

硫化物未来潜力最大，开启电池发展新纪元

--固态电池深度系列二

电新首席证券分析师：曾朵红
执业证书编号：S0600516080001
联系邮箱：zengdh@dwzq.com.cn

电动车首席证券分析师：阮巧燕
执业证书编号：S0600517120002
联系邮箱：ruanqy@dwzq.com.cn

联系电话：021-60199793

2024年12月1日

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

- ◆ **国内24年开始加大支持力度，全固态电池产业化节奏加快。**国内液态电池技术大幅领先于海外，海外加码全固态电池希望弯道超车，频繁宣传后续量产计划，引发国内危机意识，24年政府加大相关研发和支持力度，国内全固态电池产业化节奏加快。产业端看，全固态电池的材料体系基本定型，主流路线为高镍+锂磷硫氯+锂金属体系，安全性大幅提升，能量密度400-500wh/kg，但由于工艺、设备并不成熟，目前电芯尺寸较小（不超过20Ah），循环次数不够（600-700次），快充性能有限（低于2C），成本较为昂贵（4-5元/wh），制约全固态电池商业化进程。节奏方面，半固态电池技术先行，23-24年开启小批量装车发布，全固态电池预计27年开启小批量量产，主要以示范运营为主，规模在0.5GWh左右，目标成本降至2元/wh，随着规模效应释放，成本的持续下降，30年规模有望达3-5GWh，35年规模有望突破300GWh。
- ◆ **硫化物路线未来潜力最大，头部电池厂商均重点布局，其中前驱体硫化锂为降本关键。**固态电解质是实现全固态电池性能的关键，其中硫化物发展潜力最大，因为其离子电导率最高，质地软容易加工，成为主流厂商的重点布局路线。硫化物电解质中，锂磷硫氯具备成本优势，成为量产主流选择，目前报价1-4万元/公斤，降本的关键在于前驱体硫化锂，多因素导致其价格昂贵，目前报价在500万元/吨以上，后续随着工艺、设备突破后，成本有望大幅降低。此外，全固态电池的工艺难点在于前道成膜环节，对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大幅提升，要求为微米甚至纳米级别，目前生产设备仍不成熟，无法达到量产要求，需要定向开发相关设备和技术，才能保证电池性能的一致性。整体看，全固态电池量产需解决两大问题，持续降低固态电解质的成本，提升生产设备的精度和能力，未来突破后有望开启商业化进程。
- ◆ **投资建议：**产业链看，全固态电池技术壁垒更高，正极厂商横向拓展固态电解质环节，此外干法工艺、导电剂、锂金属、硅碳负极等也迎来机遇，建议关注几条主线：①电池推荐**宁德时代**（凝聚态+硫化物）、**比亚迪**（硫化物）；②电解质推荐**容百科技**（正极+硫化物）、**当升科技**（正极+硫化物）、**湖南裕能**（正极+电解质）、**天赐材料**（硫化物+硫化锂）、**恩捷股份**（硫化物+硫化锂），重点关注**厦钨新能**（正极+硫化锂），关注**三祥新材**（氧化物/卤化物）等；③添加剂推荐**天奈科技**（导电剂）、**元力股份**（硅碳）等；④设备推荐**纳科诺尔**（干法电极）、**曼恩斯特**（陶瓷化+干法电极）、**先导智能**（固态整线）、**璞泰来**（前中段+电解质），关注**赢合科技**（前中段）等。
- ◆ **风险提示：**新技术量产进度不及预期；行业发展不及预期；行业竞争加剧的风险。



- Part1:全固态电池大幅提升安全性，突破后有望替代液态电池
- Part2:海外抢先押注全固态电池，国内加快引导行业发展
- Part3:硫化物未来潜力最大，为主流厂商重点布局路线
- Part4:硫化物路线存在诸多难点，带来材料/工艺/设备全新变化
- Part5:全固态电池取消隔膜/电解液，新增固态电解质/锂金属
- Part6:国内、海外相关公司近况更新
- Part7:投资建议&风险提示

PART1 全固态电池大幅提升安全性，突破后有望替代液态电池

- ◆ **液态电池**为正极+电解液+隔膜+负极结构，为目前大规模量产形态；
- ◆ **半固态电池**为正极+电解液+隔膜（涂覆固态电解质）+负极结构，和液态电池结构一致，被认为是过渡态技术；
- ◆ **全固态电池**为正极+固态电解质片+负极结构，电池整体为三明治结构，被认为是未来电池终极技术；
- ◆ **液态电池到全固态电池**，核心是将**电解液+隔膜**替换为**固态电解质**。**电解液**相当于汽油，汽油浸润性好，但容易燃烧，安全性不足；**固态电解质**相当于沙子，安全性大幅提升，但是浸润性差。**电解液到固态电解质**，相当于沙子去替换汽油，这是一把双刃剑，必然带来一些优势，但也会引入避免不了的劣势。

图 液态/固态电池结构示意图



图 液态电池到全固态电池，核心是将电解液+隔膜替换为固态电解质

电解液 >> 汽油



固态电解质 >> 沙子



- ◆ **传统液态电池**中，电解液相当于汽油，汽油浸润性好，对应**循环次数高**，**快充性能好**，但容易燃烧，对应的是**安全性不足**，**能量密度有限**；
- ◆ **固态电池**中，固态电解质相当于沙子，大幅提升**安全性**，打破**能量密度瓶颈**，但是浸润性差，有固-固界面问题，对应的是**循环次数低**，**快充性能差**。
- ◆ 液态电池到全固态电池，会提升安全性、提升能量密度，但是降低循环次数和快充性能，电池终极技术或为**一把双刃剑**。

图 全固态电池不惧破损，剪开后还可使用（安全性相关）



图 固-固接触 VS 固-液接触（循环、快充相关）

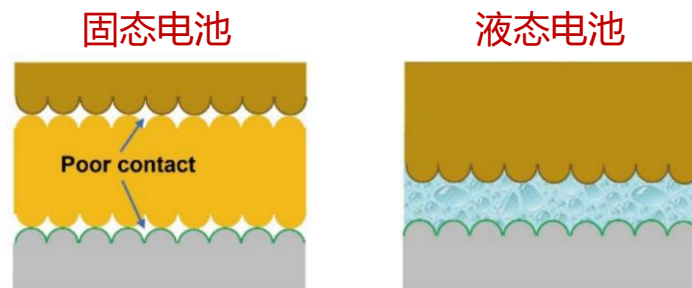


图 全固态电池打开能量密度上限（能量密度相关）

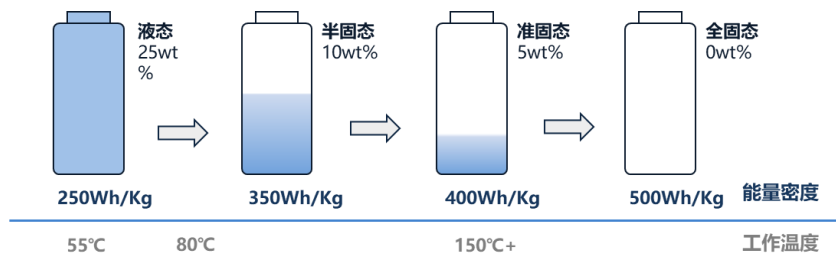
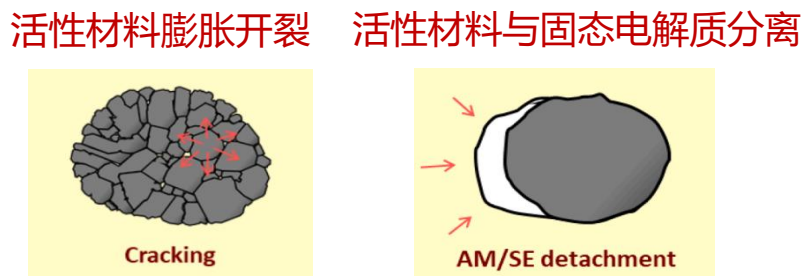


图 电极材料膨胀造成应力堆积（循环相关）



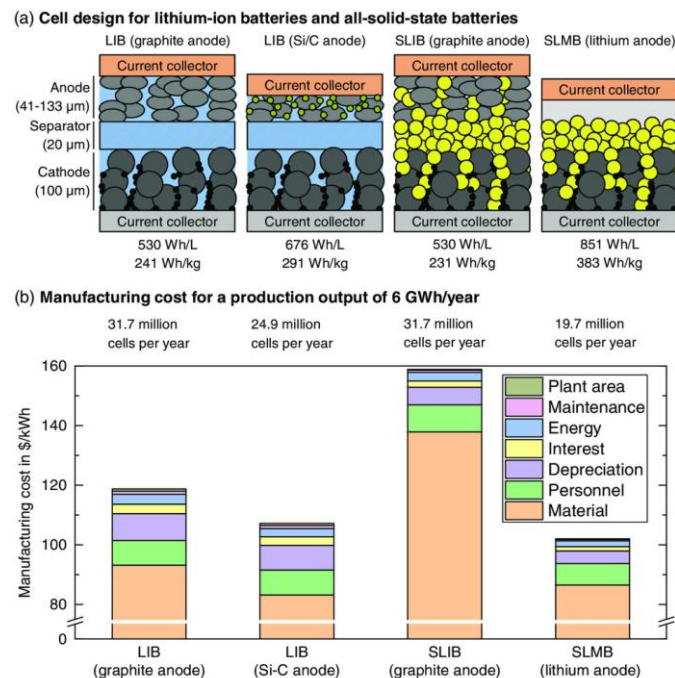
固态电池：有诸多本质的难点，制约中期商业化进程

- ◆ 固态电池虽然具备安全性、高能量密度的终极标签，但是由于固-固界面的引入，离子电导率低、界面稳定性差，带来循环、快充等问题，制约其商业化进程。
- ◆ **循环寿命差**：液态电池可达1.5万次，固态电池仅为几百次；
- ◆ **快充性能差**：液态电池已达4-6C，固态电池部分可达2-3C，但大部分基本在0.5C以下；
- ◆ **加工性能差**：固体无流动性，类比沙子，加工难度大；
- ◆ **成本高昂**：液态电池成本0.2-0.3元/Wh，固态电池成本4-5元/Wh，为液态电池的十倍以上。

表 固/液电解质电导率对比

电解质	电导率
聚合物固态电解质	常温 10^{-5} S/cm，高温 10^{-4} S/cm
氧化物固态电解质	10^{-4} S/cm
硫化物固态电解质	10^{-3} S/cm
液态电解质	10^{-1} S/cm

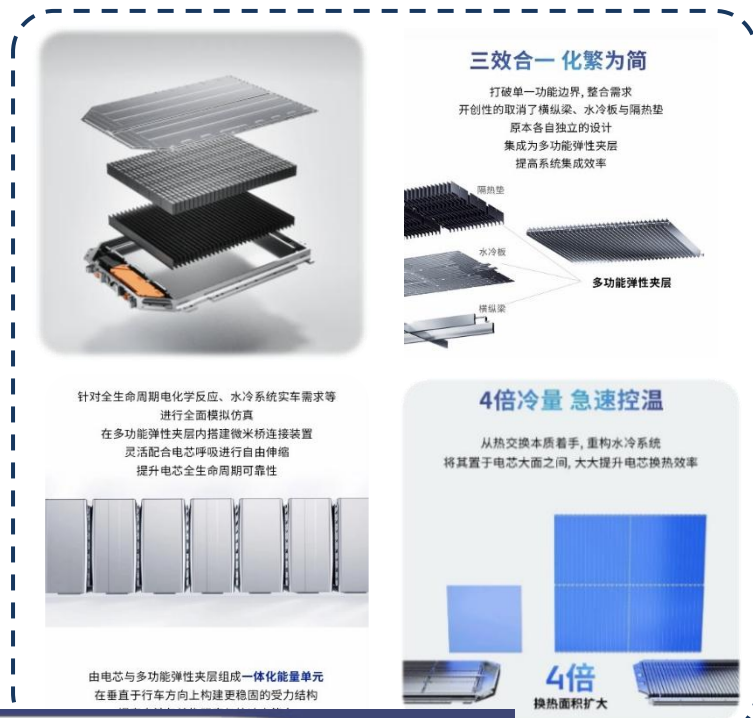
图 全固态电池成本显著高于现有液态电池



- ◆ 固态电池的短板是电解液换为固态电解质的必然结果，目前液态电池的综合性能较好，成本处于较低水平，而固态电池想要大规模的替换掉液态电池，短板性能需要达到电车要求，而此时液态电池性能必然过剩。
- ◆ **固态电池**（性能均衡时候）：安全性好，能量密度高，具备核心优势，但循环+快充性能也需满足**电车需求**，性能较为均衡，快充性能4C以上，循环3000次以上，续航1000km以上。
- ◆ **液态电池**（必然性能过剩）：固态电池满足以上条件时，液态电池快充性能或达6-8C以上，循环或达2万次以上，性能必然过剩，此时引入固态电解质，才能将短板性能达到电车要求，进而成为电池终极路线，我们预计时间点至少在2030年以后。

图 极氪001/小米su7性能均衡，4C快充+1000km续航

图：麒麟电池为目前电池最优解



PART2 海外抢先押注全固态电池，国内加快引导行业发展

- ◆ **海外整体布局领先，大额补贴抢先押注全固态电池技术。**日本押注硫化物路线，研发布局最早，技术和专利全球领先，打造车企和电池厂共同研发体系，政府资金扶持力度超2千亿日元（94亿元RMB），力争30年实现全固态电池商业化，能量密度目标500Wh/kg。**韩国**选择氧化物和硫化物路线并行，政府提供税收抵免支持固态电池研发，叠加动力电池巨头联合推进，目标于25-28年开发出能量密度400Wh/kg的商用技术，30年完成装车。**欧洲**以聚合物路线为主，同时布局硫化物路线，其中德国研发布局投入最大。**美国**全路线布局，由能源部出资，初创公司主导研发，并与众多车企达成合作，目标在30年达到能量密度500Wh/kg。

