

# 千呼万唤始出来,犹抱琵琶半遮面

## -- 固态电池行业深度

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  
2023年4月29日

- ◆ **半固态电池先行，2023年开启小批量装车发布，全固态电池仍处于研发阶段，预计2030年后实现商业化。** 液态锂电池已接近能量密度上限，并且仍存在热失控风险，而固态电池大幅提升电池的安全性，兼容高比容量正负极，打开能量密度天花板，因此成为动力电池下一轮技术竞赛中的关键。但全固态电池工艺并不成熟，仍处于研发阶段，存在离子电导率低、循环寿命差、倍率性能差、成本高昂等问题，制约了商业化进程。而半固态电池作为液态电池和全固态电池的过渡方案，兼具安全性、能量密度和经济性，因此率先进入产业化阶段，已率先切入无人机等高端消费领域，2023年蔚来、上汽、东风、赛力斯等车企将陆续推出半固态版车型，续航里程超1000km，但目前技术、产品仍不成熟，2024年预计实现开启规模化量产，规模有望达到5GWh，并逐渐具备经济性，2025年成本有望降低至0.9元/Wh，全固态电池预计2030年开始商业化，预计量产仍需5-10年时间。
- ◆ **电解质为固态电池的核心，其中氧化物进展较快，硫化物发展潜力大。** 半固态电池兼容现有工艺设备，对产业链冲击较小，减少电解液用量，使用聚合物+氧化物复合电解质，仍保留隔膜结构，负极升级为预锂化的硅基等材料，正极升级为高镍高电压、超高镍等材料，能量密度可达350Wh/kg以上。而全固态电池取消电解液，选用聚合物/氧化物/硫化物体系作为固态电解质，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，负极升级为锂金属负极等材料，正极升级为镍锰酸锂、富锂锰基等新型材料，电极工艺向干法迭代，封装方式采用叠片+软包的方式，能量密度可达500Wh/kg以上。
- ◆ **产业链龙头加大布局，推动半固态电池落地。** 电池端看，宁德时代推出凝聚态电池，兼顾安全性、能量密度和量产难度，同时布局硫化物全固态路线；比亚迪全路线布局，后续或升级固态+短刀+CTC体系；卫蓝新能源、清陶能源、赣锋锂业、辉能科技技术优异，率先落地产能；**固态电解质端看**，天目先导、蓝固新能源绑定卫蓝新能源，性能指标优异，上海洗霸、金龙羽也在加速布局，奥克股份从原料端延伸聚合物电解质，瑞泰新材实现原位固化锂盐LiTFSI规模量产；**负极端看**，兰溪致德、贝特瑞、翔丰华硅基负极进度较快；**正极端看**，容百科技、当升科技超高镍正极布局领先。
- ◆ **投资建议：**半固态技术先行，2023年开启小批量装车发布，全固态电池仍需5-10年实现商业化。固态电池产业链方面，第一条主线看好半固态电池技术领先厂商，推荐**宁德时代、比亚迪、亿纬锂能**，关注赣锋锂业、孚能科技、国轩高科等；第二条主线关注超高镍正极厂商，推荐**容百科技、当升科技**，关注厦钨新能；第三条主线关注进度领先的硅基负极厂商，推荐**贝特瑞**，关注翔丰华；第四条主线跟踪固态电解质厂商，关注前驱体的东方锆业、三祥新材、云南锆业、驰宏锌锗，电解质的奥克股份、上海洗霸、金龙羽、瑞泰新材。
- ◆ **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: 固态电池具备本征安全，打开能量密度天花板
- Part2: 以固-固接触为核心，电解质-负极-正极梯次升级
- Part3: 半固态路线先行，全固态仍处研发阶段
- Part4: 投资建议
- Part5: 风险提示

## PART1 固态电池具备本征安全，打开能量密度天花板

- ◆ **液态电池中，有机溶剂具有易燃性，且抗氧化性较差，目前已接近能量密度上限。** 锂离子电池目前基本采取液态电解质，由溶剂、锂盐、添加剂组成，起到输送离子、传导电流的作用。但液态电解质中，有机溶剂具有易燃性、高腐蚀性，同时抗氧化性较差、无法解决锂枝晶问题，因此存在热失控风险，也限制了高电压正极、锂金属负极等高能材料的使用，预计理论能量密度上限为300Wh/kg。
- ◆ **固态电池大幅提升电池安全，打破液态电池能量密度瓶颈。** 固态电池采用固态电解质，部分或全部替代液态电解质，可大幅提升电池的安全性、能量密度，是现有材料体系长期潜在技术方向。依据电解质分类，电池可细分为液态(25wt%)、半固态(5-10wt%)、准固态(0-5wt%)和全固态(0wt%)四大类，其中半固态、准固态和全固态三种统称为固态电池。我们认为车企采用固态电池，安全性为短期驱动因素，能量密度为长期驱动因素。

图 液态/固态电池结构示意图

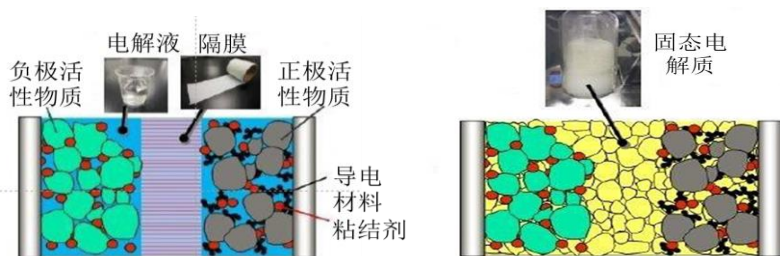


图 液态/半固态/全固态发展路径

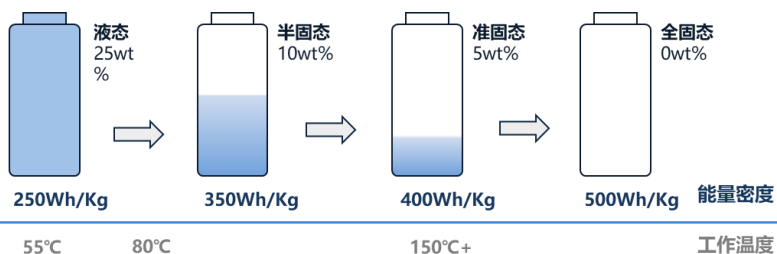
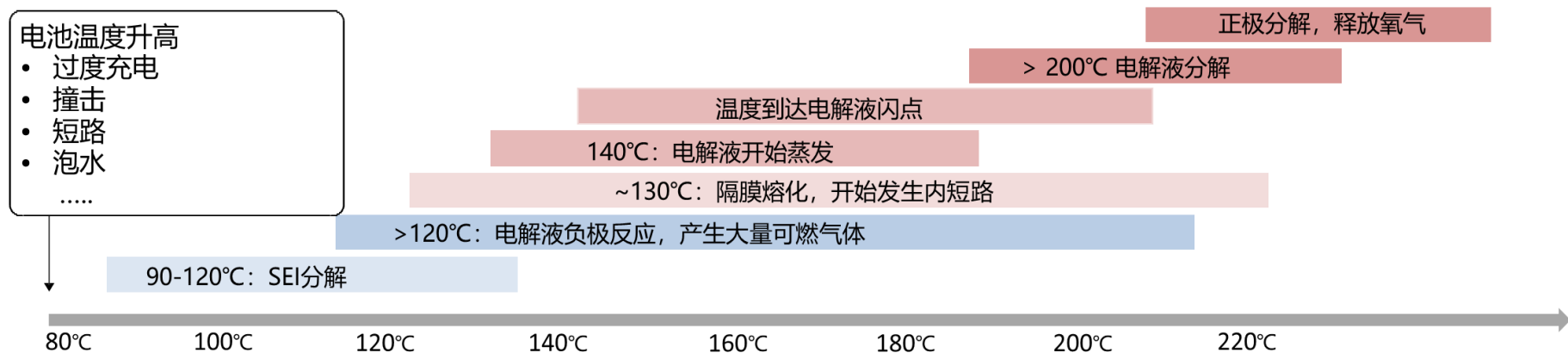


表 液态/半固态/全固态电池对比

	液态	半固态	全固态
液体含量 (wt)	25%	5-10%	0%
能量密度	250Wh/kg	350Wh/kg	500Wh/kg
电解质	有机溶剂+锂盐	复合电解质 (氧化物+硫化物、氧化物、聚合物+浸润液体)	硫化物、氧化物、聚合物
隔膜	传统隔膜	隔膜+氧化物涂覆	无隔膜
正极	三元/铁锂	高镍三元/铁锂	高镍三元/铁锂/镍锰氧/富锂锰基
负极	石墨	硅+石墨	硅+石墨/金属锂

- ◆ 随着电池能量密度的日益提升，电池热失控风险呈现上升趋势。从热失控角度看，电池应在低于60°C运行工作，但由于内部短路、外部加热、机械滥用等因素，使电池温度升至90°C，此时负极表面的SEI膜开始溶解，造成嵌锂碳直接暴露在电解液中，二者发生反应迅速放热，产生大量可燃气体，隔膜进而熔化，电池形成内短路，温度迅速升高至200°C，促使电解液气化分解、正极分解释氧，电池发生剧烈燃烧或爆炸。
- ◆ 固态电池具备本质安全性，为车厂短期主要考量因素。1) 不可燃性、热稳定性：液态电解质易燃、易挥发，分解温度约200°C（隔膜160°C），并存在腐蚀和泄露的安全隐患。而固态电解质具有不可燃、无腐蚀、无挥发等特性，分解温度大幅提升，可在更高倍率和更高温度运行，同时内部无液体不流动，电池可承受穿钉、切开、剪开、折弯，从而大幅降低热失控风险。2) 锂枝晶：液态电池中，锂枝晶的生长容易刺破隔膜，从而造成短路，而固态电解质具备高机械强度，锂枝晶生长缓慢且难刺透，进而提升电池安全性能。

图 液态锂离子电池受热易失控



- ◆ **固态电解质兼容高比容量的正负极，大幅提升电池的能量密度，为车厂长期主要考量因素。** 固态电池在兼顾安全性的基础上，可实现能量密度的突破，液态电池可达250Wh/kg+，半固态可达350Wh/kg+，准固态可实现400Wh/kg+，全固态可突破500Wh/kg，从而提升续航水平，有望解决电动车里程、安全两大核心痛点。
- **材料端看：** 固态电解质本身不能提升能量密度，但由于具备更稳定、更安全，电化学窗口宽（5V以上）等性质，因此可以兼容高比容量的正负极，比如高电压正极、富锂锰基、硅负极、锂金属负极等材料，进而大幅提升电芯能量密度；
- **结构端看：** 固态电解质将电解液的隔膜功能合二为一，大幅缩小正负极间距，从而降低电池厚度，因此提升电芯能量密度；
- **Pack端看：** 固态电解质的非流动性，可以实现电芯内部的串联、升压，可以降低电芯的包装成本，并提升体积能量密度。固态电解质的安全性，可以减少系统热管理系统需求，成组效率大幅提升，从而提升Pack能量密度。

**表 正负极电极材料性能对比**

指标	理论克容量 (mAh/g)	首次效率 (%)	电压平台 (V)
<b>正极</b>			
磷酸铁锂	170	≥85%	2.5~4.1
钴酸锂	274	≥80%	2.75~4.3
锰酸锂	148	≥90%	3.0~4.3
三元NCM	278	≥85%	3.0~4.3
三元NCA	279	≥86%	2.7~4.2
富锂锰基	458	≥80%	2.0~4.8
<b>负极</b>			
石墨	340-360	90-92%	0.2
硅基	1520-4200	60-92%	0.3-0.5
锂金属	3860		

**图 液态—固态电池材料体系及能量密度发展趋势**

电芯中液体含量 (wt%)	25	15	10	5	1	0
电解质	液态电解质		混合固液电解质			全固态
Li负极含量 (wt%)	0		5	30	50	80-100
负极材料	石墨/硅负极		预锂化负极	富锂复合负极		金属锂负极
能量密度 (Wh/kg)	250		300	350	400	500
最高操作温度 (°C)	55	80		150		

- ◆ 固态电池界面为固-固接触，离子电导率低、界面稳定性差，存在循环、快充等问题，制约其商业化进程。
- 材料端离子电导率低：固态电池中，电极与电解质之间的界面接触由固-液接触变为固-固接触，由于固相无润湿性，因此接触面积小，形成更高的界面电阻。同时固体电解质中有大量的晶界存在，且晶界电阻往往高于材料本体电阻，不利于锂离子在正负极之间传输，从而影响快充性能和循环寿命；
- 循环寿命差：固-固接触为刚性接触，对电极材料体积变化更为敏感，循环过程中容易造成电极颗粒之间以及电极颗粒与电解质接触变差，造成应力堆积，导致电化学性能衰减，甚至导致裂缝的出现，造成容量迅速衰减，导致循环寿命差的问题。

图 固-固接触 VS 固-液接触

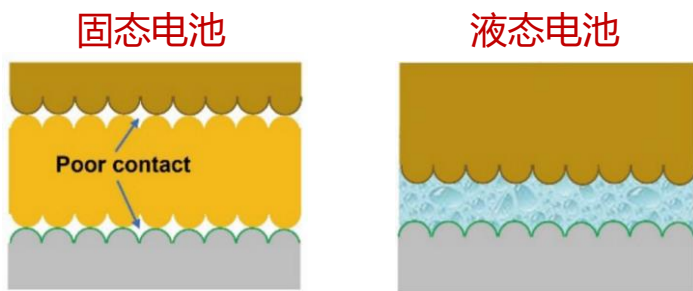


图 电极活性材料膨胀造成应力堆积

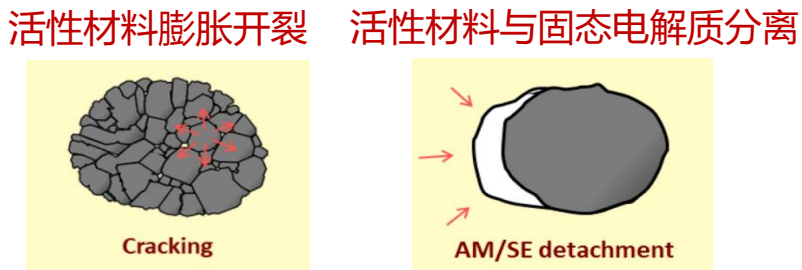


表 固/液电解质电导率对比

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



◆ **固态电池成本高于液态电池，主要体现在固态电解质和正负极。** 固态电解质目前难以轻薄化，用到的部分稀有金属原材料价格较高，氧化物电解质含锆、硫化物电解质含锗，叠加为高能量密度使用的高活性正负极材料尚未成熟，铜锂复合带价格1万元/kg，全固态对生产工艺、成本和质量控制也提出了更严苛的要求，生产设备替换率大，全固态电池成本预计明显高于现有液态电池。

图 固态电解质价格图

LLZO成本拆分	1t用量	单价
氧化锆	414.14kg	4万元/吨
氧化镧	409.09kg	1万元/吨
碳酸锂	436.03kg	15万元/吨
原材料成本	85元/kg	
实际销售价格	2000元/kg	

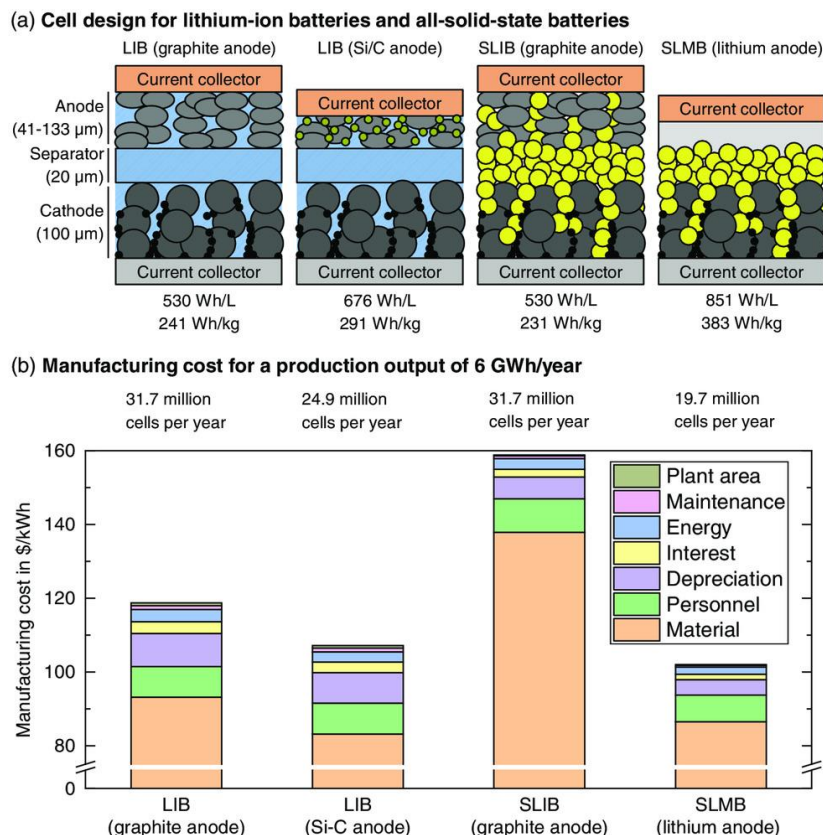
  

LPSC成本拆分	1t用量	单价
硫化锂	428.3kg	10万/kg
五硫化二磷	767.2kg	8000元/吨
氯化锂	158.3kg	15万/t
原材料成本	1万/kg	
实际销售价格	1万/kg	

铜锂复合带	实际销售价格
铜锂复合带	1万/kg

图 全固态电池成本显著高于现有液态电池



- ◆ **固态电池技术发展和应用预计将呈现梯次渗透趋势。** 我们预计液态电池到固态电池的技术迭代路径大致遵循“固态电解质→新型负极→新型正极”顺序。
- **阶段一：**引入固态电解质，保留少量电解液，正负极仍为三元+石墨/硅负极，并采用负极预锂化等技术提高能量密度；
- **阶段二：**用固态电解质逐步至完全取代电解液，用金属锂取代石墨/硅负极，正极仍为三元材料；
- **阶段三：**逐渐减薄固态电解质的厚度，并用硫化物/镍锰酸锂/富锂锰基等材料取代正极。

图 固态电池技术迭代路径

	类型	电解液	隔膜	负极	正极	产业化时间
第一代	半固态	部分替换为固态电解质	不变	石墨/硅碳，可能配合预锂化技术	三元	2022年后
第二代	全固态	全部替换为固态电解质	取消 (少数方案保留)	石墨/硅碳，可能配合预锂化技术	三元	2023-2024年
第三代	全固态	全部替换为固态电解质	取消 (少数方案保留)	金属锂	三元	2025年后
第四代	全固态	全部替换为固态电解质	取消 (少数方案保留)	金属锂	硫化物/镍锰酸锂/富锂锰基等	2030年后

◆ 半固态电池通过减少液态电解质含量、增加固态电解质涂覆，兼具安全性、能量密度和经济性，率先进入量产阶段。全固态电池工艺并不成熟，仍处于实验室研发阶段，而半固态电池已经进入量产阶段。半固态电池保留少量电解液，可以缓解离子电导率问题，同时使用固化工艺，将液态电解质转化为聚合物固态电解质，叠加氧化物固态电解质涂覆正极/负极/隔膜，提升了电池的安全性/能量密度，同时兼容传统锂电池的工艺设备，达到更易量产较低成本的效果，预计半固态电池规模化量产后，成本比液态锂电池高10-20%。

### 图 半固态电池成本拆分图

半固态电池 (LATP)						半固态电池 (LLZO)					
电芯原材料成本	单位用量	单位	单位价格 (万)	单位成本 (元/wh)	单位成本 占比	电芯原材料成本	单位用量	单位	单位价格 (万)	单位成本 (元/wh)	单位成本 占比
正极材料	1,100	t	35.0	0.34	55%	正极材料	1,100	t	35.0	0.34	36%
正负极导电剂 (SP+CNT)	100	t	17.1	0.02	2%	正负极导电剂 (SP+CNT)	100	t	17.1	0.02	2%
正极黏贴剂 (PVDF)	60	t	25.0	0.01	2%	正极黏贴剂 (PVDF)	100	t	25.0	0.02	2%
分散剂 (NMP)	165	t	3.8	0.01	1%	分散剂 (NMP)	165	t	3.8	0.01	1%
正极集流体 (铝箔)	225	t	2.7	0.01	1%	正极集流体 (铝箔)	225	t	2.7	0.01	1%
负极活性物质 (硅碳负极)	750	t	15.0	0.10	16%	负极活性物质 (硅碳负极)	750	t	15.0	0.10	10%
负极粘结剂1(PAA+CMC+SBR)	25	t	20.0	0.00	1%	负极粘结剂1(PAA+CMC+SBR)	25	t	20.0	0.00	0%
负极集流体 (铜箔)	450	t	9.6	0.04	6%	负极集流体 (铜箔)	450	t	9.6	0.04	4%
电解液	700	t	4.0	0.02	4%	电解液	700	t	4.0	0.02	3%
聚合单体 (如碳酸酯、丙烯酸酯等)	70	t	1.0	0.00	0%	聚合单体 (如碳酸酯、丙烯酸酯等)	70	t	1.0	0.00	0%
LATP涂覆	100	t	8.0	0.01	1%	LLZO压片	1,000	t	40.0	0.35	37%
隔膜 (湿法)	1,050	万m2	2.3	0.02	3%	隔膜 (取消)					
壳体&辊压膜及其他	1	套	0.0	0.04	6%	壳体&辊压膜及其他	1	套	0.0	0.04	4%
电芯材料成本合计(元/wh)	0.61			100%		电芯材料成本合计(元/wh)	0.95			100%	
BMS及高压线束、箱体	0.08			10%		BMS及高压线束、箱体	0.08			7%	
折旧(元/wh)	0.03			4%		折旧(元/wh)	0.03			3%	
电费、人工费等(元/wh)	0.05			6%		电费、人工费等(元/wh)	0.05			5%	
成本合计(元/wh)	0.77			100%		成本合计(元/wh)	1.11			100%	
合格率	90.0%					合格率	90.0%				
成本合计 (元/wh) , 不含税)	0.86					成本合计 (元/wh) , 不含税)	1.23				
价格 (元/wh) , 含税)	1.14					价格 (元/wh) , 含税)	1.64				
毛利率	15.0%					毛利率	15.0%				
单w毛利 (元/wh)	0.15					单w毛利 (元/wh)	0.22				

◆ **国内以市场驱动为主，短期聚焦半固态电池技术，同时布局硫化物路线。**2020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，2023年进一步提出加强固态电池标准体系研究，目前尚未出台补贴政策，仍以市场驱动为主。因此国内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，2020年实现首次装车突破，但能量密度在260Wh/kg水平，性能提升有限，2023年实现360Wh/kg+装车发布，成为产业化元年，2024年预计实现规模放量。

图 中国动力电池的规划内容

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）》	<b>2020年：电池模块比能量≥300 Wh/kg，成本≤1.5元/Wh。</b>
2015年5月	国务院	《中国制造2025》	<b>2020年：</b> 电池能量密度达到300 Wh/kg； <b>2025年：</b> 电池能量密度达到400 Wh/kg； <b>2030年：</b> 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》	<b>2020年：</b> 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； <b>2025年：</b> 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； <b>2030年：</b> 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》	<b>2020年：电池单体比能量≥300 Wh/kg</b> ，力争实现350Wh/kg，系统比能量力争260Wh/kg、成本≤1元/Wh； <b>2025年：电池系统比能量≥350 Wh/kg。</b>
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》	能量型锂离子电池目标 <b>2025年：</b> 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： <b>比能量&gt;350Wh/kg</b> ，寿命>1500次/12年，成本<0.50元/Wh； <b>2030年：</b> 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： <b>比能量&gt;400Wh/kg</b> ，寿命>1500次/12年，成本<0.45元/Wh； <b>2035年：</b> 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： <b>比能量&gt;500Wh/kg</b> ，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， <b>首次将固态电池的研发上升到国家层面。</b>
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； <b>加快研发固态电池，加强固态电池标准体系研究。</b>

