

证券研究报告|行业深度报告

电力设备与新能源

行业评级 强于大市（维持）

2026年1月6日



电池变革重要赛点，材料设备全新颠覆

——固态电池深度研究报告

证券分析师：

邓伟 执业证书编号：S0210522050005

游宝来 执业证书编号：S0210523030002

研究助理：

李宜琛

请务必阅读报告末页的重要声明

并购家 免费行业报告网

IPOIPO.CN 每日更新 不用注册会员 无广告 永久免费

- **发展固态电池已成为行业共识、全球竞赛点：**理论上能实现高比能、高安全性的固态电池体系，是全球公认的颠覆性技术。减少液态电解质含量，提升固态电解质占比，逐步实现固态化，是行业发展共识。由此带来的对材料体系、装备体系的颠覆，迫使全球企业、研究团队展开新一轮的创新竞争，避免在新技术方向上的掉队风险。2027年实现小批量生产、工艺定型，基本上是国内外企业一致预期的重要时间节点。
- **材料端：固态电池颠覆材料环节，重视增量、升级、瓶颈环节。**全固态电池颠覆现有体系，核心增量环节是硫化物/氧化物/卤化物/聚合物固态电解质，其中降本、量产瓶颈在于硫化锂（成本高、工艺放大难）。此外，能量密度的提升依赖高镍/富锂锰基正极、锂金属/硅碳负极的性能突破和应用；工艺落地上，需要粘结剂、骨架材料、新型集流体等的配合参与，对导电剂、铝塑膜等的应用也会提升。
- **设备端：中试线设备先行，紧抓增量、变革设备。**从第一性原理出发，干法电极能实现厚电极、减少能耗、提高压实密度、减少和硫化物电解质副反应，是固态电池优选方案，颠覆传统前道设备工艺。等静压设备解决界面接触问题，是有别于传统锂电设备的高壁垒增量环节。此外，裁切、叠片、胶框印刷、激光切割、焊接、化成分容、检测环节也有增量变化。2026年将进入设备定点、定型的关键时期，重点关注绑定核心电池、主机厂的设备企业。
- **建议关注：主线1：关键材料：**【硫化物电解质】当升科技、国瓷材料、容百科技、泰坦股份、道氏技术等；【硫化锂】上海洗霸、厦钨新能、恩捷股份、海辰药业、华盛锂电、光华科技等；【锂金属负极】中一科技、天铁科技、道氏技术、英联股份等；【硅碳负极】璞泰来、贝特瑞、杉杉股份、元力股份、道氏技术等；【辅材】博苑股份、日播时尚、海辰药业、松井股份、天奈科技等；【集流体】德福科技、诺德股份、嘉元科技、中一科技、远航精密等。**主线2：设备先行，关注固态电池增量设备：**先导智能、纳科诺尔、宏工科技、联赢激光、利通科技、锡装股份、科新机电、荣旗科技、海目星、星云股份、信宇人、德龙激光、曼恩斯特、璞泰来、利元亨、赢合科技、奥特维等。**主线3：差异化竞争的电池企业：**宁德时代、亿纬锂能、国轩高科、欣旺达、孚能科技、金龙羽、豪鹏科技、珠海冠宇、德尔股份、冠盛股份等；
- **风险提示：**固态电池技术发展、固态电池量产不及预期等。

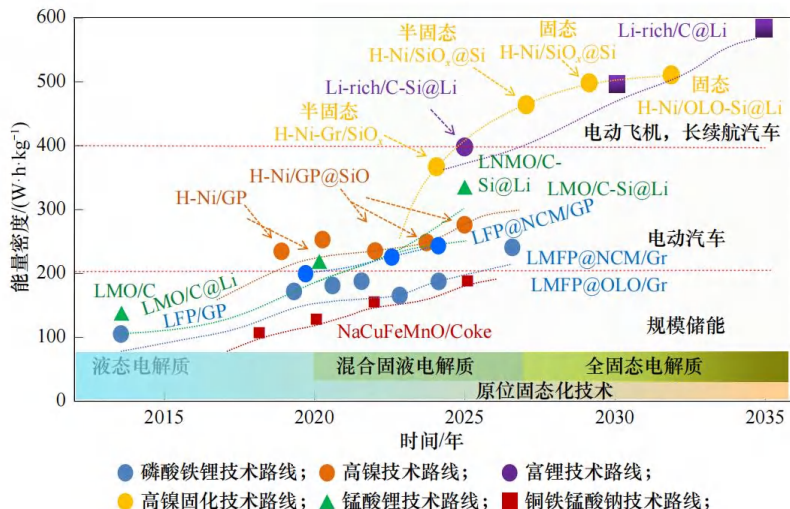
目 录

- 概览：全球发展进程、政策，产业发展阶段
- 材料：各技术路线对比、格局分析
- 设备：变化、难点、格局
- 投资建议与风险提示

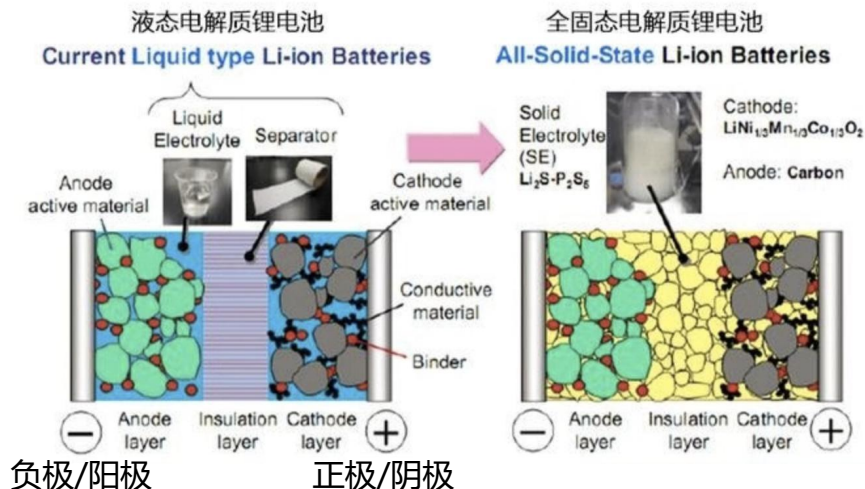
1.1 趋势判断：一致认可的颠覆性技术，新一轮技术竞赛的关键

- **液态锂离子电池触及能量密度上限，发展固态电池已成为行业共识：**传统锂离子电池采用了易燃的液态电解质，能量密度已经接近理论极限300Wh/kg（石墨负极+过渡金属氧化物），难以满足智能化电动车、电动航空、智能终端等场景对能量密度、安全性更高的要求。理论上能实现高比能、高安全性的固态电池体系，是全球公认的颠覆性技术。减少液态电解质含量，提升固态电解质占比，逐步实现固态化，是行业发展共识。由此带来的对材料体系、装备体系的颠覆，迫使全球企业、研究团队展开新一轮的创新竞争，避免在新技术方向上的掉队风险。

图：锂离子电池发展技术路线



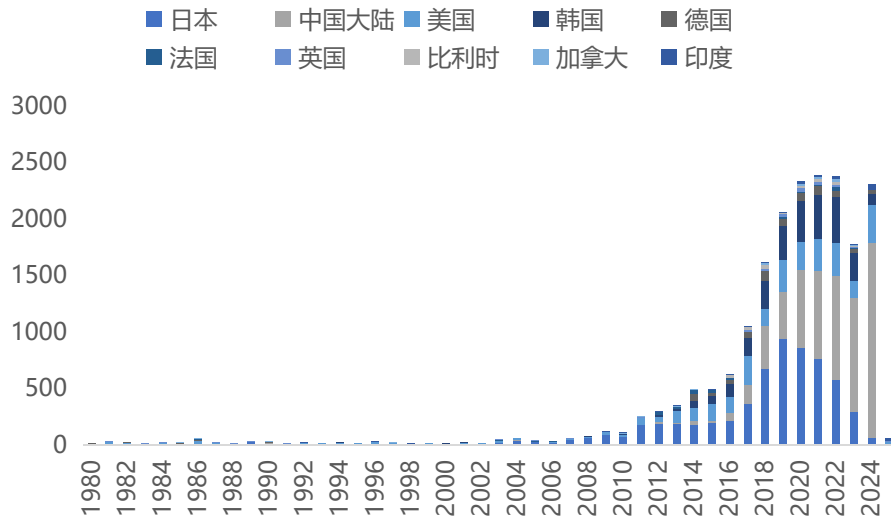
图：液态vs全固态锂离子电池结构对比



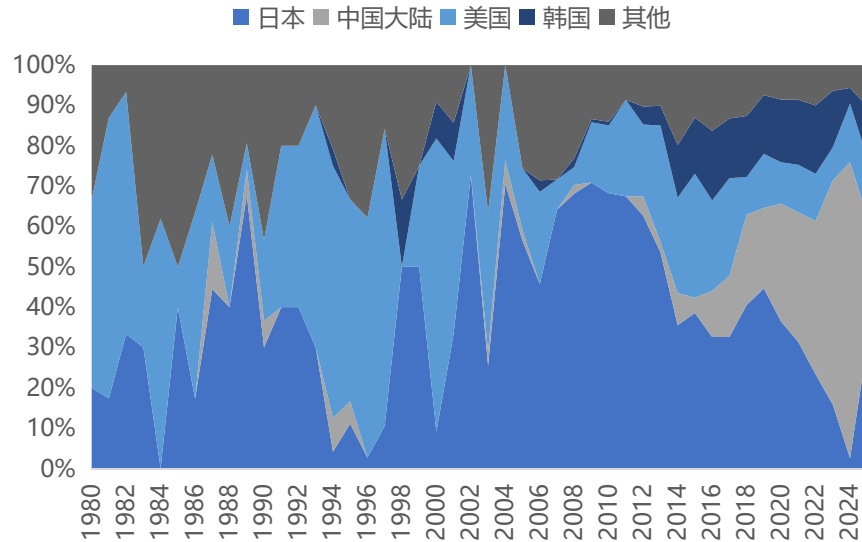
1.2 全球比较：从专利角度，日本、美国起步较早，中国在加速发力

- **从专利申请趋势观察全球固态电池发展：**根据incopat专利检索平台统计1980年-2024年7月30日全球固态电池专利申请数，从2011年开始明显加速，2020-2022年达到高峰。从占比上看，日本、美国发展较早，2000-2020年日本申请专利数占比断层领先，中国2020年开始发力，占比快速反超。

图：全球固态电池专利申请趋势



图：全球固态电池专利申请占比变化



1.2.1 中国进展：14年提出原位固化技术，2024年重视全固态路线

➤ 我国对固态电池的基础研究始于二十世纪70年代，1978年首次报道了固态离子学研究工作，1987年固态电池被列入首批国家高技术研究发展计划（863计划）重大专题之一。2014年，我国研究人员率先在国际上提出原位固化技术。2024年5月，媒体报导我国或投入60亿元，鼓励固态电池研发。

图：我国固态电池发展历程

时间	进展
1978年	首次报道固态离子学研究工作
1979年	第一个以固态离子学命名的物理所固态离子学实验室创立
1980年	在《物理学报》发表第一篇 LISICON 文章，并成功制备出锗酸锌锂等快离子导体材料。召开第一届固体离子学讨论会
1987年	科学技术部将固态电池列为首批“国家高技术研究发展计划”（863计划）重大专题之一，项目汇聚了国内11家优势单位进行集体攻关
1988年	率先研制出我国第一块由 LiV3O8正极和金属锂负极构成的全固态锂电池
1990年之后	锂离子电池产业进入快速发展阶段，固态电池的研究进展则较为缓慢
1997年	采用纳米硅作为锂电池负极材料，并实现产业化应用
2014年	在国际上率先提出原位固态化技术，通过在电池中构筑多级、多层、多位点连续的固体电解质相，综合解决固固界面问题

图：我国固态电池支持政策

时间	发布机构	文件	内容
2015.5.8	国务院	《中国制造2025》	建立和健全富锂层氧化物正极材料/硅基金体系锂离子电池、全固态锂离子电池、金属空气电池、锂硫电池等下一代锂离子动力电池和新体系动力电池的产业链
2017.3.2.	工业和信息化部等四部委	《促进汽车动力电池产业发展行动方案》	计划到2025年，新体系动力电池技术取得突破性进展，单体比能量达500Wh/kg
2020.10.20	发改委	《新能源汽车产业发展规划（2021—2035年）》	实施电池技术突破行动。加快固态动力电池技术研发及产业化
2022.1.29	发改委、能源局	《“十四五”新型储能发展实施方案》	推动多元化技术开发。研发储备液态金属电池、固态锂离子电池、金属空气电池等新一代高能量密度储能技术。
2023.1.3	工信部、教育部、科技部等	《关于推动能源电子产业发展的指导意见》	推进聚合物锂离子电池、固态电池等研发和应用。加快研发固态电池，加强固态电池标准体系研究。
2024.5	（工信部、财政厅）	无	《中国日报》报道称，中国或投入约60亿元，鼓励有条件的企业对全固态电池相关技术开展研发，宁德时代、比亚迪、一汽、上汽、卫蓝新能源和吉利共六家企业或获得政府基础研发支持
2025.3	工信部	《2025年工业和信息化标准工作要点》	提出建立健全全固态电池标准体系

资料来源：中国工程科学《固态电池关键材料体系发展研究》李泓、陈立泉，中国政府网，界面新闻，华福证券研究所

1.2.2 日韩进展：较早提出政策支持，聚焦全固态路线

- **日韩企业较早提出固态电池和电池新技术的政策支持。**其政策重点推动电池技术创新，目标提升能量密度和供应链自主性。通过补贴、人才培养和回收，使得产业竞争力提升，但锂资源短缺仍制约两国发展。

图：韩国固态电池支持政策

时间	发布机构	文件	内容
2019.11.	LG化学、三星SDI、SK创新联合成立基金	未来五年投资计划的宣布	2018年11月，韩国设立电池产业基金，计划五年内投入38万亿韩元（约290亿美元），通过税收优惠、贷款和保险支持本土企业海外投资及矿产资源获取，并加强电池回收与材料再利用，提升供应链多样性与稳定性。
2021.7.	韩国贸易、工业和能源部 (MOTIE)	《K-battery development strategy》	计划到2030年在电池产业投资40.6万亿韩元，重点支持LG、三星SDI、SKI等电池制造商及其配套企业的研发与建厂。此外，通过修改《特殊税收限制法》，大幅提高研发与设施投资的税收减免比例，分别可达40%和10%。为保障人才供给，政府还将在高校设立相关专业，每年培养逾1100名电池领域的硕博人才。

图：日本固态电池支持政策

时间	发布机构	文件	内容
2007	日本新能源产业技术综合开发机构(NEDO)	《下一代汽车用高性能蓄电池系统技术开发》	重点发展高性能蓄电池及其材料，目标开发能量密度达700–800Wh/L、续航提升一倍以上的大容量电池（如固态电池）。此外，2030年目标为能量密度500Wh/kg、功率密度1000W/kg、成本控制在1万日元/kWh；远期目标为700Wh/kg、1000W/kg，成本降至5000日元/kWh。
2010.4.2	日本经济产业省、新能源与产业技术开发机构(NEDO)、产业技术综合研究所(AIST)	成立LIBTEC研究所	为了促进和支持会员锂电池新材料的开发，成立LIBTEC以预测电池市场趋势，制定标准电池模型，创建材料评价方法并进行评价分析。成员包括：丰田、松下、日产、本田、三菱等35家企业
2018.7.	日本政府 (GOJ)	《战略能源计划》	通过推动能源技术创新、发展储能系统、加强国际合作、提升产业竞争力等措施，为固态电池等关键技术的研发和应用提供支持，以实现能源转型和低碳化目标。
2022.4.21	日本经济产业省 (METI)	《电池行业战略》	政府将大规模投资液态锂电池的上游资源保障和制造设施建设，推动全固态电池于2030年前实现商业化。为保持技术领先，将通过产学研合作加强研发，并以关西AIST中心为核心，打造产业、政府和高校共建的人才培养体系。同时，推进回收体系建设，激活再利用市场，并支持电动车、充电设施和固定电池系统发展，强化电网等领域安全，从而刺激需求。
2022.12.19		《日本电池产业战略》	该计划将提供3300亿日元（约21.4亿欧元）补贴，支持下一代磷酸铁锂（LFP）和固态电池的研发与生产，目标2030年实现年产150GWh电池产能，其中丰田获资助超过三分之一
2024.09.06		《经济安全保障推进法》	批准12个电池供应链项目，总投资约1万亿日元，政府提供最多3500亿日元补贴，支持丰田、日产、松下等企业。其中，丰田与子公司投资2450亿日元扩产固态与棱柱电池9GWh，计划2026年投产，强化日本下一代电池制造能力。

1.2.3 欧美进展：重视固态电池技术发展

- **欧美均将固态电池视为能源转型和产业竞争的关键技术。**欧洲通过欧盟成员国联合资助，支持固态电池研发产业化，重点项目包括荷兰示范线建设、西班牙企业产能扩张等。美国也出台政策推动固态电池及锂金属电池技术突破。

