

固态电池设备专题深度系列二：
干法成膜——高性能固态电池量产的关键

证券分析师：周尔双

执业证书编号：S0600515110002

联系邮箱：zhoues@dwzq.com.cn

证券分析师：李文意

执业证书编号：S0600122080043

联系邮箱：liwenyi@dwzq.com.cn

2025年11月22日

- **前道制片是锂电池制造流程中的承上启下环节，直接决定电池性能表现与产线稳定性。**锂电池制造中，前道制片环节主要指正负极片&电解质膜的成型过程：①传统液态通过浆料制备、涂布、烘干、压实等工艺，将活性物质均匀涂布于金属集流体上，形成具备电化学功能的极片。②全固态电池由于固态电解质膜替代液态电解液，前道制片除传统正负极片外，还需制备固态电解质膜。该环节是电池制造流程中的承上启下部分，直接决定成品电芯的能量密度、倍率性能与循环寿命，也对产线运行稳定性与后段工序良率产生关键影响。
- **固态电池前道制片工艺主要分为干法和湿法。**①湿法工艺：仍采用溶剂体系，将电极/电解质材料与粘结剂混合成浆料后进行涂布，再通过烘干完成成膜。②干法工艺：则取消了溶剂使用与烘干步骤，更依赖高剪切干混与纤维化设备实现材料均匀分散与预成型，并通过多辊压实方式直接完成成膜过程。湿法仍是固态电池产线的主要选择，干法凭借成本、工艺与材料适配等综合优势，正逐步成为下一代固态电池前道工艺的主流方向。
- **干法成膜技术路径多样，各具优势与适配场景。**当前较具代表性的六类干法制片技术包括①纤维化、②干法喷涂沉积、③气相沉积、④热熔挤压、⑤直接压制和⑥3D打印。不同路径在技术原理、适用材料、成膜能力、设备复杂度等方面存在差异，分别适用于大型、柔性电极、小尺寸器件、厚极片等应用场景。工艺路径的选择需综合考虑材料特性、制造成本与工艺良率的适配性，以实现性能与量产之间的最优平衡。
- **投资建议：**重点推荐固态电池设备整线供应商【先导智能】、激光焊接设备商【联赢激光】、化成分容设备商【杭可科技】，建议关注干/湿法电极设备商【赢合科技】、干法电极&模组PACK【先惠技术】、整线供应商【利元亨】、干法电极设备商【曼恩斯特】、干法辊压机【纳科诺尔】、干法电极设备商【华亚智能】等。
- **风险提示：**下游应用进展低于预期、新技术替代风险、上游原材料价格波动风险等。



1 制备电极片&电解质膜为关键，直接决定电池的性能&量产效果

2 成膜工艺可分为干法、湿法，干法为高性能固态电池终局

3 干法成膜路径多种多样，看好纤维化为未来量产路线

4 固态电池出于特殊需求，新增预包覆、印胶等工艺

5 相关公司

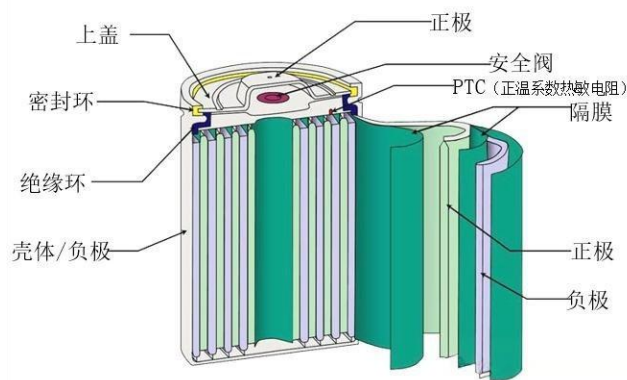
6 投资建议

7 风险提示

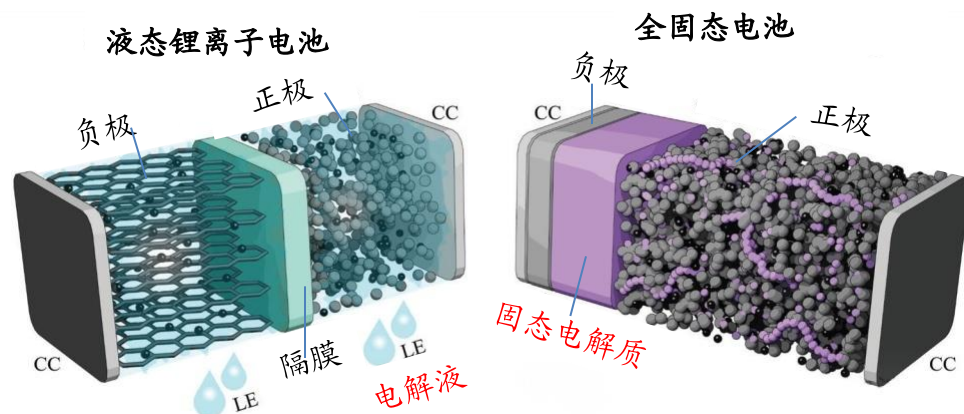
1.1 固态电池核心工艺：制备正负极片、电解质膜是关键

- 前道制片是锂电池制造流程中的承上启下环节，直接决定性能表现与产线稳定性。在传统锂电池制造中，前道制片环节主要指正负极片的成型过程，即通过浆料制备、涂布、烘干、压实等工艺，将活性物质均匀涂布于金属集流体上，形成具备电化学功能的极片。该环节是电池制造流程中的承上启下部分，直接决定成品电芯的能量密度、倍率性能与循环寿命，也对产线运行稳定性与后段工序良率产生关键影响。
- 全固态电池由于结构变化，前道制片除传统正负极片外，还需制备固态电解质膜，工艺难度与关键性显著提升。全固态电池不再使用液态电解液，而以固态电解质膜承担离子传导功能。液态电池常用电解质为有机溶剂+锂盐体系，如LiPF₆碳酸酯电解液；固态体系则主要采用氧化物（如LLZO）、硫化物（如LGPS）或高分子材料（如PEO基）等。由于电解质形态由液态转为固态，缺乏流动性与自适应性，浆料分散、涂布均匀、厚度控制、界面贴合等环节均更易产生缺陷；同时，固态材料体系间物理化学性质差异大，复合结构复杂，工艺窗口窄，稳定性与良率控制难度显著高于液态体系。

◆图：锂电池主要由正负极片和电解质膜/液组成



◆图：相比液态电池，全固态电池以固态电解质替代液态系统，需额外制备固态电解质膜



1.2 固态电池前道设备2029年市场空间有望达80亿元

- 我们假设（1）固态电池2025年陆续完成中试，2026-2027年陆续小批量装车，2028-2029年形成规模化量产，全球固态电池产能有望从2024年的17GWh提升至2029年的200GWh，5年合计新增约183GWh。（2）当前中试阶段单GWh设备价值量在5-6亿元，后续随着规模化量产及设备节拍提升有望降至2.5亿元/GWh。（3）海外中试进展2025年前快于国内，但随着我国固态电池政策陆续落地，我国固态电池产业化进度有望超过海外玩家。

		中试		小批量装车		规模化量产	
		2024A	2025E	2026E	2027E	2028E	2029E
中国实际产能（GWh）		7	12	19	35	65	130
海外实际产能（GWh）		10	10	14	20	35	70
全球实际产能（GWh）		17	22	33	55	100	200
新增产能测算（GWh）		-	5	11	22	45	100
假设单GWh设备投资额（亿元）		6	5	4	3.5	3	2.5
固态电池设备需求（亿元）		-	25.0	44.0	77.0	135.0	250.0
固态电池设备需求同比增速（%）		-	-	76%	75%	75%	85%
前道设备	干料混合（4%）	-	1.0	1.8	3.1	5.4	10.0
	干法辊压（10%）	-	2.5	4.4	7.7	13.5	25.0
	电解质热复合（8%）	-	2.0	3.5	6.2	10.8	20.0
	预锂化（6%）	-	1.5	2.6	4.6	8.1	15.0
	分切&模切（4%）	-	1.0	1.8	3.1	5.4	10.0
	前道合计（32%）	-	8.0	14.1	24.6	43.2	80.0
中道设备	胶框印刷（3%）	-	0.8	1.3	2.3	4.1	7.5
	无隔膜叠片（25%）	-	6.3	11.0	19.3	33.8	62.5
	焊接&装配（4%）	-	1.0	1.8	3.1	5.4	10.0
	等静压（13%）	-	3.3	5.7	10.0	17.6	32.5
	中道合计（45%）	-	11.3	19.8	34.7	60.8	112.5
后道设备	高压化成分容（15%）	-	3.8	6.6	11.6	20.3	37.5
	检测（4%）	-	1.0	1.8	3.1	5.4	10.0
	组装（4%）	-	1.0	1.8	3.1	5.4	10.0
	后道合计（23%）	-	5.8	10.1	17.7	31.1	57.5

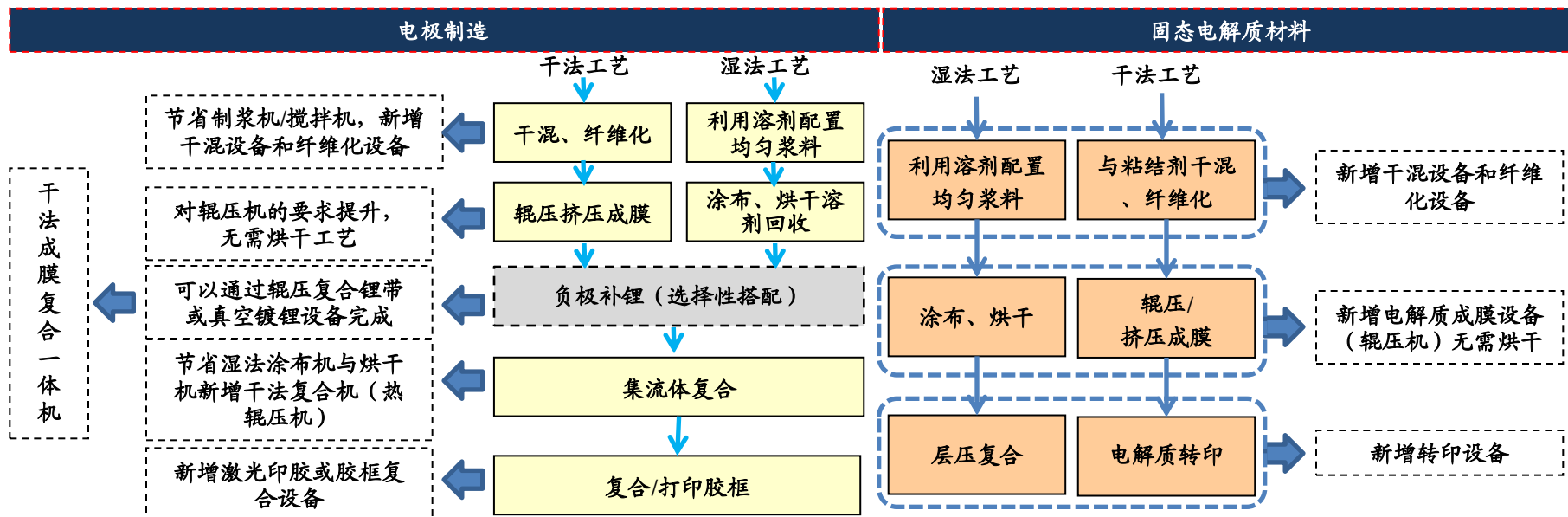


- 1 制备电极片&电解质膜为关键，直接决定电池的性能&量产效果
- 2 成膜工艺可分为干法、湿法，干法为高性能固态电池终局
- 3 干法成膜路径多种多样，看好纤维化为未来量产路线
- 4 固态电池出于特殊需求，新增预包覆、印胶等工艺
- 5 相关公司
- 6 投资建议
- 7 风险提示

2.1 干法、湿法均可制备固态电池，干法有望成为主流

- 固态电池前道制片工艺分为干法和湿法。①湿法工艺：仍采用溶剂体系，将电极/电解质材料与粘结剂混合成浆料后进行涂布，再通过烘干完成成膜。②干法工艺：则取消了溶剂使用与烘干步骤，更依赖高剪切干混与纤维化设备实现材料均匀分散与预成型，并通过多辊压实方式直接完成成膜过程。
- 湿法仍是固态电池产线的主要选择，干法凭借成本、工艺与材料适配等综合优势，正逐步成为下一代固态电池前道工艺的主流方向。①湿法工艺：成熟度高、涂布均匀性好，与液态产线适配性强；但其依赖大量有机溶剂与高温烘干，能耗较高，流程较长，对厚电极及水敏性材料支持有限。②干法工艺：相较之下，干法工艺采用无溶剂制程，省去了溶剂处理与烘干步骤，仅通过机械方式实现颗粒粘结成膜，可显著降低能耗与制造成本，提升材料利用率，同时具备更好的环保性与对水敏体系的兼容性。干法制片凭借其工艺优势，正逐步成为下一代电池前道工艺的主流方向。

◆ 图：固态电池可根据成本&材料适配性&性能要求分别选择湿法或干法工艺，干湿法工艺湿法核心区别在成膜工艺不同



2.2 干法工艺在能耗、结构稳定性与材料兼容性上更具优势

● 相较于湿法工艺，干法工艺在能耗、成本、结构性能与材料适配性等方面具备显著优势，正逐步成为固态电池前道制片的关键方向。

① 工艺流程更简洁，制造效率更高。干法工艺取消了溶剂配制、烘干与回收等流程，整体流程缩短为5步以内，生产节拍提升明显，产线更紧凑。

② 能耗与制造成本显著降低，环保优势突出。干法免除烘干与挥发性有机化合物（VOC）溶剂回收系统，单位电芯制造能耗可降低约38–40%，碳排放减少，整体制造成本可下降10–20%。

③ 结构更致密，支持厚极片与高能量密度设计。干法制备结构均匀、压实密度高，压实提升可达30%，可支持 >10 mAh/cm² 面容量，实现300+ Wh/kg、目标500+ Wh/kg 的能量密度平台。

④ 循环性能更优，界面稳定性更强。纤维化结构或颗粒压实形成稳定的骨架网络，材料间结合力强，有效降低活性物迁移风险，提升循环寿命；无溶剂残留避免副反应，显著降低界面阻抗。

⑤ 材料兼容性更好，适配固态体系制造需求。干法制程无极性溶剂参与，更适配对水敏或溶剂敏感的锂金属、硅碳负极与硫化物、部分氧化物电解质，是实现高能固态电池的理想制备工艺。

◆表：干法vs湿法极片工艺比较

对比维度	湿法工艺	干法工艺
工艺流程与制造端		
是否使用溶剂	需要溶剂，需配套烘干与回收系统	无需溶剂，省去烘干与回收系统
工艺步骤	流程较长，包含配浆、涂布、烘干等步骤	流程简洁，混合-成膜可连续进行
制造成本	设备多、能耗高，运行成本高	成本降低10–20%，节省设备与能耗投入
能耗水平	烘干和回收系统能耗高，碳排放大	无溶剂，能耗更低，碳排更少
电池性能		
压实密度	浆料干燥后结构松散、孔隙率高，限制压实密度提升	结构稳定、颗粒贴合紧密，压实密度提升可达30%
面容量	厚电极适配性弱，单位面积负载受限	支持厚极片 (>10 mAh/cm ²)，单位负载更高
可实现能量密度	主流方案仍难突破300 Wh/kg	已实现300+ Wh/kg，目标指向500 Wh/kg+
循环/耐久性能	活性物易迁移、结构不稳定，循环中易出现脱粘/脱活等问题	纤维网络结构稳定，结合力强，循环寿命更优
界面阻抗	溶剂残留可能诱发副反应，界面形成高阻层	无溶剂，固-固界面贴合性更好，阻抗更低
其他		
材料兼容性	易引发溶剂与材料界面反应，限制部分材料应用（如硫化物电解质）	无溶剂残留，适配水敏 / 溶剂敏感材料体系
环保表现	存在VOC排放与溶剂残留风险，CO ₂ 排量	无溶剂排放，每10kwh减排1000kgCO ₂

数据来源：《干法电极技术在超级电容器和锂离子电池中的研究进展》（徐桂培等），东吴证券研究所

2.3 固态电解质材料体系多样，硫化物为主流技术路线

- 固态电解质是固态电池的核心，可分为氧化物、硫化物、聚合物、卤化物四种技术路线，其中硫化物凭借电导率最高、兼具加工性能成为目前的国际主流路线。
- 硫化物：电导率与加工性最佳，潜力最大，仍处研发期，质地软，适合挤压增强界面接触。
- 氧化物：稳定性与安全性最高，成本低但脆性大，加工难，电导率一般，主用于半固态电池。
- 聚合物：合成与加工简便，率先商业化，但常温电导率低，性能瓶颈明显，难以支撑规模化发展，未来更可能以辅材形式与无机材料混用。
- 卤化物：性能均衡，兼具氧化物的高氧化电位与硫化物的高电导率与可塑性，具备成本优势与大规模应用潜力，近年进展显著。但因还原电位偏高，无法直接匹配金属锂负极，需包覆等手段解决，整体性能与成本介于氧化物与硫化物之间。