◆ **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2千亿美元（约100亿元人民币），力争2030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2025-2028年开发出能量密度400Wh/kg的商用技术，2030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2030年达到能量密度500Wh/kg。

图 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年全国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，瓦尔塔边科、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。
美国	2022年5月	德国系统与研究所发布《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。
	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。
美国	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	能源部宣布向多个大学、企业资助4200万美元用于包括固态电池的新一代电池技术研究。

◆ **车企绑定电池厂，提前布局固态电池技术，海外车企处于领先地位。** 海外车企为卡位下一代电池技术，纷纷入局，其中日系车企布局较早，受政策驱动，携手电池企业共同研发，欧美车企则通过投资初创企业进行布局。国内车企同样积极合作固态电池新秀，如蔚来合作卫蓝新能源，北汽、上汽、广汽投资清陶能源等。车企入局为固态电池企业提供了资金、技术、客户多重保障，有助于推进固态电池商业化进程。

图 主流车企对固态电池布局情况

地区	车企	绑定电池企业	布局
日韩	日产	自产+松下	2022年建设叠层软包全固态电池电芯试点生产设施，2024年建造固态电池试点工厂，2028年推出搭载全固态电池的电动车型。
	本田	松下、SES	2018年与丰田、日产、松下合作研发固态电池，获得1400万美元的资金支持，计划2024年建设全固态电池示范生产线，并将于2025年至2030年实现装车应用。
	丰田	自产+松下	2019年与松下合作，设立开发、生产电动汽车（EV）等车载电池的合资公司，致力于开发、量产固态电池。计划2025年前实现全固态电池小规模量产，率先应用于混动车型，2030年前推出全固态电池电动车型。
	现代	Factorial Energy、SES	投资Factorial Energy，共同开发和测试Factorial的固态电池技术，计划2025年试生产配备固态电池的电动车，2030年左右实现全面批量生产。
欧美	大众	QuantumScape	投资QuantumScape，建立固态电池生产线，计划2024年推出搭载QuantumScape固态电池的电动车。
	奔驰	辉能科技、Factorial Energy	投资辉能科技共同研发固态电池，并计划在2025年后将其固态电池技术整合到奔驰的多款电动车型中。投资固态电池公司Factorial Energy，共同开发固态电池，计划在未来5年内将该技术引入批量生产。
	宝马	自产+Solid Power	自建电芯研发中心，研发固态电池技术，计划2026年实现固态电池突破性进展并随后量产。投资Solid Power并签署合作协议，计划2022年开始测试其100Ah的固态电芯，2030年实现全面量产应用。
	Stellantis	Factorial Energy	投资Factorial Energy，共同开发和测试Factorial的固态电池技术，计划2026年引入固态电池技术。
	菲斯克	自产	申请固态锂电池专利，实现固态电池量产，搭载在电动跑车Emotion上。
	福特	Solid Power	投资Solid Power并签署合作协议，2022年开始在实际中搭载并测试其固态电池。
中国	通用	SES	投资固态电池初创企业Soelect，开发固态电池技术。投资锂金属电池公司SES，签订全球首个车用锂金属电池A样品开发合作项目。
	比亚迪	自产	2016年确定固态电池为未来发展方向，尝试小规模使用并计划在未来10年，最快5年内推出固态电池。2017年，申请全固态锂离子电池正极复合材料和全固态锂离子电池的发明专利。2018年1月，推进固态电池项目商用，将固态电池作为下一步研发重点，推进相关产品的产业化研发应用。2021年，公开硫系添加剂全固态电池专利。
	蔚来	辉能科技、卫蓝新能源	2019年8月与辉能科技签署战略合作协议，共同打造采用辉能MAB固态电池包的样车，就固态电池生产应用展开进一步合作。2021年发布首款新车产品 ET7，将使用150kWh电池包（固态电池），能量密度可达360Wh/kg。
	东风汽车	自产+赣锋锂业	2018年成立固态电池项目组，2019年7月完成首代固态电池系统开发。正在研发第二代固态电池，搭载整车续航里程可达1000公里以上，预计2024年上半年可实现量产搭载。

- ◆ **固态电池高安全与高比能优势显著，率先于无人机等成本敏感度低的高端消费领域实现小批量产。** 相较液态电池，固态电池作为轻量化高比能电源更适配无人机长续航要求，此外作为高安全便携式电源已在可穿戴设备、儿童消费电子等对安全性要求较高的消费电子产品上实现应用。头部固态电池厂商均率先于高端消费领域出货，辉能科技/卫蓝新能源首条40MWh/200MWh半固态产线用于无人机等高端消费品。
- ◆ **固态电池动力储能领域仍受性能、成本制约，半固态预计24年开启规模化装车，30年前后规模化应用于储能领域。** 动力方面，固态电池提升安全和续航，并有利于打造高电压平台、更高效的CTC技术和热管理系统。我们预计短期由安全性驱动，长期由能量密度驱动，但目前技术尚不成熟，22年前以示范运营装车为主，卫蓝、清陶、锋锂、国轩、孚能半固态电池均配套商业化车型，预计23年开启小批量装车发布，24年预计开启规模化装车。储能方面，固态电池具备本征安全，契合储能电池高安全要求，但循环寿命、性价比受限，当前应用以示范性储能项目为主，需技术突破成本降低后，实现商业化应用。

## 图 固态电池应用场景

### 消费领域



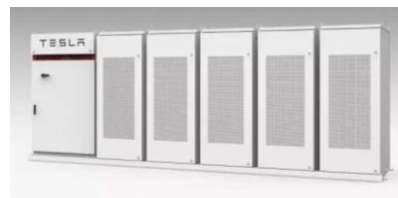
无人机、3C高端消费  
率先小批量产

### 动力领域



23年小批量装车  
24年开启规模化上车

### 储能领域



当下以示范项目为主  
30年实现规模商用

- ◆ **半固态先行，23年开始产业化，全固态预计30年开始放量。**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23年出货量小于1GWh，24年达5GWh左右，25年近20GWh，30年超100GWh，渗透率提升至约1.2%+，35年预计超300GWh，渗透率提升至2%+；全固态电池预计量产还需5-10年，30年开始放量，预计出货2-3GWh，35年有望超100GWh，渗透率提升至近0.7%。

**表 固态电池出货量及渗透率预测**

	2023E	2024E	2025E	2030E	2035E
全球新能源车销量 (万辆)	1320	1705	2241	5760	9046
YoY	30.65%	29.12%	31.49%	15.95%	9.49%
全球动力电池实际需求 (GWh)	843	1168	1631	4914	7995
YoY	36.11%	38.53%	39.72%	18.32%	11.13%
全球消费类电池合计 (GWh)	131	144	158	255	325
YoY	10.00%	10.00%	10.00%	61.05%	27.63%
全球储能电池合计 (GWh)	255	440	708	3097	7707
YoY	98.69%	72.11%	61.09%	337.34%	148.83%
全球锂电池合计 (GWh)	1229	1751	2498	8266	14428
YoY	41.81%	42.47%	42.64%	23.09%	15.54%
半固态电池渗透率	0.08%	0.29%	0.80%	1.21%	2.08%
半固态电池出货量 (GWh)	< 1	5	20	100	300
全固态电池渗透率	0.00%	0.00%	0.00%	0.03%	0.69%
全固态电池出货量 (GWh)	0	0	0	2.5	100
固态电池渗透率	0.08%	0.29%	0.80%	1.24%	2.77%
固态电池总出货量 (GWh)	1	5	20	102.5	400



## PART2 以固-固接触为核心，电解质-负极-正极梯次升级

- ◆ **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/锂金属负极，正极从高镍升级到了高镍高电压/富锂锰基等，隔膜仍保留并涂覆固态电解质涂层，锂盐从LiPF<sub>6</sub>升级为LiTFSI，封装方式主要采用卷绕/叠片+方形/软包的方式，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预锂化的硅基负极/锂金属负极，正极从高镍升级到了超高镍/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。

**图 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 <sub>6</sub> +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	硅基/锂金属
正极	三元/铁锂	高镍高电压/富锂锰基	超高镍/镍锰酸锂/富锂锰基等
封装方式	卷绕/叠片+方形/圆柱/软包	卷绕/叠片+方形/软包	叠片+软包
能量密度	< 300Wh/kg	> 350Wh/kg	> 500Wh/kg

◆ **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，可分为氧化物、硫化物、聚合物三种路线。**聚合物**体系率先在欧洲商业化，优点为易于加工、生产工艺兼容、界面相容性好、机械性能好，缺点为常温离子电导率低、电化学窗口略窄、热稳定性和能量密度提升有限，因此制约了其大规模应用；**氧化物**综合性能最好，优点为电化学窗口宽、热稳定性好、机械强度高，缺点为难以加工、界面相容性差、电导率一般。整体看，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，预计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；**硫化物**发展潜力最大，优点为电导率高、兼具强度与加工性能、界面相容性好，缺点为与正极材料兼容度差、对锂金属稳定性差、对氧气和水分敏感、存在潜在污染问题、生产工艺要求高。硫化物目前处于研发阶段，但后续发展潜力最大，工艺突破后，可能成为未来主流路线。

图 固态电池路线对比

类型	聚合物	氧化物	硫化物
材料	PEO、PAN、PMMA、PVDF等	LiPON、LATP、LLTO、LLZO等	LiGPS、LiSnPS、LiSiPS等
电导率	常温 $10^{-5}$ S/cm, 高温 $10^{-4}$ S/cm	$10^{-4}$ S/cm	$10^{-3}$ S/cm
电化学窗口	< 4V	> 5V	1.7-2.1V, 修饰后达5V
锂枝晶	低抑制	抑制	抑制
热稳定性	<300°C	<500°C	<450°C
空气稳定性	高	中	低
可加工性	易加工	易碎, 难加工	易加工
生产工艺	简单	适中	复杂
成本	低	高	高
布局企业	Bolloré、Hydro-Québec等	清陶能源、卫蓝新能源、辉能科技、赣锋锂业、QuantumScape等	丰田、松下、三星SDI、SolidPower、宁德时代、LG新能源等
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。**高分子**主要选用聚氧化乙烯(PEO)，对锂盐溶解性好，高温离子电导率高，但室温中结晶度高，离子电导率低，需进行改性处理，也可采用聚硅氧烷(PS)、聚丙烯腈(PAN)、聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)等材料，但也存在室温离子电导率低，质地较脆等问题，仍在研发改性阶段；**锂盐**主要采用LiTFSI，在聚合物中的良好分散能力与稳定性；**惰性填料**主要为氧化物，如TiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、ZrO<sub>2</sub>、SiO<sub>2</sub>等，起到降低聚合物结晶度，改善机械性能等作用。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°C，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 <sup>-7</sup> S/cm 修饰后可达10 <sup>-4</sup> 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 <sup>-6</sup> S/cm 修饰后可达10 <sup>-4</sup> 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 <sup>-3</sup> -10 <sup>-4</sup> 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 <sup>-3</sup> -10 <sup>-4</sup> S/cm	与锂电电极界面阻抗低，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

- ◆ 聚合物电解质制造工艺包括干法工艺、湿法工艺和喷涂工艺，干法湿法工艺应用广泛，两种工艺均有利弊，为主流工艺，喷涂工艺研究进展缓慢，未获大规模应用。聚合物电解质主流使用用改性高聚合度聚环氧乙烷(PEO)，主要采用多相催化聚合法合成，生成机理是配位阴离子聚合机理，一般由电池生产企业直接购置。
- **湿法工艺**与锂离子电池涂覆工艺类似，首先将聚合物(PEO等)溶解在溶剂(NMP)中，再添加锂盐(LiTFSI)、增塑剂和惰性填料等制备成电解质浆料，溶液浇铸法或刮涂法将电解质浆料成膜，然后再加热干燥，使聚合物固化、溶剂挥发，制成聚合物电解质薄膜，根据载体不同，可分为正极支撑成膜与骨架支撑成膜方式；
- **干法工艺**是将正极和电解质浆料高温熔化形成高粘度糊状物，并同时返混挤出叠加在正极集流体上，并通过卷压机压实，再将负极涂布后通过辊压法把多层电芯压实；
- ◆ 聚合物电解质工艺难点在于成膜均一性控制和与负极接触稳定性，干法湿法工艺各有优劣，后续预计双路线并行，喷涂工艺相关专利数量较少，在固态电解质领域未获大规模应用。

图 干法工艺制备示意图

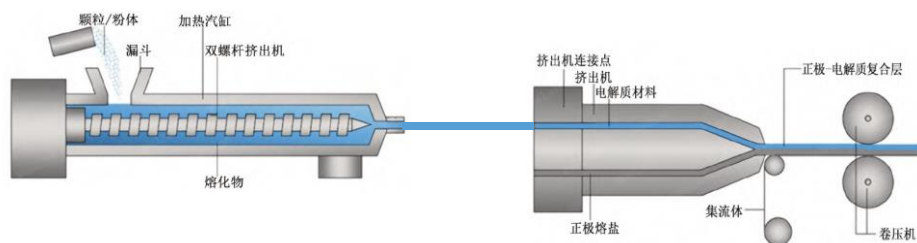


图 湿法工艺制备示意图

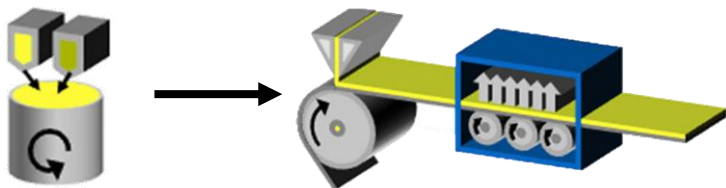


图 主流制造工艺优缺点对比

工艺	优点	缺点
湿法工艺	操作简单，工艺成熟，易于规模化生产	成本高，溶剂有毒性，残留会降低离子电导率
干法工艺	成本低，离子电导率高，不需要烘干，成膜孔隙率低	厚度偏大，影响能量密度，生产速度慢

◆ **氧化物兼具电导率和稳定性，量产难度适中，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/铈)的化合物，可分为晶态和非晶态两类。非晶态主要为LiPON型，晶态类可分为钙钛矿型(LLTO)、反钙钛矿型、GARNET型(LLZO)、NASICON型(LATP)、LISICON型几类。整体看，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，预计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。

图 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	$\text{Li}_{2.9}\text{PO}_{3.3}\text{N}_{0.46}$	$10^{-6}\text{S/cm}$	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	$\text{Li}_{0.33}\text{La}_{0.56}\text{TiO}_3$	$10^{-3}\text{S/cm}$	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、生产成本低
Anti-Perovskite(反钙钛矿)型	LOC	$\text{Li}_3\text{OCl}$	$10^{-3}\text{S/cm}$	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	$\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}/$ $\text{Li}_{6.4}\text{La}_3\text{Zr}_{1.4}\text{Ta}_{0.6}\text{O}_{12}$	$10^{-3}\text{S/cm}$	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、生产成本低
NASICON(快离子导体)型	LATP	$\text{Li}_{1.4}\text{Al}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}(\text{PO}_4)_3$	$10^{-4}\text{S/cm}$	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	$\text{Li}_{14}\text{Zn}(\text{GeO}_4)_4$	$10^{-7}\text{S/cm}$	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

- ◆ **薄膜型产品**：通过降低电解质厚度，弥补离子电导率问题，但目前仅有非晶态的LiPON可通过真空蒸镀制成薄膜，虽离子电导率差，但在较薄厚度时( $\leq 2\mu\text{m}$ )，面电阻可控，因此倍率性能、循环性能优异。但薄膜型电池容量很小(mAh级)，主要应用在微型电子、消费电子领域，但在Ah级电动车领域则需大量串并联，工艺困难且造价不菲，应用范围有限。
- ◆ **非薄膜型产品**：综合性能优异，可制备容量型电池，目前以LATP、LLZO、LLTO路线为主。**LATP**电化学窗口最宽，空气稳定性好，烧结温度低，生产成本低，但 $\text{Ti}^{4+}$ 很容易被Li还原，对锂金属不稳定，整体更具性价比。**LLZO**综合离子电导率最高，对锂金属稳定，含稀有金属镧/锆，烧结温度高，生产成本低，需改性修饰处理（如掺Al/Ta、表面包覆等），性能优势最优，长期可能潜力更大；**LLTO**晶体电导率最高，但晶界电导率低，短板效应制约总体电导率，且对锂金属不稳定，预计竞争力低于LATP/LLZO。

图 各固态电解质金属材料成本 (EUR/kg)

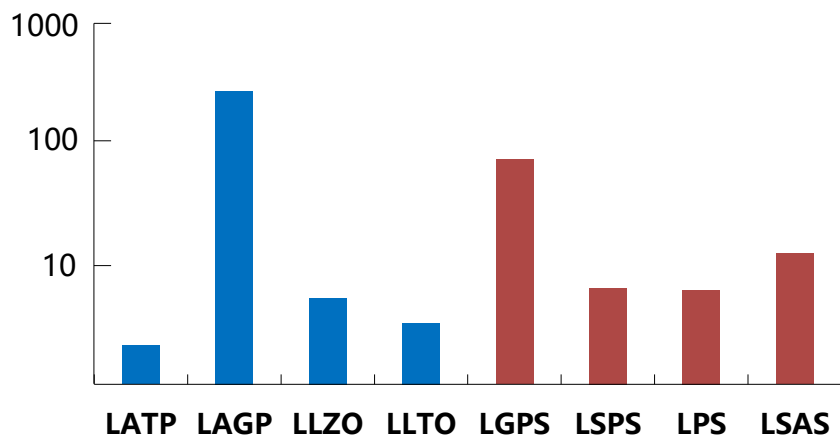


图 氧化物电解质公司布局

环节	企业	体系
电池厂	卫蓝新能源	LATP
	清陶能源	LATP/LLTO/LLZO/LLZTO
	赣锋锂业	LATP/LLZO/LISICON
电解质厂	辉能科技	LLZTO
	天目先导	LATP/LLTO/LLZO
	蓝固新能源	LATP/LLTO/LLZO
	上海洗霸	LLZTO
正负极厂	贝特瑞	LATP/LLZO
	容百科技	LATP/LLZO

◆ 氧化物固态电解质制备方法包括固相法、溶胶凝胶法、共沉淀法等，其中固相法成本低，为目前LLZO的主流生产方式，LATP涂覆需要纳米化，因此液相法为主流生产方式。

➤ **固相法**：将原材料(锂盐、镧/锆/铝氧化物等)按比例粉碎、反复球磨和高温烧结制备产品。优点为原材料易得、成本低、工艺简单，缺点为能耗高、晶粒尺寸不均匀、易团聚，影响产品性能，因此对研磨要求较高。

➤ **液相法**：将原材料(醋酸锂、有机镧/锆盐等)溶解，混合反应后脱水聚合形成溶胶/凝胶，最终低温煅烧制备产品。优点为能耗少，掺杂均匀，颗粒可控，可纳米化，缺点为原材料成本高，存在环保问题，不利于大规模生产。

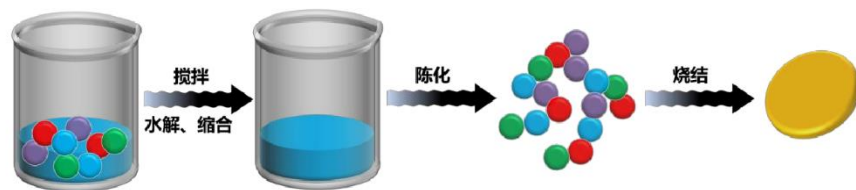
图 LLZO/LLTO制备方法对比

	固相法	液相法
锆/镧源 (LLZO/LLTO)	氧化锆/镧	有机锆/镧盐
成本	低	高
烧结温度	1200°C	450°C
工艺	简单	复杂
产品特性	颗粒较粗大	均匀度高
主要应用	规模量产氧化物陶瓷	较小规模纳米级粉体

图 固相法制备LLZO流程



图 液相法制备LLZO流程





◆ **硫化物电导率最高，兼具加工性能，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。根据晶体结构，硫化物也可分为晶态和非晶态两种。非晶态主要为LPS型(硫代磷酸)；晶态可分为Argyrodite型(硫银锗矿)、LGPS型(锂锗磷硫)、Thio-LISICON型(硫代-锂快离子导体)。但硫化物固态电解质存在成本高、电化学稳定性差、空气稳定性差(遇水产H<sub>2</sub>S)、生产工艺难度大等缺点，限制了其在高能量密度(高电压、锂金属)的电池应用，目前仍处于研发阶段，但后续发展潜力最大，工艺突破后，可能成为未来主流路线。材料选择方面，LPSCI具备成本优势，预计主打低端产品路线，LGPS综合性能最好，但原材料成本高，预计聚焦中高端产品路线。

图 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 <sub>x</sub> PS <sub>x</sub>	Li <sub>3</sub> PS <sub>4</sub> 、Li <sub>4</sub> P <sub>2</sub> S <sub>6</sub>	10 <sup>-3</sup> 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 <sub>6</sub> PS <sub>5</sub> X (X=Cl, Br, or I)	Li <sub>6</sub> PS <sub>5</sub> Cl、Li <sub>6</sub> PS <sub>5</sub> I	10 <sup>-2</sup> ~10 <sup>-3</sup> S/cm	离子电导率高、热稳定性好、 <b>成本低</b>	电化学窗口窄(< 2.2V)、空气中不稳定
LGPS型	LGPS	Li <sub>x</sub> MP <sub>x</sub> S <sub>x</sub> (M=Ge, Sn, Si, Al)	Li <sub>10</sub> GeP <sub>2</sub> S <sub>12</sub>	10 <sup>-2</sup> S/cm	<b>离子导电性最高</b> 、电化学窗口宽(5V)	锂金属不稳定、 <b>成本较高</b>
Thio-LISICON型	LGPS (LISICON)	Li <sub>4-x</sub> M <sub>1-x</sub> M' <sub>x</sub> S <sub>4</sub> (M=Si, Ge, Zr, M'=P, Al, Zn, Ga)	Li <sub>3.25</sub> Ge <sub>0.25</sub> P <sub>0.75</sub> S <sub>4</sub>	10 <sup>-3</sup> S/cm	电化学窗口宽(5V)、电化学稳定性高	离子电导率相对低、 <b>成本较高</b>

- ◆ **硫化物固态电解质制备方法包括高温淬冷法、高能球磨法、液相等，制备过程需在惰性气体保护下进行。**
- **高温淬冷法：**将原料加热到熔融温度，充分接触反应后，急剧降温到室温后回火。优点是颗粒粉末较细，压实密度较高缺点是能耗高，操作难度大，在淬冷降温过程中易生成杂相，得到的材料结晶度难以控制，适合制备非晶态硫化物电解质。
- **高能球磨法：**将原料混合装入球磨机上进行高能球磨，球磨后取出再进行热处理，优点是混合均匀，离子电导率和结晶度得到改善，缺点是设备要求较高，制备时间长，仅适合小批量生产，为目前主流制备工艺。
- **液相法：**将原料放置于溶液中搅拌，充分反应后蒸发溶剂，然后再进行热处理，进而制备固态电解质。优点是原料可在溶液中充分接触，结晶度可控，缺点是离子电导率偏低，适用于制备薄膜电解质。
- **气相合成法：**以空气稳定的氧化物为原料，一步气相法合成硫化物电解质，制备过程空气稳定，大幅简化制备工艺，节约生产时间和制备成本，适合大批量生产，通过调整掺杂等手段，电导率可达 $2.45 \times 10^{-3} \text{S/cm}$ 。

