减少20%。
- 宏工科技与清研电子就干法创新达成战略合作，共同推进干法电极前段工序制造设备的研发及市场应用。
- Hosokawa Micron Group的Nauta真空锥形搅拌机、Cyclomix 高剪切冲击混合机已在欧洲和中国的若干SSB中试产线上安装。

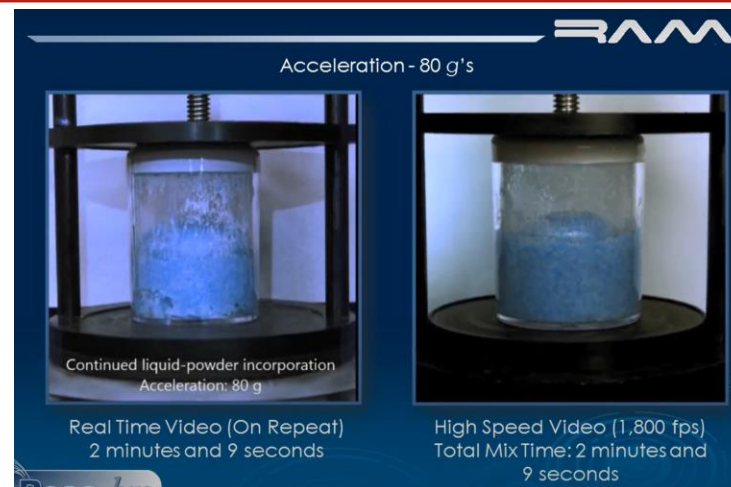
图：粘接剂原纤维化法示意图



图：Maxwell干电极生产示意图



图：静电喷涂法示意图



数据来源：《Mixing methods for solid state electrodes: Techniques, fundamentals, recent advances, and perspectives》，赢和科技官网，曼恩斯特，RAM，Tobmachine，中信建投

2.3 混合机：搅拌后进一步减小固体颗粒尺寸并二次分散

- **干法混合**：通过碰撞、剪切等高能机械作用混合，实现纳米量级的均匀分散。干法混合多采用双刀片磨粉设备、球磨设备、循环混合机等机械干混方法实现活性材料、导电剂、固态电解质的粉料干混。
- 干混工艺主要包括如下三种，干球磨工艺主要用于无机电解质制备，挤压、熔融造粒多用于聚合物。
- 1) **干球磨工艺**：利用球磨机中磨球之间以及磨球与缸体之间的相互滚撞产生剪切、碰撞、摩擦作用，使接触到磨球的纳米粒子被磨碎或者撞碎，同时纳米粒子在磨球的空隙内受到强烈的混合作用而实现纳米量级的均匀分散，完成合浆工作。
- 2) **挤压工艺**：一种无溶剂的连续方法，允许同时混合和加工材料。将电解质材料通过双螺杆挤出机或压片机，通过螺杆的旋转运动混合和运输在高压下进行压缩，使材料颗粒之间紧密接触，形成致密的电极结构。挤出的最终混合物可以通过压延直接施加到集流体上。
- 3) **熔融造粒**：特别适用于聚合物技术路线。将固态材料加热至其熔点附近，使材料表面部分熔化，通过搅拌或挤压形成均匀颗粒将不同的粉末材料高效团聚，随后冷却固化。

图：不同微米级干法混合工艺对比分析

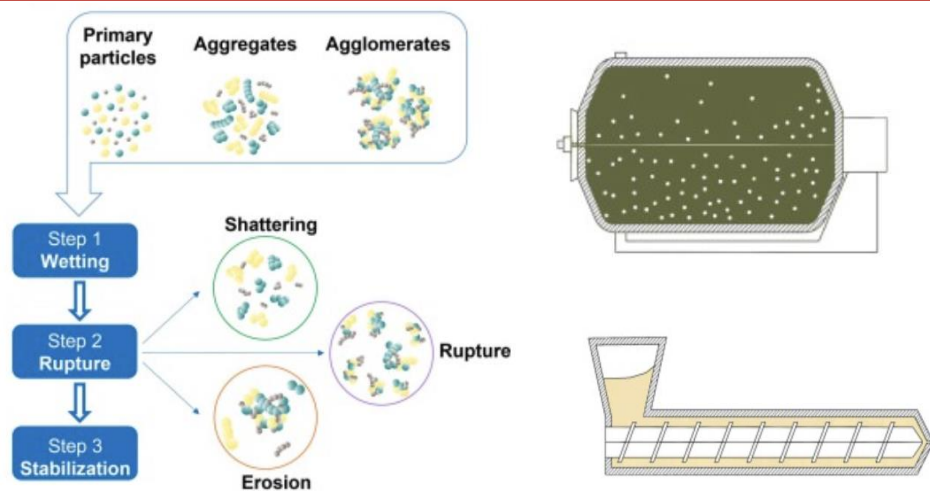
| 混合方法 | 固态电池电解质适用类型 | 混合/分散均匀面临的挑战 |
|-------|-------------|--------------------------------------|
| 干球磨工艺 | 无机杂化物 | 1.调整研磨介质尺寸以避免较大的质量和缓冲效应。2.粉末粘在容器和球上。 |
| 挤压工艺 | 聚合物杂化凝胶 | 1.难以预测混合物的粘度。2.加工必须在干燥的房间或惰性气氛中进行。 |
| 熔融造粒 | 聚合物杂化凝胶 | 1.聚合物粘合剂数量有限。2.热敏材料的降解。 |

数据来源：《Dry electrode technology, the rising star in solid-state battery industrialization》，《A comprehensive review of solid-state batteries》，中信建投

2.3 混合机：固态电池设备更侧重于高剪切或高能量输入

- 固态电池和传统液态锂电在混合/混料环节的主要区别在于：前者采用干法混合以适应无溶剂固态电解质的特性，后者采用湿法浆料混合并需脱泡和烘干以制备涂布浆料。液态电池混合设备强调对浆料的分散、脱气与粘度控制，典型设备包括双行星真空搅拌机和螺带式混合机；而固态电池混合设备则侧重于高剪切或高能量输入以实现固、固、固组分的均匀干混和预压制，主要设备有强力混合机、VC高效混合机、双螺杆挤出机及干法辊压一体机等。固态混合的干法工艺不仅避免了传统溶剂残留和高能耗烘干，还能制造更厚、更均质的电极，显示出在多种技术路线固态电解质制备中的显著优势。
- 曼恩斯特在干法工艺的各个环节研发了相关设备，已初步完成干法前段整线的成膜技术布局，涵盖强力混合机、VC高效混合机、陶瓷双螺杆挤出机、造粒机，以及压膜复合一体机等系列设备。
- 利元亨真空捏合机、三维回转混合机、行星球磨机产品已在磷酸铁锂固态、硫化物固态中试线中交付整套干混工艺设备。