◆表：固态电解质技术路线对比

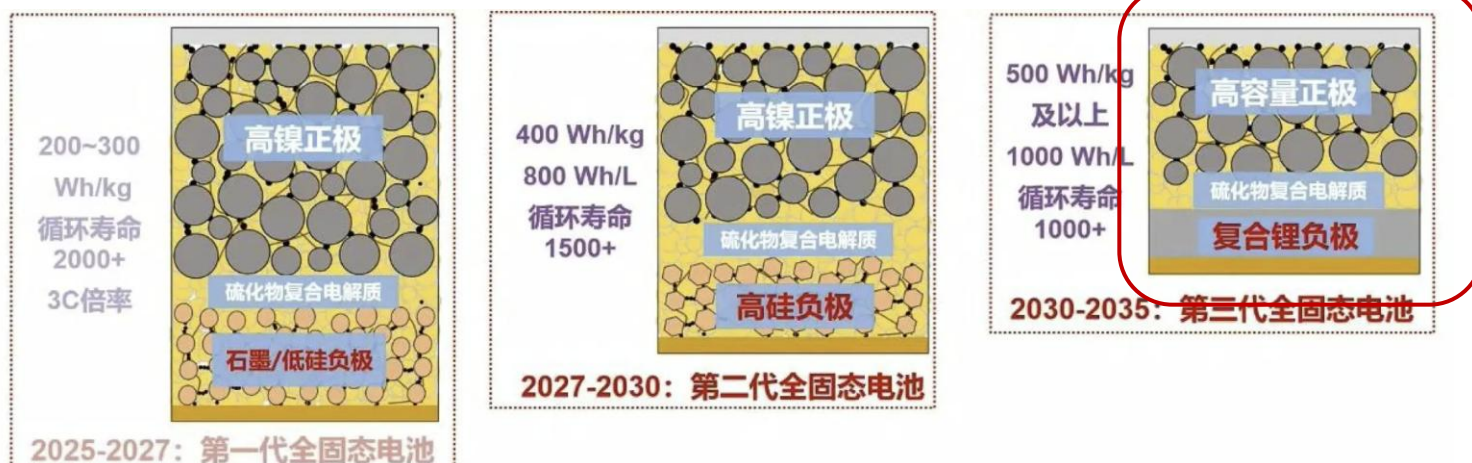
固态电解质	代表企业	优点	缺点	全固态前景前瞻
氧化物 LLTO, LLZO, LIPON	Quantum Scape、TDK 清陶、卫蓝、赣锋、国轩、辉能	电化学窗口稳定性好，宽电化学窗口，优异的高低温性能	电导率低、脆度高、界面接触差等	氧化物由于电导率低的致命缺点，非常适用于半固态方案。全固态需要解决电导率和界面问题
硫化物 LPS, LPGS	宁德时代、丰田、三星、松下、SolidPower、蜂巢	合成温度低，机械延展性优良，界面接触良好，电导率最高	成本高，电化学稳定性和空气稳定性差（与空气中的水反应），与金属锂负极使用时产生的SEI膜阻抗较大，电化学窗口较窄，水、氧气等非常敏感	硫化物不能阻止枝晶形成
聚合物 PEO+LiTFSI	宁德时代、SolidPower、冠盛东驰	良好的界面相融性	电化学窗口不耐氧化，室温电导率非常低，无法阻止锂枝晶	聚合物电解质需要在60摄氏度工作，不适用于电车
卤化物 Li3YCl6和Li3YBr6 SE	松下、三洋、三星、国联、蜂巢、圣戈班、TDK	高离子电导率、良好的可变形性和宽电化学窗口	还原电位不够低，无法与金属 锂负极匹配，而且原材料成本过高	成本太高，非重点研究领域

数据来源：高工锂电官网，东吴证券研究所

2.4 固态电池后续迭代导入高性能正负极，干法工艺适配性优势愈发突出

- 未来电池能量密度提升，驱动正负极向高性能迭代。
- 负极材料：目前以石墨负极为主，短中期向硅基负极发展，长期有望切换至金属锂。锂电池负极材料目前以石墨为主，具有高电导率和高稳定性等优势，但已接近理论比容量(372mAh/g)。（1）硅基负极理论比容量高(4200mAh/g)，但存在体积膨胀(380%)、导电性差和SEI膜不稳定的问题，多与石墨掺杂应用。（2）锂金属负极理论比容量高(3860mAh/g)，电位低(-3.04eV)，导电性优异，因此具有巨大潜力，但存在锂枝晶、循环时体积变化等问题。整体看，负极液态向硅碳负极发展，尤其CVD法迎来突破，但固态必然向锂金属负极迭代，其最具备性能潜力。
- 正极材料：短期沿用高镍体系，长期向超高镍、富锂锰基、高压尖晶石等高容量正极材料迭代。固态电池电化学窗口更宽，因此可以使用的正极材料更为广泛。半固态/固态电池短期预计仍会沿用三元高镍体系，但或通过单晶化、氧化物包覆、金属掺杂等手段进一步提升电压，从而提升电池能量密度。在固态电解质、金属锂负极等技术逐渐成熟后，正极材料预计向超高镍、富锂锰基、高压尖晶石等新型体系进一步迭代。近期看，锰酸锂/镍锰酸锂尖晶石体系进展快，未来有望迎来突破，富锂锰基能量密度最高，但存在循环寿命等一系列短板，远期有望迎来机会。

◆ 图：固态电池将向高容量正负极迭代，清华大学预计金属锂负极&高容量正极将成为行业终局



2.4 固态电池后续迭代导入高性能正负极，干法工艺适配性优势愈发突出

- 新材料对制片过程提出更高适配性要求。①正极：高镍、富锂锰基材料表面反应活性强，易与溶剂发生副反应，影响界面稳定性。②负极：锂金属活性大，遇水剧烈反应；硅基负极在湿法中易形成不稳定界面，影响循环性能。③电解质：硫化物电解质对湿气敏感，遇水后会产生巨毒硫化氢，若用湿法制备需在手套箱中操作，环境要求极高、成本大。当前产业实践中，以“正极湿法 + 负极干法”的混合路线为主流，尚未完全实现全电极干法制备。干法路线需根据不同材料体系优化适配方案，目前仍处于持续迭代过程中。
- 干法工艺具备更强的材料适配性和更广的应用覆盖范围。干法延压、干法喷涂、挤出、气相沉积等工艺基本可覆盖正极、各类负极（包括锂金属、硅碳）、以及聚合物和部分无机固态电解质膜等关键材料体系。其中，干法挤出与气相沉积在制备聚合物或氧化物类结构膜时展现出良好兼容性，适用于复杂三维结构设计；而对于硫化物固态电解质膜，当前更主流的是采用干法压片或压延路径，以兼顾致密性与离子导通性能。

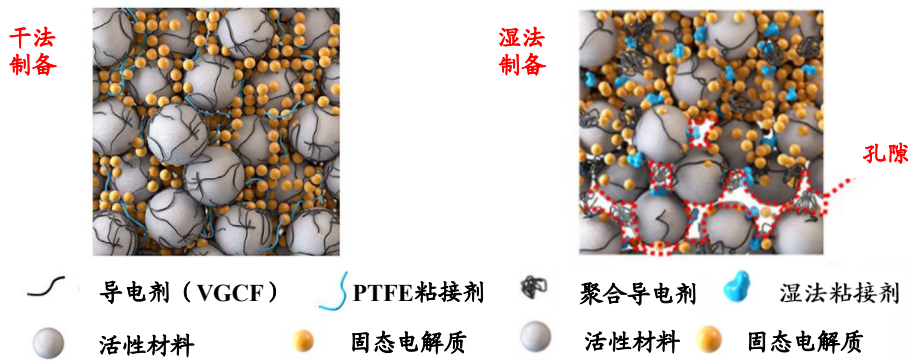
◆ 图：主流电极与电解质材料体系的工艺适配性对比，干法路径兼容性更强、应用范围更广

	干法工艺				湿法工艺	
	干法压延	干法喷涂	挤出	气相沉积	流延成型	浸润
正极	✓	✓	✓	✓	✓	✗
锂金属	✗	✗	✓	✓	✗	✗
负极						
硅碳负极	✓	✓	✓	✓	✓	✗
氧化物电						
解质膜	✗	✗	✗	✓	✓	✗
聚合物电						
解质膜	✓	✓	✓	✗	✓	✓
硫化物电						
解质膜	✓	✓	✗	✗	✓	✓

2.5 干法工艺提升能量密度与界面稳定性的两大关键：无溶剂残留&高压实密度

- 干法工艺消除溶剂残留及其带来的界面结构缺陷。湿法工艺中使用溶剂配制浆料，虽然后续通过烘干工序去除溶剂，但仍可能存在微量残留，引发界面副反应（如气体生成、SEI膜不稳定、金属溶出），影响电池的循环寿命与安全性。更关键的是，溶剂蒸发过程会在电极内部形成微孔结构，导致材料颗粒间接触不紧密，固-固界面贴合性差、压实密度低、离子传输受限。而干法制程中无溶剂参与，材料以颗粒直接压实成膜，结构更加致密，界面连续性与稳定性显著提升。
- 干法工艺通过结构优化实现更高压实密度，提升体积能量表现。相较于湿法中因溶剂、烘干、浆料流动性等限制造成的收缩、起皮和厚度控制难题，干法工艺依赖物理压实与网络结构成膜，显著减少孔隙率，提升结构均一性与机械强度。这使得干法电极具备更高的压实密度，单位体积内的活性物质含量更高，体积能量密度提升明显，同时也优化了电子/离子传输路径，有助于提升倍率性能与界面循环稳定性

◆ 图：干法工艺无需使用溶剂，不会出现溶剂蒸发后的空隙，进而改善固-固界面&能量密度



◆ 图：干法工艺的活性物质比例、压实密度等核心性能指标显著优于湿法工艺

指标	干法电极数据	传统湿法对比	突破意义
活性物质占比	95%	≤ 80%	能量密度提升20%以上
压实密度	3.62g/cm ³ (三元材料)	3.34g/cm ³	体积容量提升8.4%
剥离强度	提升3.2倍	易粉化脱落	循环寿命延长，深海验证5000次无衰减
电极厚度极限	≤ 5mm	≤ 16mm	适配硅基负极 (膨胀率300%)



- 1 制备电极片&电解质膜为关键，直接决定电池的性能&量产效果
- 2 成膜工艺可分为干法、湿法，干法为高性能固态电池终局
- 3 干法成膜路径多种多样，看好纤维化为未来量产路线
- 4 固态电池出于特殊需求，新增预包覆、印胶等工艺
- 5 相关公司
- 6 投资建议
- 7 风险提示

3.1 干法成膜技术路径多样，各具优势与适配场景

- 干法成膜技术路径多样，各具优势与适配场景。当前较具代表性的六类干法制片技术包括①纤维化、②干法喷涂沉积、③气相沉积、④热熔挤压、⑤直接压制和⑥3D打印。
- 不同路径在技术原理、适用材料、成膜能力、设备复杂度等方面存在差异，分别适用于大型、柔性电极、小尺寸器件、厚极片等应用场景。

◆ 图：干法制片主要技术路径及适用场景

干法电极技术	技术原理	优势	弊端	应用领域
纤维化	PTFE在高剪切力作用下纤维化	与现有生产线兼容，可大规模生产	阴极不稳定，目前只能采用PTFE作为黏结剂	正/负极，亦可用于聚合物/复合电解质膜成型
干法喷涂沉积	干粉混合物在高压下沉积	电极厚度和密度可控，可用于柔性电极	设备昂贵，生产环境要求高	正/负极，亦适用于薄层聚合物或氧化物电解质膜沉积
气相沉积	材料先蒸发汽化再沉积	多种汽化方法可选择	生产设备昂贵，规模扩大量难	小尺寸电极，超薄氧化物电解质膜（如LLZO系）沉积
热熔挤压	颗粒混合、挤出、脱黏和烧结	可制备厚电极	工艺复杂，能耗高，需要辊压	正/负极，也可用于制备厚膜型聚合物或复合电解质层（如PEO+陶瓷颗粒复合膜）
直接压制	活性材料充分混合后直接压制为电极	操作简单，黏结剂用量小	生产规模小，需要活性材料可压缩	正/负极，硫化物/氧化物电解质膜成型
3D打印	材料熔融后逐层打印	电极厚度和形貌可定制	设备昂贵，生产规模小，活性材料含量低	小尺寸电极，适用于复杂异形/集成结构电解质膜制备，

数据来源：《干法电极技术在超级电容器和锂离子电池中的研究进展》（徐桂培等），东吴证券研究所

3.2 不同材料体系适配不同干法工艺路线

- 工艺路径的选择需综合考虑材料特性、制造成本与工艺良率的适配性，以实现性能与量产之间的最优平衡
- 不同电极/电解质体系对工艺环境、膜层结构与界面稳定性要求差异显著，是决定具体工艺路径选择的关键因素。
①聚合物电解质：可适配湿法或干法挤出制备，膜厚可控，工艺简单，但离子导率有限；②氧化物电解质：对致密性要求高，多需高温烧结成膜，适合搭配气相沉积或湿法流延，但加工难度大、成本高；③硫化物电解质：具高离子电导率与良好压缩适应性，是产业主力路线，湿法制程虽可实现，但需全程干燥、低露点封闭环境，干法压片与挤出更具实用性。④正极材料：主流高镍层状氧化物可适配干法热熔挤出或湿法工艺；⑤锂金属负极：与硫化物/聚合物固态电解质匹配良好，多采用干法热压层叠或整体压片工艺，挑战在于界面稳定性控制；⑥碳/硅负极：传统湿法成熟，干法路径中可采用喷涂、挤出或多孔支架包覆等工艺，仍需解决膨胀控制与粘结性问题。

◆表：固态电解质/极片类型与干/湿法工艺匹配关系及产业化潜力分析

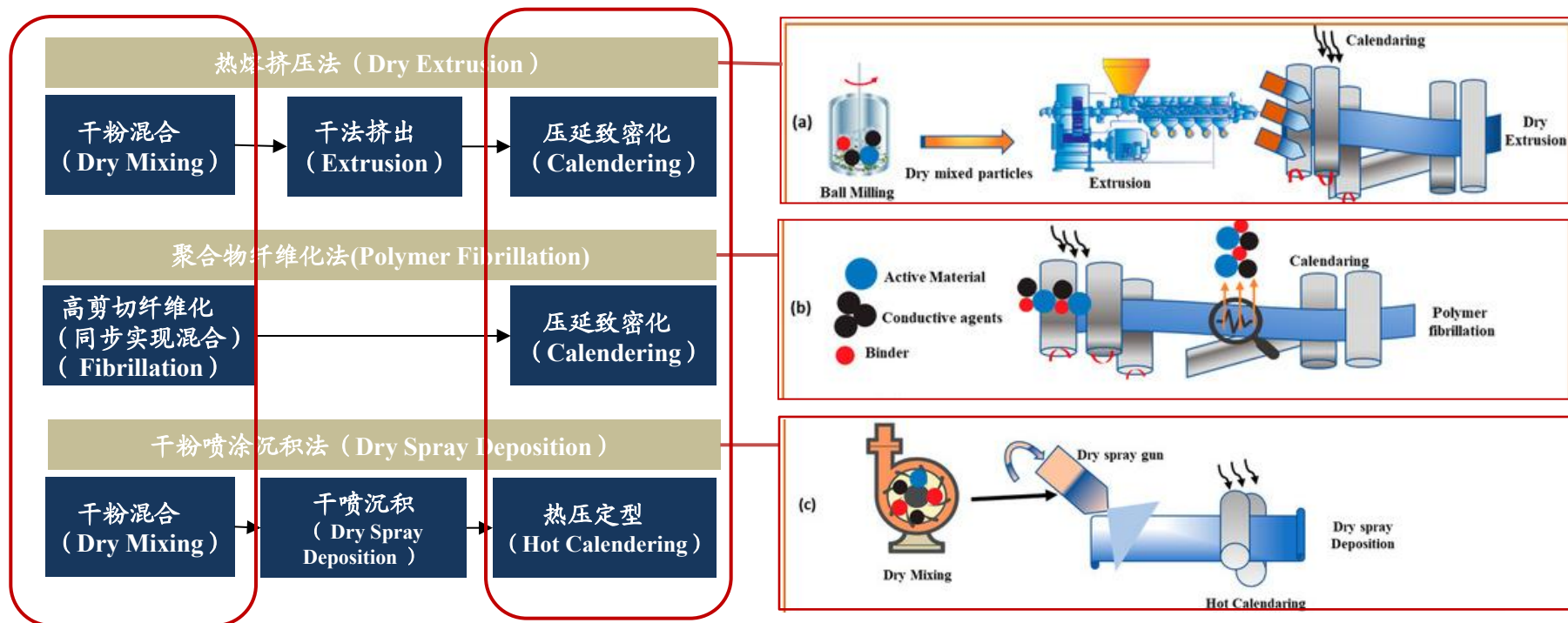
类型	离子导率（S/cm）	工艺环境要求	工艺路径适配性
聚合物 （如PEO）	10^{-5} – 10^{-6}	室温可加工	湿法（溶液法）、干法挤出
氧化物 （如LLZO）	10^{-3} – 10^{-4}	高温烧结、致密控制	湿法流延+烧结、气相沉积
硫化物 （如Li ₆ PS ₅ Cl）	10^{-3} – 10^{-2}	避水避氧、低露点	干法压片、干法挤出（适配性最好）
正极 （高镍层状氧化物等）	—	高温稳定性要求高，与固态电解质界面需处理（如表面包覆）	可适配干法热熔挤出与干法压片（高压+温度）、传统湿法涂布成熟
锂金属负极	—	界面稳定性要求极高，易形成锂枝晶，对压力与温度敏感	可适配干法压片或层压法，与SSE共热压成型较常见
碳/硅复合负极	—	硅膨胀率大（最高约300%），需良好缓冲结构与弹性粘结剂	湿法涂布最成熟；干法可用热熔挤出或干喷涂（需缓冲多孔结构）

数据来源：《Research Progress on Solid-State Electrolytes in Solid-State Batteries》，东吴证券研究所