图 硫化物制备方法对比

	高温淬冷法	液相法	高能球磨法	气相合成法
原料	$\text{Li}_2\text{S}/\text{P}_2\text{S}_5/\text{GeS}_2$	$\text{Li}_2\text{S}/\text{P}_2\text{S}_5/\text{GeS}_2$	$\text{Li}_2\text{S}/\text{P}_2\text{S}_5/\text{GeS}_2$	$\text{Li}_2\text{CO}_3$ 、 $\text{SnO}_2 + \text{CS}_2$
成本	中	较低	高	低
制备温度	高温	加热	加热	室温
工艺	复杂	简单	适中	简单
制备特性	压实密度高	结晶可控	均匀度高	空气稳定
适合应用	非晶态	薄膜	小规模	大规模

图 高能球磨法制备工艺

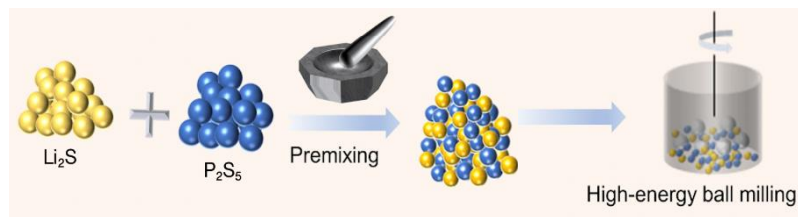
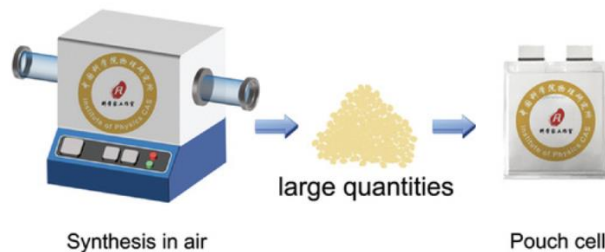


图 一步气相法合成工艺



◆ **氧化物电解质成本相对较低，硫化物电解质成本较为昂贵。**根据4月13日金属价格，镧0.62万/吨，锆5.13万/吨，锗893万/吨，钽223万/吨，锂90万/吨，钛2.42万/吨，计算得出氧化物电解质LLTO金属成本为2.11万元/吨，LATP金属成本为2.81万元/吨，LLZO金属成本为6.65万元/吨，LLZTO金属成本为32.82万元/吨，硫化物电解质LGPS金属成本为120.84万元/吨。整体来看，氧化物电解质成本显著低于硫化物电解质，其中LLTO和LATP成本更为低廉，短期性价比更高，LLZO和LLZTO虽性能更好，但成本相对较高。虽然硫化物电解质离子导电性最高，发展潜力最大，但原材料成本昂贵，仍未实现产业化落地，预计未来实现突破后，聚焦中高端产品路线。

图 固态电解质金属成本

代表材料	技术路线	化学式	分子量	金属成本(万元/吨)							金属总成本(万元/吨)
				锂	镧	钛	锆	钽	铝	锗	
LLTO	氧化物	$\text{Li}_{0.33}\text{La}_{0.56}\text{TiO}_3$	176	1.18	0.27	0.66	-	-	-	-	2.11
LATP	氧化物	$\text{Li}_{1.4}\text{Al}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}(\text{PO}_4)_3$	382	2.30	-	0.49	-	-	0.02	-	2.81
LLZO	氧化物	$\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$	840	5.23	0.31	-	1.12	-	-	-	6.65
LLZTO	氧化物	$\text{Li}_{6.4}\text{La}_3\text{Zr}_{1.4}\text{Ta}_{0.6}\text{O}_{12}$	889	4.51	0.29	-	0.74	27.28	-	-	32.82
LGPS	硫化物	$\text{Li}_{10}\text{GeP}_2\text{S}_{12}$	589	10.65	-	-	-	-	-	110.19	120.84

- ◆ **半固态电池主要采用氧化物+聚合物复合体系，通过原位固态化等工艺，大幅提升电池性能。**半固态电池保留一定液体含量，并使用氧化物+聚合物电解质、氧化物隔膜涂覆与正负极包覆，叠加深度预锂化等技术，提升电池的综合性能。残余液相赋予固体电解质优异的形状变化能力，使其可以适应充/放电中不可避免的体积变化，从而提升循环和倍率性能。
- ◆ **原位固态化解决固固界面问题，制备工艺兼容且高效。**原位固态化是半固态电池中的重要工艺，其与传统锂电池制备工艺高度兼容，是将单体（碳酸酯、丙烯酸酯等）与引发剂混合后注液，通过加热等方式下聚合固化（变为聚合物）。在固化之前，可流动的液态前驱体可以充分浸润电极/电解质的空隙，然后在填充区域聚合为固体，充分保证电极和电解质之间的接触，并仅存留不连续的液相，使得电池的能量密度和安全性都获得了显著的突破。工艺的难点在于保证聚合时的热控制，从而影响固化的均匀性。

图 卫蓝新能源基于原位固态化的半固态电池

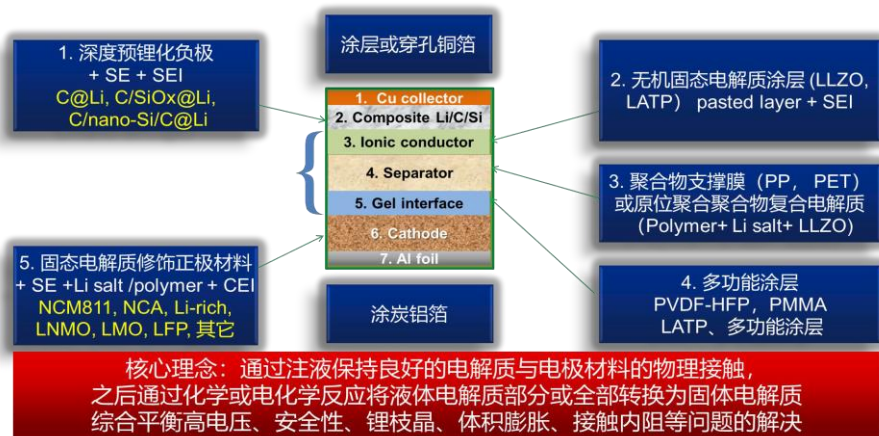


图 卫蓝新能源、清陶能源半固态电池复合电解质对比

	卫蓝新能源	清陶能源
氧化物	LATP	LATP
聚合物	聚碳酸酯、聚丙烯酸酯等	聚碳酸酯、聚丙烯酸酯等
粘结剂	PVDF	PVDF
锂盐	LiTFSI/LiFSI	LiTFSI

◆ **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，中短期向硅基负极发展，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。液态电解质中，由于硅和电解液发生副反应，消耗硅/锂/电解液，锂枝晶容易刺穿隔膜引发短路的问题，新型负极应用受到限制。而固态电解质电化学窗口更宽，化学稳定性更高，可抑制锂枝晶生长，因此打开材料选择空间，预计中短期向硅基负极发展，长期向锂金属负极迭代。

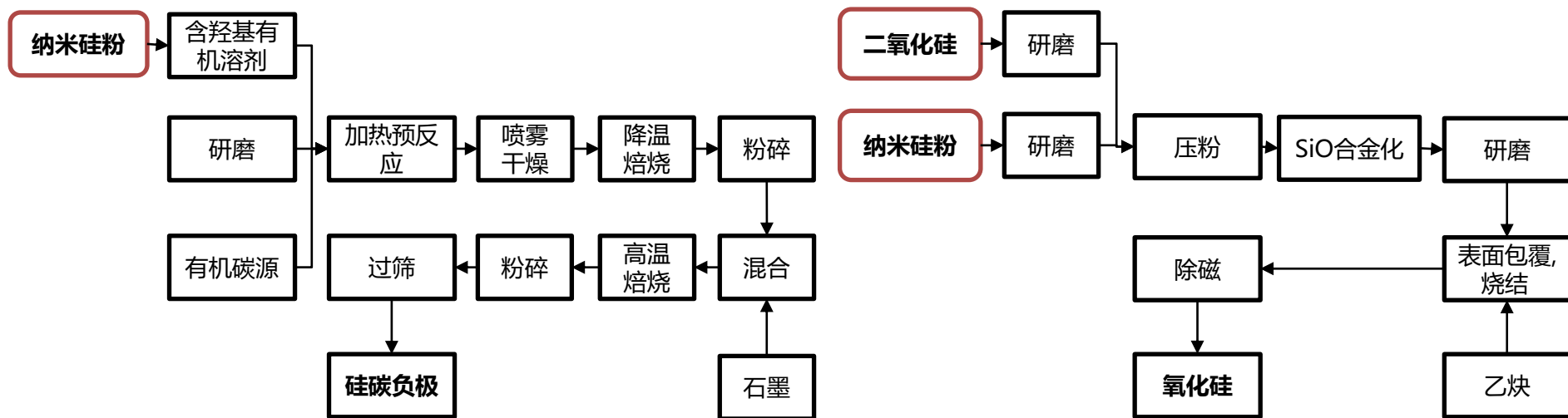
表 负极材料性能对比

	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、低电势、低膨胀、高导电性、高稳定性、低成本

- ◆ **硅氧中期仍为主流，硅碳长期更具潜力。** 硅基负极主要分为硅碳负极和硅氧负极两种路线，**硅碳负极**以纳米硅(Nano-Si)掺混石墨，具有比容量高和首效高的优势，但具有体积膨胀较大、循环性能差的劣势，因此对工艺要求较高，需叠加小粒径和包覆技术，目前主要应用于消费电子和电动工具等领域，工艺突破后潜力更大。**硅氧负极**以氧化亚硅( $\text{SiO}_x$ )掺杂石墨，粒径小均匀度高，循环和倍率性能更佳，但首效低无法单独使用，需要通过预锂/预镁化等处理，率先应用于动力电池领域，综合性能更加均衡。预计硅基负极中期将以技术成熟的硅氧负极为主，长期高克容量硅碳负极空间更大。
- ◆ **硅基材料关键在于纳米分散化，有效减少表面应力，从而缓解体积膨胀问题。** **硅碳负极**由研磨后的纳米硅粉与基体材料，通过造粒工艺形成前驱体，然后经表面处理、烧结、粉碎、筛分、除磁等工序制备。**硅氧负极**通过纳米硅粉和二氧化硅经研磨合成一氧化硅，形成硅氧负极材料前驱体，然后经粉碎、分级、表面处理、烧结、筛分、除磁等工序制备。从工艺端看，硅基负极会拉动硅烷、PAA、单壁管、补锂剂等材料的需求。

表 硅碳负极与硅氧负极的制备流程

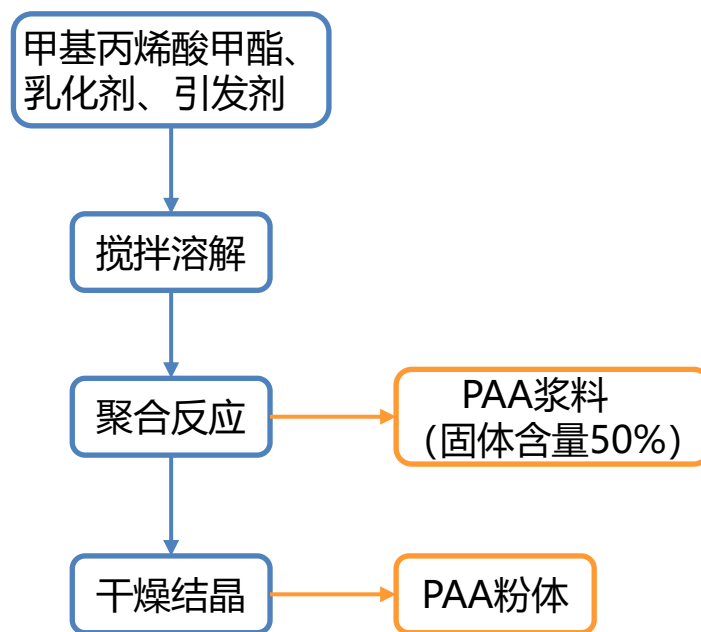


- ◆ **PAA粘结剂粘附性更强，更加适配硅基负极。** 硅基负极膨胀率高，传统SBR+CMC体系粘附性不强，无法发挥硅基负极性能优势。而PAA侧链含较多羧基官能团，可产生较强的氢键，从而赋予活性颗粒与集流体之间较强的结合力，并与硅形成类似SEI膜的包覆层，从而有效提升硅基负极的循环性能。PAA的粘结力较强，从而单位添加量减少，并无需CMC等稳定剂，但成本更贵，脆性更高，仍需进一步改性或与其他材料结合。
- ◆ **PAA工艺难点在于分子量集中度的把控。** PAA主流生产工艺为丙烯酸经过聚合，除水脱水，完成干燥结晶，或者以浓溶液的形式出货，难点在于聚合反应里面的搅速、温度等参数控制，目前PAA产品存在分子量分布较宽的问题。相对于电解液添加剂来说，粘结剂高分子聚合物的工艺流程的技术壁垒比较弱，工艺的繁琐程度也较低。

图 负极粘结剂性能对比

	SBR+CMC	PAA
<b>适用情形</b>	石墨负极	石墨、硅基负极
<b>分散体系</b>	水性	水性
<b>优势</b>	柔性更好，加工性能较好	粘结力较强，添加量减少； 缓解硅基材料体积膨胀， 在电解液溶剂中溶胀小
<b>劣势</b>	粘结力较弱，添加量较大	柔性较差，会出现裂纹；适 配的酸碱度环境要求高

图 PAA生产工艺流程



- ◆ **掺硅需搭配补锂，改善首效偏低短板。** 硅基负极首效偏低，首次不可逆锂损耗达15%~35%，因此必须搭配预锂化手段，从而改善首效短板问题。预锂化包括负极补锂和正极补锂，**负极补锂**方式有锂箔补锂、锂粉补锂、添加剂补锂等，但工艺难度高、成本较高、安全性低，并未大规模应用。**正极补锂**方式主要分为富锂化合物、二元锂化合物和锂复合物，在正极匀浆过程中添加补锂材料，工艺简便且成本较低，为当下最有前景的补锂技术。
- ◆ **正极补锂为中短期主流路线，负极补锂长期更具潜力。** 一般来说，在更强调安全性和工艺兼容性，并对补锂的容量要求不高时，选择正极补锂合适，若需要大容量补锂时，负极补锂更加合适，因此预计中短期以正极补锂为主，长期负极补锂更具潜力。正极补锂方面，主要产品为铁酸锂和镍酸锂，其中铁酸锂用于铁锂体系，镍酸锂用于三元体系。工艺可分为固相法和液相法两种，其中固相法成本更低，而液相法纯度更高，预计双路线并行。

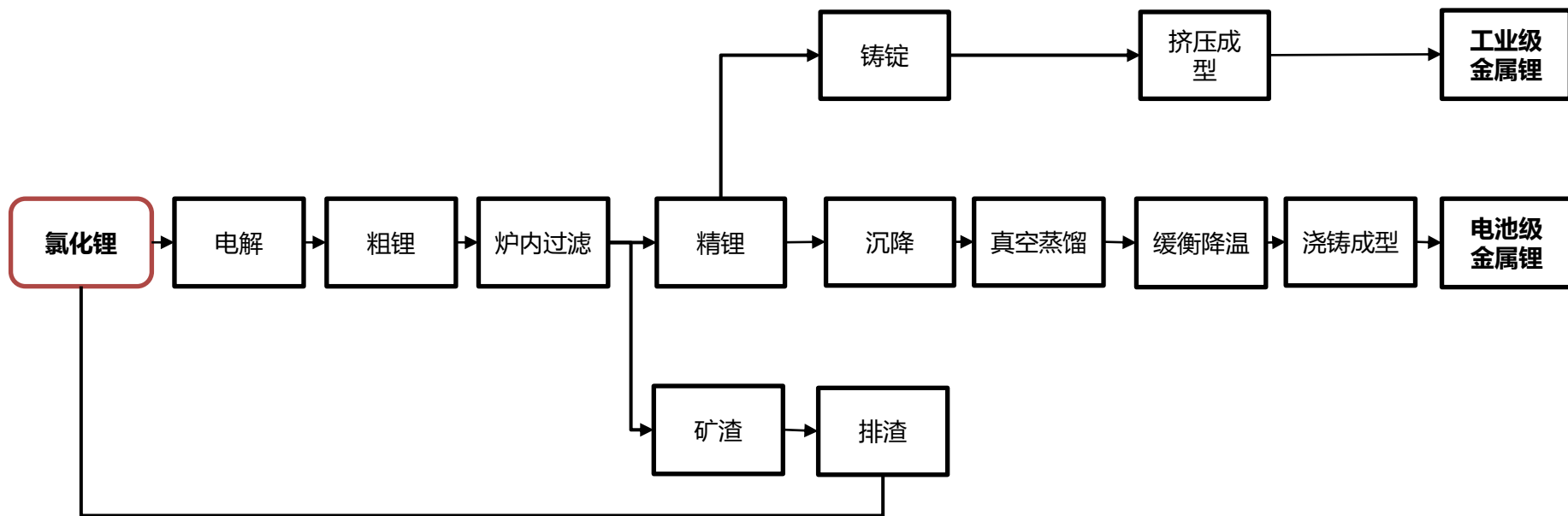
图：正极预锂化和负极预锂化比较

分类	方法	材料	生产工艺	优势	劣势	
负极预锂化	电化学法	Li	不兼容	锂化程度可控	电池需要再组装，Li 箔高反应活性	
	化学法	锂箔	Li	不兼容	简单	锂化不易控制，电池组装前需要移除锂箔
		锂粉	Li	不兼容	首效提升明显，无残留	难以分散均匀，安全性较差
		添加剂	Li <sub>x</sub> Si等	不兼容	无非活性成分，不会增加电池重量	与极性溶剂不兼容
正极预锂化	富锂化合物	Li <sub>5</sub> FeO <sub>4</sub> , Li <sub>2</sub> NiO <sub>2</sub> 等	兼容	步骤简单，适合工业化生产	稳定性差，阻抗较大	
	二元锂化合物	Li <sub>2</sub> O, Li <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , Li <sub>3</sub> N, Li <sub>2</sub> S等	兼容	首效提升明显	导电性差，稳定性差	
	锂复合物	Li <sub>2</sub> S/Co, LiF/Co, Li <sub>2</sub> O/Co等	兼容	导电性、稳定性提升	去锂化后杂质残余	



- ◆ **锂金属的能量密度最高，但安全性较差，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，但是仍需至少5-10年的突破，才能具备规模商业化可能性，预计应用于500Wh/kg以上的高端市场。
- ◆ **锂金属采用熔融LiCl电解制备，制备工艺壁垒较低。** 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。

图 赣锋锂业金属锂生产流程



◆ **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。

**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 <sub>2</sub>	135-190	3.0-4.6	500-1000	较差	较高	振实密度大、 <b>体积能量密度高</b> 、电压高	钴金属成本高（主要用于3C消费电池）
	镍钴锰酸锂 NCM	LiNi <sub>x</sub> Co <sub>y</sub> Mn <sub>z</sub> O <sub>2</sub> (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、循环安全性较差
	镍钴锰酸铝 NCA	LiNi <sub>x</sub> Co <sub>y</sub> Al <sub>z</sub> O <sub>2</sub> (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	LiNi <sub>w</sub> Co <sub>x</sub> Mn <sub>y</sub> Al <sub>z</sub> O <sub>2</sub> (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	xLi <sub>2</sub> MnO <sub>3</sub> ·(1-x) LiMO <sub>2</sub> (M=Co、Ni、Mn)	>250	2.0-4.8	1000-6000	较差 (锰含量高导致)	低	<b>能量密度最高</b> 、电压高、成本低、常规电压循环稳定性优异	<b>首效及倍率性能差、循环电压衰减</b>
橄榄石	磷酸铁锂 LFP	LiFePO <sub>4</sub>	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	LiMn <sub>1-x</sub> Fe <sub>x</sub> PO <sub>4</sub> (0 ≤ x ≤ 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 <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	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	LiNi <sub>0.5</sub> Mn <sub>1.5</sub> O <sub>4</sub>	130-150	2.2-5.0	≥400(石墨) ≥2000(钛酸锂)	良好	低	<b>电压最高</b> 、 <b>成本最低</b> 、安全性能优异	<b>循环性能差</b>

- ◆ **尖晶石镍锰酸锂兼具较高比能、低成本及高安全，难点在于稳定高压正极的界面。** 镍锰酸锂为尖晶石结构，稳定性优于层状氧化物，且具有三维Li<sup>+</sup>扩散通道，倍率性能良好。镍锰酸锂以镍均匀取代锰酸锂中25%的锰，工作电压高达4.7V，使比能量超越635Wh/kg，接近三元，远高于铁锂，且其为低镍无钴二元正极，成本优势显著。镍锰酸锂的难点在于材料电压平台过高(5V)而导致正极界面不稳定，可通过金属掺杂、氧化物包覆及铁锂、三元正极复合等路径解决。
- ◆ **富锂锰基具备极高比容、高电压及成本优势，预计主流应用路线为正极材料复合。** 富锂锰基电压窗口宽(2.0-4.8V)，常压下循环稳定性优于其他商业化正极，高压放电比容量可达250mAh/g以上，与硅碳负极匹配，电芯能量密度有望超越400Wh/kg，且其为低镍高锰正极，低瓦时成本媲美磷酸铁锂。但富锂锰基电子电导率极低(~10<sup>-8</sup>S/cm)，高压下循环过程中易发生尖晶石相变，且高压电极/电解质界面副反应严重，面临倍率性能差、首次库伦效率低(<80%)、循环容量及电压衰减等难点，短期无法单一使用，可与现有三元、钴酸锂、磷酸铁锂等正极混合降低电压，提早实现商业化应用。

图 正极材料对锂电位 vs 比容量曲线 (20 °C)

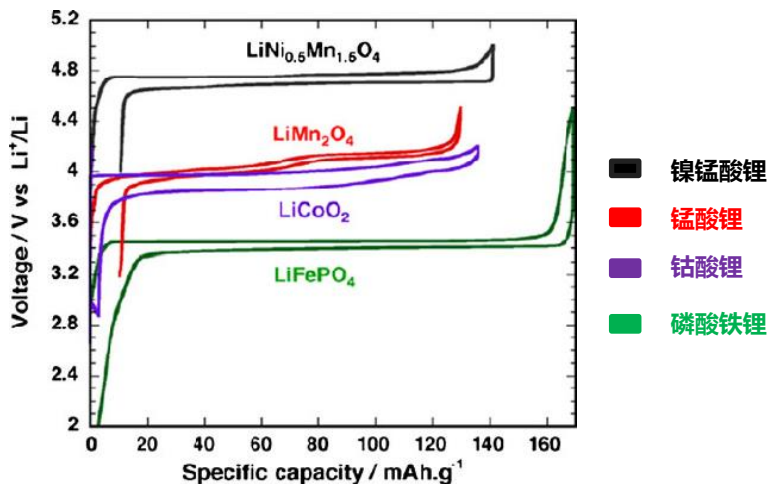
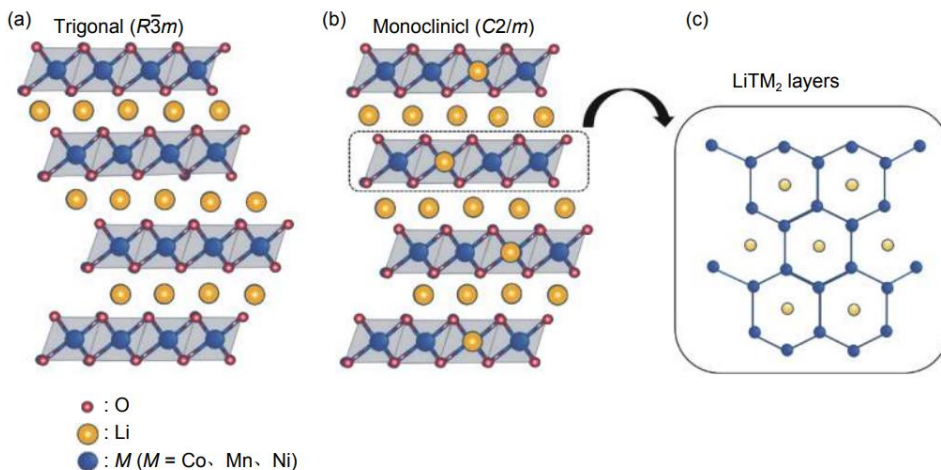