图：美国固态电池支持政策

时间	发布机构	文件	内容
2016.7	美国能源部 (DOE)	battery500计划	计划于2017年启动，是一个多机构合作项目，旨在开发下一代锂金属阳极电池，目标是实现高达500 Wh/kg的能量密度，并达到1000次充放电循环的寿命，同时降低电池的成本，显著低于每千瓦时100美元，以支持碳中和能源和电气化目标
2021.6.8	美国联邦先进电池联盟 (FCAB) /美国能源部 (DOE)	《2021-2030国家锂电池蓝图》	该蓝图指导美国在未来十年内推动锂电池技术的发展和应⤵用，目标电芯成本60美元/KWh，能量密度500Whkg，实现无钴无镍的固态电池，锂金属电池规模量产
2024.09.20	美国能源部 (DOE)	Bipartisan Infrastructure Law (BIL) 《两党基础设施法案》	授权投资65亿美元，用于加强美国电池供应链，通过设立专项拨款项目支持固态电池关键材料和制造能力的提升。Solid Power获得最高5000万美元资助，用于建设连续化硫化物电解质生产线，推动固态电池的大规模产业化。

图：欧洲固态电池支持政策

时间	发布机构	文件	内容
2021.01.26	欧盟	European Battery Innovation (IPCEI EuBatIn)	由12个成员国联合发起电池创新项目，提供最高29亿欧元公共资金，预计带动90亿欧元私人投资，重点支持固态电池在内的下一代电池技术
2024	欧洲电池联盟(EBA)	战略研究与创新议程	旨在支持电池技术的前沿研究，推动电池技术发展和应用，增强欧盟在全球电池市场的竞争力。
		关于跨部门电池创新的 CIRPASS 报告	已存在相关标准，目前国际标准化组织 (ISO) 正在开发电池护照数据标准，预计2027年2月生效

1.3 产业阶段：中国固态电池进入中试阶段

- **产业阶段：**2025年国内企业基本上建成或在建全固态电池中试线，单体容量20~70Ah，能量密度350-500Wh/kg，部分企业已经有装车装车测试计划。**后续规划：**国内企业2026年左右基本都会启动装车测试，2027年实现小批量出货。

图：中国固态电池重点企业最新进展

企业	技术路线	2025年关键进展	后续目标
宁德时代	硫化物	已建成中试线，技术处于行业领先水平	2027年有望实现小批量生产
比亚迪	硫化物	11月在官网公布技术细节	2027年左右启动全固态电池批量示范装车应用，2030年后实现大规模上车
一汽	硫化物	中汽新能成立（一汽参股），100Ah软包全固态“金旻电池”能量密度已达450Wh/kg	2026年在中国一汽的部分车型上示范应用，2027年进行小批量应用
上汽&清陶	聚合物+卤化物+氧化物	半固态电池MG4汽车量产	2026年实现全固态电池正式量产，2027年将搭载全固态电池的智己新车推向市场
吉利	硫化物	已完成20Ah电芯制备，放大验证项目获环评受理	
卫蓝	氧化物转硫化物	-	2027年实现小批量生产
广汽		建成中试线	计划2026年全固态电池装车
奇瑞	硫化物+氧化物	安瓦一期1.25GWh产线完成调试	计划2027年量产
国轩高科		金石全固态电池已实现电芯能量密度350Wh/kg，容量提升至70Ah，预紧力下降90%，通过严苛安全测试，完成PACK开发并启动装车路测，且已建成0.2GWh中试线，处于中试量产阶段	预计2027年实现小批量生产及装车测试
欣旺达	聚合物、硫化物 锂金属	320/360Wh/kg聚合物固态电池已小批量量产，硫化物全固态电池已完成24Ah小试，已有锂金属负极电池实验室原型样品（500Wh/kg）	计划2026年推出第一代全固态电池产品；2027年推出第二代全固态电池产品，完成>700Wh/kg全固态电池实验室样品制作
亿纬锂能		6月18日，发布全固态软包电池（实现45℃@1C，2000圈以上的循环）	将在2026年推出350Wh/kg全固态电池1.0；在2028年推出1000Wh/L以上的高比能全固态电池2.0产品
孚能科技	硫化物 高镍+硅+锂金属	现有小试线（8月推进送样），25年底建成0.2GWh中试线（湿法方案）	26年底至27年放大至GWh级别，2030年实现大规模量产
长安		-	预计2026年实现固态电池装车验证，2027年推进全固态电池逐步量产，能量密度达400Wh/kg

1.3 产业阶段：海外固态电池企业进展

- **产业阶段：**海外企业装车测试进展更快，主要由车企+电池企业深度绑定形式展开。**后续规划：**在DOE（美国）、NEDO（日本）等针对产能建设的专项补贴刺激下，海外企业预计26年-27年会有GWh级别量产线建成、投产。

图：海外固态电池重点企业最新进展

企业	国家或地区	技术路线	2025年关键进展	后续目标
丰田	日本	硫化物	4月20日，与松下联合开发出500Wh/kg固态电池原型，充电10分钟	计划投资5000亿日元建10GWh工厂，首批产品将供应bZ，预计2026年启动试生产，2027年正式量产
本田	日本	硫化物	2025年1月启用全固态电池示范正产线	以2020年代中后期开始量产为目标
日产	日本	硫化物	已在横滨工厂建设全固态电池试生产线	2028年实现全固态电池量产，2029年初推出搭载全固态电池的电动汽车
三星SDI	韩国	硫化物	已向客户交付首批产品进行测试	2027年大规模量产固态电池
SK	韩国	硫化物	大田市硫化物固态电池试点工厂预计25年下半年竣工	2027年推出聚合物-氧化物复合电池；2029年推出硫化物电池
LGES	韩国	硫化物	预计完成干电极中试生产线建设并实现中试量产能力	2028年实现商业化量产
奔驰	德国	-	2月，全固态电池（Factorial）路测：450Wh/kg，纯电EQS测试车续航1000km	预计在“本十年结束前”推出一款量产版固态电池电动汽车
Blue Solutions	法国	聚合物锂金属	4月24日，与上海璞泰来签署联合开发协议，共同推进其GEN4电池（>450Wh/kg）研发与产业化	GEN4电池目前仍处于样品阶段，预计2026年前建立Pilot生产线，2030年商用
Quantum Scape	美国	氧化物锂金属	6月24日宣布实现重要里程碑，将Cobra隔膜工艺集成到生产中，并于与村田制作所达成合作框架共同推进陶瓷薄膜大规模制造	
Solid Power	美国	硫化物	5月20日，宣布和宝马正在i7中测试全固态电池；已有30吨电解质产能（DOE资助\$5000万）	电解质产能 2026 年增加到75吨，2028 年增加到140吨
SES	美国	半固态	1月23日与两家OEM签署高达1000万美元的合同，共同开发AI强化型锂金属与锂离子电池；电芯已批量测试	

目 录

- 概览：全球发展进程、政策，产业发展阶段
- 材料：各技术路线对比、格局分析
- 设备：变化、难点、格局
- 投资建议与风险提示

- **从第一性原理出发，固态电池首先解决的是更高的能量密度（以安全性为前提）。**根据对固态电池体积能量密度、质量能量密度、功率密度、寿命、安全性等不同性能的追求，电池材料的选择方向各有分化。实现更高的能量密度主要靠提升电压平台、或提升负极、正极材料的比容量，负极从石墨逐渐过渡到硅、锂金属，正极从中低镍三元过渡到高镍三元或富锂锰材料。在更高容量嵌入和转换、更高电压体系下，电解质、隔膜、集流体、导电剂、黏接剂都需要为维持稳定性和兼容性做相应的改变。

图：固态电池不同性能追求对材料的选择

	高体积能量密度	高质量能量密度	高功率密度	超长寿命	本质安全	极端环境应用
正极	高压实、高电压	高容量嵌入类与转换类、高电压	多晶小颗粒	单晶颗粒层状氧化物、磷酸铁锂	高稳定氧化物、聚阴离子	高稳定单晶氧化物、聚阴离子
负极	高容量硅碳、锂复合	高容量硅碳、锂复合	高功率石墨、高功率硅碳	低锂损耗石墨、钛酸锂钛酸镍	钛酸锂钛酸镍、硬碳、高安全人造石墨	钛酸锂钛酸镍、人造石墨
电解质	高电压、固态电解质	高电压、固态电解质	高电导高安全、硫化物固态电解质	固态电解质	固态电解质	超低温电解液、宽温区电解液、全固态电解质
隔膜	固态电解质复合隔膜	固态电解质复合隔膜	功率型超薄复合隔膜	固态电解质涂层隔膜	固态电解质涂层隔膜	耐高温复合隔膜
集流体	复合集流体	复合集流体	高功率集流体	涂碳集流体	聚合物金属复合集流体	-
导电剂	单臂碳纳米管	单臂碳纳米管	单臂碳纳米管	-	-	-
黏接剂	新黏接剂PTFE	新黏接剂	新黏接剂	新黏接剂	-	-

2.1 固态电解质-评价维度

- **从性能角度，评价固态电解质性能主要考虑：**较高的室温电导率、较宽的电化学稳定窗口、较高的锂离子迁移数、较好的机械强度、较好的热稳定性。
- **从产业化角度，还需要评估材料的：**空气稳定性（影响生产、运输、应用的环境要求）、原材料成本（是否含贵金属）、加工制造难度（高温、干房、环境影响等）。

图：固态电解质性能评价维度

评价维度	指标	理由
较高的室温电导率	$\geq 1.0 \times 10^{-4} \text{ S/cm}$	锂离子电池中电解质的界面阻抗与其在不同倍率下的充放电性能直接取决于离子电导率。高的离子电导率可以降低在充放电过程中锂电池的极化
较宽的电化学稳定窗口	$\geq 4.0 \text{ V vs. Li/Li}^+$	对于电解质来说，锂离子电池发生电化学氧化和还原反应的电极电位差即电化学稳定窗口。电解质必须在充放电的氧化还原反应过程中保持惰性，不参与化学反应，因此其氧化电位要高于锂离子在正极材料的嵌锂反应电位；低于锂离子在负极材料的沉积电位。一般来说，正极氧化电位至少高于 4 V vs. Li/Li^+ ，当匹配高压正极材料体系时需要达到 5 V vs. Li/Li^+
较高的锂离子迁移数	-	锂离子迁移数越高，锂电池在充放电过程中的浓差极化现象就越小，电池的倍率性能就越好
较好的机械强度	$\geq 30 \text{ MPa}$ （聚合物）	不仅能提升锂离子电池的安全性，也意味着其可实现商业化大规模制备合成。如聚合物电解质具有柔性与弹性可以有效释放在装配或贮存过程中产生的应力，大幅降低制造难度以及成本
较好的热稳定性	$\geq 150 \text{ }^{\circ}\text{C}$	电解质应与锂电池中的各个组分（正极、负极、集流体、极耳和电池壳体等）保持惰性。良好的热稳定性有助于锂电池在滥用或热失控时保证锂电池的安全性

2.1 固态电解质-综合比较

- **固态电解质主要分为有机聚合物基、无机陶瓷基和复合型。其中无机陶瓷基大致分为氧化物、硫化物、卤化物等体系。**
- **硫化物：**离子电导率最高，机械性能较好，但对水汽敏感，容易产生有毒害气体H₂S，界面阻抗高，产业化仍有较多难点。
- **氧化物：**离子电导率低于硫化物，空气稳定性相对好，但机械性能较差。对负极锂金属稳定性较差，主要作为半固态电池的过渡方案。
- **卤化物：**离子电导率较高，质地柔软，界面接触较好，电化学窗口较宽，可作为复合路线的辅助材料、或低倍率电池主材。
- **聚合物：**机械性能好、空气稳定、加工成本低，是率先实现应用的方案，但室温电导率低，锂金属稳定性较差、无法适配高电压正极，有性能瓶颈。

图：固态电解质几大类别及性能

	无机陶瓷基			聚合物基
	硫化物	氧化物	卤化物	
基础结构	L-P-S、Thio-LISICON 型、LMPS结构、硫银锗矿型	钙钛矿型、石榴石型、LISICON 型、NASICON 型等	LiaMXb	PEO、PC、PVDF、PDMS、PAN
离子电导率S/cm	$10^{-3} \sim 10^{-1}$	$10^{-6} \sim 10^{-3}$	$10^{-3} \sim 10^{-2}$	$10^{-5} \sim 10^{-2}$
机械性能	较柔软	较差，硬	质地柔软	弹性模量高，柔软易加工
水氧稳定性	稳定性差，会产生有害气体H ₂ S	较好	稳定性差	不敏感
加工成本	高，依赖惰性气体和干房	烧结温度高，能耗较高	能源、制造成本高	较低
电化学窗口	1.6~2.3V		较宽，氧化还原电位较高(>4-6V)，兼容高压正极	无法适配高电压正极
优点	热稳定性高	热稳定、机械稳定、电化学稳定性好	界面接触好，电化学窗口宽	机械性能好、界面接触好
缺点	水氧稳定性差，界面电阻高	电导率低、界面阻抗高	锂金属负极稳定性差	室温电导率低，锂金属稳定性差

2.1 固态电解质-硫化物主要分类

- 硫化物固态电解质由氧化物固态电解质衍生而来（由S原子取代O原子），由于S的电负性比O低，半径更大，可降低Li+结合能，拓宽Li+迁移通道，因而具备更高的离子电导率，能提高锂离子迁移速率，有利于实现高倍率的循环性能。
- 目前，较有发展前景的硫化物电解质主要有几大体系：
- **L-P-S体系（玻璃态、玻璃-陶瓷态）**：75Li₂S-25P₂S₅离子电导率可达到 2.8×10^{-4} S/cm，对玻璃相电解质热处理后形成玻璃陶瓷，可以进一步提升离子电导率，如70 Li₂S-30 P₂S₅玻璃陶瓷室温离子电导率可达 1.7×10^{-2} S/cm，-35 °C低温条件下可达到 10^{-3} S/cm。
- **L-M-S体系（Thio-LISICON 型）**：M=Si, Ge, Sn，合成简单，热稳定性较好，电化学稳定性也较好，但离子电导率相对较低。
- **L-M-P-S结构：M = Ge, Sn, Si**，具备3D离子传输路径，LGPS室温离子电导率可达 1.2×10^{-2} S/cm，可媲美传统有机液态电解液，低温性能更好，但Ge成本较高，且会被Li金属还原。LiSiPSCI离子电导率可达 2.5×10^{-2} S/cm。
- **硫银锗矿型**：代表性结构为Li₆PS₅X（X为Cl、Br、I等卤族元素），具有立方F43m面中心对称(FCC)结构，**有较高的室温电导率，电化学稳定性较好**，但空气稳定性差。通过以乙醇和四氢呋喃为溶剂的液相路径合成的LPSCI离子电导率可达 2.42×10^{-3} S/cm，进一步调节Cl、Br的比例可在此基础上再提升。

图：硫化物固态电解质主要类型

	玻璃态	玻璃-陶瓷态	Thio-LISICON 型	LMPS结构	硫银锗矿型
结构	L-P-S体系 ，xLi ₂ S-(100-x)P ₂ S ₅ ，x为摩尔百分比	L-P-S体系 ，由玻璃态硫化物电解质部分结晶形成	正交Pnma空间群的γ-Li ₃ PO ₄ 结构， Li₄MS₄ （M=Si, Ge, Sn）	Li_{11-x}M_{2-x}P_{1+x}S₁₂ （M = Ge, Sn, Si）	Li₆PS₅X （X = Cl, Br 和 I）
优点	与正负极材料兼容性较好，在全固态电池利用率很高，合成简单	离子电导率较高	合成简单，热稳定性好，电子电导率小，对Li/Li+的稳定性均可达5V	离子电导率高	低成本，电化学稳定性好
缺点	离子电导率较低	合成步骤复杂	离子电导率相对较低	成本较高，空气稳定性差	空气稳定性较差
离子电导率	<10 ⁻³ （75Li ₂ S-25P ₂ S ₅ 可达 2.8×10^{-4} ）	>10 ⁻³	<10 ⁻³	>10 ⁻³	>10 ⁻³
典型代表		Li ₇ P ₃ S ₁₁ 、Li _{3.25} P _{0.95} S ₄	Li ₂ GeS ₃ 、Li ₄ GeS ₄ 、Li ₂ ZnGeS ₄ 、Li _{4-2x} Zn _x GeS ₄ 、Li ₅ GaS ₄	LGPS、LSnPS、LSiPS	LAGS、LPSCI

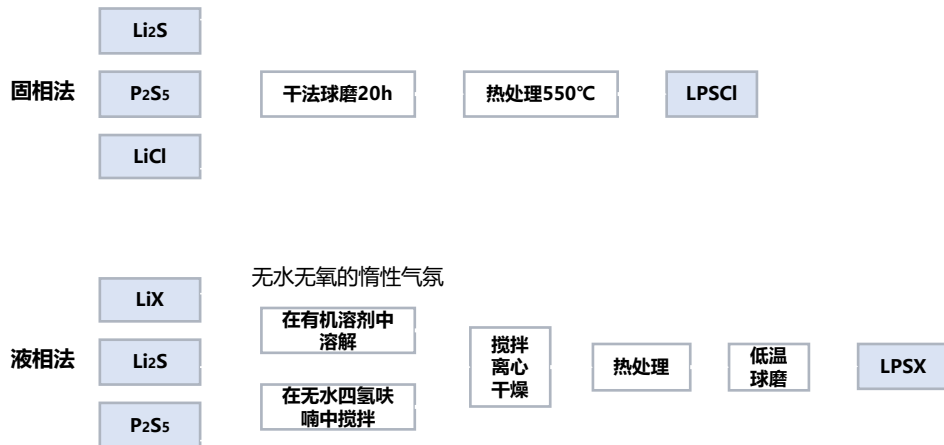
2.1 固态电解质-硫化物合成方法

- 硫化物电解质对空气中水汽非常敏感，**合成主要在封闭体系或者惰性气氛保护下完成**，合成方法主要有：机械球磨法、高温固相反应法和液相合成法。
- **机械球磨法**：可在室温下使粉末细小均匀，提升离子电导率，但在球磨过程中不可避免杂质污染，合成纯度较低。
- **高温固相反应法**：包括熔融淬火和高温热处理等，可提升结晶度，进一步提升离子电导率，通常与球磨法结合，缩短反应时间。
- **液相合成法**：在有机溶剂中进行，可使固态电解质涂覆在活性材料上，形成接触良好的固-固界面，有利于提高电池性能。但有机溶剂容易造成环境污染。