表 海外国家固态电池政策梳理

国家	时间	规划内容
日本	2007年	NEDO启动“下一代汽车用高性能蓄电系统技术开发”项目，2030年能量密度目标500Wh/kg，1000W/kg，1万日元/kWh，远期目标700Wh/kg，1000W/kg，5千日元/kWh。
	2010年4月	在日本经济产业省、新能源与产业技术开发机构（NEDO）和产业技术综合研究所（AIST）的支持下，成立LIBTEC研究中心，负责“下一代电池材料评估技术开发”项目，成员包括丰田、本田、日产、马自达、松下等35家企业。
	2018年6月	NEDO宣布在未来5年内投资100亿日元，由丰田、本田、日产、松下等23家企业，以及日本理化学研究所等15家学术机构联合研发全固态锂电池，到2022年全面掌握相关技术。
	2021年	NEDO部署“电动汽车创新电池开发”项目(2021-2025年)，计划投入166亿日元，开发超越锂电池的新型电池（包括氟化物电池、锌负极电池），增强电池和汽车行业的竞争力。
	2022年5月	NEDO宣布投入1510亿日元，用于资助包括高性能电池及材料研发主题和10个固态电池课题等18个课题，并着重开发700-800Wh/L大容量电池。
韩国	2022年9月	日本经济产业省发布《蓄电池产业战略》，目标在2030年实现全固态电池的正式商业化应用，确保卤代电池、锌负极电池等新型电池的技术优势，并完善全固态电池量产制造体系。
	2018年11月	LG化学、三星SDI、SK创新联合成立下一代1000亿韩元（9000万美元）电池基金，用于共同研发固态电池、锂金属电池和锂硫电池等下一代电池技术。
	2021年7月	公布《K-Battery Development Strategy》，政府协助研发固态电池等新一代电池技术并提供税收优惠，投资设备和投资研发最高可享20%及50%的税收抵免，在2025年推动锂硫电池和2027年全固态电池的实际商业化应用。具体开发①全固态电池，选择重量轻的硫化物系全固态电池，安全性高的氧化物系全固态电池，2025-2028年具备400Wh/kg的商用技术，2030年完成装车验证；②锂金属电池，2025-2028年具备400Wh/kg的商用技术，2030年完成装车验证。
欧洲	2017年10月	德国联邦教育和研究部出资320万欧元，发起为期三年的凝胶电解质和锂金属负极固态电池研究项目，由德国系统与创新研究所（Fraunhofer）承担。
	2018年11月	德国政府投资10亿欧元支持固态电池技术研发与生产，并支持建立动力电池研发联盟，聚焦固态电池技术开发，瓦尔塔迈科、巴斯夫、福特德国、大众已加入该联盟。
	2018年12月	公布《电池2030+》，明确全固态高性能锂离子电池、金属锂空气电池、锂硫电池迭代路线，目标2030年电池实际性能与理论性能差距缩小至少1/2，耐用性和可靠性至少提升3倍。
	2019年12月	批准欧洲共同利益重大项目（IPCEI），由欧盟七国共同出资32亿欧元，同时从私人投资商中筹集50亿欧元，用于研发下一代创新、环保锂电池技术（包括电解液、固态电池等）。
	2021年	EUROBAT（欧洲汽车和工业电池制造商协会）发布《2030电池创新路线图》，提出锂电池迭代目标为更高能量密度和更高安全性，明确固态电池技术为研发方向。
	2022年5月	德国系统与创新研究所发布《固态电池技术路线图2035+》，由100多名专家共同参与制定，预计硅基负极+高镍三元+硫化物电解质固态电池能量密度25-30年达275Wh/kg，650Wh/L，35年达325Wh/kg，835Wh/L，锂金属负极+高镍三元正极+硫化物电解质固态电池30年能量密度达340Wh/kg，770Wh/L，35年达410Wh/kg，1150Wh/L。
美国	2022-23年	额外600-800万欧元用于解决固态电解质相关问题，并规划更多支持政策确保欧盟电池产业竞争力。
	2016年7月	发布Battery500计划，由美国西北太平洋国家实验室领衔，联合大学和产业界共同攻关，参与者包括斯坦福大学、IBM、特斯拉等。计划5年投资5000万美元，目标电芯能量密度500Wh/kg、循环寿命1000次，pack成本150美元/KWh，最后过渡至锂金属电池或锂硫电池。
	2019年8月	能源部宣布资助通用汽车910万美元，其中200万美元明确用于固态电池界面问题及硫化物本全固态电池的研究。
	2021年1月	能源部宣布资助800万美元用于聚合物电解质制造工艺研究项目，目标聚合物电解质成本降低15%，获超大容量车用固态电池第三方生产资质。
	2021年6月	国防部先进计划研究局宣布启动MINT计划支持固态电池研发，包括开展固-固界面电荷转移相关研究。
	2021年6月	能源部、国防部、商务部、国务院共建的联邦先进电池联盟(FCAB)发布《锂电池2021-2030年国家蓝图》，目标2025年电芯成本60美元/KWh，2030年能量密度500Wh/kg，pack成本进一步降低50%，实现无钴无镍的固态电池、锂金属电池规模量产。
	2021年10月	能源部宣布资助2.09亿美元支持固态电池及快充等先进动力电池的技术研究。
	2023年1月	能源部宣布

国内此前以市场驱动为主，短期聚焦半固态电池技术，24年政府加快行业发展，积极布局硫化物、聚合物等全固态电池路线。20年起，我国首次将固态电池列入行业重点发展对象并提出加快研发和产业化进程，23年进一步提出加强固态电池标准体系研究，但此前尚未出台补贴政策，仍以市场驱动为主，短期聚焦于更具兼容性、经济性的聚合物+氧化物的半固态路线。24年5月，政府首次投入约60亿元用于全固态电池研发，相关项目由政府相关部委牵头实施，经过严格筛选后，最后具体分为七大项目，聚焦硫化物和聚合物等不同技术路线，加快全固态电池的商业化。

表 国内固态电池的规划内容

时间	发布主体	政策/规划	内容
2012年6月	国务院	《节能与新能源汽车国家规划（2012—2020年）》	2020年：电池模块比能量≥300 Wh/kg，成本≤1.5元/Wh。
2015年5月	国务院	《中国制造2025》	2020年：电池能量密度达到300 Wh/kg；2025年：电池能量密度达到400 Wh/kg；2030年：电池能量密度达到500 Wh/kg。
2015年11月	科技部	“十三五”计划——新能源汽车重点研发专项（2016-2020）	产业化锂离子电池能量密度≥300 Wh/kg，成本≤0.8元/Wh，电池系统能量密度≥200 Wh/kg，循环寿命≥1200次，成本≤1.2元/Wh；新型锂离子电池能量密度≥400 Wh/kg，新体系电池能量密度≥500 Wh/kg。
2016年10月	工信部指导，中国汽车工程学会牵头编制	《节能与新能源汽车技术路线图》	2020年：电池单体比能量350Wh/kg，系统250Wh/kg，寿命单体4000次/10年，系统3000次/10年，成本单体0.6元/Wh，系统1.0元/Wh；2025年：电池单体比能量400Wh/kg，系统280Wh/kg，寿命单体4500次/12年，系统3500次/12年，成本单体0.5元/Wh，系统0.9元/Wh；2030年：电池单体比能量500Wh/kg，系统350Wh/kg，寿命单体5000次/15年，系统4000次/15年，成本单体0.4元/Wh，系统0.8元/Wh。
2017年4月	工信部、国家发改委、工信部	《汽车产业中长期发展规划》	2020年：电池单体比能量≥300 Wh/kg，力争实现350Wh/kg，系统比能量力争260Wh/kg、成本≤1元/Wh；2025年：电池系统比能量≥350 Wh/kg。
2020年10月	工信部指导，中国汽车工程学会牵头编制	《节能与新能源汽车技术路线图2.0》	2025年：普及型：比能量>200Wh/kg，寿命>3000次/12年，成本<0.35元/Wh；商用型：比能量>200Wh/kg，寿命>6000次/8年，成本<0.45元/Wh；高端型：比能量>350Wh/kg，寿命>1500次/12年，成本<0.50元/Wh；2030年：普及型：比能量>250Wh/kg，寿命>3000次/12年，成本<0.32元/Wh；商用型：比能量>225Wh/kg，寿命>6000次/8年，成本<0.40元/Wh；高端型：比能量>400Wh/kg，寿命>1500次/12年，成本<0.45元/Wh；2035年：普及型：比能量>300Wh/kg，寿命>3000次/12年，成本<0.30元/Wh；商用型：比能量>250Wh/kg，寿命>6000次/8年，成本<0.35元/Wh；高端型：比能量>500Wh/kg，寿命>1500次/12年，成本<0.40元/Wh。
2020年11月	国家发改委	《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，首次将固态电池的研发上升到国家层面。
2023年1月	工信部、教育部、科技部、人民银行、银保监会、能源局	《关于推动能源电子产业发展的指导意见》	开发安全经济的新型储能电池，加强新型储能电池产业化技术攻关，推进先进储能技术及产品规模化应用；加快研发固态电池，加强固态电池标准体系研究。
2024年5月	政府	固态电池项目	根据中国日报报道，国内或将投入约60亿元用于全固态电池研发，包括宁德时代、比亚迪、一汽、上汽、卫蓝和吉利共六家企业或获得政府基础研发支持，该项目由政府相关部委牵头实施，经过严格筛选后，最后具体分为七大项目，聚焦硫化物和聚合物等不同技术路线。

- 国内液态电池技术大幅领先于海外，海外加码固态电池希望弯道超车，23-24年频繁宣传全固态量产计划，引发国内危机意识，政府层面加快固态电池研发和支持力度，提供固态电池底层的支撑逻辑。
- 海外：此前抢先布局全固态电池，意在率先卡位下一代电池技术，日本资金扶持已超2千亿日元(94亿RMB)，韩国已提供20%/50%的设备/研发税收优惠，德国已投资超10亿欧元(77亿RMB)，美国已投资超3亿美元(21亿RMB)，海外24年频繁宣传全固态电池量产计划，目标27年小批量量产全固态电池。
- 国内：此前尚未出台补贴政策，引发政府危机意识，24年5月将投入60亿，加快全固态电池研发力度，包括宁德时代、比亚迪、一汽、上汽、卫蓝和吉利共六家企业或获得政府基础研究支持，项目支持力度空前，固态电池产业化加速，目标27年小批量量产全固态电池，实现千辆级别的示范运营。

表 海外电池厂固态电池量产计划

厂商	量产计划
丰田	2026年正式量产全固态电池
三星SDI	2027年正式量产全固态电池
ION	2028年具备500MWh全固态电池的产能
QS	2025年底正式量产全固态电池
SP	2026年正式量产全固态电池

表 国内政府牵头的60亿全固态研发项目

具体情况		
2024年5月29日，根据中国日报报道，国内或将投入约60亿元用于#全固态电池 研发，包括宁德时代、比亚迪、一汽、上汽、卫蓝和吉利共六家企业或获得政府基础研究支持。该项目由政府相关部委牵头实施，经过严格筛选后，最后具体分为七大项目，聚焦硫化物和聚合物等不同技术路线		
路线	数量	厂商
硫化物	3家	宁德时代、比亚迪、一汽集团
聚合物	3家	上汽集团、卫蓝新能源、吉利汽车

- ◆ **半固态电池为过渡路线，国内23-24年陆续装车发布，开启产业化元年，随着新车型陆续发布，带来持续性行业热度，提供固态电池应用的短期支撑逻辑。**
- ◆ **蔚来ET7：**24款蔚来ET7搭载半固态电池，实测续航超过1000公里，150kwh电池包开启试运营，最低日租100元，开启运营。
- ◆ **智己L6-光年版：**4月8日，上汽智己L6发布光年固态电池，对应max光年版(133kwh)预售价不超过33万元，相比超强性能版(100kwh)预售价不超过29.99万元，仅加价3万元，定价好于市场预期。
- ◆ **后续：**上汽荣威、上汽名爵、长安深蓝、广汽昊铂等。

表 半固态电池装车进展汇总

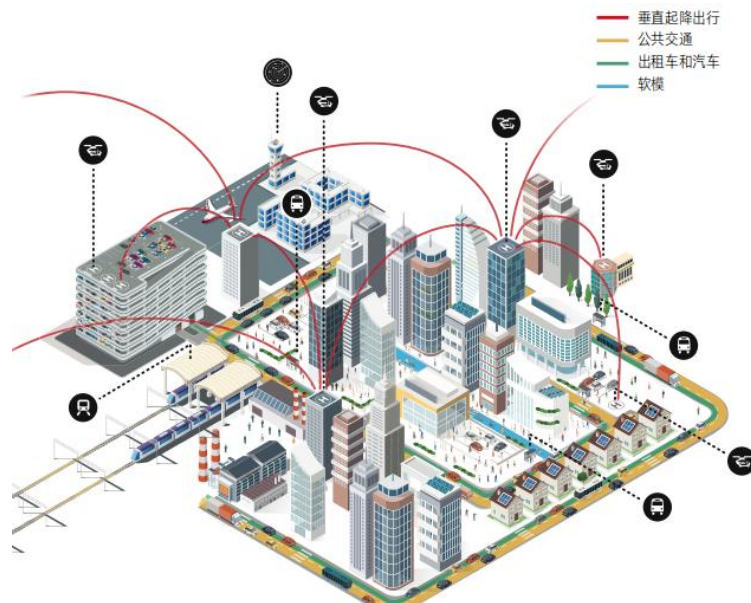
品牌	车型	带电量 (kwh)	合作厂商	售价 (万元)	上市时间
东风风神	E70	-	赣锋锂电	14-15	202101
赛力斯	SERES-5	90	赣锋锂电	23.68	202303
东风岚图	追光	82.1-108.7	孚能科技	32.39-38.59	202304
上汽智己	L6	100	清陶能源	33	202404
蔚来	ET7	150	卫蓝新能源	50	2024Q2
上汽荣威	-	-	清陶能源	-	2025H2
上汽名爵	-	-	清陶能源	-	2025H2
福田	轻卡	-	-	-	2024
长安深蓝	-	-	赣锋锂电	-	2025
广汽埃安	昊铂	-	因湃电池科技（自主）	-	2026

- ◆ 国内后续大力发展低空经济，而eVTOL作为关键载体，为固态电池中期打开想象空间，提供固态电池应用的中期支撑逻辑。
- ◆ eVTOL作为低空经济的关键载体，助力塑造未来城市空中交通（UAM）场景。UAM（Urban Air Mobility），即城市空中交通，通过建立低空运输系统，以eVTOL（Electric Vertical Takeoff and Landing）进行载客或载货运输，为大型城市、都市圈及城市群创造了新型交通方式，有效缓解日益严重的地面交通拥堵问题。
- ◆ eVTOL能量密度要求400Wh/kg以上，为固态电池进一步打开想象空间。24年3月，低空经济首次纳入政府工作报告，eVTOL迎来发展黄金期，其对电池具备高能量密度、高倍率的诉求。四部门发布《通用航空装备创新应用实施方案》指出，推动400Wh/kg级航空锂电池投入量产，实现500Wh/kg级航空锂电池产品应用验证，理论上需搭配固态电池使用，为其打开想象空间。

