



电力设备与新能源行业研究

买入（维持评级）
行业深度研究

证券研究报告

新能源与电力设备组

分析师：姚遥（执业 S1130512080001）

yaoy@gjzq.com.cn

联系人：陆文杰

luwenjie3@gjzq.com.cn

硫化物：全固态主力路线，产业化进程提速

——固态电池深度二

投资逻辑

核心观点：基于高安全+高能量密度，固态电池为大势所趋，当前全固态电池向硫化物路线聚焦，以比能量 400Wh/kg、循环寿命 1000 次以上为性能目标，确保 2027 年实现轿车小批量装车，2030 年实现规模量产，产业就核心材料硫化物电解质、硫化锂沿着性能提升和降本上持续做技术攻关，产线从小批量迈向大批量阶段，带来明确的新技术投资机会。

高安全+高能量密度，固态电池为大势所趋。传统锂电池由于使用有机液态电解质而存在易挥发、易泄漏、易燃等问题，将易燃的有机电解液替换为不易燃的无机固态电解质能改善电池安全性，也能提升空间利用率以提升能量密度。

全固态电池向硫化物路线聚焦。相较其他路线，硫化物固态电解质最大优势在于室温下最高的电导率，兼具优异的机械性能和延展性，被视为理论上最理想的固态电解质材料。根据欧阳明高院士，当前全固态电池的技术路线聚焦以硫化物电解质为主体电解质，匹配高镍三元正极和硅碳负极的技术路线，以比能量 400Wh/kg、循环寿命 1000 次以上为性能目标，确保 2027 年实现轿车小批量装车，2030 年实现规模量产。

硫化物电解质：电化学设计、合成工艺共筑壁垒。1) 选型：硫化物电解质分多种形态，其中锂硫银锗矿结构（代表是锂磷硫氟）具备较低成本、高室温电导率、合成简单、重复性高、电化学稳定性等优势而成为主流；2) 电化学：硫化物电解质空气稳定性较差、电化学窗口较窄、界面性差，通过氧掺杂、包覆层等方案改进，电化学配方构成核心难点；3) 合成工艺：固相法更易得到离子电导率高的电解质，直接固相烧结法简单且离子电导率较高，在批量生产方面有优势；液相法更易于规模化生产，但制得电解质离子电导率偏低，且溶剂的使用对环境有污染，仍待提升改进。

硫化锂：电解质核心原材料，竞争要素核心在提纯成本。硫化锂的产品指标中纯度参数尤为关键，对硫化物电解质的制备有重要影响，主流制备工艺超 5 种以上，从纯度、安全性、经济性多方位评价不同工艺，锂硫化合工艺的产品指标最为突出，是硫化锂在产业化早期实现小批量供应的主要路线碳热还原、水合肼还原和液相法这 3 种工艺路线的综合优势（安全、纯度、经济性）较为明显，其产业化实践已进入工程验证阶段，氢氧化锂+硫化氢法也具备潜力。

格局：硫化锂格局优于电解质，路线百花齐放待收敛。硫化锂/硫化物电解质参与玩家已较多，锂电龙头企业率先构建产业矩阵，典型代表包括赣锋锂业、天齐锂业、容百科技、恩捷股份等；初创企业快速涌现，如深圳固研、广州博粤、中科固能等；半导体领域企业基于硫化物半导体领域的技术协同效应，逐步延伸至硫化锂等核心材料供应链，如杭州凯亚达、四川全固态等。硫化物预计为全固态电池后续发展的主流路线，从壁垒和格局上判断，由于涉及到电化学核心配方，当前电池厂仍在积极自研硫化物电解质，叠加布局的材料企业较多，我们判断未来竞争会相对激烈；硫化锂的壁垒相对硫化物电解质更高，电池厂自研少，当前产业未规模化，成本均较高，未来随着各路线愈发成熟，降本能力将进一步明确，路线或逐步收敛。

投资建议

当前硫化锂尚未实现规模化生产，性能为核心指标，看好具备独特工艺、产品性能突出的企业；中期看，均相还原法、碳热还原法、液相复分解法、氢氧化锂和硫化锂法均具备大规模应用潜力，建议关注相关路线的领军企业。

风险提示

量产不及预期，降本不及预期致使市场拓展不及预期，路线竞争风险。



内容目录

一、全固态电池向硫化物体系聚焦，2030 年有望初步放量	4
二、硫化物电解质：电化学设计、制备工艺共筑壁垒	7
2.1 电化学：提升电导率、空气稳定性、电化学窗口、界面性为突破重点	7
2.2 制备工艺：固相法性能更优，液相法更易于大规模量产	11
2.3 成膜工艺：关注新兴湿法骨架膜工艺、干法工艺的应用	12
2.4 规模化：沿着硫化锂降本、工艺放大迭代	13
三、硫化锂：电解质核心原材料，竞争要素核心在提纯成本	14
3.1 性能：纯度是核心指标，显著影响电解质的制备效果	14
3.2 工艺：安全&低成本为核心，碳热还原法、液相法占主流	15
四、竞争格局：路线尚未收敛，关注各路线的降本走向	19
五、投资建议	22
4.1 厦钨新能：钴酸锂领军企业，新工艺硫化锂行成独特卡位	22
4.2 上海洗霸：固态电池平台型企业，收购有研稀土硫化锂资产	22
4.3 华盛锂电：电解液添加剂领先企业，液相法硫化锂代表	23
4.4 容百科技：全球三元材料龙头，固态正极、电解质双线并行	24
4.5 恩捷股份：隔膜全球龙头，碳热还原法硫化锂代表	25
六、风险提示	25

图表目录

图表 1： 固态电池使用固态电解质替代电解液	4
图表 2： 液态、半固态、全固态电池的材料体系各不相同	4
图表 3： 聚合物、氧化物、硫化物固态电池的各有特点和优劣	5
图表 4： 聚合物、氧化物、硫化物电解质成本测算	5
图表 5： 日韩企业布局全固态电池以硫化物路线为主	5
图表 6： 硫化物固态电池 roadmap	6
图表 7： 国内企业布局全固态电池以硫化物体系居多	7
图表 8： 2030 年硫化物固态电池出货有望达 117GWh	7
图表 9： 硫化物固态电解质分多种类型，其中硫银锗矿型的综合表现更优	8
图表 10： 常用硫化物固态电解质的室温离子电导率	8
图表 11： 限制硫化物电解质实用化的技术挑战	9
图表 12： 硫化物电解质的问题及策略汇总	10
图表 13： 硫化物电解质的不同合成方法优劣	11



图表 14: 硫化物电解质成本拆分	13
图表 15: 硫化物电解质的工程化问题	13
图表 16: 硫化锂的晶体结构及主要的副反应方程式	14
图表 17: 硫化锂质量评价指标汇总	14
图表 18: 锂硫化合工艺、H ₂ S 中和工艺制备硫化锂图示	15
图表 19: H ₂ S 中和工艺制备硫化锂工艺及反应方程式	15
图表 20: 水合肼还原工艺路线制备硫化锂图示	16
图表 21: 液相复分解工艺路线图示	17
图表 22: 碳热还原法制备硫化锂粗品的制备流程	17
图表 23: 硫化锂制备工艺多维指标分析	18
图表 24: 硫化锂制备工艺路线归纳 (左); 应用于硫化锂制备的反应助剂的安全性归纳 (右)	18
图表 25: 硫化锂不同制备工艺路线的原材料成本测算	19
图表 26: 硫化锂不同主流制备工艺路线的多方面综合对比	19
图表 27: 硫化物电解质/硫化锂企业布局进展汇总	20
图表 28: 厦钨新能营业收入	22
图表 29: 厦钨新能归母净利润	22
图表 30: 上海洗霸营业收入	23
图表 31: 上海洗霸归母净利润	23
图表 32: 华盛锂电营业收入	24
图表 33: 华盛锂电归母净利润	24
图表 34: 容百科技营业收入	25
图表 35: 容百科技归母净利润	25
图表 36: 恩捷股份营业收入	25
图表 37: 恩捷股份归母净利润	25



一、全固态电池向硫化物体系聚焦，2030 年有望初步放量

具备高安全+高能量密度，固态电池为大势所趋。传统的锂离子电池由于使用可燃性的有机液态电解质而存在易挥发、易泄漏和易燃等问题，导致电池存在较大的安全隐患。交通电气化和规模化储能的快速发展对锂离子电池的安全性和能量密度提出了更高的要求，而电池能量密度的提高导致液态锂电池安全性问题更加突出，因而提高锂电池的本征安全性迫在眉睫。将易燃的有机电解液替换为不易燃的无机固态电解质不仅能有效改善锂电池的安全性和可靠性，还有助于提升电池的内部空间利用率以达到提高电池能量密度的目的，固态电池已成为锂电池的长期发展趋势。

固态电池分为半固态、全固态电池。按照固态电解质用量可将固态电池分为半固态电池、全固态电池，根据储能网，通常将电池内液体含量 10%作为区分半固态电池和液态电池的分界线，而全固态电池将完全使用固态电解质，液体含量将降为 0%。相比液态电池，全固态电池取消原有液态电解质，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，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、富锂锰基等正极，能量密度可达 500Wh/kg。

图1: 固态电池使用固态电解质替代电解液



来源：国际储能网，国金证券研究所

图2: 液态、半固态、全固态电池的材料体系各不相同

	液态	半固态	全固态
液体含量 (wt)	25%	5-10%	0%
能量密度	250Wh/kg	可达 350Wh/kg 以上	可达 500Wh/kg 以上
电解质	有机溶剂+锂盐	复合电解质(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/金属锂	硅+石墨/金属锂

来源：国际储能网，国金证券研究所

固态电解质分硫化物、氧化物、聚合物等，硫化物的最大优势在于高电导率。硫化物固态电解质硫化物固态电解质在室温下展现出最高的电导率，电化学稳定窗口宽广，同时兼具优异的机械性能和延展性，界面相容性问题较少，因此被视为理论上最理想的固态电解质材料，然而硫化物热稳定性差、热反应起始温度高以及与正极材料兼容度低等问题，仍制约着其大规模应用；聚合物电解质在加工性和界面相容性上占优，但电导率和稳定性有待提高；氧化物电解质在热稳定性和电化学窗口上表现突出，但界面接触和成本问题仍需解决。



图表3: 聚合物、氧化物、硫化物固态电池的各有特点和优劣

特性	聚合物固态电解质	氧化物固态电解质	硫化物固态电解质
离子电导率 (S/cm)	较低(10 ⁻⁶ ~10 ⁻⁴)	中(10 ⁻⁵ ~10 ⁻³)	高(10 ⁻³ ~10 ⁻²)
机械性能	柔韧性好, 易于加工	脆性大, 加工难度高	适中, 可加工性较好
界面接触	与电极接触良好, 界面阻抗低	界面阻抗较高, 需界面修饰	界面阻抗较高, 需界面修饰
化学稳定性	对锂金属稳定, 但电化学窗口窄	化学稳定性高, 电化学窗口宽	对空气和水分敏感, 化学稳定性较低
热稳定性	热稳定性较差, 高温易分解	热稳定性好, 高温下稳定	热稳定性差, 但高温下可能分解
安全性	不易燃, 安全性较好	不易燃, 安全性好	不易燃, 安全性好
成本与工艺	成本低, 易于大规模生产	成本较高, 制备工艺复杂	成本较高, 制备工艺复杂

来源:《锂离子电池固态电解质的特性及研究进展》, 国金证券研究所

硫化物全固态电池的成本较高。根据亿欧智库, 从成本角度看, 硫化物路线由于采用了价格较高的原材料, 材料成本相较对其他路线更高, 其电导率和能量密度也相对更高; 聚合物复合电解质路线的制备过程涉及复杂的合成步骤和精细的加工技术, 其制造成本相比其他路线更高; 氧化物路线材料成本和制造成本居中, 整体平衡性较好。

图表4: 聚合物、氧化物、硫化物电解质成本测算

聚合物复合电解质路线			氧化物电解质路线			硫化物电解质路线	
400-600Wh/kg			450-700Wh/kg			450-900Wh/kg	
LLZO+PEO 50-60万元/吨			LATP/LLZO/LLTO 30-40万元/吨			LPS/LPGS 200-250万元/吨	
高镍三元 16.8万元/吨	富锂锰基 16.8万元/吨	尖晶石镍锰酸锂 16.8万元/吨	高镍三元 16.8万元/吨	富锂锰基 16.8万元/吨	尖晶石镍锰酸锂 16.8万元/吨	高镍三元 16.8万元/吨	富锂锰基 16.8万元/吨
硅碳 12万元/吨	硅氧 9万元/吨	锂金属 9万元/吨	锂金属 70万元/吨			硅碳 12万元/吨	硅氧 9万元/吨
总成本: 1.9-3.5元/Wh 制造成本: 1.4-2.2元/Wh 材料成本: 0.5-1.3元/Wh			总成本: 2.8-4.6元/Wh 制造成本: 1.3-1.8元/Wh 材料成本: 1.5-2.8元/Wh			总成本: 3.7-6.2元/Wh 制造成本: 1.1-1.4元/Wh 材料成本: 2.6-4.8元/Wh	

来源: 亿欧智库, 国金证券研究所

注: 原材料价格存在较大波动幅度, 成本根据 24 年 8 月材料价格估算

当前各国全固态电池向硫化物路线聚焦。

1) 日韩: 日韩主攻硫化物技术路线, 尤其日本企业在固态电池的研发起步较早, 在固态电池领域处于技术领先地位, 截至 2024 年日本在全固态电池领域的国际专利申请数量占比达到 68%。其中丰田起步最早, 拥有全球最多的固态电池专利。

2) 欧美: 欧美车企与初创公司合作开发固态电池, 多种路线均有布局。

图表5: 日韩企业布局全固态电池以硫化物路线为主

企业	技术路线	2024 年关键进展
丰田	三元正极 硫化物 石墨负极	2024 年 9 月, 全固态电池生产计划获得日本经济产业省的认证, 2026 年开始逐步量产
本田	单晶三元 硫化物	2024 年 11 月, 首次公开自研全固态电池示范生产线, 2025 年 1 月开始试生产 将采用单晶正极, 用辊压工艺替代等静压工艺, 通过分段控制降低环境控制成本
日产	三元正极 硫化物 金属锂负极	2024 年 4 月, 公开在日本横滨建设的全固态电池试验线照片, 将于 2025 年开始生产首批全固态电池
出光兴产	硫化物固态电解质	2024 年 10 月, 开始设计固态电解质大规模中试装置, 年产能数百吨, 将在 2027~28 年实现商业化