图：固体颗粒分解的方式及不同机理



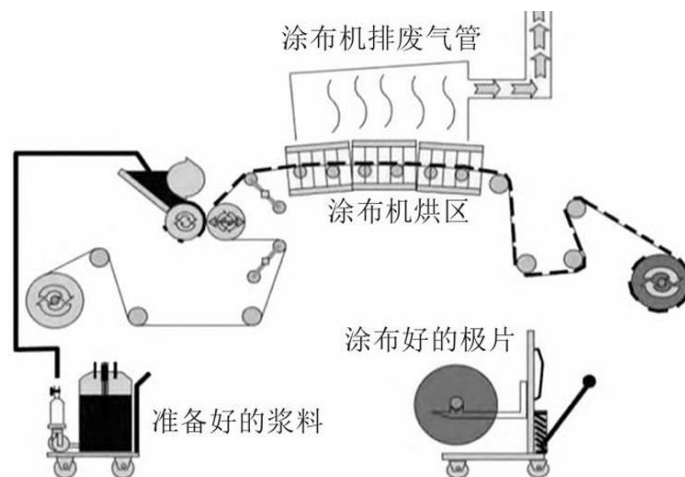
图：强力混合机及工作原理示意图



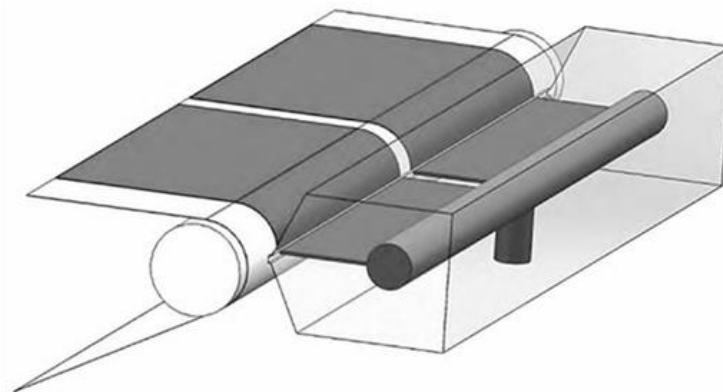
2.4 涂布机：纤维化机+成膜机是干法涂布的核心

- **涂布工艺**是将含有活性物质、粘结剂、导电剂等成分的粉料均匀地涂覆在集流体（如铜箔、铝箔）表面的过程，其主要作用是在集流体上形成一层具有特定厚度、均匀性和性能的电极涂层，为后续的电池组装和充放电过程提供良好的基础。通过精确控制涂布的**厚度和均匀性**，可以确保电池的能量密度、充放电效率和循环寿命等性能指标达到设计要求。
- **湿法涂布**多采用**狭缝挤压设备+烘干设备实现电解质膜制备**。以工业生产中最常见的狭缝挤压涂布设备为例，其利用流体物性，通过挤压让流体经过有特殊通道的涂布头，然后涂覆在运动的基材上，以得到较高精度的涂层，后采用**烘箱干燥或是固化**的方式对涂覆的液体涂层进行处理，从而生成一层具有特殊功能的膜层。

图：湿法涂布工艺流程图



图：狭缝挤压设备侧片图



数据来源：《A review of metrology in lithium-ion electrode coating processes》，中信建投

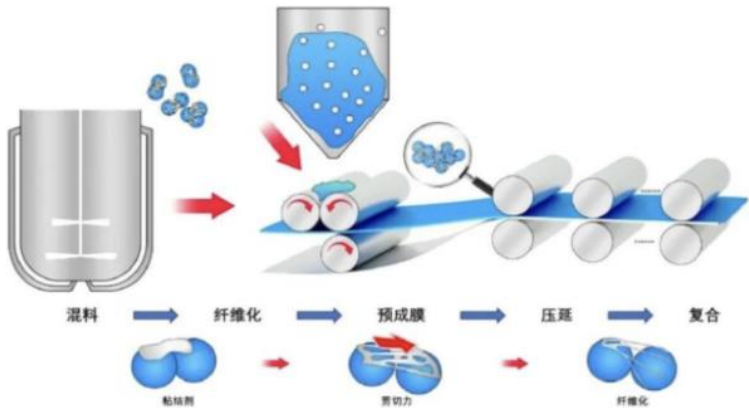
2.4.1 纤维化设备：粘结剂纤维化有望成为干法电极主流方案

- 干法电极涂布工艺主要采用麦克斯韦法（粘结剂纤维化法）、干法喷涂沉积法、气相沉积、热熔挤压法实现电解质膜制备。麦克斯韦法是先将电极材料、导电剂和粘结剂通过干混的方式充分混合，再通过纤维化设备将混合物纤维化，使粘合剂能够在干燥状态下发挥出类似于湿法中的液态粘结效果，从而增强混合物的黏附性能和机械强度。后续经多次（热）辊压形成电极膜。
- 在特斯拉收购Maxwel后，粘结剂纤维化法得到广泛关注。行业普遍认为，粘结剂原纤化法在性能稳定性和可加工性上表现更优，有望成为主流方案。粘结剂纤维化法：
- 设备方面：新增气流粉碎机、螺杆挤出机、磨机等纤维化设备需求。辅材方面：常用的原纤化粘结剂包括PTFE、ETEF、FEP，PTFE是最优粘结剂选择，主要系PTFE聚合分子量较大，可形成更长的原纤维，机械性能良好。

图：干法电极工艺技术分析对比

| 干法技术 | 技术原理 | 优势/劣势 | 所需设备 | 代表电池/设备企业 |
|--------|---|--|---|---|
| 粘结剂纤维化 | 在高剪切力的作用下将PTFE纤维化以生成PTFE纤维，其可将活性材料颗粒连接，但不会覆盖活性材料。再经热压后形成自支撑的电极薄膜，最后通过辊压将电极薄膜压在涂碳集流体上得到最终的电极 | 优势：与现有产线兼容，可大规模生产 劣势：对负极不稳定且目前阶段只能采用PTFE作为粘结剂 | 纤维化设备：气流粉碎机、螺杆挤出机、辊磨机等 压延成膜及复合设备：辊压机 | 电池：Maxwell(特斯拉链) 设备：纳科诺尔、曼恩斯特、利元亨、先导智能 |
| 干法喷涂沉积 | 利用高压气体预混合活性物质、导电剂和粘结剂PTFE/PVDF，然后在静电喷枪的作用下使粉末带电并喷涂到接地的集流体上之后通过热轧将粉末粘合并固定在集流体上，得到最终的电极 | 优势：电极厚度和密度可控；可用于柔性电极；技术成熟度高 劣势：设备昂贵，生产环境要求高；目前仍处于实验室阶段，与现有的锂电池产线设备不兼容 | 静电喷枪 | 电池：日本丰田、美国AMB |
| 气相沉积 | 材料先蒸发汽化再沉积 | 优势：多种汽化方法可选择 劣势：生产设备昂贵，规模扩大较难 | PVD、CVD、ALD | // |
| 热熔挤压 | 颗粒混合、挤出、脱粘和烧结 | 优势：可制备厚电极 劣势：能耗高，需要牺牲粘结剂 | 双螺杆挤出机等 | // |

图：粘结剂纤维化干法电极制备方法工作原理



数据来源：《Dry electrode technology, the rising star in solid-state battery industrialization》，《干法电极技术在超级电容器和锂离子电池中的研究进展》，

2.4.2 成膜机：干法电极工艺凸显辊压重要性及价值量

- 纤维化后的材料通过**多辊设备**，经过**第1次辊压支撑膜成形**，**第2-3次辊压进行减薄和压实**（减少厚度增加密度，增强电极性能），形成一层稳定电极膜。电极膜厚度几十微米到几百微米，应具有良好的压实性，以确保良好的导电性和机械强度；相比较液态电池，固态电池电极膜具有低孔隙率，且电极膜应牢固地附着在基材上，以防止脱落或开裂。
- **辊压机对固态电池已成型的电极薄膜或粉体自支撑膜进行压实，提高材料致密度和界面接触，从而提升电芯的能量密度。**
- **干法工艺较湿法对辊压设备的工作压力、辊压精度以及均匀度提出更高要求。**固态电池辊压机通过一对高精度滚筒对干法制备的电极材料施加压力，使其在集流体上形成均匀、致密的电极层。传统湿法辊压仅为压实压密作用，最大压力不足100吨。干法工艺对辊压要求更高，特斯拉最新采购的 SACMI 2000 最大压力可达3500吨。
- ✓ **提高电极致密性：**通过辊压，电极材料的孔隙率降低，密度增加，有助于提升电池的能量密度。
- ✓ **优化界面接触：**辊压有助于改善电极与固态电解质之间的接触界面，降低界面阻抗，提高离子传导效率。
- ✓ **增强机械强度：**辊压后的电极具有更好的机械强度，能够满足后续工艺（如叠片、热压）的需求。

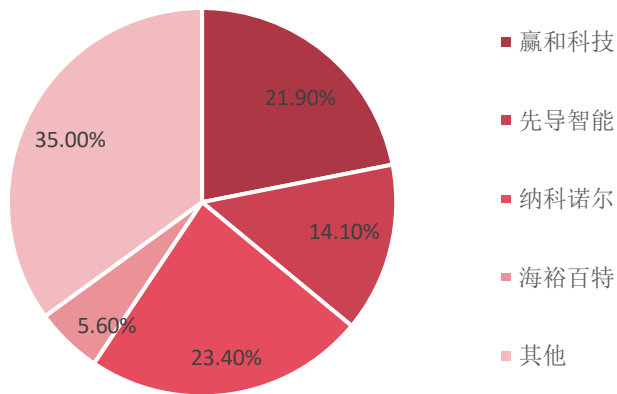
图：干法电极工艺技术分析对比

| 项目 | 固态电池辊压机 | 传统液态锂电辊压机 |
|------|--------------------------|----------------------|
| 材料形态 | 处理干法制备的电极材料，通常为无溶剂的干粉混合物 | 处理湿法涂布后的电极材料，含有溶剂。 |
| 辊压目的 | 提高电极致密性，优化固-固界面接触，增强机械强度 | 控制电极厚度，改善表面平整度，防止毛刺。 |
| 工艺要求 | 无尘、干燥环境中进行 | 对环境要求低，主要关注溶剂的挥发和回收。 |
| 设备结构 | 需要更高的压力、均匀度和精度 | 结构相对成熟，已广泛应用于液态电池生产。 |