图：亿航全自动无人驾驶飞行器产品



图：未来城市空中交通构想



◆ **安全性和能量密度为动力核心性能，提供固态电池应用的远期支撑逻辑，半固态先行，24年开启放量，全固态预计30年后放量。**半固态电池23年起开始产业化，但技术、产品仍不成熟，我们预计24年出货量1-2GWh，25年预计5GWh，30年超100GWh，渗透率提升至2-3%；全固态电池预计27年小批量装车，以示范运营为主，出货量0.5GWh，30年预计开启产业化，出货量预计3GWh，随着规模效应释放，成本持续下降，35年出货量有望突破300GWh。

图 固态电池应用场景



表 固态电池出货量及渗透率预测

	2023	2024E	2025E	2026E	2027E	2028E	2029E	2030E	2035E
全球新能源车销量 (万辆)	1,339	1,680	1,992	2,348	2,732	3,079	3,438	3,792	5,142
YoY	33%	25%	19%	18%	16%	13%	12%	10%	6%
全球动力电池实际需求 (gwh)	873	1,062	1,272	1,531	1,840	2,156	2,510	2,883	4,272
YoY	25%	22%	20%	20%	20%	17%	16%	15%	8%
全球储能电池合计 (gwh)	211	297	430	576	730	922	1,154	1,444	3,594
YoY	67%	41%	45%	34%	27%	26%	25%	25%	20%
全球动力+储能电池实际需求合计 (gwh)	1,083	1,360	1,702	2,107	2,569	3,078	3,664	4,327	14,166
YoY	32%	26%	25%	24%	22%	20%	19%	18%	6%
半固态电池渗透率	0.0%	0.1%	0.3%	0.5%	0.8%	1.3%	2.2%	2.3%	1.4%
半固态电池出货量 (GWh)	0.1	1.5	5.0	10.0	20.0	40.0	80.0	100.0	200.0
全固态电池渗透率	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	2.1%
全固态电池出货量 (GWh)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.8	1.0	3.0	300.0
固态电池渗透率	0.0%	0.1%	0.3%	0.5%	0.8%	1.3%	2.2%	2.4%	3.5%
固态电池总出货量 (GWh)	0.1	1.5	5.0	10.0	20.5	40.8	81.0	103.0	500.0

PART3 硫化物未来潜力最大，为主流厂商重点布局路线

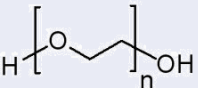
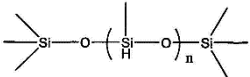
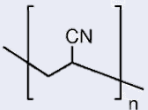
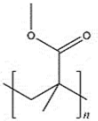
- ◆ 固态电解质是实现高安全性、能量密度、循环寿命性能的关键。根据电解质的种类，可分为聚合物、氧化物、硫化物、卤化物四种路线。**硫化物发展潜力最大，卤化物的热度也在提升。**
- ◆ **聚合物**：不够安全，上限低，已基本被淘汰，主要与氧化物/硫化物/卤化物混用。
- ◆ **氧化物**：安全性最高，电导率一般，加工难度最大，成本低，但质地较脆，目前主要用于半固态。
- ◆ **硫化物**：潜力最大，电导率高，易加工，但难点最多，成本高，稳定性差，长期潜力较大。
- ◆ **卤化物**：介于氧化物和硫化物之间，难点是耐还原度差，成本低，近一年进展相对较快。

表 固态电池路线对比

类型	聚合物	氧化物	硫化物	卤化物
材料	PEO、PAN、PMMA、PVDF等	LiPON、LATP、LLTO、LLZO等	LiGPS、LiSnPS、LiSiPS等	Li ₃ InCl ₆ 、Li ₂ ZrCl ₆ 、Li ₃ YBr ₆
电导率	常温10 ⁻⁴ S/cm，高温10 ⁻³ S/cm	10 ⁻³ S/cm	10 ⁻² S/cm	10 ⁻² -10 ⁻³ S/cm
优势	生产工艺简单	安全性好	电导率高、易加工	电导率高、成本低、耐氧化
劣势	不够安全、上限低	难加工、电导率一般	稳定性差，成本高	耐还原度差
基本需求	离子电导率高、电化学窗口宽、热稳定性好、机械性能好、制造成本低等			

- ◆ 聚合物易于合成和加工，率先实现商业化应用，但常温电导率低，整体性能提升有限，制约大规模应用与发展。聚合物固态电解质由高分子和锂盐络合形成，同时添加少量惰性填料。锂离子通过聚合物的分段运动，靠不断的络合与解络合而传递。聚合物由于易加工、工艺兼容等优势，率先在欧洲商业化，技术最为成熟，但其电导率低、电化学窗口窄，仅能和铁锂正极匹配，性能上限较低，工作时需持续加热至60℃，因此制约了其大规模应用，预计后续与无机固态电解质复合，通过结合两者优势，在应用端实现性能突破。

表 聚合物电解质主流材料及对应性能

材料	结构式	电导率	优势	劣势
PEO		10^{-7}S/cm 修饰后可达 10^{-4}S/cm	锂离子传输能力强，负极兼容性好， 电极间界面阻抗小	离子电导率低，电压窗口低，机械强度差， 粘性大影响成膜
PS		10^{-6}S/cm 修饰后可达 10^{-4}S/cm	热稳定性高，化学稳定性高，负极稳 定性高，易加工成膜	离子电导率低，机械强度差，大规模制造难 度大，电化学窗口窄
PAN		修饰后可达 $10^{-3}\text{-}10^{-4}\text{S/cm}$	化学稳定性好，耐热性强，电化学窗 口宽	离子电导率低，力学性能差
PMMA		修饰后可达 $10^{-3}\text{-}10^{-4}\text{S/cm}$	与锂电界面阻抗低，锂离子传输能 力强，制造成本低，易合成	成膜后硬脆、柔韧性差、机械强度差

- ◆ **氧化物稳定性最好，电导率一般，加工性能最差，目前发展进度较快。**氧化物电解质是含有锂、氧以及其他成分(磷/钛/铝/镧/锆/锗/锌/锑)的化合物。氧化物热稳定性好、电化学窗口宽、机械强度高，缺点为电导率一般、脆度高难以加工、界面接触差。量产方面，氧化物体系制备难度适中，较多新玩家和国内企业选取此路线，采用与聚合物复合的方式，在半固态电池中率先规模化装车。

表 氧化物电解质类型及对应性能

类型	代表材料	化学式	电导率	优势	劣势
LiPON型	LiPON	$\text{Li}_{2.9}\text{PO}_{3.3}\text{N}_{0.46}$	10^{-6}S/cm	电化学窗口宽、热稳定性好、电阻小	离子电导率低
Perovskite(钙钛矿)型	LLTO	$\text{Li}_{0.33}\text{La}_{0.56}\text{TiO}_3$	10^{-3}S/cm	离子电导率最高、循环寿命好	需高温退火、晶界电阻高、锂金属不稳定、生产成本高
Anti-Perovskite(反钙钛矿)型	LOC	Li_3OCl	10^{-3}S/cm	离子电导率高、电化学窗口宽、锂金属稳定、成本低	脆性较高、循环寿命差、不易加工
GARNET(石榴石)型	LLZO/ LLZTO	$\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}/$ $\text{Li}_{6.4}\text{La}_3\text{Zr}_{1.4}\text{Ta}_{0.6}\text{O}_{12}$	10^{-3}S/cm	离子电导率高、电化学窗口宽、 锂金属稳定、空气相对稳定	需进行掺杂改性、 生产成本高
NASICON(快离子导体)型	LATP	$\text{Li}_{1.4}\text{Al}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}(\text{PO}_4)_3$	10^{-4}S/cm	生产成本低、空气中稳定、 电化学窗口最宽、适合高电压体系	离子电导率偏低、 锂金属不稳定
LISICON(快离子导体)型	LZG	$\text{Li}_{14}\text{Zn}(\text{GeO}_4)_4$	10^{-7}S/cm	合成条件吻合，空气中稳定	离子电导率低(需加热)、 空气中敏感、锂金属不稳定

- ◆ **硫化物电导率最高，兼具加工性能，未来潜力最大，但仍处于研发阶段。**硫化物离子电导率最高，质地软易加工，可以通过挤压来增大界面接触，从而提升电池性能。**锂磷硫氯**为主流硫化物固态电解质，但其合成需要使用大量昂贵的**硫化锂**（国内报价约500万元/吨），行业经过长期的探索，仍无法降低硫化锂的成本。因此硫化物成本高，成为量产核心难点之一，后续也可能通过开发锂磷硫氧氯等新体系，不使用硫化锂前驱体从而实现降本。此外，硫化物固态电解质存在电化学稳定性差、空气稳定性差(遇水产 H_2S)、生产工艺难度大等问题，因此给电池制造量产带来诸多难点。整体看，硫化物目前仍处于研发阶段，但后续发展潜力最大，待材料、设备、工艺突破后，预计成为未来主流路线。

表 硫化物电解质类型及对应性能

类型	简称	化学式	代表材料	电导率	优势	劣势
Li-P-S型	LPS	Li_xPS_x	Li_3PS_4 、 $Li_4P_2S_6$	$10^{-3}S/cm$	电化学窗口宽(5V)、热稳定性好、成本低	离子电导率相对低、空气中不稳定
Argyrodite型	LPSCI/LPSI	Li_6PS_5X (X=Cl, Br, or I)	Li_6PS_5Cl 、 Li_6PS_5I	$10^{-3}-10^{-2}S/cm$	离子电导率高、热稳定性好、 成本低	电化学窗口窄(< 2.2V)、空气中不稳定
LGPS型	LGPS	$Li_xMP_xS_x$ (M=Ge, Sn, Si, Al)	$Li_{10}GeP_2S_{12}$	$10^{-2}S/cm$	离子导电性最高 、电化学窗口宽(5V)	锂金属不稳定、 成本较高
Thio-LISICON型	LGPS (LISICON)	$Li_{4-x}M_{1-x}M'_xS_4$ (M=Si, Ge, Zr, M'=P, Al, Zn, Ga)	$Li_{3.25}Ge_{0.25}P_{0.75}S_4$	$10^{-3}S/cm$	电化学窗口宽(5V)、电化学稳定性高	离子电导率相对低、 成本较高

◆ 卤化物介于氧化物与硫化物之间，综合性能相对优异，且具备成本优势，近一年进展相对较快。理论上，卤化物固态电解质既具有高于氧化物固态电解质的氧化电位，又具有与硫化物接近的易变形性和接近的离子电导率，同时具有媲美聚合物的大规模应用前景，但卤化物的还原电位不够低，无法与金属锂负极匹配，需要包覆等方式解决，整体成本、性能处于硫化物和氧化物之间。近一年来，国内对于卤化物的热度快速提升，尤其含锆的Li₂ZrCl₆材料，其具备低成本的优势，成为清陶能源等公司重点突破方向，未来预计与硫化物复合应用，进而实现降本的效果。

表 卤化物电解质类型及对应性能

类型	简称	化学式	代表材料	电导率	优势	劣势
Li _a MX ₄ 类	正尖晶石结构	Li _a MX ₄	Li ₂ MnCl ₄ 、 Li ₂ ZnCl ₄ 、LiAlF ₄	10 ⁻³ S/cm	成本较低	离子电导率较低，常温下无法稳定
Li _a MX ₆ 类	三方、正交、 单斜晶系结构	Li _a MX ₆	Li ₃ InCl ₆ 、Li ₂ ZrCl ₆	10 ⁻³ -10 ⁻² S/cm	离子电导率较高	还原电位不够低
Li _a MX ₈ 类	suzuki晶格	Li _a MX ₈	Li ₆ CoCl ₈	10 ⁻⁴ S/cm	成本较低	离子电导率较低

◆ **硫化物未来潜力最大，头部电池厂商均重点布局。**硫化物固态电解质未来最具潜力，具备极高的离子电导率，部分硫化物电解质的离子电导率甚至已经超越电解液，此外具备相对较好的界面接触性能、柔韧可加工性，成为主流厂商重点布局的路线。目前来看，**国内**宁德时代、比亚迪、华为，**日本**的丰田、松下，**韩国**的三星SDI、LG新能源、SK on，**美国**的QuantumScape、Solid Power等均重点布局硫化物体系。硫化物体系具备突出的性能优势，待材料、设备、工艺突破后，预计成为未来全固态电池的主流路线。

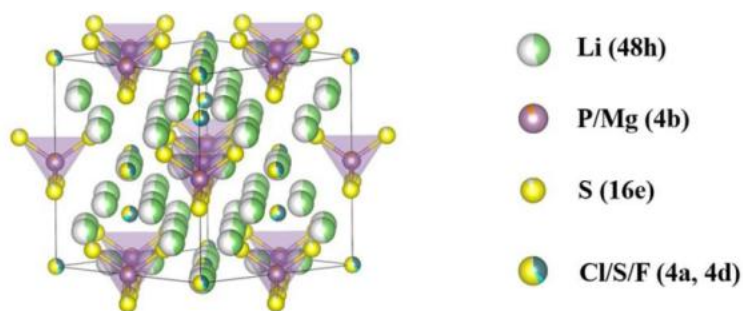
表 部分国家地区全固态电池路线

国家	公司	技术路线	进展
中国	宁德时代	硫化物	进入20Ah样品试制阶段，27年小批量量产，能量密度500wh/kg
	清陶能源	卤化物+硫化物	26年装车验证，27年小批量量产，能量密度400-500wh/kg
	卫蓝新能源	聚合物、硫化物	26年装车验证，27年小批量量产，能量密度400-500wh/kg
日本	丰田	硫化物	26年小批量产，10分钟即可充满，续航里程1000-1200km
	本田	硫化物	25年试生产，30年量产装车
韩国	三星SDI	硫化物	27年小批量量产，能量密度500wh/kg
	LG新能源	聚合物、硫化物	30年小批量量产
	SK on	聚合物+氧化物、硫化物	25-26年试生产，28-29年商业化
美国	QuantumScape	氧化物、硫化物	进入B样测试阶段，
	Solid Power	硫化物	A样品交付宝马，30年量产装车
	ION	氧化物	25年产能10MWh，28年产能500MWh

PART4 硫化物路线存在诸多难点，带来材料/工艺/设备全新变化

- ◆ **硫化物常用材料体系有四种，其中锂磷硫氯为主流选择。**硫化物基固态电解质体系常见有四种，即锂锗磷硫(LGPS)，锂硅磷硫氯(LSiPSCI)，锂磷硫氯(LPSCI)以及锂磷硫(LPS)。其中锂锗磷硫(LGPS)离子电导率最高，但原材料成本极高，不能与锂金属共存，主要用于科研应用；而锂磷硫氯(LPSCI)具备成本优势，离子电导率优异，并与锂金属良好的兼容性，成为量产主流选择，目前价格1-4万元/公斤，规模化后有望大幅降低。