3.3 主流干法成膜路径普遍包括干混、压延致密化等关键步骤

- 当前干法方案中热熔挤压、干粉喷涂、聚合物纤维化工艺为主流工艺，普遍需要干粉混合、压延致密化的关键步骤。聚合物纤维化工艺（如PTFE高剪切成膜）、热熔挤压工艺（干混颗粒经挤出+压延成型）、干粉喷涂工艺（干粉高速沉积后热压定型）与直接压制尽管工艺原理差异明显，但各路径在工序上存在高度共通性，除却中间环节不同，普遍包括干粉混合和压延致密化的关键步骤。另外两种新兴工艺3D打印与薄膜沉积则不需要干粉物理混料，需进行原料体系的配比优化与成膜前处理；薄膜沉积法无需压延，膜层致密性由沉积工艺决定；3D打印视结构与用途而定，可结合热压提升致密度，但非必须环节。

◆ 图：三种典型干法成膜工艺路径示意图



3.3.1 剪切、滚筒、球磨等干混设备各具优势

- 干混工艺是干法电极制备的起始环节，是后续成膜与压延质量的基础。1) 工序内容：将活性材料、导电剂和粘结剂按比例进行干粉混合，常用设备包括高速剪切混合机、V型/滚筒混合机和球磨机。2) 关键目标：实现混合均匀、颗粒不团聚、粘结剂分布一致、粒径可控，以确保压片后膜层致密、导电性能优良。3) 设备特性：混合设备需具备良好密封性、可调剪切力与混合时间；由于干法体系摩擦大、流动性差，混料系统必须配备更高马达功率、更耐磨的搅拌部件与更精确的转速控制，以保证在高负载下仍能稳定高效运行。
- 不同类型混合设备适用于不同场景：1) 剪切混合机依靠高速旋转部件产生强烈剪切力，类似“切割+搅拌”的动作，可高效打散粘结剂并实现纤维化处理，适合粘结剂含量较高、需纤维网络预处理的干法体系，常用于PTFE等体系中。2) V型或滚筒混合机通过容器自身的旋转实现粉体间的缓慢翻滚、重力混合，搅拌过程温和，适用于热敏性物料、批量干粉的均匀混合，尤其适合不希望破坏颗粒结构的材料体系。3) 球磨机利用研磨球在旋转腔体中撞击、滚动和剪切物料，同时实现混合与颗粒细化，适用于实验室研发或对粒径控制要求较高的制备场景，也可用于表面包覆等复杂工艺。

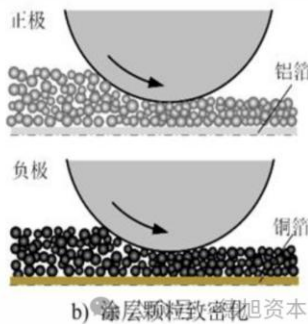
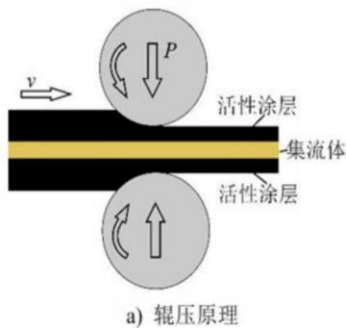
◆ 表：剪切混合机、V型或滚筒混合机、球磨机适用于不同场景

设备类型	优点	缺点	典型适用场景
剪切混合机	混合效率高，粘结剂分散性好，能破团聚、细化颗粒；混合均匀性强	能耗高；可能引入热量；对热敏材料不友好；设备磨损大	高粘结剂含量体系；需快速分散粘结剂、纤维化前处理的电极；研发/中试阶段
V型 / 滚筒混合机	结构简单，剪切力低，适合热敏材料；混合均匀；易清洁换料	混合时间长；对极低粘结剂或细粒径体系均匀性一般；体积大	中等粘结剂比例电极；干混初始阶段；需低剪切保护材料结构的场景
球磨机	可研磨+混合，能细化粒径，适合破团聚、粒径控制需求	能耗高；效率低；易损材料结构；可能引入污染	材料开发/粒径调控阶段；活性材料粉碎+混合；对表面积敏感的电极体系

3.3.2 干法工艺均需辊压机，完成压延致密化

- 辊压机是锂离子电池制造过程中的核心装备，承担着对涂布干燥后的电极极片进行精密压缩的关键任务，干法制备电极大大提升了对于辊压机设备的需求。其核心功能是通过高压力轧制，使活性物质颗粒与导电剂、粘结剂形成致密结合，同时增强涂层与金属箔集流体的结合强度。这一过程直接决定了电极的压实密度（g/cm³）和孔隙结构，进而影响电池的能量密度、功率特性和循环寿命。现代辊压机已成为融合热力学控制、实时反馈及智能调节的精密系统。以主流锂电生产线为例，辊压工序需将极片压缩至设计厚度（通常正极压缩率20-30%），同时保证厚度波动 $\leq \pm 1\mu\text{m}$ ，宽度方向密度偏差 $<0.02\text{g/cm}^3$ 。这一精度要求相当于在百米跑道上控制一片纸的厚度误差。
- 辊压装备的辊数配置直接影响成膜精度与产线节拍。传统路线下，辊压机多数采用单区段6~8辊配置，适配常规湿法正负极极片厚度；而在干法厚极片、高精度路线中（如固态电池或高镍NCM+硅负极等体系），需实现更强力压实、更均匀厚度控制与更高材料通量，推动22辊甚至更高辊数的配置成为趋势。例如，纳科诺尔推出的22辊热辊压系统，可匹配产线120ppm节拍下的正极干法压制工艺，在保证 $\pm 1\mu\text{m}$ 厚度波动的前提下，兼顾卷对卷连续运行与膜层一致性，是厚极片制备环节的重要突破。

◆ 图：辊压过程中的结构机制与颗粒致密化示意图



◆ 表：辊压工艺对固态电池性能的三大影响机制

影响维度	机制说明
降低界面阻抗	固态电池依赖固-固界面进行离子传导，辊压可实现极片与电解质更紧密贴合，减少孔隙和微缝，提高离子输运效率。
提高能量密度	压实过程使单位厚度内可填充更多活性物质，特别适用于无液态介质的固态体系，对厚极片设计尤为关键。
改善一致性	高精度压实可将极片厚度误差控制在微米级，提升电芯一致性，满足固态电池对微观结构稳定性的更高要求。

3.3.2 干法工艺均需辊压机，完成压延致密化

- 辊压机的核心壁垒在于热管理、均匀性控制、轧辊制造、宽幅与高速需求等。
（1）热管理：传统冷压方式已难以满足高镍正极、硅碳负极等新型材料的工艺要求，由此需要引入热辊压技术，但同时热管理面临热量精度控制、热惯性滞后、轴向温度梯度等难题；
（2）均匀性管理：极片辊压的横向厚度一致性是业界公认难题，其根源在于多物理场耦合效应。同时辊面工作温度梯度导致热膨胀量变化，也会影响均匀性；
（3）轧辊制造：为了实现更好的批量稳定性和轧制里程，材料选择、表面处理、精度硬度、加工工艺都有较高的要求。
（4）宽幅与高速需求：为提升产能，电池极片正向更宽幅、更高速方向发展，但这对压机提出更高要求。幅宽增加后，边中压差更难控制；高速运行下振动与响应滞后易影响厚度精度。厂商需在结构设计与控制算法上优化，确保在1.5米幅宽、百米/分钟速度下仍维持微米级厚度公差。目前仅有少数企业具备该类高端压机技术能力。

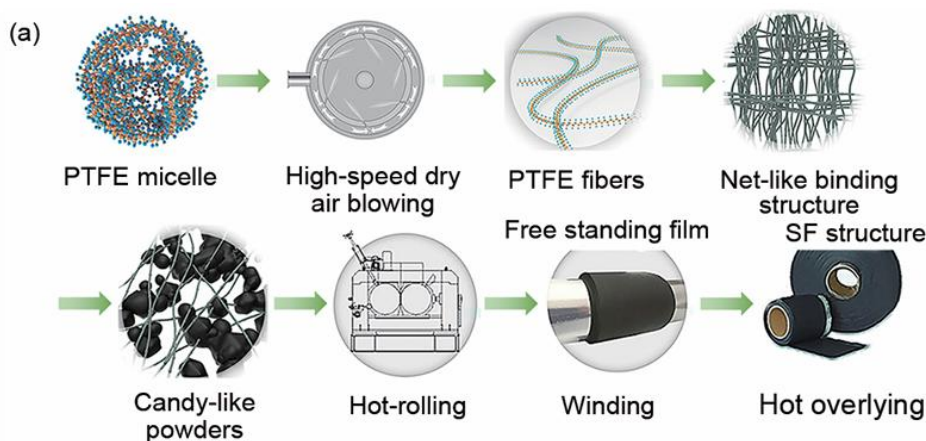
◆ 图：辊压机关键子系统技术壁垒对比

子系统	技术方案	性能上限	主要局限
轧辊结构	整体锻钢轧辊	辊径Φ400mm，硬度HRC67	大尺寸淬火变形难控制
热管理	电磁感应+气体冷却	轴向温差±1℃，响应时间<10s	中心轴组件密封要求高
驱动控制	双伺服电机同步	线速度10m/min，扭矩波动<0.5%	高速下振动抑制难
调形机构	液压弯辊+抽辊系统	弯辊力300t，挠度补偿0.1mm	能耗高，响应慢

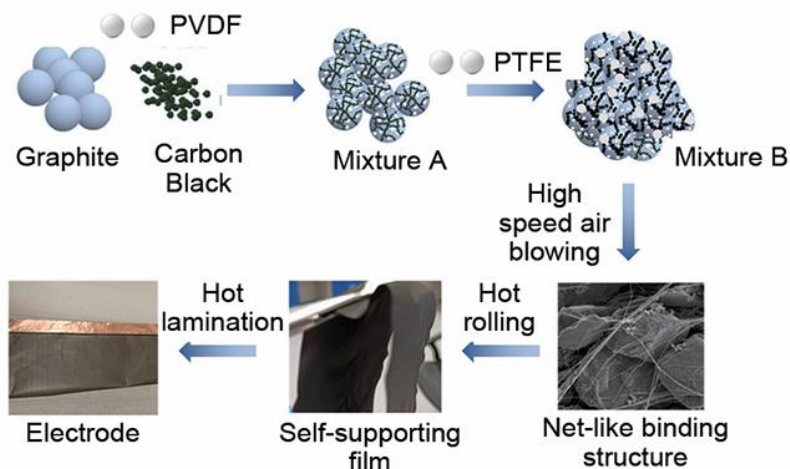
3.4 纤维化：工艺成熟&产线兼容，有望成为量产路线

- 纤维化技术通过高剪切力将PTFE黏结剂拉伸为微纳纤维，形成支撑性三维骨架结构，实现无溶剂条件下电极成膜。该技术最早应用于陶瓷与电子元件制造，后被Maxwell公司成功用于超级电容器干法制备并拓展至锂离子电池，尤其适用于卷对卷连续生产体系。制备流程中，PTFE在高剪切空气流中纤维化，与活性材料、导电剂混合形成棉絮状“自支撑干膜”，再经过热压与热覆工艺完成集流体复合。该路径工艺成熟、设备完善，成膜密度高、无需溶剂、适配性强，已在LFP、NCM等正极材料中实现成功验证，具备产业化基础。
- 目前该技术在负极应用中仍面临黏结剂适配性差与结构稳定性不足等挑战。如PTFE在负极低电位下易还原分解，影响首次效率与循环寿命，尤其在石墨等体积变化较大的材料中表现明显。为此，已有研究尝试引入PVDF等辅助黏结剂协同使用：PTFE提升成膜能力，PVDF（聚偏二氟乙烯，Polyvinylidene Fluoride）则提供更好的界面黏附性与结构稳定性。此外，自支撑膜易断裂也是生产难点，提高PTFE纤维化程度与改善机械强度仍是关键；未来发展方向包括拓展可纤维化黏结剂种类与提升多材料体系适配性。

◆ 图：聚合物纤维化技术用于制备磷酸铁锂电极工艺流程示意图



◆ 图：基于PTFE纤维化处理的干法PVDF石墨电极制备工艺流程示意图



3.4 纤维化：工艺成熟&产线兼容，有望成为量产路线

- 干法工艺取消溶剂体系，更依赖粘结剂的结构支撑与热处理行为，材料适配性成为关键。干法制备中，粘结剂需在无溶剂条件下实现颗粒间连接，同时具备良好的机械强度、热塑性或纤维化能力。不同干法路径对应的粘结剂类型差异较大，影响成膜致密性与电极界面稳定性，尤其在高极化正负极与固态电解质体系中更为关键。
- 不同粘结剂材料特性不一，可根据电极/电解质材料单独或搭配使用。①聚四氟乙烯（PTFE）可在高剪切下形成纤维网络，是干法纤维化主流选材，适配性好但负极稳定性较差；②PVDF具备优良热塑性，适用于喷涂等热辅助成膜工艺，也可与PTFE协同使用提升结构强度；③PEO / PA / PC类复合体系包括聚环氧乙烷（PEO）、聚酰胺（PA）以及聚碳酸酯醚酯+氯化丁腈橡胶（PC/CE+NBR）等，主要用于固态电解质膜或柔性电极结构的干法加工路径。此类材料各具特色：PEO具备离子导通能力，适合复合电解质膜；PA具备较强机械强度，适用于挤出工艺；PC/CE+NBR具有良好柔韧性与缓冲性能，适合结构集成与界面适配场景。

◆表：不同类型粘结剂在干法制片中的稳定性与适配路径

粘结剂	阴极稳定性	阳极稳定性	适用的干法电极技术	使用温度(℃)	粘结剂属性
聚四氟乙烯(PTFE)	不稳定	稳定	聚合物纤维化	25 ~ 80	机械变形
聚偏二氟乙烯(PVDF)	部分稳定	稳定	干粉喷涂沉积	>80	热塑性
聚环氧乙烷（PEO）	部分稳定	电位>4V不稳定	热熔挤压、3D打印	150 ~ 170	热塑性
聚丙烯（PA）	稳定	稳定	热熔挤压	160 ~ 190	热塑性
聚碳酸酯醚酯+氯化丁腈橡胶 （（PC/CE+NBR）	不稳定	稳定	直接压制	40 ~ 90	热塑性

数据来源：《干法电极技术在超级电容器和锂离子电池中的研究进展》（徐桂培等），东吴证券研究所

3.4 纤维化：依赖高剪切设备实现干法成膜

- 纤维化设备需提供足够剪切力，使PTFE黏结剂在无溶剂条件下形成连续纤维网络，支撑电极结构稳定成膜。目前常用设备包括气流粉碎机、双螺杆挤出机、辊磨机及犁刀搅拌机等。部分设备可实现混合与纤维化一体化处理，在一步工艺内完成物料分散与PTFE网络构建，提升工艺稳定性与量产效率；也有设备将混合与纤维化分步完成，适用于实验室验证或对剪切能量/温控要求较高的材料体系。
- 不同设备在剪切强度、温控能力、混合均匀性与适配材料方面各有差异，选型需结合目标电极材料特征与工艺节拍需求。
①气流粉碎机具备高速冲击与强剪切能力，能形成较优的纤维状网状结构，适用于低粘结剂用量、干粉处理场景；但设备能耗高，对热敏材料存在风险，粒径控制也较困难。
②螺杆挤出机适用于厚极片与高负载体系，具备良好的工艺参数控制能力（温度、剪切、转速等），适合规模化连续生产，但对材料热塑性要求高，初期投资较大。
③辊磨类设备结构简单、成本较低，适用于中等纤维化要求场景，但剪切能力有限，纤维结构均匀性相对较差，难以适配高强度一体化连续产线。

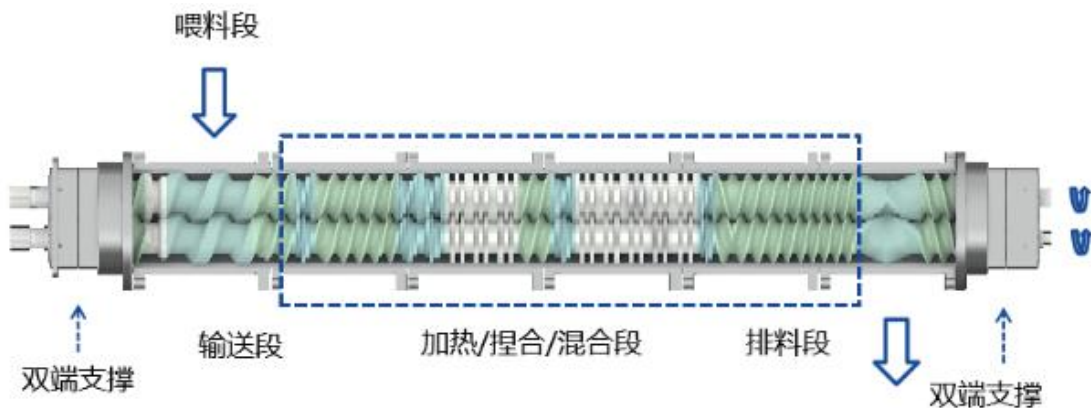
◆表：气流粉碎机、螺杆挤出机、辊磨机等纤维化设备优劣比较

设备类型	原理	优点/关键性能	缺点/使用限制
气流粉碎机	利用高速气流驱动颗粒间相互碰撞，实现高速剪切和分散	剪切力强，能做出细纤维网状结构；适合低黏结剂用量；快速处理干粉体系	能耗高；对热敏性材料有风险；设备磨损大；对粒径分布控制严格
螺杆挤出机	依靠旋转螺杆持续挤压和剪切物料，实现连续混合与纤维化	流程连续性好；控制参数（温度、转速、螺杆型式）多；适合厚极片与高负载场景	对非热塑性材料支持弱；混合-熔融环境可能损伤活性材料；初期设备和模具投入较高；流程复杂
辊磨机 / 辊式混合研磨	通过两个或多个辊轮压紧碾压物料，产生机械剪切和压实作用	结构简单；成本较低；对材料热稳定性要求低；适用于中等纤维化要求场景	剪切力度可能不够；纤维结构形成不如气流或挤出那样均匀；磨损与清洁问题；效率低于集成型设备