图：硫化物固态电解质主要合成方法比较

	机械球磨	高温固相合成	液相合成
操作步骤	复杂	简单	复杂
操作环境	友好	友好	苛刻
优点	粉末细小均匀，室温制备成本低	离子电导率较高，结晶度、纯净度更高	可使固态电解质涂覆在活性材料上，形成接触良好的固-固界面
缺点	纯度较低	能耗高	有机溶剂污染

图：硫化物电解质合成方法示例



2.1 固态电解质-硫化物工艺瓶颈及改性方法

- **硫化物的产业化瓶颈主要是水氧稳定性差、界面接触较差、电化学稳定性差。**
- **水氧稳定性差：**硫化物暴露在水氧（空气）中，易产生H₂S（有害气体），并造成电解质结构破坏，从合成到应用的每个环节都需要惰性气体和干燥环境，制造成本高。为解决这一问题，主要通过开发新材料、包覆涂覆、无机有机复合材料等方案提升性能。
- **界面接触差、电化学稳定性差：**主要通过减小阴极和电解质的粒径、湿法涂层、粘合剂增强界面接触；通过构建LLSTO、LNO缓冲层提高电化学稳定性、改善空间电荷效应。

图：硫化物固态电解质改性方法

难点	解决方案	具体方案	效果
水氧稳定性差	开发新材料	掺杂元素取代S、由Li ₂ S、P ₂ S ₅ 和LiCl制备	H ₂ S产生量降低67%
	材料涂覆	在电极-电解质层叠体四周涂覆氮化硅、氧化铝或氧化硅绝缘膜以阻隔湿气	湿气透过率降低2个数量级
	无机有机复合材料	制备硫化物-PVDF-HFP复合电解质	获得稳定的循环性能
		制备硫化物-疏水聚苯乙烯复合电解质	H ₂ S产生量降低约73%
界面问题	增强界面接触	减小阴极和电解质的粒径：将Li ₂ S粒径从100μm以上研磨到约10μm	初始放电容量提高25%
		湿法涂层：Li ₆ PS ₅ Cl和碳纤维（VGCF）涂覆在阴极上	获得稳定的循环性能
		粘合剂：Li _{5.4} PS _{4.4} Cl _{1.6} 与PTFE混合	获得稳定的循环性能
	构建缓冲层提高化学/电化学稳定性	LLSTO缓冲层	获得稳定的循环性能
		LNO缓冲层	LNO可以抑制LGPS与LCO的界面反应
	构建缓冲层改善空间电荷效应	LNO缓冲层	初始放电容量提高10%

2.1 固态电解质-硫化物电解质膜工艺

- 硫化物电解质成膜工艺对全固态电池性能至关重要，因厚膜和复合膜致能量低于理论值，超薄强韧薄膜是关键。分湿法（冷/热压、流延、渗透、3D 打印等）和干法（粉末压缩、粘结剂原纤化）。湿法中流延和渗透可大规模生产，干法中粘结剂原纤化无溶剂，降本且环保。

图：硫化物固态电解质膜制备方法

工艺	细分工艺	流程	优点	缺点
湿法	冷/热压法	将聚合物粘结剂和硫化物电解质先后溶解或部分溶解在有机溶剂中，蒸发溶剂后，在一定温度和压力下将电解质粉末冷（热）压成薄膜	通过湿法制浆使聚合物粘结剂分散均匀，提高离子电导率；压力压制可降低膜厚度，提高致密性	依赖压制设备性能与精度，压力和温度控制不均或设备精度不足会导致膜厚度和形貌不均；尺寸放大时，内部缺陷出现概率增大，易产生应力集中引发裂纹或破裂；大规模制备受设备限制
	流延法	将粘结剂和电解质先后溶解在溶剂中形成浆料，调整粘度后均匀浇铸在基材上，干燥固化后进行冲切、层合等后处理	能制备超薄薄膜，提高离子电导率；可制备多层结构、性能良好的固态电解质；具备大规模生产能力	硫化物与强极性溶剂混合会分解或降低离子电导率，需选择低极性或非极性溶剂，限制了聚合物粘结剂选择；常用粘结剂在这些溶剂中溶解性不佳，影响薄膜机械强度；粘结剂会包裹硫化物颗粒，影响离子电导率
	渗透法	将浆料浇筑在多孔支架上（如静电纺丝三维网络、商用非织造布），或把聚合物单体渗透到三维硫化物骨架中原位聚合，形成复合膜；也可将浆料直接涂覆在正极上得到正极支撑的固体电解质薄膜	可得到超薄固态电解质膜；能构建离子传输连续路径；通过涂覆在正极上，实现正极支撑的固体电解质薄膜，降低界面阻抗，提高能量密度；可与传统液态锂离子电池电极工业生产线结合	流延法中固体颗粒被粘结剂包裹会阻碍离子传导；商用非织造布需进一步提高离子电导率
	3D 打印	设计 3D 虚拟模型并切割成若干 2D 水平部分，以逐层打印方式制作固态电解质膜	过程方便、可定制和智能化；能精确控制膜的厚度和形状，减少材料浪费；可使用不同打印材料，改变电池各部分三维结构	生产效率远低于传统技术；材料适配性要求高，打印“墨水”配方开发难度大；打印精度有限，现有分辨率通常大于 10 μ m；层间易存在孔隙或缺陷，需后处理提升致密度
	其他湿法（喷涂等）	通过喷涂将湿法浆料沉积在基膜或电极上形成固态电解质膜，如喷雾淬火、使用溶剂化纳米粒子作为粘结剂喷涂等	可制备大面积、超薄的膜；能设计优异稳定性和高离子电导率的电解质界面层；部分方法可在无堆叠压力下稳定充放电	-
干法	粉末压缩法	通过球磨将聚合物粘结剂与硫化物电解质粉末混合，然后在一定温度和压力下热压成复合电解质薄膜	-	制备的薄膜柔性差、易开裂；受模具尺寸限制，无法大规模应用
	粘结剂原纤化	将粘结剂和固态电解质材料初步混合，施加机械力使粘结剂分子链定向排列形成纤维结构，再通过辊压等方式制成薄膜，热固性粘结剂可能需加热固化	成本低；有利于制备更厚电极和更薄电解质膜，提高电池能量密度；保持硫化物电解质结构完整；粘结剂使用少	核心挑战是精准控制纤维的尺寸、分布和取向，避免过度处理导致粘结剂降解或纤维断裂；目前常用的 PTFE 粘结剂存在传输锂离子能力差、界面粘附不足、易在电化学还原作用下转化为烯碳等问题

2.1 固态电解质-硫化物核心环节在于硫化锂合成&降本

- **瓶颈：**硫化锂是一种具有反萤石结构的白色至黄色晶体，具有较高的熔点(938 °C)，具有活泼的化学性质，在空气中易水解产生剧毒的硫化氢气体，其制备和储存需要更复杂的工艺。
- **要求：**1) 碳含量<0.1%以内；2) 水分含量≤100 mg/kg；3) 金属杂质含量 < 100 mg/kg；4) 粒度D50≤7 um 且 D90 ≤ 2D50等
- **技术路线：**固相球磨法（纯度高，但效率低、原料成本高）、固相碳热还原法（原料成本低，引入碳杂质、能耗高）、液相法（反应充分，需要二次提纯，废水需要处理）、气相法（设备成本高）

图：硫化锂主流工艺对比

路线	原料	工艺原理	优点	不足
固相法	锂源： 金属锂、氨基锂、亚氨基锂、氮化锂 硫源： 硫粉	将锂或含锂化合物与硫或含硫化合物通过机械球磨或高温的方式固相混合	工艺简单 、环境友好、无废液产生	原料成本高 (金属锂、氯化锂)、反应时间长、转化率较低，所得产品存在杂质如多硫化锂等，提纯复杂，产业化设备不易选型
固相法-（碳）热还原	锂源+硫源： 硫酸锂 还原剂： 碳材料（或Mg等）乙醇	利用碳的强还原性，一步法合成分散均匀、性能良好的硫化锂/碳复合材料	原料成本极低； 反应更易控制，解决了因硫化锂遇水、氧敏感而导致的生产和储运困难的问题，提高了产品收率和性能	需要提纯碳材料 ，产品质量不稳定
气相-高温/高压法	锂源： 金属锂、氢氧化锂、碳酸锂 硫源： 硫蒸汽、硫化氢	在惰性/还原保护气氛下，高温、高压使锂/锂化合物和硫/硫化物通过还原或气相等反应制备	工艺流程简单 ，且有效利用了高温高压密闭反应的优势，避免有害溶剂泄漏，缩短制备流程	高温、高压工况控制不易 ，设备选型要求高；原料 硫化氢较难获取 （除炼油厂产生硫化氢废气外，对于剧毒硫化氢气体的生产、运输、储存均需特殊资质）
液相-溶剂法	锂源： 金属锂、氢氧化锂、苯基锂、丁基锂 硫源： 硫粉、硫化氢 溶剂： 乙醇、己烷、甲苯、乙醚、四氢呋喃、N-甲基吡咯烷酮	将锂/锂化合物和硫/硫化物在溶剂介质中混合后反应制备硫化锂。	液相反应充分完全，不易残留杂质，产品提纯容易；不需要高温处理， 能耗较小	有机溶剂易燃、易爆、易挥发，环境污染严重，不易回收；工况危险性高，较难控制

2.2 负极：提升能量密度的关键

- **负极材料的变化是固态电池提升锂电池性能的最关键因素**，负极储锂主要通过嵌入、合金化或转换反应实现。目前已广泛应用的负极材料包括石墨类、 $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ 、无定形碳（硬碳、软碳）、硅基材料、锂合金等。**固态电池的负极材料主要有碳族负极、硅基负极和金属锂负极。**
- **锂金属**：理论比容量高达**3860mAh/g**，化学电位低（-3.045V），密度低（0.534g/cm³），被认为是最理想的高比能量锂电负极材料。但充放电过程中体积变化大、反应活跃，在液态电池中一直未实现商业化，固态电解质的高机械强度能更有效抑制锂枝晶，使得锂金属负极的应用成为可能。但实际应用还有较多问题需要解决：LATP、聚合物容易被锂金属氧化，准全固态电解质仍有液体易产生枝晶，锂金属薄膜成本较高，若电池发生意外撞击，裸露在空气中也有易燃的风险。
- **硅基**：纯硅的理论比容量高达**4200mAh/g**，但锂化过程中容易膨胀，较难单独使用，主要通过CVD多孔碳、纳米化等形式处理后与石墨掺混使用。

图：负极材料比较

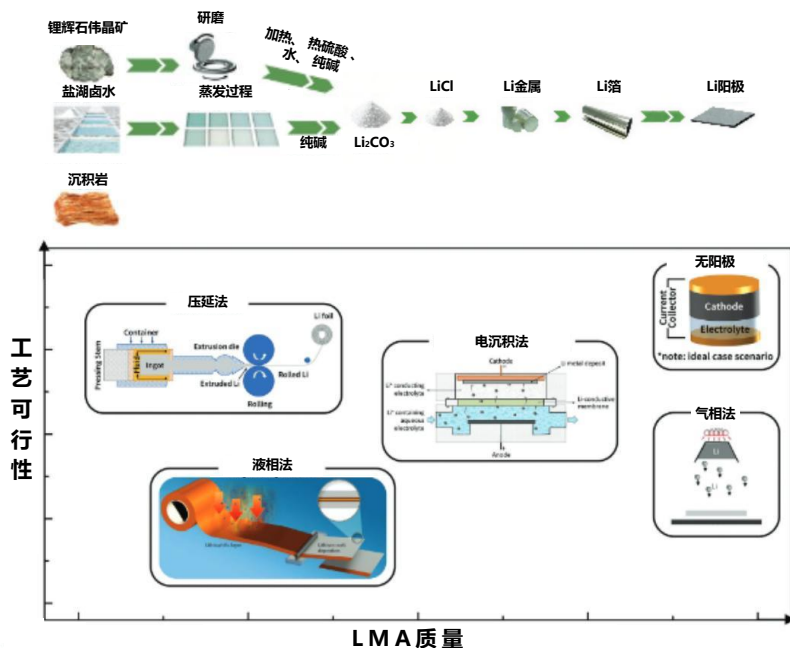
	锂金属负极	硅基负极	石墨负极	钛酸锂
优点	理论比容量高	理论比容量高	电化学性能稳定，结构稳定，循环寿命长	高安全性、寿命长、循环稳定性优异
缺点	容易产生枝晶导致电池短路，成本高，裸露在空气中易燃	锂化过程中硅材料会发生体积膨胀	实际比容量的发挥已接近理论值	比容量较低
比容量 (mAh/g)	3860	4200 (纯硅，掺混石墨一般可以达到600以上)	372	175
循环性能	较差	较差	较好	较好
成本	较高	较高	较低	较低

2.2.1 锂金属负极：主流路线对比

- **量产瓶颈：**使用高纯金属锂（极其活泼，自然界中不游离存在，一般用氯化锂电解，需要通惰性气体保护锂不被氧化和腐蚀），量产中需要控制厚度、表面平整度、匹配电池尽可能做大幅宽等。
- **工艺比较：**目前生产锂负极较为成熟的是固相压延法，在减薄的方向上还提出了气相热蒸发法、液相法、电沉积法等。

图：锂金属负极生产工艺比较

图：锂金属负极生产工艺示意图

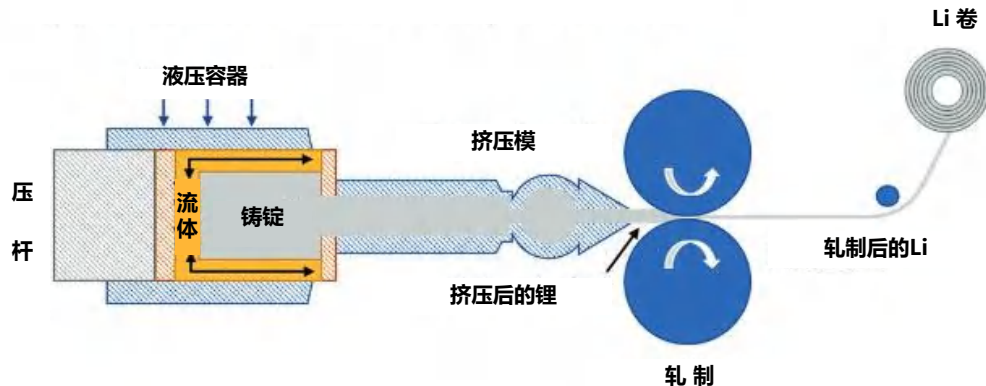


工艺	具体工艺描述	优点	不足	参数指标	成本	代表企业
固相-压延法	齐压采用液压驱动的静液挤压，得到条、棒、带等；轧制通过冷轧进一步减薄厚度	工艺成熟，是长期使用的工业标准方法	生产的锂箔质量、长度、宽度和厚度等难以满足锂金属电池（LMBs）的要求	厚度可低至10-20μm	较高，轧制步骤增加成本	赣锋、天铁等
气相法-热蒸发	在超高真空下，电加热源材料使其蒸发并冷凝到基板	可制备高质量、高纯度的薄膜，厚度控制好，热蒸发尤其适合锂的沉积	热蒸发需专用真空室	可制备出从纳米级到几十微米	高，需高真空系统，投资和维护成本高	英联、Li Metal
液相法	- 熔融锂处理：将锂熔化，通过浸涂、喷涂等方法沉积在基板上 - 浆料法：将锂金属粉末、流变改性剂和溶剂制成浆料，涂覆在集流体上，再进行压延	工艺相对简单，浆料法与现有锂离子电池制造技术相似，易规模化	熔融锂处理难以精确控制厚度和表面形态，大规模使用时安全隐患大；浆料法锂的质量可能类似挤压锂箔	可制备1-30μm厚的锂涂层，浆料法生产的锂箔厚度10-50μm	熔融锂处理成本可能较高，浆料法成本相对可控	道氏、Livent
电沉积法	- 常规电沉积：在电解液中，通过施加电流使锂在负极还原沉积； - 阳极无锂：电池组装时无锂金属阳极，首次充电时从正极析出锂形成阳极	可避免高温和有毒气体，能生产更薄的锂膜，阳极无锂概念可提高能量密度、降低成本和改善安全性	需在干燥室环境进行，可能使用有害电解液；阳极无锂概念需要高库仑效率，对集流体等要求高	可控制沉积层的厚度和形态	相对较低	宁德时代、QS、AlphaEn、Pure Lithium