图 富锂锰基正极晶体结构



- ◆ **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，主流的原位固化工工艺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，全固态电解质也具有隔膜的功能，隔膜是否需要被保留取决于各方案设计差异，长期来看，隔膜会逐渐退出电池市场。

图 半固态电池仍保留隔膜 (卫蓝新能源)

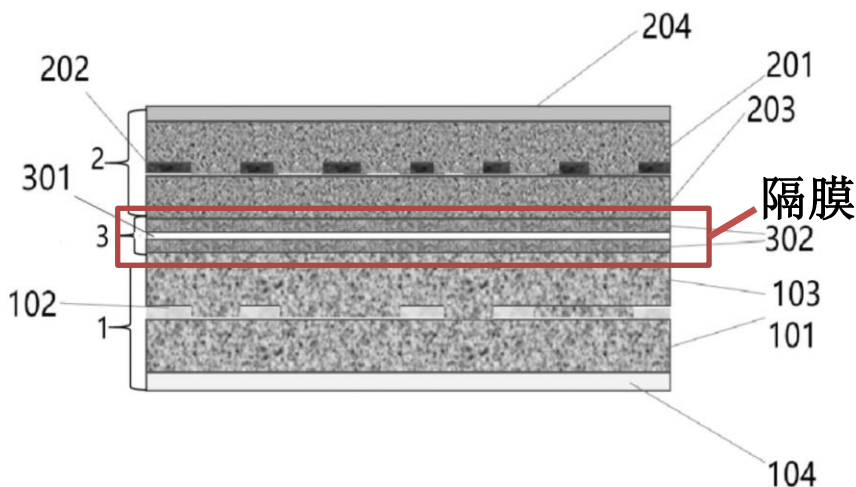
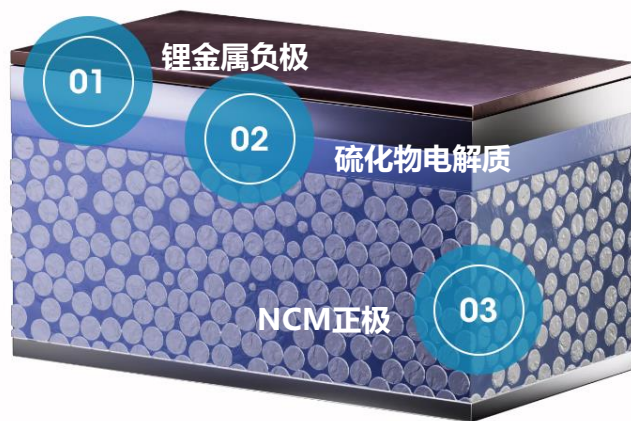


图 全固态电池不保留隔膜 (Solid Power)



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

图 辊压法制备干法电极

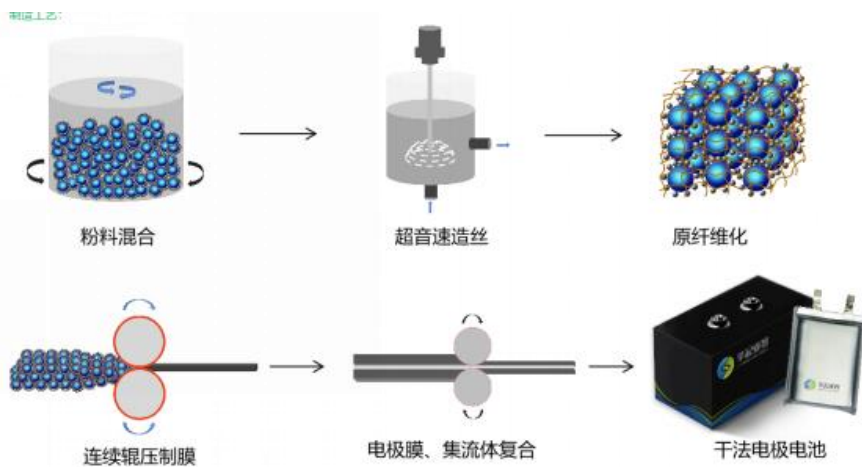


图 干湿法电极工艺对比

干法vs湿法		
对比项	干法	湿法
NMP溶剂	不需要	需要
粘合剂	少量 (5-8%) PTFE	大量
干燥车间	降低1/3	巨大
流程	简单	复杂
生产速度	快	慢
成本	下降20%	高
可做厚电极	是	否
能量密度	300Wh/kg以上	180-280Wh/kg
环保	是	否

- ◆ **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°C，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，预计在固态电池领域有较大发展。
- ◆ **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。

图 全固态电池温等静压法示意图

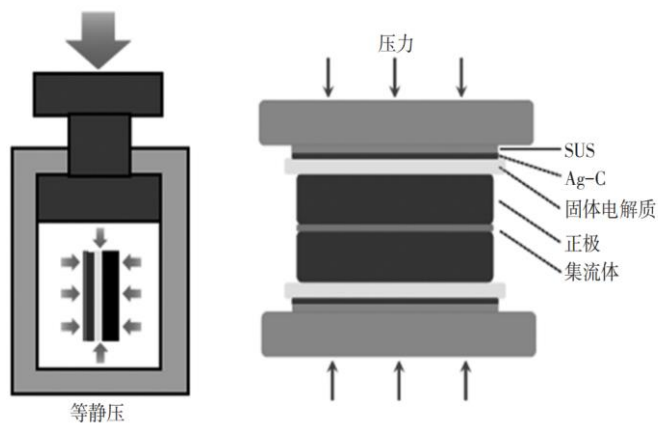
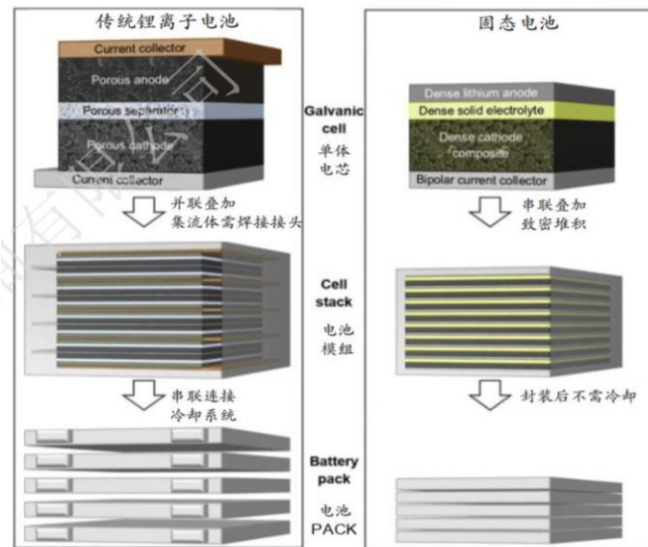


图 传统电池和固态电池叠片对比图



## PART3 半固态路线先行，全固态仍处研发阶段

- ◆ **固态电池技术迭代基于液态体系，顺序遵循固态电解质-新型负极-新型正极。**主流厂商按照半固态到全固态的发展路径布局，核心变化在于引入**固态电解质**，**电解质**预计从聚合物+氧化物的半固态路线，向氧化物半/全固态路线，再向硫化物全固态路线迭代；**负极**从石墨，向硅基负极、含锂负极，再向金属锂负极升级；**正极**从高镍三元，向高电压高镍三元、超高镍三元，再向尖晶石镍锰酸锂、层状富锂锰基等新型正极材料迭代；**隔膜**从传统隔膜，向氧化物涂覆隔膜，再向固态电解质膜升级。
- ◆ 产业链方面，**电池端**企业主要有宁德时代、比亚迪、卫蓝新能源、清陶能源、亿纬锂能、赣锋锂业、辉能科技、国轩高科、孚能科技、蜂巢能源等；**固态电解质**企业主要有天目先导、蓝固新能源、奥克股份、上海洗霸、金龙羽、瑞泰新材等；**固态电解质前驱体钴源/锗源**企业有东方锆业、三祥新材、云南锆业、驰宏锌锗等；**负极**企业有兰溪致德、贝特瑞、翔丰华等；**正极**企业有容百科技、当升科技等；**隔膜**企业有恩捷股份等；此外**整车**企业以自研或增资入股等方式积极入局，代表公司有丰田、日产、本田等。

图 固态电池产业链





◆ **半固态电池国内率先量产，23年开始小批量装车，24年实现规模放量。**国内以市场驱动为主，行业基本选用可量产的半固态路线，电解质选用聚合物+氧化物复合路线，正极仍选用高镍三元体系，负极升级为预锂化的硅基负极，实现能量密度360Wh/kg。代表厂商为卫蓝新能源、清陶能源、赣锋锂业、辉能科技等，已在高端无人机、航天、军工等高端领域实现应用，23年实现360Wh/kg以上装车发布，如蔚来、上汽、赛力斯、高合等，成为产业化元年，但仍需规模效应降本，24年实现小规模放量，24-25年迎来商业化转折点。

图 国内固态电池产业化情况

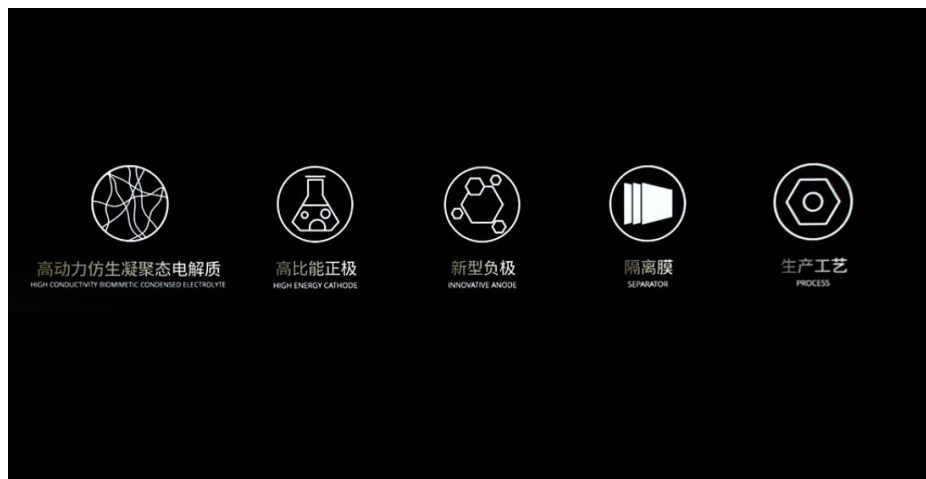
公司	路线	电解质	正极	负极	能量密度	合作车企	产能 (gwh)		
							22A	23E	规划
宁德时代	凝聚态+全固态	高动力仿生凝聚态电解质；硫化物	-	-	500Wh/kg	-	-	-	-
比亚迪	全固态	聚合物、氧化物、硫化物	-	-	-	自供	-	-	-
卫蓝新能源	半固态	聚合物+氧化物	高镍三元	硅基/预锂化	360Wh/kg	蔚来	2.2	5.2	50
清陶能源	半固态	聚合物+氧化物	高镍三元	硅基/预锂化	368Wh/kg	上汽、北汽、广汽、哪吒	1.7	2.7	35
亿纬锂能	半固态+全固态	聚合物+氧化物；聚合物、氧化物、卤化物	高镍三元	硅基/预锂化	330Wh/kg	-	-	-	-
赣锋锂业	半固态	聚合物+氧化物	高镍三元	含锂负极	360Wh/kg	大众、东风、广汽、赛力斯、曙光	2	4	40
辉能科技	半固态	氧化物	高镍三元	硅基/预锂化	270Wh/kg	奔驰、VinFast、ACC、FEV、Gogoro、蔚来、一汽	0.5	3	120
国轩高科	半固态	聚合物+氧化物	高镍三元	硅基/预锂化	360Wh/kg	高合	-	-	-
孚能科技	半固态	聚合物+氧化物	高镍三元	硅基/预锂化	330Wh/kg	奔驰、广汽、吉利、东风	-	-	-
蜂巢能源	半固态	聚合物+氧化物	高镍三元	硅基/预锂化	300-350Wh/kg	-	-	-	-
太蓝新能源	半固态	聚合物+氧化物	高镍三元	硅基/预锂化	350Wh/kg	-	0.2	1.2	11.2

- ◆ **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2023年4月19日推出凝聚态电池，兼具高比能和高安全，并且可以快速实现量产，是开启宁德时代下一轮创新节奏的里程碑，能量密度可高达500Wh/kg。该电池采用高动力仿生凝聚态电解质，构建纳米级别自适应网络结构，调节链间相互作用力，在增强微观结构稳定性的同时，提高电池动力性能，提升锂离子运输效率。此外凝聚态电池还聚合了包括超高比能正极、新型负极、隔离膜以及新工艺等一系列创新技术，使之既具备优秀的充放电性能，又具备高的安全性。
- ◆ **今年内具备车规级量产能力，同时进行航空级合作开发。** 公司正在进行民用电动载人飞机项目的合作开发，执行航空级别标准与测试，满足航空级别安全与质量要求。同时，宁德还将推出凝聚态电池的车规级应用版本，可在今年内具备量产能力。凝聚态电池的问世将会对实现碳中和产生积极深远的影响，为追求绿色环保的未来提供有力支持。

### 图 凝聚态电池产品性能



### 图 凝聚态电池材料端创新设计



- ◆ **重点布局硫化物全固态路线，但距离商业化仍需5年以上。** 与日韩企业路线相似，宁德时代直接布局最具潜力的硫化物全固态电解质。宁德时代自13年起申请固态电池相关专利，具有多年技术储备，其中9项专利内容中含有硫化物固态电解质，专利内容包含基于硫化物的固态电解质、正极极片、固态电池、电池材料回收等方面。公司目前已有高能量密度的固态电池实验室样品，但距离实现商业化仍需5年以上。
- ◆ **以全固态锂金属电池为发展目标，不断提升能量密度与安全性。** 针对高端市场，宁德时代将持续投入全固态锂金属等新材料技术的研发，以锂金属负极材料为发展方向，正极材料由传统三元向高压三元、无金属材料迭代升级，通过不断攻关工艺难题与关键技术，争取到2030年前后实现真正意义上的超长续航、安全及具成本竞争力的锂电池技术。

### 表 宁德时代固态电池相关专利

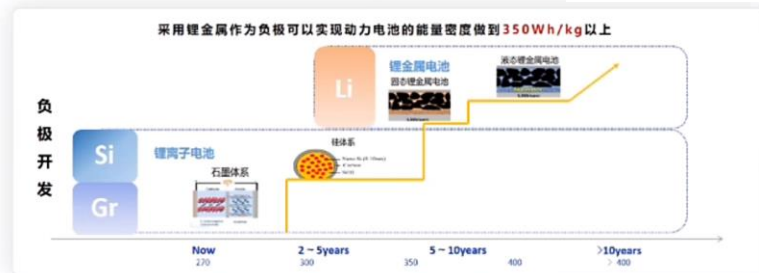
专利名称
超分子离子液体、固态电解质膜、 <b>固态锂金属电池</b> 及装置
复合无机固态电解质膜及其 <b>锂金属电池</b>
固态电解质膜片及 <b>固态锂金属电池</b>
一种 <b>硫化物</b> 固态电解质片及其制备方法
一种 <b>固态电解质</b> 的制备方法
<b>硫化物</b> 固态电解质及全固态锂二次电池
一种 <b>固态电池材料</b> 回收的处理方法
<b>全固态锂离子二次电池</b> 用粘结剂、电解质膜片、电极膜片、电池及制备方法
<b>硫化物</b> 固态电池正极极片及硫化物固态电池
一种固态电解质及其 <b>全固态锂金属</b> 电池
电极组件、电池单体、电池及用电装置
锂离子电池的 <b>固态电解质</b> 材料
<b>固态电解质</b> 膜片及锂离子电池
正极片、二次电池、电池模组、电池包和用电装置
无锂负极极片及其制备方法、二次电池、电池模块、电池包及用电装置

### 图 宁德时代电池技术发展规划

高能量密度——化学体系迭代升级是核心



高能量密度——锂金属电池是重要方向



- ◆ **深耕固态电解质多年，专利数量众多。**公司于11年起申请固态电池相关专利，截止23年3月已申请50余项，获30余项专利授权，申请中专利10余项，专利储备丰富。
- ◆ **研发涵盖多种路线，技术不断更新迭代。**公司技术路线包含聚合物、氧化物、硫化物和复合固态电解质，其中聚合物路线主要包括PEO和聚烯酸酯类，氧化物、硫化物和复合固态电解质路线研究范围广泛，多种路线同步进行，不断升级迭代。此外，公司不断优化正/负极材料，对三元正极包覆硫化物电解质、钼酸盐等以改善离子传输和循环性能；负极采用硅基核壳结构、锑/铋锂合金以提高离子/电子电导性和电化学性能。
- ◆ **技术储备丰富，后续或升级固态+短刀+CTC体系。**公司申请固态电解质相关的专利覆盖固态电解质材料、正/负极材料修饰与改性、电池结构、电池包与模组设计等，专利覆盖范围广泛，技术储备丰富，符合公司发展战略，结合传统电池包向CTC路线发展的趋势，推测第三代刀片电池可能使用固态软包。

表 刀片电池升级情况

	第一代刀片	第二代刀片	第三代刀片	功率型刀片
尺寸 (mm)	960×90×13.5	960×90×13.5	517×128×14.2	200×140×20
适用车型	EV	EV	EV	DM-i
主打方向	能量密度	能量密度	能量密度+倍率性能	倍率性能
设计	方壳	方壳	软包+铝壳	软包+铝壳
壳体厚度 (mm)	0.3	0.3	0.3	0.3
叠片方式	层叠	层叠	Z叠	卷绕
方案	CTP	CTP	CTC	CTP
冷却方案	液冷	直冷	直冷	液冷
平台	e2.0	e2.0	e3.0	e2.0
单体电压 (V)	3.2	3.2	3.2	3.2
单块刀片电池电芯数量	3	3	2	1
单体能量密度 (Wh/kg)	170	182	205	120-150
系统能量密度 (Wh/kg)	140	150	175	100-130

- ◆ **脱胎于中科院物理所，掌握原位固态化核心工艺。** 卫蓝新能源于2016年成立，由中科院院士陈立泉、研究员李泓、原北汽总工俞会根共同创办，是中科院物理所固态电池唯一的产业化平台，承接所有相关专利，研发实力全面领先，获小米集团、蔚来资本、华为哈勃、天齐锂业、吉利控股等入股。公司主打半固态路线，采用聚合物+氧化物（LATP为主）复合路线，首创原位固态化等八大核心工艺，改善固-固界面接触，并与液态电池工艺基本兼容，铸造产品护城河。
- ◆ **与蔚来、吉利等众多车企达成合作，23年下半年装车上线。** 20年8月，公司溧阳基地中试线投产(0.2gwh)，针对无人机、AGV等消费领域，能量密度达275Wh/kg，支持7C高功率放电。22年6月，公司湖州基底投产(2gwh)，针对动力领域，能量密度达360Wh/kg，23年上半年开始规模量产，预计下半年搭载**蔚来ET7**的150kwh电池包上线，续航里程突破1000km，成本较为昂贵，仍需规模效应和研发突破，进一步降本。此外公司已开发铁锂储能电芯，具备本征安全属性，能量密度150Wh/kg，已开始示范应用(4MWh)。全固态电池方面，公司计划24、25年推出400、500Wh/kg产品，量产进度较为领先。
- ◆ **远期规划产能超50gwh，形成完善产业链布局。** 公司22年底产能2.2gwh，远期产能规划超50GWh。公司电解质与天目先导、蓝固新能源、盟固利合作，正极与容百、当升签订战略合作协议，负极与天目先导、贝特瑞、天齐锂业合作，隔膜与恩捷股份签约，形成完善产业链布局。

图 卫蓝新能源半固态电芯制备工艺流程

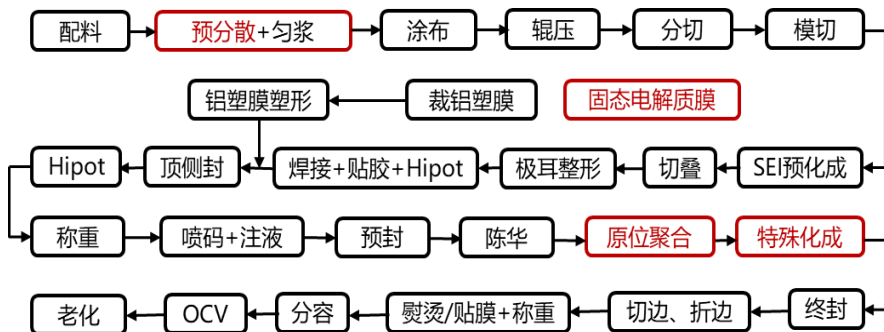


图 卫蓝新能源年底产能布局 (单位: GWh)

基地	22A	23E	24E	25E	26E	用途
淄博		3	9	9	20	储能+动力 (12+8)
湖州	2	2	2	2	2	动力
房山			4	8	8	动力
溧阳	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	消费
IPO募投				10	20	-
合计	2.2	5.2	15.2	29.2	50.2	动力+储能

- ◆ **脱胎于清华大学材料学院，率先实现固态电池量产。**清陶能源成立于2016年，由清华大学南策文院士领衔，团队深耕固态电池20余年，已获300多项专利授权。公司已突破核心固态电解质(LATP、LLTO、LLZO)的生产技术，并可以通过高速分散、流延成型等方式，制备含氧化物颗粒在聚合物骨架上均匀分散的复合电解质膜，拥有粉体、浆料、电解质涂覆等完整工序，率先实现了半固态电池的量产。公司先后获北汽、上汽、广汽等公司战略投资，并与哪吒等车企建立长期合作关系。
- ◆ **电池产品性能突出，致力量产全固态电池。**18年11月，公司建成首条固态电池量产线(0.1gwh, 400Wh/kg)，应用于特种电源、高端数码等消费领域。20年7月，搭载清陶固态电池系统的北汽、哪吒U纯电样车下线，21年11月，轻量化固态电池产品携手广汽埃安亮相车展，电芯能量密度达320Wh/kg。21年12月，与上汽合作完成368Wh/kg, 1083km CLTC续航的实车验证，并于23年率先应用于上汽自主品牌新款车型。22年11月，与北汽福田联合开发的首套量产商用车固态电池系统已完成调试、正式下线。
- ◆ **远期规划产能35gwh，一体化布局固态电解质。**公司22年底产能1.7gwh，远期规划产能35gwh。自研自产固态电解质粉体材料，此外与利元亨、当升科技、翔丰华达成战略合作，保障设备及正负极材料供给。