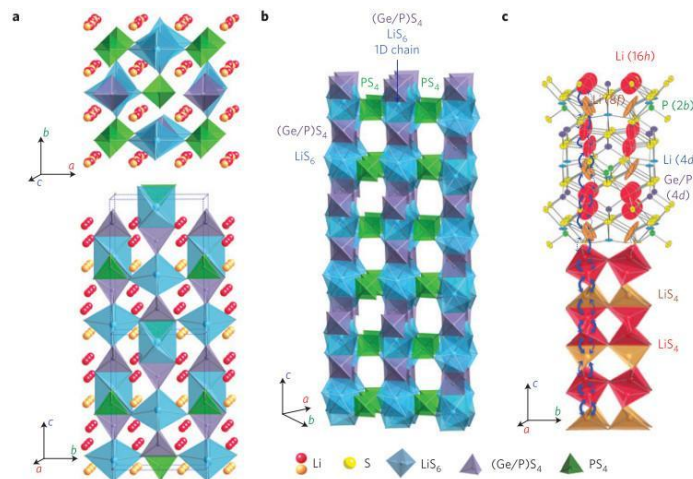
图 锂磷硫氯(LPSCI)材料结构图



原材料成本低，与锂金属共存

离子电导率良好 (> 8mS/cm)

图 锂锗磷硫(LGPS)材料结构图



离子电导率最高 (> 12mS/cm)

原材料成本高，不与锂金属共存

- ◆ 锂磷硫氯可通过固相法和液相法合成，其中固相法离子电导率更高，为目前主流工艺主流路线。
- ◆ 固相法主要包括高能机械球磨法、球磨-烧结联用法和简单固相烧结法。固相法具备更高的离子电导率和产品结晶度，但纯化相对困难，耗时长、能耗高，工艺效率低。固相法目前以球磨-烧结法为主，仍需解决原料混合均匀性问题，为目前主流工艺路线。
- ◆ 液相法主要包括悬浮液法和溶解-沉积法。液相法具备更低的烧结温度，更短的合成时间，更适用于规模化生产等，但其硫化物与溶剂有高反应活性，易化学降解，离子电导率低，溶剂有毒不环保；液相法短期具备成本优势，批量化具有一定优势，但产品性能不及固相法，量产工艺需进一步优化。

图 锂磷硫氯固相法合成工艺

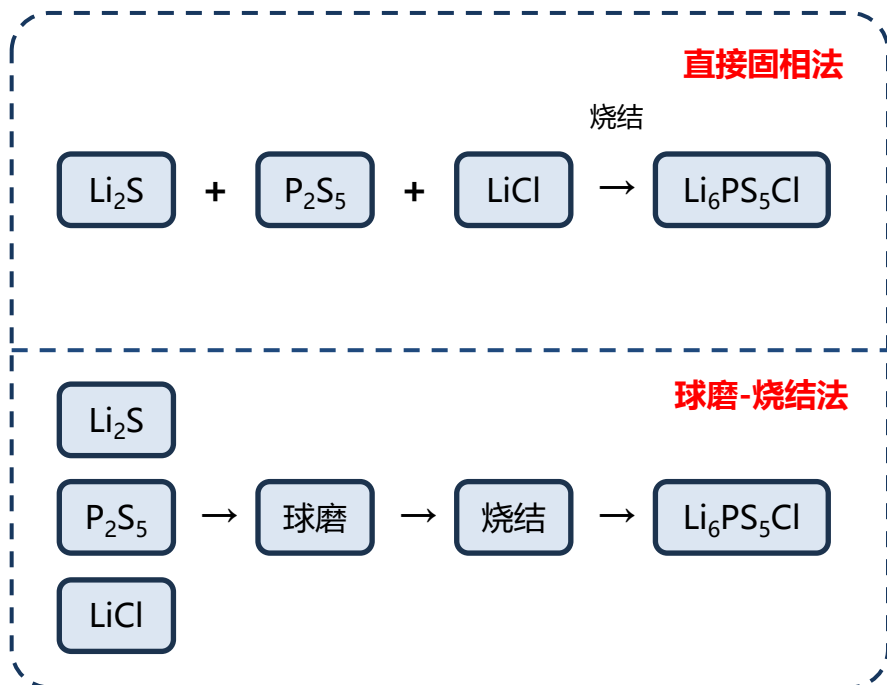
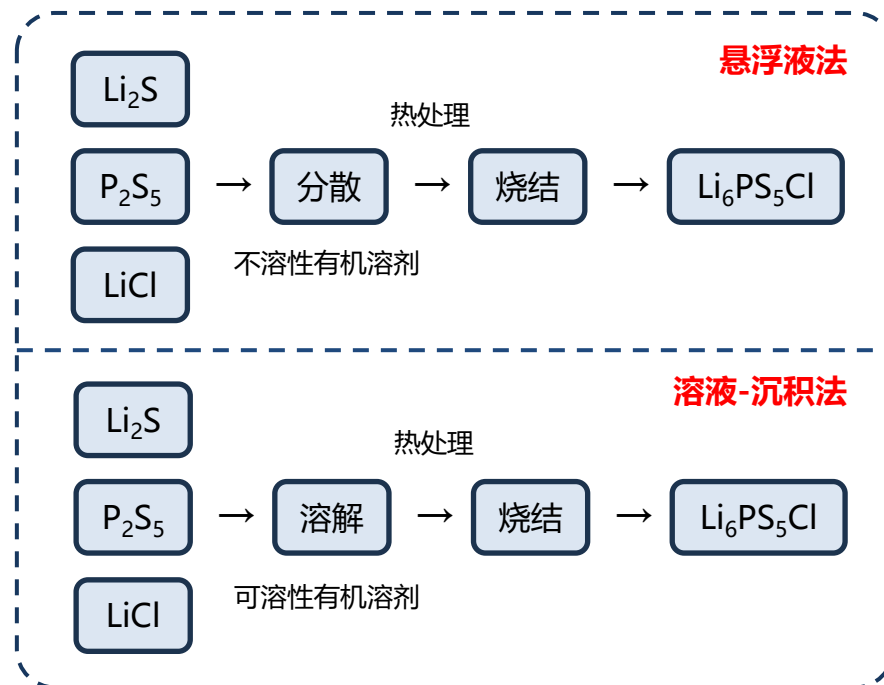


图 锂磷硫氯液相法合成工艺



- ◆ 锂磷硫氯的原材料主要有硫化锂、氯化锂和五硫化二磷，其中成本最高为硫化锂，多因素导致其价格昂贵，目前仍无有效降本手段。硫化锂属于立方晶系，具有反萤石结构，化学性质非常活泼，在自然界并不稳定，在空气中易吸收水蒸气发生水解，放出剧毒硫化氢气体，制造和储存要求较高，且应用市场主要为硫化物固态电解质，规模较小并对纯度和粒径要求极高，目前价格较为昂贵，在500万元/吨以上。根据我们测算，1GWh的锂磷硫氯全固态电池约合消耗500-700吨锂磷硫氯固态电解质，每吨锂磷硫氯固态电解质平均消耗超400公斤的硫化锂粉体，单wh硫化锂原材料成本1.0-1.4元。

图 硫化锂具备反萤石结构（橙色为硫原子，绿色为锂原子）

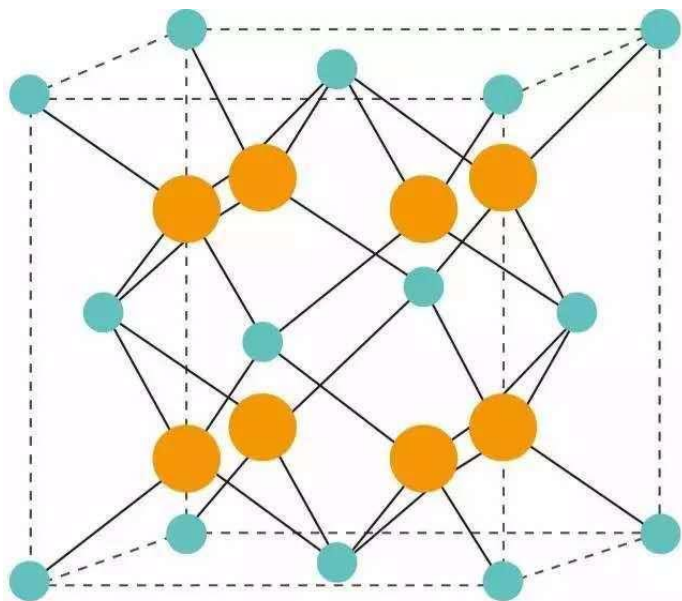


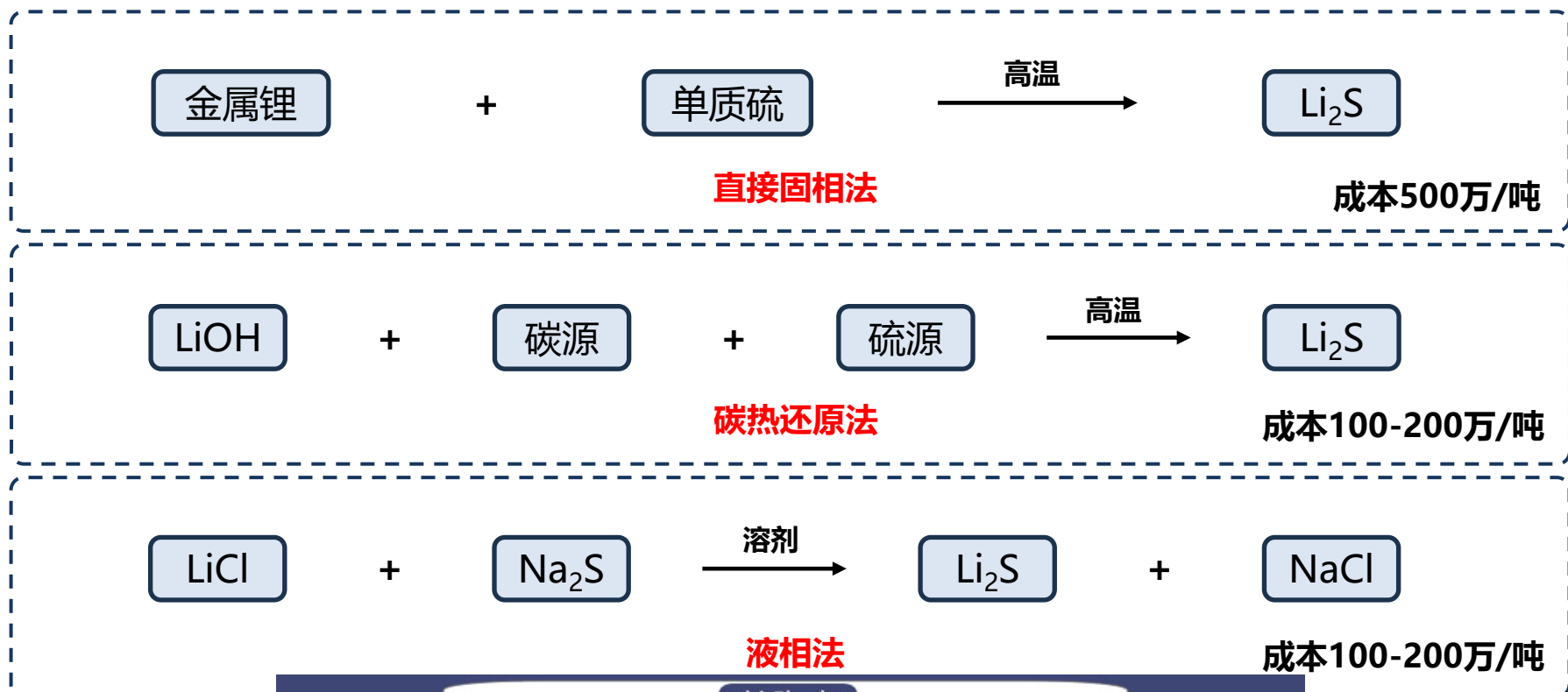
图 硫化物电解质成本核算（ $\text{Li}_6\text{PS}_5\text{Cl}$ 为例）

国内主流 工艺测算	主要原材料			其他辅料、 耗材等
	硫化锂	氯化锂	五硫化二磷	
用量（吨）	0.43	0.16	0.41	/
吨价（万元）	500	15	10	5
总价（万元）	215	2.4	4.1	5
BOOM成本（万元）	226.5			
目前价格（万元）	≈1000			

硫化锂：主流合成工艺有三种，固相/液相法各有利弊

- ◆ 硫化物主流合成工艺有三种，其中碳热还原法和液相法具备成本优势，此外CVD法等新工艺也有较大潜力，未来待工艺、设备突破后，有望大幅降低硫化锂成本。
- ◆ **直接固相法**，金属锂/氢化锂+单质硫：工艺简单，环境友好，但原料**成本高**，反应时间长，产品收率低；
- ◆ **碳热还原法**，氢氧化锂+炭+硫：原料**成本低**，反应容易控制，转化效率高，但工艺仍需完善，产品质量仍不稳定；
- ◆ **液相法**，六氟磷酸钠+锂化物+硫化物：原料**成本低**，反应充分完全，反应时间短，能耗较少，但原材料精制、产品纯化难，粒径调控难。

图 硫化锂主流合成工艺



- ◆ 锂磷硫氯具备生产壁垒，核心在于产品稳定性，目前仅少量企业可实现，硫化锂为量产降本核心，众多企业开启布局，胜出关键在于找到有效的降本方式。硫化物固态电解质具备生产壁垒，关键在于材料的均匀性、一致性以及产品批次的稳定性，目前仅有日本的出光兴产、三井金属和国内的中科固能等企业可实现吨级稳定供货。前驱体硫化锂价格昂贵，主要由于其与空气中的水和氧气反应，需要在惰性气体氛围、无水无氧的环境中生产，此外生产过程中易产生硫化氢，需进行回收处理，后续工艺、设备需进一步优化，众多正极厂商、金属厂商、电解液厂商均有布局，胜出的关键在于找到有效的降本手段。