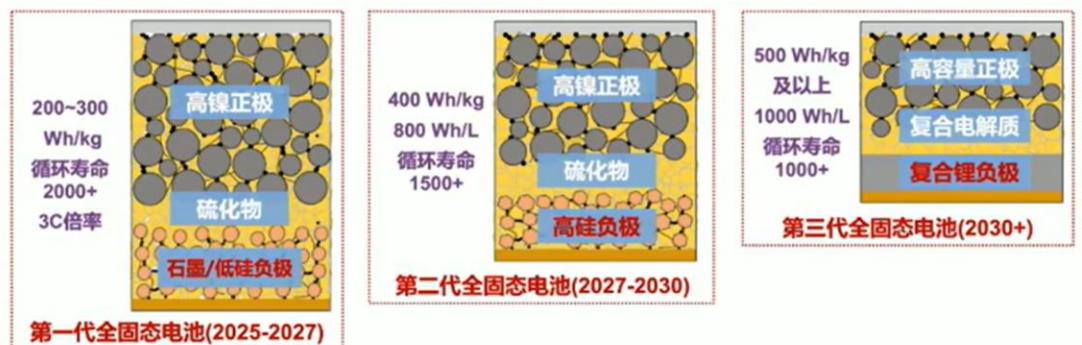
企业	技术路线	2024 年关键进展
三星 SDI	三元正极 硫化物 银碳/硅碳负极	2024 年 5 月，发布了 super-gap 固态电池技术，采用 Anode-less 设计，能量密度将达到 900Wh/L，在韩国水原市建立了试生产线，将于 2027 年开始量产
SK On	三元正极 硫化物 硅碳负极/金属锂负极	与 Solid Power 达成协议，将在研发许可、产线安装和电解质供应三方面开展合作，预计于 2025 在韩国大田市建设试生产线，并在 2030 年前至少采购 8 吨硫化物固态电解质
LG	三元正极 硫化物 硅碳负极/金属锂	原计划 2026 年量产聚合物全固态电池，调整为 2030 年量产硫化物全固态电池
Solid Power	三元正极 硫化物 硅碳负极/金属锂负极	2023 年 11 月，向宝马交付了第一批 A 样全固态电池，进入装车验证阶段 2024 年 9 月，扩大硫化物电解质生产，现有产能 30 吨/年，将扩展至 75 吨/年(2026 年)、140 吨/年(2028 年)
Quantum Scape	三元正极 氧化物 无锂负极	2024 年 5 月，开始交付固态电池原型样品，为六层软包电池；7 月，与大众旗下电池企业 PowerCo 达成合作，授权其大规模生产；10 月，开始小批量生产首批原型 B 样固态电池 (5Ah)
Factorial Energy	干法正极 硫化物 金属锂负极	2024 年 9 月，与梅赛德斯 Wh/kg 级全固态电池，工作温度可在 90°C 以上，启动 B 样测试 2024 年 12 月，发布 40AhA 样硫化物全固态电池，采用干法工艺提升能量密度

来源：25 年中国全固态电池创新发展高峰论坛欧阳明高院士发言，国金证券研究所

3) 中国：根据 2025 年 2 月 15 日第二届中国全固态电池创新发展高峰论坛上欧阳明高院士的演讲，当前全固态电池的技术路线，要聚焦以硫化物电解质为主体电解质，匹配高镍三元正极和硅碳负极的技术路线，以比能量 400Wh/公斤、循环寿命 1000 次以上为性能目标，确保 2027 年实现轿车小批量装车，2030 年实现规模量产，具体的 roadmap 为：

- 石墨/低硅负极硫化物全固态电池(2025-2027)：以 200~300Wh/kg 为目标，攻克硫化物固态电解质，打通全固态电池的技术链，三元正极和石墨/低硅负极基本不变，向长寿命大倍率方向发展。
- 高硅负极硫化物全固态电池(2027-2030)：以 400Wh/kg 和 800Wh/L 为目标，重点攻关高容量硅碳负极，三元正极和硫化物固态电解质仍为主流材料体系，面向下一代乘用车电池。
- 锂负极硫化物全固态电池(2030+)：以 500Wh/kg 和 1000Wh/L 为目标，重点攻关锂负极，逐步向复合电解质(主体电解质+补充电解质)、高电压高比容量正极发展(高镍、富锂、硫等)。

图表6：硫化物固态电池 roadmap



来源：第二届中国全固态电池创新发展高峰论坛，国金证券研究所



图表7：国内企业布局全固态电池以硫化物体系居多

公司	正极	负极	主体电解质	能量密度目标	预计产业化时间
宁德时代	高镍三元	锂金属/硅碳负极	硫化物	400Wh/kg	2027年
比亚迪	高镍三元	硅碳负极	卤化物/硫化物	400Wh/kg	2027年
一汽	高镍三元	硅碳负极	硫化物	400Wh/kg	2027年
卫蓝新能源	高镍三元	硅碳负极	聚合物/氧化物/硫化物	400Wh/kg	2027年
国轩高科	高镍三元	硅碳负极	硫化物	350Wh/kg	2027-2030年
上汽/清陶能源	锰基正极	锂金属/硅碳负极	聚合物/氧化物/卤化物	400Wh/kg	2026年
亿纬锂能	高镍三元	硅碳负极	硫化物/卤化物/聚合物	400Wh/kg	2028年
吉利	高镍三元	硅碳负极	聚合物/硫化物	400Wh/kg	2027年
中创新航	高镍三元	硅碳负极	硫化物	430Wh/kg	2027-2028年
孚能科技	高镍三元	硅碳负极	硫化物	400Wh/kg	2032年
恩力动力	高镍三元	锂金属负极	硫化物	400Wh/kg	2026年
上海屹锂	高镍三元	锂金属/硅碳负极	硫化物	450Wh/kg	2026年
赛科动力	高镍三元	硅碳负极	硫化物	400Wh/kg	2027-2028年
高能时代	高镍三元	硅碳负极/石墨负极	硫化物	220/420Wh/kg	/
潍柴动力	高镍三元	硅碳负极	硫化物	400Wh/kg	2027年
长安汽车	高镍三元	硅碳负极	硫化物	400Wh/kg	2027年

来源：25年中国全固态电池创新发展高峰论坛欧阳明高院士发言，国金证券研究所

全固态电池有望2030年开始放量，硫化物路线预计构成主流，测算2030年硫化物固态电池出货有望达117GWh，若价格假设在1-1.5元/Wh，对应市场空间在1170-1755亿元。核心假设：

1) 固态电池出货量：根据EV Tank，2024年全球固态电池出货量达到5.3GWh，同比大幅增长4.3倍，全部为半固态电池，预计全固态电池将在2027年实现小规模量产，到2030年将实现较大规模的出货，根据EV Tank，2030年全球固态电池出货量预计达614.1GWh，我们假设全固态的比例将接近30%，约180GWh；

2) 硫化物比例：EVTank在白皮书中指出，2024年中国聚合物和氧化物电解质出货量占比超过98%，预计随着全固态电池的逐步产业化，硫化物电解质的出货量占比会逐步提升。我们预计到2030年，在全固态电池电解质中，硫化物电解质的市场份额达到65%。

根据锂电动态，1GWh的LPSC（锂磷硫氯硫化物）全固态电池约合消耗400-450吨LPSC固态电解质，每吨LPSC固态电解质平均消耗400~450公斤的硫化锂粉体，按117GWh出货，对应电解质需求约5万吨，对应硫化锂需求2万多吨。

图表8：2030年硫化物固态电池出货有望达117GWh

	具体测算
2030年全固态电池出货（GWh）	180
全固态电池占比	29%
硫化物电解质渗透率（全固态内部）	65%
2030年硫化物固态电池出货量（GWh）	117
2030年硫化物电解质需求（万吨）	约4.7-5.3万吨
2030年硫化锂需求（万吨）	约1.9-2.4万吨

来源：EV Tank，懂车帝，锂电动态，国金证券研究所

二、硫化物电解质：电化学设计、制备工艺共筑壁垒

2.1 电化学：提升电导率、空气稳定性、电化学窗口、界面性为突破重点

硫化物电解质分多种形态。是通过硫取代氧化物电解质中的氧衍生而来，与O²⁻相比，S²⁻的电负性小，对Li⁺的束缚较弱，有利于降低Li⁺扩散势垒。同时S²⁻的离子半径较大，能在结构中形成较大的Li⁺传输通道，从而有利于Li⁺的传导。因此，硫化物电解质具有更



高的离子电导率，部分材料的离子电导率达到甚至超过液态电解质。根据硫化物电解质的结晶状态可细分为玻璃型、玻璃-陶瓷型、硫代锂超离子导体型（Thio-LISICON）、硫银锗矿型（Argyrodite）等、锂锗磷硫型（LGPS）等，后三者也称为晶态电解质。

与玻璃态和玻璃-陶瓷电解质相比，晶态电解质的种类最多，研究最为广泛，其展现出的离子电导率也最高（ 10^{-2} S/cm）。2011年 Kanno 报道的 $\text{Li}_{10}\text{GeP}_2\text{S}_{12}$ (LGPS) 固态电解质，室温离子电导率达到 1.2×10^{-2} S/cm，与液态电解液相当，但是由于金属 Ge 的使用，LGPS 的成本居高不下，严重阻碍其实际应用。相比之下，锂硫银锗矿结构的硫化物电解质因其相对较低的成本、高室温电导率（ 10^{-2} S/cm）、合成简单、重复性高、电化学稳定性相对其他硫化物较好等优点而成为研究主流。

图表9：硫化物固态电解质分多种类型，其中硫银锗矿型的综合表现更优

硫化物固态电解质	化学式	优势	劣势	离子电导率 / (S/cm)
玻璃型	$x\text{Li}_2\text{S}-(100-x)\text{P}_2\text{S}_5$	合成过程简单	制备成本高，离子电导率低，化学稳定性差	$10^{-4} \sim 10^{-3}$
玻璃-陶瓷型	$\text{Li}_x\text{PS}_y(\text{Li}_7\text{P}_3\text{S}_{11}, \text{Li}_3\text{PS}_4)$	电阻低，热稳定性好	合成难度大	$10^{-4} \sim 10^{-2}$
硫代-锂快离子导体型 (Thio-LISICON)	$\text{Li}_x\text{M}_y\text{M}'_z\text{S}_4$ (M=Si, Ge or Sn, M'=P, Zn or Sb)	热稳定性好，电化学稳定性窗口宽	离子电导率低	$10^{-4} \sim 10^{-3}$
硫银锗矿型 (Argyrodite)	$\text{Li}_7\text{PS}_6/\text{Li}_6\text{PS}_5\text{X}$ (X=Cl, Br or I)	离子电导率高，电化学稳定性优异	空气敏感，电化学稳定性窗口窄	$10^{-3} \sim 10^{-2}$
锂锗磷硫型 (LGPS)	$\text{Li}_{1-x}\text{M}_2\text{-x}\text{P}_{1+x}\text{S}_{12}$ (M=Ge, Sn or Si)	离子电导率高	空气敏感，成本高，对锂负极敏感	$10^{-3} \sim 10^{-2}$

来源：《实用化硫化物固态电解质的研究进展与挑战》，国金证券研究所

图表10：常用硫化物固态电解质的室温离子电导率

电解质	结晶形态	25 °C 离子电导率 / $\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$
$60\text{Li}_2\text{S} \cdot 40\text{P}_2\text{S}_5$	玻璃态	3.2×10^{-6}
$80\text{Li}_2\text{S} \cdot 20\text{P}_2\text{S}_5$	玻璃态	1.3×10^{-4}
$40\text{Li}_2\text{S} \cdot 28\text{SiS}_2 \cdot 30\text{LiI}$	玻璃陶瓷态	1.8×10^{-3}
$\text{Li}_7\text{P}_{2.9}\text{Mn}_{0.1}\text{S}_{10.7}\text{I}_{0.3}$	玻璃陶瓷态	5.6×10^{-3}
$\text{Li}_{10}\text{GeP}_2\text{S}_{12}$	晶态	1.2×10^{-2}
$\text{Li}_{10}\text{SiP}_2\text{S}_{12}$	晶态	2.3×10^{-3}
$\text{Li}_6\text{PS}_5\text{Cl}$	晶态	1.9×10^{-3}
$\text{Li}_7\text{Ge}_3\text{PS}_{12}$	晶态	1.1×10^{-4}
$\text{Li}_{6.6}\text{P}_{0.4}\text{Ge}_{0.6}\text{S}_5\text{I}$	晶态	5.4×10^{-3}
$\beta\text{-Li}_3\text{PS}_4\text{-Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$	晶态	2.4×10^{-4}

来源：《全国态锂离子电池用硫化物电解质研究进展》，国金证券研究所

尽管硫化物电解质的离子电导率可以与液态电解质相媲美甚至更高，但硫化物电解质自身仍存在性能缺点，同时工程化难度较大。

硫化物电解质自身有三个性能缺点待改进：

(1) 空气稳定性较差。软硬酸碱理论是指硬酸与硬碱更易反应，软酸和软碱优先反应。由于 H_2O 中的 O^{2-} 比硫化物电解质中的 S^{2-} 碱性更强，因此在潮湿的空气下，硫化物电解质的中心原子 P^{5+} 更易与 O^{2-} 结合，进而导致 S^{2-} 与 H^+ 结合产生有毒的 H_2S 气体，造成材料空气稳定性衰减，带来安全隐患。

(2) 电化学窗口较窄。性能不佳的固态电解质在高电压下会发生分解，产生较高的界面阻抗，引起电池极化。业界普遍认为硫化物电解质的电化学窗口为 $1.6 \sim 2.3\text{V}$ (vs Li^+/Li)，