图 清陶能源正极、电芯生产工艺

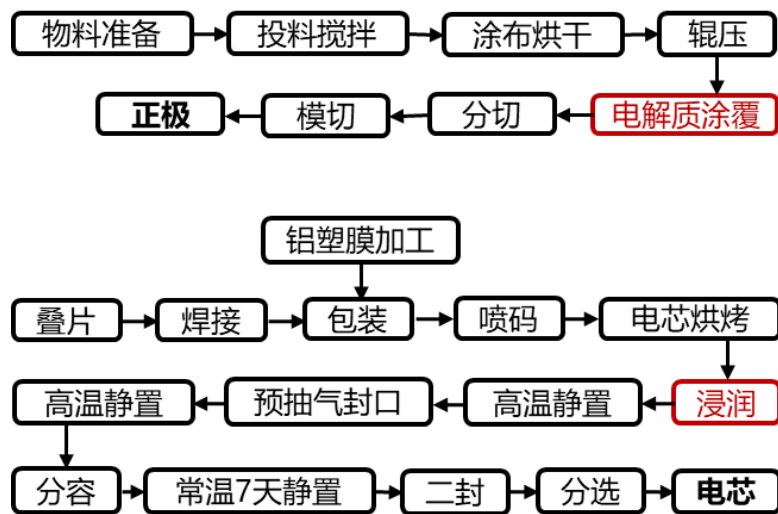


图 清陶能源产品性能

	能量密度	电解质	正极	负极	隔膜	进度
第一代	360-420Wh/kg	氧化物为主，添加聚合物形成复合电解质	三元高镍	硅碳	有	已量产
第二代	400-500Wh/kg	基于一代复合电解质，添加卤化物和硫化物	高镍高电压、二元镍锰	含锂负极	无	中试，预计24年后量产
第三代	500+Wh/kg	沿用二代	无锂/缺锂		无	规划，无样品

图 清陶能源产能规划 (GWh)

基地	22A	23E	规划产能
宜春	1	1	10
昆山	0.7	0.7	10.7
成都	-	1	15
合计	1.7	2.7	35.7

- ◆ **打造垂直整合业务模式，加速半固态电池量产。** 赣锋锂业在2016年成立固态电池研发中心，在2017年与中科院宁波材料所许晓雄团队合作，共建固体电解质研究中心，并设立子公司浙江锋锂，建设第一代固态电池中试线。公司主打半固态电池，聚焦于氧化物厚膜路线(GARNET型、LISICON型)，一代产品能量密度达260Wh/kg以上，二代产品达360Wh/kg以上。公司打造垂直整合业务模式，稳定自供锂化合物及金属锂等材料，已与德国大众、东风汽车、赛力斯、广汽埃安、曙光汽车等车企建立合作协议。
- ◆ **与下游车企深度合作，推动固态电池产业化。** 19年4月，公司与**德国大众**签订协议，在电池回收和固态电池等未来议题进行合作；19年7月，**东风汽车**与赣锋锂电开始合作开发一代固态电池系统，22年1月，搭载赣锋锂电第一代固态电池的东风E70示范运营车投入市场，实测续航426公里，搭载赣锋锂电第二代固态电池的东风汽车预计24年装车，续航预计超1000公里；22年8月，公司与**广汽埃安**签署协议，后者支持赣锋锂电固态电池开发工作，在综合技术、质量、成本具有市场竞争力的条件下，优先引入赣锋锂电新型电池方案；23年2月，赣锋锂电宣布搭载公司半固态电池的纯电动SUV**赛力斯-SERES-5**规划于23年上市。
- ◆ **远期规划产能超40gwh，推动锂产业链结构优化升级。** 固态电池方面，公司22年底产能2gwh，远期规划产能超40gwh。江西新余基地二期规划第一代固态产能4gwh，目前已具备产能2gwh，23年底预计升至4gwh，三期规划新型电池产能6gwh；重庆两江基地规划新型电池产能20gwh，预计第二代固态锂电池为主；广东东莞基地规划新型电池产能10gwh，项目建设内容包括半固态电芯。固态电池推动公司的锂产业链结构优化升级，金属锂方面，公司目前在宜春、奉新具备金属锂设计产能为2160吨，并计划在宜春、青海分期投资建设金属锂7000吨产能。

图 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	10	10
重庆两江	0	0	0	20
广东东莞	0	0	0	10
总计	2	4	10	40

图 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%	360Wh/kg+	600次+	氧化物	高镍三元	含锂负极	固态隔膜	赛力斯SERES-5
第三代	100%	-	-	硫化物	-	-	无	-

- ◆ **专注氧化物固态电池路线，三大核心技术构筑护城河。**辉能科技于2006年在中国台湾成立，创始人杨思栢来自台湾大学化学工程系，公司专注于氧化物固态电池领域，具备完善的专利壁垒(500+)，可实现50层以上堆叠，并达到99.9%单层电芯良率和94%多层电芯良率，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)，并具备三大核心技术：1) MAB：多轴向双极电池技术，采用CTP+内部串联方式，大幅提升封装效率；2) LCB：通过Ceramion内导技术降低内阻、Logithium封装技术提升加工性能，进而解决氧化物电解质的导电性和脆性问题；3) ASM：主动隔断高温产热及释放，钝化正负极，提升安全性。公司预计可凭借核心技术，在生产规模达7gwh后，价格实现与液体电池Pack持平。
- ◆ **绑定奔驰团队进行深度合作，远期规划产能120gwh。**16年公司开始与奔驰合作，送样车规级电芯，22年1月双方签署合作协议，共同开发固态电池，同时奔驰在辉能董事会占据一席，帮助其在欧洲建立生产制造厂，首款全新固态车型预计将在未来几年推出，并将逐渐在未来五年搭载在一系列乘用车当中。此外，公司已与VinFast、ACC、FEV、Gogoro、蔚来、一汽等车企建立合作关系。产能方面，13年首条中试线开始运营，17年10月投产消费类产线(台湾G1, 40mwh)，23年初投产动力类产线(台湾G2, 22年底0.5gwh, 23年底3gwh)，远期规划产能超120gwh。此外公司与韩国浦项制铁达成协议，合作开发并制造相关正负极和固态电解质材料。

图 辉能科技产品技术迭代

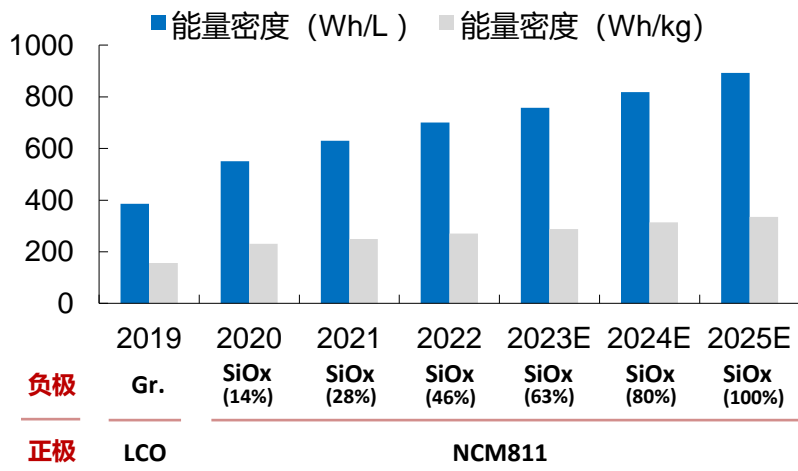


图 辉能科技合作企业情况

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

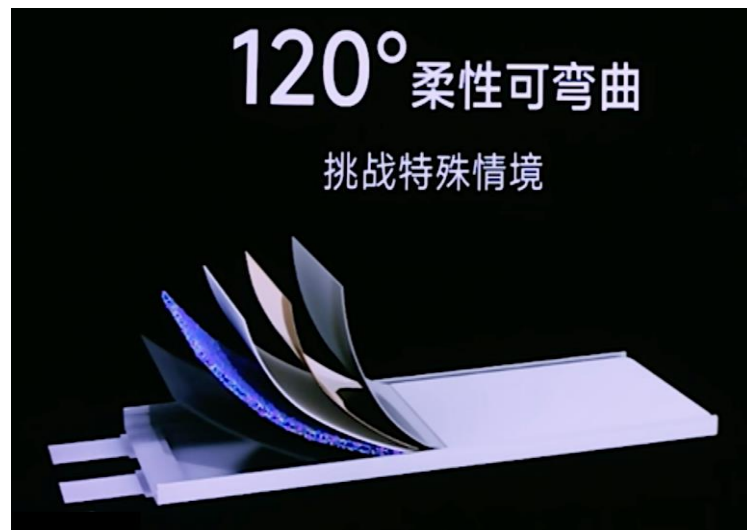


- ◆ **拥有半固态+全固态技术，半固态产品22年率先装车验证。** 22年12月，亿纬锂能在新技术新产品发布会中公布了半固态、全固态电池产品及未来技术布局，首代半固态技术基于50Ah软包电池，能量密度330Wh/kg，循环寿命超过1000次，电池工作温度范围扩展至-20~80°C，产品已于22年完成设计定型，目前处于装车测试阶段。
- ◆ **首代全固态电池基于卤化物路线，将运用于高端消费电子领域。** 公司已有的全固态薄膜软包电池技术基于卤化物体系，可适应特殊高温及弯折条件，搭配高镍正极可以在150 °C高温温区稳定放电，柔性技术使电池在120°弯曲条件仍可正常充放电。公司计划于24年完成全固态电池1.0技术研发，能量密度为350Wh/kg，循环寿命300次以上，首代全固态电池产品在机器人/消防设备、内置医疗、VR/曲面屏等高端消费领域应用潜力巨大。
- ◆ **重点布局氧化物、硫化物、卤化物全固态路线，进一步提升能量密度及安全性。** 公司在固态电解质领域拥有数十年研发经验，公司全固态技术迭代将分为三个阶段，未来将重点研发氧化物、硫化物、卤化物路线，旨在打造高比能、极致安全的固态电池体系。目标于28年实现全固态电池3.0技术迭代，能量密度提升至550Wh/kg、循环寿命1000次+、且具备高安全性、高柔性、耐高温等特性，以满足动力电池领域需求。

图 亿纬锂能固态电池技术布局路线

	2022年	2024年	2026年	2028年
产品技术	半固态电池	全固态电池1.0	全固态电池2.0	全固态电池3.0
标称容量	>50Ah	0.5Ah	2.0Ah	10Ah
能量密度	330Wh/kg	350Wh/kg	450Wh/kg	550Wh/kg
循环寿命	1000次+	300次+	500次+	1000次+
使用温度范围	-20~80°C	0~100°C	-20~120°C	-20~150°C
目标/产品特性	完成技术定型	柔性可弯曲	柔性可弯曲	柔性可弯曲
产品目标	高能量密度、极致安全性、耐高温、可弯折			

图 亿纬锂能固态电池柔性可弯曲技术



- ◆ **采用氧化物包覆+原位固态化工艺，半固态产品23年批量交付。** 22年5月，公司发布首款半固态电芯产品，通过固态电解质复合正极(LATP包覆)、固态电解质功能离子膜、单体原位固态化技术、掺硅补锂、复合集流体等工艺，实现单体能量密度360Wh/kg，Pack能量密度260Wh/kg，配套车型的电池包电量达160kwh，续航里程超过1000km，预计首批搭载高合汽车HiPhi X，以超高电池包升能服务方式，在23年批量交付。产能方面，预计公司22年底半固态产能1gwh左右，23年H1正式投产更大规模的半固态产线。
- ◆ **目标25年量产全固态电池，打造高电压无模组电池包。** 公司已有400Wh/kg的三元半固态电池实验室原型样品，未来还将通过技术创新落地硅基负极迭代，锂金属负极和预锂技术，加速液态电池向半固态过渡，最终实现全固态，目标是25年后做出能量密度800Wh/L+、对应400Wh/kg+、循环800次的全固态电池，采用富锂材料、硫系或其他正极材料，负极方面采用锂负极及界面修饰技术，打造内串高电压无模组电池包。

图 国轩高科固态电池总体目标

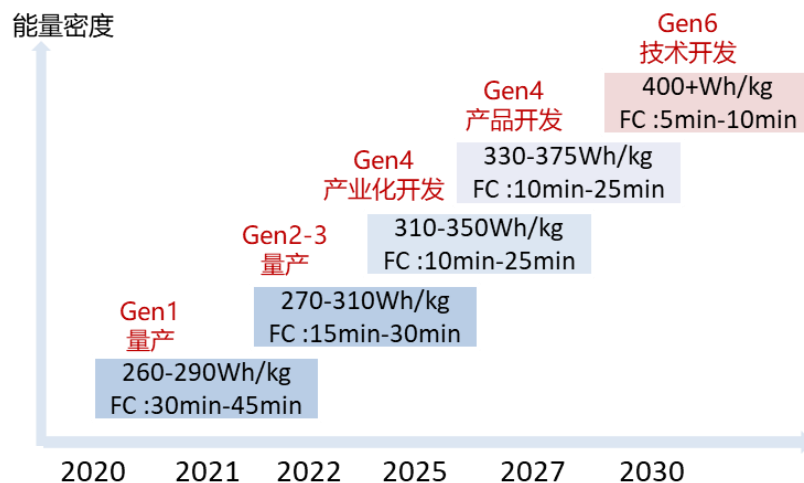
	2020年	2021年	2022年	2023年	2024年	2025年	>2025年
<b>类型</b>	高安全固液电池			高性能固态电池			
<b>通用新型技术货架</b>	复合集流体/功能离子膜/特殊电极/活性陶瓷包覆正极/硅碳预锂化技术/固态电解质卷对卷成膜			一体化复合电极工艺/双极性电极/锂负极本体结构/固态电芯批量生产/低阻抗界面技术/高电压内串型电芯/锂负极界面工程/内串高电压无模组电池包集成			
<b>体积能量密度</b>	610Wh/L	640Wh/L	680Wh/L	700Wh/L	700Wh/L	750Wh/L	800Wh/L
<b>质量能量密度</b>	300Wh/kg	320Wh/kg	350Wh/kg	350Wh/kg	350Wh/kg	380Wh/kg	400Wh/kg
<b>循环寿命</b>	1000次	1000次	1000次	800次	800次	800次	800次
<b>安全性</b>	满足高端客户要求	满足高端客户要求	满足高端客户要求	满足高端客户要求	满足高端客户要求	引领行业安全性定义	根本上解决安全问题，满足定制化场景应用需求
<b>正极</b>	NCM (Ni50-80)	NCM (Ni80-85)	NCM (Ni80-88)	NCM (Ni83-90)	NCM (Ni85-90)	NCM (Ni 90)	富锂、硫系或其他正极
<b>负极</b>	石墨	低硅碳+石墨	高硅碳+石墨	高硅碳+石墨	高硅碳+石墨	锂复合负极+人工SEI界面	锂负极+界面修饰
<b>电解质</b>	液态电解质+固态化技术	液态电解质+固态化技术	固态电解质+原位固态界面	固态电解质+原位固态界面	固态电解质	固态电解质	固态电解质

- ◆ **搭载岚图追光率先量产装车，推出SPS全新解决方案。** 2021年，孚能科技成功研发9系高镍三元半固态电芯，可实现能量密度330Wh/kg、循环寿命1500+次、成本目标0.1\$/Wh。22年9月，公司发布SPS大软包方案，引入半固态电芯设计，提升电池的本征安全，材料成本降低33%，提升体积利用率到75%，带电量涵盖80kWh到150kWh，同时开始量产第一代半固态电池。22年12月，东风岚图C级乘用车“追光”开始预售，搭载“云母”电池系统，其中82kWh电池包为业内率先量产装车半固态系统，对应电池能量密度170Wh/kg，预计由孚能科技提供。此外，公司已获**广汽、吉利、东风**等车企的SPS定点，并**已为奔驰**送样固态电池进行测试，预计27年后量产装车。
- ◆ **SPS预计23年起规模放量，全固态电池预计30年推出。** 产能方面，SPS技术将同步规划于公司新产能中，并逐步迭代已有产线。SPS产能方面，赣州基地(规划30gwh，一期12gwh)预计23年H2投产，并计划未来于芜湖基地(规划24gwh)、广州基地(规划30gwh)落地SPS产能，此外镇江一期产线稍加调整后即可适用于生产未来330Wh/kg产品。产品迭代方面，公司已储备350Wh/kg的产品，并向400Wh/kg方向升级，预计30年推出全固态电池，能量密度达到400-500Wh/kg。

图 孚能科技330Wh/kg半固态软包技术的“1 + N”



图 孚能科技电芯技术路线布局



- ◆ **与宁波材料所深度合作，开发果冻电池、硫系全固态电池。**蜂巢能源于2018年注册成立，陈少杰任固态电池研发中心总监，曾任中科院宁波材料所高级工程师，同时子公司日本蜂巢专注于固态电池和前沿技术开发。**半固态**电池方面，公司果冻电池采用安全涂层和凝胶电解质技术，实现高的离子电导率(接近电解液水平)和高的阻燃性(空气中不可燃)。一代电芯形式多样，包括方形短刀(230Wh/kg)、软包电芯(270Wh/kg)，循环寿命2000次以上，二代电芯拟完成300-350Wh/kg技术开发，预计选用聚合物+氧化物路线，目前处于中试阶段。**全固态**电池方面，实现离子电导率10mS/cm，电解质膜厚20 $\mu$ m，能量密度350-400Wh/kg，循环寿命1000次，已顺利通过针刺、200 $^{\circ}$ C热箱等实验测试，目前处于样件阶段。

图 蜂巢能源固态电池产品



- ◆ **全固态电池25年集中量产，28年大规模商业化放量。**各国厂商研发生产模式差异化，主要通过自行研发、联合研发及投资初创公司，以全固态路线为主，材料体系选择多样，技术迭代迅速，部分企业已交付A样，将于25年集中量产。
- **美国：初创企业风靡，商业化进程较快。**着重于推动电动车产业链本土化，拥有大量固态电池初创公司，创新为主打，风格以快速融资上市为主要目的，技术路径多为聚合物电解质和氧化物电解质，负极采用锂金属，商业化进程较快，代表厂商为Solid Power、SES、Quantum Scape等。
- **日本：组织产学研联合，全力搭建硫化物技术体系。**日本厂商普遍较早布局固态电池，通常以企业与机构联合研发的形式推进，主攻硫化物固态电解质，代表厂商包括丰田、松下、日产等企业。
- **韩国：内部研发与外部合作并行，主攻硫化物技术体系。**研究模式以企业自行研究和外部合作并行为主，技术路线集中于硫化物体系，电芯开发速度逊于日本，但韩企延续正负极材料研发优势，有望较快搭建固态电池材料供应链，领先厂商包括三星SDI、LG、SKI等企业。

图：固态电池产业化情况

国家	公司	正负极技术	电解质体系	研发/产能进展
美国	Quantum Scape	无负极设计	氧化物(LLZO, 主打) 硫化物(LGPS, 储备)	计划在24年实现0.25gwh产能, 25年提高至0.75gwh, 最终目标在28年实现91 gwh产能
	Solid Power	NCM正极/FeS2正极+硅基/金属锂基负极	硫化物	目前提出的三种固态电池设计概念包括：第一代硅负极固态电池；第二代锂金属固态电池；第三代高能量密度正极材料固态电池, 分别计划在24年、26年实现量产
	SES	/	聚合物	23年后将有1GWh的产能, 预计到2028年将超过100GWh, 在2025年实现商业化生产
	Ionic Materials	阳极结构预计将转向硅主导和锂金属材料	全新聚合物	Ionic Materials研究人员已经宣布3项重大突破, 包括: 锂离子在聚合物中移动的比常规液态电解质还要快; 其材料工作电压高达5V; 它们的材料能在室温环境下工作
	Factorial Energy	/	FEST (专有固体电解质材料)	在2021年与梅赛德斯-奔驰公司达成了战略协议, 获得其投资约10亿美元金额以支持固态电池研发, 并计划在五年内实现小批量生产
日本	丰田	层状氧化物系正极+碳素系负极	硫化物	预计在2025年前实现全固态电池小规模量产, 并首先搭载于混动车型, 2030年前推出全固态电池电动车型, 实现持续的、稳定量的固态电池生产
	松下	NCA正极+合金(硅基)负极	卤化物/硫化物(主打)	松下与日本的主要汽车制造商丰田、日产、本田联手展开了固态电池研发项目, 此外松下开发出一种AI高科技材料分析手法, 并将其预先应用于全固态电池的研发中, 在特定的课题上进行确认
	日产	/	硫化物	已成功开发全固态电池, 预计2025年试生产, 2028年正式生产一款固态电池的电动汽车
韩国	LG新能源	NMC811正极+全硅负极	硫化物	计划于26年推出650Wh/L的聚合物固态电池, 28年推出750Wh/L的聚合物固态电池和完成硫化物全固态电池开发, 30年推出超过900Wh/L的硫化物固态电池
	三星SDI	NCA正极+新型负极	硫化物	2022年三月, 三星宣布一条全固态电池试验线 S-Line破土动工, 当 S-Line 完成后, 大规模的试生产将成为可能。三星SDI力争在5-8年内实现固态电池大规模生产
	SKI	NCM正极+高含量硅负极	硫化物	计划在25年前推出使用镍钴锰和硅/石墨的固态电池, 并于30年前推出锂金属负极电池。

- ◆ **脱胎于斯坦福大学, 深度绑定大众集团。** 公司2010年创立, 拥有超300项电池技术专利, 成功开发唯一一款具有汽车OEM认证的锂金属固态电池, 研发实力国际领先, 创立至今获得超20亿美元投资, 包括比尔盖茨、大众、马牌和上汽等机构, 公司深度绑定大众, 18年与其成立合资制造企业, 20年获单笔增资2亿美金。
- ◆ **氧化物、硫化物双重材料体系, 无负极、固态陶瓷隔膜创新结构提升电池性能。** 相较LIB, QS在固态电池结构设计中取消传统负极材料层, 以兼具隔膜/负极作用的固态陶瓷电解质取代电解液, 充电时集流器将沉积锂离子形成锂金属负极, 提升体积、能量密度, 而固态电解质满足高导电性的同时可抗枝晶, 防止内部短路。公司开发双重固态电解质材料体系, 以LLZO石榴石型氧化物体系为主打, LGPS硫化物体系为储备, 电池性能显著, 1) 15分钟可快充至80%; 2) 800次循环后保持80%+容量; 2) 1000Wh/L存储电量 (380-500Wh/kg), 续航提升80%, 最高可达2000公里。
- ◆ **实现首批原型电池交付, 计划28年实现91GWh产能。** QS当前已向客户交付首批24层原型固态电池第一批A样, QS-0预试生产线正开发建设, 预计23年实现小批量生产, 陶瓷固态电解质隔膜生产峰值可达8000片薄膜/周, 预计23年开始试产部分固态电池, 25年实现大规模量产。现有计划在24年0.25GWh电池产能, 25年0.75GWh, 28年91GWh。公司已与6家汽车OEM签订了QS-0电池合同, 还与固定储能系统领导者Fluence签署QS-0电池使用协议。

图: QS无负极结构设计原理



图: QS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

图: 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

- ◆ **背靠福特、宝马，硫化物固态电解质/固态电池为两大核心业务。** SP 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。公司两款核心产品为高能量密度固态电池、硫化物固态电解质，前者潜在客户有SKI、丰田、现代、LG、松下与三星，后者含福特、宝马、SKI等，SP电池涵盖三种材料体系，1) NCM层状正极+硅基负极+硫化物电解质；2) NCM层状正极+金属锂负极+硫化物电解质；3) FeS<sub>2</sub>正极+金属锂负极+硫化物电解质。
- ◆ **高硅全固态电池容量发挥、循环性能优异。** 公司硫化物固态电解质室温离子电导率达1-9mS/cm，所研发的高硅全固态电池目标使用2000mAh/g硅基负极材料，开发容量容量≥2Ah，可用比能量≥350Wh/kg，循环寿命≥1000周，成本≤100美元/kWh的全固态电池。从项目进展及性能来看，其硅基负极材料3mAh/cm<sup>2</sup>面容量电极下可实现1500mAh/g容量发挥，首次库伦效率92%，循环100周容量保持率达到95%。
- ◆ **试验线周产300块固态电池，规划25/27年实现硅基/金属锂全固态电池量产。** 19年SP第一条中试线投运，20H2进OEM交付验证320Wh/kg的2Ah锂金属电池，22年5月第二条中试线建成，Q3向福特、宝马交付150块20Ah电池测试，当前每周硫化物全固态电池试制量约300块，预计21-23年100Ah产能6.5MWh/年，23-25年100MWh年产能，25-27年产能为10GWh/年；固态电解质方面，22H2产能预计2.5吨/月，在丹佛地区开设第二工厂，规划年产30吨。近期宝马与公司将共同在慕尼黑建立一条全固态电池原型产品生产线，公司计划23年向宝马交付用于测试的全尺寸汽车电芯，第一辆采用全固态电池技术的BMW原型车计划在25年前问世。