图 硫化物固态电解质头部生产厂商（部分）



出光兴产（日本）

10吨级别，持续扩产



三井金属（日本）

吨级别，年底百吨级



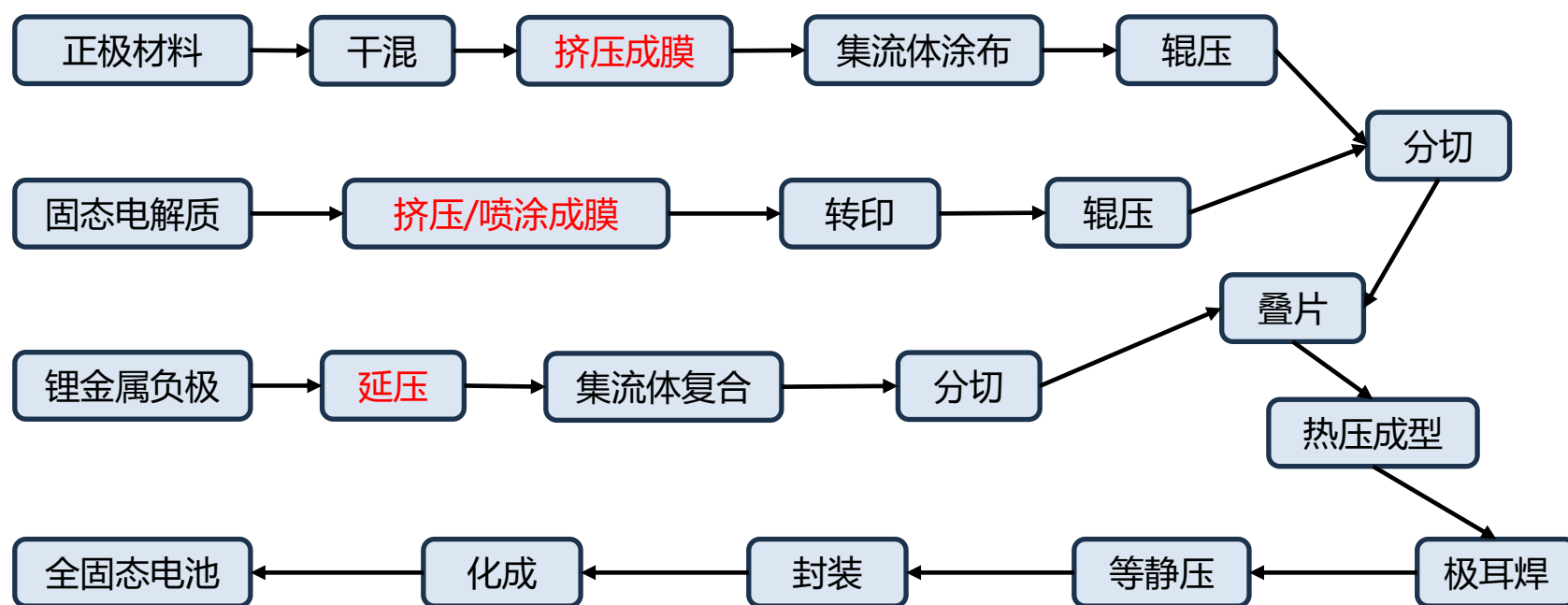
中科固能（中国）

图 硫化锂前驱体生产厂商（部分）

厂商	进展
赣锋锂业	新余赣锋锂业建成年产1万吨硫化锂项目，21年底投产；赣锋锂业在江西南昌建成年产1万吨硫化锂项目，22年底投产
湖北鑫润德	生产的硫化锂广泛应用于电池、化工等领域
杭州凯亚达	硫化锂纯度达99.99%，用于电池、半导体等领域
成都汉普高新	硫化锂产品畅销美国、日本，获国际市场广泛认可
天齐锂业	已完成硫化锂产业化支持工作
厦钨新能	使用CVD法制备高纯硫化锂，已向多家头部企业送样
恩捷股份	高纯硫化锂已完成小试吨级年产能建设和运行
天赐材料	已完成硫化锂、硫化物固态电解质实验室公斤级生产
有研新材	高纯硫化锂实现产品小批量稳定制备

- ◆ 硫化物全固态电池生产流程的难点在于固态电解质膜的成型，固态电解质极片的成型和固态电池的成型，其中最难环节为前道的固态电解质膜成型环节，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，目前整体效率较低；此外，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



◆ **固态电池产线的关键设备有电极干法涂布设备，辊压热复合双轧一体机，极片胶框印刷&叠片一体机，高压化成成分容设备。** 固态电池生产对于设备的精度大幅提升，在均匀程度的要求上是微米级甚至纳米级，尤其使用的干法工艺对设备的精度和能力要求较高，并且硫化物对金属具备腐蚀性，辊压时容易造成金属涂层脱落，此外在极片成型、分散过程以及电池成型方面，都需要针对固态电池的特点开发定制化的设备和技术，才能保证电池性能的一致性，目前生产设备仍不成熟，无法达到要求。

图 固态电池制造工艺及设备

环节		正负极片&电解质制备（前段）							电芯组织（中段）					后段	
工序		匀浆搅拌	涂布&烘烤	干料混合	干法涂布	电解质涂膜	辊压	电解质热复合	分条&模切	胶框印刷	无隔膜叠片	极耳焊接&包装	注液	原位固化	高压化成成分容（60吨）
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	涂布机	强力混合机	干法涂布设备	电解质涂覆设备	辊压机	热复合设备	分条模切机	胶框印刷机	无隔膜叠片机	电芯组装设备	注液机	烘烤设备	大压力化成成分容机

- ◆ **干法为全固态电池关键工艺，设备精度、幅宽和速度仍不成熟。**全固态电池中，硫化物电解质对极性有机溶剂极为敏感，同时金属锂容易与溶剂反应，导致膨胀更加严重，因此需切换为干法电极工艺，并使用进行PTFE原纤维化，进而抑制材料膨胀。干法工艺的重点环节为混料、纤维化和成膜，混料使用**搅拌机**将正极、固态电解质、导电剂、粘结剂混合，纤维化使用**气流粉碎机**、**蜜炼机**、**双螺杆挤出机**将PTFE网状结构打开闭合，成膜使用**复合成膜一体机**，制作干法正极膜、干法负极膜、固态电解质膜。干法工艺仍不成熟，具备量产的前置条件有：负极PTFE含量 < 1.0%，正极PTFE含量 < 1.5%，负极速度 > 80m/min，正极速度 > 50m/min，幅宽 > 1000mm。

图 湿法电极工艺

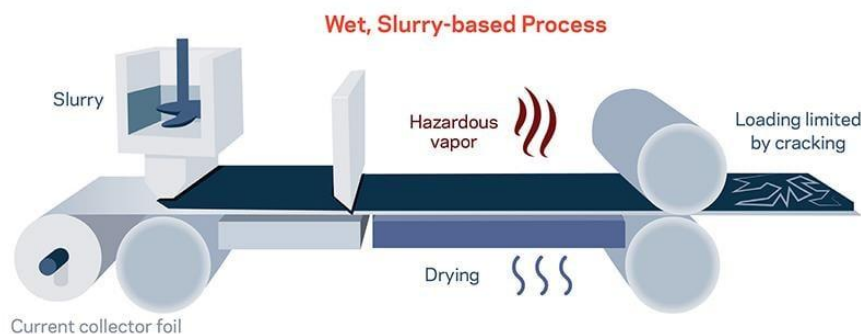


图 干法电极工艺

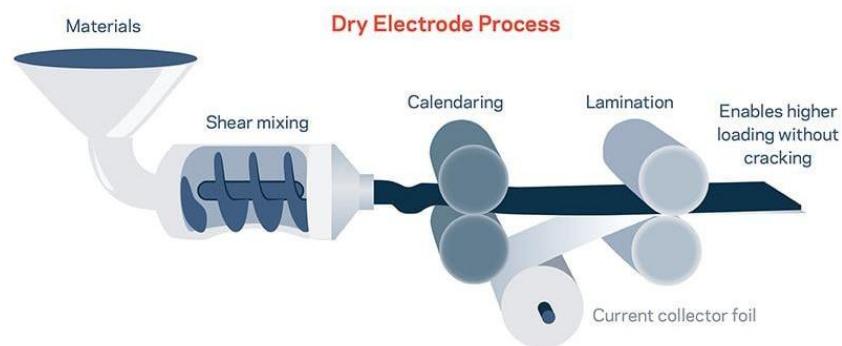
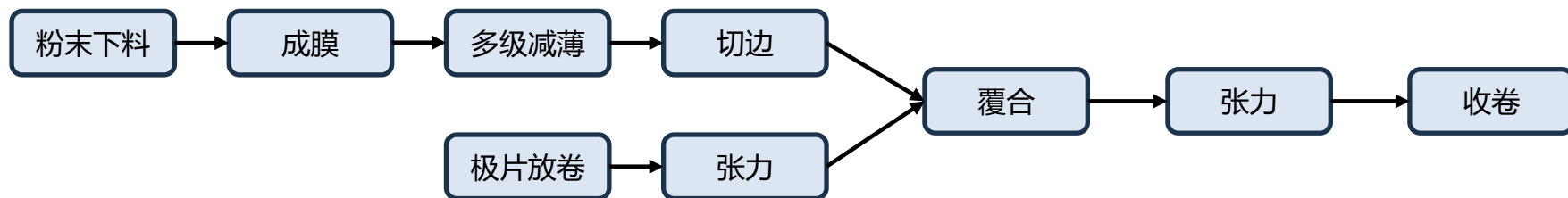


图 干法成膜+覆合工艺流程图



- ◆ **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化成，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**。
- ◆ **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等温静压法，一般温度在80-120℃，压力在300MPa左右，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，**等静压设备在固态电池领域有较大发展**。

图 全固态电池温等静压法示意图

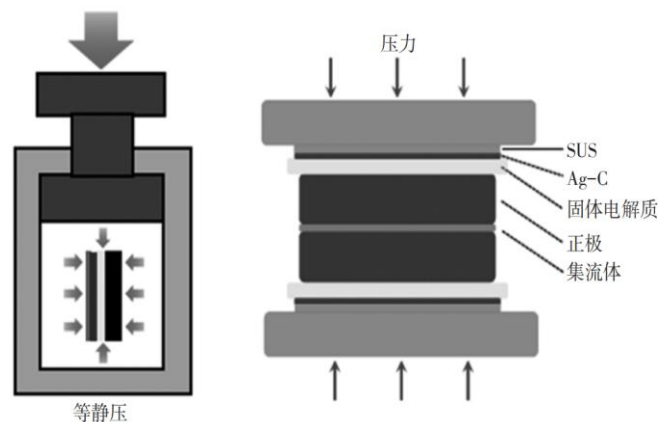
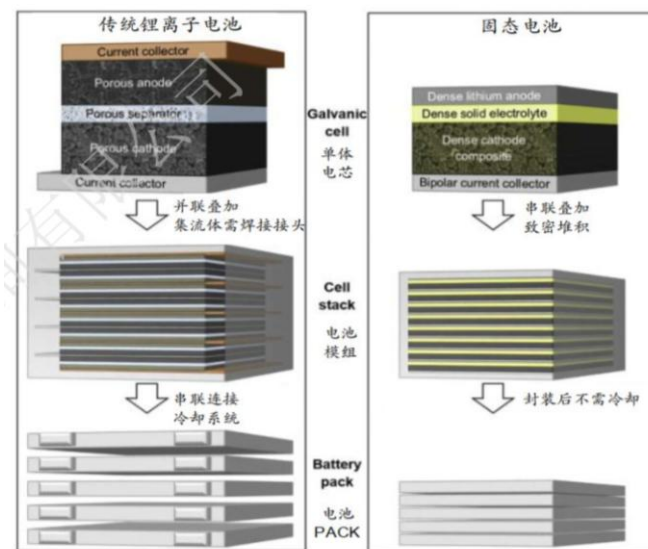


图 传统电池和固态电池叠片对比图



PART5 全固态电池取消隔膜/电解液，新增固态电解质/锂金属

- ◆ **无论是半固态电池还是全固态电池，想要提升能量密度，必然要更换正负极材料，或改变相关材料电压，否则加入固态电解质后，能量密度不会有明显变化，甚至有些下降。**
- ◆ **半固态电池：**相比液态电池，半固态电池减少电解液的用量，增加聚合物+氧化物复合电解质，其中聚合物以框架网络形式填充，氧化物主要以隔膜涂覆+正负极包覆形式添加，此外负极从石墨体系升级到预锂化的硅基负极，正极从高镍升级到了高镍高电压/超高镍等，隔膜仍保留并涂覆固态电解质涂层，锂盐从LiPF₆升级为LiTFSI，封装方式仍采用卷绕/叠片+方形/软包/圆柱的方式，能量密度可达350Wh/kg以上。
- ◆ **全固态电池：**相比液态电池，全固态电池取消原有电解液，选用聚合物/氧化物/硫化物体系作为固态电解质，以薄膜的形式分割正负极，从而替代隔膜的作用，其中聚合物性能上限较低，氧化物目前进展较快，硫化物未来潜力最大，负极从石墨体系升级到锂金属负极，正极从高镍升级到了高镍高电压/超高镍/镍锰酸锂/富锂锰基等，封装方式采用叠片+软包的方式，能量密度可达500Wh/kg以上。

表 半固态/全固态电池与液态电池对比

类型	液态电池	半固态电池	全固态电池
电解质	溶剂+LiPF ₆ +添加剂	聚合物+氧化物固态电解质+溶剂+LiTFSI+添加剂	聚合物/氧化物/硫化物/卤化物固态电解质
隔膜	有	保留+氧化物涂覆	无
负极	石墨	硅基	锂金属
正极	三元/铁锂	高镍高电压/超高镍	高镍高电压/超高镍/镍锰酸锂/富锂锰基
封装方式	卷绕/叠片+方形/圆柱/软包	卷绕/叠片+方形/软包/圆柱	叠片+软包
能量密度	< 300Wh/kg	> 350Wh/kg	> 500Wh/kg

- ◆ 硫化物固态电池来看，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。**

表 正极材料体系对比

晶体结构	正极材料	化学式	实际比容量 (mAh/g)	电压范围 (V)	循环寿命(次)	热稳定性	材料成本	优势	劣势
层状	钴酸锂 LCO	LiCoO_2	135-190	3.0-4.6	500-1000	较差	较高	振实密度大、 体积能量密度高、电压高	钴金属成本高（主要用于3C消费电池）
	镍钴锰酸锂 NCM	$\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z\text{O}_2$ ($x+y+z=1$)	155-220	2.8-4.5	800-2000	较差（镍含量高导致）	中	能量密度高	高温易胀气、循环性安全性较差
	镍钴锰酸铝 NCA	$\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_z\text{O}_2$ ($x+y+z=1$)	210-220	2.5-4.6	800-2000	较差	中	能量密度高、低温性能好	循环性能、安全性较差
	镍钴锰铝 NCMA	$\text{LiNi}_w\text{Co}_x\text{Mn}_y\text{Al}_z\text{O}_2$ ($w+x+y+z=1$)	155-220	2.7-4.6	≥ 3000	较好	较低	循环寿命及高温性能优于三元正极、材料成本更低	生产工艺复杂（控制铝含量）
	富锂锰基 LMR	$x\text{Li}_2\text{MnO}_3 \cdot (1-x)\text{LiMO}_2$ ($M=\text{Co}, \text{Ni}, \text{Mn}$)	>250	2.0-4.8	1000-6000	较差（锰含量高导致）	低	能量密度最高、电压高、成本低、常规电压循环稳定性优异	首效及倍率性能差、循环电压衰减
橄榄石	磷酸铁锂 LFP	LiFePO_4	130-140	3.2-3.7	3000-12000	优秀	低	成本低、安全性能好、循环寿命长	能量密度低、低温放电容量衰减快
	磷酸锰铁锂 LMFP	$\text{LiMn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{PO}_4$ ($0 \leq x \leq 1$)	130-140	3.3-4.1	2000	优秀	低	电压高、成本低、低温性能略优于磷酸铁锂	导电率差、循环寿命较低、高温性能略低于磷酸铁锂
尖晶石	锰酸锂 LMO	LiMn_2O_4	100-120	3.0-4.3	500-2000	良好	低	成本低、安全性能好、倍率性能好	能量密度低、高温循环性能差
	镍锰酸锂 LNMO	$\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$	130-150	2.2-5.0	≥ 400 (石墨) >2000 (钛酸锂)	良好	低	电压最高、成本最低、安全性能优异	循环性能差