2.4.3 热复合设备：热辊压要求下设备价值量提升

- 热复合是指将干法电极膜与集流体牢固结合的过程。通过高温高压的方式将材料复合，以提供良好的电子导电路径和机械稳定性。
- 在干法电极工艺下，一方面干法工艺对辊压机的工作压力、辊压精度以及均匀性提出更高要求。另一方面在此基础上可通过施加热量及更高压力应用于电极成膜和热复合以形成致密的界面结构，应用场景得到拓宽。
- 纳科诺尔等头部辊压设备厂商有望率先受益于干法电极。纳科诺尔热辊优势较大，产品在最大轧辊尺寸、最高稳定生产速度、极片厚度精度、辊面温度均匀性等基础参数方面均处于第一梯队水平。其控股公司清研纳科计划在2025年10月推出GWh级干法电极自动化产线，实现1000mm幅宽80m/min的机型规模化量产。
- 赢和科技多辊点击转移、多辊厚度闭环技术在产品端具备更高的压实密度和能量密度，目前第三代干法电极辊压机已在客户端投入生产。
- 发展趋势：设备大型化、集成化，将加料、混料、纤维化、制膜、辊压、分切、收卷等功能集成在一起，降低流转时间，提高效率及一致性等，设备价值量更高。

图：2022年国内锂电辊压设备市占率



图：赢和科技第三代干法电极辊压机示意图



数据来源：《Insights into Influencing Electrode Calendering on the Battery Performance》，纳科诺尔，赢和科技，中信建投



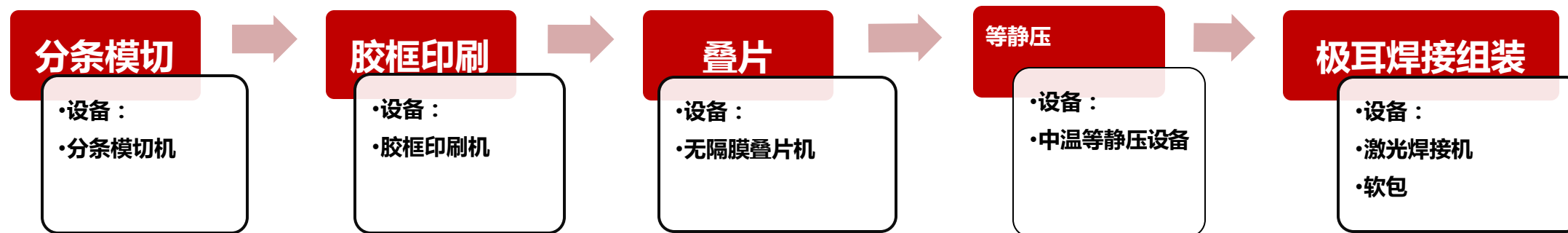
PART 3

中段工艺：取消注液工艺，电池集成多采用叠片软包方式

3.1 中道工艺及设备：省去注液过程，电池集成多采用叠片软包工艺

- **中道**：在全固态电池的生产流程中，无需进行注液，且电池集成多采用叠片软包工艺。固态电池的固态电解质具有脆性特性而且硬度较高，对分条模切机刀具硬度、耐磨性和锋利度要求更高；引入了胶框印刷技术提升固态电池极片贴合度，避免内短路问题；同时采用叠片工艺进行电池组装，热压处理致密化后最终通过激光焊接工艺完成极耳焊接并组装。

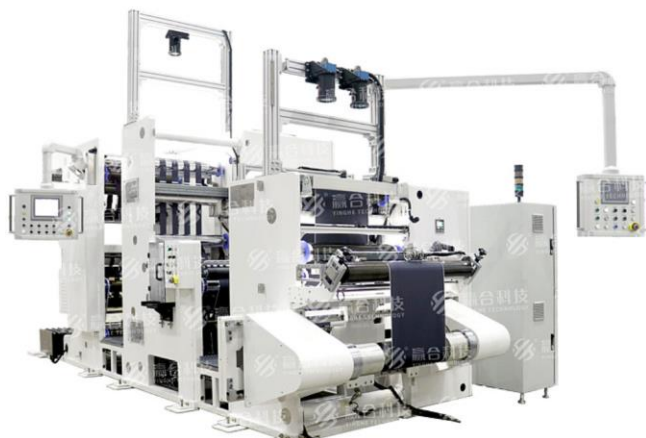
图：中道工艺及设备一览



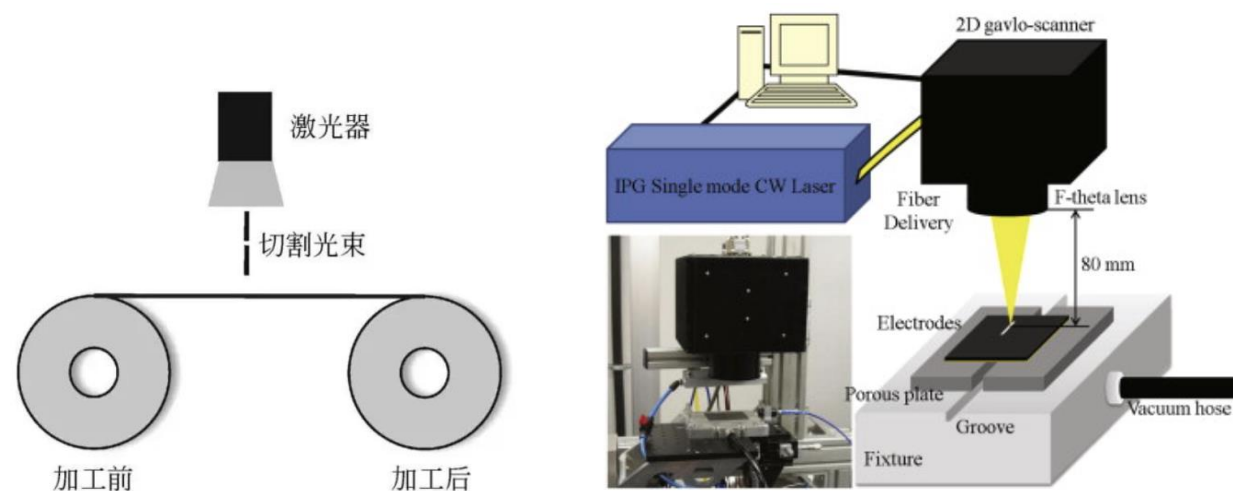
3.2 分条模切机：分条+模切批量化定型，精度控制要求提升

- 分条通过多组圆刀在恒定张力下将宽幅卷材纵向切割成预定宽度的窄带，保证尺寸一致性与边缘质量；模切则通过施加压力、冲击或激光切割等方式，对分条后的带材按特定形状冲切成电芯所需的尺寸和图案，实现所需几何形状的批量化定型。
- 对于传统液态锂电，由于极片主体为浆料涂布后连续柔性卷带，分条和模切均可在室温及较低压力下进行；而固态电池的极片往往为干式压制或干法涂布的致密化材料，附着在金属集流体上的固体颗粒层硬度及脆性更高，对分条模切的精度和稳定性，刀具硬度、耐磨性和锋利度要求更高，以避免微裂纹、局部剥离或粉化。
- 近年来，激光分条、超声波模切、专用高刚性分条刀轴等工艺在固态电池领域取得进展，为满足更高精度和更严苛的材料特性提供了新方案。

图：赢和科技分切机示意图



图：激光模切机示意图



数据来源：《High speed remote laser cutting of electrodes for lithium-ion batteries》，赢和科技，中信建投

3.2 分条模切机：分条+模切批量化定型，精度控制要求提升

- 分条：分条机主要由上下两组圆盘刀片（或直刀）安装在刀轴上，利用滚剪原理将成卷的极片在纵向进行连续切割，切成装配电池所需的长度和宽度的极片条。分切后的边缘平整程度（无毛刺、无屈曲）是考察分条机性能优劣的关键。
- 将宽幅涂布或干压卷带纵向切割，以适配不同规格电芯的装配需求。
- 分条机标的企业：先导智能、赢合科技(雅康精密)、科恒股份(浩能科技)、海目星、北方华创、璞泰来(嘉拓智能)等。