3.4 纤维化：依赖高剪切设备实现干法成膜

- 双螺杆挤出系统或是干法电极混合与纤维化的终局方案，其陶瓷螺杆&开腔特征能够满足高强度量产。为确保PTFE在干法过程中稳定纤维化，设备需在螺杆材质、结构与控制系统方面满足更高要求。① 陶瓷螺杆可避免金属颗粒污染，适配高洁净电极体系。传统金属螺杆在高剪切环境下易磨损引入异物，陶瓷螺杆具备更高耐磨性与化学稳定性，可应用于锂金属、硫化物等敏感体系，设备寿命可达18000小时以上。② 开腔与分段结构提升设备运维效率。干法工艺中粉体粘性大，堵料风险高，具备“一键开腔”与模组化结构的新一代设备能显著提升清洗效率与维护便利性，满足中试到量产需求。③ 精控温度与剪切力是形成稳定纤维网络的前提。PTFE在约19° C的窗口温区内剪切效果最佳，各段螺杆温度与转速需独立调控，确保不同材料体系下成膜一致性与纤维结构重现性。

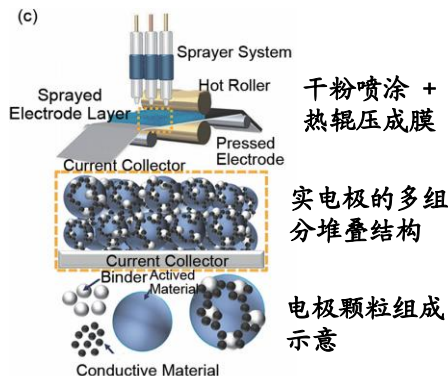
◆ 图：双螺杆挤出设备采用陶瓷螺杆避免金属颗粒污染，且当前主流设备均具备开腔功能，同时兼具量产性&出料良率



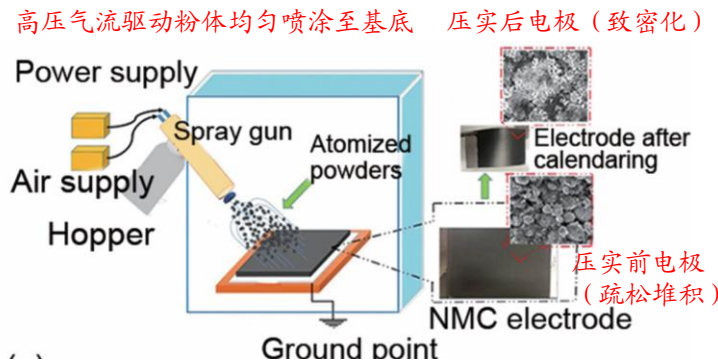
3.5 干粉喷涂：可降低黏结剂用量，但产能小为瓶颈

- 干粉喷涂沉积是一种基于静电辅助喷涂的干法电极制备工艺，具备低耗材、高一致性等优势。干粉喷涂沉积是一种基于静电辅助喷涂的干法电极制备工艺，具备低耗材、高一致性与结构优势。其核心在于将活性材料、导电剂与少量黏结剂（如PVDF）预混后，通过静电喷枪使粉末带电，均匀沉积至接地集流体表面，随后通过热压实现成膜。
- 干法喷涂电极具备高能量密度&支持卷对卷生产。①干法喷涂黏结剂用量可降低至1%以内，显著提升了单位体积内活性材料比例，有利于提升体积能量密度与界面电子/离子通道效率/能量密度。②该工艺支持卷对卷连续生产，电极厚度与密度可通过热压参数精控，形成致密均匀结构，电化学性能优异。当前该技术也被广泛用于在正极表面喷涂固态电解质膜层，具有良好贴合性与厚度控制能力，是干法工艺中兼容正极-电解质协同结构重要方案之一。
- 目前干粉喷涂沉积仍处于实验室阶段，产能较小是制约产业化的关键问题。沉积质量受喷枪电压（建议25 kV）、载气压力（25 psi）与喷嘴-基底间距共同影响；不同分子量PVDF对结构致密性、导电性与剥离强度均有显著影响，需根据材料体系精准选型。该技术适用于高比表面积结构电极或功能层复合设计，在固态电池中特定应用场景（如保护层、界面层）具备一定潜力。但要实现产业化，仍需解决设备标准化、成膜一致性与单位产线产出能力不足等关键问题。

◆ 图：干粉喷涂结合热压成膜结构清晰，颗粒分布均匀黏结剂用量显著降低



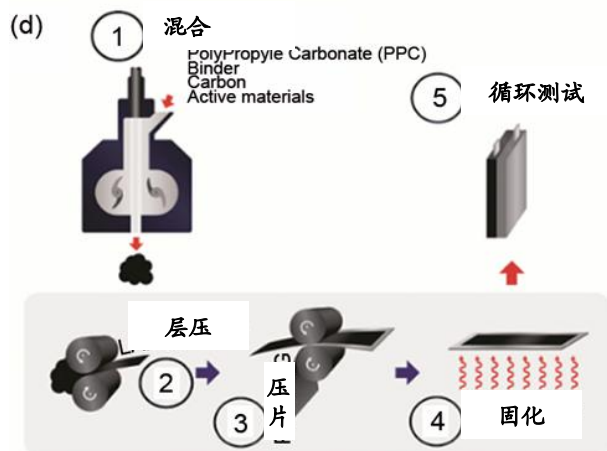
◆ 图：静电喷涂+热压制得均匀厚度NMC电极，工艺简单性能稳定



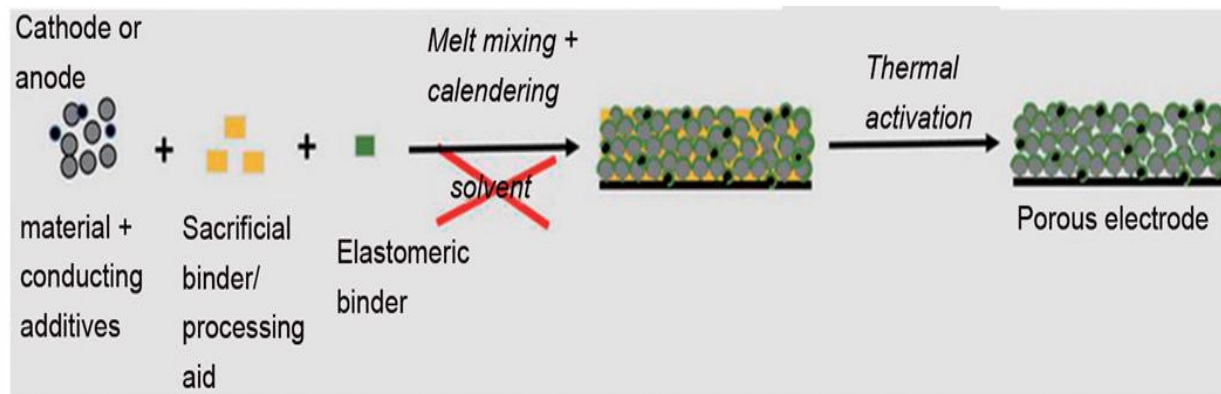
3.6 热熔挤出：适用于厚电极制备，但工艺复杂、成本高

- 热熔挤出是一种通过聚合物加热熔融后连续成膜的干法制备方法，适用于厚电极设计。该技术通过双螺杆挤出设备将活性材料、导电剂、黏结剂等原料混合并加热至熔融状态，然后经模具连续挤出形成电极片，后续经过热处理、脱黏与烧结形成多孔结构。该工艺能够显著提升活性材料与导电碳之间的界面结合力，具备良好的厚度控制与孔隙调控能力，适用于高负载 ($>10 \text{ mg/cm}^2$)、高面容量 ($>10 \text{ mAh/cm}^2$) 的极片制备场景。
- 热熔挤出技术尚面临聚合物黏结剂比例高、后处理复杂等产业化障碍。①为实现可挤出性与结构稳定性，现有方案需加入较多黏结剂及牺牲组分，导致活性物质含量下降、电极能量密度降低。②配套的脱黏、烧结等高温处理工序较复杂，流程能耗较高。③不同材料体系对螺杆结构、温度控制、挤出压力等条件适配性差异较大，标准化难度较高。相比动力电池，储能电池对单位面积负载量更高，对能量密度敏感度相对较低，热熔挤出在成膜效率与厚电极控制方面的优势有望进一步释放，具备较强的工艺迁移潜力。

◆ 图：热熔挤压将材料加热融化后进行辊压



◆ 图：热熔挤压技术粘结剂用量较高，导致活性物质含量下降，影响电极能量密度



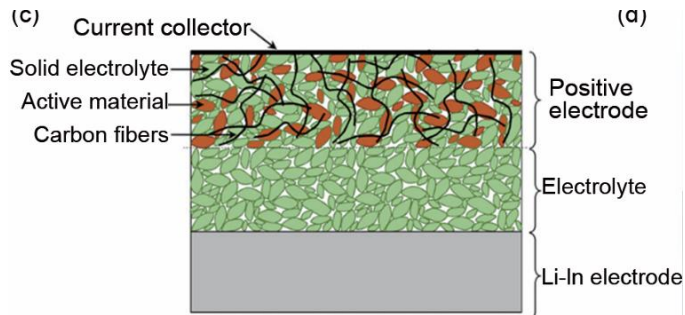
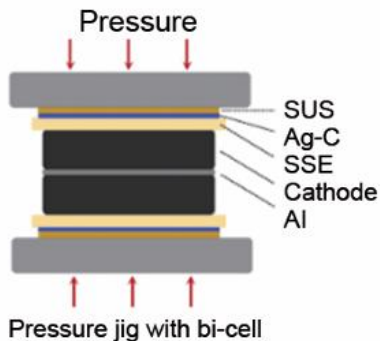
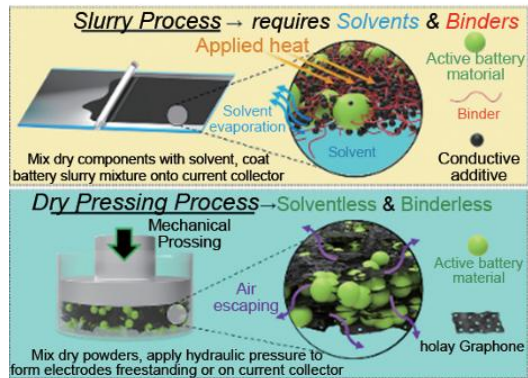
3.7 直接压制：工艺简单、无溶剂无黏结剂，但成膜均匀性与适配性仍待优化

- 直接压制技术是将活性材料与导电剂充分混合后直接进行机械压制形成电极片的工艺，无需溶剂与黏结剂，流程简洁、能耗低。可分为冷压与热压两类：冷压操作简便、适合快速成型，热压有助于提升压实密度与界面粘结性。该技术常与多孔碳、石墨烯等具压缩性结构结合，赋予电极成膜能力。研究表明，部分无黏结剂冷压电极可实现与湿法电极相当的比容量（160 mAh/g），为简化工艺与环保制备提供新路径。
- 直接压制存在模具压制密度不均、膜层应力不均等问题，尚需进一步工艺优化。尤其在厚电极或异形结构应用中，单次模压难以实现高一致性，且不同材料体系对成膜压力窗口要求不一，限制其通用性。目前多用于实验室研发、材料筛选、固态电池电极快速验证等场景。配合柔性集流体、自支撑结构或可压缩导电基底（如多孔石墨烯）将是提升适配性的重要方向。

◆ 图：冷压工艺实现无溶剂/无黏结剂电极成膜，适配多孔石墨烯构建三维结构

◆ 图：热压制备硫化物固态电解质电极，构建高能量密度软包全固态电池

◆ 图：冷压成型验证不同导电添加剂在多种正极材料中的循环稳定性表现



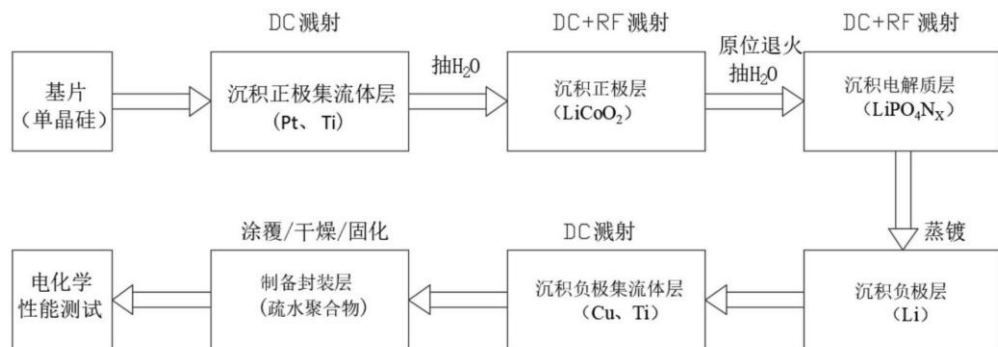
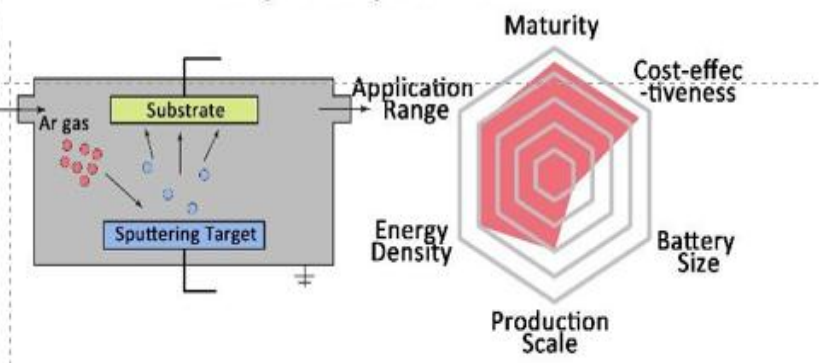
3.8 气相沉积：薄膜电池潜力巨大，将用到薄膜沉积设备

- 气相沉积法在固态电池领域展现出巨大潜力，在能量密度、性价比等关键指标处于领先状态。该技术通过在真空环境下利用物理或化学方法沉积薄膜，能够实现纳米级的膜层控制，满足高性能电池对薄膜均匀性、致密性和附着力的严格要求。目前，在实验室环境中，气象沉积法已成功制备出高性能的固态电池薄膜，为电池性能的提升奠定了坚实基础。
- 我们认为气相沉积法薄膜固态电池将率先应用于消费电子级小电池，做出“大电池”仍待技术突破。（1）核心难点在于腔体尺寸的限制，目前该技术仅能用于小型消费电子级电池的生产。但考虑到面板行业已成功应用的大腔体 XVD 技术，后续相关大型化技术有望应用于全固态电池制造。（2）高精度沉积设备的需求导致初始 CAPEX 大幅攀升，这在一定程度上限制了其在大规模生产中的广泛应用。

◆ 图：气相沉积薄膜电池在能量密度、应用场
景广度、性价比等关键指标都处于领先状态

◆ 图：薄膜固态电池工艺流程，依次完成正极集流体层、正极层、电解质层、负极层和负极集流体层的沉积工艺

Vapor Deposition



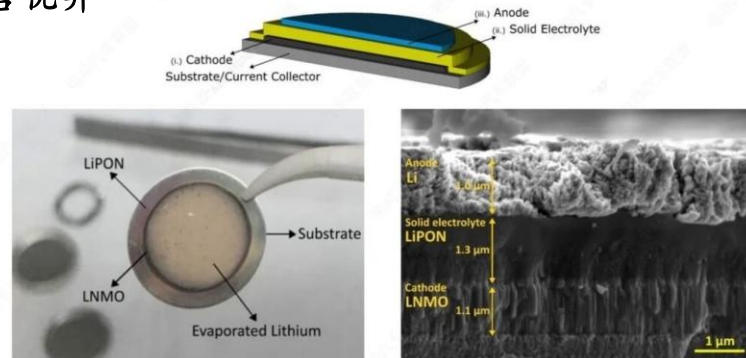
3.8 气相沉积：薄膜电池潜力巨大，将用到薄膜沉积设备

- **案例：ULVAC以真空溅射方式完成多功能层沉积，构建出高度集成的LIPON全固态电池结构。**该工艺源于ULVAC基于射频磁控溅射的多腔沉积系统，正极（如 LiCoO_2 ）、电解质（LIPON）、负极（金属锂）、保护层等功能膜层依次沉积在集流体基底上，并通过掩膜实现图案化控制。工艺包括七层膜的沉积与晶化处理，整体结构覆盖从基底集流体到正极、电解质、负极及外部保护膜的全流程，具备完整器件层级结构，适配微电池制备平台
- **沉积后的多层膜具备极高致密性与界面贴合度，有效提升电化学性能与封装稳定性。**真空沉积过程不使用溶剂，避免传统湿法可能导致的孔隙缺陷与界面反应问题，适合对结构一致性与厚度精度要求极高的氧化物体系；其膜层厚度可控制在 $1\ \mu\text{m}$ 级别，界面过渡自然，离子通道连续性更优。沉积后薄膜无需压实处理，直接具备成膜致密、阻抗低、贴合好等特点，特别适合用于微型全固态电池、MEMS器件等场景。此外，聚合物/无机混合保护层可一体沉积，提升电池循环寿命与整体封装性。

◆ 图：ULVAC多层沉积结构流程图



◆ 图：SEM截面图显示 LIPON ($\sim 1.3\ \mu\text{m}$)、LNMO 正极 ($\sim 1.1\ \mu\text{m}$)、金属锂 ($\sim 1\ \mu\text{m}$) 多层结构清晰、界面贴合优异