难以与常用的正负极材料形成热力学稳定的界面。

(3) 界面性差。硫化物电解质/电极界面问题包括空间电荷层、界面副反应、固固界面接触差、锂枝晶生长和体积膨胀等：

- 空间电荷层：硫化物电解质和正极材料内部存在 Li⁺浓度差，这驱动了空间电荷层的产生，导致界面阻抗增加，影响电池寿命。
- 界面副反应：硫化物电解质和电极材料间的化学/电化学不相容会在界面产生不可逆的副反应，形成高电子电导率、低离子电导率的复杂界面相，阻碍 Li⁺在界面的快速运输。
- 固固界面接触差：电极/硫化物电解质界面刚性接触会减少 Li⁺的有效接触区域，限制 Li⁺的跨界面迁移。在电池循环过程中，刚性接触难以容纳活性材料的体积变化，导致局部应力分布不均匀，最终发展为复杂的化学—力学耦合失效。
- 锂枝晶生长：硫化物电解质与金属锂负极界面的不均匀锂沉积/剥离过程会导致锂枝晶的成核和生长，进而穿透电解质层，造成电池短路。

图表11：限制硫化物电解质实用化的技术挑战

限制硫化物电解质实用化的技术挑战	具体描述
化学稳定性较差	在潮湿的空气下，硫化物电解质的中心原子 P5+更易与 O2-结合，进而导致 S2-与 H+结合产生有毒的 H2S 气体，造成材料空气稳定性衰减，带来安全隐患
电化学窗口较窄	性能不佳的固态电解质在高电压下会发生分解，产生较高的界面阻抗，引起电池极化
界面性差	硫化物电解质/电极界面问题包括空间电荷层、界面副反应、固固界面接触差、锂枝晶生长和体积膨胀等

来源：《实用化硫化物固态电解质的研究进展与挑战》，国金证券研究所

➢ 改善硫化物电解质的空气稳定性的策略包括有：

(1) 物理吸附法。如在硫化物电解质中添加金属氧化物、金属硫化物、沸石或卤化锂等材料充当 H₂S 气体的吸收剂或催化，从而抑制 H₂S 气体的释放或将其催化分解。如：将 LiI 掺杂到 Li₃PS₄ 材料中，之后转移至潮湿空气中放置，后续并未检测到 H₂S，这是由于 Li₄PS₄I 暴露在潮湿空气后首先会生成 LiI·H₂O，并且 LiI·H₂O 会在 H₂O 分子和 Li₃PS₄ 材料的 PS₄⁻单元间形成有效屏障，从而抑制 H₂S 的生成和释放。但添加这些离子绝缘的材料会在一定程度上影响 Li⁺传输，导致硫化物电解质的离子电导率显著降低，且无法从根本上改善硫化物电解质的稳定性。

(2) 基于软硬酸碱理论的元素掺杂改性。如将氧元素、卤素等阴离子，较软的 Sn⁴⁺、Cu⁺、Sc³⁺等阳离子进行单一元素掺杂或阴阳离子共掺杂策略。Gong 等系统考察了 SnO₂、GeO₂、SiO₂ 的掺杂效果，结果发现，阳离子倾向于取代 Li₇P₃S₁₁ 型电解质中的 P 位，这有利于拓宽 Li⁺传输通道，提升材料离子电导率；阴离子则会部分取代 S 位，从而显著提升材料的电化学稳定性和界面稳定性。

(3) 表面包覆。由于硫化物电解质与水之间的反应首先发生在硫化物电解质颗粒表面，因此构建惰性表面或涂层可以有效抑制 H₂O 甚至有机溶剂对硫化物电解质的化学侵蚀，提高其空气稳定性。然而，大多数包覆层材料的离子传导能力较差，通常会在一定程度上牺牲硫化物电解质的离子电导率。

➢ 改善电化学窗口窄的策略包括有：

(1) 由于硫化物电解质自身分解反应不受控，因此可以对硫化物电解质材料表面进行优化。如在硫化物电解质表面添加包覆缓冲层，能够有效提高电化学窗口。

(2) 通过对硫化物电解质分解产物进行设计，获得与锂兼容且电子绝缘的钝化膜，从而抑制硫化物电解质的持续分解。研究人员通过引入阳离子或阴离子如 Ge、Si、或 O 等来拓宽材料的电化学窗口。

(3) 硫化物电解质组成和结构调控。如设计核壳结构、调控元素配比等方法。

➢ 界面性差的问题包括了和正极、负极的界面反应问题，对应问题和改善策略包括有：

针对正极侧：锂离子电池正极材料多为氧化物材料，而 Li⁺在硫化物电解质与氧化物材料中存在较大化学势差，导致 Li⁺在充放电时会从硫化物电解质向氧化物正极侧迁移，从而形成空间电荷层效应，影响电池寿命。硫化物电解质较窄的电化学窗口使其在低电位下即被氧化。因此在充放电时硫化物电解质/正极存在严重的界面副反应，导致阻抗急剧增加。



此外，正极材料和电解质之间为刚性接触，正极材料在脱嵌锂时存在体积效应，从而造成机械失效，电池性能恶化。改善硫化物电解质/正极界面性质的策略包括：

(1) 构建缓冲层包覆在正极材料表面。正极材料表面设计包覆层可以避免氧化物正极材料与硫化物电解质材料的直接接触，抑制二者间界面副反应的发生，减缓材料结构破坏和容量衰退。常见的包覆层材料包括含锂氧化物或快离子导体 Li_2ZrO_3 、 LiNbO_3 或卤化物等材料。

(2) 设计新型硫化物正极材料。硫化物正极材料能够避免与硫化物电解质之间空间电荷层的形成和元素互相扩散，消除异质成分间的界面副反应。

(3) 材料特殊结构设计。通过特殊工艺将正极材料与固态电解质设计成一体化结构，从而形成稳定的正极/电解质接触面，减小界面电阻，提高全固态电池的电化学性能。

针对负极侧：当硫化物电解质与金属锂接触后会发生界面副反应，引起锂的不可逆消耗和不均匀沉积，导致锂枝晶的生长，锂枝晶极易从电解质层的微裂纹中穿透造成电池短路。另一方面，硫化物电解质会发生局部分解，分解产物如 Li_3P 等物质的离子传输能力较差，会使 Li^+ 在界面传输的势垒增大，从而削弱电池的整体性能。改善硫化物电解质/锂负极的界面性质的策略有。

(1) 对硫化物电解质进行物理/化学修饰。常见的修饰方法是对硫化物电解质进行元素掺杂改性，掺杂元素包括 Mn 、 Fe 、 Mo 等金属元素，以及 O 、 Cl 、 I 等非金属元素。元素掺杂可有效调节硫化物电解质组成，改变材料内部能带结构，从而增强结构稳定性，提高氧化还原能垒，避免界面副反应的发生。

(2) 对金属锂负极改性以降低反应活性。将化学性质不活泼的金属与锂金属合金化制成 Li-X ($\text{X}=\text{In}$ 、 Sn 或 Al 等) 二元合金或 Li-X-Y ($\text{X}=\text{In}$ 、 Sn 等， $\text{Y}=\text{Mg}$ 、 Ag 等) 多元合金，以提高锂负极的稳定性，降低锂负极的还原性，减少与硫化物电解质之间的界面副反应。在锂合金材料中， Li-In 合金具有对硫化物电解质较好的界面相容性、良好的重复性等优势。

(3) 在电解质/负极界面设计人工固体电解质界面膜 (SEI 膜)。通过原位/非原位的方法在界面处引入 SEI 膜，不仅可以隔绝电子，保障 Li^+ 传输通畅，还能避免电极/电解质接触，防止锂枝晶的穿透和电解质机械失效。人工 SEI 膜需要具有高离子电导率、电子绝缘性、良好的机械强度和电化学稳定性，其构建方法包括化学气相沉积、电化学沉积等。

图表12: 硫化物电解质的问题及策略汇总

问题	改善策略	具体描述
空气稳定性差，易和水反应	物理吸附法	在硫化物电解质中添加金属氧化物、金属硫化物、沸石或卤化锂等材料充当 H_2S 气体的吸收剂或催化，从而抑制 H_2S 气体的释放或将其催化分解
	元素掺杂改性	将氧元素、卤素等阴离子，较软的 Sn^{4+} 、 Cu^+ 、 Sc^{3+} 等阳离子进行单一元素掺杂或阴阳离子共掺杂策略。
	表面包覆	由于硫化物电解质与水之间的反应首先发生在硫化物电解质颗粒表面，因此构建惰性表面或涂层可以有效抑制 H_2O 甚至有机溶剂对硫化物电解质的化学侵蚀，提高其空气稳定性
电化学窗口窄，高压易分解	优化硫化物电解质材料表面	在硫化物电解质表面添加包覆缓冲层
	设计硫化物电解质分解产物	引入阳离子或阴离子如 Ge 、 Si 、或 O 等
	调控硫化物电解质组成和结构	设计核壳结构、调控元素配比
界面性差 (正极)，硫化物电解质/正极存在严重的界面副反应，导致阻抗急剧增加	构建缓冲层包覆在正极材料表面	常见的包覆层材料包括含锂氧化物或快离子导体 Li_2ZrO_3 、 LiNbO_3 或卤化物等材料
	设计新型硫化物正极材料	硫化物正极材料能够避免与硫化物电解质之间空间电荷层的形成和元素互相扩散，消除异质成分间的界面副反应
	材料特殊结构设计	通过特殊工艺将正极材料与固态电解质设计成一体化结构，从而形成稳



定的正极/电解质接触面，减小界面电阻

界面性差（负极），硫化物电解质与金属锂接触后会发生界面副反应	对硫化物电解质进行物理/化学修饰	对硫化物电解质进行元素掺杂改性，掺杂元素包括 Mn、Fe、Mo 等金属元素，以及 O、Cl、I 等非金属元素
	对金属锂负极改性以降低反应活性	将化学性质不活泼的金属与锂金属合金化制成 Li-X (X=In、Sn 或 Al 等) 二元合金或 Li-X-Y (X=In、Sn 等, Y=Mg、Ag 等) 多元合金，以提高锂负极的稳定性，降低锂负极的还原性
	在电解质/负极界面设计人工固体电解质界面膜 (SEI 膜)	通过原位/非原位的方法在界面处引入 SEI 膜，不仅可以隔绝电子，保障 Li ⁺ 传输通畅，还能避免电极/电解质接触，防止锂枝晶的穿透和电解质机械失效

来源：《实用硫化物固态电解质的研究进展与挑战》，国金证券研究所

2.2 制备工艺：固相法性能更优，液相法更易于大规模量产

固相法的制备性能更优，液相法更易于大规模量产。目前常用的合成 Li₆PS₅X (X=Cl, Br, I) 电解质的方法主要有固相法和液相法两种。固相法更易得到离子电导率更高的电解质材料，但其原料混合均匀性较差；在三种固相法中，直接固相烧结法工艺比较简单，且离子电导率也较高，在批量生产方面具有一定优势；液相法更易于规模化生产，但该方法得到的电解质离子电导率偏低，且溶剂的使用导致其对环境有一定污染。

(1) 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三种，简单固相烧结法具备较大应用前景：

- 高能机械球磨法：一致性较差限制规模化应用。是把 LiX (X=Cl, Br)、Li₂S、P₂S₅ 等各种原材料密封在球磨罐内，采用高速球磨提供机械能将原材料的化学键断裂，使材料在原子级别混合反应，同时球磨珠之间以及与球磨罐内壁之间在高速旋转和碰撞过程中会产生热量，最终形成 Li₆PS₅X (X=Cl, Br, I) 电解质的制备方法。相比其他制备方法，高能机械球磨法耗时耗能，且制备的材料一致性较差，这些都限制其大规模实用化。
- 球磨-烧结联用法：成本较高限制规模化应用。将原材料经高能球磨过程后，压片烧结得到最终电解质的方法。由于高能球磨得到的产物含有大量的无定形相存在，导致材料的结晶性较差，经过烧结处理提高制备的材料中晶相电解质含量，一般能得到室温离子电导率超过 10⁻³ S/cm 的锂硫银锗矿电解质。为保证材料的均匀性，前期的高能机械球磨过程需要手动混合物料，导致这种合成方法成本较高且难以大规模制备而限制了其应用。
- 简单固相烧结法：具备较大前景的方案。是将原材料均匀混合后直接烧结得到最终电解质的制备方法。为了保证材料混合的均匀性，前期的原材料混合可采用低速球磨的方法。该方法能克服高能机械球磨带来的能耗、沾壁及一致性问题，有望降低合成成本，推动锂硫银锗矿固态电解质规模化制备。

(2) 液相法：液相法在电解质合成方面有诸多优势，如更低的烧结温度，更短的合成时间，适合放大等，其在固态电池制作方面也有较大前景。由于电解质可溶于或者分散在有机溶剂中，因此可以将电解质粉末和正极材料同时加入到溶剂中混合均匀，采用传统锂离子电池的涂布工艺来实现大批量制备复合正极极片。由于合成过程中有机溶剂难除尽，烧结过程容易导致电解质材料表面残余碳导致电子电导率提升，残存的物质还影响电解质的离子电导率，综合性能有待提升。液相法合成锂硫银锗矿固态电解质一般分为两种途径：悬浮液法和溶解-沉积法：

- 悬浮液法：将合成锂硫银锗矿电解质原材料(主要为 Li₂S、P₂S₅、LiCl、LiBr、LiI 等)分散在不溶性的有机溶剂中，通过机械搅拌使其均匀混合，随后采用热处理除去有机溶剂，并通过烧结得到最终产物。
- 溶解-沉积法：将固相法合成的电解质或前驱体材料溶解在可溶性的有机溶剂中，形成稳定均匀的混合溶液，最后经过热处理去除溶剂，并进行简单烧结得到所需电解质。目前，用于合成锂硫银锗矿固态电解质的有机溶剂主要有无水乙醇、四氢呋喃 (THF)，乙酸乙酯 (EA) 和无水乙腈 (ACN) 等，其中最常见的是无水乙醇和四氢呋喃。

图表13：硫化物电解质的不同合成方法优劣

合成方法	一致性	工艺过程	离子电导率	环保性
机械球磨法	较差	复杂	<10 ⁻³ S/cm	环保



合成方法	一致性	工艺过程	离子电导率	环保性
球磨-烧结联用法	较差	复杂	$>10^{-3}$ S/cm	环保
简单固相烧结法	较差	简单	$>10^{-3}$ S/cm	环保
液相法	较好	复杂	$<10^{-4}$ S/cm	不环保