图：液态&固态电池分条机对比分析

| 特性 | 液态锂电分切机 | 固态电池分切机 |
|------|-------------------|----------------------------|
| 极片状态 | 涂布后柔性卷带，可在室温下直接分条 | 干法压片或干涂卷带，脆性大，易开裂 |
| 刀具类型 | 通常为高碳高速钢圆刀或硬质合金圆刀 | 需高刚性材料刀轴，或激光/超声波切割，以减少机械冲击 |
| 环境要求 | 室温、常压 | 有时需要加热至100℃或真空/惰性气氛以提高材料韧性 |
| 切割精度 | ±0.02 mm | ±0.005 mm（更严格，以防固体颗粒层剥离） |

数据来源：《Lithium-Ion Battery Manufacturing: Industrial View on Processing Technologies》，先导智能，科恒股份，中信建投

3.2 分条模切机：分条+模切批量化定型，精度控制要求提升

- 模切：利用冲床+模具对极片进行冲压切割或激光束/超声波聚焦切割极片上的特定区域，形成电芯所需的形状和通孔等特征。
- 将分条后的极片冲切为圆柱、方形、波纹形等电芯封装前的最终形状，并可冲压极耳、搭片通孔等复杂图案。
- 极耳模切成型是在正负极集流体上切出导电体的工艺，将分切后的间隙涂布或连续涂布(单侧出极耳)的极片冲切成型，主要使用机械模切成型或激光模切，一般作为叠片的前工序。
- 模切机标的企业：先导智能、赢合科技、海目星、利元亨、吉阳智能等。

图：液态&固态电池模切机对比分析

| 特性 | 液态锂电分切机 | 固态电池分切机 |
|--------|------------------------------------|-------------------------------------|
| 模具工艺 | 冷冲或微热冲 | 高压热冲（>100 MPa、>60℃）、激光/超声波切割 |
| 对材料的损伤 | 液态涂层具一定延展性，易与金属箔粘结； 冲切压力<50 MPa | 干态颗粒层脆性大，压力易导致微裂纹； 需激光或超声波减少机械应力 |
| 加工精度 | ±0.05 mm | ±0.01 mm 或更高，以防固体电解质颗粒层局部剥离 |
| 进给方式 | 振动送料或伺服送料 | 精密伺服或激光扫描，保证切割路径偏差<±5 μm |

数据来源：《High speed remote laser cutting of electrodes for lithium-ion batteries》，《Applications of Laser Material Processing for Solid-State Lithium Batteries》，中信建投

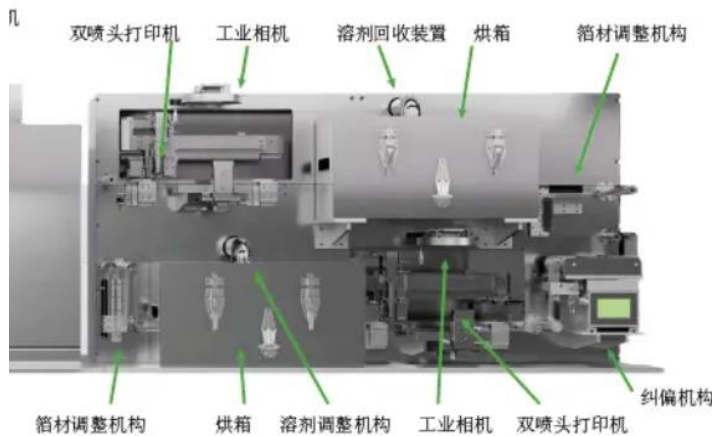
3.3 胶框印刷机：印刷胶框以形成支撑并避免短路

- 全固态电池采用叠片+等静压的装配方式，去除了注液工序，但高压下极片边缘易发生变形，引发正负极直接接触的内短路风险。因此为防止变形、短路，引入胶框将树脂印刷到电极极片或电解质膜边缘位置形成回形框，为后续叠片、组装等工艺提供精准定位基准。同时在压力下起到支撑和绝缘作用，可以有效防止叠片与等静压过程中边缘变形导致的内短路，并兼具阻隔水分的功能，保证电机和电解质处于干燥。
- 根据利元亨公开专利《固态电池极片胶框覆合方法、装置及叠片设备》，固态电池胶框复合流程为：
1) 在料带膜上设置固态/半固态胶框；2) 将片状电极膜置于胶框内周形成极片电极膜；3) 进行压合实现粘连；4) 剥离料带膜。

图：固态电池胶框复合流程



图：固态电池胶框印刷机示意图



数据来源：利元亨《固态电池极片胶框覆合方法、装置及叠片设备》，《全固态电池生产工艺分析》翟喜民，中信建投

3.4 叠片机：有望成为固态电池主流组装方式

- 卷绕与叠片的目的均是将制作好的正负极片、隔膜组合起来，是完全相互替代的工艺。卷绕是指以卷绕的方式排列正极片、负极片、隔膜，叠片是将正极、负极、隔膜一层层叠起来以形成电池堆实现电芯装配。卷绕型工艺应用时间长，技术成熟、速度快、效率高、电芯一致性有保证，但对涂布要求高，且要求极片层有一定的弹性，否则在弯折处易脱落或断裂。叠片尺寸灵活、内阻比卷绕低（如采用同样材料）、内部散热性优良，可制作成各种形状的电池。
- 由于电解质的化学特性问题，固态电池很难用卷绕方式进行组装，叠片或成为主流。全固态电池电解质为氧化物或硫化物时，其柔韧性较弱，叠片设计可有效解决柔韧性问题，同时，叠片技术与全固态电池的固-固界面处理相兼容，有助于优化固态电解质与电极之间的接触面。

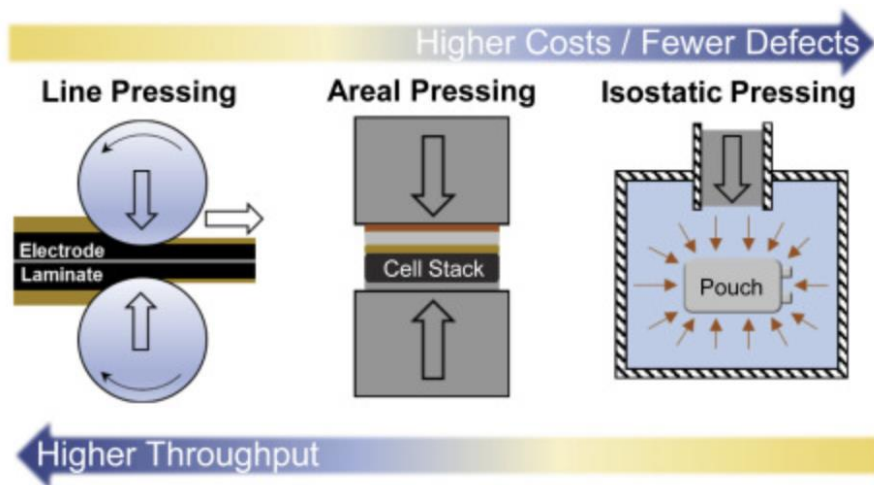
图：不同叠片机对比分析图

| 特性 | Z型叠片机 | 切叠一体机 | 热复合叠片机 | 卷叠一体机 |
|-------|---------------------------|-----------------|-----------------------|----------------------------------|
| 原理 | 主叠片台带动隔膜呈Z字型往复并放置裁切好的正负极片 | 模切&Z字型叠片机&贴胶热压机 | 烘烤后的正负极片与隔膜热复合，然后进行叠片 | 将正负极片分别贴在隔膜上，用卷绕的方式，实现两组正负极片相间叠放 |
| 效率 | 30-100ppm | 60-100ppm | 200-300ppm | 240ppm |
| 价格 | 100-200万元 | 400-500万元 | 600-800万元 | LG专利，不对外销售 |
| 毛刺 | ≤10um | ≤15um | ≤10um | —— |
| 对齐度 | ≤±0.25mm | ≤± 0.5mm | ≤±0.2mm | ≤±0.4mm |
| 稼动率 | 95% | 80% | 95% | —— |
| 特点 | 容易出现吸多片，隔膜张力不均，拉伤，起皱 | | 杜绝左侧传统Z型叠片机中的问题 | 效率高，涉及日韩专利 |
| 设备厂 | 先导智能、赢合科技、超业精密、利元亨、科瑞技术 | | 格林晟、吉阳智能、先导智能 | MANZ(德国) |
| 应用端客户 | CATL、BYD、孚能科技、万向123、卡耐新能源 | | 万向123、中航锂电 | // |