3.8 气相沉积：薄膜电池潜力巨大，将用到薄膜沉积设备

- 当前薄膜全固态电池的沉积法制备路径主要分为物理气相沉积、化学气相沉积与分子层沉积三类，不同技术在沉积速率、成膜均匀性与附着力上存在显著差异。如磁控溅射、真空蒸发等物理气相技术可快速成膜，适配工艺窗口宽，但成膜偏析与厚度一致性不足；化学气相沉积类（如等离子增强CVD）则具备低温沉积、膜质优良与良好附着力等优势，更适用于高致密电解质层制备；分子层沉积虽速率慢，但因其极高的成膜均匀性与厚度控制精度，适合用于功能性薄膜或3D微结构电池中的关键界面构建。

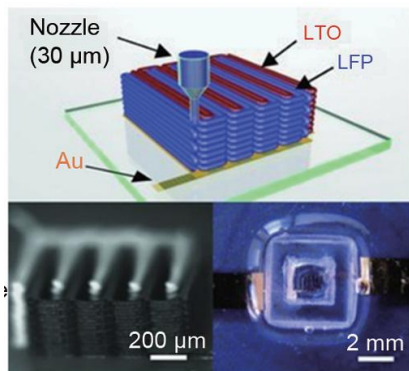
◆ 图：固态电池典型沉积制备工艺比较

分类	沉积技术	特点	应用
物理气相沉积	磁控溅射	沉积速率快，靶损失大，成分偏析大	正极、电解质、负极
	分子层沉积	温度低、成分偏析小、成膜均一性差	正极、电解质、负极
	真空蒸发	工艺简单、沉积速度快、附着力差、重现性差	正极、电解质、负极
化学气相沉积	离子束溅射	成膜质量好，附着力差、速度慢	电解质
	等离子增强化学气相沉积	温度低、成膜质量好、附着力好	正极
	激光化学气相沉积	沉积速度快、附着力好	正极
	低压化学气相沉积	成膜均一性好	电解质、负极
	金属-有机化学气相沉积	温度低、膜质差	电解质
分子层沉积	原子层沉积	成膜均一性好、膜质好，适用于3D结构或微电池	正极、电解质、负极

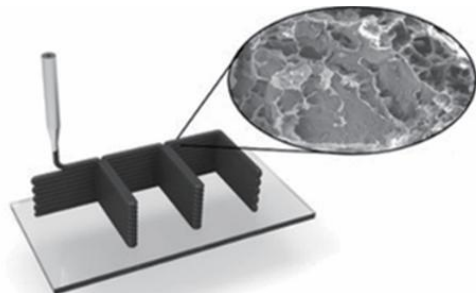
3.9 3D打印具备高结构自由度与集成能力，但仍局限于验证与小型器件应用

- 3D 打印是一种兼具结构可控性与工艺灵活性的电极制备新路径，具备高度空间自由度和三维设计能力。通过预先编程路径，将调配好的油墨直接沉积在基底上，经干燥/固化处理形成电极结构，可实现电极的按需成型、厚度控制与结构设计一体化。打印油墨中通常包含活性材料、导电剂、聚合物黏结剂及功能性添加剂，通过控制油墨黏度、挥发性和固化速率，确保成膜质量与结构稳定性。热退火处理可进一步提升导电性，并形成多孔结构，有利于电化学性能提升。3D 打印技术可用于构建交叉指状微电池架构，实现正极、负极与固态电解质的全组件打印。
- 当前3D打印尚难用于大规模干法电极生产，主要限制在油墨制备、沉积速率与导电性控制。（1）打印油墨需在黏度、粒径、稳定性等多维参数中取得平衡，复杂配方对活性材料适配性要求高；（2）沉积效率和成膜均匀性限制其高速生产，无法满足大电池量产。（3）结构致密性、电导率与界面粘结性仍依赖后处理（如热退火、光固化）优化。因此，3D 打印目前更适合应用于微电池、柔性器件、小型储能单元，或在实验室阶段用于厚电极、结构电极或全组件原型设计与验证。（4）在固态电解质制备中，3D 打印可提升与电极的贴合度、降低孔隙率，有助于减少后续压实处理时间。

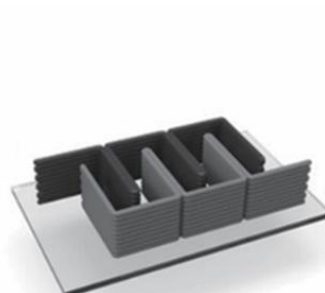
◆ 图：3D打印构建交叉指状微结构电池架构



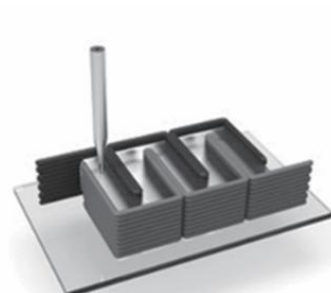
◆ 图：3D打印实现电极与固态电解质全组件打印，兼顾厚度控制与多层堆叠结构设计



3D打印负极



3D打印正极



3D打印固态电解质

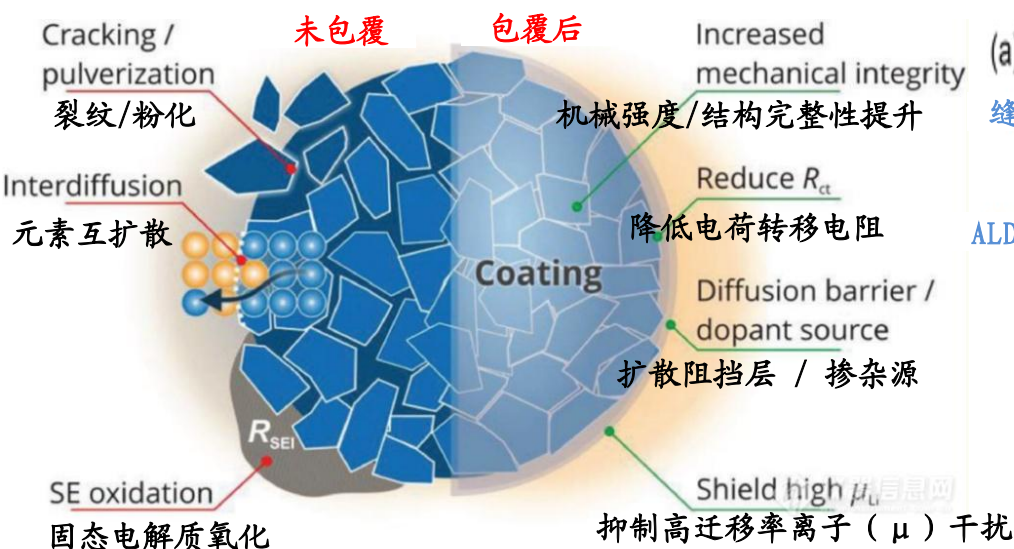


- 1 制备电极片&电解质膜为关键，直接决定电池的性能&量产效果
- 2 成膜工艺可分为干法、湿法，干法为高性能固态电池终局
- 3 干法成膜路径多种多样，看好纤维化为未来量产路线
- 4 固态电池出于特殊需求，新增预包覆、印胶等工艺
- 5 相关公司
- 6 投资建议
- 7 风险提示

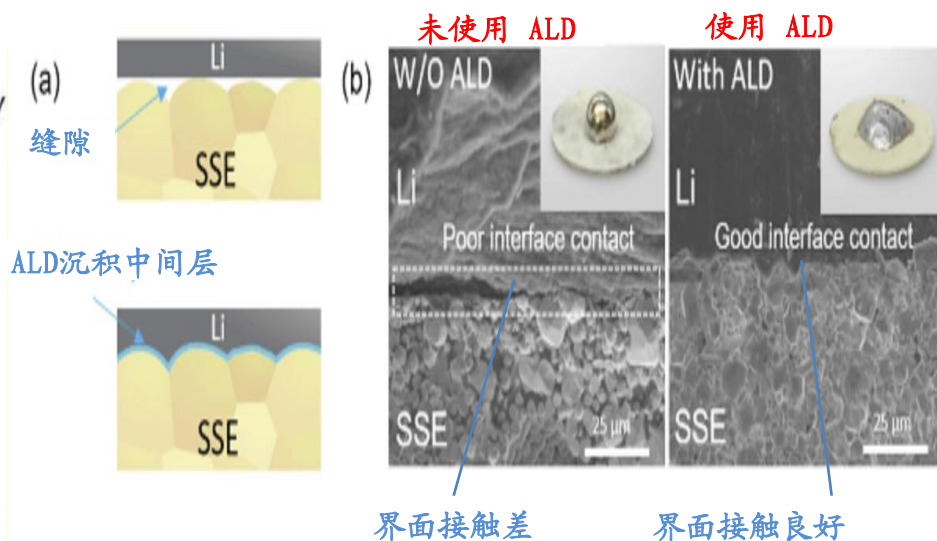
4.1 材料预覆膜：利用ALD覆膜可解决固态电池材料的多重痛点

- 硫化物全固态电池量产仍受固-固界面、电解质膜机械强度不足、硫化物毒性等问题影响。①固-固界面：固-固界面接触为核心瓶颈，低界面接触导致电池能量密度、性能下降，且会发生化学副反应生成高阻抗界面消耗活性锂离子，从而影响循环寿命、倍率性能及电池可靠性。②机械强度：硫化物电解质膜杨氏模量 $<2\text{ GPa}$ ，连续辊压会出现开裂、断带等问题。③安全问题：硫化物遇水即生成剧毒 H_2S ，需设置产线露点到 $<-40^\circ\text{C}$ 环境，生产成本显著提高。
- 材料覆膜是固态电池正极、负极及电解质粉体在前道制备环节中的关键稳定化工艺。其主要作用是提升材料结构强度、抑制界面副反应、优化成膜质量，并改善后续压制和循环过程中的界面稳定性。覆膜方式多样，其中ALD（原子层沉积）是典型代表，可实现高度均匀、可控的表面包覆：①构筑致密物理屏障，阻断正极与电解质之间的副反应，抑制元素互扩散，避免高阻界面相生成；②改善固-固界面接触，提供连续离子通道，保障锂离子高效迁移；③具备良好力学适配性，有助于连续、快速卷对卷工艺的稳定性运行。

◆图：缓冲层能够提升材料机械强度、抑制元素扩散并发生副反应，进而降低固-固界面电阻



◆图：ALD缓冲层显著优化电池界面接触，减少孔隙率



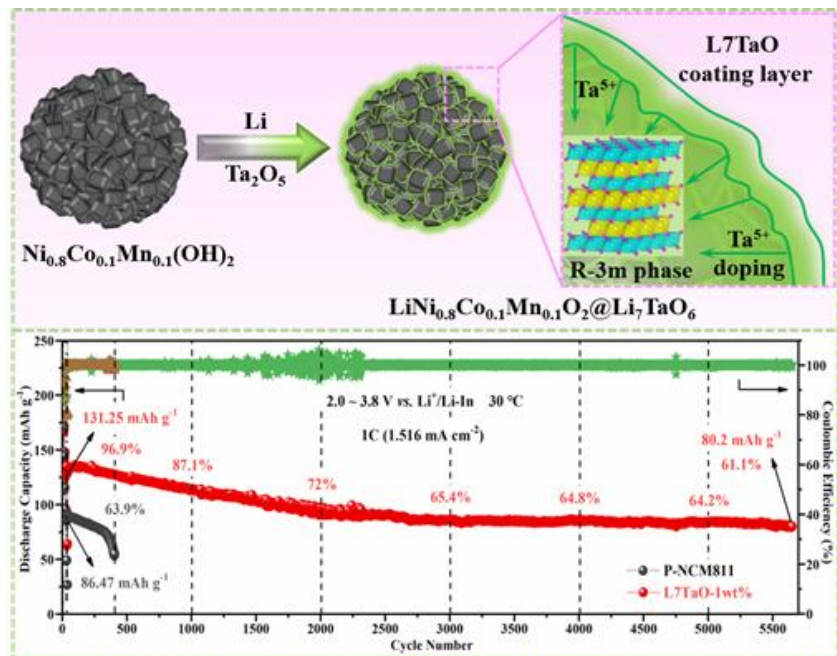
4.1 材料预覆膜：利用ALD覆膜可解决固态电池材料的多重痛点

- 正负极界面缓冲层包覆可系统性提升电池性能与循环稳定性。（1）正极：三元NCM811表面构建2nmLi₃PO₄超薄层，界面阻抗由>1000Ω·cm²骤降至50Ω·cm²，1C循环1000次容量保持率>80%，首次库伦效率提升至85.4%，显著抑制极化及电解质副反应。（2）负极：锂金属表面沉积Al₂O₃纳米层，可均匀化锂离子通量、延缓枝晶成核，界面稳定性提升>3倍。（3）硫化物电解质：颗粒级LiNbO₃包覆兼具空气与界面双重保护，阻断H₂O侵蚀并抑制H₂S生成，界面阻抗降至传统体系1/3，为硫化物全固态电池规模化落地提供关键材料支撑。
- 此外，我们认为若LiNbO₃包覆层可彻底隔绝水汽、阻断H₂S生成，硫化物电解质有望摆脱真空与防毒环境依赖，能够适配湿法产线，且不需要额外环境处理&防毒设备投入，显著降低电池厂CAPEX。

◆图：包覆氧化铌的三元正极多维度性能均有提升

性能指标	三元 NCM811	包覆氧化铌Li ₇ TaO ₆ 的NCM811
首次放电容量	~180 mAh/g	203.2 mAh/g
首次效率	~80%	85.4%
循环寿命（1C）	快速衰减	5650 圈后容量保持 61.1%（每圈衰减仅 0.0069%）
界面阻抗	高（>1000 Ω·cm ² ）	显著降低（~50 Ω·cm ² ）
极化现象	严重	明显减轻
电解质分解	明显（SO ₄ ²⁻ 、PO ₄ ³⁻ 等副产物）	显著抑制

◆图：包覆氧化铌的三元固态材料可以显著提升电池循环寿命



4.1 材料预覆膜：薄膜包覆&沉积可采用多种工艺，ALD性能最佳

东吴证券
SOOCHOW SECURITIES

- 固态电池界面包覆主流路线涵盖 ALD、CVD、PVD 与凝胶工艺，其中 ALD 综合性能最优。传统溶胶-凝胶及 CVD 方案虽可部分缓解界面副反应，但受限于涂层均匀性差、厚度不可控、对多孔/曲面结构保形能力不足，难以满足量产需求。
- ALD 方案优势显著：（1）逐层自限生长，厚度可精准调控至亚纳米级，契合固态电池超薄界面需求；（2）保形性优异，即便面对高比表面积多孔电极或纳米粉体，仍可实现100%均匀覆盖；（3）材料体系多元，可沉积氧化物、氮化物、硫化物乃至有机-无机杂化层，覆盖全电池体系；（4）界面功能一体化，同步阻隔副反应并构筑高速离子通道，助力固态电池循环寿命与能量密度双提升。

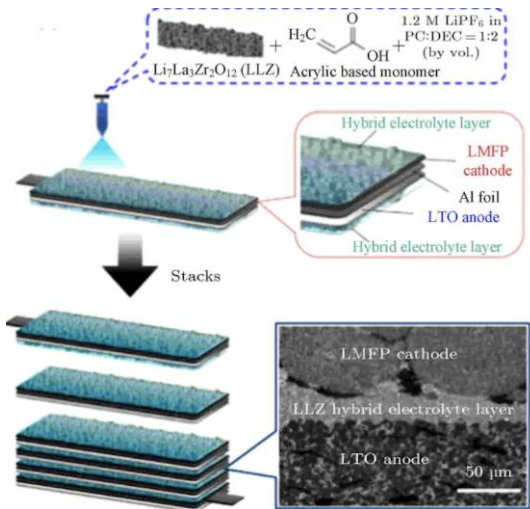
◆图：材料包覆主要可以通过ALD、CVD、PVD、和凝胶等工艺来完成，其中ALD优势颇多

方法	精度	优点	缺点
ALD 	0.1nm	-保形性 -均匀涂层 -精确和可调节的沉积厚度 -高薄膜密度 -低温和应力 -附着力强	-前驱体和设备昂贵 -速度慢
CVD 	>1nm	-前驱体选择性多 -沉积速率好 -再现性简单	-前驱体反应性低 -不适用于聚合物和非常薄的薄膜 -需要较高的衬底温度
PVD 	100nm	-比 CVD 更安全（无有毒材料） -低温薄涂层 -低成本（部分提及） -相对快速的工艺	-不均匀沉积 -需要退火 -无化学计量控制 -低沉积速率 -压缩应力
Sol-gel 	1000μm	-高粘合强度 -低成本 -易于执行 -无需导电基板 -低温工艺	-不均匀沉积 -不可调节 -部分晶相需要高温后退火

4.2 印胶：为防止极片发生偏移导致短路，新增印胶设备需求

- 全固态电池采用叠片、等静压等工艺来集成正负极片，但在这些工艺过程中，极片容易发生偏移或倾斜，进而引发短路问题。在全固态电池制造中，通常采用叠片工艺将正极、固体电解质和负极层叠集成，随后通过等静压工艺确保界面紧密接触。但这一过程中，极片边缘容易因压力过大发生塌陷、错位或变形，导致正负极直接接触而短路，影响电池安全和良率。同时，全固态电池为了保证界面接触，通常需要施加大压力，这也会增加极片边缘变形导致内短路的风险。
- 全固态电池的正极、负极及电解质均为干态固体材料，普遍具备高脆性、低延展性、易碎裂等特征。固态电池的正极材料（如 NCM、LFP 等）多为高密度烧结结构，断裂韧性约 $0.8\text{--}1.0\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ；负极材料（如硅碳复合、锂金属等）延展性更差，韧性仅约 $0.15\text{--}0.4\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ；氧化物与硫化物类固态电解质多为陶瓷结构，断裂韧性通常不足 $1.0\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ （E.g. 氧化物约为 $0.5\text{--}1.0\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 、硫化物约 $0.2\text{--}0.3\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ），仅为液态体系隔膜或复合极片的十分之一，干态脆性材料在叠片与压合过程中极易破裂，导致离子通道中断、枝晶生长及良率下降。