- ◆ **电池能量密度提升，驱动负极向高性能迭代，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)。**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。**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。**

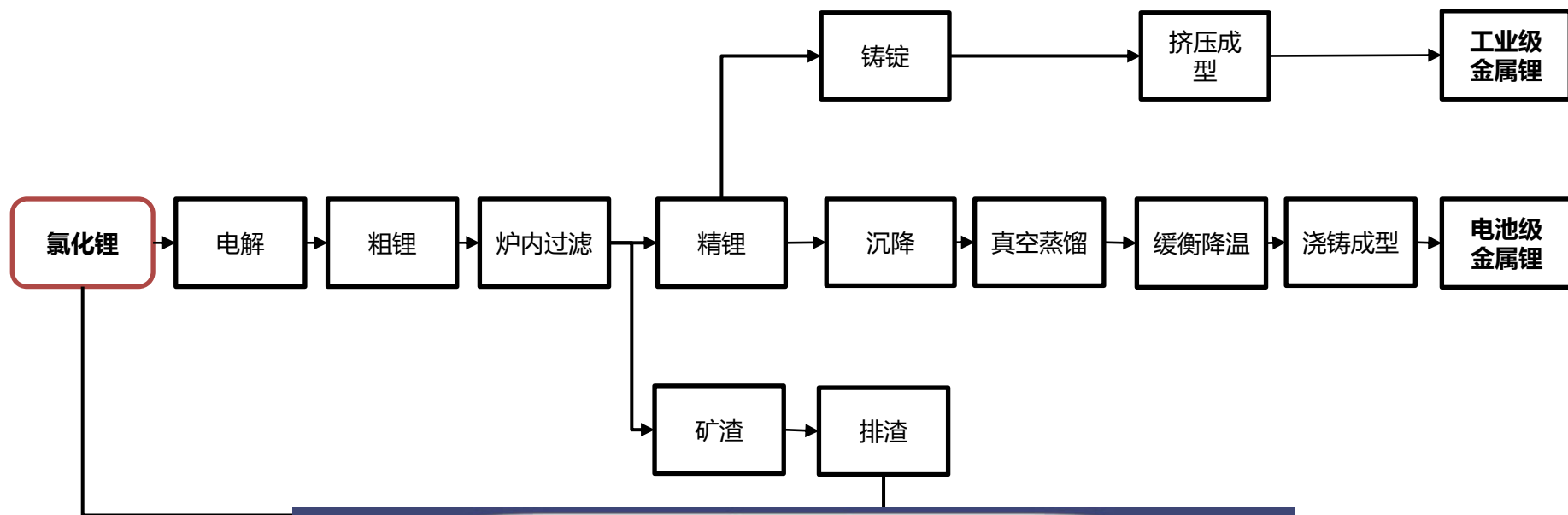
表 负极材料性能对比

	负极材料	比容量(mAh/g)	首次效率(%)	电极电位(V)	倍率性能	循环寿命(次)	体积膨胀率(%)	安全性	市场价(万元/吨)
碳材料	天然石墨	340-370	90-93	0.2	一般	>1000	<12	一般	3-6
	人造石墨	310-360	90-96	0.2	一般	>1500	<12	良好	3-7
	中间相碳微球	300-350	90-94	0.2	良好	>1000	-	良好	6-10
	无定形碳(硬碳)	300-400	80-85	0.52	良好	>1500	<1	良好	8-20
非碳材料	硅碳	400-700	85-90	0.3-0.5	略差	500-600	>300	一般	8-20
	硅氧	450-500	65-75	0.3-0.5	一般	>1000	>100	一般	40-60
	钛酸锂	165-170	98-99	1.55	优异	>30000	<1	高	10-35
	锂金属	3860 (理论)	90-95	-3.04	一般	>300	~120	较差	>100

负极材料诉求：高克容量、低电化学势、低膨胀、高导电性、高稳定性、低成本

- ◆ **锂金属的能量密度最高，未来应用潜力最大，但存在锂枝晶等问题，无法使用在半固态电池中，预计在全固态电池中实现突破。**锂金属是固态电池最理想的负极材料，理论比容量高，还原电位最低，因此具有巨大潜力，但需解决锂枝晶生长、循环时体积膨胀等问题，以优化金属锂安全性。半固态电池含有电解液，无法使用金属锂负极，但可以使用负极预锂化的方式提升能量密度；全固态电池可以使用金属锂作为负极，能量密度可提升至400-500Wh/kg以上，但仍有诸多工艺制造难题，导致产品价格较为昂贵，目前报价约1万元/kg。
- ◆ **锂金属采用熔融LiCl电解制备，关键在于界面平整度的控制。**金属锂的制备方法有熔盐电解法、金属热还原法和真空蒸馏法，其中熔盐电解法为主流制备方式，主要工艺流程为将氯化锂和氯化钾等原料混合制成熔盐，在电解槽内通电析出粗锂，通过炉内过滤分离出高纯度精锂，再经沉降、真空蒸馏、降温、浇铸等工序制成电池级金属锂，其中部分低纯度金属锂经过滤后可通过铸锭、挤压成型制成工业级金属锂，关键制备在于产品纯度和界面的平整度。

图 赣锋锂业金属锂生产流程



- ◆ **隔膜短期仍保留，通过涂覆固态电解质，增加其价值量，长期预计被取代。**半固态电池中，仍然需要隔膜来分隔正负极防止短路，并作为载体表面涂覆氧化物或者复合固态电解质，从而增加价值量。**全固态电池中，固态电解质也具有隔膜的功能，隔膜+电解液预计会被取代。**长期来看，隔膜+电解液会逐渐退出电池市场。
- ◆ **固态电解质为新增材料环节，未来预计主要由正极厂商生产。**固态电解质从结构上，与正极材料结构类似，使用固相法/液相法制备，如LATP固态电解质和铁锂正极均为橄榄石型结构，LLZO固态电解质和三元正极均为层状型结构。因此，由于结构具备相似性，固态电解质天然适合正极厂商生产。长期看，正极厂商有可能会变为正极+固态电解质厂商，进一步扩大在电池中价值量。

图 半固态电池仍保留隔膜（卫蓝新能源）

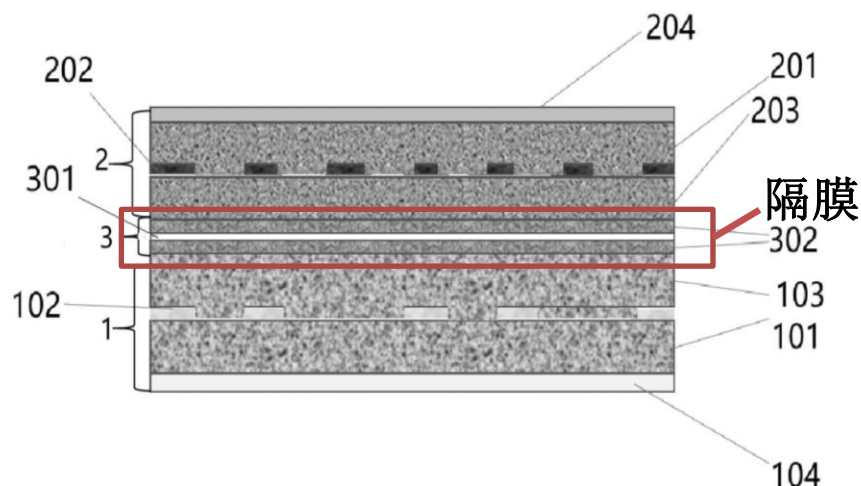
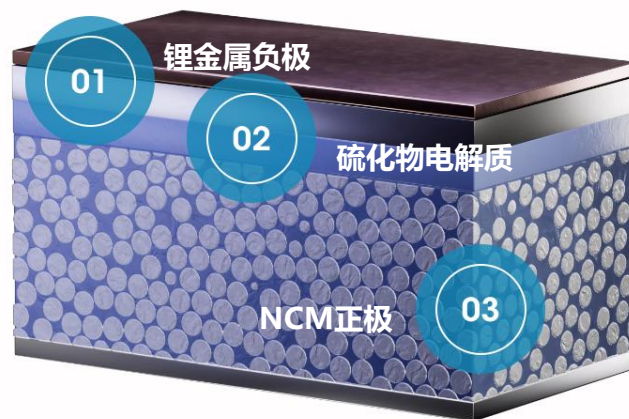


图 全固态电池不保留隔膜（Solid Power）



- ◆ 整体来看，半固态和全固态均带来材料体系的升级，正极厂商长期受益度高，隔膜、电解液厂商逻辑或受损。
- ◆ **半固态**：负极收益度最高，由石墨向硅碳负极迭代；正极其次，由高镍向超高镍、镍锰酸锂迭代；其余变化较小。
- ◆ **全固态**：正极受益度最高，由高镍向高电压，或镍锰酸锂、富锂锰基等新体系迭代，此外拓展固态电解质环节；负极其次，由石墨向锂金属负极迭代；此外，隔膜+电解液厂商长期被替代，长期逻辑受损。
- ◆ 此外，细分方向看，若全固态硫化物路线实现突破，**硫化锂**相关厂商收益，氧化物/卤化物路线实现突破，**锆**系相关厂商收益。

表 半固态/全固态电池相关环节生产厂商

类型	液态电池	半固态电池	全固态电池
电解质	电解液厂商	电解液厂商+正极厂商	正极厂商
正极	三元/铁锂，正极厂商	三元/镍锰酸锂，正极厂商	三元/镍锰酸锂/富锂锰基，正极厂商
负极	石墨，负极厂商	硅碳，负极厂商	锂金属，有色厂商
隔膜	隔膜厂商	隔膜厂商	被替代
封装方式	方形/圆柱/软包，结构件厂商	方形/圆柱，结构件厂商	软包，铝塑膜厂商

◆ **全固态电池成本较为昂贵，目前预计超过5元/wh，未来有较大的降本空间。**以高镍/锂磷硫氯/锂金属硫化物全固态体系，若按照锂磷硫氯200万元/吨，锂金属箔材200万元/吨，合格率70%，全固态硫化物电池成本约5元/wh，未来材料工艺端持续降本，若按照锂磷硫氯25万元/吨，锂金属箔材85万元/吨，合格率90%，全固态硫化物电池成本有望降至1-2元/wh，后续随规模效应释放，有进一步下降的空间。

表 硫化物全固态电池成本测算（量产前）

电芯原材料	单位用量	单位	单位价格 (万元)	单位成本 (元/wh)	单位成本 占比
高镍三元	1800	t	13	0.23	10%
金属锂	120	t	200	0.24	11%
固态电解质	700	t	200	1.40	62%
碳纳米管	27	t	700	0.19	8%
其他材料（元/wh）			0.20		
电芯材料成本合计（元/wh）			2.26		
折旧（元/wh）			1.00		
成本合计（元/wh）			3.26		
合格率			70%		
实际成本合计（元/wh）			4.66		
毛利率			15%		
价格			5.48		

表 硫化物全固态电池成本测算（规模化）

电芯原材料	单位用量	单位	单位价格 (万元)	单位成本 (元/wh)	单位成本 占比
高镍三元	1800	t	10	0.18	26%
金属锂	120	t	85	0.10	15%
固态电解质	700	t	25	0.18	26%
碳纳米管	27	t	100	0.03	4%
其他材料（元/wh）			0.20		
电芯材料成本合计（元/wh）			0.68		
折旧（元/wh）			0.50		
成本合计（元/wh）			1.18		
合格率			90%		
实际成本合计（元/wh）			1.32		
毛利率			15%		
价格			1.55		

- ◆ **全固态电池前景广阔，带来材料端+设备端全新增量。** 根据我们测算，35年固态电池有望突破300GWh，对应市场空间超3500亿元，固态电解质需求21万吨，对应市场空间超210亿元，硫化锂需求9万吨，对应市场空间超180亿元，金属锂需求3.6万吨，对应市场空间288亿元，设备端市场空间225亿元。

表 硫化物全固态电池关键环节市场空间预测

	2027E	2028E	2029E	2030E	2035E
全固态电池出货量 (GWh)	0.5	0.8	1.0	3.0	300.0
全固态电池价格 (元/Wh)	5.5	3.5	2.3	1.5	1.2
市场空间 (亿元)	27.5	26.3	22.5	45.0	3529.4
固态电解质 (万吨)	0.04	0.05	0.07	0.21	21.00
固态电解质价格 (万元/吨)	200	100	50	25	10
固态电解质市场空间 (亿元)	7.0	5.3	3.5	5.3	210.0
硫化锂 (万吨)	0.02	0.02	0.03	0.09	9.03
硫化锂价格 (万元/吨)	100	80	50	40	20
硫化锂市场空间 (亿元)	1.5	1.8	1.5	3.6	180.6
金属锂 (万吨)	0.01	0.01	0.01	0.04	3.60
金属锂价格 (万元/吨)	200	150	125	85	80
金属锂市场空间 (亿元)	1.2	1.4	1.5	3.1	288.0
碳纳米管 (万吨)	0.001	0.002	0.003	0.008	0.810
碳纳米管价格 (万元/吨)	500	300	250	100	80
碳纳米管市场空间 (亿元)	0.7	0.6	0.7	0.8	64.8
设备端价格 (亿元/GWh)	3.0	2.5	2.2	2.0	1.5
设备端市场空间 (亿元)	1.5	0.6	0.6	4.0	225.0