2.2.1 锂金属负极：压延法相对成熟，是当前量产方案

- **工艺难点：**锂金属质地柔软且具有黏性，压延过程中难以获得厚度均一的薄膜，传统压延工艺生产的锂箔厚度通常在30 – 75 μm ，若需进一步减薄至10 – 20 μm ，易出现表面损伤或缺陷。锂金属黏性强，压延过程中易黏附在轧辊或支撑层上，导致薄膜撕裂或表面损伤，需使用聚合物支撑层或润滑剂辅助加工。张力过大会导致箔材弯曲，影响表面形貌和内部晶粒结构；张力不足则难以实现薄膜的稳定剥离。
- **工艺步骤：**
 - **1) 挤压成型：**将胚料置于腔室中，通过液压驱动的压头施加高压水压力使胚料塑性变形，进而挤压锂金属。
 - **2) 轧制：**根据电池的尺寸，对挤压成型的锂金属进行冷轧，有时使用覆盖锂金属或轧辊来促进加工。
 - **3) 后处理：**锂金属极易与空气中的水分、氧气反应形成氧化层（如 Li_2O 、 Li_2CO_3 ），压延前后需在干燥环境中进行，且需通过机械刮擦、清洗等步骤去除氧化层。

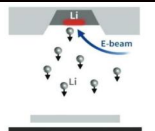
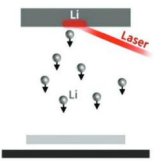
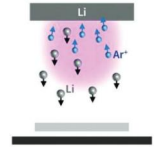
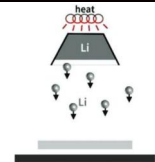
图：锂金属负极压延法生产示意图



2.2.1 锂金属负极：气相法实现精准控制，蒸镀法最适配锂金属

- **物理气相沉积法 (PVD)**：是通过将材料从凝聚态源经气相传输到另一个待涂覆表面来沉积薄膜和涂层的方法，涂层厚度范围从几埃 (Å) 到数百微米 (μm) 不等。包括电子束气相沉积 (EB-PVD)、脉冲激光沉积 (PLD)、溅射沉积、热蒸发法等。
- **蒸镀法**：其中蒸镀法 (即热蒸发法) 特别适用于熔点低、蒸气压高的金属材料 (如锂)，是金属锂薄膜最合适的物理气相沉积技术。具体操作为超高真空条件下，对锂源材料施加直流电进行焦耳加热，使锂蒸发并在基板上冷凝形成薄膜。

图：锂金属负极气相法工艺比较

路线	工艺描述	优点	不足	条件控制	示意图
电子束气相沉积 (EB-PVD)	在超高真空环境下，钨丝产生的电子束经加速并在磁场引导下撞击锂靶材，使锂熔化或升华，其蒸气沉积到基板表面形成锂金属负极薄膜	① 涂层杂质少，纯度高，能保证锂薄膜的高洁净度；② 沉积速率高，可较快获得一定厚度的锂薄膜；③ 材料喷射方向性好，利于控制锂薄膜的沉积区域	① 在锂金属负极制备中的应用研究极少，尚未充分验证其适用性；② 高温 (≈2000°C) 可能导致锂的挥发或性质改变；③ 设备成本高，从实验室规模扩展到工业生产难度大	电子束 (磁场)、高沉积速率、压力： 10^{-7} – 10^{-2} 毫巴、温度：≈2000°C、适用于所有类型材料	
脉冲激光沉积 (PLD)	在超高真空的不锈钢腔室内，锂靶材置于旋转支架，基板可加热，利用高能激光脉冲 (如 KrF 准分子激光，λ=248nm) 照射锂靶材，使其转化为气相并产生等离子体羽流，等离子体在基板表面冷凝形成锂金属负极薄膜	① 可通过调控激光参数 (如重复频率、沉积时间等) 制备不同厚度 (如 1μm)、形态的锂薄膜；② 制备的锂薄膜表面均匀性较好，能减少枝晶生长隐患	① 锂易受水分污染，需配备手套箱，处理复杂；② 可制备的薄膜面积小 (如 2cm² 不锈钢基板)，难以满足大规模生产需求；③ 设备成本高，不适合批量制备锂金属负极薄膜	KrF 准分子激光 (波长 = 248 纳米；1.4 焦 / 平方厘米，150 毫焦 / cm²) 重复频率：2 赫兹、沉积时间：1–4 小时 压力：≈ 2×10^{-6} 帕 温度：室温 靶材 - 基板距离：2–3 厘米 基板：2 平方厘米不锈钢 (SUS 316L)	
溅射沉积	在靶材附近的辉光放电等离子体中产生 Ar⁺ 离子，借助电势差加速 Ar⁺ 离子撞击带负电的锂靶材，使锂原子脱离并沉积到基板形成锂金属负极薄膜	① 沉积速度快，可在大面积基板上获得厚度均匀的锂薄膜；② 通过改变溅射参数可控制锂薄膜的晶粒和微晶尺寸，优化其电化学性能	① 对锂的溅射研究极少，传统锂靶存在缺陷 (熔点低、易熔化、与支撑结构附着力差)；② 锂表面的钝化膜会影响溅射效率和薄膜质量；③ 需在靶材制造或溅射方法上取得突破才能用于锂金属负极生产	等离子体 (1–10 毫安 / 平方厘米；10–200 千赫兹：500–3 千伏)、高沉积速率、压力： 10^{-7} – 10^{-2} 毫巴、温度：100–500°C、靶材 - 基板距离：6–16 厘米、大面积基板	
蒸镀法	在超高真空条件下，对锂源材料施加直流电进行焦耳加热，使锂蒸发并在基板上冷凝形成锂金属负极薄膜，锂的低熔点 (180.5°C) 和高蒸气压使其适合该工艺	① 能制备质量高、均匀性和保形性好的锂层，可实现无缺陷表面；② 厚度控制精准，能满足不同厚度锂金属负极的需求；③ 能确保与固态电解质的紧密接触，利于提升电池性能	① 需防止锂氧化，否则需更高初始功率突破氧化层，可能导致剩余锂快速闪蒸；② 锂熔化后可能与蒸发源发生合金化反应，缩短源的寿命；③ 锂蒸气压较高，需使用专用真空室以防污染，增加了设备成本和操作复杂度	直流电、压力： 10^{-7} 毫巴、样品温度：室温、靶材 - 基板距离：≈5 厘米	

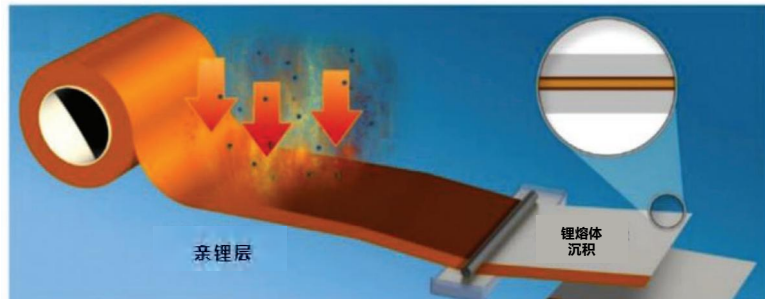
2.2.1 锂金属负极：液相法可实现卷对卷加工，提升对电池工艺兼容性

- **液相法**：利用锂较低的熔点（180.5℃），可将其转变为液态，可直接在3D多孔碳、电解质、铜箔上沉积成薄膜，实现卷对卷加工、进行避免锂枝晶的后续处理，对电池生产的兼容性更强。
- **具体工艺**：
 - **熔融处理法**：在厌氧环境下将锂熔化，通过浸涂、喷涂、刮刀等方式沉积在基板上，需通过化学策略（涂覆、掺杂、合金化）或物理策略（调整表面粗糙度）解决锂与基板的润湿性问题。
 - **浆料法**：将锂金属粉末、流变改性剂和溶剂制成浆料，通过狭缝涂布机涂覆在集流体（或隔膜、固态电解质）上，再经压延处理。

图：锂金属负极液相法工艺对比

路线	工艺描述	优点	不足
熔融锂处理法	在厌氧环境下将锂熔化，通过浸涂、喷涂、刮刀等方式沉积在基板上，需通过化学策略（涂覆、掺杂、合金化）或物理策略（调整表面粗糙度）解决锂与基板的润湿性问题	① 工艺相对简单，可通过卷对卷浸涂类工艺实现规模化生产；② 能制备较薄（1-30μm）的锂薄膜，且表面纯度高，可进行特定功能化；③ 熔融锂的塑性流动有助于与电解质形成良好接触	① 锂的高表面能导致与多数基板润湿性差，需额外处理（如 lithiophilic 涂层），增加工艺复杂度；② 难以精确控制厚度和表面形态，大规模生产时存在安全隐患（如熔融锂的高反应性）
浆料法	将锂金属粉末、流变改性剂和溶剂制成浆料，通过狭缝涂布机涂覆在集流体（或隔膜、固态电解质）上，再经压延处理，形成厚度 10-50μm 的锂箔	① 与现有锂离子电极制造技术相似，易规模化；② 可生产比传统方法更薄的锂薄膜，且宽度灵活性高；③ 工艺兼容性强，便于整合到现有电池生产线	① 锂的质量可能类似挤压锂箔，存在表面缺陷或杂质风险；② 浆料中的溶剂和添加剂可能残留，影响电池性能；③ 压延步骤可能导致锂层密度不均

图：锂金属负极液相法工艺示意图



2.2.1 锂金属负极：应用瓶颈及改进路线

- **应用层面，锂金属负极主要的问题是锂枝晶的生长和较低的循环库伦效率，主要的优化方案是固态电池及电解质、界面修饰改性、建立骨架。**
 - 界面稳定性：**锂金属活性高，极易与固态电解质反应，不可控地生成化学结构杂乱、机械强度较低、稳定性极差的固体电解质中间相SEI，导致界面电阻增加，降低库伦效率。
 - 锂枝晶：**在充放电过程中，不稳定的SEI膜无法阻止锂金属与电解质的进一步反应，诱发锂枝晶形成，导致正负极短路，引发爆炸。
 - 体积膨胀：**在充放电过程中会发生较大的体积变化，导致电极材料的破碎和剥离，降低库伦效率。
- **制造层面，锂金属负极材料制造本身也有难点需要解决：**
 - 制造成本：**锂金属负极的制备工艺相对复杂，且对环境的要求较高。
 - 材料纯度：**锂金属负极的制备需要高纯度的锂材料，杂质的存在可能会影响电池的性能和安全性。

图：锂金属负极改性工艺

路线	方案	效果	原理
三维碳基辅助材料	将熔融的 Li 注入还原氧化石墨烯 (rGO)	比容量~3390 mAh/g	多层结构为循环过程中电极的体积膨胀提供了空间，抑制锂枝晶生成
	碳纳米纤维-石墨烯气凝胶膜	在高倍率循环 (10 mAh cm ⁻²) 时，循环 700 h 后半电池 CE 仍维持~99 %	稳定结构提升循环可逆性
三维金属基辅助材料	利用动态氢气泡作为造孔模板剂制备多孔三维 (3D) Cu	在3 mA cm ⁻² 电流密度下表现出优异的循环稳定性和绩效的电压迟滞	3D Cu 电极孔洞中的离子和电场分布均匀，有利于 Li 在凹陷的孔中成核
	高孔隙率的 3D Cu 基底材料	确保循环过程中电极材料表面稳定的 SEI，实现优异的电化学性能	孔洞内部电荷集中，诱导锂优先孔内沉积
合金负极	在 Cu 箔上负载均匀分布的 Cu ₉₉ Zn	锂的均匀沉积	与 Zn 形成 Li-Zn 合金，降低 Li 成核过电位
	褶皱石墨烯笼 (WGC) 的新型材料	FP WGC@Li全电池循环 340 周后容量无明显衰减。	笼内嵌入的 Au 纳米颗粒锂化后降低 Li 成核过电位，诱导 Li 优先沉积在 Au 颗粒周围，随着沉积容量的增加沉积锂逐渐充满石墨烯内部空间
梯度负极材料	具备电导率梯度 (CG) 性质的锂金属负极材料	电极长时间的循环稳定性	底部电子聚集的特别结构诱导 Li 优先在内部沉积
	可调控 Li 沉积的梯度复合负极材料	最高可负载 40 mAh cm ⁻² 容量的 Li。	利用电子束蒸发方式在三维镍骨架的顶部沉积绝缘的 Al ₂ O ₃ ，底部溅射一层薄薄的 Au

2.2.2 硅碳负极：迭代到第三代多孔碳CVD技术

- **硅基负极优势：完全锂化至 $\text{Li}_{4.4}\text{Si}$ 时理论比容量可达到4200mAh/g，储量大、资源成本低，是较为理想的优化方案。**但硅基负极在锂化/脱锂过程中的剧烈体积膨胀（>300%）会引发材料内部应力累积，这不仅导致活性物质的结构粉化和机械完整性破坏，还会诱发电极/电解质界面接触失效与固态电解质界面膜（SEI）的持续重构。
- **为改善膨胀问题，商用化技术已经迭代到第三代：**第一代技术路线是通过机械球磨法将硅的尺寸减少至纳米级别来减小材料的体积膨胀，第二代用硅氧替代硅碳（以及在此基础上的预锂/镁方案），第三代以多孔碳骨架来储硅。目前第一代和第二代硅基负极材料已经实现了批量化应用，占据了大量市场份额，但是从性能、成本、稳定性和潜力来看，CVD 硅碳是三条技术路线中最具有优势的方向。

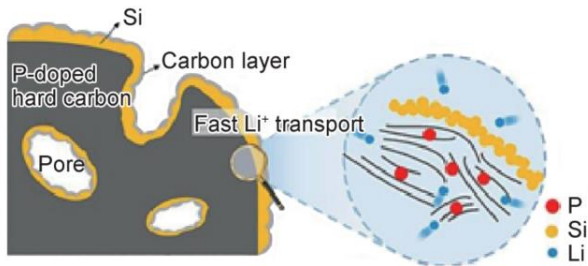
图：硅碳负极工艺对比

工艺代际	具体工艺	性能表现	优点	不足
砂磨硅碳	采用机械球磨法将硅颗粒尺寸减小至纳米级别，通过硅颗粒间的空隙缓冲体积膨胀，与碳材料混合提升导电性	粒径难以控制在 20nm 以下且易团聚，容量衰减快，首效低，难以满足高能量密度需求	工艺简单，成本相对较低，可初步缓解硅的体积膨胀问题	易引入杂质，颗粒团聚严重，循环稳定性差，无法实现小粒径（<20nm）的稳定制备
硅氧	以纯硅和二氧化硅合成一氧化硅（ SiO ）等硅氧材料作为前驱体，嵌锂时生成单质 Si 、 Li_2O 及锂硅酸盐， Li_2O 和锂硅酸盐不参与后续反应，提供应力缓冲空间	体积膨胀率降至约 118%，循环性能较第一代提升，但首次库伦效率低（约 70%），存在大量不可逆容量损失	体积膨胀显著降低，循环稳定性优于第一代，颗粒间空隙更丰富	首次循环生成大量非活性物质，导致不可逆容量损失大，首效低，能量密度提升有限
预锂 / 预锂硅氧	在第二代硅氧材料基础上，通过添加剂预锂化（掺入 Li_3N 等）、电化学预锂化（恒电位沉积）或化学预锂化（联苯锂反应）等策略进行电荷补偿，弥补首圈锂损耗	首圈库伦效率提升至 90% 左右，循环稳定性进一步改善，能量密度提高	解决第二代首效低的关键问题，提升电池能效和循环寿命	工艺复杂度高，金属锂源利用率低，规模化生产导致原料成本增加 15%-20%
CVD 硅碳	以多孔碳为骨架，通过化学气相沉积（CVD）法将硅烷气体热解，使硅纳米颗粒分散沉积在多孔碳内部孔隙中，再经碳包覆处理，利用孔隙缓冲硅的体积膨胀	首效可达 80%-90%，无需额外预锂化，循环性能优异（如 Group14 的 SCC55™ 循环超 1000 次），体积膨胀低至 20%，克容量可达 1800mAh/g	组分均匀，结构致密，工艺可控性强，循环稳定性和首效大幅提升，适合规模化生产	硅烷气体具有危险性，储存和使用需严格安全管控；成本较高，设备要求高，大规模生产仍需解决批次稳定性和成本控制问题

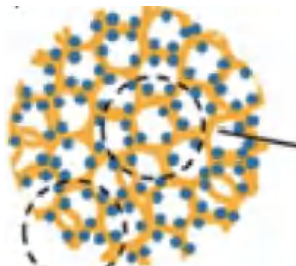
2.2.2 硅碳负极：多孔碳骨架孔径孔容决定产品性能

- **多孔碳的要求：**凭借高比表面积、丰富多级孔结构、良好导电性、较低的杨氏模量（形变不易破裂），是硅碳材料的理想载体。多孔碳的孔容、孔径需要与硅含量相匹配：孔隙过小（ $<1\mu\text{m}$ ）内部无法容纳过多纳米硅颗粒，使硅沉积在表面导致SEI膜不稳定，孔隙过大会导致碳衬底稳定性、力学性能差，容易坍塌。
- **多孔碳原材料：**常见的多孔碳基底材料包括石墨烯球、自制多孔碳基底、多孔硬碳、有机碳骨架、碳纳米管等。商用场景下一般使用树脂基、生物质基、石油焦基多孔碳。其中树脂基可精确调节孔径分布及结构，实现定制化生产，但成本较高，主要用于高端3C类场景。生物质来源较广泛、成本低，但批次稳定性差。石油焦基、沥青基成本较低，杂质含量高。