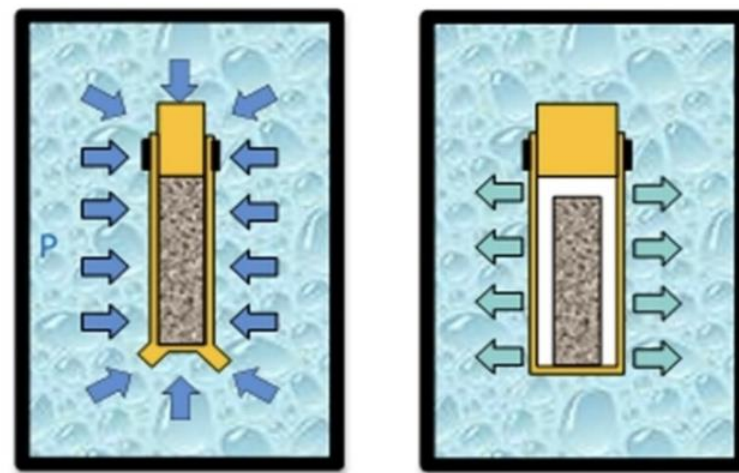
3.5 等静压设备：高效致密化电芯实现活性组件间的充分接触

- 固态电池的生产需要施加极高的压力并结合高温来使其致密化，以便去除孔隙和空隙，确保活性组分之间的界面充分接触。电芯组装堆叠后，需要致密化电池层以降低孔隙率，并增加电极和SSE界面之间的物理接触。
- 通常使用三种主要方法完成：连续线压制、单轴面压制和等静压。连续线压制所需的高制造压力会导致 SSE 和电极层的严重不均匀性以及片材的机械开裂；单轴压制所需吨力随电池面积线性增加，致密化较大的全固态软包电池所需的液压机成为限制条件；等静压已被证明可以实现高密度的电极形态并且可以容纳任何尺寸的全固态电池，仅受等静压容器尺寸的限制。
- 等静压是将待致密化的样品封装于模具内，置于充满液体介质的高压压腔中，通过液体将压力均匀传递给样品，使材料在塑性流动条件下重排、消除孔隙与裂纹，实现“各向同性”压实。尤其适用于硫化物固态电解质层的成型。

图：实现电解质/电极层致密化的三种主要策略示意图



图：等静压工艺示意图



数据来源：《Scaling up high-energy-density sulfidic solid-state batteries: A lab-to-pilot perspective》，中信建投

3.5 等静压设备：温度（80-120℃）、压力（百兆帕）要求远高于液态电池

➤ 固态电池：高温 / 高压致密化

冷等静压（CIP）：在室温或略高温下使用均匀高压液压（数十至数百兆帕）对粉体或聚合物进行致密化。

热等静压（HIP）：在高温（300-1200℃）和高压（100-200 MPa）下施加热能和压力，实现粉末或陶瓷材料的充分烧结与致密。

温等静压（WIP）：一般温度在80-120℃，压力在300MPa左右，或更适合于量产制造固态电池。

➤ 液态电池：室温冷压与辊压

在室温下将涂覆在金属箔上的浆料电极通过对辊施加线压（10-50 MPa），以调整活性层厚度和孔隙率。

图：全固态电池、液态电池等静压、辊压技术对比

| 对比项目 | 传统锂电电极辊压机/单向压机 | 固态电池等静压设备 |
|-------|---------------------------|--|
| 压力模式 | 单向或双向压实（辊压机压力通常10-50 MPa） | 各向同性压力（CIP可达200 MPa+；HIP可达150-200 MPa） |
| 温度条件 | 常温或略高温（< 100℃） | CIP：常温；HIP：高温（300-1200℃） |
| 密度均匀性 | 压力集中在辊面，可能存在厚度或孔隙不均 | 液体传压实现样品全方位均匀压实 |
| 界面形成 | 电极浆料与集流体表面接触 | 电极-电解质-集流体多层界面同时致密 |
| 应用对象 | 电极薄片涂层 | 固态电解质粉末或电极-电解质复合层 |

数据来源：《Electrolyte Developments for All-Solid-State Lithium Batteries: Classifications, Recent Advances and Synthesis Methods》，中信建投

3.5 等静压设备：国外技术优势明显，国内专攻高性价比与工艺适配性

- 海外已有头部电池企业布局等静压技术。韩国LGES曾公开专利，利用冷等静压机采用新型硫化物固态电解质制备了无负极全固态电池。2025年1月，有报道称三星SDI在固态电池产线中测试中采用水压和辊压工艺的温等静压机。
- 国内宁德时代、比亚迪、先导智能、利元亨等头部企业均在等静压工艺上有深入布局，且已形成相关专利，纳科诺尔等企业也在积极研发等静压设备。其中：宁德时代已建立多条固态电池示范线，配套等静压机自主工艺，拥有数项高温高压烧结专利。先导智能与德国合作，开发适配固态电池的高压层压机及HIP设备，2024年已实现首批试生产。纳科诺尔：2024年底投产首条GWh级固态“干法电极+等静压”全线，入选多地新能源示范园；2025年将推出规模化层压及HIP成套设备。

图：国内/外相关企业等静压技术/等静压设备进展

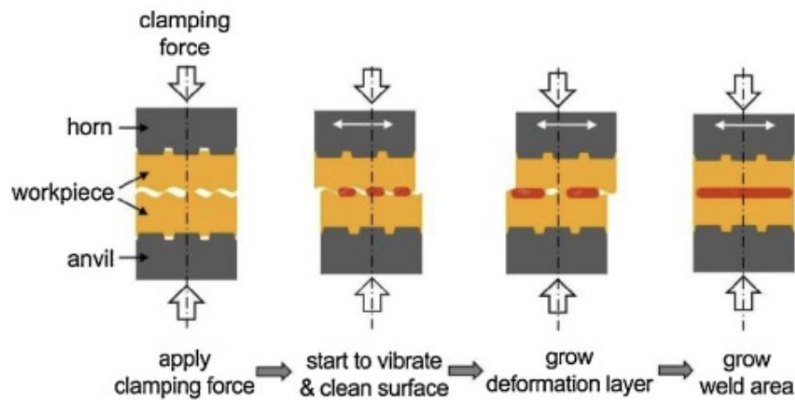
| 企业 | 等静压设备/技术研究进展 |
|-----------|---|
| LGES | 发表专利，利用冷等静压机采用新型硫化物固态电解质制备了无负极全固态电池 |
| 三星SDI | 在固态电池产线中测试中采用水压和辊压工艺的温等静压机 |
| 瑞典Quintus | 全球领先的等静压设备供应商，在固态电池领域可提供从实验室到大批量生产的长期可扩展性解决方案 |
| 宁德时代 | 在料框设计中加入夹料组件夹紧维持压面平整，使得电芯受力均匀 |
| 比亚迪 | 将固态电池最外层设计为陶瓷层以提高电芯承压能力 |
| 先导智能 | 可提供等静压致密化设备，供货宁德时代、比亚迪等客户 |
| 利元亨 | 具有固态电池电芯等静压处理方法、装置及生产线专利，供货国轩高科、广汽埃安等客户 |
| 曼恩斯特 | 与多家材料企业合作，提供小规模实验室级HIP设备，用于固态电解质烧结工艺验证。 |

数据来源：中国粉体网，高工锂电，宁德时代，利元亨，先导智能，中信建投

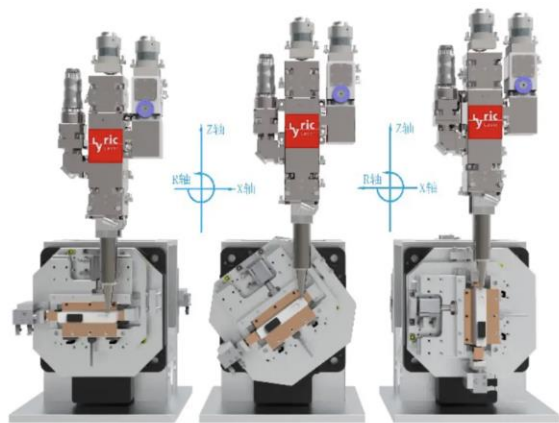
3.6 极耳焊接：激光焊接降低材料损伤风险，或称为主流焊接方式

- 极耳焊接旨在将电芯的正负极耳与电芯叠片体可靠连接，确保低接触电阻与电流高效传输。常用的焊接技术包括：
- 1. **激光焊接**：激光焊接利用高能量密度的激光束作为热源，通过光学系统将激光束聚焦在极小的区域内，在极短的时间内使被焊处形成一个能量高度集中的热源区，从而使被焊物熔化并形成牢固的焊点和焊缝。该方法适用于多种金属材料，焊接速度快，具备无接触、高精度强度及热影响区极小的优点，焊缝质量高。
 - 2. **超声波焊接**：超声波焊接是一种固相焊接方法，通过高频机械振动（20-40kHz）在加压条件下使金属界面产生摩擦发热，短时间内实现金属之间的原子级结合。该方法适用于铜、铝等金属的焊接，焊接过程无需熔化金属，适合热敏感材料，焊缝质量高。
- 在液态锂电池生产中，超声波焊接是最主流的极耳焊接技术。因固态电解质膜硬度高、极组整体刚性大，超声波传递时更易出现极片层间开裂与焊点分层，需要优化焊接能量与焊头设计以避免材料破损。激光焊接可降低焊接对周围层材的损伤风险。