◆ 图：固态电池中正极、负极与电解质直接接触，缺乏液态体系中的隔膜与缓冲层



◆ 图：主流电解质材料断裂韧性均小于2MPa

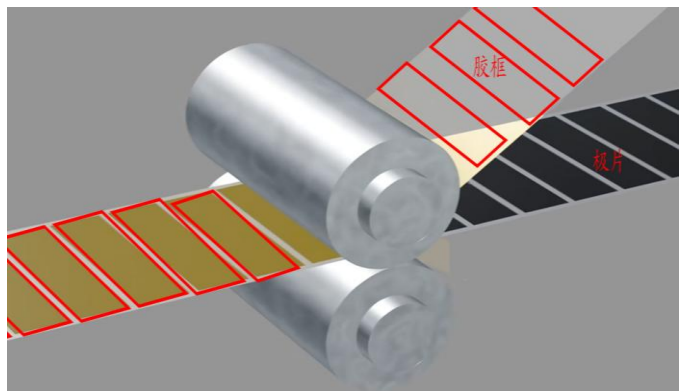
材料类型	代表材料	断裂韧性 ($\text{MPa m}^{(1/2)}$)
氧化物	LLZO (锂镧锆氧)	<2
硫化物	$\text{Li}_2\text{S-P}_2\text{S}_5$ (玻璃态)	0.23 ± 0.04
卤化物	Li_3YCl_6 等	≈ 0.2
正极	$\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{0.3}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$	0.3

数据来源：《石榴石型固态锂电池中的物理问题》（郭向欣等），东吴证券研究所

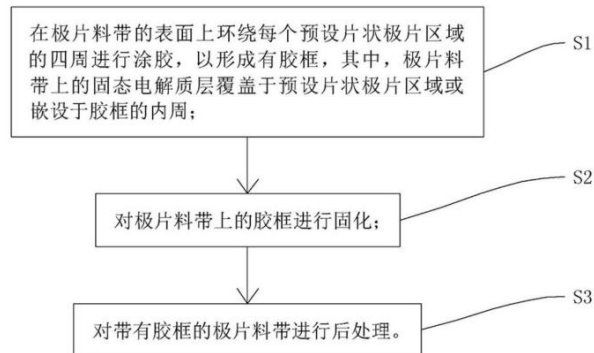
4.2 印胶：为防止极片发生偏移导致短路，新增印胶设备需求

- 为解决极片变形或倾斜导致短路，极片印胶工艺成为刚需。目前主要有三种工艺：
- （1）**胶框复合**：现在PET载体上制备胶框，随后与极片进行卷对卷复合。复合胶框通常由硬质层与弹性层构成，其中弹性层位于硬质层与集流体之间，可在提供稳定机械支撑的同时，缓冲应力并保持界面贴合。复合材料通常具有良好的机械性能和绝缘特性，能够为极片提供稳定的支撑，同时隔绝正负极，避免短路。该工艺具备良率高、效率快的优势，但对设备精度和工艺控制要求严苛。
- （2）**开槽印胶**：通过激光器在极片上开槽，后将胶水填充至槽内并完成UV固化，从而实现对极片边缘的密封与保护，防止正负极短路。具体步骤为：①**激光制痕**：使用超快激光器（皮秒级）在极片边缘精确刻蚀15-20 μm 微槽或痕道，为UV胶注入提供精准路径；②**注入绝缘胶**：将UV胶（紫外光固化绝缘胶）喷涂或填充到激光沟槽中，围绕极片形成封闭的胶框结构；③**紫外固化**：UV灯照射快速固化胶水，确保胶框稳定成型；固化后的胶框附着在极片边缘，提供支撑并耐受后续高压压合。该工艺成品最优，但目前节拍相对较慢。
- （3）**3D打印**：利用3D打印设备将具有绝缘、阻隔水分特性的框胶材料精准打印在电极极片周围或电解质表面，形成回形框，防止正负极直接接触造成内短路。该技术可实现微米级别的精准制造控制，能够根据电芯的形状和尺寸快速定制胶框，但受限于3D打印效率，仅适配于小型电池极片。

◆ 图：胶框复合效率更高，但对设备要求也更高

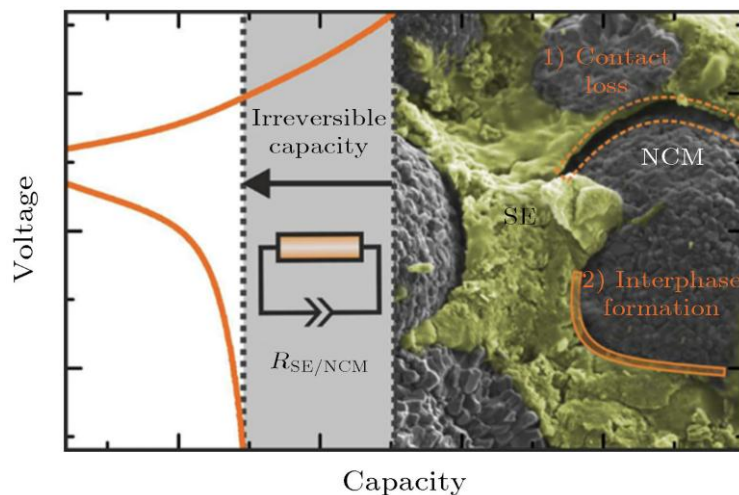
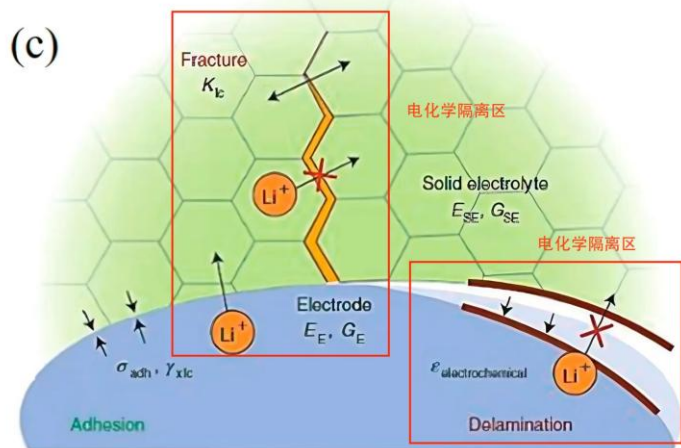


◆ 图：开槽印胶工艺涉及开槽、印胶&UV固化



4.3 补锂：受新增工艺及电池结构差异影响，补锂技术成为刚需

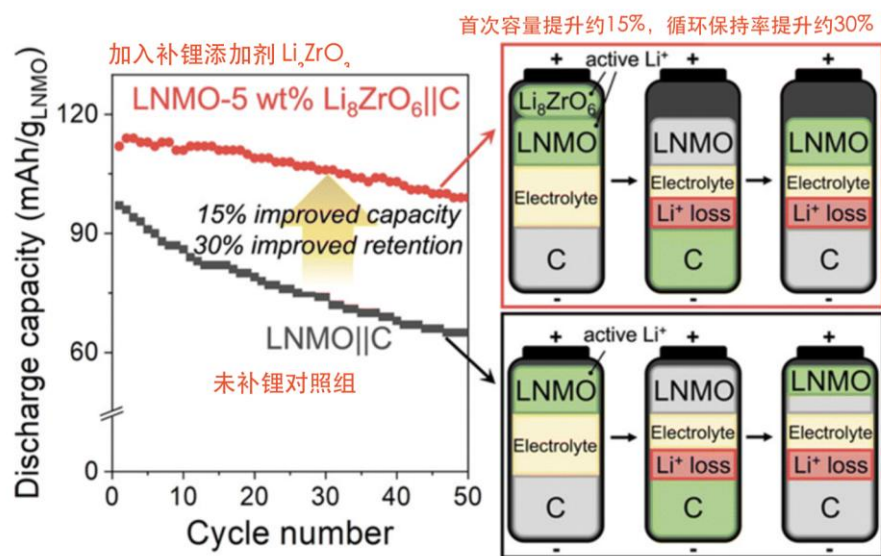
- ◆ 固态电池相比液态电池的活性锂流失量显著增大，主要系：
 - ◆ (1) 固-固界面的孔隙率会导致活性锂粉化，导致锂离子永久失效。无溶剂混料使正极、电解质颗粒处于“硬-硬”点接触状态；在约 600 MPa 等静压作用下，脆性的固态电解质及活性颗粒易产生微裂纹。随着裂纹的扩展，电极活性物质逐渐粉化，固态电解质也易发生断裂。裂纹及粉化区域形成局部电化学隔离区，其中残留的锂无法重新参与嵌脱反应，逐步转化为“死锂”，长期累积后显著降低活性材料利用率与可逆容量。
 - ◆ (2) 固态电池缺乏电解液浸润的自修复能力，导致首圈成膜和循环过程中大量锂损失。因无法通过电解液修复裂纹，固态电池的负极表面必须在点接触面积上形成一层形成更厚的SEI保护膜（约为液态体系的 2-3 倍），导致首圈约 5-10% 的活性锂被消耗用于成膜，使电池的不可逆容量损失超过10%。进入循环后，固态电解质无法缓冲负极的体积膨胀，导致每次充放电都在极片内产生水平裂纹→活性颗粒电隔离→新鲜表面暴露→SEI再生长，形成持续耗锂的“死循环”。同时，微裂纹和晶界成为锂金属蠕变的低阻通道，最终形成锂枝晶，引发电池短路。
- ◆ 图：裂纹与界面剥离使锂离子传输路径被切断，形成局部电化学隔离区，活性锂无法重新参与反应
- ◆ 图：全固态电池首圈形成较厚无机 SEI 膜（绿色区域），导致大量活性锂被消耗



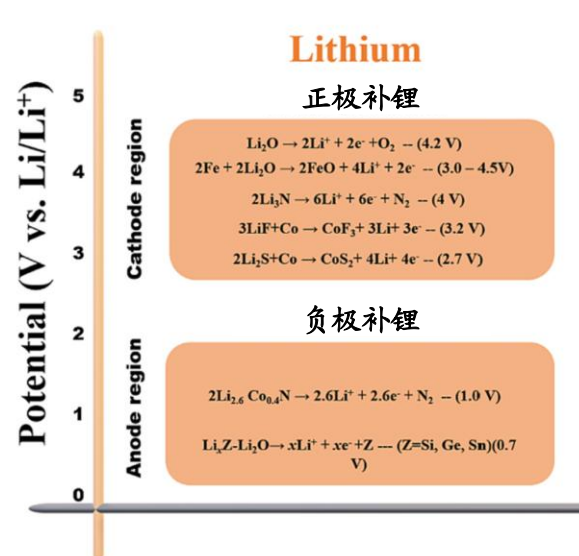
4.3 补锂：受新增工艺及电池结构差异影响，补锂技术成为刚需

- 补锂能够补偿固态电池首圈不可逆锂损，提升首效与循环稳定性。补锂通过在负极预置少量可释放锂源，使初始循环中负极所需的锂离子得到补充，从而提高体系整体锂含量并改善界面稳定性。以图示体系为例，在LNMO正极中加入 5 wt% 的 Li_2ZrO_3 后，电池首效提升约 15%，循环容量保持率提升约 30%，有效降低了首次不可逆容量损失，并改善了长期循环性能。
- 目前液态&固态电池工艺中，补锂以负极预锂为主，正极补锂则作为辅助路径用于提升整体锂丰度与稳定性。（1）**负极补锂**：常通过在负极材料或集流体表面引入可释放锂源（如复合锂带、金属锂蒸镀等）来补偿不可逆锂耗，具备效率高、锂剂量可控的特点，是当前主流技术路线。（2）**正极补锂**：通过引入少量富锂正极材料（如LNO、LFO）可在一定程度上提升首效至94%、延长循环寿命约50%，适用于高能密度或液-固界面稳定性较差的应用场景。常见补锂材料包括：金属锂、富锂锰酸锂（Li-rich NMC）、富锂铁酸锂（Li-rich LFO）以及锂锆复合氧化物（如 Li_2ZrO_3 ）等。

◆ 图：预锂化显著改善电池性能



◆ 图：不同预锂化材料电压窗口与反应路径对比



4.3 补锂：受新增工艺及电池结构差异影响，补锂技术成为刚需

- 直接辊压复合锂带是一种工艺流程最简、成本最低、锂利用率最高的负极补锂技术路径，具备最强的工程兼容性。该技术通过将超薄金属锂带直接辊压于负极片表面，无需电化学反应，即可完成锂源预置，避免副产气体与电解液适配问题，具备全干法特征。工艺省去蒸镀与预锂化等步骤，可直接进入电芯装配环节，已在瑞浦兰钧、赣锋锂业等企业实现规模化落地，适用于石墨、硅碳等多类负极。
- 除直接复合锂带外，当前负极补锂技术还包括真空蒸镀锂、化学锂化和电化学预锂三类主流方案；真空蒸镀工艺产业化概率最大。（1）真空蒸镀锂：通过锂源蒸发系统将超薄金属锂沉积于极片表面，膜厚均匀性高（偏差<5%），可实现单/双面补锂，适用于高精密研发与中试场景。但设备成本高、工艺复杂，目前多处于小批量试产阶段。（2）化学锂化：利用金属锂与添加剂（如Si、Sn粉）在溶剂中原位反应形成锂化合物，工艺灵活、原料丰富，但锂分布均匀性较差，副产物控制难度大，存在一定安全风险，目前已在部分项目中量产应用。（3）电化学预锂：通过三电极体系，精准控制电压电流，将锂原位嵌入负极，具备最高锂化效率（>98%）与良好深度控制能力，适用于复杂结构负极。但因需额外电芯组装与分解步骤，主要用于示范验证或功能化材料研究。

◆ 图：金属锂通过滚压或蒸镀方式均匀沉积于负极极片表面，形成超薄锂层，实现预锂化补锂

◆ 图：主流补锂技术工艺对比

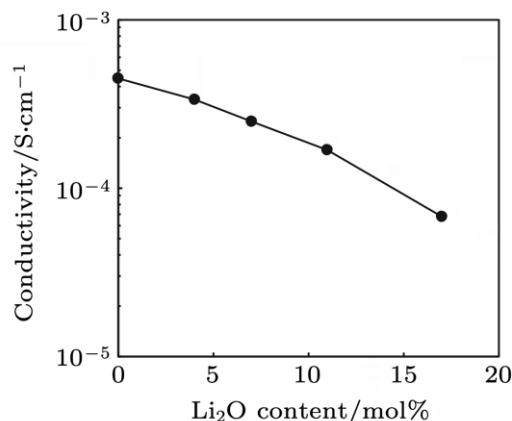


技术路线	补锂效率	工艺复杂度	均匀性控制	产业化程度
直接辊压复合锂带	极高	极低	中等偏优	大规模量产
真空镀锂	高(>95%)	高	优	小批量试产
化学锂化	中	高(85-95%)	中等	部分应用
电化学锂化	极高(>98%)	高	优	示范应用

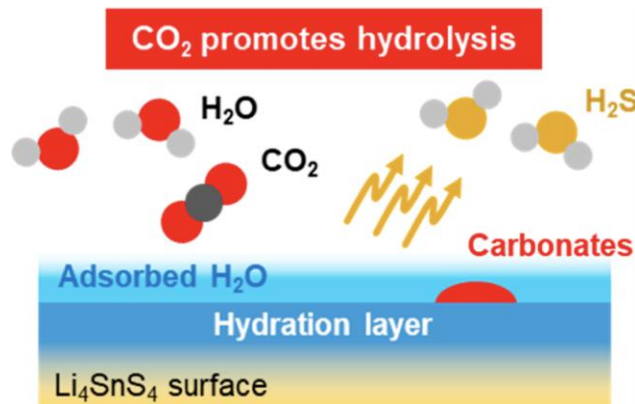
4.4 物料系统：向高精度、高密封、自动化方向演进，以确保固态电池安全高效生产

- 为了确保固态电池的高性能与安全生产，物料系统在配比精度、生产安全和效率成本三个方面进行严格把控：
- 提升配比精度：固态电池材料体系复杂，多种固体粉末和液体助剂的精确配比是保证电池性能一致性的基础。固态电解质如硫化物制备往往涉及多种前驱粉末（硫化锂、硫化磷等），投料精度的微小偏差都会显著影响离子电导率。例如，在 $\text{Li}_2\text{S}-\text{P}_2\text{S}_5$ 体系中，配比偏差 $\pm 3 \text{ mol}\%$ 即可使电导率从约 17 mS/cm 下降至 $12-14 \text{ mS/cm}$ （下降约 25-30%）。因此，自动计量系统需将误差控制在万分级，以确保批次间一致性与性能稳定。
- 提高设备密封性：部分固态材料对湿气极度敏感且有毒，生产流程需在全封闭环境中进行。①安全：当硫化物固态电解质材料与空气中的氧气、水蒸气发生不可逆的水解反应后，会释放有毒的硫化氢气体，带来安全隐患，②性能：硫化物接触氧气后会导致离子电导率下降，影响电池性能。因此，投料过程必须在惰性气体保护下通过全封闭自动投料系统进行。投料、混合和转运全过程需严格控制环境条件，确保氧气和水蒸气含量低于 1ppm 。所有操作都在手套箱或密封舱内进行，并配备 0.1 秒响应时间的硫化氢激光监测系统和 3 秒内启动的碱液喷淋应急系统，以确保安全。
- 全自动化运行：传统人工配料费时费力且易出错，自动化系统可 24 小时连续运行，大幅提高产能，并减少原料浪费。