来源：《锂硫银锗矿固态电解质研究进展》，国金证券研究所

2.3 成膜工艺：关注新兴湿法骨架膜工艺、干法工艺的应用

固态电解质一般为电解质膜。为提高固态电池的能量密度，提高有效活性物质的含量，降低电池内部电解质等不能贡献容量的部分含量也至关重要。考虑将固态电池组装工艺与当前商业化液态电池工艺相结合能简化制备工艺和降低成本，需要将固态电解质设计成类似隔膜的结构。

硫化物固态电解质膜的典型制备方法包括湿法和干法，其中湿法是一种更为普遍的薄膜生产技术，干法是新兴工艺。

(1) 湿法：湿法制备固态电解质膜主要是利用溶剂、粘结剂、电解质配成均匀溶液，再将溶剂蒸干得到电解质膜的一种方法。在湿法过程中，由于硫化物的特殊化学性质，与强极性溶剂混合时会发生分解或导致离子电导率降低，因此需要选择低极性或非极性溶剂。然而，这些溶剂将限制聚合物粘结剂的选择，常用的聚合物粘结剂在这些溶剂中溶解性不佳，影响薄膜机械强度。同时聚合物粘结剂会包裹硫化物颗粒，这种结构会影响固态电解质薄膜的离子电导率。在制备过程中需要兼顾薄膜高电导率和高机械强度。湿法步骤一般包括制浆、成膜、烘干和致密化。根据成膜方式可以分为流延法、渗透法等。

- 流延法：大规模制备电解质薄膜的有效方法，具有显著的优势，包括均匀的制备以及精确控制薄膜厚度。主要步骤包括：(1) 将粘结剂和电解质先后溶解在溶剂中形成浆料，调整浆料粘度，将其均匀地浇铸在基材上，(3) 干燥固化后或去掉基材，(4) 对薄膜进行冲切、层合等后处理。最后，成功获得超薄固态电解质膜。流延法能够制备超薄薄膜，提高离子电导率的同时，也为制备多层结构、性能良好的固态电解质提供了条件，并具备大规模生产的能力。为了进一步提高固态电解质膜的室温离子电导率，未来的研究侧重于开发新的聚合物粘接剂和探索新的溶剂体系。
- 渗透法：应用骨架膜，是后续具备潜力的新方案。在流延法中，固体颗粒通常被粘结剂包裹阻碍离子传导，为了构建离子传输的连续路径，将浆料浇筑在多孔支架上，提供有利的多孔通道和机械强度。多孔支架通常可以选择聚合物骨架或其他材质骨架，聚合物骨架通常有两种选择，一种是静电纺丝技术制成的三维网络，另一种是商用的非织造布。

除了将硫化物浆料渗透到聚合物粘结剂或其他材质形成三维网络中之外，还可以将聚合物渗透到三维硫化物骨架中。具体的制备过程包括将聚合物单体渗透到三维硫化物骨架中，然后进行原位聚合，形成独立的硫化物/聚合物复合膜。渗透法不仅可以得到超薄的固态电解质膜，通过将浆料直接涂覆在正极上，可以得到电解质层厚度更小的正极薄膜，实现正极支撑的固体电解质薄膜。该方法不但可以改善正极和电解质接触，降低界面阻抗，还可以有效降低复合正极的孔隙率，有效提高固态电池的能量密度，而且有可能与现有的传统液态锂离子电池电极的工业生产线相结合，实现大规模生产。

(2) 干法：也称为无溶剂法，是为了克服在浆料工艺中加入有机溶剂可能带来的不利影响而提出的一种新的加工技术。通常将固态电解质粉末与少量粘结剂混合后，通过不同的成型方式制成薄膜。因为其能耗较低、粘结剂用量少，硫化物电解质膜电导率高等优点。

干法工艺主要采用粘结剂原纤化技术。该技术最初源于 Maxwell Tech Co. 开发的超级电容器制造技术。原纤化指将纤维分解为更细原纤的过程，通过研磨、拉伸、剪切等机械力作用，使纤维轴向分裂成直径数微米的原纤，成为互相联结的原纤化细丝。粘结剂原纤化法使用具有良好塑性的可变形粘结剂原纤化后提供均匀网络，连接目标颗粒。首先，将粘结剂和固态电解质材料通过低速搅拌初步混合均匀，接着通过特定设备施加机械力(剪切、拉伸、研磨等)，使粘结剂分子链在外力作用下发生定向排列并形成纤维结构。最后，将原纤化后的原料通过辊压等成形方式制成薄膜，使粘结剂纤维结构固定。对于热固性粘结剂，可能需要加热固化以形成交联网络，进一步稳定纤维形态并增强力学性能。

干法制备具备多个优势。(1) 成本更低；(2) 有利于制备更厚的电极、更薄的电解质膜，提高电池的能量密度；(3) 保持硫化物电解质的结构完整；(4) 粘结剂使用更少。该方法的核心挑战在于精准控制纤维的尺寸、分布和取向，避免过度处理导致的粘结剂降解或纤



维断裂。

2.4 规模化：沿着硫化锂降本、工艺放大迭代

硫化物电解质的工程化包括四个难点：

(1) 硫化锂规模化难度大、成本高。硫化物电解质所用的原料 Li₂S 合成难度大，纯度要求高，产量较低，成本居高不下。目前 Li₂S 的主要合成方法是高温还原法，该方法原料廉价易得，工艺简单，但需要高温高压的反应条件，工况不易控制，设备选型困难，安全性差；反应过程中还会产生大量副产物 Li₂O，导致产品产率和纯度较低，影响硫化物电解质的性能和规模化制备。因此实现原材料 Li₂S 的低成本、高品质、大规模生产是硫化物电解质商业化发展过程中必须要解决的难题。

以 Li₆PS₅Cl 粗粉电解质体系为例的实证分析显示，硫化锂在材料体系中质量占比达 43%，而当前公斤级市场报价波动于 5000~10000 元区间。基于吨级 Li₆PS₅Cl 产线的成本敏感性分析，硫化锂的原料成本构成比高达 82%，为核心成本项，硫化锂成相后的二次加工、运输以及存储等环节均需构建严格的水氧隔绝体系，成本同样较高。

图表14：硫化物电解质成本拆分



来源：《硫化锂：全固态电池时代的“基石”材料》，国金证券研究所

(2) 环境要求高。硫化物电解质自身及所用的 Li₂S、P₂S₅ 等原料空气稳定性较差，全程需要惰性气氛或真空环境保护，避免水或氧气的侵蚀，制备时产生的有毒 H₂S 需进行回收处理，防止泄漏导致安全风险。

(3) 工艺制造难度大。硫化物电解质合成方法均存在工艺复杂、耗时耗能、环境要求高的问题。固相法需长时间球磨混合及烧结，全程要求无水无氧，对设备要求高，耗时耗能，成本极高。液相法需要使用有机溶剂将原料溶解混合，全程要进行长时间加热搅拌、固液分离及热处理，不仅制备周期长，引入的有机溶剂也难以去除。这两种合成工艺与现有的锂电池产线难以兼容，为满足硫化物全固态电池的制备需求，新型设备的研发和制造显得尤为紧迫。

(4) 硫化物电解质工艺一致性要求更高，工艺放大难度高。从目前多家企业的产品来看，硫化物电解质之间的批次性较差，这不仅导致硫化物电解质与电极界面兼容性变差，影响电池的倍率性能和循环寿命；还会导致硫化物电解质的电化学性能不稳定，影响电池充放电效率和能量密度。因此硫化物电解质制备过程中需要具备强大的工程能力和制造经验，精准地控制每一步工艺条件，以确保材料生产中的批次一致性。

图表15：硫化物电解质的工程化问题

硫化物电解质的工程化问题	具体描述
关键原料产量小	硫化物电解质所用的原料 Li ₂ S 合成难度大，纯度要求高，产量较低，成本居高不下
环境要求高	硫化物电解质自身及所用的 Li ₂ S、P ₂ S ₅ 等原料空气稳定性较差，全程需要惰性气氛或真空环境保护，避免水或氧气的侵蚀，制备时产生的有毒 H ₂ S 需进行回收处理，防止泄漏导致安全风险
工艺制造难度大	硫化物电解质合成方法均存在工艺复杂、耗时耗能、环境要求高的问题
硫化物电解质工艺一致性要求更高	从目前多家企业的产品来看，硫化物电解质之间的批次性较差，这不仅导致硫化物电解质与电极界面兼容性变差，影响电池的倍率性能和循环寿命；还会导致硫化物电解质的电化学性能不稳定，影响电池充放电效率和能量密度

来源：《实用化硫化物固态电解质的研究进展与挑战》，国金证券研究所

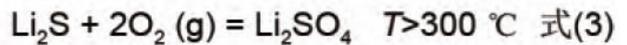
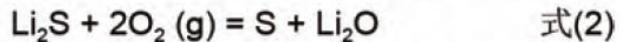
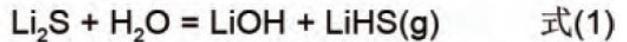
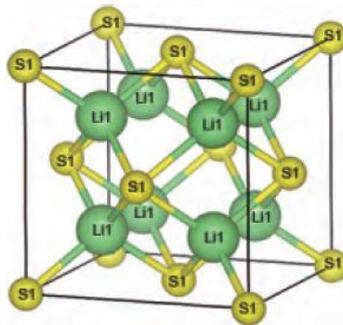


三、硫化锂：电解质核心原材料，竞争要素核心在提纯成本

3.1 性能：纯度是核心指标，显著影响电解质的制备效果

硫化锂为固体粉末，CAS 号为 12136-58-2，锂溶于水时放热，同时发生水解反应，如生成硫化锂和氢氧化锂，进一步水解会生成硫化氢。硫化锂在常温下会被氧气缓慢氧化，生成黄色的单质硫和氧化锂；在 300°C 以上会被氧气氧化生成硫酸锂。硫化锂粉体有较强的吸湿性，即使空气中的微量水分也能引起硫化锂的水解反应，生成有毒的硫化氢气体，大量的硫化锂暴露于含湿空气中，如无特殊防护措施，安全风险极大。因此硫化锂的生产、应用、运输与储存需要重点关注安全性，特别是预防硫化氢溢出带来的潜在风险。

图表16：硫化锂的晶体结构及主要的副反应方程式



来源：《硫化锂：全固态电池时代的“基石”材料》，国金证券研究所

硫化锂的纯度直接制约后续硫化物固态电解质的合成工艺及产物性能。硫化锂中的杂质以无机锂盐杂质、碳杂质、金属元素杂质以及水分杂质等为主，而硫化锂的产品指标中纯度参数尤为关键，对硫化物电解质的制备有重要影响；

- 硫化物固态电解质的高性能高度依赖精确的化学计量比，在材料制备过程中，硫化锂中残留的惰性锂盐杂质(如氧化锂、碳酸锂)在高温固相合成过程中引发化学计量偏差，导致非离子传导性杂相(如 Li3PO4 等)的生成。此类杂相在电解质晶界处选择性富集，恶化颗粒界面离子传输动力学，显著降低材料本征离子导率；
- 部分工艺制备的硫化锂中可能存在的残碳、金属元素等杂质，会升高所制备硫化物电解质的电子电导，导致固态电解质材料在应用中存在较高的漏电流，在电池运行中易于引发电解质分解甚至内部局部锂沉积，进而造成电池内部软短路等问题；
- 硫化锂的水分残留会引发储存过程中的自发性水解反应，导致材料纯度显著劣化，严重影响硫化物固态电解质材料的可控制备。综上所述，硫化锂的高纯度是实现硫化物固态电解质高性能的重要基础，目前行业内评价硫化锂产品水平主要聚焦白度、物相纯度、多硫含量、水分含量，以及碳杂质含量等角度。

图表17：硫化锂质量评价指标汇总

指标	测试方法	测量目标	意义
粉体颜色(白度)	目视(白度仪)	碳、多硫等显色杂质	杂质对电解质制备及性能产生显著影响
物相	XRD	无机盐杂质	氢氧化锂、氧化锂之类的杂质相在电解质制备中造成杂质相生成，降低电导率
水含量	卡尔-费休水分测试仪	硫化锂含水量	水分对硫化锂的储存、使用影响较大
碳含量	红外碳硫分析仪 测试电子电导	硫化锂含碳量	碳含量会造成电解质的电子电导率升高，并可能诱导电解质分解
溶剂含量	GC-MS/TGA-DSC	硫化锂的有机溶剂残留	溶剂影响计量比，在后续电解质烧结时碳化会提高电子电导率
水溶颜色	来源：国金证券研究所 所溶于水后的水溶液颜色	金属离子、多硫等杂质	金属离子或多硫杂质超标会对电解质化学计量比以及晶体结构产生不利影响



来源：《硫化锂：全固态电池时代的“基石”材料》，国金证券研究所

3.2 工艺：安全&低成本为核心，碳热还原法、液相法占主流

在制备硫化锂时，锂源和硫源的选择具有显著多样性。

- 硫源：呈负价态的硫离子(S²⁻)具有本征高反应活性，在传统工业领域中，被广泛用作高效硫化试剂，如硫化氢，二硫化碳等。这类活性硫源一般可直接与氢氧化锂、碳酸锂以及有机锂盐等稳定锂盐反应生成硫化锂。而硫单质或更高价态的硫前体需经历还原过程，借助还原剂如氢化锂等还原性锂盐、金属锂单质等直接反应生成硫化锂。
- 锂源：锂源可分为两种，一种是强还原性锂源(金属锂或有机锂类)，参与硫源的氧化还原反应；另一种是惰性锂源(如氢氧化锂等传统锂盐)，仅作为锂供体，不参与氧化还原反应。如前文所述，前者一般可和单质硫直接反应生成硫化锂；后者一般需要和高活性硫化剂，如硫化氢，二硫化碳等进行反应。具有双功能前体特性如硫酸锂能够同时提供锂源和硫源，通过碳热、镁热、铝热等除氧工艺实现硫价态调控，直接得到硫化锂。

(1) 高活性锂/硫源工艺：原料贵，安全风险较大，不利于规模化生产

优势：有较高的反应活性以及良好的产物收率。由于锂/硫源的反应活性高，无需外界提供苛刻条件促进反应进行，同时工艺路线对应的基础化学反应简单，不易产生副产物，从而产物纯度高。目前市场中的高纯硫化锂产品也多来自此工艺路线。

缺陷在于：成本昂贵+较大安全风险。其自身活性高，不宜保存，成本也相比稳定锂/硫源更为昂贵；不仅如此，高活性反应物除了自身会带来安全风险，其反应进程往往剧烈，不易控制，整个反应路线也有较大安全风险。