图：超声波焊接工艺图



图：激光焊接工艺图



数据来源：《Improving process robustness in ultrasonic metal welding of lithium-ion batteries》，Laserax，中信建投

3.6 极耳焊接：激光焊接降低材料损伤风险，或称为主流焊接方式

- 联赢激光：提供包括激光焊接设备在内的固态电池装配线，设备技术已走入成熟阶段，累计服务多家量产客户。整线方案涵盖预焊、裁切、终焊和整形，可实现多层极耳与叠片体的高质量一站式焊接。
- 利元亨（供货清陶能源）：自2020年起布局固态电池生产线，已向头部客户交付10余套干法电极与激光焊接一体机，覆盖从分条、模切到焊接、装配的全流程设备。2024年11月为清陶能源提供激光焊接、激光模分一体机等设备并已完成交付。
- 多家国内锂电设备厂如赢合科技、先导智能等，在固态电池线实现激光焊接模块化集成，重点聚焦焊接+在线检测的流程优化。
- 德国Manz AG则凭借其BLS 500激光焊接平台，实现了微米级定位与焊缝可编程控制，已被多家主流电池厂引入试生产线

图：利元亨多层极耳激光焊接技术效果图



利元亨激光焊后样品断面：
Sample section after Lyric Robot laser welding:

极耳基本无断裂，焊缝内部气孔小
the polar lug is not broken, and the pores in the weld are small



超声波焊后样品
After ultrasonic welding



激光焊后样品
After laser welding

图：德国Manz BLS 500激光焊接平台

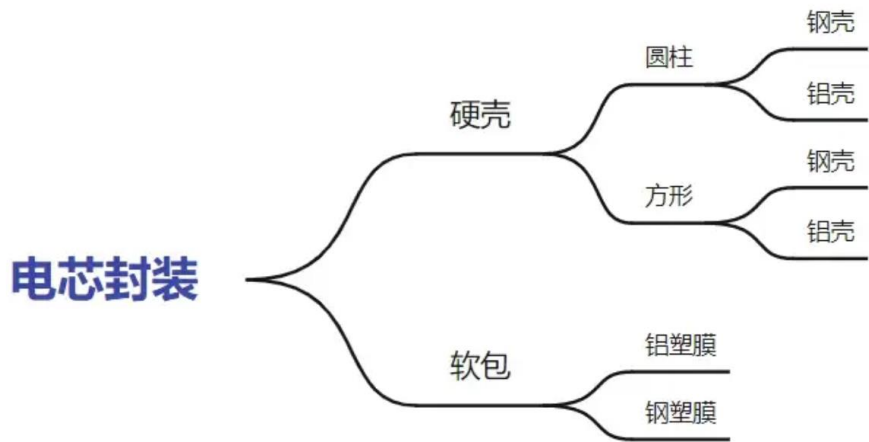


数据来源：《Investigating the bonding mechanisms in ultrasonic welded multilayered copper foils in electric vehicle battery cells》，利元亨，联赢激光，Manz，先导智能，中信建投

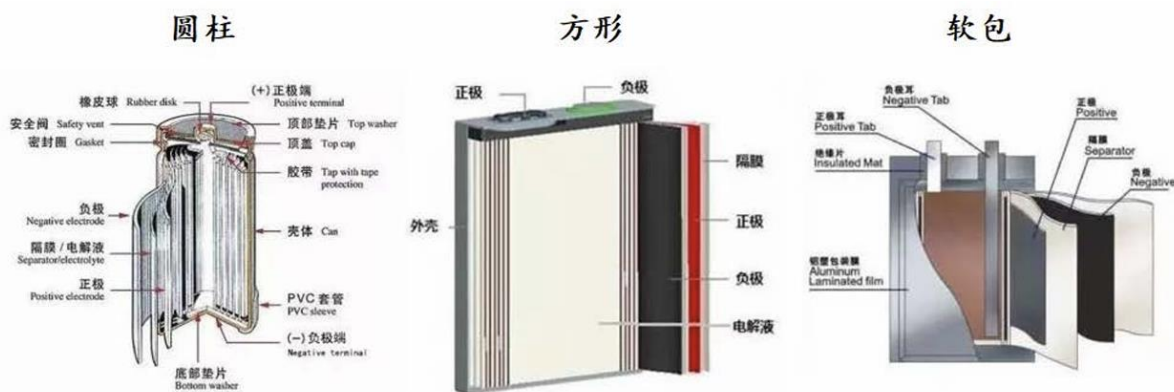
3.7 电芯封装：软包方式可适配充放电过程的体积变化

- 电芯封装主要目的是保护电芯免受外部环境影响，确保电池的安全性和稳定性。
- 全固态锂离子电池和液态锂离子电池的封装方式存在着区别。液态锂电池在国内主要使用方壳进行封装，硬壳结构能提供较高的机械强度，适用于自动化生产，但在发生热失控时可能存在爆炸风险。氧化物和硫化物方案由于其电芯整体较为硬脆缺乏弹性，若采用硬壳封装，容易在充放电过程中的体积变化或外部振动中导致极组碎裂。因此，氧化物和硫化物技术路线固态电池多采用软包封装形式，利用铝塑膜的柔性特性来缓冲内部应力，减少机械损伤。

图：电芯封装技术分类



图：圆柱、软包、方形封装示意图



数据来源：中国粉体网、《专利：CN106450482A - 一种全固态软包锂离子电池制作方法》，中信建投

PART 4

后段工艺：升温升压下进行，降低能耗成为竞争要点

4.1 分容化成设备：升温升压下进行，降低能耗成为竞争要点

- 固态电池化成分容过程需要再升温升压下进行，作为电池制造环节后段最耗能的工序之一，设备能耗占据整线的约40%，分容化成的能耗成为行业竞争焦点之一。
- 先导智能、杭可科技、精实机电、瑞能股份、智佳能等后段自动化装备企业不仅均已有的主打的后段设备方案，而且都在朝着“化成分容+仓储物流”集成系统，乃至化成分容+仓储物流+模组PACK”定制化方案等方向发展。
- 先导智能：后处理工序可提供集成化成、分容、检测、分选等于一体的方壳、软包、圆柱锂电池化成分容工序智能制造解决方案。拥有全球领先的锂电充放电技术，能量回馈效率高达90%。
- 杭可科技：后段设备龙头企业，在充放电机、内阻测试仪等后处理系统核心设备的研发、生产方面拥有核心技术和能力。
- 利元亨：供货清陶能源化成分容设备并已完成交付，在高压化成分容设备等方面取得了阶段性成果。