PART6 国内、海外相关公司近况更新

- ◆ **长期技术发展看，固态电池为重点布局方向，短期由半固态电池过渡，宁德时代在半固态和全固态技术行业领先，全球龙头地位长期稳固。**
- ◆ **半固态：宁德时代推出凝聚态电池，兼具高比能与高安全，可快速实现量产。** 宁德时代23年4月推出凝聚态电池，能量密度可高达500Wh/kg，并具备优秀的充放电性能，24年已具备车规级量产能力，同时进行航空级合作开发，已成功试飞4吨级民用电动飞机，8吨级飞机预计27-28年发布，此外，今年底搭载宁德时代电池的eVTOL预计能够首次飞行。
- ◆ **全固态：宁德时代布局硫化物路线，目标27年小批量量产。** 宁德时代在全固态电池已投入7-8年的时间进行研究，布局最具潜力的硫化物全固态电解质。曾毓群在24年世界动力电池大会表示，如果用技术和制造成熟度作为评价体系（1-9打分），宁德时代的全固态电池目前处于4的水平，对比全世界的情况，研究算是“领先一大步”，或者英文叫做“Second to none”，目标是27年达到7-8的水平，实现小批量生产。据晚点Auto，宁德时代在今年增加了对全固态电池的研发投入，已将全固态电池研发团队扩充至超1000人，目前主攻硫化物路线，近期已进入20Ah样品试制阶段。

图 凝聚态电池产品性能

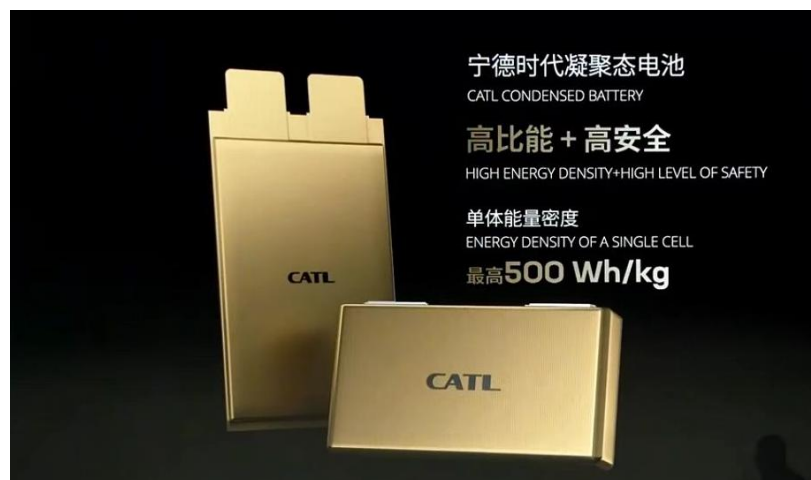
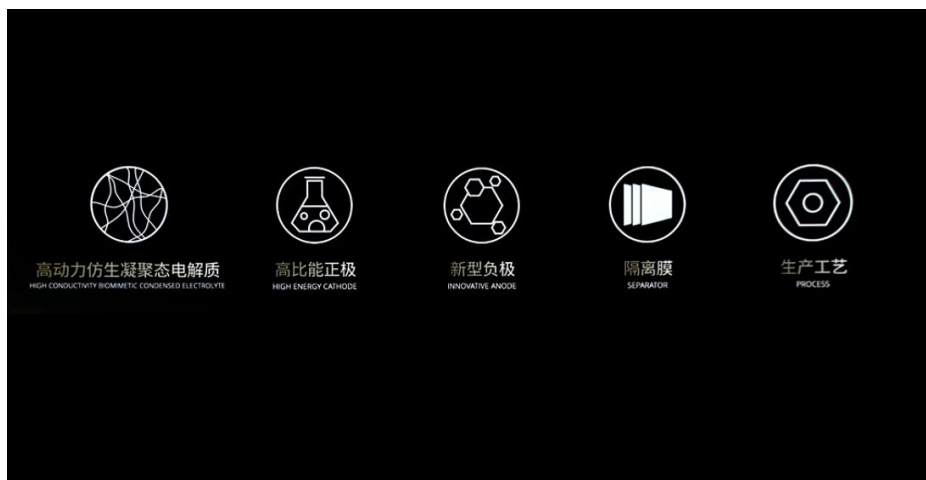


图 凝聚态电池材料端创新设计



曾毓群说：“如果要在6000个大气压下，全固态电池才能实现较高的低温性能，这意味着这些器件还无法投入市场应用。”

- ◆ 公司脱胎于清华大学材料学院，主要和上汽集团绑定，固态电池分为三代产品，量产进度相对较快。
- ◆ **第一代**：能量密度320Wh/kg，半固态，高镍9系，增加LATP+PVDF复合涂层，搭载上汽智己光年版车型。24年10月正式量产；
- ◆ **第二代**：能量密度180Wh/kg，半固态，新正极体系（对标铁锂），搭配LATP+PVDF复合涂层，25年H2搭载上汽部分车型；
- ◆ **第三代**：能量密度400Wh/kg，全固态，富锂锰+卤化物/硫化物体系，26年装车验证，27年装车。

图 清陶能源正极、电芯生产工艺

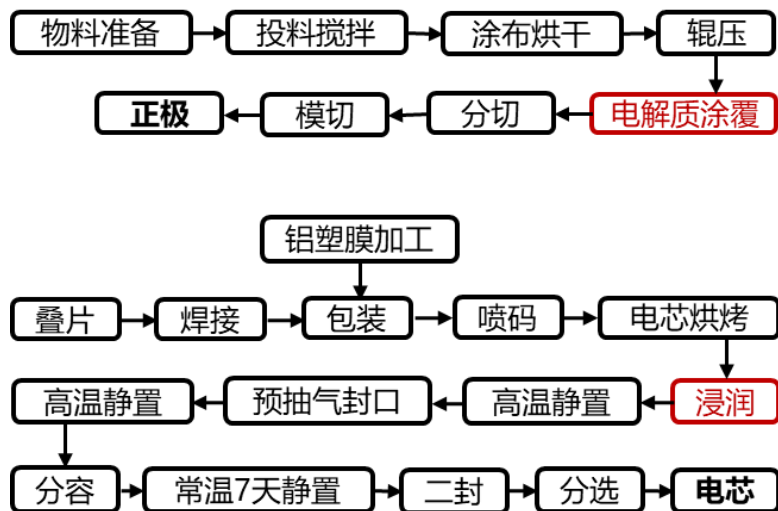
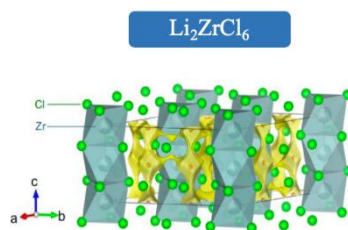
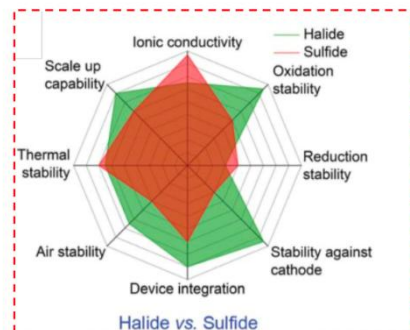


图 清陶能源卤化物技术布局



成本分析

电解质类	材料	电导率 (mS/cm)	原材料成本 (元/kg)	与LiPS-Cl 价格比
硫化物	$\text{Li}_6\text{PS}_5\text{Cl}$	~10	31650	100.0%
	$\text{Li}_2\text{S-P}_2\text{S}_5$	~5	12600	39.8%
	$\text{Li}_{10}\text{GeP}_2\text{S}_{12}$	~12	62150	196.4%
	Li_3InCl_6	~1.5	9000	28.4%
卤化物	Li_2ZrCl_6	~0.5	4140	13.1%
	Li_3YBr_6	~1.7	15500	49.0%
	Li_2ZrCl_6	~0.8	855	2.7%



- 优点：电导率高、成本低、耐氧化
- 痛点：耐还原性差

开发策略：固态电解质材料复配使用，优势互补

- ◆ 脱胎于中科院物理所，掌握原位固态化核心工艺，此前与蔚来汽车合作，量产进度相对较快。
- ◆ **动力电芯**：360Wh/kg，具备超高能量密度，单次续航里程超过1000km，已于23年底量产交付蔚来汽车，并在江淮钇为等多家知名整车厂获得定点；
- ◆ **储能电芯**：165Wh/kg，280Ah，具备超高安全性，已于23年下半年量产交付，为三峡、海博思创、国电投等多个储能项目供货；
- ◆ **小动力电芯**：320Wh/kg，目前已为多家国内外无人机、机器人、便携电源等客户供货。

图 卫蓝新能源半固态电芯制备工艺流程

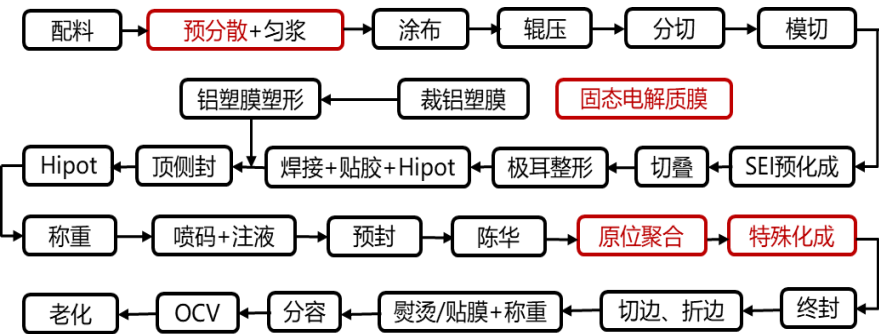


表 卫蓝新能源年底产能布局（单位：GWh）

合作方	时间	内容
曼恩斯特	24年9月	中科超能联手曼恩斯特签订合作协议，围绕固态电池前段设备环节展开合作
普利特	24年8月	宣布达成在新能源系统材料、固态电池产品、资本合作等多维度的全面战略合作
许继电气	24年7月	共同探索储能电站以及固态电池等领域应用
新云医疗	24年5月	携手推动医疗植入固态电池技术的研发和应用，提升植入式医疗器械性能
钇威科技	24年4月	携手钇威科技在合肥携手宣布达成固态电池战略合作协议，联手攻坚4695大圆柱半固态电芯
联泓新科	23年5月	实施固态电池、半固态电池等新型电池关键功能材料的开发、生产、销售
容百科技	22年4月	约定在22-25年期间将向容百科技采购固态锂电正极材料产品不低于3万吨
当升科技	21年7月	约定在22-25年期间向后者采购总量不低于2.5万吨固态锂电材料

- ◆ 公司已在江西新余实现4GWh半固态电池产线投产，预计2025年于重庆建成10GWh产线。
- ◆ **第一代半固态电池**：半固态电池，能量密度260Wh/kg+，22年在全球率先实现装车运营，在动力、3C数码及储能电池中应用，已开发离子电导率达到1.5mS/cm新型LATP+材料，在行业率先实现千吨级产线投产；同时，浙江锋锂在持续开发和改进LLZO固体电解质材料，最新开发出1.5mS/cm高电导低BOM成本材料。
- ◆ **第二代半固态电池**：半固态电池，能量密度400Wh/kg+，含锂金属负极，提高热失控边界，持续放电倍率大于5C，均通过各项安全测试，主要在高端动力、航空器等领域应用。

表 公司固态电池产品迭代情况

	固体含量	能量密度	循环寿命	电解质	正极	负极	隔膜	已配套车型
第一代	80%	260Wh/kg+	2000次+	氧化物	高镍三元	石墨	柔性固体电解质膜	东风E70
第二代	90%	400Wh/kg+	600次+	氧化物	高镍三元	含锂负极	固态隔膜	-
第三代	100%	-	-	硫化物	-	-	无	-

表 公司新型电池产能规划情况 (单位: GWh)

基地	22	23E	24E	25E
江西新余	2	4	4	4
重庆两江	0	0	0	10
广东东莞	0	0	0	0
总计	2	4	4	14

- ◆ 辉能科技布局氧化物全固态电池，取消隔膜设计，台湾首座工厂已投产，计划向VinFast、奔驰等提供固态电池，预计产能达7GWh时价格与液态电池持平。
- ◆ 技术：目前选用811正极+硅氧负极半固态路线(3%wt)，能量密度超270Wh/kg，未来向全固态+锂金属迭代。公司具备独特的商业模式，可以直接以Inlay形式出货(正负极、电解质组成的薄片)
- ◆ 产能：中国台湾桃园首座Giga级锂陶瓷电池工厂已投产，投资42亿新台币，初始产能为每年0.5GWh，足以供应1.4万辆电动汽车使用，最终规模预计将达到2GWh；此前在法国规划固态电池超级工厂，投资52亿欧元，规划产能48GWh，但24年7月宣布建设进程放缓；此外还和VinFast考虑合资在越南建设固态电池工厂。
- ◆ 客户：主要有VinFast、奔驰、ACC、FEV、Gogoro、蔚来、一汽，辉能首批量产的固态电池可能会提供给VinFast和奔驰装车测试。

图 公司固态电池产品的设计图

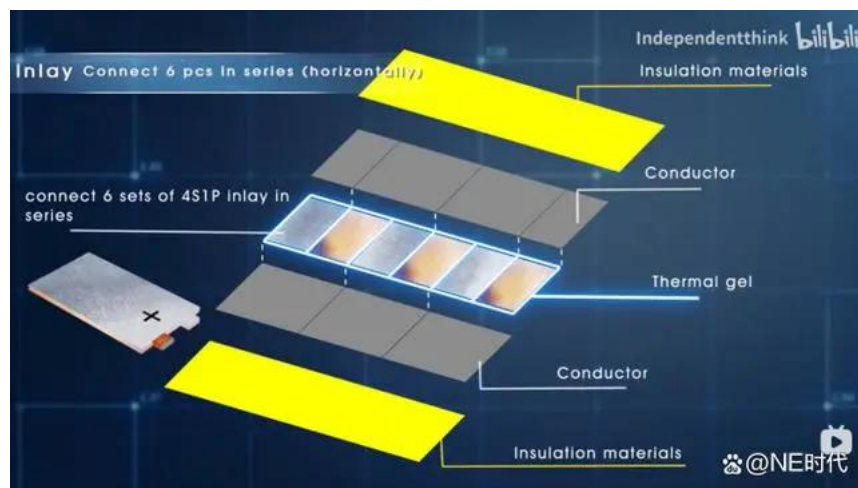


表 辉能科技合作企业情况

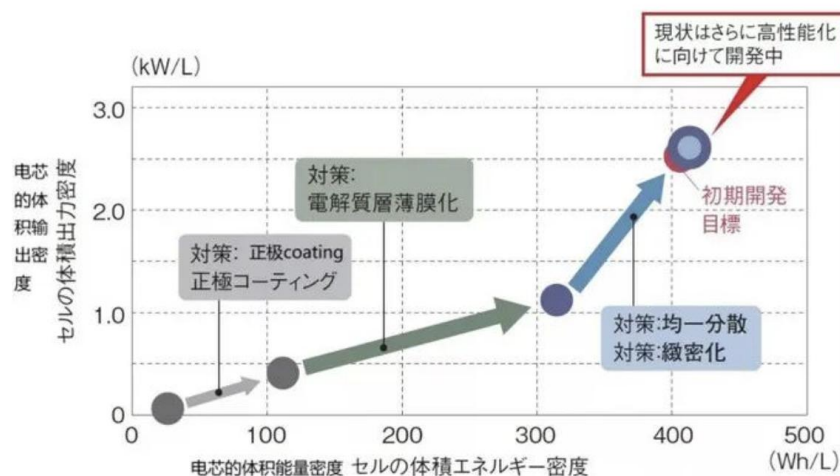
企业	业务	国家	开始时间	合作内容
奔驰	整车	德国	16年	共同开发固态电池，入席董事会，并推动欧洲建厂，未来几年推出固态新车型
VinFast	电动车	越南	22年	合作开发固态电池，支持加速纯电动新车型落地，固态电池预计24年起供货
ACC	电动车电芯制造	法国	22年	共同推动“ProLogium Inside”的次世代新能源汽车电池解决方案
FEV	整车和动力总成软硬件开发	德国	22年	合作开发固态电池能源储存方案，满足各方客户需求以及电池芯、模块及系统验证的潜在合作
Gogoro	换电制造	中国（台湾）	22年	共同研发全球第一颗电池交换式电动机车固态电池原型，导入两轮车市场，预计未来3-4年投产
蔚来	电动车	中国	19年	联合开发固态动力电池
南都电源	储能	中国	17年	就固态电池生产技术授权合作进行了初步探讨