① 锂硫化合工艺：由于还原性有机锂盐的成本高昂，且锂含量低，应用强还原性有机锂盐(如叔丁基锂、硼氢化锂、萘锂等)的制备工艺一般用于合成纳米化硫化锂正极材料，不适用于硫化锂量产。金属锂或氢化锂本身锂含量高，而且具有极高的反应活性，一般和单质硫直接进行反应，生成的硫化锂不仅白度极高(蓝光白度>83%)，且几乎不引入其他杂质，纯度可达到99.9%以上，是目前百克级高纯硫化锂制备的优选方案之一

图表18：锂硫化合工艺、H₂S 中和工艺制备硫化锂图示

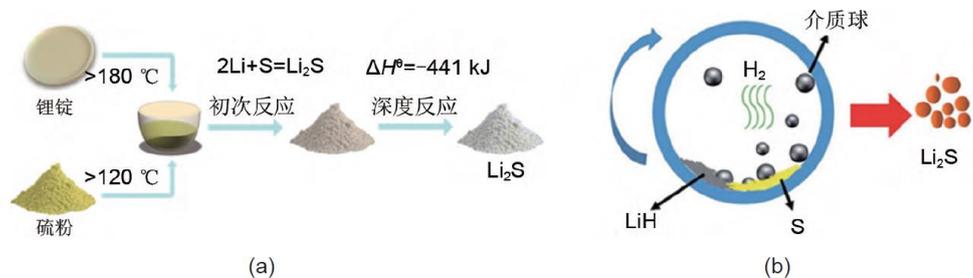
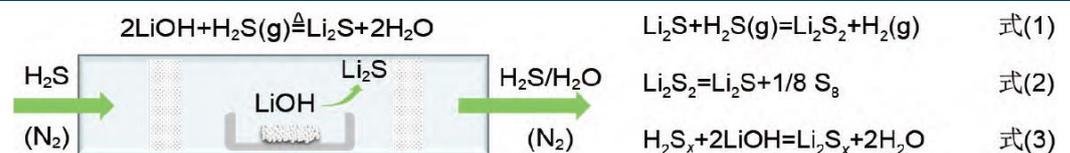


图7 (a) 锂硫化合工艺路线制备硫化锂图示；(b) 氢化锂与硫反应工艺路线制备硫化锂图示

来源：《硫化锂：全固态电池时代的“基石”材料》，国金证券研究所

② H₂S 中和工艺。应用硫化氢制备硫化锂源自硫化氢与氢氧化锂的中和反应，工艺简洁路线。通过原位转化 H₂S 为 Li₂S，不仅实现危废减排，同时可以大幅提高 H₂S 的产业附加值，因此该路线适用于油气田等 H₂S 富集区的原位转化，可有效规避 H₂S 跨区域运输风险。但原料地理依赖性(需匹配 H₂S 气源)导致工艺普适性受限，加之水解副反应抑制技术尚未成熟，致使产业化进程滞后。

图表19：H₂S 中和工艺制备硫化锂工艺及反应方程式





来源：《硫化锂：全固态电池时代的“基石”材料》，国金证券研究所

(2) 化学稳定锂/硫源工艺：原料便宜，过程安全，适合规模化

当前硫化锂规模合成技术存在三条典型路径，其共性特征表现为：①原料廉价且较为易得；②大气环境耐受性优异，投料端无须严格环境管控；③工艺过程本征安全。应用稳定锂/硫源的温和反应路线有利于进一步工艺降本和规模化。

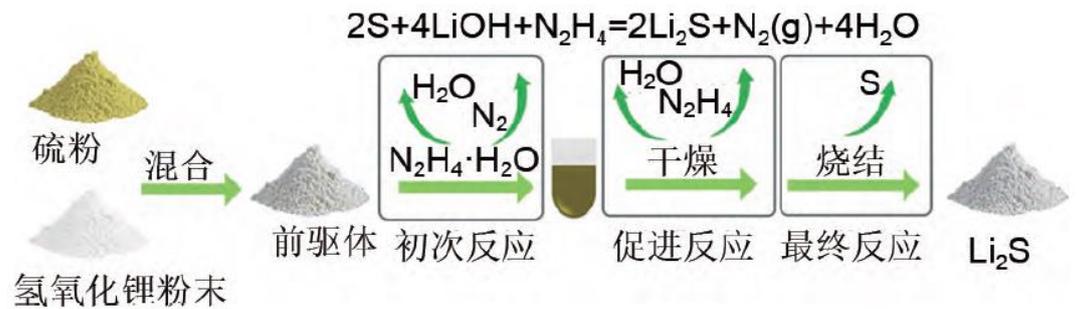
➤ 水合肼还原工艺：高效低成本，但要求反应控制精确

原理：在碱性介质中，单质硫于热驱动条件下易发生价态歧化反应，硫元素的歧化倾向导致高价硫物种难以彻底清除，终产物仍存在Li₂S₃、Li₂S₂O₃等伴生杂质，引入水溶性还原剂(如水合肼)可显著降低体系氧化势，促使反应平衡向硫负离子(S²⁻)方向迁移。有研究通过引入水合肼作为液相还原介质，使硫单质与氢氧化锂在常温下即可完成前体合成，经后续梯度热处理(400~600℃)促进硫物种完全还原，最终获得纯度≥99.95%的Li₂S粉体。

优势：该工艺创新性地利用强还原剂将S原位转化为S²⁻，进而和廉价锂盐，如氢氧化锂或碳酸锂，直接反应形成高效、低成本的硫化锂制备工艺路线。

劣势：需要较为精确的反应控制，如果反应控制不当，水合肼将硫单质还原的过程中极易产生大量的中间产物多硫化锂(Li₂S_x)，水合肼属于管制危险品，同时对人体及环境具有毒性，工程化实施需同步构建封闭式操作单元与完备防护体系。

图表20：水合肼还原工艺路线制备硫化锂图示



来源：《硫化锂：全固态电池时代的“基石”材料》，国金证券研究所

➤ 液相复分解工艺：原料便宜，易于规模化，但提纯成本高

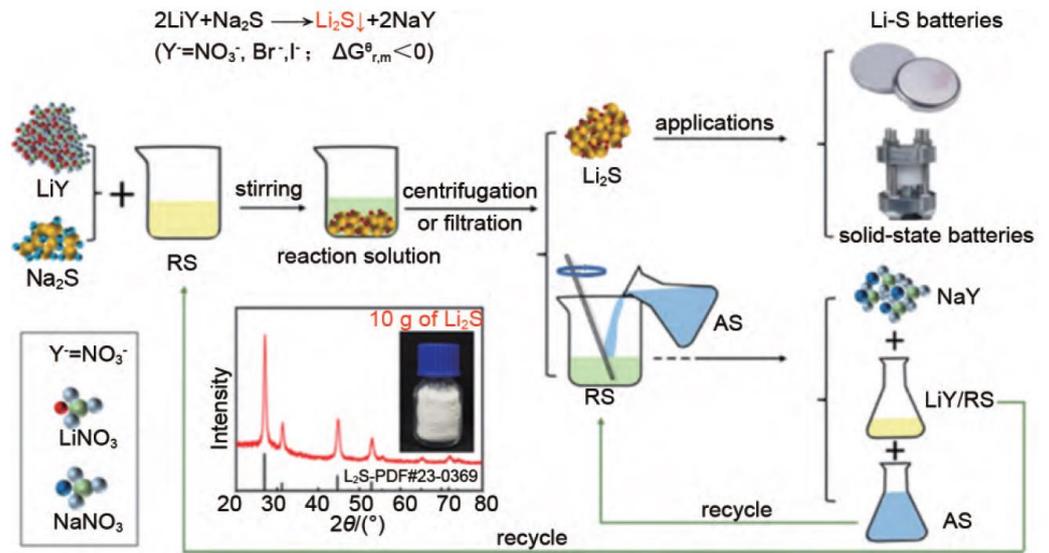
原理：硫化钠和廉价锂盐可通过复分解路径生成硫化锂，Li₂S在乙醇中呈现可溶性，但卤化钠、硝酸钠等盐类难溶于乙醇，该溶解特性差异构成Na₂S与锂盐发生复分解反应的核心驱动力。

优势：①原料成本低廉且来源广泛；②该反应体系表现出优异的动力学特性，在室温下即实现硫化锂可控合成；③液相工艺可结合自动化产线，有望实现规模化连续化生产。

劣势：①通过液相法制备硫化锂，后续均需增加中高温热处理来脱除有机溶剂以及水分，抵消了低温复分解反应本应有的节能优势；同时低温下生成的小粒径硫化锂因热处理过程出现晶粒粗化，降低其应用时的反应活性；②涉及大量溶剂的循环使用，溶剂安全性以及溶剂中的水氧含量均需严格控制，以满足生产过程品控要求；③市售硫化钠原料的纯度不足，作为反应原料需要二次提纯；④复分解反应的副产物不易完全去除，仍需增加额外提纯工步，在长期储存过程中，残留水分诱导硫化锂的分解，需设计针对性抑制策略。



图表21: 液相复分解工艺路线图示



来源:《硫化锂: 全固态电池时代的“基石”材料》, 国金证券研究所

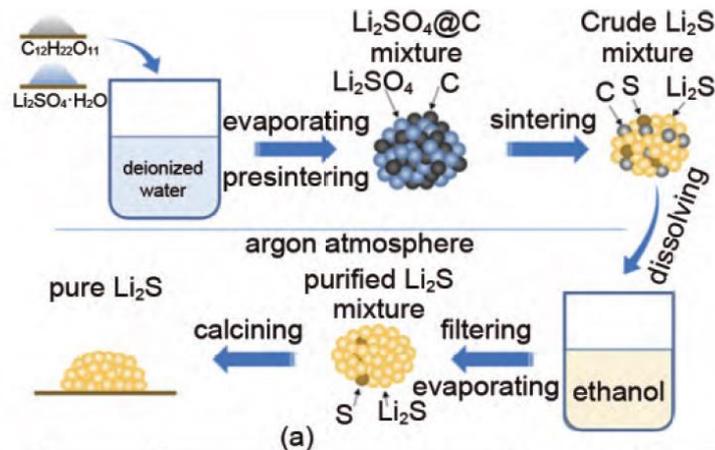
热还原路线: 原料便宜, 环境兼容高, 但能耗高、收率低

原理: 基于还原剂在高温下还原稳定的硫酸锂, 直接合成硫化锂。还原剂体系可以是非金属单质(如碳、硅等)、金属单质(如铝、镁等)以及氢气等气态还原介质

优势: ①原料成本优势显著: 锂源采用硫酸锂, 碳源可拓展至石墨、活性炭及聚乙烯醇、柠檬酸等有机物热解碳等; ②环境兼容性优异: 碳热还原工艺的原料在空气中物化性质稳定, 无需特殊管理条件, 显著降低了工艺成本; ③反应过程安全可控: 碳在还原硫酸锂的过程中, 过程温和可控, 通过温度控制能够调控反应进行, 有利于规模量产。

劣势: ①工艺能耗较高: 一般需要 635°C 以上的热力学反应温度, 部分工艺甚至需达到 900°C, 导致生产能耗较高; ②烧失严重, 产品收率较低: 碳在夺氧生成硫化锂的同时, 逸出了高达 65% 的二氧化碳, 导致最终的产物收率仅为 30% 左右。碳热还原的工艺路线需配套做好节能减排装置, 如设计余热、尾气利用等工艺模块, 以进一步降低生产成本, 构建符合低碳工艺标准的能量闭环系统。

图表22: 碳热还原法制备硫化锂粗品的制备流程

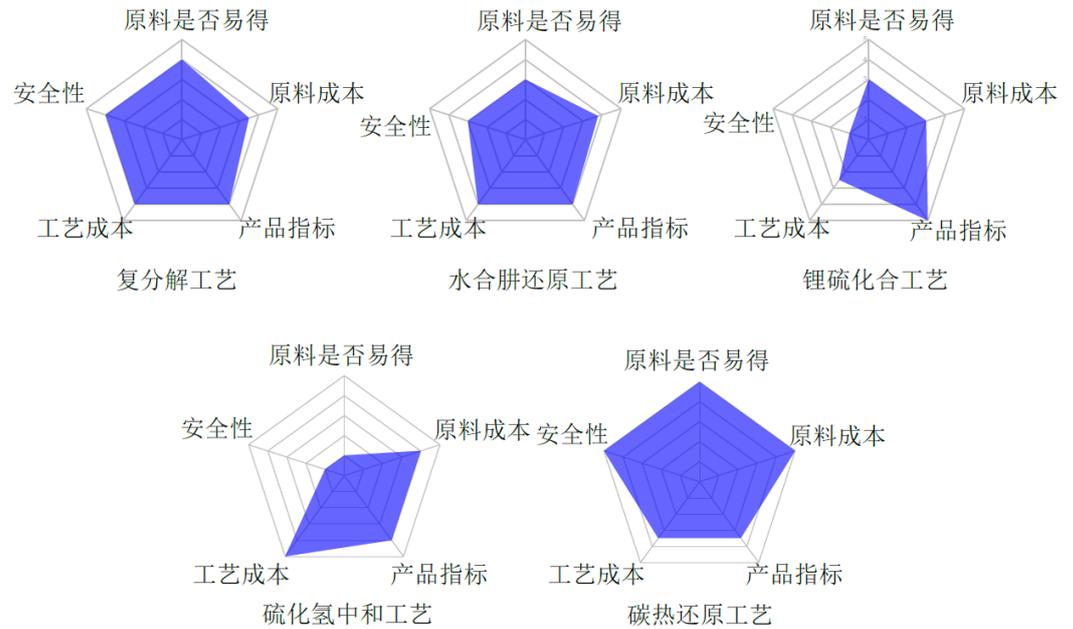


来源:《硫化锂: 全固态电池时代的“基石”材料》, 国金证券研究所

从纯度、安全性、经济性多方位评价不同工艺, 锂硫化合物工艺的产品指标最为突出, 是硫化锂在产业化早期实现小批量供应的主要路线碳热还原、水合肼还原和复分解这 3 种工艺路线的综合优势较为明显, 其产业化实践已进入工程验证阶段。