图：分容化成柜示意图



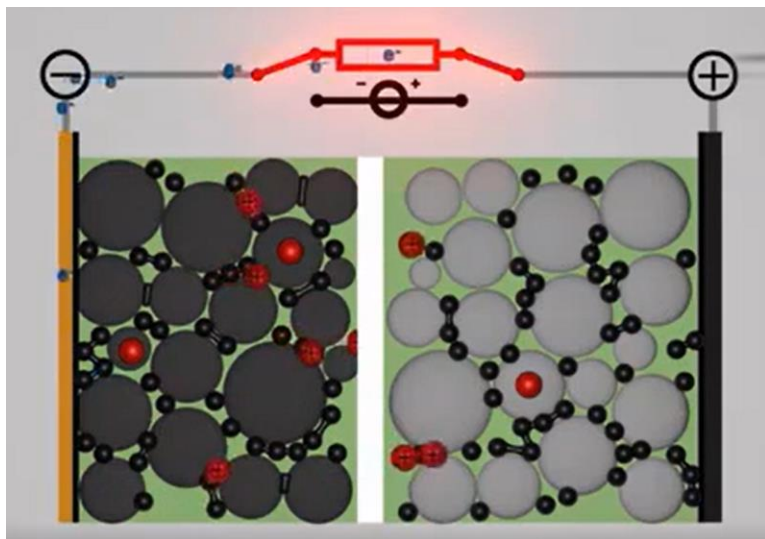
图：分容化成流程图



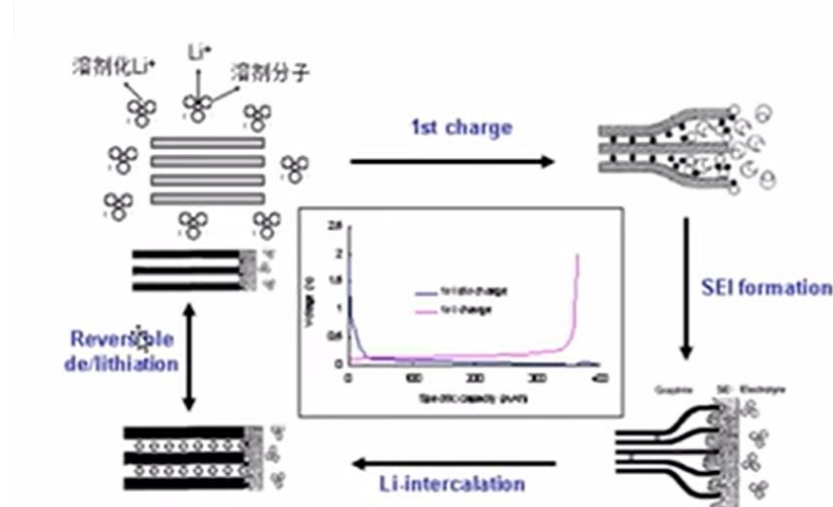
4.1.1 化成工艺：充放电过程以激发电池活性物质实现“初始化”

- **化成工艺：充放电过程以激发电池活性物质实现“初始化”。**化成时电极表面形成一层钝化层，即**固态电解质界面膜(SEI 膜)**，SEI 膜的好坏直接影响到电池的循环寿命、稳定性、自放电性、安全性等电化学指标，满足二次电池密封“免维护”的要求。
- SEI 膜的形成过程，即电化学反应过程。在电压达到一定值时，在负极表面会发生一系列的物理化学变化(电解质的分解；石墨表层的膨胀等)。SEI 膜具有多层结构，靠近固态电解质的一端较为致密，该膜在电极和电解质中间充当中间相，具有固态电解质的性质，且只允许锂离子自由通过，而对电子绝缘。

图：固态锂电充放电过程示意图



图：化成成膜原理示意图



数据来源：《Formation Processes of a Solid Electrolyte Interphase at a Silicon/Sulfide Electrolyte Interface in a Model All-Solid-State Li-Ion Battery》，中信建投

4.1.1 化成工艺：固态电池化成压力远高于传统化成

- 固态电池在化成过程中，将电池通入电路以达到：1、激活活性物质：固态电池中的活性物质需借助第一次充电转化成具有正常电化学反应的物质；2、形成稳定的SEI膜，保证电芯的电化学性能：使电极（主要是负极）形成有效的钝化段，即 SEI 膜——在锂离子电池的电化学反应中，对于电池的稳定性扮演着重要的作用；3、使电池在首次充电中，完成电化学反应的产气过程以便除去产生的气体副产物，确保电油密封后不至于再产生更多的气体而影响电油性能和外观尺寸。
- 固态电池要求大压力化成，常规电池化成压力在3-10吨，固态电池化成压力需60-80吨。

图：固态电池化成方法对比分析

| 实现方法 | 原理概述 | 优点 | 缺点 |
|------|---|--------------------------------------|-------------------------------|
| 负压化成 | 化成过程中始终从注液嘴处给电芯抽真空，使化成产气能够及时排除 | 化成产气可以被及时排除，保证界面稳定一致，简化了后续的真空脱气 | 设备气密性要求较高，设备复杂且成本高，对环境相对湿度要求高 |
| 开口化成 | 化成过程中，电芯的注液嘴始终处于常压开放状态，使化成产气可部分被排除，成产气可以部分排除。 | 一定程度保证了界面一致性，真空脱气相比负压化成复杂，设备较简单，成本较低 | 化成时间较长，对环境相对湿度要求高 |
| 闭口化成 | 化成过程中，电芯注液嘴处始终处于密封状态。 | 设备简单，成本低，对环境湿度没有要求。 | 真空脱气过程复杂，化成时间较长，电芯壳体存在塑性变形风险 |
| 高温化成 | 化成过程中，电芯处于高温环境中，如60/80C° | 加快电化学反应的速度和SEI膜的生长速度且提高了膜的一致性。 | 形成的SEI膜较疏松，不稳定 |
| 低温化成 | 化成过程中，电芯处于高温环境中，如20/30C° | 形成的SEI膜较致密且稳定 | 化成时间较长 |

数据来源：华中科大课件，《Recent advances in all-solid-state batteries for commercialization》，电池中国微信公众号，中信建投

4.1.2 分容工艺：固态电池通常在升温环境中进行

- 分容工艺通过对电池进行标准化的充放电循环，测量其实际容量和性能参数。根据测量参数对电池进行组配，以保证组成电池包的电池其电容量具备一致性。由于分容与化成原理相近，故化成、分容多在一个设备内完成，即化成分容柜。
- 由于固态电解质在室温下的离子电导率较低，分容过程通常需要在升温环境中进行，以提高离子迁移速率。因此，固态电池分容机需配备精确的温控系统，确保测试环境的稳定性；而液态电解质具有较高的离子电导率，通常在室温下即可进行分容测试，对温控系统的要求相对较低。

图：固态电池分容方法对比分析

| 分容方法 | 原理概述 |
|-------------|--|
| 单参数法 | 对电池进行分容的外置特征参数只选择一个进行测量 |
| 多参数法 | 从可选容量、电压和自放电率等参数中选取多项特征参数对锂电池进行分容的方法 |
| 动态特性（曲线）分容法 | 对锂电池进行特定的充放电试验，根据锂电池在充放电曲线上的相似程度进行分容 |
| EIS分容法 | 将多个预设分容条件按EIS和等效电路参数筛选出来，将每块电池按阻抗向量聚类在选定的预设条件上 |

数据来源：EE Times China，中信建投

PART 5

产业化导入设备端率先受益，关注具备核心竞争力的高弹性标的

相关公司：核心工序设备自供、客户深入绑定、验证进展快的高弹性标的

➤ 我们认为设备环节资本开支是固态电池产业化的先行指标，设备端将成为产业导入的率先受益环节，建议关注具备干法电极、等静压设备等固态电池核心差异化工序的设备自供能力，且客户绑定深入、验证进展快的高弹性标的。相关公司包括【宏工科技、纳科诺尔、曼恩斯特、先导智能、先惠技术、利元亨、海目星】。