图：孔容过小的沉积效果



图：多孔碳沉积硅示意图



图：多孔碳原料对比

原料	优点	不足
树脂基	原材料纯度高，一致性能好，结构强度高，压实高；可合成球形多孔碳，有利于降低表面应力，降低膨胀率，提升循环性能	成本较高
生物质基	原材料来源广泛、成本较低，具备环保效益；物理活化成熟，可实现连续生产，环保压力小	受原材料影响，批次稳定性差；压实低
石油焦、沥青基	原材料成本低、来源广泛、成碳率高、导电性好	杂质含量较高

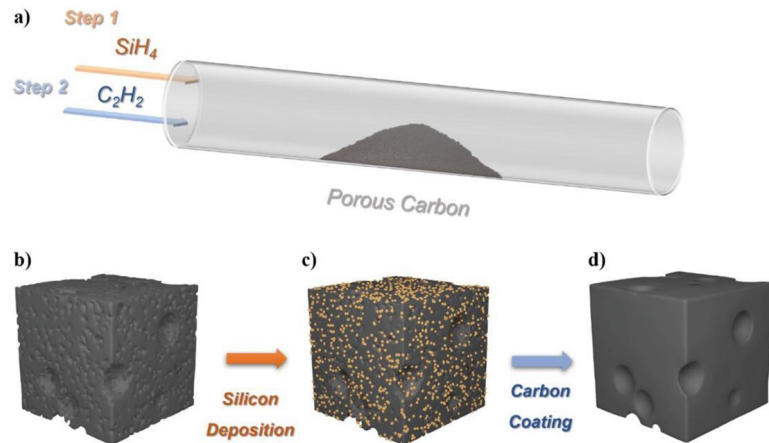
2.2.2 硅碳负极：气相硅源是商业化的优选

- 沉积过程直接影响活性物质的负载量和分布均匀性，决定硅-碳界面结构的形成质量。**沉积硅源的选择主要包括液相和气相两种：**
 - **液相硅源**主要包括四氯化硅、氯硅烷等，成本低、来源丰富，但合成过程粒径控制难度大，合成操作繁琐，不适合工业级生产。
 - **气相硅源**主要包括硅烷、氯甲基硅烷等工艺参数可控，沉积更加均匀，适合工业大规模生产，具有氧敏感性、对设备要求高、生产过程存在危险，难度较高。

图：不同硅源效果比较

分类	硅源	优点	不足
液相	四氯化硅 SiCl_4 氯硅烷 HSiCl_3	成本低，来源丰富	沉积过程工艺参数、粒径不好控制，操作繁琐，不利于工业生产
气相	硅烷 SiH_4 氯甲基硅烷 $(\text{CH}_3)_x\text{SiCl}_{4-x}$, $x=1,2,3$	沉积过程工艺参数好控制，沉积更加均匀，粒径可以调整，可大规模生产	硅烷具有氧敏感性和低利用率。成本高、对设备要求高、生产过程危险

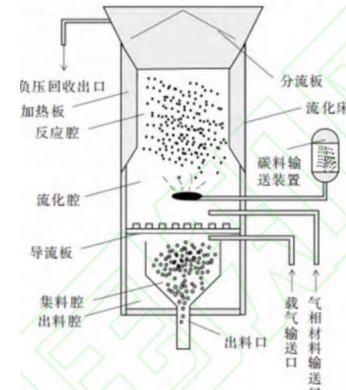
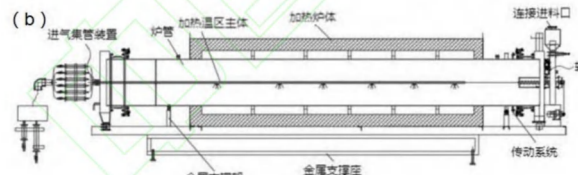
图：CVD沉积过程示意图



2.2.2 硅碳负极：CVD工艺设备和难点

图：CVD沉积设备比较

- **沉积设备的重要性：**温度场均匀性、气流分布特性、压力控制精度等核心直接影响材料沉积的均匀性、重复性及工艺安全性，设备的单次沉积容量和连续生产能力决定生产效率和成本。用于CVD 硅碳负极工业化生产的设备主要有**流化床**和**回转炉**：
- **流化床设备：**沉积均匀性较好，硅烷利用率高，并且可以实现对硅颗粒形态和尺寸的控制，确保硅碳复合材料的均匀性和稳定性。但规模化难度较大。目前仍以20 kg/炉小型化设备为主，超过100 kg/炉的流化床设备验证、工艺的优化及改进、投入量产使用仍需要时间。
 - **回转炉设备：**是其他工业常用的一种煅烧设备，技术成熟，运行稳定，安全性可靠，并且单机产能大，产品容易放大，燃料适应性好。但容易导致沉积不均匀，硅烷利用率低，产品一致性较差，最终制备的硅碳复合材料性能较差。

设备	原理	优点	不足	示意图
流化床	通过气体或液体流化固体颗粒，通过调整流体的流动速度和温度，使硅颗粒在床层中均匀分布，进而将纳米硅沉积到多孔碳中，并实现对硅颗粒的碳包覆	沉积均匀性较好，硅烷利用率高，并且可以实现对硅颗粒形态和尺寸的控制，确保硅碳复合材料的均匀性和稳定性	硅烷吸附与裂解需要高压与高温环境，要求流化床设备需要有极好的密闭性和高气压以实现小颗粒的气态包覆，操作难度高，安全问题大，规模化难度较大。目前大部分厂家用于生产 CVD 硅碳负极的流化床设备仍以20 kg/炉小型化设备为主，超过100kg/炉的流化床设备的验证、工艺的优化及改进、投入量产使用仍需要时间	
回转炉	用于煅烧的固定床设备，通过倾斜和旋转来确保物料的均匀加热。将多孔碳基体材料放入回转炉中，通入惰性气体并加热到500℃左右，引入硅烷气体进行气相沉积形成硅层，随后继续加热，通入碳源进行二次沉积形成碳层	回转炉作为其他工业常用的一种煅烧设备，技术成熟，运行稳定，安全性可靠，并且单机产能大，产品容易放大，燃料适应性好	容易导致沉积不均匀，硅烷利用率低，产品一致性较差，最终制备的硅碳复合材料性能较差	

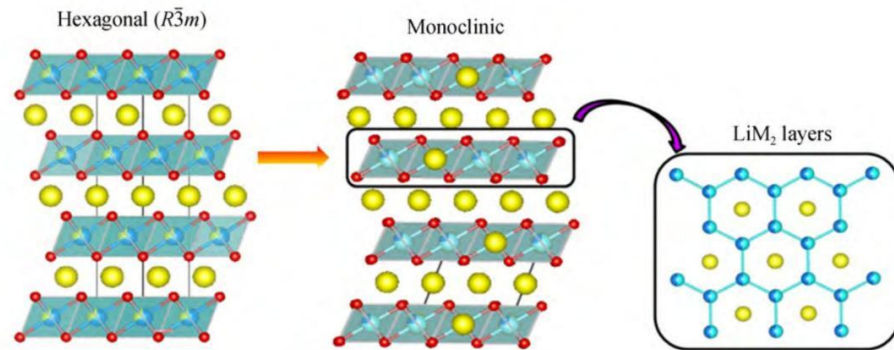
2.3 正极：高镍、富锂锰基打开能量密度空间

- **高容量、高电压是发展趋势**：正极材料是制约电池能量密度提升的重要因素，未来有望在现有体系下发展高镍层状氧化物、富锂锰基、高电压镍锰尖晶石型的正极材料。
- **富锂锰基是固态体系内有潜力的正极材料**：晶体结构由 Li_2MnO_3 （特有Li-O-Li态）和 LiMO_2 ($\text{M}=\text{Mn}/\text{Ni}/\text{Co}$) 构成，具备高比容量（过渡金属阳离子、氧阴离子共同参与电荷补偿）、高电压等优势，但存在首效低（氧阴离子反应不可逆）、倍率性能差、析氧和电压衰减问题。需要进行体相/表界面结构设计、构筑稳定快速的离子/电子传输网络、单晶化等改性。电压衰减主要由于氧空位邻近的锰离子会通过空位迁移到锂层，进一步形成尖晶石结构，即表面锰的化合价降低造成的锰溶解，而用固态电解质代替电解液的体系可以在一定程度上避免该现象。

图：正极材料容量、性能比较

正极材料	结构类型	平均放电电压 (vs. Li^+/Li)/V	理论放电比容量 /mAh/g	实际平均放电容量 /mAh/g
$\text{Li}_2\text{Mn}_2\text{O}_4$	尖晶石	4	148	110
LiFePO_4	橄榄石	2.3~2.5	170	150
LiCoO_2	层状	3.7~3.9	274	150
$\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$	层状	3.8~4.0	275	160
$\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$	层状	3.8	279	200
$\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$	层状	3.8	275	200
$x\text{Li}_2\text{MnO}_3 \cdot (1-x)\text{LiTMO}_2$	层状	3.6	—	>250

图：富锂锰基材料结构示意图



首充电压超过4.45V时， Li_2MnO_3 中的Li、O脱出（不可逆），形成大量空位，使其实际容量高于传统层状氧化物

2.4 集流体：传统集流体易与硫化物反应，抗腐蚀是关键

- **负极集流体基底选择：**传统液态电池中，铜凭借良好的导电性、延展性，是负极集流体的主流方案。但在全固态硫化物电池中，铜可能与硫化物发生反应形成合金，进而影响电池安全、循环性能。镍箔、不锈钢箔凭借抗腐蚀性受到关注，但其导电性较差，可能限制电池高倍率性能，界面兼容性也仍需优化。
- **负极集流体改性方法：**在金属集流体基础上，较多研究团队也在修饰层入手，通过涂碳、AgC等表面修饰、合金修饰、复合缓冲层修饰等手段，减少集流体和电解质的副反应，提升循环、倍率性能。

图：负极集流体基底比较

类型	原理	优势	不足
Cu 箔	作为负极集流体，提供电子传导路径，支撑负极活性材料与固态电解质接触	传统负极常用集流体，电子导电性良好，工艺成熟	与硫化物存在化学不稳定性，生成导电的 Cu_2S 枝晶，影响电池安全性和循环性；在高压力固态环境下，超薄 Cu 箔易被锂枝晶穿透，形成异质界面
Ni 箔	可用于正、负极集流体，凭借一定的电化学稳定性传导电子，连接电极与外部电路	电化学稳定窗口较宽，可双向使用，在部分固态电池体系中能维持基本电子传导	在无负极全固态电池中，会与 SEI 成分反应导致分解（虽不形成合金），增加界面阻抗，影响电池性能；与 SEs 的界面兼容性有限，长期循环可能出现接触失效
SUS 箔（不锈钢）	凭借宽电化学稳定窗口，在正、负极均能作为集流体传导电子，适应固态电池的高压力环境	在宽电压范围内电化学稳定，可同时用于正、负极	电子导电性相对较差，低于 Cu、Al 等金属箔，可能限制电池的高倍率性能；在高压下，其界面与 SEs 的接触均匀性仍需优化，可能增加传质阻力

图：负极集流体修饰方法比较

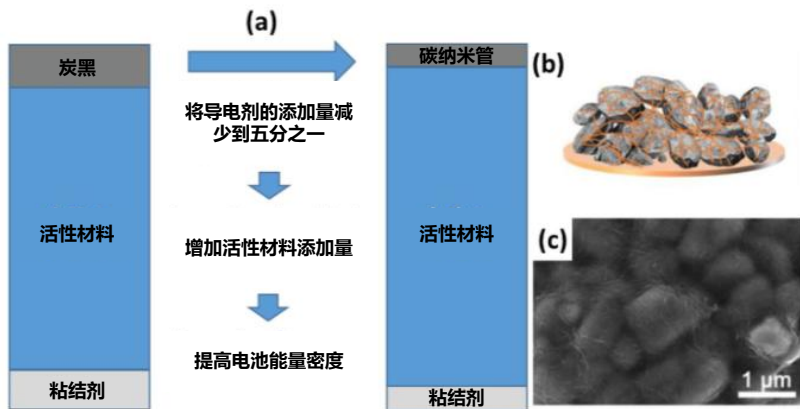
类型	原理	优势	不足
表面修饰（石墨烯类碳涂层、AgC 纳米复合涂层等）	通过表面涂层隔离集流体与 SEs，或降低 Li 核能量，调控 Li 沉积行为	减少集流体与 SEs 的副反应，提升循环稳定性	涂层制备工艺复杂，增加生产成本；部分涂层（如碳层）可能存在离子传导性不足的问题
合金层修饰（LiMg、Al_{0.4}Li_{0.6}、In_{0.5}等合金）	利用合金可逆储 Li 能力，作为 Li 金属宿主，通过合金介导的电流重分布，均匀 Li 沉积，缓解界面应力	提升循环寿命；增强界面弹性和稳定性	Li 迁移率依赖合金成分，易导致 Li 沉积不均；循环中体积变化大，可能引发合金网络不稳定；长期稳定性有待提升
复合缓冲层修饰（含 PFPE、FEC 等的弹性离子传导层）	通过弹性缓冲层缓解界面应力，构建连续的 Li ⁺ 传输路径，改善集流体与 SEs 的界面接触	缓解电极体积变化导致的机械变形，减少 SEs 断裂风险；提升 Li ⁺ 传导效率，改善高倍率性能	对材料兼容性要求高，缓冲层与集流体、SEs 的界面稳定性需进一步优化；长期循环下缓冲层可能发生降解

2.5 导电剂：单壁CNT导电性最高，机械性能强

- **单壁CNT是适配固态电池体系的优选方案：**导电剂是非活性物质，在兼顾成本和功能的条件下，尽可能降低导电剂的质量占比，提升活性物质（正极、负极）的质量占比，能提升电池的能量密度。目前在液态电池中使用较多的炭黑成本较低，但由于其零维特性，降低电极内阻的能力有限，添加比例大概在重量5%。**多壁CNT和单壁CNT的电导率分别比炭黑高3倍和10倍**，添加量低（分别为0.5重量%、0.16重量%），用单壁CNT替代炭黑，可增加活性物质重量，进而提高能量密度。

图：导电剂性能比较

图：CNT替代炭黑可提升电池能量密度



	炭黑 (CB)	碳纤维 (CF)	碳纳米纤维 (CNF)	多壁碳纳米管 (MWCNT)	单壁碳纳米管 (SWCNT)
直径 (nm)	20-100	5000-15000	60-150	3-50	1.4
长度 (μm)		10000	30-100	50-100	50-100
密度 (g / cm ³)	1.7-2.1	1.75-1.93	1.8-2.0	*2.3	*1.9
比表面积 (m ² /g)	60-800	448-902	150-200	200-600	600-800
电阻率 (Ω*cm)	3-22	*10 ⁻³	*10 ⁻³	*10 ⁻³	*10 ⁻³
粉末电导率 (S/cm)	30		3-27	60-80	300-380
热导率 (W/mk)	0.2-0.3	5-10	20	600-1500	1200
模量 (GPa)		230	400	450	1000-1200
拉伸强度 (GPa)		3.87-4.4	2.7-5.6	1-15	14-20
断裂应变		1.0-2.3%	1.50%		5%
核心优势	成本低	有一维特性	树状结构适配干法电极	高电导率，高长径比	更高电导率，高长径比，柔韧性高
主要局限	用量大、降低电阻能力有限	成本高			

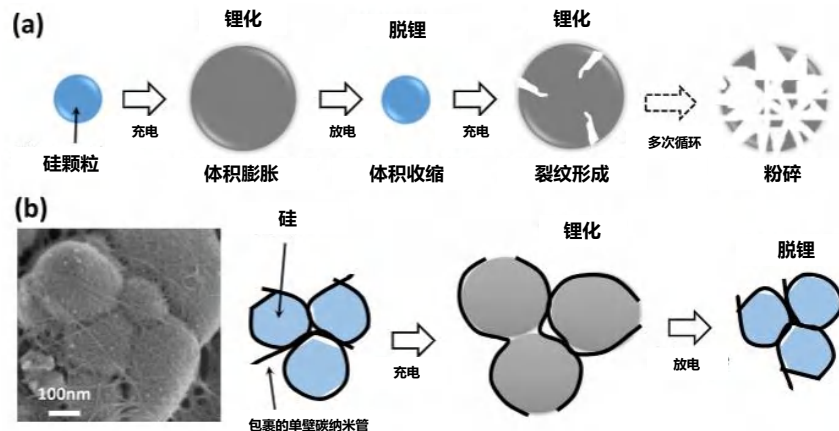
2.5 导电剂：单壁CNT对正极、负极、干法工艺均有贡献

- 导电剂可提升活性材料之间和与集流体之间的电导率，在硅碳负极中还可抑制硅锂化/脱锂过程中的膨胀，维持高导电性和结构完整性。具体而言，**单壁CNT的贡献体现在：**
- **正极：**从第一性原理出发，单壁CNT可在同等的电导率贡献下，减少对能量密度的反向影响，
- **负极：**硅本身电导率低、膨胀率大，单壁CNT有高导电性和柔韧性，可通过网状结构包裹 Si 颗粒，抑制其体积变化，同时提供稳定的导电网络。
- **干法工艺：**干法工艺使用 PTFE 作为粘合剂时，电极电导率低，且粘合剂分布不均，单壁CNT凭借高导电性，可改善干法电极的电导率，同时其结构适合制备厚电极，克服干法工艺的性能短板。