图表23: 硫化锂制备工艺五维指标分析



来源:《硫化锂: 全固态电池时代的“基石”材料》, 国金证券研究所

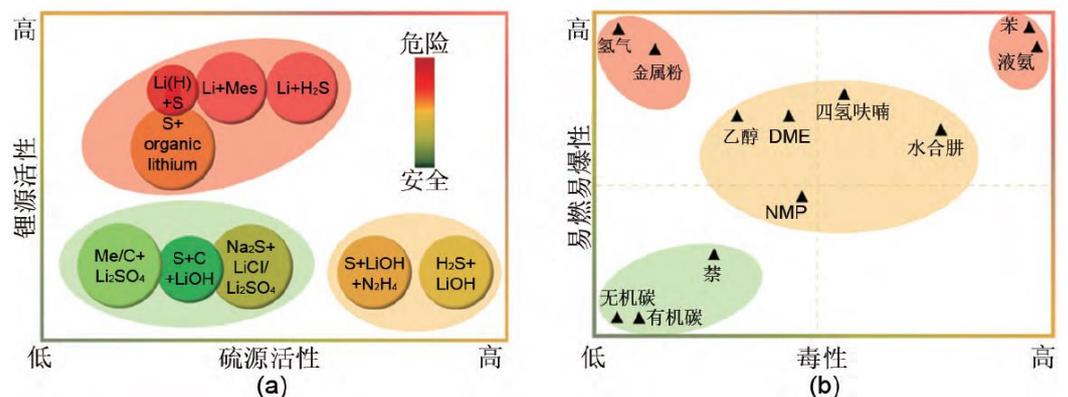
(1) 纯度: 由于原料的高活性、高纯度, 锂硫化合工艺性能突出。

硫化锂产品质量呈现以下规律性特征: ①应用高活性锂/硫源的反应路线反应过程简洁, 机理明确, 其产物收率及纯度指标在现有方法中表现最优。②液相合成路线受限于溶剂脱除工序, 此类路线生产的硫化锂产品易于出现溶剂残留、水分以及多硫杂质超标等问题, 而用于脱除此类杂质而增加的中高温除杂工艺可能引发溶剂碳化, 引入新的杂质。③原料安全性高的工艺路线多依赖高温还原反应, 而硫元素的价态复杂, 反应路径多, 副反应难以根除, 此类工艺路线制备的硫化锂产品常含无机锂盐、残碳等杂质, 一般需结合二次提纯工艺提升纯度。

(2) 安全性: 碳热还原法(固相法)、液相法的安全性更优, 适合规模化生产。

硫化锂制备工艺的安全风险主要源自原料活性、制备过程、辅助化学品。①原料活性: 高活性硫源, 如硫化氢原料具有剧毒; 高活性锂源, 如金属锂、氢化锂及有机锂盐极易燃爆; ②反应过程: 氢化锂和单质硫反应释放大量氢气、金属锂或有机锂与单质硫反应的剧烈放热等特性显著提升了防火防爆与毒害防护的工程复杂度; ③工艺辅助体系: 用于还原硫酸锂的金属粉末或氢气、可溶解金属锂的液氨、用于还原单质硫的水合肼, 以及用于支持复分解反应进行的 NMP(N-甲基吡咯烷酮)等均需建立专项防护机制。高纯度硫化锂制备工艺往往伴随安全边际成本的显著增加。

图表24: 硫化锂制备工艺路线归纳(左); 应用于硫化锂制备的反应助剂的安全性归纳(右)





来源：《硫化锂：全固态电池时代的“基石”材料》，国金证券研究所

(3) 经济性：碳热还原法、水合肼还原法、液相复分解法均有潜力。

成本分析揭示关键规律：原材料在产业链中的前体属性越显著(如硫酸锂处于锂盐加工前端)，其市场价格传导效应越弱，对应工艺的单位质量硫化锂原料成本呈现梯度递减特征。

当前硫化锂主流制备工艺仍处于产业化验证阶段，其规模经济性尚未完全显现。碳热还原路线展现出显著经济性优势，主要归因于硫酸锂的低价特性及其作为碳酸锂上游前体的产业定位优势；硫化氢中和工艺和水合肼还原工艺的原料成本构成类似，均主要源于锂源，在锂盐价格趋于稳态的市场环境下，进一步降本需依赖工艺改进；复分解工艺的核心原料若用水合硫化钠，价格会高于水合肼法，但存在LiOH+H₂S的搭配方案，价格会更低；锂硫化合工艺由于使用了价格高昂的金属锂，所以锂硫化合工艺的原料成本远高于其他工艺。

图表25：硫化锂不同制备工艺路线的原材料成本测算

反应类型	反应方程式	锂源量 /t	硫源量 /t	助剂量 /t	单吨硫化锂的原料成本/(万元 /t)
碳热还原工艺	2C+Li ₂ SO ₄ H ₂ O=Li ₂ S+2CO ₂ +H ₂ O	2.78		0.52	13.61
硫化氢中和工艺	H ₂ S+2LiOH·H ₂ O=Li ₂ S+4H ₂ O	1.83	0.92	-	14.61
水合肼还原工艺	2S+4LiOH·H ₂ O+N ₂ H ₄ ·H ₂ O=2Li ₂ S+N ₂ (g)+9H ₂ O	1.83	0.7	0.68	14.75
复分解工艺	Na ₂ S·nH ₂ O+2LiCl=Li ₂ S+2NaCl+nH ₂ O	1.85	2.83	-	15.01
锂硫化合工艺	2Li+S=Li ₂ S	0.3	0.7	-	21.26

来源：《硫化锂：全固态电池时代的“基石”材料》，国金证券研究所

图表26：硫化锂不同主流制备工艺路线的多方面综合对比

评比维度	金属锂和硫法(锂硫化合工艺)	氢氧化锂和硫化氢法(硫化氢中和工艺)	碳热还原法	均相还原法(水合肼还原工艺)
合成工艺-原材料安全性	2	1	3	2
硫化锂产品品质	3	2	1	2
原料成本	2	2	3	2
工业化设备开发难易程度	1	2	3	2
技术防御性	1	1	1	3
生产安全性	1	1	2	2
总分	10	9	13	13

来源：《全固态电池关键材料-硫化锂制备研究进展》，国金证券研究所

四、竞争格局：路线尚未收敛，关注各路线的降本走向

硫化锂、硫化物电解质的制备难点有较大的差异，硫化锂是硫化物电解质的核心原材料，硫化锂的纯度会直接影响硫化物电解质的电化学性能表现，但是二者的制备仍有较大的区别。

- 硫化锂的制备核心在提纯工艺，难点主要集中于高纯度要求和环境敏感性，在于如何在安全、纯度和成本上做出好的平衡，合成本身并不困难。
- 硫化物电解质的制备核心在电化学配方设计及合成工艺，需要设计好元素比例并在合成时精准调控多组分的配比，对电化学的理解需要非常深入，合成工艺也有较高的技术要求。

硫化锂/硫化物电解质参与玩家已较多。锂电龙头企业率先构建产业矩阵，典型代表包括赣锋锂业、天齐锂业、容百科技、恩捷股份等；初创企业快速涌现，如深圳固研、广州博粤、中科固能等；半导体领域企业基于硫化物半导体领域的技术协同效应，逐步延伸至硫化锂等核心材料供应链，如杭州凯亚达、四川全固态等。

根据布局的方式，可按照布局硫化物电解质/硫化锂/一体化将企业分成三种类型：



1) 硫化物电解质企业：初创企业居多，国内代表企业包括中科固能、恩力动力、天赐材料、广州博粤等。其中中科固能建成完工并试线投产世界范围内首条百吨级规模化制备硫化物固态电解质的生产线，为未来建成万吨级别硫化物固态电解质的制备提供经验基础及数据支撑；恩力动力 2018 年与软银成功开发出了使用硫化物固态电解质及锂金属负极的全固态锂金属电池，掌握低成本的硫化物电解质制备技术；天赐材料开发出了硫化锂路线的固态电解质，并成功完成实验室公斤级生产，目前处于中试阶段，计划于 2025 年实现小批量生产；广州博粤攻关硫化物固态电解质（如 $\text{Li}_6\text{PS}_5\text{Cl}$, $\text{Li}_{10}\text{GeP}_2\text{S}_{12}$ 等）公斤级批量化制备工艺，通过优化前驱体处理、固相反应条件及后处理工艺，成功开发出可重复性高、适用于公斤级制备的技术路线。

2) 硫化锂企业：大企业居多，国内代表企业包括天齐锂业、厦钨新能、上海洗霸、华盛锂电、容百科技、海辰药业等。当前硫化锂多种制备工艺并行，路线尚未完全收敛。

①碳热还原法：代表企业恩捷股份等，恩捷股份的超纯硫化锂目前已完成百吨级中试产线，硫化物固态电解质的纯度和电导率，能够满足国内外头部电池企业的性能指标要求，硫化物电解质膜已实现卷对卷、连续化生产，目前公司在云南玉溪推进硫化物全固态电解质材料中试生产线项目，设计年产能约 1000 吨。

②液相复分解法：代表企业华盛锂电等，公司为原先布局电解液添加剂的企业，电解液添加剂和硫化锂的液相制备工艺原理上类似，核心都在于后续提纯，且都使用反应釜、过滤装置等通用化工设备，有较强的技术可迁移性。华盛锂电制备的硫化锂具有纯度高、收率高、加工性能好的优点，基于这种高纯度硫化锂，公司与客户合作开发的固态电解质 $\text{Li}_6\text{PS}_5\text{Cl}$ 的离子电导率可达 5.57ms/cm 。

③水合肼还原法：代表企业天齐锂业等，其中天齐锂业通过全球首创的循环提纯技术并通过工艺创新制造高纯度低成本的硫化锂，计划 2025 年实现硫化锂量产，目标覆盖硫化物固态电解质 80% 的原材料需求。

④氢氧化锂和硫化氢法：代表企业容百科技、海辰药业等。该方法多用于日韩国家的硫化锂生产，利用石油尾气中的硫化氢为原料进行合成，成本优势较大，目前使用此方法的日韩代表企业有出光新产株式会社、古河机械金属株式会社、东丽精细化工株式会社和韩国梨树集团。国内容百科技的硫化物电解质材料粒度及离子电导率等性能处于行业领先水平，目前正在进行中试线的建设，部分量产设备已经完成带料验证，预计将于四季度竣工，2026 年初投产。氢氧化锂和硫化氢法（液相法）代表企业为海辰药业等，使用氢氧化锂和硫化氢在有机溶剂中反应制备硫化锂。

⑤其他工艺：上海洗霸、厦钨新能均采取独特工艺。上海洗霸收购有研稀土的硫化锂业务及技术，后者的固态电解质已可实现产品小批量稳定制备；厦钨新能采用气相法中的 CVD 法制备硫化锂，其利用自研冶炼技术提炼的活性锂化合物，与含硫化合物（非硫化氢）反应，一步形成高纯度硫化锂，小试、中试结果显示降本空间较大。

3) 硫化物电解质+硫化锂一体化布局企业：主要集中在龙头企业。龙头企业居多，如赣锋锂业、恩捷股份、容百科技，由于硫化锂的制备效果对后续制备硫化物电解质有较大影响，因此一体化布局硫化物电解质+硫化锂的企业可以打通前后端研发，形成更强的 know-how 积累，技术迭代相对高效。

图表27：硫化物电解质/硫化锂企业布局进展汇总

企业	布局产品	产业化进展
旭硝子株式会社	硫化物电解质	布局大幅缩短生产时间的新技术（采用玻璃领域的高温熔融工艺生产硫化物固态电解质），最早将于 2027 年实现商业化
三井金属	硫化物电解质	公司“A-SOLiD”硫化物固体电解质 21 年年产 10 万吨以上，2023 年把验证用产能翻一番，2024 年 2 月份计划将日本全固态电解质量产试验设施进行第二次产能扩建，提升两倍
Solid Power	硫化物电解质	2022 年公司完成其硫化物基全固态电池试生产线安装，年产能达 15,000 个电池，预计 2022 年底之前将第一批电池单体交付测试，2026 年启动批量生产；2022 年二季度预计全面投产桑顿每年将生产多达 30 吨的硫化物基固体电解质材料，到 2028 年，电解质材料的生产能力将提高到每年 4 万吨，可以为 80 万辆电动汽车生产固态电池
赛科动力	硫化物电解质	2025 年 4 月正式投入使用 10 吨级硫化物固态电解质产线
中科固能	硫化物电解质	建成完工并试线投产世界范围内首条百吨级规模化制备硫化物固态电解质的生产线，为未来建成万吨级别硫化物固态电解质的制备提供经验基础及数据支撑
瑞道科技	硫化物电解质	2023 年 9 月 14 日签约，总投资 13 亿元的进行硫化物系全固态电解质材料规模化生产的项目，根据项目