◆ 图：氧元素的引入导致硫化物电解质离子电导率大幅降低



◆ 图：硫化物固态电解质遇空气中水汽和氧气发生水解，生成有毒 H_2S 气体





- 1 制备电极片&电解质膜为关键，直接决定电池的性能&量产效果
- 2 成膜工艺可分为干法、湿法，干法为高性能固态电池终局
- 3 干法成膜路径多种多样，看好纤维化为未来量产路线
- 4 固态电池出于特殊需求，新增预包覆、印胶等工艺
- 5 相关公司
- 6 投资建议
- 7 风险提示

5.1 先导智能：率先打通固态电池生产整线设备，前道设备关键性能表现突出

- 研发强度高，整线已打通并在客户中试线稳定量产。2024年研发人员占比>35%，硕博>20%，无锡/上海/珠海及欧美多地建研发中心；自2020-2021年起加大干法电极、等静压等投入，研费/营收>10%。与宁德时代签署战略合作，在固态、钙钛矿等协同攻关。已具整线交付能力，覆盖电极—电解质—组装—致密化—化成分容；中试级整线已在客户稳定量产，并向国内及欧美、日韩头部车企与电池客户批量交付、获复购。
- 前道设备布局全面（干/湿法+共用），关键性能表现突出。（1）干法：创新性推出一体化混料-涂布量产线，高剪切/双螺杆实现充分分散与粉体纤维化，厚度与面密度更稳定，易维护、易扩产。（2）湿法：配套高效制浆、匀浆与涂布设备，搭载在线面密度/膜厚闭环控制与A/B面同步监控，实现成膜均匀、良率高、工艺窗口宽。（3）共用：真空镀锂+复合转印协同，镀层均一、界面结合好，配套在线检测与安全策略，便于快速导入。

◆图：公司实现固态电池前道设备全覆盖，能够提供干法/湿法制片工艺核心设备及真空镀铝机

工艺类型	设备	性能优势
湿法制片	湿膜测重系统	检测前移至烘箱上游；X/β-Ray精准测湿膜面密度；异常快速反馈、提升良率；A/B双面同步监控；精度±0.2%。
	高效节能制浆设备	低速湍流高效分散；低黏、对高比重颗粒友好；温升低免冷却；支持在线换桶与监控。参数：线速≤50 m/s、混料≤20 min、5-150℃、±3℃。
	高效匀浆设备（分散盘超高速）	分散盘超高速、端流碰撞高效分散；抗扰流筒体+自定义流场；多层桨叶；多点温度监控+PID控温；料桶自转0-50 r/min（选配）。
	固态湿法制浆机	集干混+浆混+高速分散；宏/分层混合效率高、能耗低；细腻无损分散，支持在线脱泡。
	固态湿法涂布机	特殊涂布结构，膜厚10-60 μm；环境控制降成本；面密度/膜厚闭环；快开阀+稳压提升均匀性。指标：0.1-50 m/min、≤500 mm、±0.3 mm、正反面±0.4 mm、对齐±0.5 mm。
干法制片	干法混料涂布系统	一体化量产线（解包-计量-纤维化-成膜-复合-回收）；均温电加热辊、独立控温、节能；智能投料与张力调环稳定厚度/密度；自适应切刀不伤膜；易维护。示例：100 m/min、幅宽1200 mm、14-18辊。
	干法高剪切混料机	多层仿真分散浆高效混料；内外双冷却、升降温快且易控；下置出料便捷。参数：30-1000 L、线速≤50 m/s、混料≤20 min、5-150℃、±3℃。
	干法双螺杆混料机	粉料100%纤维化；高比扭短流程高剪切；新型螺纹+分区温控；耐磨涂层寿命长；可选纤维化检测。指标：正极≈350 kg/h、负极≈200 kg/h；≥11.5 N/cm³；20-180℃、±3℃。
	固态复合转印机	干法电极与集流体连续/间歇复合；高密封机罩控温湿与气氛；多级辊压温均性≈±1℃；防静电/防粉尘；压辊易拆换。
前道共用	真空镀锂机	真空补锂，均匀、安全；镀膜/照管单元促进反应；激光测厚在线监测，锂利用率≥85%；可选前/后处理适配工序。指标：带宽100-1200 mm、厚0.5-2 μm、均匀性±5%、收卷≈3000 m。

5.2 赢合科技：深度布局前道设备，已向龙头出货中试设备

- 深度布局湿法&干法固态电池前道设备，近期已向龙头客户出货中试设备。涵盖固态湿法涂布、固态湿法辊压、固态电解质转印、干法纤维化一体设备及固态干法成膜等在内的全套核心前道装备。近期向国内某头部电池企业发货的一批核心固态电池设备，包括固态湿法涂布设备、固态辊压设备及固态电解质转印设备，助力客户建设中试线；未来有望充分受益于固态电池产业化。
- 锂电设备业务国内外需求共振。①随着国内头部锂电池厂商开工率提升及扩产规划持续推进，2024Q4起国内锂电设备行业复苏趋势逐步确立。今年1月，公司接连中标国内头部客户大单，包括涂布、辊分及组装线订单。②海外锂电池扩产需求明确，2024年公司陆续取得欧美、日韩、印度、东南亚等地区的锂电设备订单，出海已实现较大突破。

◆图：公司能够提供固态电池干法、湿法前道设备，包括干法成膜设备、湿法挤压式涂布机及电解质转印设备

工艺段	设备	特点
分散+纤维化	300L系列固态干法分散+纤维化一体设备	采用分散盘偏心设计、刮刀配合，可适应不同材料、配方、工艺等各种复杂工况稳定生产；生产效率达300L/h。除此之外，设备还涵盖多种高度自动化功能，如高压喷淋全自动清洗、负压全自动上料等。
成膜&复合	1050系列固态干法成膜+复合一体设备	能够完成轧辊多级速差控制、高精度在线辊缝调节、电极预热复合；辊压厚度精度 $\pm 2\mu\text{m}$ ，辊面宽度达1050mm、极片宽度可达950mm。
湿法涂布	固态湿法涂布设备	辊面宽度达 1050mm，能够完成10-300 μm 厚度的超高速涂布，产能速度超80m/min。
前道转印	固态电解质转印设备	辊面宽度达 1050mm，能够在 ± 0.1 纠偏下处理950mm极片，产能速度60m/min。

5.3 曼恩斯特：完成干法+湿法设备双线布局，已在多家客户端验证

- 涂布设备龙头完成干法+湿法前道设备双线布局，相关设备已在国内外多家客户验证。2024年公司已初步完成固态电池“湿法+干法”工艺装备的双线布局，且为国内外多家企业提供了固态/干法工艺的测试验证实验，并在混合设备、双螺杆挤出设备、多辊成膜设备等多款核心产品均有订单贡献。
- 公司陶瓷双螺杆纤维化技术杜绝金属异物、预成膜机构与14辊双面成膜工艺保障成膜质量、狭缝涂布结合砂磨机处理实现固态电解质均一性涂布，构建起全产线连续生产模式。为固态电池量产提供了一套更高效、安全、稳定的解决方案，可实现能耗减少50%以上、厂房面积减少20%以上、设备投资减少20%以上，电池制造成本降低超10%。

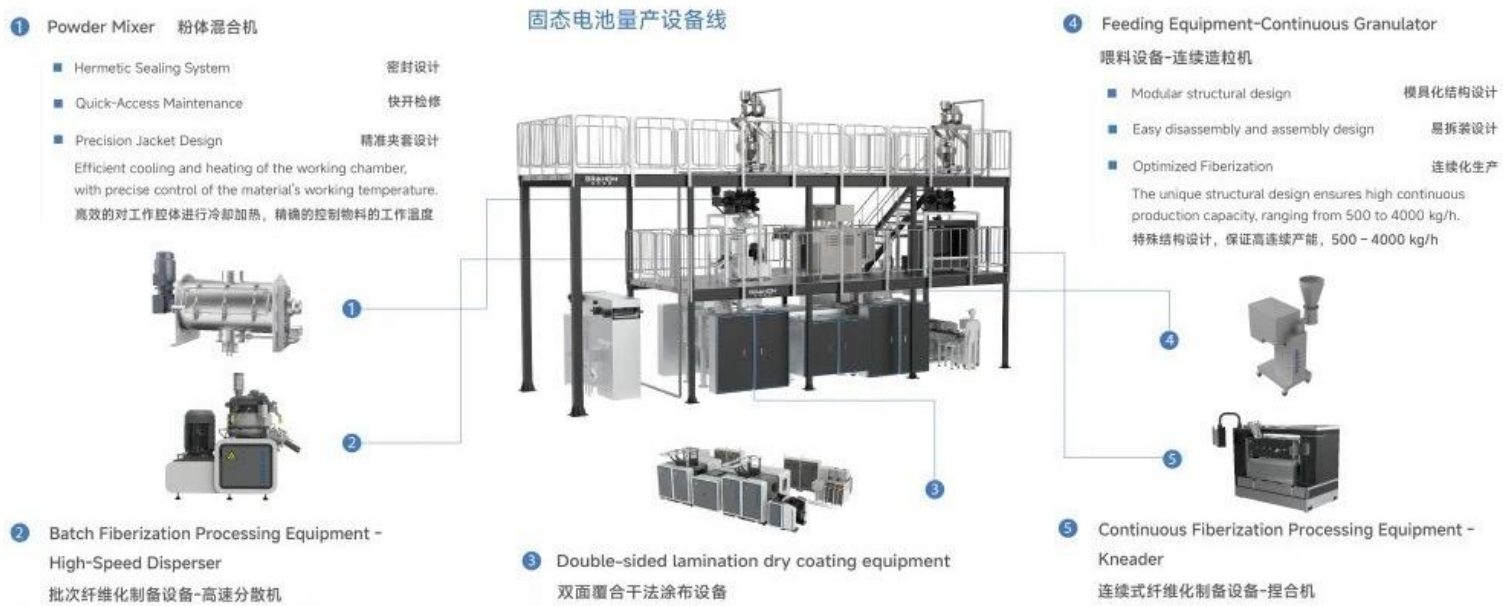
◆图：公司前道设备技术领先，纤维化设备核心元件采用陶瓷件，避免金属异物引入且磨损量仅为镍合金的1/10

工艺段	设备	特点
干法混合	混合机	能够灵活适应逆流或横流混合模式，其旋转的混合盘能够将物料精准地导向一个偏心安装且高速运转的混合工具区域，形成高速差产生的相逆性混合物料流，使物料在短时间内达到均匀混合状态。既满足批次式生产的精确需求，又适应连续式生产的高效节奏。
	VC高效混合机	可加热、可冷却、可真空、可常压，以充氮保护，保压能力强，并配备加热或冷却夹层水道，实现超高的混合效率。
干法纤维化	陶瓷双螺杆挤出机	其螺杆为双支撑结构，受力均匀，螺纹元件与套筒之间摩擦力小、磨损小，整体功率比传统形式降低10%。同时，该产品的双螺杆内腔、螺纹元件做到了全陶瓷化，无金属异物引入，磨损量为镍基合金的1/10，高耐磨、耐腐蚀。
干法过筛造粒	造粒机	粒径可调范围宽、粉碎过程无温升，同时做到了内衬陶瓷化。
干法成膜	干法成膜复合一体设备	400型干法成膜复合一体设备制膜宽度150~800mm、制膜厚度75~250μm、面密度精度误差±1%、厚度精度±2μm、压辊压力最大50T、辊压速度最快高达65m/min、压辊辊缝间隙0~2mm、辊缝调节精度0.001mm，均处于行业领先水平。

5.4 华亚智能：子公司冠鸿智能布局干法电极设备，携手客户推进中试

- 子公司冠鸿智能推出智能干法电极生产装备系统，集成了粉料混料、纤维化、压延、覆合等工艺流程。系统采用AI控制技术，具备高度集成化、结构布局紧凑、占地面积小等优势，可实现在线纠偏、修正辊缝、参数自学习与PID快速调节，帮助客户提升产线效率、节能降耗、减少污染，具备良好的产业化应用基础。
- 公司携手客户推进固态电池生产线建设。25H1公司与上海海希工业通讯股份有限公司正式签署200MWh全固态电池生产线项目协议，此次合作将充分整合冠鸿在工艺装备方面的技术积累与海希通讯在新能源汽车、储能等领域的产业资源，推进干法电极技术在固态电池领域的落地与规模化应用。

◆图：公司固态电池设备布局涵盖粉体混合机、纤维化分散机、干法涂布机、连续造粒机及捏合机



5.5 利元亨：完成整线设备布局，硫化物路线整线交付广汽

- 公司目前已实现固态电池整线制造全覆盖，核心设备包括干法涂布一体机、辊压与电解质复合一体机、印刷叠片一体机及高压化成设备。在关键环节上，公司突破高压致密化、电解质与极片复合、封装及高压化成等技术难点，并针对硫化物电池的防爆、防毒需求设计了三级防护体系，固态电池领域布局有望兑现。
- 公司与广汽埃安合作的硫化物中试线已于2024年6月完成首批交付，并于2025Q3完成整线交付，目前已进入生产调试与参数优化阶段。同时，公司与比亚迪、宁德时代等头部客户进入全固态设备测试与交流阶段；并交付半固态电池设备至清陶能源与国轩高科。

◆图：公司提供固态电池整线解决方案，涵盖干法涂布一体机、辊压与电解质复合一体机、印刷叠片一体机及高压化成设备



◆图：公司一体机整合多工艺配置，显著提升生产质量、效率并降低占地空间

设备	特点
电极干法涂布设备	整合干混、膜制造与压制工艺，相比传统湿法工艺节省11.5%溶剂成本、降低46%能耗，采用多辊压延技术实现超薄材料精准控制，适配多种固态电池体系。
电极辊压与电解质热复合一体机	创新融合正负极辊压与电解质热压功能，通过转印技术和红外预热解决工艺难题，显著提升效率并减少设备占地空间。
胶框印刷与叠片一体机	针对无隔膜结构下极片边缘易变形的的问题，将树脂胶框印刷与电极叠片工艺结合，有效提高产品安全性和一致性。
高压化成分容设备	具备80吨载荷能力，配备百余项安全防护措施，覆盖硫化物、卤化物、氧化物及聚合物等多种固态电池体系，全面支持大规模量产需求。

5.6 先惠技术：携手固态电池先发玩家，布局辊压机

- 模组/Pack设备龙头与清陶能源深度合作，布局固态干法成膜设备（辊压）。公司与清陶能源（氧化物路线）战略合作开发干法辊压设备，切入固态电池前道设备。2024年7月，先惠技术与清陶能源签署合作研发协议，围绕全固态电池核心关键装备的研发和产业化开展工作。首台中试设备于2025年6月底交付清陶，能够用于全固态或半固态电池产线。2025年8月公司与清陶签署《全面合作协议》，联合组建“固态电池先进工艺研发机构”，推进固态电池关键装备研发与产业化，逐步拓展固态电池整线设备布局。

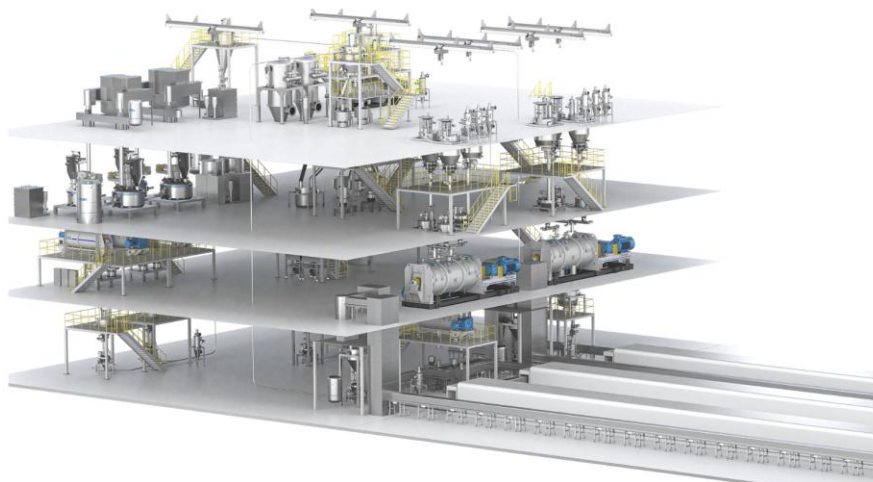
◆图：先惠技术与清陶能源战略合作开发干法辊压设备



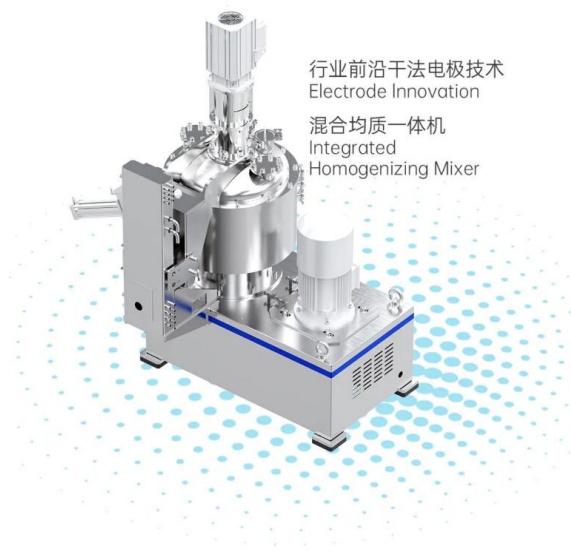
5.7 宏工科技：干法混料纤维化设备先布局

- **深耕自动化物料技术，方案稳定。**公司在固态电池前道设备中具备显著技术优势，已成为上料、输送、搅拌等关键环节的核心设备供应商，方案稳定性与工艺适配性获得广泛认可。
- **与清研电子合资开发混合均质一体机，提前三年布局干法自动化设备。**公司与清研电子成立合资公司（持股49%），成功解决PTFE纤维化难题，相关产品已实现客户销售。干法设备自动化难度高，公司提前三年布局，产品性能居于行业前列。
- **公司与头部客户签订数千万元固态电池设备订单，聚焦物料前道环节，已解决粉尘零泄漏和全程隔氧难题。**小试线设备已完成交付，并签署中试线订单（百兆瓦时级），适配正负极湿法与硫化物干法体系。此外，公司已与卫蓝新能源、清陶能源等客户签署固态设备合同。