图：单壁CNT 对正极、负极、干法工艺的贡献

应用场景	现有瓶颈	改善方式
正极	1. 高镍 NCM (镍含量 > 80%) 存在低循环稳定性、低速率能力、热不稳定性；2. LiFePO ₄ 电导率低 (需要更多导电剂)	SWCNT 可包裹 NCM 颗粒形成网状导电层，提升导电性；相比炭黑用量更少，可提升活性物质重量占比
负极	硅 (Si) 作为活性材料时，在锂化/脱锂过程中体积变化大，导致电极粉碎，且硅本身电导率低	SWCNT 具有高导电性和柔韧性，可通过网状结构包裹 Si 颗粒，抑制其体积变化，同时提供稳定的导电网络
干法工艺	干法工艺使用 PTFE 作为粘合剂时，电极电导率低，且粘合剂分布不均	SWCNT 凭借高导电性，可改善干法电极的电导率，同时其结构适合制备厚电极，克服干法工艺的性能短板

图：CNT 帮助抑制硅膨胀示意图



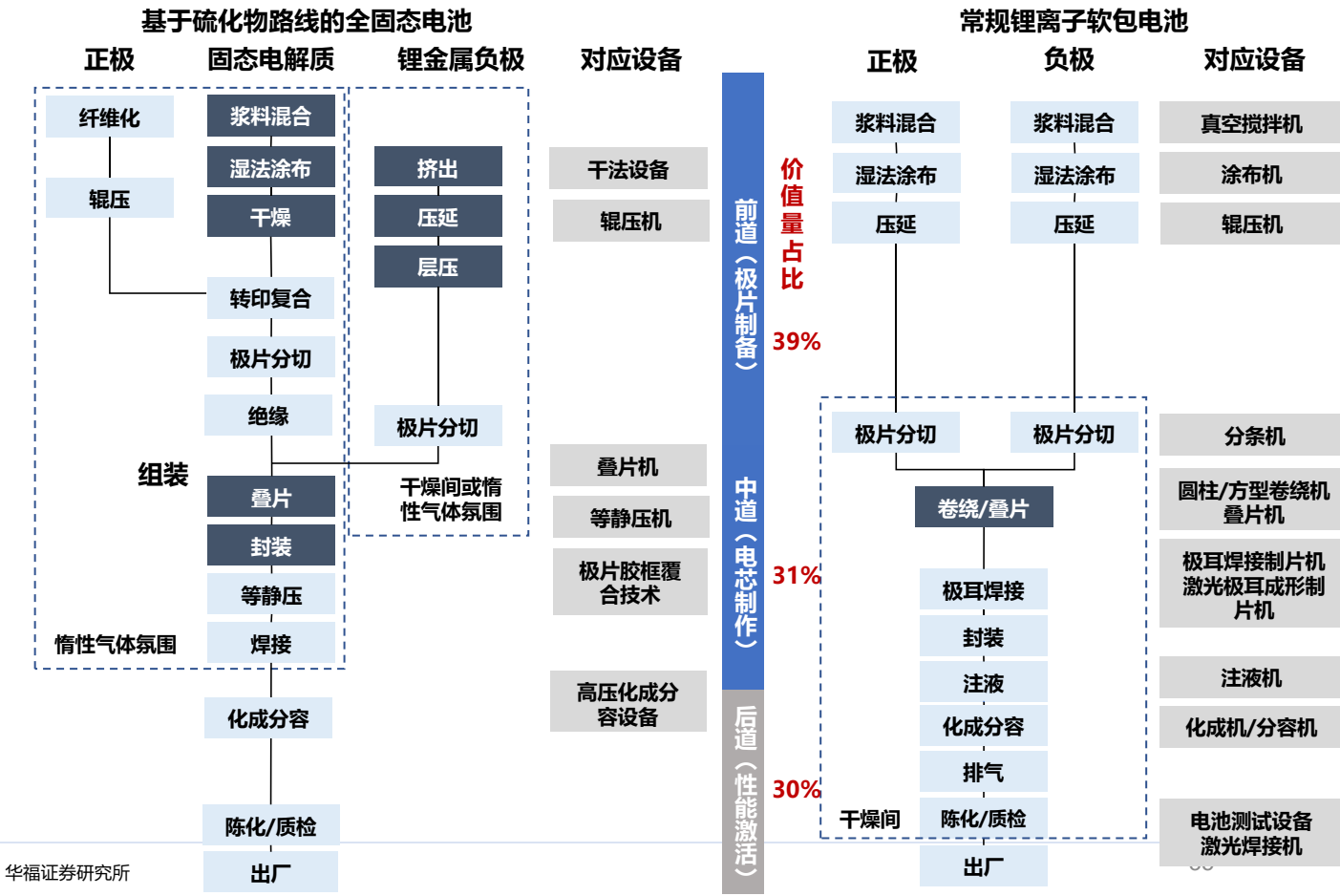
目 录

- 概览：全球发展进程、政策，产业发展阶段
- 材料：各技术路线对比、格局分析
- 设备：变化、难点、格局
- 投资建议与风险提示

3.1 全固态电池VS液态电池：工艺及设备变化主要集中在前道及中道

- **前道：干法电极技术为主要变化。**
- ✓ **工艺端：**主要变化在于干法电极及固态电解质层制备。干法电极技术无需使用溶剂，直接采用干法混浆和涂布工艺制备极片；固态电解质层额外增加了电解质膜的涂布及辊压流程。
- ✓ **设备端：**1) **干法设备：**增加了干法混合、干法涂布等设备以制备固态电解质膜；2) **辊压设备：**同时由于目前干法电极技术对辊压设备的精度、均匀度和压实密度等性能提出了更高要求。
- **中道：变化集中在叠片+极片胶框覆合技术+等静压。**
- ✓ **工艺端：**采用叠片工艺，结合极片胶框印刷和等静压技术，确保固态电解质与电极紧密接触；同时由于全固态电池无需电解液，省去了注液环节。
- ✓ **设备端：**1) **叠片机：**由于固态电池的固态电解质具有脆性，对叠片设备的精度和稳定性要求更高；2) **等静压机：**可有效改善固固界面接触，实现材料致密化、消除孔隙；3) **极片胶框覆合技术：**可有效提升相邻极片之间的粘合力。
- **后道：高压化成设备为核心变化。**
- ✓ **工艺端：**无明显变化。
- ✓ **设备端：**1) **高压化成设备：**为满足固态电池对高离子电导率的要求，化成过程趋向高压化以优化电池性能。

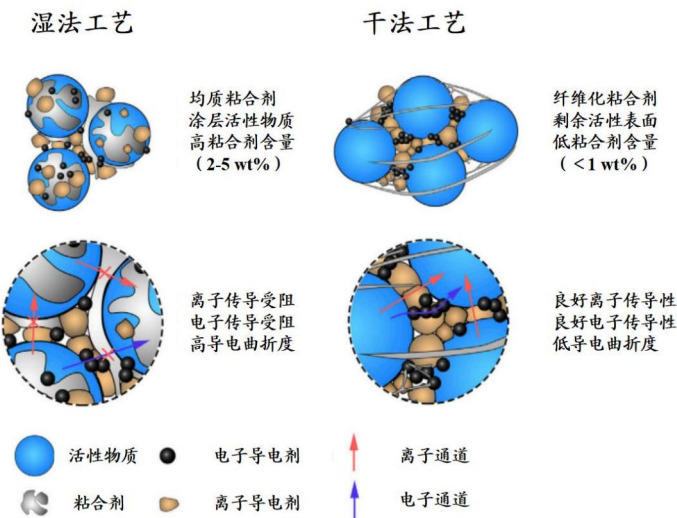
图表：全固态电池与液态电池工艺及设备对比



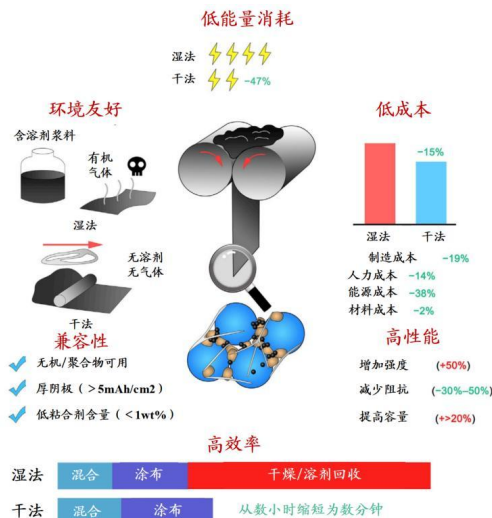
3.2.1 湿法工艺VS干法工艺：干法技术可简化制造流程，优化电极结构

- 从原理上看，湿法电极通过溶液定型蒸发形成固态电解质膜；干法电极通过将固态电解质与聚合物粘结剂分散成高粘度混合物，后施加足够压力使其成膜。从工艺流程上看，干法电极技术将固态电池的制备流程从传统的“粉末-浆料-薄膜”工艺流程革新为“粉末-薄膜”工艺流程，不仅可以大幅简化电极制造工艺，还可以重建电极的微观结构，提升电池性能，具体来看：
- ✓ **1) 优化电极结构**：由于全固态电池中的离子传输完全依赖于固固接触，离子传输将会被粘合剂层阻挡；而干法烧结的粘结剂含量较低，可保证电极良好的离子及电子传导性，同时可以降低导电曲折度，增强导电效率。
- ✓ **2) 降低成本**：由于干法技术省略了干燥及溶剂回收的过程，节省了相关的能源及人力成本，可以使得总成本下降15%，其中制造成本/人力成本/能源成本/材料成本分别下降19%/14%/38%/2%。
- ✓ **3) 减少污染**：湿法技术中含溶剂浆料干燥会释放有毒气体且增加CO₂排放，干法技术无溶剂可避免有毒气体释放，同时可有效降低CO₂排放。
- ✓ **4) 提升效率**：湿法技术总制作市场在3小时以上，而干法技术省略了干燥及溶剂回收步骤，总时长可减少16%-21%。
- ✓ **5) 兼容性更强**：湿法技术对溶剂敏感的固态电解质兼容性较差，而干法技术对溶剂兼容性较好，无机及聚合物均可使用，同时适配厚电极技术，适用范围更广。

图表：干法电极与湿法电极微观结构比较



图表：干法电极技术优势示意图



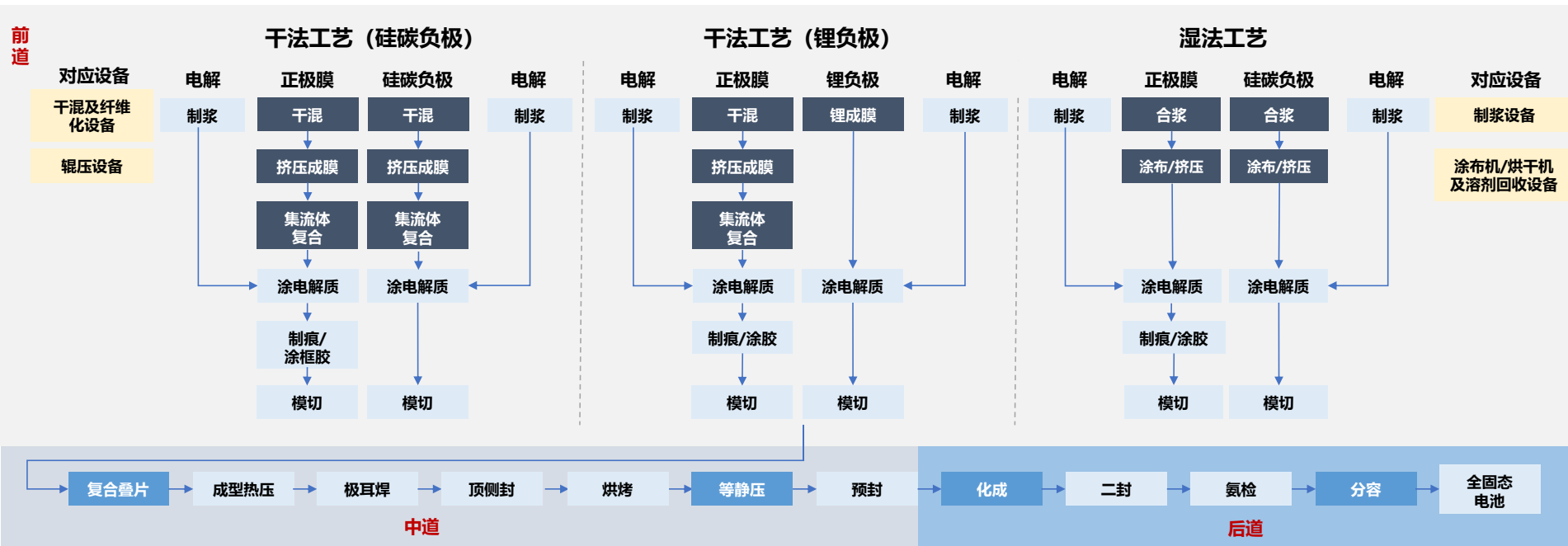
图表：干法技术及湿法技术性能比较

	湿法技术	干法技术
基本成本	有干燥/溶剂回收相关能源成本	无干燥/溶剂回收过程，降低了相关的能源及人力成本，总成本降低15%
环境影响	有毒溶剂，CO ₂ 排放带来的高能耗	无溶剂且能耗更低（每生产10kWh排放1000kg CO ₂ ）
效率（电极制造）	共7步，需要干燥以及进行溶剂回收以供超长期使用，总时长>3h	共5步，没有干燥时间，可节省16.2%-21.4%的总时长
能源消耗	总能耗约47%用于干燥和溶剂回收；每生产10kWh需耗费420Wh电能用于干燥和溶剂回收	无需干燥和溶剂回收过程；节省约38%-40%的能源成本
兼容性	与溶剂敏感的固态电解质（如硫化物、石榴石）相容性差	特定的粘结剂分布；提升倍率性能；降低孔隙率；良好的附着力(>5mAh/cm ²)

3.2.2 湿法工艺VS干法工艺：干法工艺带来的设备变化主要集中在前道

- **干法与湿法工艺及设备差别集中在前道环节。**与湿法工艺相比，干法工艺取消了涂布、烘干及溶剂回收设备，增加了干混及纤维化设备，同时对制膜所需的辊压机要求提升，具体来看：
 - ✓ **1) 制浆环节：**干法工艺取消了湿法常用的双行星搅拌机、双螺杆制浆机、循环式高效制浆机等制浆设备，增加了强力混合机、高效混合机等干混设备以及气流粉碎机、螺旋挤出机、开炼机等纤维化设备。
 - ✓ **2) 涂布&辊压环节：**干法工艺取消了湿法相关的涂布、烘干及溶剂回收设备，同时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。

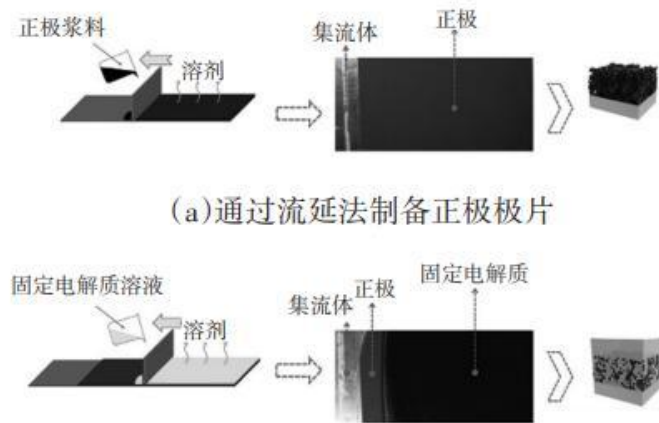
图表：干法电极和湿法电极制造工艺对比



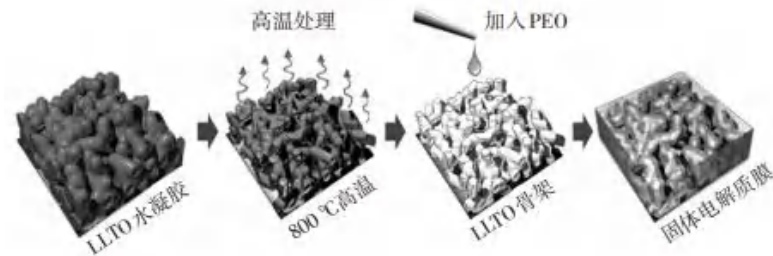
3.2.3 湿法前道工艺：成熟度高易于量产，共有三种成膜方式

- 湿法工艺成膜操作简单、工艺成熟，易于规模化生产，**量产可能性较高**。按照载体不同，湿法工艺可分为模具支撑成膜、正极支撑成膜以及骨架支撑成膜三种方式：
- ✓ **模具支撑成膜**：将固体电解质溶液倾倒在模具上，随后蒸发溶剂获得固态电解质膜，通过调节溶液的体积和浓度来控制膜的厚度；该方法常被用于制备聚合物电解质膜及复合电解质膜；为保证固体电解质膜可以完整的从模具中分离，电解质膜通常需要具备较大的厚度以提供足够的机械强度。
- ✓ **正极支撑成膜**：将固体电解质溶液直接浇在正极表面，蒸发掉溶剂后，在正极表面形成固体电解质膜；该方法常用于无机电解质膜及复合电解质膜的制备；与模具支撑成膜相比，正极支撑可以获得更薄的固体电解质膜和更好的界面接触；
- ✓ **骨架支撑成膜**：将固体电解质溶液注入骨架中，蒸发掉溶剂后，形成具有骨架支撑的固体电解质膜；该方法常用于复合电解质膜的制备。