企业	布局产品	产业化进展
		规划，2025 年建成并达到百吨级全固态电解质生产能力，2028 年实现年产 6000 吨全固态电解质的目标。
天赐材料	硫化物电解质	开发出了硫化锂路线的固态电解质，并成功完成实验室公斤级生产，目前处于中试阶段，计划于 2025 年实现小批量生产
当升科技	硫化物电解质	公司已开发与布局氧化物、硫化物固态电解质等多个技术路线
恩力动力	硫化物电解质	2018 年 6 月，恩力动力开始与管野了次教授合作，开发硫化物固态电解质材料，与软银成功开发出了使用硫化物固态电解质及锂金属负极的全固态锂金属电池，已经掌握了低成本的硫化物电解质制备技术。2025 年 8 月 9 日申请硫化物固态电解质回收利用方法专利，使硫化物固态电解质电导率恢复到 10ms/cm 可回收利用
深圳固研	硫化物电解质	硫化物电解质系自研自产，目前已经实现吨级年产量，正在规划建设年产百吨级材料中试线；广州分公司固态电解质研发建设项目年研发硫化物固态电解质 18 吨
广州博粤	硫化物电解质	攻关硫化物固态电解质（如 Li ₆ PS ₅ Cl, Li ₁₀ GeP ₂ S ₁₂ 等）公斤级批量化制备工艺：通过优化前驱体处理、固相反应条件及后处理工艺，成功开发出可重复性高、适用于公斤级制备的技术路线
出兴光产	硫化锂、硫化物电解质	建年产能 1000 吨大型硫化锂生产设施，计划 2027 年 6 月完工；设计年产百吨级硫化物固态电解质大规模中试装置，2027~2028 年实现商业化，2030 年达万吨规模
浦项钢铁	硫化锂、硫化物电解质	2022 年建成了年产 24 吨的硫化物固态电解质工厂，2030 年将扩产至 7200 吨，并布局硫化锂稳定供应链
湖南思捷	硫化锂、硫化物电解质	公司超纯硫化锂目前已完成百吨级中试产线，硫化物固态电解质的纯度和电导率，能够满足国内外头部电池企业的性能指标要求，硫化物电解质膜已实现卷对卷、连续化生产。目前该公司在云南玉溪推进硫化物全固态电解质材料中试生产线项目，设计年产能约 1000 吨。
容百科技	硫化锂、硫化物电解质	公司硫化物电解质材料粒度及离子电导率等性能处于行业领先水平，目前正在进行中试线的建设，部分量产设备已经完成带料验证，预计将于四季度竣工，2026 年初投产
研一新材	硫化锂、硫化物电解质	旗下子公司浙江研一新能源科技有限公司年产吨级硫化物固态电解质中试项目从事硫化物固态电解质的中试研发，年中试规模 10 吨，但研发产品不对外销售；公司硫化锂产品已获主流企业的小批量订单，下一步可实现规模化量产
赣锋锂业	硫化锂、硫化物电解质	在 2022 年便已具备电池级高纯度硫化锂量产能力，并于 2024 年进一步扩大了产线规模，由赣锋锂业牵头起草的《中华人民共和国有色金属行业标准：电池级硫化锂》也已进入预审阶段；LPSC/LPS/LGPS 等体系的硫化物固体电解质，通过工艺优化，可实现亚微米级别的硫化物电解质超细粉体（D ₅₀ <1 μm），电导率达到 3mS/cm
华盛锂电	硫化锂	公司凭借在合成、提纯和溶剂回收方面的技术优势，选择液相法制备高纯度硫化锂，未来，华盛锂电将在完善工艺的基础上，探索硫化锂的批量化生产，并研究新一代高电导率、高机械强度的硫化物固态电解质
光华科技	硫化锂	硫化锂目前产品已向客户送样，产能为 300 吨/年，可根据需求扩至 3000 吨/年
上海洗霸	硫化锂	公司储备了硫化物、氯化物等固态电解质的其它固态电解质粉体技术路线，竞拍有研稀土硫化锂业务相关资产，力争硫化物固态电解质路线“战略补强”
天齐锂业	硫化锂	通过全球首创的循环提纯技术并通过工艺创新制造高纯度低成本的硫化锂，计划 2025 年实现硫化锂量产，目标覆盖硫化物固态电解质 80% 的原材料需求。若硫化物路线成为全球主流，其有望在 2028 年全球超 2000 亿元的固态电池市场中占据 30% 以上份额。
凯亚达	硫化锂	生产的硫化锂纯度达 99.99% 以上，杂质铝、钙、铜、铁、镁、镍、铅、硒等总含量小于 100ppm，为全球硫化锂市场的重要参与者
瑞福锂业	硫化锂	和天津理工大学联合建成了一条硫化锂实验线，目前技术工艺已打通，日产 30 公斤的硫化锂生产线正在建设中
汉普高新	硫化锂	2024 年媒体报道其高纯硫化锂产能达 50 吨，并可根据市场情况扩大产能，满足国内外需求
四川全固态	硫化锂	公司推出的硫化锂、硫化锆、硫化硅等产品，作为固态电解质的关键组成部分或相关原料，为固态电池



企业	布局产品	产业化进展
----	------	-------

技术的突破提供了有力支持

来源：日经中文网，维科网锂电，中国粉体网，北极星电池网，我的钢铁网，投资界，金融界，新浪财经，各公司官网等，国金证券研究所，截止 2025 年 8 月 13 日

五、投资建议

硫化物预计为全固态电池后续发展的主流路线，从壁垒和格局上判断，由于涉及到电化学核心配方，当前电池厂仍在积极自研硫化物电解质，叠加布局的材料企业较多，我们判断未来竞争会相对激烈；硫化锂的壁垒相对硫化物电解质更高，电池厂自研少，建议关注当前具备独特工艺且产品性能表现突出、产业链评价较好的企业：厦钨新能、上海洗霸（有研稀土的技术）；从后续量产和降本看，液相复分解法、氢氧化锂和硫化锂（液相法）、均相还原法、碳热还原法、均具备大规模应用、降本的潜力，关注代表企业华盛锂电、海辰药业、容百科技、天齐锂业、赣锋锂业、恩捷股份等。

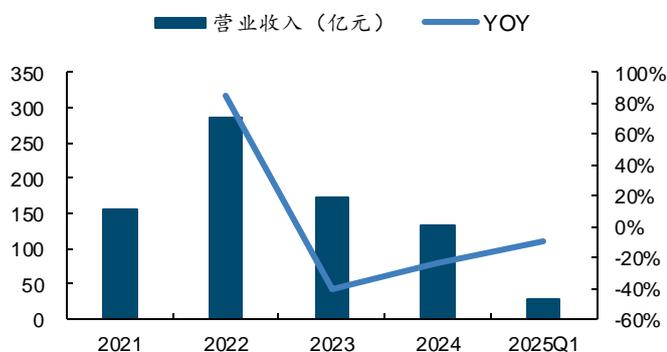
4.1 厦钨新能：钴酸锂领军企业，新工艺硫化锂行成独特卡位

公司是全球钴酸锂正极企业的领军企业。24 年公司稳步推进 NL 全新结构正极材料、固态电池材料、钠电材料等新能源材料前沿技术的研发，形成了成熟的技术驱动发展的 IPD 模式，在新能源材料多个关键领域取得了显著进展，打造了较为全面的产品矩阵。在钴酸锂领域，公司始终保持行业领先地位。钴酸锂作为传统优势产品，市场份额位居世界第一，产品获得国家制造业单项冠军产品称号。2024 年，AI 人工智能技术在手机以及平板电脑方面的切入，使得新产品不断上市，带动了消费者的换机潮，对钴酸锂需求有一定的拉动，同时 AI 电耗增长对钴酸锂能量密度提出更高的要求，技术门槛进一步提升，作为钴酸锂龙头企业，公司充分受益。24 年，公司通过技术创新，提升产品性能和质量，在高电压、高能量密度等方面保持领先，4.53V 钴酸锂产品通过多家客户认证，实现小批量供货；4.55V 产品开发进度符合客户要求。在三元材料领域，公司巩固了在高电压、高功率细分市场的技术龙头地位。通过聚焦三元材料高电压、高功率产品技术的深度研发，赋能高端纯电汽车、混动增程汽车、低空经济及电动工具等领域。

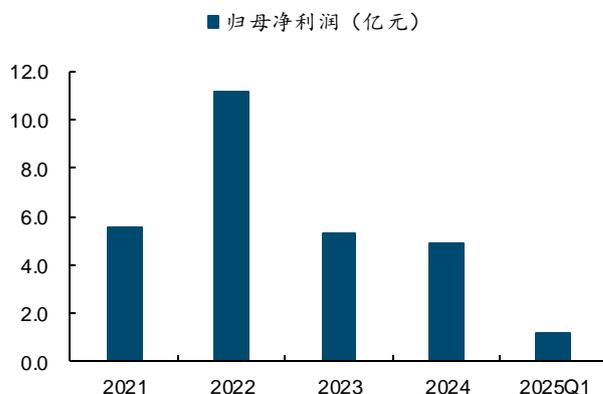
2024 年公司培育有未来新的盈利增长点：(1) 正极补锂材料，公司已完成高稳定性补锂材料的开发，并实现批量供货；(2) 推出 NL 全新结构正极材料，相较传统正极材料，NL 全新结构正极材料结构更稳定，层间距更宽，能量密度和倍率性能都有显著的提升，未来将广泛应用于 3C 消费电子、机器人、低空经济、固态电池等领域。

在固态电池领域，公司重点在正极材料和电解质方面布局：(1) 在固态电池正极材料方面：匹配氧化物路线固态电池的正极材料已实现供货；硫化物路线固态电池的正极材料方面，公司与下游客户在技术研发上保持密切的交流合作；(2) 在固态电解质方面，公司凭借深厚的技术沉淀，开发出新的硫化锂合成工艺，小试、中试结果显示降本空间较大。

图表28：厦钨新能营业收入



图表29：厦钨新能归母净利润



来源：厦钨新能公司公告，国金证券研究所

来源：厦钨新能公司公告，国金证券研究所

4.2 上海洗霸：固态电池平台型企业，收购有研稀土硫化锂资产

公司主营水处理化学品及解决方案，积极推进电池新材料。24 年公司在保持水处理特种化学品服务及整体解决方案等主营业务业绩稳健发展的同时，积极推动电池材料等特种化



学品相关研发。目前，公司已经实现均质硅碳负极材料年十吨级产线稳产一年以上，合格样品已送国内部分电池厂商进行测试及验证，并被个别电池厂商列入车规 C 样进行电池匹配验证。同时，公司依托控股子公司实施的年百吨级产线已在浙江基地建设完成并通过客户验厂，根据市场需求情况进一步安排生产计划。

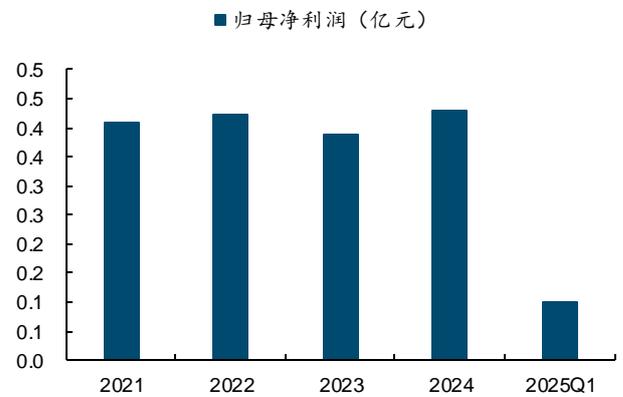
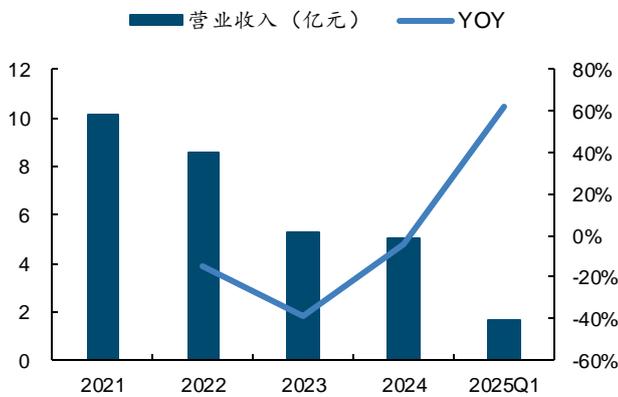
公司在锂电新材料及算力领域已行成广泛布局：1) 锂离子固态电池氧化物电解质、多种复合固态电解质先进材料的产能放大与产线的稳产；未来，卤化物电解质、硫化物电解质全固态电池核心关键材料产线的设计与产能放大工作会适时有序推进，固态电池（半固态与准固态）在消费电子、智能穿戴、无人机、机器狗、人形机器人、eVTOL 等价格不敏感应用场景的推广，以及随着固态电解质生产成本的持续大幅下降引发在固态锂离子动力电池领域的规模化应用拓展；2) 锂离子动力电池新型硅碳负极材料创新性生产（硅碳近零膨胀）与生产规模和成本的持续下降，能量密度的持续上升与负极材料配对应用的低成本工业化推进；3) 云数据中心空冷与算力中心液冷及核心关键全氟乙胺丙胺丁胺系列液冷剂开发等业务的大规模拓展。

公司收购有研新材资产进军硫化锂。2025 年 7 月 31 日，公司就标的资产与有研稀土、有研稀土高技术有限公司、雄安稀土功能材料创新中心有限公司签署《有研稀土新材料股份有限公司部分资产（专有技术）的资产交易合同》《有研稀土新材料股份有限公司部分资产（专利）的资产交易合同》和《有研稀土新材料股份有限公司部分资产（设备及产线安装配套投入）的资产交易合同》，转让价人民币 10,649.78 万元。8 月 4 日，公司公告，公司通过公开竞拍形式竞得有研稀土硫化锂业务相关资产，为推动硫化锂业务的发展，公司拟与有研稀土签署《合资公司出资协议》共同投资设立一家有限公司。

上海洗霸扩大固态版图，占据产业化先机。通过本次收购，上海洗霸在介孔碳、硅负极、氧化物电解质、氧化物半固态电池之外，新增硫化锂业务，进一步完善在固态电池的技术布局。基于有研稀土此前在硫化锂的长期技术积累形成的先发优势和上海洗霸背靠的相对雄厚的复旦大学、中科院上海硅酸盐研究所的科研资源，我们认为上海洗霸在后续固态电池产业化的过程中占据明显先机。

图表30：上海洗霸营业收入

图表31：上海洗霸归母净利润



来源：上海洗霸公司公告，国金证券研究所

来源：上海洗霸公司公告，国金证券研究所

4.3 华盛锂电：电解液添加剂领先企业，液相法硫化锂代表

公司是国内的电解液添加剂领先企业。目前产品主要有电子化学品及特殊有机硅两大系列，高度覆盖国内市场，同时出口日本、韩国、美国、欧洲、东南亚等国家和地区。在电子化学品领域，公司是碳酸亚乙烯酯 (VC) 和氟代碳酸乙烯酯 (FEC) 市场领先的供应商之一，产品广泛应用于新能源汽车、电动两轮车、电动工具、UPS 电源、移动基站电源、光伏电站、3C 产品等领域。在特殊有机硅领域，公司是少数拥有“非光气法生产异氰酸酯硅烷”技术的生产商之一，凭借领先的技术优势、卓越的产品品质及优秀的售后服务，公司在国内外客户中赢得了良好的口碑。

公司硫化锂产品已制备合格样品。24 年公司积极拓展研发方向，布局未来锂电新材料，如固态、半固态电池材料新领域。公司已在下一代固体电池核心原材料硫化锂制备技术上取得突破性进展，制备出合格样品，目前处于放大验证阶段。