图：Solid Power 两大核心产品概况



图：Solid Power的未来产品路线

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

- ◆ **诞生于MIT，深耕混合液态锂金属电池。**12年创建，目前全球唯一拥有混合锂金属电池样品且经过验证的电池公司，电池负极由锂金属和特制高浓度电解液组成，核心材料技术有高浓度溶剂盐电解质（低挥发性和自熄性）、复合负极涂层（转变枝晶生长方向&降低体积膨胀幅度）、宽幅锂金属负极、聚合物隔膜（自断电）、高能量密度正极等，公司三大业务平台为：1) 新材料开发平台Hermes，所产4Ah小电芯软包电池较LIB减轻24%质量，提升77%能量密度和35%续航，已有车企对接开发A样；2) 锂金属电池工程制造平台Apollo，已发布全球单体容量最大的107Ah锂金属电池，重量0.982kg，能量密度417Wh/kg、935Wh/L；3) 安全软件Avatar，AI软件追踪全生产流程。
- ◆ **已通过第三方验证，混合锂金属电池性能优异。**1) 电解质方面，SES开发的特殊电解液不仅可以减缓锂枝晶生长，还可将其形态由尖锐的枝晶转变为密集沉积结构，减少枝晶刺穿隔膜概率；2) 锂金属电池方面，公司产品性能业内领先，4.2Ah 25层小电芯实测能量密度370Wh/kg和700Wh/L，15分钟内实现80%充电，还通过针刺、耐热、过充、外短路等安全测试，预计550次循环寿命下90%容量保留率；100Ah样品预计能量密度超400Wh/kg和1000Wh/L。
- ◆ **23/28年产能1/100GWh，25年量产。**与通用、现代开展A样合作，上海工厂A样电池产线一期 0.2GWh 22年投产，二期0.8GWh 23Q1投产，总计1GWh产能，全球最大；电解液5吨/年，后续扩至250吨/年；韩国忠州产线已生产50Ah/100Ah电池。23年启动电池BC样10GWh产线建设，预计23H2交付B样，24年提供C样，25年量产，26年规划第二阶段30GWh工厂，27年产能80GWh+，28年100GWh。此外，还与吉利、上汽、富士康、天齐等合作。

图：SES的产品特性（Hermes 4Ah电池）

指标	参数特征
工作电压	4.3V
工作温度	-30 ~ 60°C
循环寿命	800周期 (3-4层, 80%)
能量密度	>375Wh/kg (低功率 C/20, 室温)
快充	80% in <15min
可生产性	与锂离子高度相似的过程，具备生产条件
安全性能	温度超过锂的熔点时，电解质稳定，穿刺、过充、外部短路均通过测试

图：SES产能规划

年份	规划产能(GWh)	备注
2023年	1	上海工厂计划于2023年竣工
2025年	10	韩国等其他国家的工厂相继启动
2027年	> 80	/
2028年	100	/



- ◆ **瞄准聚合物路线, FEST电解质系统技术斩获奔驰、Stellantis合作。** Factorial Energy 成立于2020年, 其FEST技术 (Factorial电解质系统技术) 可利用专有的聚合物固体电解质材料, 匹配高压和高能量密度的电极, 实现高安全的电池性能, 并增加续航里程20%-50%, 同时具备嵌入式兼容特性, 可轻松集成至现有锂离子电池制造设备。目标400Wh/kg和1000Wh/L的能量密度, 21年FE成功制作40Ah固态电池原型, 能量密度350Wh/kg, 体积能量密度770Wh/L, 循环675次后容量保持率更是高达97.3%, 分别斩获现代、奔驰和Stellantis投资与合作。
- ◆ **40Ah电池已实现规模化, 100Ah电池有望26年量产。** 22Q1公司于新英格兰建设先导产线, 建成后将规模化生产固态电池, 并供货给客户进行测试, 预计23年初投入运营。22H2FE电池已与多家世界顶级OEM公司启动产品送样。23年1月, 公司已成功在 40Ah 电池中实现规模化, 并推出100Ah固态电池原型, FE 100Ah电池使用更少的钴材料, 能量密度较LIB提升30%, 下一代目标提升50%。公司将与奔驰于22年内测试原型车, 27年内实现小批量量产, Stellantis 100Ah电池有望26年实现商业化量产。

图: Factorial Energy 40Ah固态电池

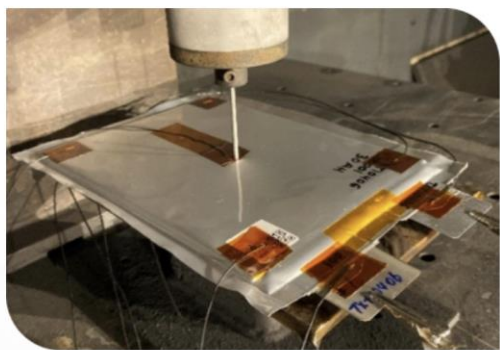


图: Factorial Energy的产品特性 (40Ah)

指标	参数特征
工作温度	室温
循环寿命	675次
容量保持率	97.3%
重量能量密度	350Wh/kg
体积能量密度	770Wh/L
电解质	因子电解质系统技术 (FEST)
电解质种类	聚合物固态电解质

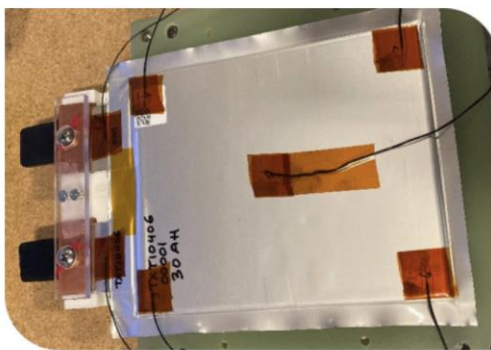
◆ **美国材料科技先锋公司，专注聚合物电解质优化锂电池技术。** Ionic Materials材料技术公司创始人Mike Zimmerman拥有30多年的聚合物专业知识，公司致力于聚合物研究以代替液态电解质，并作将其聚合物电解质为先进材料供应商出售给电池行业。公司突破性产品为首款在室温下能完全发挥作用、传导离子的聚合物固体电解质，室温离子电导率高达1.3mS/cm，锂离子迁移数0.7、5V高电压能力、高弹性模量、可承受正极高负载、低成本合成原料，且可与锂和碱性电池兼容。公司固态电解质专利表明其由结晶树脂制成（聚苯硫醚，聚苯醚，聚醚醚酮和聚砜），在将树脂、离子材料和掺杂剂混合后，挤出成膜，当前Ionic Materials正生产少量的胶片进行测试。

图： Ionic Materials的聚合物固态电解质测试过程



TEST 1

Nail penetration of lithium-ion batteries, while a quite severe and controversial test, can demonstrate the high level of safety achieved with polymer-based solutions.



TEST 2

On severe electrical abuse tests, such as overcharge, conventional, carbonate-based electrolytes can decompose leading to gassing, pressure build-up, and rapid unplanned disassembly. Polymer-based solutions mitigate these limitations.



TEST 3

Severe mechanical abuse, such as crushing cells, frequently leads to hard internal short circuit events such as thermal runaway and fire. The use of polymer-based electrolytes provides enhanced mechanical abuse performance, acting as a solid buffer between electrode layers.

- ◆ **主攻硫化物体系，专利数量遥遥领先。** 丰田于90年开始布局固态电池研究，08年与伊利卡合作研发，19年试制全固态电池样品亮相，次年展示固态电池原型车，并与松下成立合资企业共同研发，2000-22年初固态电池专利达1331项，远超第2（松下445项），其中硫化物电解质专利300余项。丰田选择高离子传导性的硫化物固态电解质，正负极沿用现下主流LIB活性材料，层状氧化物系正极（钴酸锂、NMC、NCA等），碳素系负极。
- ◆ **四大技术降低电池内阻、提升输出密度，打开全固态电池商业化道路。** 丰田通过涂覆正极活性材料（10nm 钨酸锂涂覆层）、湿涂工艺覆薄固体电解质层、浆料旋流均一分散活性物质、加压致密化电极等四大核心技术，提升固态电池体积功率密度至约2.5kW/L，体积能量密度至约400Wh/L，为2010年左右锂离子电池的2倍。
- ◆ **加码电池研发投入，预计25年小规模量产。** 丰田计划到2030年投入1.5万亿日元用于开发动力电池及其电池供应链，预计在2025年前实现全固态电池小规模量产，并首先搭载于混动车型，2030年前推出全固态电池电动车型，实现持续的、稳定量的固态电池生产。

图 丰田全固态电池实现商业化应用的四大技术

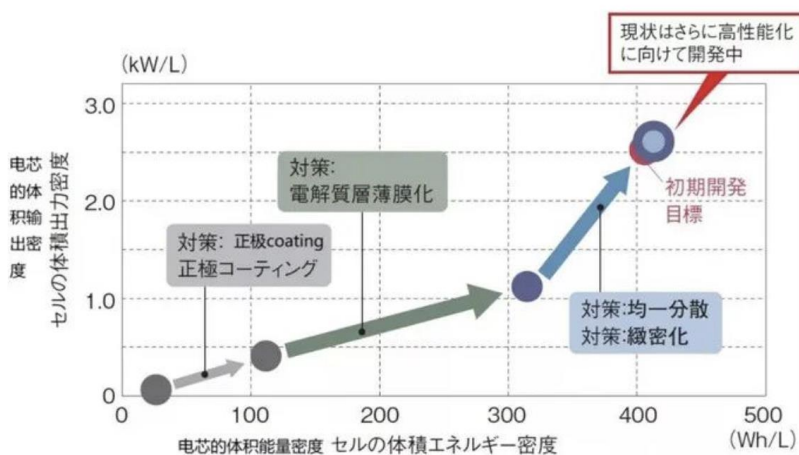
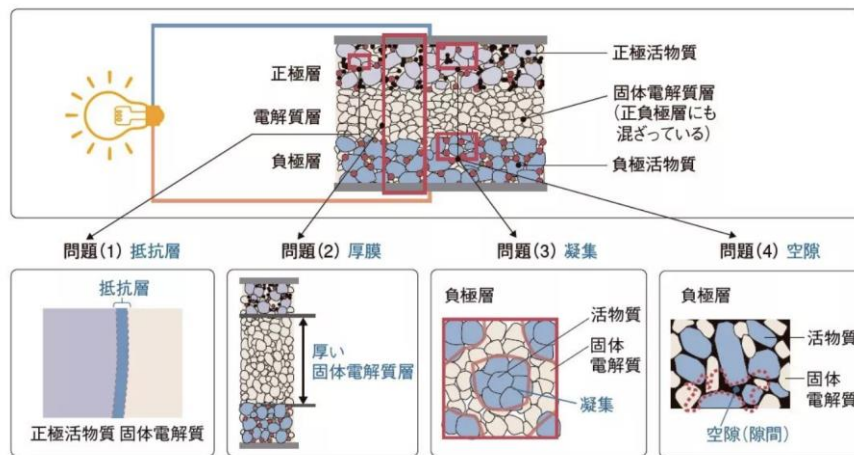
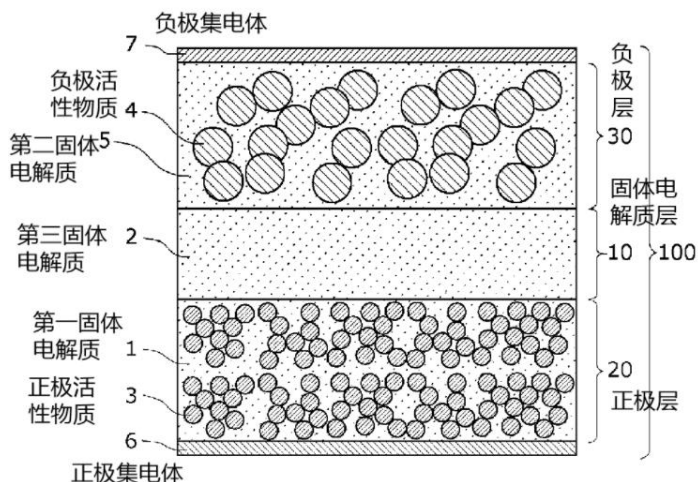


图 阻碍全固态电池性能改善的四个要素



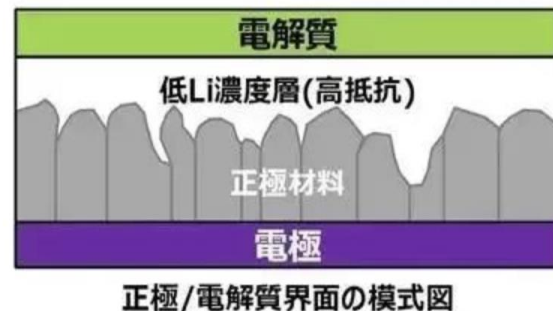
- ◆ **AI可视化研究改善电池性能，预先应用于固态电池研发。**松下18年开发AI高科技材料分析手法，通过将EELS和AI机器学习相结合，可在高速且高分辨率条件下，可视化锂离子电池内部材料在电池工作过程中的行动状态，从而观察影响充放电性能以及容量密度的电极材料(活性材料的LiCoO<sub>2</sub>，以及石墨等)的做功状态，改善电池性能。目前，松下已经将AI技术预先应用于全固态电池的研发中，通过锂离子浓度分布分析，研究与电解质接触的电极表面附近的变化，推动离子导电性、锂枝晶等难题的加速攻克。
- ◆ **技术路线多样，与丰田强强联手加快量产进程。**18年松下成功制备出兼具高离子电导、高化学/电化学稳定性和可塑性的固态卤化物电解质（LYC/LYB），并以锂镧合金为负极、钴酸锂为正极，在商品化电池装配条件下实现整体式全固态电池的正常工作的正常，首周库伦效率高达94.8%。继卤化物之后，22年公司联合丰田公开另一项固态电池技术，旨在采用NCA正极、硫化固态电解质、合金（硅基）负极材料体系与创新涂覆工艺降低内阻。23年2月，公司公布全新混合阴离子固态电解质LiNbOCl<sub>4</sub>以及LiTaOCl<sub>4</sub>（氧卤化物），可实现10.4-12.4mS/cm的超高离子电导率，超过或相当于有机液态电解质。

图：松下固态电池结构设计



图：松下锂离子浓度分布分析技术

- 界面抵抗の起源をnmオーダーの空間分解能で解明  
通过nm级的空间分辨率分析界面抵抗的起源



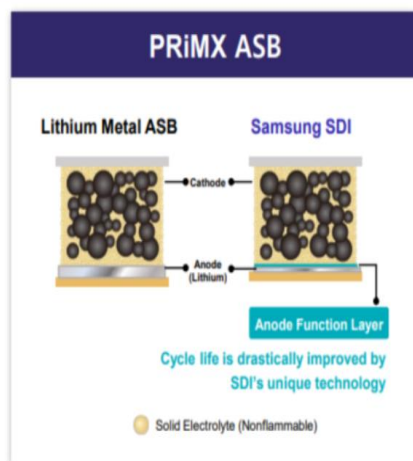
反馈给到材料开发与设备开发，实现高性能化

- ◆ **率先布局硫化物体系，抢占先发、技术优势。** 公司13年引入固态电池技术，18年与LG、SKI投资相关研发项目，20年发表能量密度超400Wh/kg、单次续航里程超800公里、循环寿命1000+的硫化物全固态电池研究成果，当前已申请63项专利。SDI公司的ASB（全固态电池）采用高导电性硫化物型固态电解质、高镍NCA正极、新型负极和堆叠技术，展现优异电池性能表现。
- ◆ **预计引进Ag-C负极、SUS集电器、硫银锗矿型电解质及LZO涂层等核心技术。** 三星在Nature Energy公布的硫化物全固态电池中引入Ag-C复合负极、不锈钢SUS集电器、辉石型硫化物（硫银锗矿）电解质及LZO涂层技术，解决负极锂离子过量不均匀沉积、避免锂枝晶形成、减小界面阻抗、断绝副反应，实现1000次+充放电循环、库伦效率 > 99.8%、900Wh/L能量密度（丰田、松下能量密度仅700Wh/L，库伦效率约90%）。
- ◆ **业界首条固态电池测试线动工，加速商业化、量产进程。** 三星21Q4完成PP Scale Material工作，22Q4实现MP Scale Material测试，计划23Q4实现20Ah试制电芯，27年量产900Wh/L全固态电池。同年固态电池制造试验线（S-line）开工，规模约6500m<sup>2</sup>，并计划引进纯电池电极板、固体电解质加工设备和电池组装设备。目前公司已在实验室内研发出2款固态电池原型，S-Line完成后有望大规模试生产，加速量产进程，现代汽车或将搭载其固态电池。

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)
面容积	6.8mAh/cm <sup>2</sup>
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



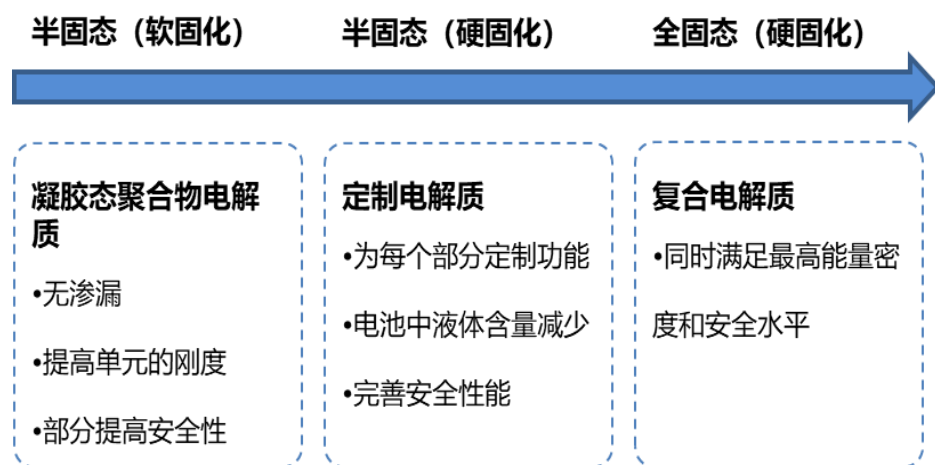
- ① High-Ni NCA : The highest specific energy
- ② Sulfide solid electrolyte : High ionic conductivity
- ③ Novel anode : Preventing Li-dendrite
- ④ Stacking : High energy density and conductivity

- ◆ **布局全球联合研发，全面开放式创新加速固态电池进程。** 21年公司与UCSD共同开发“常温驱动长寿命全固态电池”项目，其电池采用硫化物固态电解质、NMC811正极与全硅负极，实现室温快充的突破、循环寿命500+。22年6月，公司与德国研究机构EM共同设立新一代电池技术研发中心，加速全固态电池开发。同时，与2家德国研究所建立研究伙伴关系，联合研究新电池技术。
- ◆ **LGES现阶段专注于聚合物（半）固态电池，有望26年实现量产。** LG在固态电池领域同时开发基于聚合物和基于硫化物的固态电池技术，引入差异化材料和创新工艺技术，如添加铝的四元电池（NCMA）和LongCell，LG计划于26年推出650Wh/L的聚合物固态电池，28年推出750Wh/L的聚合物固态电池和完成硫化物全固态电池开发，30年推出超过900Wh/L的硫化物固态电池，有望逐步应用于电动汽车和飞机领域。

图：LGES的部分合作研究布局

研究机构	合作项目
美国加州大学圣地亚哥分校	建立了第一个前沿研究实验室(FRL)项目，共同研究的新一代全固态电池。这种电池使用全硅负极，并采用硫化物固态电解质。采用无粘合剂和全面去除碳的设计以解决硅负极膨胀而造成快充快放性能差的问题
德国研究机构EABTC MEET	在欧洲增加电池技术研发中心，来加速全固态电池的开发
明斯特电化学能源技术研究所以及亥姆霍兹明斯特研究所	研究伙伴关系，两机构将参与由LG新能源的前沿研究实验室(FRL)资助的联合电池研究项目

图：LGES聚合物基电池发展策略



- ◆ **SKI: 外部合作布局全固态电池，主打硫化物体系，规划25年交付。** 18年SKI和LG、SDI组成共研联盟，20年与诺贝尔化学奖得主古迪纳夫合作开发新型凝胶聚合物电解质，21年3000万美元入股Solid Power，以其硫化物固态电解质、专利电池设计和生产工艺为基础，开发生产固态电池，采用NCM正极、高含量硅负极和硫化物电解质，目标密度930Wh/L+，未来60%-70%电池产线将用于生产固态电池。22年SKI与佐治亚理工学院Seungwoo Lee团队合作，旨在提升固体电解质离子导电率。
- ◆ **沿用现有锂电池产线，计划25年落地使用。** SKI和Solid Power规划沿用现有锂离子电池工厂设备生产全固态电池，减少投资成本，旨在较竞争对手提前交付固态电池，计划在25年前推出使用镍钴锰和硅/石墨的固态电池，并于30年前推出锂金属负极电池。

图：2023首尔电池展 SKI固态电池技术展示



图：SKI全固态电池结构设计



◆ **固态电解质氧化物主线明确，23年有望放量。**从厂商分布看，目前有固态电解质规划的厂商主要有四类，第一类为一体化布局的**固态电池企业**，如清陶能源、赣锋锂业；第二类为绑定固态电池龙头的**初创公司**，如蓝固新能源、天目先导，二者与卫蓝新能源达战略合作，技术成熟，率先实现较大规模量产供货；第三类为**正负极材料厂**，大多同时布局固态电解质与固态电解质包覆/掺混正极，如当升科技、厦钨新能；第四类为**合作科研团队或主业可延展至固态电解质用聚合物/锂盐的跨界入局者**，如上海洗霸（水处理）、奥克股份（环氧精加工）、瑞泰新材（新型锂盐添加剂），我国固态电解质厂商大多聚焦氧化物路线。从投产进度看，固态电解质23年有望放量，多家厂商于22年末-23年初实现量产。

**图 固态电解质行业公司布局**

公司	主营业务	体系	产业化进程/客户	产能布局
清陶能源	固态电池	LATP/LLTO/LLZO/LLZTO	自供	产能达1300吨+ (LLZO300吨+, LLTO1000吨+)
赣锋锂业	锂产品及锂电池	LATP/LLZO/LISICON	自供/外售	LISICON型/Garnet型(LLZO)氧化物固态电解质产能分别超100吨
天目先导	硅基负极、固态电解质	LATP/LLZO/LLTO	供货卫蓝新能源	产能达3000吨(粉体/浆料)
蓝固新能源	固态电解质	LATP/LLZO/LLTO/原位聚合	供货卫蓝新能源	规划5.5万吨原位固态化电解质, 7000吨固态电解质粉体, 1万吨固态电解质浆料, 已部分量产
厦钨新能	正极材料	-	固态电解质开发成功, 固态电解质包覆正极处于小试阶段	固态电解质实现吨级量产
当升科技	正极材料	LATP	推出纳米级固态电解质+固态电解质包覆正极, 固态锂电材料实现批量供货	-
贝特瑞	正负极材料	LATP/LLZO/原位聚合	获小批订单	-
上海洗霸	水处理	LLZTO	送样客户	吨级至十吨级产线投产; 规划50吨产能预计需24个月建成
金龙羽	电线电缆	-	已有中试样品, 未送样	-
奥克股份	环氧精加工	PEO	具备生产不同分子量PEO能力, 积极推进固态电池用PEO产品研发	-
瑞泰新材	锂电材料及化工新材料	LiTFSI	批量供货	LiTFSI产能达200吨