图表：正极支撑成膜工艺示意图



图表：基于LLTO骨架的复合电解质膜合成示意图

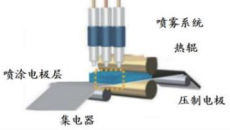
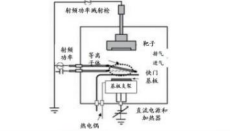
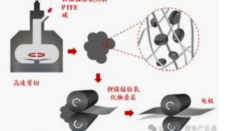
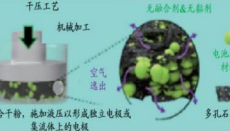
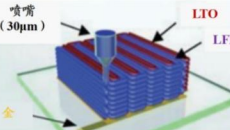


3.2.4 干法前道工艺：共六种常用工艺，纤维化和直接压制多用于固态电池

➢ 目前干法电极技术共聚合物纤维化、干法喷涂沉积、气相沉积、热熔挤压、直接压制、3D打印六种制备技术，其中聚合物纤维化及直接压制较为适用于全固态电池制备：

- ✓ **聚合物纤维化**：利用可纤维化的PTFE材料，在高剪切力的作用下使其纤维化，形成PTFE纤维网络；PTFE纤维可将活性材料颗粒链接在一起而不会覆盖其表面，再经热压后可以形成自支撑的电极薄膜；最后经过热轧工艺将点击薄膜压在涂碳集流体上得到电极。
- ✓ **干粉喷涂沉积**：通过高压气体将活性物质、导电剂和粘合剂PTFE预混合，在静电喷枪的作用下使粉末带电并喷涂在接地的集流体上，后通过热轧将粉末粘合并固定在集流体上形成电极。
- ✓ **气相沉积**：通过物理或化学方法使原料蒸发汽化，再将汽化的原料沉积到基底上制备电极；目前常见的气相沉积技术包括磁控溅射、热蒸发、脉冲激光沉积和原子层沉积等；目前上不适用于大规模的电极生产。
- ✓ **热熔挤压**：将原材料混合并加热到熔融状态，通过模具挤出成型，可制备薄膜、片材或电极片；目前双螺杆挤出机是最常用的原料匀浆设备。
- ✓ **直接压制**：将材料粉末充分混合后直接压制形成电极片的技术，无需额外操作简单有效；压制步骤通常需要通过压力机、液压机或其他专用设备。
- ✓ **3D打印**：通过将配置好的油墨按照预先的程序打印到基底上，后经过干燥固定处理即生成所需电极；该技术可根据特定应用需求定制电极的厚度和三维结构，目前尚不适用于大规模的电极生产。

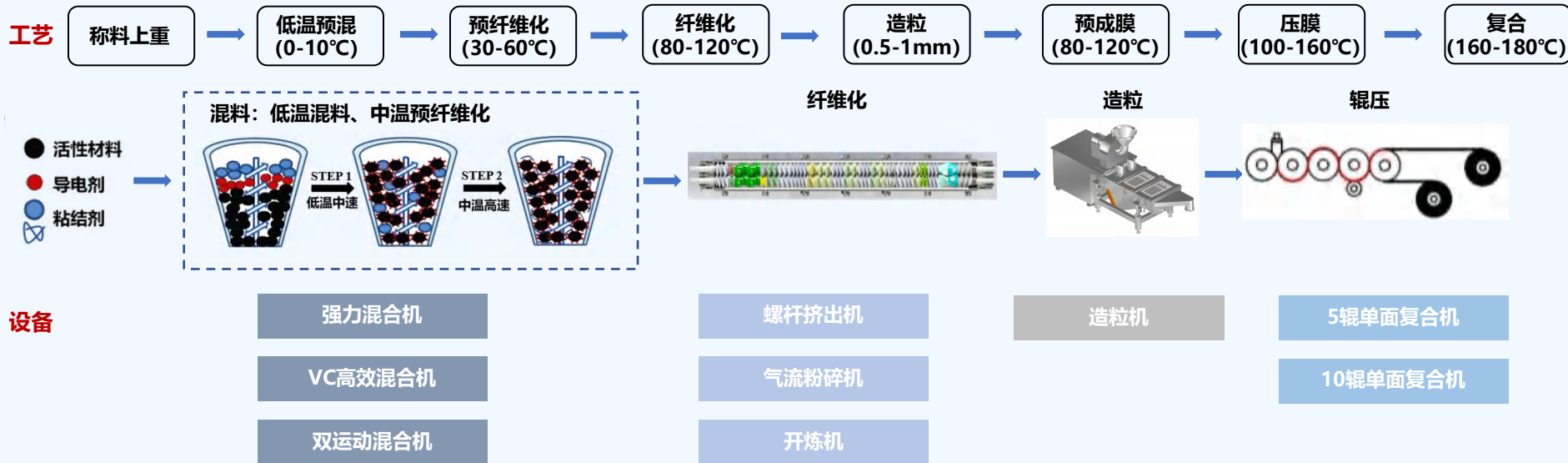
图表：六种干法电极制备原理及优缺点对比

干法电极技术	图示	技术原理	优势	劣势
聚合物纤维化		PTFE在高剪切力作用下	与现有生产线兼容，可大规模生产	正极不稳定，目前只能采用PTFE作为粘结剂
干法喷涂沉积		干法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
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，大规模量产较难实现
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，需要牺牲粘结剂
直接压制		活性材料充分混合后直接压制为电极	操作简单，粘结剂用量小	生产规模小，需要活性材料可压缩
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

3.2.5 干法前道工艺：纤维化法为目前最常用干法成膜工艺

- **纤维化法为目前应用最广的固态电池干法工艺。**纤维化法通过机械力作用，纤维状粘结剂（如PTFE）在高剪切力和适宜温度下被拉伸成具有三维网络的原纤维，将原纤维、活性材料和导电剂紧密结合，形成均匀稳定的自支撑电极膜。主要包括混料、纤维化、造粒、辊压四项流程，整个制造工艺链具备高效性和继承性。该流程可以满足对于高性能固态电池的电极均匀性和稳定性的要求，还适用于大规模量产，目前是固态电池干法制备中最常用的成膜工艺。目前宁德使用该工艺制备的电极厚度可控制在50-70 μm ，能量密度达到320Wh/kg较传统湿法工艺提升约15%，制造成本下降10%。而由于该工艺对于机械力控制要求较高，任何偏差都可能影响电池性能，设备的高效性和一致性是大规模量产的主要技术挑战。

图表：纤维化法工艺流程及对应设备



- **强力混合机**：能够灵活适应逆流或横流混合模式，旋转的混合盘能够将物料精确的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。该设备既可满足批次式生产的精确需求，又适应连续性生产的高效节奏。
- **高效混合机**：通过轴心处的叶片将物料向上翻腾，物料经飞刀组件后被充分的混合和分散。分散后的物料在重力作用下回落到腔体底部，同时物料在回落过程中经高速桨叶进行二次混合和分散，最终物料经多次混合过程完成混料。
- **双运动混合机**：结合了对流、扩散和剪切三种混合原理，实现了粉料的高效、均匀混合。通过对混料机内部运动轨迹的精准控制，该设备能够有效提升混合效果。

图表：强力混合机、双运动混合机及高效混合机产品性能及特点

设备名称

强力混合机

设备图示

产品优势

产品参数



1、精准导向物料，极大提升混合效果；

2、物料流垂直分量，强化混合的均匀性；

3、防止物料粘贴，显著提升生产效率。

名称	参数
设备功率	搅拌电机功率11kW+料桶电机功率3kW+冷热一体模温机32kW
搅拌电机转速	270~2700rpm+料桶电机转速：4-40rpm
分散盘线速度	Max.40m/s
单罐加料	Max.50L
处理能力	15-50L/桶
桶体温度	5~150±5℃
接触材料	与材料接触的材料为SUS304/SUS316L
使用环境	建议环境温度25±3℃，湿度30-90RH，无振动和电磁干扰
电源	三相380VAC±10%，频率50Hz，功率50kW
设备主机尺寸	W2050mm*D2000mm*H1600mm
重量	约1300kg

高效混合机



1、主轴采用多点支撑的支撑结构，规避了主轴挤压晃动而造成刮蹭现象且确保搅拌桨浆的离壁间隔；

2、内部采用双支撑结构设计，底部螺带采用分级可拆卸结构方便更换，可缩短90%+的维护时间，同时密封部件故障率可降低70%+。

名称	参数
高转速	≥400rpm（可定制）
高剪切	可选配高速飞刀
工作环境	可加热、可冷却、可真空、可常压
使用范围	粉体混合、液粉混合、不同粘度浆料混合分散及包覆

双运动混合机



1、对流混合确保物料均匀性；

2、扩散混合避免物料结块分层；

3、剪切混合使物料更细腻。

名称	参数
设备功率	搅拌电机功率0.75kW+料桶电机功率0.75kW
搅拌电机转速	10-75rpm+料桶电机转速：5-30rpm
搅拌叶片直径	440mm
单罐加料	Max.50L
处理能力	15-50L/桶
接触材料	与材料接触的材料为SUS304/SUS316L
使用环境	建议环境温度25±3℃，湿度30-90RH，无振动和电磁干扰
电源	三相380VAC±10%，频率50Hz，功率2kW
设备主机尺寸	W2000mm*D800mm*H1500mm
重量	约600kg

资料来源：曼恩斯特公众号，曼恩斯特官网，华福证券研究所

3.3.2 干法前道-纤维化设备：主要包括气流粉碎机、螺旋挤出机和开炼机三种

- **气流粉碎机**：压缩空气以超音速射入粉碎腔，高压气流推动活性物质与粘结剂混合物以每秒数百米的速度相互碰撞实现原纤维化，随后混合物随气流上升至分级腔，由辊压设备压制成膜；**气流粉碎机效率最高**。
- **螺旋挤出机**：混料从料口进入后，在旋转螺旋杆的推动下在料桶内壁和螺杆表面之间进行搅拌、压实、混合，物料抵达压缩段末端时经螺杆挤出退入机头速成电极膜；**螺杆挤出机良率最高**，通过精确控制螺杆转速、温度和压力，可将不良率控制在1%以内，电极膜厚度偏差从 $\pm 5\mu\text{m}$ 降低至 $\pm 2\mu\text{m}$ ，极大提升了电池的一致性。
- **开炼机**：通过两台相对旋转的辊筒产生速比，从而形成剪切力打断物料分子链，经过多次往复辊压形成电极膜；开炼机通过调节速比应对不同配方需求，速比1:1.2适合低粘度物料，速比1:1.5可应对高硬度材料。

图表：气流粉碎机示意图



图表：螺旋挤出机示意图



图表：开炼机示意图



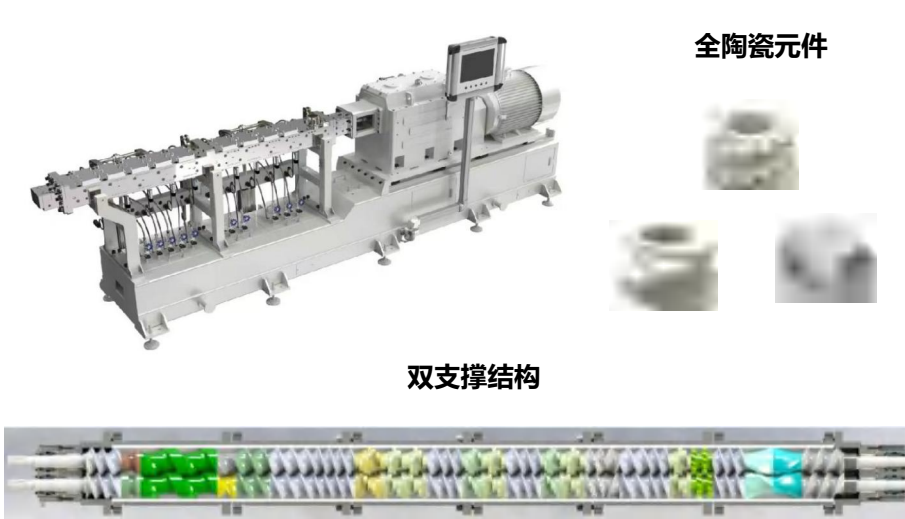
3.3.2 干法前道-纤维化设备：混合均质一体机及全陶瓷双螺旋纤维化机为创新解决方案

- **宏工科技-混合均质一体机**：如何在无溶剂条件下实现活性物质的均匀融合和纤维化，从而避免影响电机性能及寿命成为干法电极前道技术的技术难点。针对此，宏工科技与清研电子合作成立清研宏工开发混合均质一体机，拥有超高速切割和剪切技术，通过可定制的搅拌浆和分散盘，可满足不同粉体纤维化需求，具有优异的适用性和效率，目前已经实现销量。具体来看，该产品具有三大技术特性：1) 集成混合、包覆、均质、纤维化功能；2) 物料残留率 $<0.5\%$ ，解决传统高混机因残留造成的过纤维化问题；3) 保障物料晶粒结构完整性。
- **曼恩斯特-全陶瓷干法双螺旋纤维化机**：使用全陶瓷元件且螺杆为双支撑结构，具有以下优点：1) 安全性更高：固态电池使用硫化物材料时对金属设备有腐蚀，后续维修更换成本较高，同时金属碎屑对电芯性能影响较大，该产品使用双螺杆内腔、螺纹元件实现全陶瓷化，可有效避免金属异物引入，降低电芯内部短路等安全隐患；2) 使用寿命长：由于陶瓷材质具有卓越的耐磨性，使用寿命 ≥ 18000 小时；3) 模块化积木设计便于拆卸：产品采用模块化积木设计便于拆卸清洗，同时可灵活适配小试、中试到量产不同阶段需求。

图表：宏工科技混合均质一体机示意图



图表：曼恩斯特全陶瓷干法双螺旋纤维化机示意图



3.3.3 干法前道-辊压设备：干法工艺对辊压设备性能提出更高要求

- **干法辊压设备主要通过多级连辊机及热轧技术提高性能。**干法环节对辊压设备的力度、精度和均匀性提出更高要求，尤其对于正极，由于正极粉末易碎，需要更大的压力来压紧。相比于湿法辊压设备，干法辊压设备主要有以下变化：**1) 采用多辊连轧：**传统湿法设备一般采用二辊辊压机辊压极片，而干法设备辊压机辊数增加到10-20根，采用多辊连轧技术可精确调节轧辊辊缝间隙，同时具备自动切边和纠偏功能，有效提升膜片的边缘整齐度和收卷对齐度，保证成膜质量稳定；**2) 采用热辊技术：**相比于传统湿法辊压设备中加热辊为备选项，干法辊压设备一般采用热轧；一方面可减少极片在轧制后的材料反弹，降低电池极片的变形抗力，另一方面由于极片在加热过程中处于熔融状态，可以增加活性物质与流体之间的粘合力，减少电池在充放电循环过程中掉粉情况的发生，可有效提高电池循环寿命。

图表：湿法辊压设备及干法辊压设备性能对比

名称	湿法辊压设备	干法辊压设备
图示		
辊数量	2辊	4-8辊/10-20辊
轧辊直径	Φ500-1500mm	Φ150-500mm
轧辊宽度	Max.1200mm	Max.1200mm
机械速度	100m/min	100m/min
极片宽度	Max.1200mm	Max.1000mm
施压方式	伺服阀液压站/双路恒压液压站	伺服阀液压站/双路恒压液压站
是否加热	选配加热辊/双主机连轧/预分切	加热辊

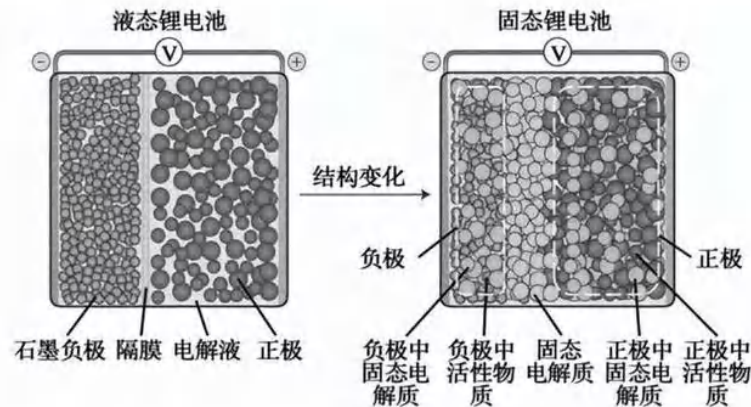
图表：纳科诺尔热辊产品性能领先

公司名称	量产产品 最大轧辊尺寸	最高稳定生产速度	极片厚度精度	热辊辊面温度均匀性
纳科诺尔	Φ900-1500mm	120-140m/min	±1.5μm	±1℃
赢合科技	Φ900-1500mm	100-120m/min	±1.5μm	≤±3℃
先导智能	Φ900-1500mm	120m/min	±1.5μm	-
海裕百特	Φ900-1500mm	100m/min	±1.5μm	≤±3℃
浩能科技	Φ900-1300mm	100m/min	±1.5μm	±3℃