- ◆ **专利数量遥遥领先，主攻硫化物体系，26年正式量产全固态电池。** 丰田于90年开始布局固态电池研究，专利数目近1500项，在全球一骑绝尘，联手日本能源巨头**出光兴产**和电池巨头**松下**，共同打造固态电池供应链。24年9月，据丰田官方透露，公司宣布其固态电池生产计划已获得日本政府正式批准，计划于2026年正式启动固态电池的生产，初期虽产能有限，但预计在未来几年内将迅速扩大规模，至2030年后实现年产量9GWh的目标。此外，公司介绍该电池仅需10分钟即可充满电，在WLTP工况下，车辆的续航里程可达到1000公里，甚至有望超越1200公里。

图 丰田全固态电池原型机



图 丰田全固态电池商业化应用的四大技术

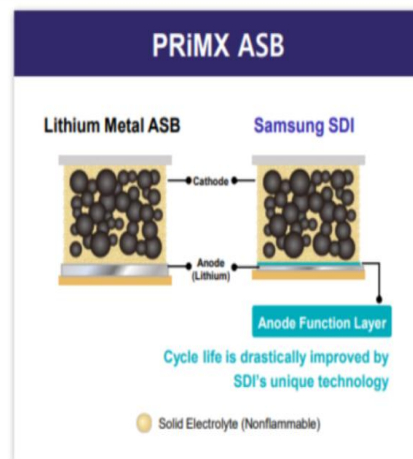


- ◆ **三星SDI池具备多项关键技术，全固态电竞争实力较强，主攻硫化物路线，计划27年量产全固态电池。**
- ◆ **进展：**已于2023年建立了一条试验线，去年年底首批产品已经交付给电动汽车制造商进行测试，与车企共同进行了六个多月的测试，并收到了积极的反馈。
- ◆ **性能：**能量密度500Wh/kg，可使电动汽车实现续航里程600英里，充电9分钟可以将容量从20%充到80%。
- ◆ **应用：**全固态电池生产成本过高，主打高端细分市场，首先用在丰田的雷克萨斯上。
- ◆ **技术：**三星SDI全固态电池技术领先，引进Ag-C负极、SUS集电器、硫银锗矿型电解质及LZO涂层等，并利用了一种热等静压技术，实现1000次+充放电循环、库伦效率>99.8%、900Wh/L能量密度。

图：三星SDI Ag-C负极硫化物全固态电池参数

指标	参数特征
电池容量	5.8Ah(60°C, 0.05C)
结构	NCM811/LSPSC/Ag/@C
质量能量密度	>400Wh/kg
体积能量密度	>900Wh/L
循环周期	1000周(0.6Ah, 0.5C)
面面积	6.8mAh/cm ²
安全性能	软包电池在210°C条件下测试没有出现胀气；对0.6Ah电池进行裁剪未有问题；油浴测试通过

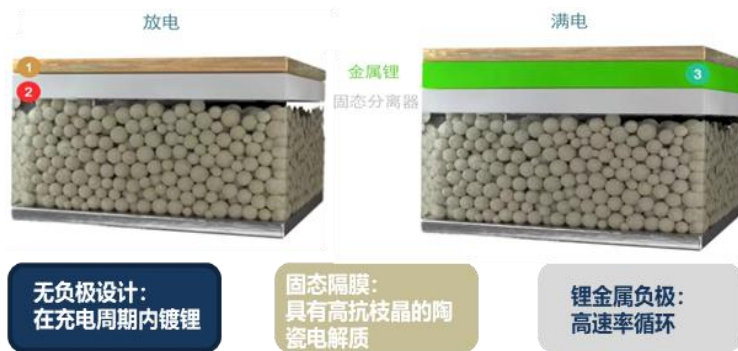
图：三星全固态电池结构展示



- ① **High-Ni NCA** : The highest specific energy
- ② **Sulfide solid electrolyte** : High ionic conductivity
- ③ **Novel anode** : Preventing Li-dendrite
- ④ **Stacking** : High energy density and conductivity

- ◆ **脱胎于斯坦福大学，深度绑定大众汽车，布局氧化物+硫化物体系。** QuantumScape (QS) 成立于2010年，融资已超15亿美元，以LLZO石榴石型氧化物体系为主打，LGPS硫化物体系为储备；22年6月，该公司宣布生产出一种固态电池，其续航里程为650英里，充电时间为15分钟；24年初，大众汽车展示QS所开发技术的电池原型，该电池可进行1000次充电循环，且容量损失仅为5%。
- ◆ **获得大众汽车的量产协议，目标每年生产40GWh。** 24年7月，大众汽车旗下电池公司PowerCo已签署协议，将QS的下一代固态锂金属电池技术工业化。QS将以1.3亿美元的价格授予PowerCo批量生产固态电池的许可，取代大众汽车集团与QS之前通过2021年建立的试验生产线共同生产电池的合资企业。这项非独家协议涵盖使用QS的技术每年生产40GWh，并可选择每年扩大到80GWh，足以为每年约100万辆汽车提供装备。

图：QuantumScape无负极结构设计原理



表：QuantumScape产能规划

	2022E	2023E	2024E	2025E	2026E	2027E	2028E
总产能 (GWh)	0	0	0.25	0.75	6	46	91
QS-1 Pilot (1GWh)	0	0	0.25	0.75	1	1	1
QS-1 Expansion (20GWh)	0	0	0	0	5	15	20
QS-2	0	0	0	0	0	30	70

表：QuantumScape产品特性

指标	参数特征
能量密度	380-500 Wh/kg
充电率	至少1c速率, $>3 \text{ mA/cm}^2 < \sim 40 \text{ min}$ 10-80% SOC
快速充电	$<15\text{min}$ (10-80%)
循环寿命	800次 ($\leq 30^\circ\text{C}$, 1C / 1C循环)
体系	氧化物(LLZO, 主打) 硫化物(LGPS, 储备)
安全性	采用固态隔膜, 不易燃、不可燃。
成本	消除负极界面的容量损失, 降低成本

- ◆ **Solid Power**背靠宝马集团，主要布局硫化物路线。SP于12年成立，与宝马、福特签订联合开发协议，并获美国空军、国家科学基金会支持，公司潜在客户有SKI、丰田、现代、LG、松下与三星。公司规划电池单体能量密度达390Wh/kg，在此基础上通过替换正负极材料最高能量密度预计可达560Wh/kg，同时批量生产可适用传统锂离子电池产线。量产进度方面，公司22年完成硫化物全固态中试线的安装，并计划26年启动批量生产。
- ◆ **宝马**：已从Solid Power获得研发许可，后续将在其位于德国慕尼黑附近的电池制造能力中心建立一条固态电池的原型生产线，并计划在25年之前推出第一辆基于Solid Power电池技术的原型车。
- ◆ **SK on**：24年1月，双方达成价值5000万美元的三项合作协议，包括授权技术研发，供货硫化物固态电解质，以及为SK On安装固态电池产线；双方加速合作产线的建设，预计2025年完工，并已向多个潜在客户送固态电解质样品，A-2样品研发进展顺利，预计年底前交付。

图：Solid Power 两大核心产品概况



图：Solid Power的产品路线

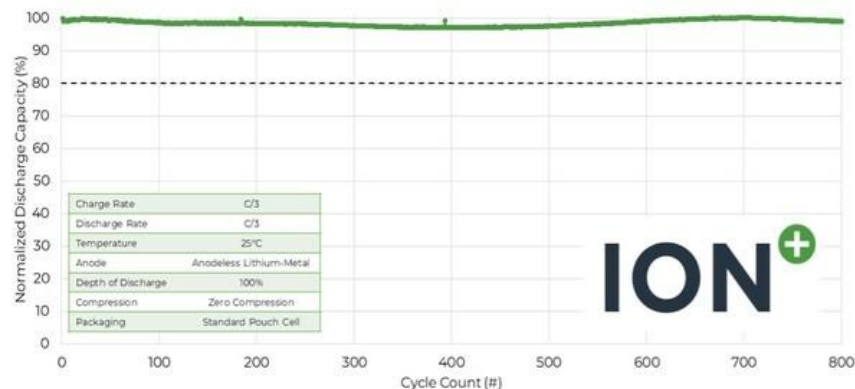
产品	硅负极+电解质 +NCM811	锂金属负极+电解质 +NCM811	锂金属负极+电解质+ 下一代正极
能量密度	390Wh/kg	440Wh/kg	560Wh/kg
体积能量密度	930Wh/L	930Wh/L	785Wh/L
循环周期	1000+循环	1000+循环	1000+循环
快充	15min 10%-90% SOC	20min 10%-90% SOC	30min 10%-90% SOC
量产计划	22年测试 25年量产	24年测试 26年量产	26年量产

- ◆ **Ion Storage Systems (ION)** 由美国能源部高级研究项目署资助, 主要布局无阳极的氧化物固态电池。22年, ION在获得3000万美元的A轮融资, 投资方包括丰田风投等; 23年9月, ION在与圣戈班陶瓷公司签订了陶瓷粉末供应协议, 确保了关键原材料的稳定供应。
- ◆ **性能:** 24年3月, ION宣布在无压力情况下, 其开发的无阳极固态电池循环125次后, 性能容量衰减低于5%, 并展现出超过1000次循环的潜力, 8月宣布其固态电池已实现800次循环。ION的电池技术采用3D陶瓷结构, 摒弃了传统材料, 无需复杂的冷却系统或笨重的防火设备, 有助于降低成本并提高效率。
- ◆ **产能:** 24年5月, ION公司宣布, 将在总部附近建设全美最大的固态电池工厂, 该固态电池生产试点线计划于今年内启动, 初始产能为1MWh, 预计到2025年初产能将增至10MWh, 长期目标是到2028年实现500MWh的产能。

图: ION无阳极全固态电池展示图



图: ION无阳极固态电池循环已实现800次



PART7 投资建议&风险提示

◆ **投资建议：**产业链看，全固态电池技术壁垒更高，正极厂商横向拓展固态电解质环节，此外干法工艺、导电剂、锂金属、硅碳负极等也迎来机遇，建议关注几条主线：①电池推荐**宁德时代**（凝聚态+硫化物）、**比亚迪**（硫化物）；②电解质推荐**容百科技**（正极+硫化物）、**当升科技**（正极+硫化物）、**湖南裕能**（正极+电解质）、**天赐材料**（硫化物+硫化锂）、**恩捷股份**（硫化物+硫化锂），重点关注**厦钨新能**（正极+硫化锂），关注**三祥新材**（氧化物/卤化物）等；③添加剂推荐**天奈科技**（导电剂）、**元力股份**（硅碳）等；④设备推荐**纳科诺尔**（干法电极）、**曼恩斯特**（陶瓷化+干法电极）、**先导智能**（固态整线）、**璞泰来**（前中段+电解质），关注**赢合科技**（前中段）等。

表 固态电池产业链相关进展

公司	环节	布局
宁德时代	电池	进入20Ah样品试制阶段，27年小批量量产，能量密度500wh/kg
比亚迪	电池	27年小批量量产，并装车示范运营
容百科技	正极+电解质	已完成多种固态电解质的开发，包括硫化物/氧化物/卤化物固态电解质等，已在中试验证阶段
当升科技	正极+电解质	研发的双相复合固态正极、固态电解质已批量出货，并在多家固态电池头部企业实现上车验证
湖南裕能	正极+电解质	锰铁锂正极可用于固态电池，积极对接固态电池厂商，针对固态电池的正极性能的研发和储备
天赐材料	硫化物+硫化锂	硫化物路线的固态电解质处于中试阶段，计划2025年做小批量生产应用
恩捷股份	硫化物+硫化锂	已成功研发硫化锂、硫化物固态电解质以及硫化物固态电解质膜，已完成小试吨级产能建设和运行
厦钨新能	正极+硫化锂	①开发全新NL层状结构正极，与华为合作紧密；②CVD法硫化锂已向多家头部企业送样
三祥新材	氧化物/卤化物	已向固态电池领域的部分企业提供了相关产品，并达到了使用要求
天奈科技	导电剂	公司产品在固态电池项目中应用良好，供给国内主流固态生产公司
元力股份	硅碳	已量产固态电池的重要材料硬炭、多孔碳，超级电容炭
纳科诺尔	干法电极	已于国内头部客户签订干法电极设备采购合同，固态电池已陆续推出高精度锂带压延，负极补锂、材料覆合一体机，包括超高压设备、等静压设备正在加快研发中
曼恩斯特	干法电极	陶瓷化路线适配硫化物，推出干法复合制膜一体机，可实现电极膜片成型，还适用于固态电解质膜片的制备
先导智能	固态整线	获国内外知名汽车及固态电池企业的全固态生产线订单，已向韩国头部电池企业交付了定制的固态干法电极涂布设备
璞泰来	前中段	与中科固能在现有的固态电解质复合膜、固态电池锂金属负极成型设备，硅碳负极和锂金属负极战略合作，此外已建成年产200吨固态电解质中试产线
赢合科技	前中段	开发的固态极片涂覆设备、干法搅拌设备已成功发货到国内头部客户现场

- ◆ **固态电池技术攻关不及预期，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，其中钴、镍、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