- ◆ **脱胎于中科院物理所，承接硅负极核心专利群。**天目先导成立于2017年，专注于硅基负极、固态电解质和钠电负极材料研发生产。公司核心技术源于中科院物理所，组建了以物理所陈立泉院士、李泓研究员为技术带头人，罗飞博士为主体的研发团队，拥有世界较早的纳米硅负极核心专利，形成40余项硅负极材料专利群。此外公司硅负极战略合作硅烷科技、龙佰集团，固态电解质涂层隔膜战略合作卫蓝新能源、恩捷股份，获小米入股。
- ◆ **硅负极全面量产，导入海内外知名客户。**公司硅氧负极13年发布第一代（CVD包覆），19年发布第二代（预镁化）；硅碳负极17年起步，18年发布第二代，第三代处于中试。公司硅负极已全面量产，20年实现千吨级销售，性能处于国际较高水平，可满足能量密度高于300Wh/kg及700Wh/L的高性能电池需求，导入ATL、三星、LG、特斯拉等知名客户。产能方面，硅负极规划有溧阳（一期5万吨纳米硅基负极）、成都（3.3万吨纳米硅材料+10万吨硅基负极）、许昌（6万吨纳米硅基负极）三大基地，23年产能达1.2万吨，配套硅负极石墨产能达2万吨。
- ◆ **固态电解质性能优异，供货卫蓝新能源。**固态电解质方面，公司一代LATP，二代LLTO/LLZO可以粉体及浆料形式批量交付，产能达3000吨/年，三代超高离子电导率新型固态电解质在研，已量产LATP粉体离子电导率达 $10^{-3}$ S/cm。此外公司开发了固态电解质涂层隔膜，一代采用LATP涂覆，二代采用LATP渗入基膜，三代向全固态电池隔膜发展。

图 天目先导硅负极产品性能

型号	YOB155-5	YOB155-500	YOB166	YOB166-500	SL650B1	SL400B1
类型	掺镁硅氧负极			纳米硅碳负极		
振实密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.15	1.1	1.15	0.99	0.91	0.97
比表面积 (m <sup>2</sup> /g)	3.98	1.97	2.44	1.9	5.44	1.75
可逆容量 (mAh/g)	1413.6	503	1370.2	504	650.8	401.0
首次效率 (%)	84.4	88.9	91.7	90.2	88	93.2
特点	高容量、高首效、长循环			高容量、高首效、高倍率		

图 天目先导LATP粉体产品性能

指标	单位	数值	
颗粒度	D10	um	1.74
	D50	um	4.78
	D90	um	8.36
振实	g/cm <sup>3</sup>	1.36	
比表	m <sup>2</sup> /g	1.18	
离子电导率	S/cm	$10^{-3}$	
磁性物质	ppm	0.23	

- ◆ **绑定卫蓝新能源、中科院物理所，形成液态/混合固液/固态电解质全面布局。** 蓝固新能源创办于21年5月，卫蓝新能源为创始股东之一，创始人李立飞博士毕业于中科院物理所，师从黄学杰研究员、李泓研究员和陈立泉院士，曾任天目湖先进储能技术研究院副院长。公司全面布局液态/固液混合/固态电解质，实现关键原材料自我配套，与卫蓝新能源、天目先导、中科海钠、中科院物理所、天目湖储能研究院达成战略合作。**固态电解质方面**，公司LATP/LLZO/LLTO产品可提供公斤级/百公斤级/吨级包装，以粉体或浆料形式供货，离子电导率高，相纯度高，用于正极材料包覆、隔膜涂覆或极片掺混。**固液混合电解质方面**，公司一代产品用于注液后在电池内部原位固化，同时可定制化生产。
- ◆ **5万吨原位固态化电解质预计23H1投产，供货卫蓝新能源。** 公司规划有淄博（5万吨原位固态化电解质）、溧阳（7000吨固态电解质粉体+10000吨固态电解质浆料）、湖州（5000吨原位固态化/混合固液电解质）三大基地，溧阳、湖州基地22年初步量产，淄博基地预计23H1投产，全部供货卫蓝新能源淄博基地，用于生产半固态电芯，后用于海博思创储能产品，打通全产业链链条。

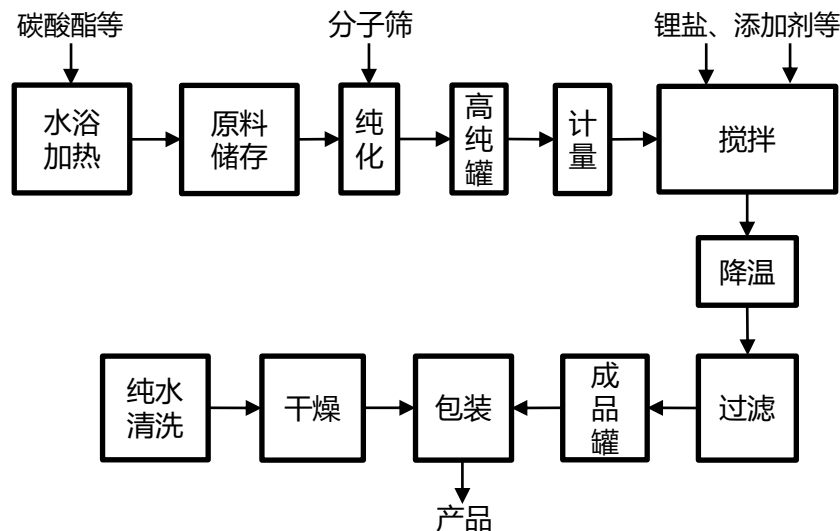
图 蓝固新能源固态电解质产品性能

产品/典型值	LATP		LLZO	LLTO	
型号	LG1133	LG2137 /LG3173	LG1413	LG1512	LG2516
类型	粉体	水/油系浆料	粉体	粉体	水系浆料
D50	1-6μm	100-200nm	4-8μm	1-6μm	400-500nm
离子电导率	2-10×10 <sup>-4</sup> S/cm		5-10×10 <sup>-4</sup> S/cm	1×10 <sup>-3</sup> S/cm	

图 蓝固新能源产能布局

基地	产能	量产时间
淄博	5万吨原位固态化电解质+5万吨钠电电解液	2023年5月
湖州	5000吨原位固态化/混合固液电解质	2022年10月
溧阳	7000吨固态电解质粉体+10000吨固态电解质浆料	2022年5月

图 原位固态化电解质生产工艺

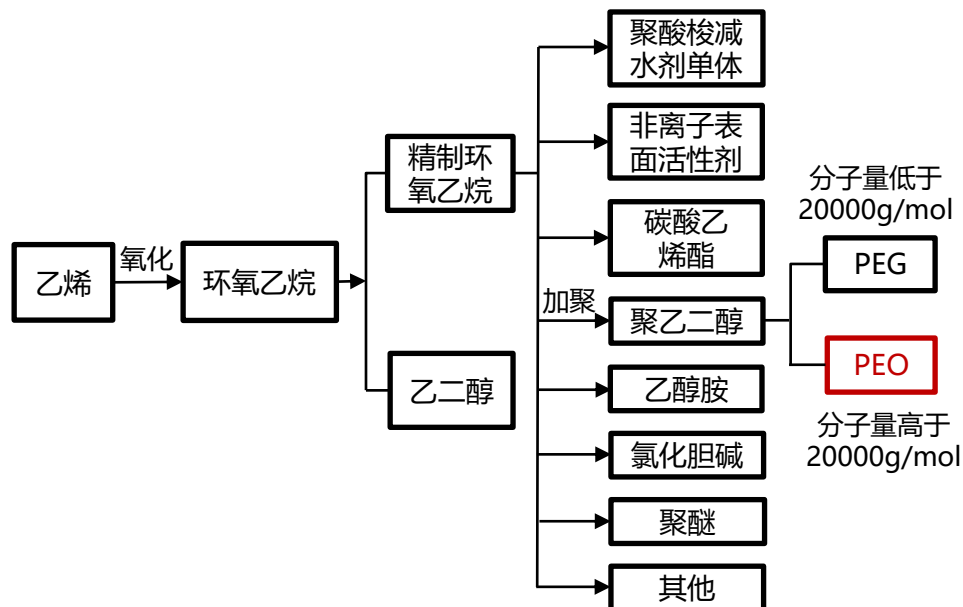


- ◆ **环氧乙烷精深加工王者，形成乙烯-环氧乙烷-衍生物全产业链布局。** 公司为国内环氧乙烷精深加工领军企业，主营环氧乙烷、乙烯衍生精细化工新材料。公司具备5万立方米低温乙烯储罐、30万吨环氧乙烷生产装置，坐拥全球11%的环氧精深加工产能，环氧衍生产品覆盖聚醚（建筑化工）、聚乙二醇（医疗健康）、碳酸酯（电解液）、非离子表面活性剂（日用品）等丰富品类。公司同时积极延伸电解液产业链，持下游电解液添加剂供应商苏州华一（主营产品VC、FEC合计产能3000吨）35%股权。
- ◆ **完成PEO合成技术攻关，环氧衍生产品有望扩展应用于聚合物固态电解质。** PEO（聚环氧乙烷）属于环氧乙烷衍生物，由环氧乙烷经多相催化，开环聚合而制备，可用于聚合物固态电解质。公司积极推进固态电解质相关产品研发，19年起承担吉林省科技发展技术攻关项目“用于固态电池电解质的高分子量聚氧乙烯醚（PEO）的合成工艺技术”，项目经3年实施，已通过验收，完成5项专利申请，形成生产不同分子量PEO产品的自主知识产权，预计产品进行材料改性和结构优化后，有望应用于固态电池。

图 22年我国环氧乙烷产能

公司	产能 (万吨)	产能排名
卫星化学	123	1
三江化工	50	2
上海石化	42.6	3
镇海炼化	33	4
茂名石化	30	4
中韩石化	30	4
扬子石化	30	4
江苏斯尔邦	30	4
扬州奥克	30	4
中海壳牌	26.2	10
<b>行业</b>	<b>751.3</b>	-

图 环氧乙烷衍生物产业链



- ◆ **合作硅酸盐所跨界入局，受让核心专利。** 公司传统主业为水处理，22年起合作中科院上海硅酸盐所张涛团队/复旦大学赵东元院士团队分别跨界布局固态电解质/硅碳、硬碳负极及CMC-Li。固态电解质方面，公司22年8月与硅酸盐所共建联合实验室，9月受让3项核心专利，11月设立子公司上海科源固能（公司/张涛分别参股70%/30%）。张涛团队在固态电解质宏量制备和固固界面方面具备多项革新性成果，基于锂供体反应、锂热还原反应改善石榴石型电解质界面性能。公司已验证技术可行，开启产业实施放大。
- ◆ **产业化迅速推进，募投项目大力扩产，聚焦低成本氧化物。** 公司首条吨级至十吨级固态电解质粉体工业化标准产线23年1月一次性试产成功，首釜产品（LLZTO）相纯度合格，几乎无杂相，已送样客户。23年1月公司披露非公开发行股票预案，拟募资7亿元，投建生产、研发基地，预计需24个月建成50吨固态电解质粉体产能。此外公司计划通过原料替换、水溶剂取代、废料回收等技术，聚焦低成本氧化物电解质开发，同时针对不同应用场景，逐步开发高热稳定性隔膜、复合固态及全固态电解质。

图 上海洗霸合作团队及规划

合作团队	合作方式	初步计划	进展
硅酸盐所张涛团队	①共设 <b>联合实验室</b> ， <b>受让3项相关专利</b> ② <b>共设子公司</b> 上海科源固能（公司/张涛分别参股70%/30%）	建设 <b>吨级到十吨级/年</b> 固态电解质粉体试产线	①试产线 <b>投产成功</b> ，进入优化阶段 ②募投项目计划扩建 <b>50吨/年</b> 固态电解质产线
复旦大学赵东元院士团队	<b>增资控股</b> 山东复元47.75%股权（赵东元持股52.5%）	建设 <b>百吨级/年</b> 锂电硅碳/硬碳/钠电软碳硬碳复合负极材料及锂电池粘结剂CMC-Li试产线	筹备中

图 张涛团队改善LLZO/LLZTO 界面性能成果

界面	原理	作用
LLZTO/正极活性材料界面	以LLZTO近表面 $\text{Li}_2\text{CO}_3$ 等自发反应惰性层作为锂供体，加入 $\text{Co}_3\text{O}_4$ 进行固相反应，生成 <b>空气稳定的活性<math>\text{LiCoO}_2</math>衍生层</b>	①提高LLZTO <b>空气稳定性</b> ②提高复合正极内部 <b><math>\text{Li}^+</math>电导率</b>
Li负极/LLZO界面	利用LLZO与熔融锂之间的“ <b>锂热还原</b> ”，在界面处同时构筑具有 <b>电子绝缘性的<math>\text{Li}_2\text{O}</math>中间层</b> 和可 <b>加快<math>\text{Li}^+</math>均匀扩散的氧空位中间层</b>	<b>抑制锂枝晶</b> 在电解质内部及Li/LLZO界面的成核与生长

- ◆ **深度绑定重庆大学李新禄教授团队，形成固态电解质-正负极-固态电池完整布局。** 公司传统主业为电线电缆，全资子公司电缆实业21年8月与李新禄独资公司锦添翼签订框架协议，拟于5年内投入不超过3亿人民币共推固态电池及其关键材料研发及产业化。李新禄为重庆大学材料学院教授，其团队掌握氧化物固态电解质宏量制备、硅碳负极材料批量生产、固态电芯原位集成等研究成果，公司受让李新禄团队20项核心专利的15%份额，形成了覆盖电解质-正负极-固态电池的完整专利体系，具备良好技术基础。
- ◆ **产业化有序推进，氧化物固态电解质、固态电芯进入中试阶段。** 公司22年于重庆设立研发中心，着手逐步推进小试、中试研究与产业化产线建设。截至23年2月，氧化物固态电解质、硅碳负极分别已出中试、小试样品，进入内测阶段，固态电芯中试线建成。公司计划中试成果达产业化条件后，将与锦添翼将成立合资公司，或进一步开启规模化生产。

图 李新禄团队固态电池及关键材料制备技术与产品性能

技术	产品性能
高温固相法生产公斤级氧化物固态电解质	离子电导率达 $4 \times 10^{-4} \text{S/cm}$
无机-聚合物复合电解质制备	离子电导率达 $10^{-4} \text{S/cm}$
微米级硅表面包覆生产公斤级硅碳负极	1.0A/g充放电500次循环后可逆容量700mAh/g
NCM811正极+超薄锂合金负极+无机-聚合物复合电解质装配固态电芯	1Ah固态电芯能量密度350Wh/kg，充放电循环30次后容量保持率>95%

图 金龙羽拟研究项目及规划资金

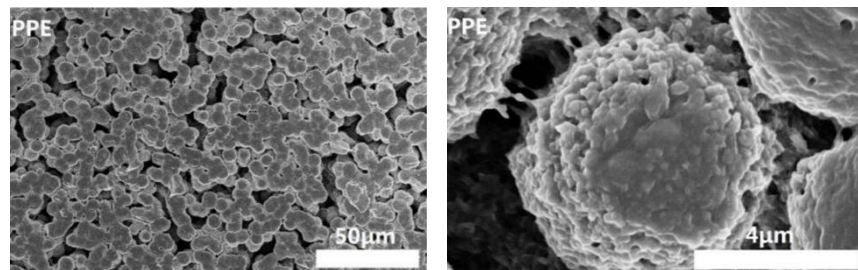
项目	拟投入资金	进展
研究、孵化、建设 <b>氧化物</b> 固态电解质中试产线及产业化生产线	0.7亿元	已出中试样品
研究和孵化 <b>聚合物、硫化物及卤化物</b> 固态电解质小试技术	0.3亿元	-
研究、孵化和建设 <b>硅碳负极</b> 材料中试及产业化生产线	0.7亿元	已出小试样品
研究、孵化或建设 <b>NCM三元或LiFePO<sub>4</sub>正极材料</b> 小试及中试产线	0.3亿元	-
研究、孵化和建设 <b>准固态或全固态</b> 电池生产制造技术	1亿元	中试线建成

- ◆ **具备原位固态化锂盐LiTFSI的规模量产能力。** 公司主营产品为电池材料及有机硅材料，电池材料包括LiTFSI、LiDFP、LiDFOB等新型锂盐，具备较高技术门槛。LiTFSI能够提升电解液的电导率，降低聚合物基体结晶度，且在聚合物中具备良好分散能力与稳定性，因此常用于原位固态化锂盐/聚合物固态电解质锂盐。国内目前形成LiTFSI规模产能的公司仅有瑞泰新材、中国船舶718所、九州化工与上海恩氟佳科技。公司LiTFSI产品10年实现规模量产，22年产能达200吨/年，为A股唯一具备LiTFSI规模产能的稀缺标的。
- ◆ **固态级LiTFSI批量用于固态电池，积极开发聚合物及凝胶电解质。** 公司19年立项固态电解质锂盐产业化开发，开发的固态级LiTFSI限定类杂质离子含量低，21年起进入固态电池客户供应链。此外公司全资子公司国泰华荣储备有多项固态电解质、固态电池用正极、固态电池相关专利，聚焦聚合物及凝胶电解质路线，开发的复合型固态电解质由具多孔结构的聚合物电解质骨架添加液态/凝胶态电解质（占聚合物骨架1-10wt%）制备，离子迁移多模式化，液态/凝胶态电解质添加量适中，兼具离子电导率和安全性能。

**表 清陶能源年产1GWh固态锂电项目正极主要材料**

正极片主要原辅材料	年消耗量 (吨)
镍钴锰酸锂	2646.03
<b>LiTFSI</b>	<b>214.10</b>
正极粘结剂PVDF	26.19
正极粘结剂PVDF (5130)	87.13
LLZTO	42.82
导电炭黑	81.13
NMP (N-甲基吡咯烷酮)	286.16

**图 国泰华荣多孔聚合物电解质膜扫描电镜图**



- ◆ **我国锆矿进口依赖度高，供给格局长期偏紧。上游供给侧**，2022年全球锆矿储量约6800万吨，主要分布在澳大利亚与南非，我国储量仅为50万吨。产量端看，2022年全球锆矿产量约140万吨，超50%集中于Iluka、力拓、特诺三家海外巨头，我国产量仅14万吨，2021年进口依赖度超九成。**下游需求侧**，锆英砂可经工艺流程处理得到硅酸锆、氯化锆、二氧化锆等锆系材料，用于陶瓷、铸造、耐火材料等，其中陶瓷材料占大头（超40%），应用可由传统建筑领域延展至航天、机械、生物、通信等新兴领域，锆制品长期需求明确。
- ◆ **未来影响锆英砂市场的主要因素**：**1) 全球供应缩减**：20年以来，海外主要矿山受品位下行、安全局势升级致部分停运等影响，供应量不断缩减，且澳洲大部分锆矿山将于26-27年进入资源枯竭期，预计锆英砂供应将持续短缺。**2) 市场需求或恢复缓慢**：房地产市场恢复若不及预期，将极大影响硅酸锆市场需求及上游锆英砂原料市场。**3) 汇率波动**：国内经济基本面加快恢复向好，人民币汇率整体呈双向波动态势，弹性不断增强。

图 22年全球锆矿储量分布

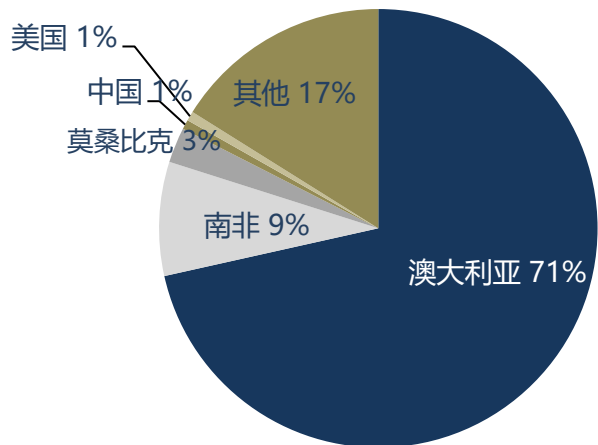
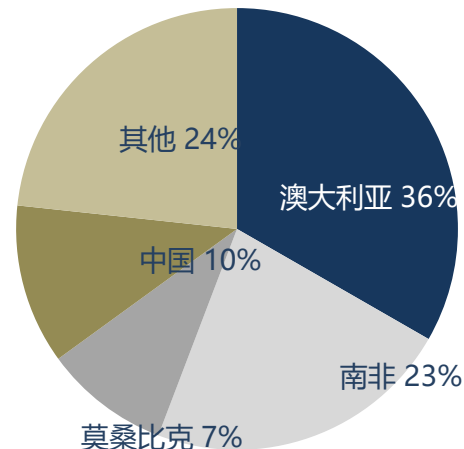


图 22年全球锆矿产量分布



- ◆ **东方锆业独家把控海外锆矿，锆英砂权益储量超400万吨，产销全面领先。** 公司一体化布局锆制品全产业链，产品涵盖上游锆英砂，中游氯化锆、电熔锆（电熔二氧化锆）、二氧化锆，下游氧化锆陶瓷结构件等九大系列一百多个品类。其中电熔锆由锆英砂电熔、研磨而成，二氧化锆由氯化锆煅烧、气流粉碎而成，二者均可用于固相法制备LLZO/LLZTO粉体，已向下游电池材料厂送样。公司为国内唯一把控海外锆矿的企业，掌握澳大利亚5处优质锆资源，锆英砂总权益储量超400万吨。产能方面，公司22年氯化锆/二氧化锆/电熔锆年产能分别为5万吨/9400吨/1.6万吨，预计分别约占国内产能的20%/40%/14%，此外楚雄年产3万吨电熔锆基地在建，预计23年电熔锆产能达2.6万吨，远期达4.6万吨。
- ◆ **三祥新材电熔锆/海绵锆全国领先，积极布局氯化锆。** 公司主营锆系制品（主）及铸改新材料（辅），同时与宁德时代等4家公司共设宁德文达镁铝，新涉足镁铝合金领域。锆产品方面，公司持续延链扩展，产品主要包括电熔锆、工业级海绵锆、氯化锆及纳米氧化锆等，其中电熔锆与海绵锆业务位居全国前列，22年电熔锆产能达2.6万吨，暂居全国第一，且公司一体化布局水电站自供能源。海绵锆主要原材料为电熔锆，公司实现原材料自给，目前年产能达3000吨。此外公司积极布局氯化锆，在建氯化锆项目规划产能一期2万吨，二期8万吨，一期预计23年投产。