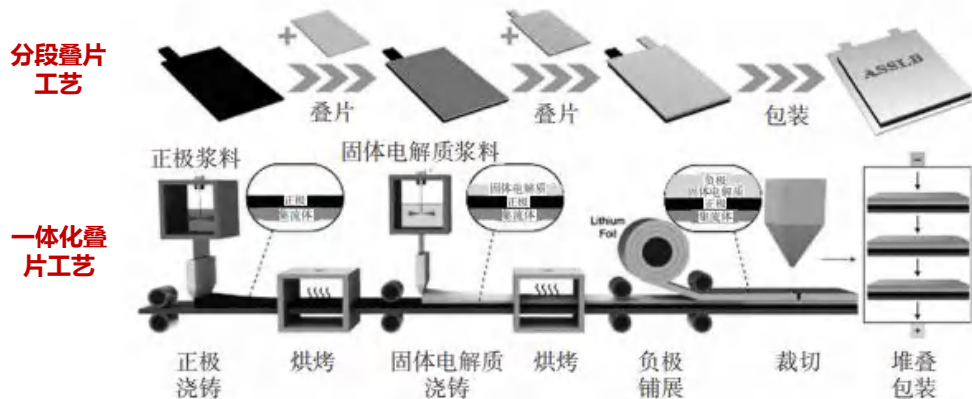
3.4.1 固态中道-叠片设备：精度要求更高，分为分段及一体化两种工艺

- **固态电池无需卷绕，对叠片机定位精度要求更高。**传统液态电池可采用卷绕或叠片后注液，而固态电池由于采用固态电解质脆性高，卷绕技术并不适用，仅采用叠片工艺以避免机械损伤、确保电芯结构稳定，从而提高电池安全性。全固态电池要求叠片机定位精度提出更高要求，需达 $\pm 2\mu\text{m}$ ，而传统液态电池叠片及定位精度通常为 $\pm 10\mu\text{m}$ 。
- **叠片工艺分为分段和一体化两种工艺。**1) **分段叠片工艺（先裁切后叠片）：**沿用液态电池叠片工艺，将正极、固态电池电解质层和负裁切成指定尺寸后按顺序以及叠片后进行包装；2) **一体化叠片工艺（先叠片后裁切）：**在裁切前将正极、固态电解质膜和负极压延成三层结构，按尺寸需求将三层结构裁切成多个“正极-固体电解质膜-负极”单元，并将其堆叠在一起后进行包装。使用该工艺需注意，由于裁切前固体电解质膜已经与正负极结合，裁切时易发生正负颗粒混合，从而出现短路风险。

图表：液态锂电池与固态锂电池结构差异



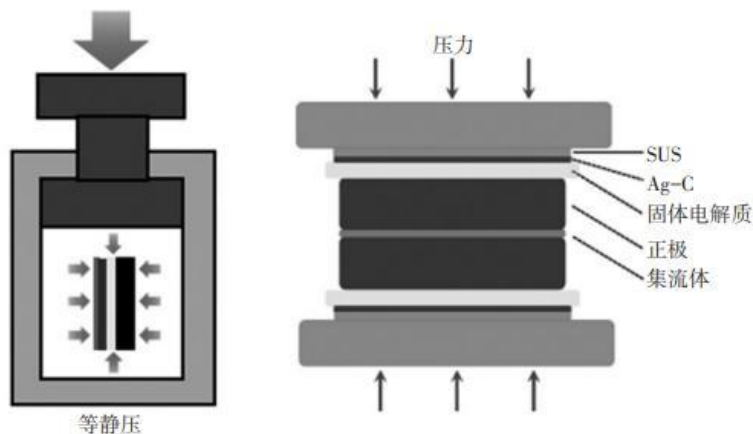
图表：分段叠片工艺及一体化叠片工艺示意图



3.4.2 固态中道-等静压设备：固态电池独家引入工艺，共有冷/温/热三种技术

- **等静压为固态电池独家引入工艺，可有效优化固-固接触。**固态电池由于采用固态电解质，对电极与电解质之间“固-固接触”产生优化需求，同时理想的固态电池对致密性和均薄性提出更高要求，需要额外引入等静压工艺。等静压主要利用帕斯卡原理，在密封容器中以高压流体为介质，将其产生的静压力均匀的向各个方向传递，对加工件进行均匀加压。在固态电池中引入等静压工艺，可以是固态电池的电极和电解质材料紧密机构和在一起，优化界面接触，同时可以精准控制电极密度、厚度以及孔隙率等关键参数，同时降低内 温等静压及热等静压技术对应标准温度分别为20°C/150°C及2000°C，由于热等静压温度较高选择氩气/氮气等气体介质，冷等静压和温等静压均使用液体介质。除压力容器外，冷等静压和问等静压系统相对简单，由各种阀门、增压器、泵和控制面板组成；而热等静压涉及高温，设备更加复杂，需要有额外子系统保证安全。从三种方式的对比来看，冷等静压单次循环时间最短、设备成本最低；温等静压可以兼顾焦虑和材料致密化要求；热等静压致密性能优异单成本较高，难以满足大规模生产需求。

图表：全固态电池等静压示意图



图表：三种等静压技术参数对比

指标	冷等静压 (CIP)	温等静压 (WIP)	热等静压 (HIP)
压力介质	液体-水	液体-油/水	气体-氩气/氮气
标准温度 (°C/°F)	20/68	150/302	2000/3632
标准压强 (Mpa/ksi)	600/87	500/72.5	207/30
循环时间	短	中	长
设备成本	低	中	高

3.4.3 固态中道-极片胶框覆合技术：可有效提升相邻极片粘合度，避免正负极片短接

- **利元亨提出独家专利，可有效提升相邻极片间的粘合度且避免正负极短路。**目前在固态电池生产过程中，当极片卷料完成裁剪工序后与其极片进行复合制备固态电池电芯时，难以保证相邻极片之间具有高的粘合度，导致固态电池电芯质量下降。针对这一问题，利元亨申请固态电池极片胶框覆合方法专利：将电极片放在胶框内周，通过挤压使得片状电极膜与胶框内缘膜充分粘合，可避免在叠片过程中正负极片电极膜短接的问题，同时可使得相邻极片电极膜连接稳固。

图表：极片胶框覆合技术工序图

S1步骤：在料带膜上设置固态或半固态的胶框。



S2步骤：预先将长条状电极膜切成多片结构，形成片状电极膜，将片状电极膜置于胶框内周，并使片状电极膜的外缘与胶框的内缘仿形配合，形成极片电极膜。



S3步骤：对形成于料带膜表面的极片电极膜进行压合，以使受积压的胶框的内缘部分向内延伸以黏连片状电极膜的外缘部分，和/或以

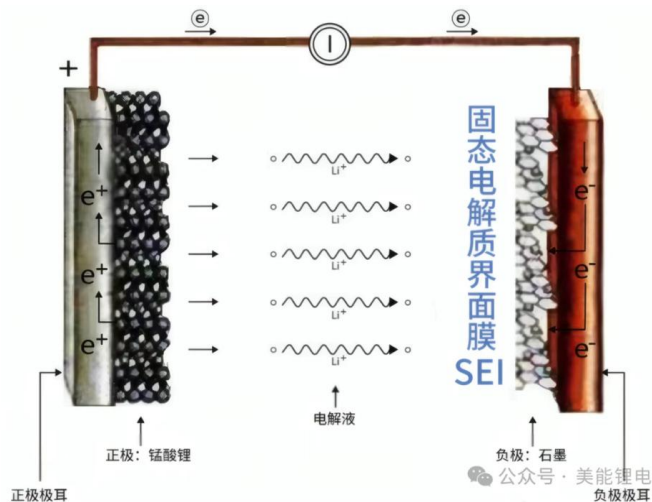


S4步骤：将料带膜从贴合有胶框的片状电极膜上剥离。

3.5.1 固态后道-高压化成设备：固态对化成设备压力要求更高以增加接触

- **化成是对注液封装后的电池进行首次充放电**，**固态电池对化成压力要求更高以增加固固接触面积**。化成是对注液封装后的电池进行首次充放电的过程，一方面为了激活电极材料，石墨负极通过锂离子嵌入完成从天然石墨到锂碳层间化合物的相变，另一方面在负极表面生成固体电解质界面膜（Solid Electrolyte Interface, SEI），SEI膜允许锂离子通过但阻止电子和溶剂分子穿透，从而保护负极不被持续腐蚀，同时减少活性锂损耗。由于固态电池采用固态电解质，电解质与电极之间存在固-固接触界面，在微观层面上存在大量空隙，会导致接触不良；高压压制可增大有效接触面积，促进固态电解质与电极之间的物理和化学结合，因此对化成设备的压力提出更高要求。传统锂电池的化成压力通常在3-10吨，而固态电池的化成压力要求为60-80吨，对高压化成装置提出了更高要求。

图表：化成工艺原理图



图表：化成工艺步骤图

步骤一：开口充电。采用小电流（如0.05C-0.15C）阶梯式充电，促进电解液中添加剂反应生成气体排出，避免后续鼓包或短路。在此阶段形成致密SEI膜。

步骤二：闭口充电。逐步增大电流（如0.5C-1C），使SEI膜从致密过渡到疏松，平衡离子传导和稳定性。需严格控制截止电压（如3.65V-4.0V），防止过充导致锂枝晶生长或正极分解。

步骤三：闭口老化。充电后静置，使SEI膜成分与结构趋于稳定。高温老化（如60°C-80°C）可加速反应，但需避免SEI膜热分解。

步骤四：闭口放电。以接近充电电流的速率放电，完成电池活化。放电深度需控制在安全范围内（如不低于1.5V），防止过放损坏极片。

图表：先导智能固态电池高压化成解决方案



3.5.2 固态后道-激光/超声波极耳焊接设备：多采用激光及超声波焊接

- **激光焊接**：其原理为通过产生高能量密度的激光束，在极小的区域内实现快速、精准的焊接，激光焊接具有以下优势：**1) 精度更高**：可以精确对准极耳焊接部位，避免传统焊接过程中的焊接偏移问题；**2) 可靠性高**：通过精准控制激光束的聚焦直径和能量分布，可以在极小的区域内实现高质量焊接，确保极耳与电极之间牢固连接，同时可以有效避免焊接不均匀、虚焊等问题，显著提高焊接可靠性；**3) 高效率**：可以在短时间内完成高质量焊接操作，速度远高于传统焊接工艺；**4) 自动化**：可以通过计算机控制系统实现精确的焊接参数设置和自动化操作，可以提高生产效率同时降低人工操作带来的误差，确保焊接的一致性。
- **超声波焊接**：其原理为通过高频振动摩擦生热（频率15-40kHz），实现材料分子层面的结合，超声波焊接具有以下优势：**1) 高效节能**：焊接周期仅需0.3秒，能耗较激光焊接降低70%；**2) 无热损伤**：属于“冷焊接”，避免高温破坏电极材料和隔膜，保障电池能量密度与安全性；**3) 多材料兼容**：可焊接铜铝异种金属、超薄箔材（低至0.05mm）、高分子复合膜等新型材料；**4) 零污染排放**：无烟尘、无焊渣，符合多种环保标准。

图表：大族激光激光焊接机示意图



图表：硕克超声波焊接机示意图



3.6 核心固态电池设备公司进展：固态电池设备先行，核心厂商已开始批量出货

公司	前道					中道				后道			典型设备及进展
	干混设备	纤维化设备	涂布设备	辊压设备	激光设备	叠片设备	电解质转印设备	等静压设备	极片胶框覆合	高压化成设备	激光/超声波焊接设备	电池检测	
宏工科技													创新性推出混合均质一体机。
纳科诺尔													已开发锂带辊压、电解质成膜、转印等设备，超高压、等静压设备在研发中，目前已实现关键设备出货。
曼恩斯特													推出全陶瓷双螺杆纤维化、14辊双面压延、湿法电解质薄涂三大核心自研设备。
先惠技术													公司与清陶能源合作研发的干法辊压设备已经交付，并进入精密调试阶段。
信宇人													干法电极设备样机已成功研制，由搅拌设备和干法涂布设备组成，目前处于参数调试和技术验证阶段。
海目星													目前布局电池前道极片的激光设备、叠片以及控制层负极制程等设备，目前已经签约了2GWh固态电池量产线。
金银河													目前干法涂的连续成膜及覆合成极片设备已具备接单能力，后续从有料、纤维化到极片的高速连续量产线预计25年完成量产线；25年3月，公司与Microvast微宏集团签订“全球锂电基地产线和固态电池联合开发战略合作协议”，固态设备进展将加速。
赢合科技													公司方案覆盖湿法及干法两条路径，提供包括固态湿法涂布、固态湿法辊压、固态电解质转印、干法分散及纤维化一体机、固态干法成膜及复合一体设备等，25年6月已经向国内某头部电池客户企业发货一批核心固态电池设备。
联赢激光													首条固态电池生产线已于3月发货，共6台设备，软包模式和方壳模式都有做。
星云股份													已针对下游固态电池领域客户的主要路线布局，并已对头部电池企业完成批量交付。
先导智能													已率先打通全固态电池量产线全线工艺设备环节，并于25年6月向一家全球领先的电池制造企业交付多套固态电池核心设备，包括复合转印设备与高速叠片机。
利元亨													25年7月公司全固态电池整线设备开始陆续交付国内头部客户。

目 录

- 概览：全球发展进程、政策，产业发展阶段
- 材料：各技术路线对比、格局分析
- 设备：变化、难点、格局
- 投资建议与风险提示

➤ **建议关注：**

- **主线1：关键材料：**【硫化物电解质】当升科技、国瓷材料、容百科技、泰坦股份、道氏技术等；【硫化锂】上海洗霸、厦钨新能、恩捷股份、海辰药业、华盛锂电、光华科技等；【锂金属负极】中一科技、天铁科技、道氏技术、英联股份等；【硅碳负极】璞泰来、贝特瑞、杉杉股份、元力股份、道氏技术等；【辅材】博苑股份、日播时尚、海辰药业、松井股份、天奈科技等；【集流体】德福科技、诺德股份、嘉元科技、中一科技、远航精密等。
- **主线2：设备先行，关注固态电池增量设备：**先导智能、纳科诺尔、宏工科技、联赢激光、利通科技、锡装股份、科新机电、荣旗科技、海目星、星云股份、信宇人、德龙激光、曼恩斯特、璞泰来、利元亨、赢合科技、奥特维等。
- **主线3：差异化竞争的电池企业：**宁德时代、亿纬锂能、国轩高科、欣旺达、孚能科技、金龙羽、豪鹏科技、珠海冠宇、德尔股份、冠盛股份等；

➤ 技术发展不及预期

- 固态电池技术虽有进展，但仍在完善阶段，未来在提高电池能量密度、循环寿命、充电速度等性能上，能否持续突破存疑。

➤ 固态电池量产不及预期

- 固态电池生产工艺复杂，目前尚未大规模量产，企业在量产时会面临技术工艺、设备调试、质量控制等挑战，量产进度可能延迟。

分析师声明

本人具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格并注册为证券分析师，以勤勉的职业态度，独立、客观地出具本报告。本报告清晰准确地反映了本人的研究观点。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。

一般声明

华福证券有限责任公司（以下简称“本公司”）具有中国证监会许可的证券投资咨询业务资格。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，本公司不对任何人因使用本报告中的任何内容所引致的任何损失负任何责任。

本报告的信息均来源于本公司认为可信的公开资料，该等公开资料的准确性及完整性由其发布者负责，本公司及其研究人员对该等信息不作任何保证。本报告中的资料、意见及预测仅反映本公司于发布本报告当日的判断，之后可能会随情况的变化而调整。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。本公司不保证本报告所含信息及资料保持在最新状态，对本报告所含信息可在不发出通知的情形下做出修改，投资者应当自行关注相应的更新或修改。

在任何情况下，本报告所载的信息或所做出的任何建议、意见及推测并不构成所述证券买卖的出价或询价，也不构成对所述金融产品、产品发行或管理人作出任何形式的保证。在任何情况下，本公司仅承诺以勤勉的职业态度，独立、客观地出具本报告以供投资者参考，但不就本报告中的任何内容对任何投资做出任何形式的承诺或担保。投资者应自行决策，自担投资风险。

本报告版权归“华福证券有限责任公司”所有。本公司对本报告保留一切权利。除非另有书面显示，否则本报告中的所有材料的版权均属本公司。未经本公司事先书面授权，本报告的任何部分均不得以任何方式制作任何形式的拷贝、复印件或复制品，或再次分发给任何其他人，或以任何侵犯本公司版权的其他方式使用。未经授权的转载，本公司不承担任何转载责任。

特别声明

投资者应注意，在法律许可的情况下，本公司及其本公司的关联机构可能会持有本报告中涉及的公司所发行的证券并进行交易，也可能为这些公司正在提供或争取提供投资银行、财务顾问和金融产品等各种金融服务。投资者请勿将本报告视为投资或其他决定的唯一参考依据。

投资评级声明

类别	评级	评级说明
公司评级	买入	未来6个月内，个股相对市场基准指数涨幅在20%以上
	持有	未来6个月内，个股相对市场基准指数涨幅介于10%与20%之间
	中性	未来6个月内，个股相对市场基准指数涨幅介于-10%与10%之间
	回避	未来6个月内，个股相对市场基准指数涨幅介于-20%与-10%之间
	卖出	未来6个月内，个股相对市场基准指数涨幅在-20%以下
行业评级	强于大市	未来6个月内，行业整体回报高于市场基准指数5%以上
	跟随大市	未来6个月内，行业整体回报介于市场基准指数-5%与 5%之间
	弱于大市	未来6个月内，行业整体回报低于市场基准指数-5%以下

备注：评级标准为报告发布日后的6~12个月内公司股价（或行业指数）相对同期基准指数的相对市场表现。其中，A股市场以沪深300指数为基准；香港市场以恒生指数为基准；美股市场以标普500指数或纳斯达克综合指数为基准（另有说明的除外）。

诚信专业 发现价值

联系方式

华福证券研究所 上海

公司地址：上海市浦东新区滨江大道5129号陆家嘴滨江中心N1幢

邮编：200120

邮箱：hfyjs@hfzq.com.cn