图：2030年设备环节弹性测算

| 代码 | 简称 | 产品 | 单GWh价值量 /亿元/gwh | 设备需求- 2030E/gwh | 固态电池市占率 /% | 固态电池环节营 收 /亿元 | 2024年主营业收入 /亿元 | 营收弹性 /% | 固态电池设备净 利率/% | 2024年主营业收入/ 亿元 | 业绩弹性 /% | PE-2024 |
|-----------|------|------------|--------------------|--------------------|---------------|---------------------|-------------------|------------|-----------------|-------------------|------------|---------|
| 301662.SZ | 宏工科技 | 搅拌机、干法电极设备 | 0.20 | 294 | 15% | 7 | 21 | 32% | 20% | 2.08 | 65% | 36 |
| 832522.BJ | 纳科诺尔 | 干法电极设备 | 0.20 | 294 | 15% | 7 | 11 | 64% | 20% | 1.62 | 83% | 40 |
| 301325.SZ | 曼恩斯特 | 干法电极设备 | 0.40 | 294 | 10% | 9 | 17 | 53% | 20% | 0.31 | 586% | 54 |
| 300340.SZ | 科恒股份 | 干法设备 | 0.40 | 294 | 5% | 5 | 21 | 21% | 20% | (1.92) | /// | /// |
| 688155.SH | 先惠技术 | 干法设备、pack线 | 0.40 | 294 | 5% | 5 | 25 | 18% | 20% | 2.23 | 40% | 20 |
| 688573.SH | 信宇人 | 前道辊压设备 | 0.20 | 294 | 5% | 2 | 6 | 36% | 20% | (0.63) | /// | #DIV/0! |
| 688559.SH | 海目星 | 前中道产线 | 1.82 | 215 | 5% | 20 | 45 | 45% | 20% | (1.63) | /// | /// |
| 300457.SZ | 赢合科技 | 前中道产线 | 1.92 | 215 | 5% | 22 | 85 | 25% | 20% | 5.03 | 86% | 18 |
| 688383.SH | 新益昌 | 中段设备 | 1.15 | 215 | 5% | 13 | 9 | 139% | 20% | 0.40 | 640% | 118 |
| 688518.SH | 联赢激光 | 中段设备及产线 | 1.15 | 215 | 5% | 13 | 31 | 41% | 20% | 1.66 | 156% | 26 |
| 300173.SZ | 福能东方 | 整线 | 2.24 | 215 | 5% | 25 | 13 | 189% | 20% | 0.83 | 606% | 52 |
| 300450.SZ | 先导智能 | 整线 | 2.24 | 215 | 20% | 101 | 119 | 85% | 20% | 2.86 | 705% | 27 |
| 688499.SH | 利元亨 | 整线 | 2.24 | 215 | 5% | 25 | 25 | 102% | 20% | (10.44) | /// | 93 |
| 002008.SZ | 大族激光 | 整线 | 2.24 | 215 | 5% | 25 | 148 | 17% | 20% | 16.94 | 30% | 31 |
| 300648.SZ | 星云股份 | 后道设备 | 0.20 | 215 | 5% | 2 | 11 | 21% | 20% | (0.82) | /// | 108 |
| 688006.SH | 杭可科技 | 后道设备及产线 | 0.42 | 215 | 20% | 19 | 30 | 63% | 20% | 3.26 | 116% | 21 |

数据来源：Wind，中信建投

风险分析

- 行业进展不及预期：当前固态电池仍处于市场化导入初期的技术中试阶段，如果相关政策支持不及预期可能导致行业产业化进度较慢
- 固态电池降本不及预期：固态电池进入大规模放量的关键是成本端具备一定的经济性或者综合性能来看具备性价比，当前未量产阶段成本较高，如果后续技术、规模降本不及预期可能导致市场推广不及预期
- 技术迭代不及预期：当前固态电池处于技术路线选择、材料体系搭建、量产工艺完善的时间段，如果技术方面进展不及预期可能导致产业化进度迟缓
- 客户订单不及预期：中试线向量产线导入过程中如果终端客户下单延迟可能导致上游设备、材料、电池企业订单不及预期。

分析师介绍

朱玥
中信建投证券电力设备新能源行业首席分析师。2021年加入中信建投证券研究发展部，8年证券行业研究经验，曾就职于兴业证券、方正证券，《财经》杂志，专注于新能源产业链研究和国家政策解读跟踪，在2019至2022年期间带领团队多次在新财富、金麒麟，水晶球等行业权威评选中名列前茅。

许琳
中信建投证券新能源汽车锂电与材料行业首席分析师，7年主机厂供应链管理+2年新能源车研究经验，2021年加入中信建投证券研究发展部，主要覆盖新能源汽车、电池研究。

屈文敏
中信建投证券电力设备及新能源研究员，2022 年所在团队荣获新财富最佳分析师评选第四名，2022 年上证报最佳电力设备新能源分析师第二名，金麒麟评选光伏设备第二名，金麒麟电池行业第三名，金麒麟新能源汽车第三名，水晶球新能源行业第三名，水晶球电力设备行业第五名。

评级说明

| 投资评级标准 | | 评级 | 说明 |
|--|------|------|---------------|
| 报告中投资建议涉及的评级标准为报告发布日后6个月内的相对市场表现，也即报告发布日后的6个月内公司股价（或行业指数）相对同期相关证券市场代表性指数的涨跌幅作为基准。A股市场以沪深300指数作为基准；新三板市场以三板成指为基准；香港市场以恒生指数作为基准；美国市场以标普 500 指数为基准。 | 股票评级 | 买入 | 相对涨幅15%以上 |
| | | 增持 | 相对涨幅5%—15% |
| | | 中性 | 相对涨幅-5%—5%之间 |
| | | 减持 | 相对跌幅5%—15% |
| | | 卖出 | 相对跌幅15%以上 |
| | 行业评级 | 强于大市 | 相对涨幅10%以上 |
| | | 中性 | 相对涨幅-10-10%之间 |
| | | 弱于大市 | 相对跌幅10%以上 |

分析师声明

本报告署名分析师在此声明：（i）以勤勉的职业态度、专业审慎的研究方法，使用合法合规的信息，独立、客观地出具本报告，结论不受任何第三方的授意或影响。（ii）本人不曾因，不因，也将不会因本报告中的具体推荐意见或观点而直接或间接收到任何形式的补偿。

法律主体说明

本报告由中信建投证券股份有限公司及/或其附属机构（以下合称“中信建投”）制作，由中信建投证券股份有限公司在中华人民共和国（仅为本报告目的，不包括香港、澳门、台湾）提供。中信建投证券股份有限公司具有中国证监会许可的投资咨询业务资格，本报告署名分析师所持中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格证书编号已披露在报告首页。

在遵守适用的法律法规情况下，本报告亦可能由中信建投（国际）证券有限公司在香港提供。本报告作者所持香港证监会牌照的中央编号已披露在报告首页。

一般性声明

本报告由中信建投制作。发送本报告不构成任何合同或承诺的基础，不因接收者收到本报告而视其为中信建投客户。

本报告的信息均来源于中信建投认为可靠的公开资料，但中信建投对这些信息的准确性及完整性不作任何保证。本报告所载观点、评估和预测仅反映本报告出具日该分析师的判断，该等观点、评估和预测可能在不发出通知的情况下有所变更，亦有可能因使用不同假设和标准或者采用不同分析方法而与中信建投其他部门、人员口头或书面表达的意见不同或相反。本报告所引证券或其他金融工具的过往业绩不代表其未来表现。报告中所含任何具有预测性质的内容皆基于相应的假设条件，而任何假设条件都可能随时发生变化并影响实际投资收益。中信建投不承诺、不保证本报告所含具有预测性质的内容必然得以实现。

本报告内容的全部或部分均不构成投资建议。本报告所包含的观点、建议并未考虑报告接收人在财务状况、投资目的、风险偏好等方面的具体情况，报告接收者应当独立评估本报告所含信息，基于自身投资目标、需求、市场机会、风险及其他因素自主做出决策并自行承担投资风险。中信建投建议所有投资者应就任何潜在投资向其税务、会计或法律顾问咨询。不论报告接收者是否根据本报告做出投资决策，中信建投都不对该等投资决策提供任何形式的担保，亦不以任何形式分享投资收益或者分担投资损失。中信建投不对使用本报告所产生的任何直接或间接损失承担责任。

在法律法规及监管规定允许的范围内，中信建投可能持有并交易本报告中提公司的股份或其他财产权益，也可能在过去12个月、目前或者将来为本报告中所提公司提供或者争取为其提供投资银行、做市交易、财务顾问或其他金融服务。本报告内容真实、准确、完整地反映了署名分析师的观点，分析师的薪酬无论过去、现在或未来都不会直接或间接与其所撰写报告中的具体观点相联系，分析师亦不会因撰写本报告而获取不当利益。

本报告为中信建投所有。未经中信建投事先书面许可，任何机构和/或个人不得以任何形式转发、翻版、复制、发布或引用本报告全部或部分内容，亦不得从未经中信建投书面授权的任何机构、个人或其运营的媒体平台接收、翻版、复制或引用本报告全部或部分内容。版权所有，违者必究。

中信建投证券研究发展部

北京
朝阳区景辉街16号院1号楼18层

电话：(8610) 8513-0588
联系人：李祉瑶
邮箱：lizhiyao@csc.com.cn

上海
浦东新区浦东南路528号南塔2103室

电话：(8621) 6882-1600
联系人：翁起帆
邮箱：wengqifan@csc.com.cn

深圳
福田区福中三路与鹏程一路交汇处广电金融中心
35楼

电话：(86755) 8252-1369
联系人：曹莹
邮箱：caoying@csc.com.cn

中信建投（国际）

香港
中环交易广场2期18楼

电话：(852) 3465-5600
联系人：刘泓麟
邮箱：charlene.liu@csci.hk