图 东方锆业电熔锆/二氧化锆制备工艺及相关应用

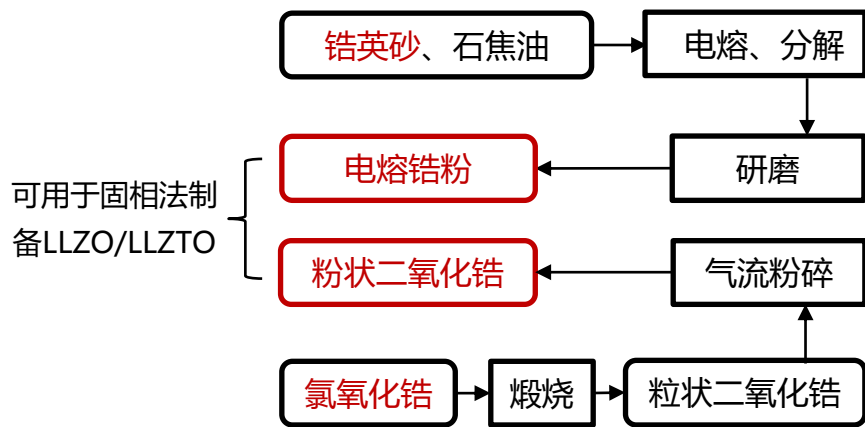


表 东方锆业、三祥新材部分锆产品产能（万吨）

东方锆业	22	23E	规划
电熔锆	1.6	2.6	4.6
二氧化锆	0.94	0.94	0.94
氯化锆	5	5	5
三祥新材	22	23E	规划
电熔锆	2.6	2.6	2.6
氯化锆	0	2	10



- ◆ **中国是全球第二大锆矿存储国，也是全球第一大锆生产国。** 2022年锆资源全球储量约8500吨，我国锆矿资源较为丰富，已探明锆矿产地约35处，保有储量高达3526吨，占全球41%，仅次于美国（占全球45%），是全球第二大锆矿存储国。同时，我国是全球第一大锆生产国，2021年锆产量为95吨，占全球锆产量68%。**全球锆生产主要特征：**1) 生产集中度较高，中国、美国和俄罗斯三国产量超全球75%；2) 中国自2004年起取代美国，成为全球最大锆生产国，近十年贡献全球68.1%的锆。
- ◆ **锆原料近期需求旺盛，价格明显走强。** 美国、英国等海外国家将锆列入战略资源，对锆矿开采较为谨慎，叠加矿山品位下降，锆原料供给偏紧。下游消费端看，锆产品主要应用于光纤/红外光学/PET催化剂/太阳能电池等领域，中国锆产品主要内销及出口至美、日等锆消费大国，目前锆下游需求表现较好，且国际市场方面，地缘冲突带给军工红外及相关锆产品的需求逐步释放，海外用户采购积极，锆价整体处于上行通道。

图 22年全球锆资源储量分布

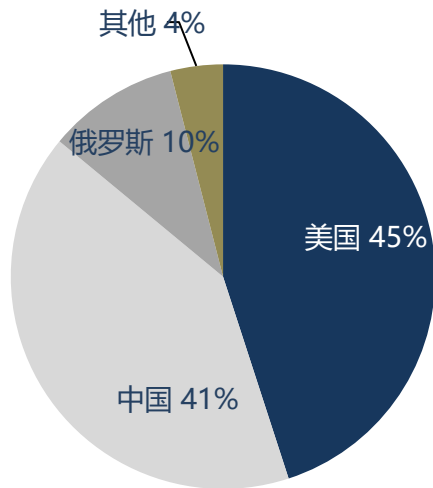
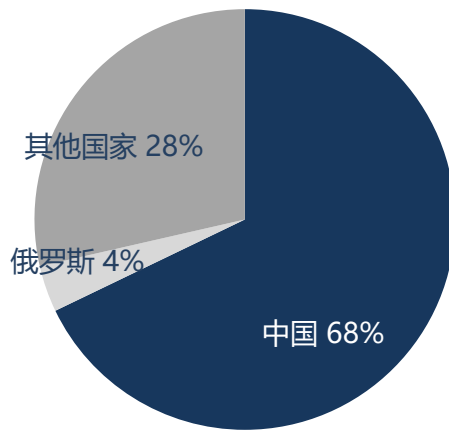


图 21年全球锆产量分布

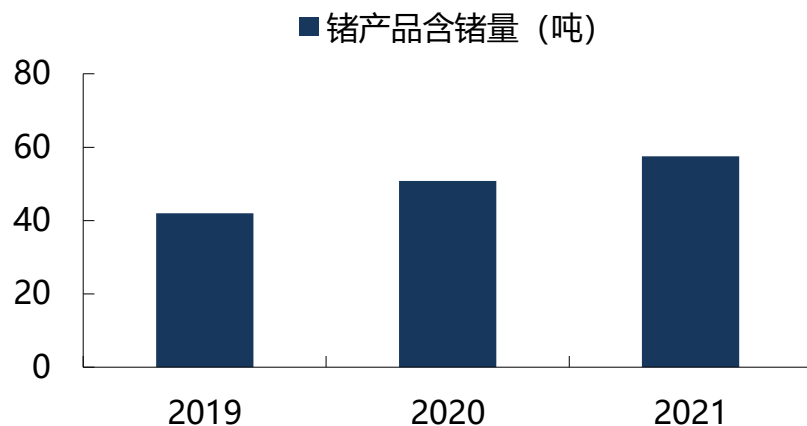


- ◆ **云南锆业把控全国超25%锆资源，拥有最完整锆产业链，锆产品产销量全国第一。** 公司为全国锆行业龙头，全产业链布局锆矿开采、火法富集、湿法提纯、区熔精炼、精深加工及研究开发，锆产品产销量全国第一。公司坐拥云南7个含锆矿山（梅子菁矿山已关停），锆金属保有量合计约897吨，占全国保有量达25%+，居全国第一，10年至21年末累计产出自有锆矿约263吨。产品方面，公司锆产品主要为材料级产品（区熔锆锭/二氧化锆等）和深加工产品（光伏级锆/红外锆/光纤级锆等），暂未涉足锂锆磷硫型硫化物固态电解质领域，公司表示将持续关注锆材料在相关领域的应用发展。
- ◆ **驰宏锌锆具备丰富铅锌伴生锆资源，锆产品含锆产量超全国52%。** 公司为全国铅锌资源龙头，主营业务为锌/铅/锆系列产品的采选、冶炼、深加工与销售，21年锌/铅/锆产品分别贡献营收的74.38%/12.28%/1.87%。锆较少独立成矿，常与铅锌伴生，公司以自有/控股方式把控多处富含锆元素的优质铅锌矿山，目前已探明的锆金属储量超600吨，约占全国保有量的17%。公司不断扩展锆深加工能力，锆产品由锆精矿/锆锭等初级产品向锆单晶/锆毛坯片/锆镜片/红外整机等高附加价值产品延展。产能方面，公司具备锆产品含锆年产能60吨，21年生产锆产品含锆量(锆单晶) 达57.48万吨，预计占国内锆金属产量的52.25%，居全国第一。

**表 云南锆业在产自有锆矿资源**

矿山名称	锆资源量/万吨	锆金属量/吨	品位
大寨锆矿	177.07	613.19	0.036%
韭菜坝煤矿	19.67	114.69	0.058%
中寨朝相煤矿	29.75	68.64	0.023%
306华军煤矿	8.35	18.88	0.023%
勐旺昌军煤矿	17.68	43.33	0.025%
勐托文强煤矿	24.07	42.51	0.018%
合计	275.9	896.89	

**图 驰宏锌锆历年生产锆产品含锆量（吨）**



- ◆ **掌握硅碳材料低成本纳米化核心工艺，一体化布局设备及前驱体。**兰溪致德成立于2018年，16年起开始硅碳负极研发，核心研发团队由硅材料、碳材料、设备开发等领域的专家共同构成，现已掌握硅碳材料低成本纳米化制备技术，获16项授权发明专利，推出ZDS01(低成本、普通首效)、ZDS02(高首效)、ZDS03(高倍率)三大系列硅碳产品。此外公司一体化布局原材料硅烷，同时自研硅碳负极设备，打破海外龙头硬件垄断，实现低成本高品质的全产业链布局。
- ◆ **产品独家媲美海外龙头，且已处于高产阶段，导入宁德时代、比亚迪等多家头部客户。**公司21年实现500吨量产，产品经海内外30+重点电池厂一年以上试用，获高度认可，已导入宁德时代、比亚迪、国轩高科、珠海冠宇、华为、OPPO等多家动力电池/3C消费电子头部客户。产品性能方面，公司为国内唯一一家能够与海外龙头日本信越化学高端7系产品抗衡且实现量产的企业，高端产品S02 0.1C容量达1400-1600mAh/g，首效达88%-90%，部分指标超越信越同类产品，低成本产品S01 0.1C容量突破2100mAh/g，技术水平国内领先。
- ◆ **远期产能规划超2.35万吨，预计23年大幅扩产。**公司硅碳负极22年产能超2000吨，在建一体化硅碳负极项目一期8000吨预计23年底投产，23年产能预计达1.15万吨，远期达2.35万吨，此外配套原材料硅烷规划产能达5000吨。

图 兰溪致德硅碳负极产品性能

型号	ZDS01	ZDS02	ZDS03
振实密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.2-1.3	1.2-1.3	≥0.75
比表面积 (m <sup>2</sup> /g)	1.7-3.3	2-3.5	1-6
首次放电比容量 0.1C/CC (mAh/g)	2100-2200	1400-1600	1350-1450
首次放电比容量 0.1C/DC (mAh/g)	1600-1700	1300-1400	1200-1300
首次效率	75%-77%	88%-90%	≥88.5%
特点	高容量 长循环 低成本	高容量 高首效	高倍率 高首效

图 兰溪致德规划产能

项目	阶段	规划产能	投产时间
锂电池硅碳负极材料项目	一期	500吨硅碳	21年7月
	二期	3000吨硅碳	预计22年下半年-23年
硅碳一体化负极材料项目	一期	8000吨硅碳+5000吨硅烷	预计23年底
	二期	12000吨硅碳	-

- ◆ **贝特瑞：硅碳负极积累深厚代际领先，氧化物电解质率先实现小批供货。** 公司硅基负极材料2006年起步，2013年通过三星SDI认证，为其供应硅碳负极，2017年切入松下-特斯拉硅氧负极供应链。第三代硅基材料已量产，第四代硅碳产品处于开发中，公司22年底拥有硅基负极产能5000吨（硅碳/硅氧各占一半），另有4万吨产能在建，预计23年底产能达到2万吨。此外公司积极研发高容量、低膨胀锂金属复合负极及氧化物/原位聚合电解质，基于微纳加工技术制备的氧化物电解质具备高电导率与高稳定性，21年实现小批量供货。
- ◆ **翔丰华：绑定清陶能源，高性能硅碳中试产品达行业龙头水平，具备产业化条件。** 公司高容量硅碳与高容量、低膨胀硅氧负极产品容量均超越450mAh/g，并已进入中试阶段。其中高容量硅碳负极（XFH-3）能量密度达到457.6mAh/g，首次效率达95.4%，领先于行业龙头贝特瑞同类产品S400。此外公司于22年与清陶能源达成战略合作，成为清陶能源负极材料优先供应商，并将在高比容负极领域联合布局。

**表 贝特瑞、翔丰华主要硅基负极产品性能**

企业	类型	产品名称	压实密度 (g/cm <sup>3</sup> )	克容量 (mAh/g)	首次效率 (%)	产品特点
贝特瑞	硅碳	S400		400-499	92-94	高容量、高倍率
		S500	0.8-1.0	500-599	90-92	
		S600		600-650	89-90	
		DXB5		445-455	≥93	
		DXB6	0.8-1.0	495-505	≥92	
	DXB8		645-655	≥91.5	高容量、高倍率、长循环	
	硅氧	DXA5-LA	0.85-1.05	445-455	≥93	高容量、低膨胀、长循环
		DXA8-LA		640-660	≥91	
翔丰华	硅碳	XFH-3	-	457.6	95.4	高容量、高首效、长循环
		SCX-1	1.65-1.75	450-460	-	高容量、高压实、高倍率
	硅氧	XS1	1.60-1.70	420-430	-	高容量、低膨胀、长循环

- ◆ **积极布局固态正极材料，21年实现批量供货。**公司在固态电池材料方面掌握多项前沿技术，开发的高镍单晶型Ni90产品测试1/3C容量达 $\geq 206\text{mAh/g}$ ，低成本高容量，循环寿命优良，适用于液态/半固态电池，21年起批量供货下游固态电池公司，预计22年底随半固态电池实现装车。此外公司同步储备全固态电池用正极材料、氧化物固态电解质（LATP、LLZO）、硫化物固态电解质制备技术。产能方面，公司22年底高镍产能达25万吨，产线可兼容固态电池用正极材料生产，具备量产能力。
- ◆ **深度绑定卫蓝新能源，获3万吨固态正极材料意向订单。**公司22年4月与卫蓝新能源达成协议，双方将在全/半固态电池和材料领域的战略、技术、产品开发、供应链等方面开展全面深度合作，同等条件下，卫蓝新能源将公司作为高镍三元正极材料第一供应商，22-25年卫蓝新能源承诺向公司采购不少于30000吨正极材料，实现与头部客户深度绑定。

**表：容百科技固态电池用正极研发项目**

项目名称	进展	目标	目前技术水平	应用
高镍单晶型Ni90	量产	开发出高分散性、高温循环、高安全性能的单晶Ni90产品 (Ni $\geq 90\%$ )	产品全电池测试1/3C容量 $\geq 206\text{mAh/g}$ ，低成本高容量，循环寿命优良	液态/半固态电池
Ni90高镍新品开发	量产	现有NCM811产品基础上能量密度提升6%，采用低钴化路线，成本降低8%	产品全电池1/3C容量 $\geq 210\text{mAh/g}$ (4.25-2.8V)，低成本高容量，循环寿命优良	液态/半固态电池
全固态电池正极材料	小试	①开发出固态电池用高镍三元正极； ②固态电解质锂离子电导率高于 $1\text{mS/cm}$ ； ③固态电池能量密度、循环性能、安全性能达国内先进水平	①固态电解质电导率超过目标，实现稳定生产； ②开发出适用于硫化物体系全固态电池的改性高镍三元材料，性能行业领先	全固态电池

- ◆ **打造固态正极+固态电解质两款战略新品，产品性能行业领先。**公司17年起与国内科研院所共建固态锂电正极材料开发平台，22年7月正式发布双相复合固态锂电正极、纳米级氧化物固态电解质两款战略新品：
  - **固态正极：**以镍93三元正极与固态电解质复合。基于独特反应模型，实现超高镍材料的高度单晶化，并原位构筑快离子导体包覆层，改善固固界面接触，抑制正极表面氧的析出，提升电池循环寿命、容量倍率和安全性能。
  - **固态电解质：**引入特殊组分设计调控锂离子通道，通过多元素靶向修饰稳定材料结构，同时开发了全流程一体化的纳米化工艺，固态电解质颗粒度减小至160nm，比表面积达30m<sup>2</sup>，更容易分散，因此离子电导率达4.8\*10<sup>-4</sup>S/cm，超同类产品。
- ◆ **头部客户资源丰富，与清陶能源、卫蓝新能源达成战略合作，获大额意向订单。**公司固态锂电材料20年率先实现批量供货，22年配套装车，已导入卫蓝、清陶、赣锋、辉能等头部大客户，于21年12月/22年7月分别与卫蓝新能源/清陶能源达成战略合作，获卫蓝新能源/清陶能源22-25年不低于2.5万吨固态锂电材料/不低于3万吨固态锂电正极材料意向订单。产能方面，公司22年底高镍产能达4.4万吨，预计23Q2达9.4万吨，8系及9系高镍材料产线适当调整后，可用于固态电池用正极材料生产。

**表：当升科技固态正极/固态电解质与竞品性能对比**

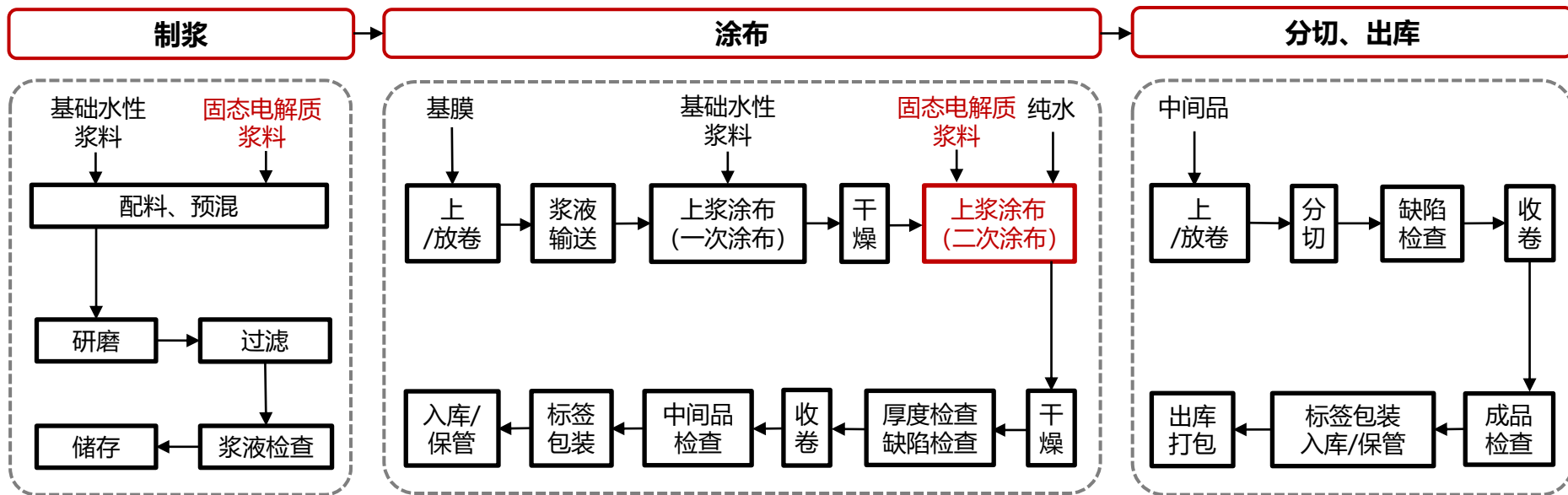
固态正极	常规93正极	当升93SS
镍含量	93mol%	93mol%
粒径	3.6um	3.5um
0.1C容量	220.5mAh/g	221.5mAh/g
0.33C容量	209.5mAh/g	210.8mAh/g
1C容量	202.4mAh/g	203.0mAh/g
固态电解质	竞品	当升固态电解质
颗粒大小	300nm	160nm
比表面积	16m <sup>2</sup> /g	30m <sup>2</sup> /g
离子电导率	1.3*10 <sup>-4</sup> S/cm	4.8*10 <sup>-4</sup> S/cm

**表：当升科技高镍正极规划产能（万吨）**

基地	22	23E	24E	规划
南通（海门）	2.4	2.4	2.4	2.4
常州（金坛）	2	7	7	7
芬兰（科特卡）	-	-	5	10
合计	4.4	9.4	14.4	19.4

- ◆ **密切跟踪产业趋势，前瞻布局固态电池。** 公司为全球湿法隔膜龙头，积极对固态电池、锂金属电池等新型电池进行针对性隔膜开发，18年成立前沿技术研究所布局半固态电池隔膜，20年半固态电解质隔膜研发项目立项，22年与中科院共设“中科恩捷柔性固体电池联合实验室”。
- ◆ **携手卫蓝新能源、天目先导共建半固态涂层隔膜项目，规划产能达6亿平米。** 公司21年与卫蓝新能源、天目先导共设合资公司江苏三合（恩捷/卫蓝/天目分别持股51%/25%/24%），实施恩捷固态电解质涂层隔膜项目，工艺采用基础水性浆料（PVDF、 $Al_2O_3$ ）/固态电解质浆料（LATP）分别进行一次/二次涂布。项目规划产能一期3.6亿平米，预计24年5月投产，二期2.4亿平米，预计26年5月投产。截止23年3月，产线已部分建成，送样多家主流电池厂，实现小批量供货。公司具备高质量基膜供应保证、专业涂布设备及涂布技术，研发基础良好，产品预计率先供货卫蓝新能源。

图 恩捷固态电解质涂层隔膜制备工艺



## PART4 投资建议



- ◆ 半固态技术先行，2023年开启小批量装车发布，全固态电池仍需5-10年实现商业化。固态电池产业链方面，第一条主线看好半固态电池技术领先厂商，推荐**宁德时代、比亚迪、亿纬锂能**，关注赣锋锂业、孚能科技、国轩高科等；第二条主线关注超高镍正极厂商，推荐**容百科技、当升科技**，关注厦钨新能；第三条主线关注进度领先的硅基负极厂商，推荐**贝特瑞**，关注翔丰华；第四条主线跟踪固态电解质厂商，关注前驱体的东方锆业、三祥新材、云南锆业、驰宏锌锗，电解质的奥克股份、上海洗霸、金龙羽、瑞泰新材。

表：公司估值表（截至2023年4月28日）

证券代码	名称	总市值 (亿元)	股价 (元)	归母净利润 (亿元)			PE			评级	总股本 (亿股)	来源
				2022	2023E	2024E	2022	2023E	2024E			
300750.SZ	宁德时代	10,149	231	307.3	464.2	632.0	33	22	16	买入	43.96	东吴
002594.SZ	比亚迪	6,925	256	166.2	283.9	360.6	45	26	21	买入	29.11	东吴
300014.SZ	亿纬锂能	1,341	66	35.1	63.5	90.7	38	21	15	买入	20.46	东吴
835185.BJ	贝特瑞	305	41	23.1	32.8	43.6	13	9	7	买入	7.37	东吴
688005.SH	容百科技	300	66	13.5	17.1	22.4	22	18	13	买入	4.51	东吴
300073.SZ	当升科技	271	54	22.6	18.9	23.3	12	14	12	买入	5.07	东吴
002460.SZ	赣锋锂业	1,232	65	205.0	158.0	175.1	6	8	7	-	20.17	Wind
002074.SZ	国轩高科	489	28	3.1	16.4	25.0	157	30	20	-	17.79	Wind
600497.SH	驰宏锌锗	277	5	6.7	20.7	23.7	41	13	12	-	50.91	Wind
688567.SH	孚能科技	261	21	-9.3	10.4	21.0	-	25	12	-	12.18	Wind
688778.SH	厦钨新能	189	63	11.2	14.9	19.7	17	13	10	-	3.01	Wind
301238.SZ	瑞泰新材	157	21	7.8	-	-	20	-	-	-	7.33	Wind
002428.SZ	云南锆业	77	12	-0.6	-	-	-	-	-	-	6.53	Wind
002882.SZ	金龙羽	64	15	2.2	-	-	-	-	-	-	4.33	Wind
002167.SZ	东方锆业	56	7	1.0	-	-	57	-	-	-	7.75	Wind
300082.SZ	奥克股份	55	8	0.1	-	-	-	-	-	-	6.80	Wind
603663.SH	三祥新材	45	15	1.5	2.2	2.8	30	21	16	-	3.02	Wind
300890.SZ	翔丰华	42	39	1.6	3.2	4.1	26	13	10	-	1.08	Wind
603200.SH	上海洗霸	35	20	0.4	1.2	1.6	82	30	22	-	1.74	Wind

## PART5 风险提示

- ◆ **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，本公司不对任何人因使用本报告中的内容所导致的损失负任何责任。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。如引用、刊发、转载，需征得东吴证券研究所同意，并注明出处为东吴证券研究所，且不得对本报告进行有悖原意的引用、删节和修改。

东吴证券投资评级标准：

公司投资评级：

买入：预期未来6个月个股涨跌幅相对大盘在15%以上；

增持：预期未来6个月个股涨跌幅相对大盘介于5%与15%之间；

中性：预期未来6个月个股涨跌幅相对大盘介于-5%与5%之间；

减持：预期未来6个月个股涨跌幅相对大盘介于-15%与-5%之间；

卖出：预期未来6个月个股涨跌幅相对大盘在-15%以下。

行业投资评级：

增持：预期未来6个月内，行业指数相对强于大盘5%以上；

中性：预期未来6个月内，行业指数相对大盘-5%与5%；

减持：预期未来6个月内，行业指数相对弱于大盘5%以上。

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