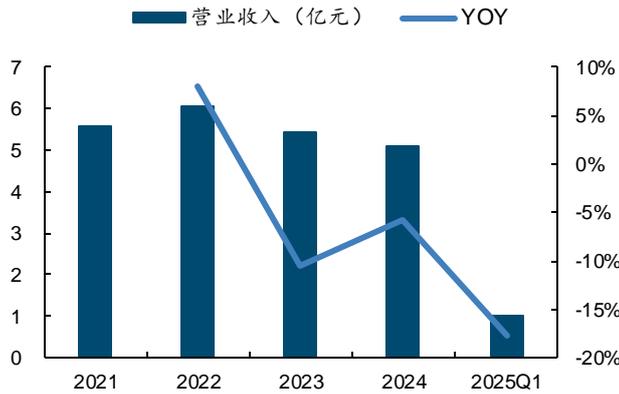
公司配合武汉大学开发出新型硅碳负极材料。在负极材料方面，子公司华盛联赢携手武汉大学进行技术合作开发，通过采用可控流化床 CVD 技术，将纳米硅颗粒与熔盐活化技术制



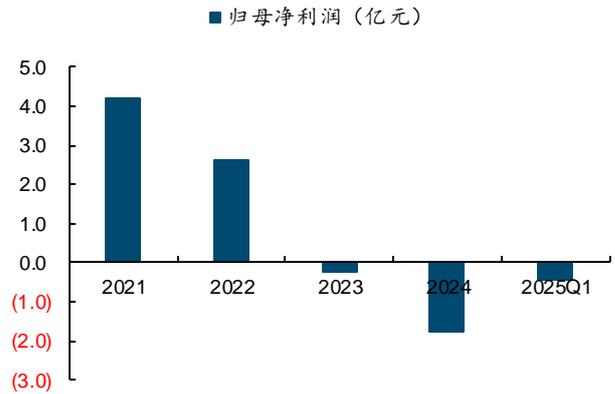
备的碳基材料（如石墨、碳纳米管、无定形碳等）进行复合，成功研发出硅碳负极材料，有效解决纯硅负极体积膨胀率大、循环寿命短的技术痛点，显著提升了电池综合性能。该项目正在进行产业化规划。

公司的新型添加剂有望向市场推广。公司成功研发一款 HSI003 创新型正极成膜添加剂，当前正处于市场推广的关键阶段。HSI003 主要适用于三元及钴酸锂电池体系，经电化学性能评测结果显示其在高倍率循环性能、高温存储性能、低温循环性能等方面相较于基准配方具有显著优势。

图表32：华盛锂电营业收入



图表33：华盛锂电归母净利润



来源：华盛锂电公司公告，国金证券研究所

来源：华盛锂电公司公告，国金证券研究所

4.4 容百科技：全球三元材料龙头，固态正极、电解质双线并行

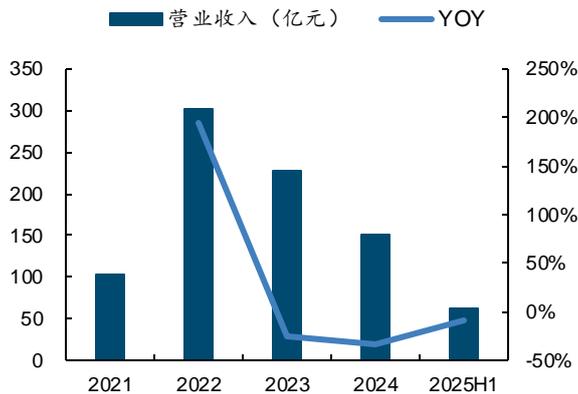
公司是三元材料的全球龙头企业。2024 年公司三元正极材料销量 12 万吨，逆势增长 20%，全球市占率超 12%，较 2023 年进一步提升 2 个百分点，连续四年保持全球第一。在业务规模持续提升的基础上，公司客户及产品结构都得到明显改善。2024 年，公司海外客户累计销量首次超过 2 万吨，9 系以上超高镍产品出货达到 2.7 万吨，占比提升至 23%。

公司在富锂锰基材料方向深耕多年，是业内最早一批针对全固态电池开发高能量密度富锂锰基材料的企业，在全固态领域已有百公斤级出货，并已拿到批量订单；在液态电池领域已突破高温存储、高温循环、产气等多项关键技术瓶颈，有望率先实现产业化。同时，公司尖晶石镍锰正极材料性能领先，配合国际头部客户持续进行开发，高温存储性能获得显著提升，2025 年上半年已有吨级出货，客户端预计 2026 年可实现量产。

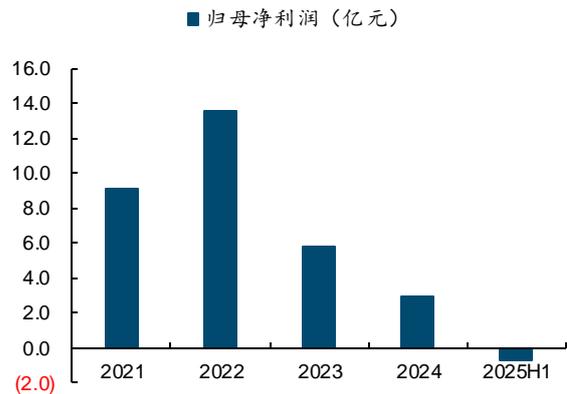
固态电池领域，公司围绕正极材料、固态电解质双线并行推进，在多家固态电池头部企业位列第一供应商。固态正极材料方面：高镍及超高镍全固态正极材料均已实现吨级出货，客户端测评可满足 400Wh/Kg 电芯开发需求，产品覆盖客户包括国内头部电池厂和整车厂、海外知名电池企业。超高容量正极工艺定型，容量可达 230mAh/g。固态电解质方面：公司硫化物电解质材料粒度及离子电导率等性能处于行业领先水平，目前正在进行中试线的建设，部分量产设备完成带料验证，预计将于四季度竣工，2026 年初投产。



图表34: 容百科技营业收入



图表35: 容百科技归母净利润



来源: 容百科技公司公告, 国金证券研究所

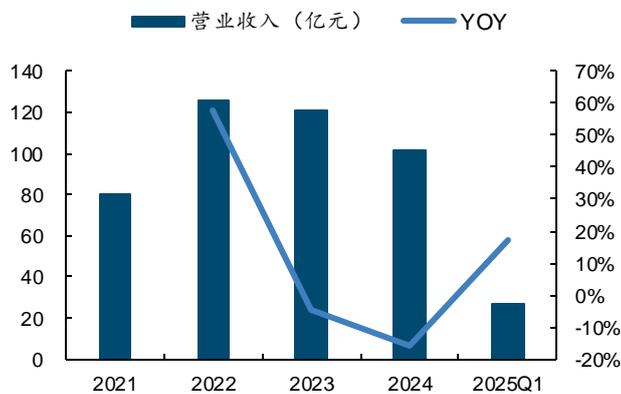
来源: 容百科技公司公告, 国金证券研究所

4.5 恩捷股份: 隔膜全球龙头, 碳热还原法硫化锂代表

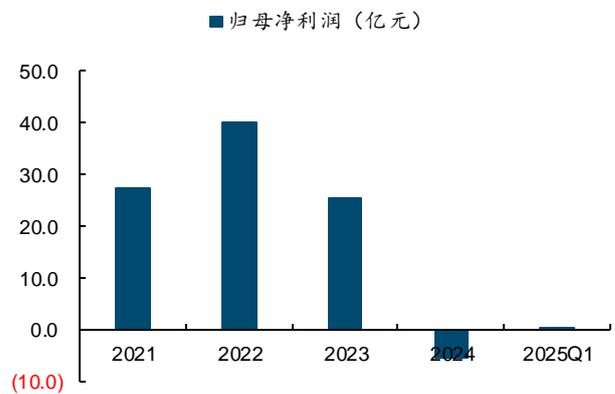
公司是隔膜领域全球龙头。公司在锂离子电池湿法隔膜市场继续保持领先的市场地位。公司目前已融入全球绝大多数主流锂电池生产企业的供应链体系中, 包括海外锂电池生产巨头: 松下、LGES、法国 ACC、Ultium Cells、海外某大型车企, 以及宁德时代、亿纬锂能、中创新航、比亚迪、国轩高科、孚能、力神等超过 50 家国内外锂电池企业。公司在锂离子电池湿法隔膜市场继续保持领先的市场地位。

公司是碳热还原法硫化锂工艺的代表企业。在固态/半固态电池领域, 江苏三合具备半固态电池隔膜量产能力, 并推进与国内多家锂电池企业的验证和技术交流工作, 湖南恩捷专注于固态电池材料的研发, 开发了硫化锂、硫化物固态电解质、硫化物固态电解质膜产品, 尤其是硫化物固态电解质粉体电导率、粒径控制等核心指标已行业领先。

图表36: 恩捷股份营业收入



图表37: 恩捷股份归母净利润



来源: 恩捷股份公司公告, 国金证券研究所

来源: 恩捷股份公司公告, 国金证券研究所

六、风险提示

量产不及预期: 硫化物全固态电池的大规模制备当前仍有较多材料难点、工艺难点需要攻克, 企业技术攻关及后续行成量产能力均任重道远, 存在量产不及预期风险。

降本不及预期致使市场拓展不及预期: 降本的最大瓶颈硫化锂尚未进入大规模生产阶段, 当前实验室、小试、中试的成本较高, 无法真实反映后续的量产成本, 未来的降本预期目前也相对模糊, 若后续量产成本高企导致全固态电池的综合成本居高不下, 存在商业化场景受限、市场规模不及预期风险。

路线竞争风险: 全固态电池根据电解质分类, 除硫化物路线外仍有氧化物、聚合物等路线, 由于氧化物电解质、聚合物电解质当前的材料体系更为成熟, 工艺放大更为简单, 当前成本相较液态电池高出部分相对较小, 有望率先应用于半固态电池并迈入量产阶段, 若在硫



氧化物全固态尚未规模化的时期，氧化物、聚合物路线（或者氧化物+聚合物复合路线）的半固态/全固态电池在性能上实现了持续的突破迭代，同时通过量产实现了大幅的降本，则会具备更为充分的商业化条件，进而扩大市场份额，将致使硫化物全固态电池未来的商业化前景的不确定性显著提升。



行业投资评级的说明：

- 买入：预期未来 3—6 个月内该行业上涨幅度超过大盘在 15%以上；
- 增持：预期未来 3—6 个月内该行业上涨幅度超过大盘在 5%—15%；
- 中性：预期未来 3—6 个月内该行业变动幅度相对大盘在 -5%—5%；
- 减持：预期未来 3—6 个月内该行业下跌幅度超过大盘在 5%以上。



特别声明：

国金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。

形式的复制、转发、转载、引用、修改、仿制、刊发，或以任何侵犯本公司版权的其他方式使用。经过书面授权的引用、刊发，需注明出处为“国金证券股份有限公司”，且不得对本报告进行任何有悖原意的删节和修改。

本报告的产生基于国金证券及其研究人员认为可信的公开资料或实地调研资料，但国金证券及其研究人员对这些信息的准确性和完整性不作任何保证。本报告反映撰写研究人员的不同设想、见解及分析方法，故本报告所载观点可能与其他类似研究报告的观点及市场实际情况不一致，国金证券不对使用本报告所包含的材料产生的任何直接或间接损失或与此有关的其他任何损失承担任何责任。且本报告中的资料、意见、预测均反映报告初次公开发布时的判断，在不作事先通知的情况下，可能会随时调整，亦可因使用不同假设和标准、采用不同观点和分析方法而与国金证券其它业务部门、单位或附属机构在制作类似的其他材料时所给出的意见不同或者相反。

本报告仅为参考之用，在任何地区均不应被视为买卖任何证券、金融工具的要约或要约邀请。本报告提及的任何证券或金融工具均可能含有重大的风险，可能不易变卖以及不适合所有投资者。本报告所提及的证券或金融工具的价格、价值及收益可能会受汇率影响而波动。过往的业绩并不能代表未来的表现。

客户应当考虑到国金证券存在可能影响本报告客观性的利益冲突，而不应视本报告为作出投资决策的唯一因素。证券研究报告是用于服务具备专业知识的投资者和投资顾问的专业产品，使用时必须经专业人士进行解读。国金证券建议获取报告人员应考虑本报告的任何意见或建议是否符合其特定状况，以及（若有必要）咨询独立投资顾问。报告本身、报告中的信息或所表达意见也不构成投资、法律、会计或税务的最终操作建议，国金证券不就报告中的内容对最终操作建议做出任何担保，在任何时候均不构成对任何人的个人推荐。

在法律允许的情况下，国金证券的关联机构可能会持有报告中涉及的公司所发行的证券并进行交易，并可能为这些公司正在提供或争取提供多种金融服务。

本报告并非意图发送、发布给在当地法律或监管规则下不允许向其发送、发布该研究报告的人员。国金证券并不因收件人收到本报告而视其为国金证券的客户。本报告对于收件人而言属高度机密，只有符合条件的收件人才能使用。根据《证券期货投资者适当性管理办法》，本报告仅供国金证券股份有限公司客户中风险评级高于C3级(含C3级)的投资者使用；本报告所包含的观点及建议并未考虑个别客户的特殊状况、目标或需要，不应被视为对特定客户关于特定证券或金融工具的建议或策略。对于本报告中提及的任何证券或金融工具，本报告的收件人须保持自身的独立判断。使用国金证券研究报告进行投资，遭受任何损失，国金证券不承担相关法律责任。

若国金证券以外的任何机构或个人发送本报告，则由该机构或个人为此发送行为承担全部责任。本报告不构成国金证券向发送本报告机构或个人的收件人提供投资建议，国金证券不为此承担任何责任。

此报告仅限于中国境内使用。国金证券版权所有，保留一切权利。

上海	北京	深圳
电话：021-80234211	电话：010-85950438	电话：0755-86695353
邮箱：researchsh@gjzq.com.cn	邮箱：researchbj@gjzq.com.cn	邮箱：researchsz@gjzq.com.cn
邮编：201204	邮编：100005	邮编：518000
地址：上海浦东新区芳甸路 1088 号 紫竹国际大厦 5 楼	地址：北京市东城区建国内大街 26 号 新闻大厦 8 层南侧	地址：深圳市福田区金田路 2028 号皇岗商务中心 18 楼 1806



【小程序】
国金证券研究服务



【公众号】
国金证券研究