◆图：公司物料自动化解决方案



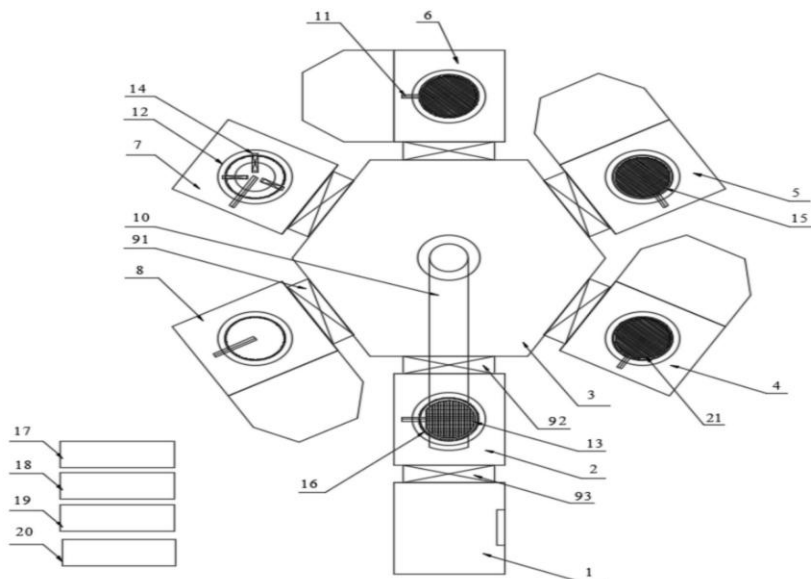
◆图：与清研电子合资开发的混合均质一体机



5.8 迈为股份：平台化真空技术助力高效固态电池产业化

- 迈为凭借其平台化真空技术，推出了薄膜固态电池沉积设备。该设备采用独特的多腔室设计，包括驱动组件腔室、多个沉积薄膜腔室和过渡腔室，能够在不破坏真空条件的前提下，连续完成正负极与电解质的沉积。这一创新设计有效避免了传统工艺中因反复开舱而导致的膜层界面污染问题，显著提高了产品的良率和生产效率。
- 公司已与头部消费电子企业合作研发薄膜固态电池沉积设备，并有望利用其在面板级设备领域的经验，推出适用于大型电池的沉积设备。（1）迈为与国际消费电子龙头合作，为其下一代手机用固态电池研发薄膜沉积设备，有望充分受益于气象沉积法固态电池率先应用于消费电子产品。（2）迈为作为国内面板设备龙头企业，后续有望利用其在面板行业中积累的平台化、大型化技术，助力大型薄膜电池的产业化，推动大型动力 & 储能电池的落地应用。

◆图：迈为薄膜固态电电池沉积设备采用单机台、多腔体设计，能够在真空环境下连续完成多种材料的沉积



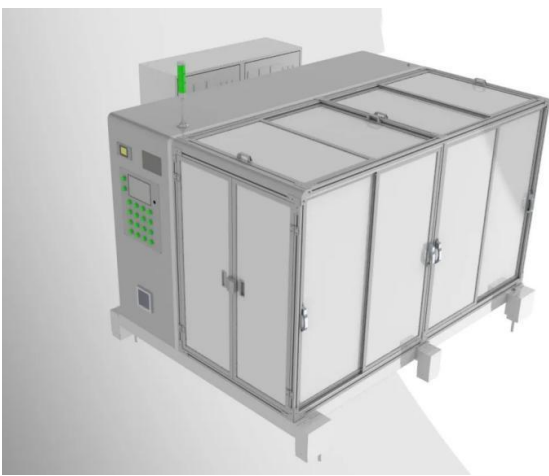
5.9 信宇人：推出卤化物电解质干法解决方案，差异化布局固态电池设备&材料

- 公司开发“能量型+快充型”两条固态电解质路线，均采用公司自研、自产干法成膜一体机。（1）能量型：重点开发稀土替代型卤化物，通过水相合成工艺降低材料成本至20万元/吨以下，并实现室温离子电导率>1 mS/cm，固态电池能量密度>400 Wh/kg。（2）快充型：优化其与高镍正极的界面适配性，设计卤化物-硫化物梯度复合电解质，引入锂离子高速传输通道结构，降低迁移能垒从而提高离子电导率，支持5C级快充。
- 公司固态电池材料解决方案采用自主研发的干法成膜一体机，可实现高能量密度隔膜的高效生产。传统工艺为“制膜 + 热复合”两步工序，而公司采用“干粉直涂热复合技术”，省略纤维化制膜工序，一步成型。该技术使用的粘结剂含量更少，无需依赖活性物质之间的高粘接强度，可保持其原有孔隙率，从而有助于提升电池的倍率放电性能和高容量设计。
- 公司干法成膜方案具有以下优势：（1）无需干燥烘箱，显著降低厂房占地面积及生产采购成本；（2）无需处理 NMP 溶剂，减少 VOC 排放并降低产线能耗；（3）突破湿法涂布厚度极限，有效提升电池能量密度。

◆图：公司开发“能量型+快充型”两条固态电解质路线，匹配不同应用场景下的固态电池需求

电解质类型	未来应用场景	未来目标
能量型卤化物电解质	动力电池	重点开发稀土替代型卤化物，通过水相合成工艺降低材料成本至20万元/吨以下，并实现室温离子电导率>1 mS/cm，固态电池能量密度>400 Wh/kg.
快充型卤化物电解质	无人机等应用场景	优化其与高镍正极的界面适配性，设计卤化物-硫化物梯度复合电解质，引入锂离子高速传输通道结构，降低迁移能垒从而提高离子电导率，支持5C级快充。

◆图：公司干法成膜复合一体机



5.10 软控股份：干湿法成膜设备同步推进，半固态前道设备持续交付

- 公司布局干、湿法成膜设备，完成高镍、富锂锰基等材料成膜设备的布局。（1）干法：公司搅拌设备成熟度较高，已在多家客户处完成 1 - 2 代迭代，当前主要供货对象为科研机构及初创企业，具备一定技术积累与客户基础。由于干法工艺涉及全固态材料，存在高固含特性，公司对配料-输送-搅拌器及动力系统进行了针对性改造，形成密闭物料系统。除前道搅拌 & 纤维化设备外，公司干法辊压设备进展相对滞后，目前完成 0.5GWh 产线辊压设备研发，尚未导入客户端验证。（2）湿法：公司在硫化物领域已覆盖配料-输送-搅拌-上料-涂布等设备，交付客户中试，其中 0.1 - 0.2GWh 的中试线订单金额在千万元级别，部分设备用于 0.5GWh 产线前段供货，订单量突破 3000 万元。
- 公司在半固态电池设备领域已实现持续交付，客户覆盖多家头部与科研类企业。目前湿法半固态设备累计出货金额达数千万元，均配套物料系统，客户包括宁德时代、中科院系企业、清陶、蔚蓝等；其中清陶、宁德试线均采用半固态路径。干法方向，公司已向宁德提供上料及硫化物电解质搅拌设备，物料系统同步交付出货设备与宏工相似。

◆图：公司干法电极制备技术实现无溶剂生产，显著降低 OPEX&CAPEX

◆图：公司硫化物电解质混料设备



5.11 海目星：锂金属固态电池整线设备率先出货

- 公司在硫化物固态电池中试线领域已实现多环节设备交付。公司向国内外电池龙头玩家持续交付固态电池正负极涂布、硫化物电解质涂布、正负极辊压、电解质与极片复合、叠片等关键工序的设备方案，相关产品目前正陆续出货，充分体现了公司在高粘度材料处理、复合与致密化等环节的技术积累。
- 公司与欣界能源合作的高能量密度金属锂固态电池整线项目已实现量产落地，相关固态电池通过eVTOL客户验证。公司是国内首家锂金属高能量密度固态电池的整线供应商，提供激光、电池构形、负极控制层等核心设备。公司与欣界能源签署 5 年合作协议，并获得总价值 4 亿元、2GWh 固态电池整线设备订单。目前，欣界固态电池能量密度超过 450Wh/kg，采用氧化物固态电解质和金属锂作为负极，电池已通过 eVTOL 载人飞行器等终端验证。

◆图：公司深度布局锂电前、中、后道设备



5.12 璞泰来：子公司嘉拓智能深度布局干法电极&核心设备，硫化物电解质与锂金属负极同步突破

- 子公司嘉拓智能围绕固态电池关键工艺，完成了电极成型及材料制备环节的设备布局。嘉拓智能推出高速混合机、高速分散机、搅拌机、及分段式/连续式双钢带辊压设备，设备持续出货&迭代。同时，公司与中科固能等核心固态电池玩家展开战略合作，并针对差异化材料体系优化设计设备方案。
- 公司设备在硫化物电解质与锂金属负极方向均取得技术进展，助力高能固态体系落地。（1）硫化物电解质：公司布局硫化物电解质成膜设备，开发出干法成膜机，实现膜厚均匀性 $\pm 2\mu\text{m}$ 、面密度偏差 $<6\%$ ；设备能够满足在惰性气体环境下制膜，已实现交付落地并进入客户验证阶段。（2）锂金属负极：公司突破 $15\mu\text{m}$ 厚度锂箔的高一致性压延与复合技术。成膜设备可将 1.2mm 锂箔以 15m/min 的速度延压至 $15\mu\text{m}$ ，厚度控制在 $\pm 2\mu\text{m}$ 以内，并具备铜箔表面处理与张力调节功能，已实现锂箔带的稳定制备及批量交付，应用于高比能锂金属固态电池场景。

◆图：公司推出多款辊压设备，满足不同材料&工艺需求

辊压工艺	技术特点&进展	技术参数
多辊转移	基于颗粒料，采用辊面作为自支撑电极膜的载体，减少高速运行过程中的断带现象。通过差速转移实现均匀上料、连续成膜、减薄集成。嘉拓智能多辊转移已交付客户。	速度 $\leq 30\text{ m/min}$ ；厚度精度 $\pm 2\mu\text{m}$ ；辊宽 500mm ；压力 $10\text{-}50\text{T}$
分段辊压	基于颗粒料，采用微张力控制技术，实现 2N 张力下稳定高速走带，减少断带现象；分断式辊压可提升压制精度。	速度 $\leq 30\text{ m/min}$ ；厚度精度 $\pm 2\mu\text{m}$ ；辊宽 500mm ；压力 $10\text{-}50\text{T}$
双钢带辊压	适配粉状、颗粒料、多形态来料。钢带系统作为自支撑载体减少断膜，提高压膜成品的强度与密度。双钢带厚重，稳定性强。现已交付多个客户。	速度 $\leq 30\text{ m/min}$ ；厚度精度 $\pm 2\mu\text{m}$ ；辊宽 600mm ；压力 $10\text{-}50\text{T}$



- 1 制备电极片&电解质膜为关键，直接决定电池的性能&量产效果
- 2 成膜工艺可分为干法、湿法，干法为高性能固态电池终局
- 3 干法成膜路径多种多样，看好纤维化为未来量产路线
- 4 固态电池出于特殊需求，新增预包覆、印胶等工艺
- 5 相关公司
- 6 投资建议
- 7 风险提示

6. 投资建议

● 重点推荐固态电池设备整线供应商【先导智能】、激光焊接设备商【联赢激光】、化成分容设备商【杭可科技】，建议关注干/湿法电极设备商【赢合科技】、干法电极&模组PACK【先惠技术】、整线供应商【利元亨】、干法电极设备商【曼恩斯特】、干法辊压机【纳科诺尔】、干法电极设备商【华亚智能】等。

公司	设备工段	市值（亿元） 20251121	归母净利润（亿元）				PE			
			2024	2025E	2026E	2027E	2024	2025E	2026E	2027E
先导智能	整线	784.6	2.9	15.3	20.4	24.8	274.3	51.2	38.4	31.6
联赢激光	中道 (电芯焊接&装配&印胶设备)	86.0	1.7	2.9	4.5	6.1	51.9	29.6	19.2	14.0
杭可科技	中后道 (化成分容&加压设备)	176.6	3.3	5.8	7.4	8.8	54.1	30.2	23.9	20.1
宏工科技	前道 (干法混料&纤维化设备)	113.7	2.1	1.8	2.4	3.8	54.7	62.9	46.8	29.6
纳科诺尔	前+中道 (干法辊压成型&等静压设备)	100.4	1.6	0.9	2.0	3.5	62.0	115.4	49.2	28.9
赢合科技	整线	184.0	5.0	6.8	8.8	10.7	36.6	27.0	21.0	17.1
先惠技术	前道 (辊压)	79.5	2.2	3.0	3.7	4.5	35.6	26.4	21.7	17.8
利元亨	整线	92.3	-10.4	0.8	1.6	2.2	-8.8	114.8	57.3	42.4
曼恩斯特	前道 (干法电极)	81.1	0.3	0.1	1.2	2.0	264.3	579.6	66.5	41.6
德龙激光	中道 (激光设备)	35.9	-0.3	0.0	0.4	0.8	-235.2	-	97.0	47.2
华亚智能	前道 (干法电极)	66.2	0.8	1.2	1.6	1.9	114.3	53.6	42.0	35.0

注：宏工科技、赢合科技、德龙激光、华亚智能盈利预测来自Wind一致预期，20251121



1 制备电极片&电解质膜为关键，直接决定电池的性能&量产效果

2 成膜工艺可分为干法、湿法，干法为高性能固态电池终局

3 干法成膜路径多种多样，看好纤维化为未来量产路线

4 固态电池出于特殊需求，新增预包覆、印胶等工艺

5 相关公司

6 投资建议

7 风险提示

7. 风险提示

- **下游应用进展低于预期：**半固态电池技术仍不成熟，循环次数、倍率性能较差，同时未形成规模量产，成本价格较高，因此下游应用进展存在低于预期的风险。此外固态电池多数仍处于实验室阶段，商用化时间存在较大不确定性。
- **上游原材料价格波动风险：**固态电池产业链与技术尚未发展成熟，电解质、更高比能正负极等关键材料采用贵金属，其中锆、锗、锂等金属原材料价格较高，价格波动时，对下游需求影响较大，因此存在价格上涨后，下游需求放缓的风险。
- **新技术替代风险：**电池技术日新月异、迭代较快，半固态电池仍为到全固态电池的过渡方案，企业大规模扩产可能存在后续技术升级到全固态电池后，大量产线被淘汰的风险，因此多数企业目前产能规划存在不及预期的可能。此外存在其他电池新技术替代的风险，进一步影响固态电池的产业化进程。

免责声明

东吴证券股份有限公司经中国证券监督管理委员会批准，已具备证券投资咨询业务资格。

本研究报告仅供东吴证券股份有限公司（以下简称“本公司”）的客户使用。本公司不会因接收人收到本报告而视其为客户。在任何情况下，本报告中的信息或所表述的意见并不构成对任何人的投资建议，本公司及作者不对任何人因使用本报告中的内容所导致的任何后果负任何责任。任何形式的分享证券投资收益或者分担证券投资损失的书面或口头承诺均为无效。

在法律许可的情况下，东吴证券及其所属关联机构可能会持有报告中提到的公司所发行的证券并进行交易，还可能为这些公司提供投资银行服务或其他服务。

市场有风险，投资需谨慎。本报告是基于本公司分析师认为可靠且已公开的信息，本公司力求但不保证这些信息的准确性和完整性，也不保证文中观点或陈述不会发生任何变更，在不同时期，本公司可发出与本报告所载资料、意见及推测不一致的报告。

本报告的版权归本公司所有，未经书面许可，任何机构和个人不得以任何形式翻版、复制和发布。经授权刊载、转发本报告或者摘要的，应当注明出处为东吴证券研究所，并注明本报告发布人和发布日期，提示使用本报告的风险，且不得对本报告进行有悖原意的引用、删节和修改。未经授权或未按要求刊载、转发本报告的，应当承担相应的法律责任。本公司将保留向其追究法律责任的权利。

东吴证券投资评级标准

资评级基于分析师对报告发布日后6至12个月内行业或公司回报潜力相对基准表现的预期（A股市场基准为沪深300指数，香港市场基准为恒生指数，美国市场基准为标普500指数，新三板基准指数为三板成指（针对协议转让标的）或三板做市指数（针对做市转让标的），北交所基准指数为北证50指数），具体如下：

公司投资评级：

买入：预期未来6个月个股涨跌幅相对基准在15%以上；

增持：预期未来6个月个股涨跌幅相对基准介于5%与15%之间；

中性：预期未来6个月个股涨跌幅相对基准介于-5%与5%之间；

减持：预期未来6个月个股涨跌幅相对基准介于-15%与-5%之间；

卖出：预期未来6个月个股涨跌幅相对基准在-15%以下。

行业投资评级：

增持：预期未来6个月内，行业指数相对强于基准5%以上；

中性：预期未来6个月内，行业指数相对基准-5%与5%；

减持：预期未来6个月内，行业指数相对弱于基准5%以上。

我们在此提醒您，不同证券研究机构采用不同的评级术语及评级标准。我们采用的是相对评级体系，表示投资的相对比重建议。投资者买入或者卖出证券的决定应当充分考虑自身特定状况，如具体投资目的、财务状况以及特定需求等，并完整理解和使用本报告内容，不应视本报告为做出投资决策的唯一因素。

东吴证券研究所
苏州工业园区星阳街5号

邮政编码：215021

传真：（0512）62938527

公司网址：<http://www.dwzq.com.cn>

东吴证券 财富家园