

固态电池：具有技术颠覆潜力的新技术

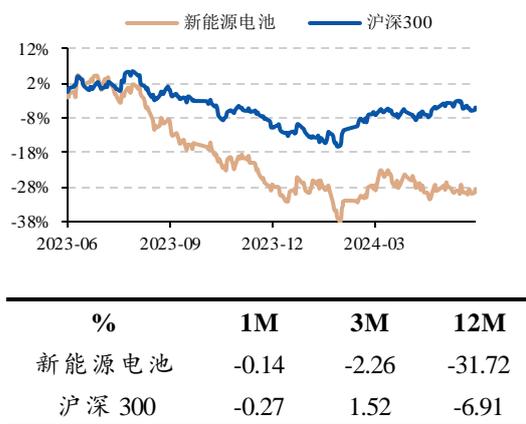
新能源电池新技术之五

2024年06月06日

评级 领先大市

评级变动： 维持

行业涨跌幅比较



杨鑫 分析师

执业证书编号:S0530524050001
yangxin13@hncasing.com

相关报告

- 1 新能源电池行业点评：相关企业获研发支持，全固态电池研发提速 2024-05-30
- 2 新能源电池行业 2024 年 5 月份月报：4 月半固态电池装车 369.0MWh 2024-05-21

重点股票	2023A		2024E		2025E		评级
	EPS (元)	PE (倍)	EPS (元)	PE (倍)	EPS (元)	PE (倍)	
宁德时代	10.03	20.35	11.25	18.14	13.41	15.22	买入
中科电气	0.06	162.50	0.47	20.74	0.75	13.00	买入
科达利	4.45	22.13	5.38	18.31	6.48	15.20	买入

资料来源：iFinD，财信证券

投资要点：

- **固态电池具有技术颠覆的潜力：**传统液态电池体系成熟，但难以出现大幅性能突破。从兼顾高能量密度和本征安全性两方面出发，以锂金属作为负极，使用稳定、不易燃烧的固态电解质的全固态锂离子电池将成为未来最有技术颠覆潜力的电池。双极堆叠的可能性、锂金属负极的使用能保证其具备大幅领先的能量密度，其能量密度可以轻松突破 400Wh/kg，固态电解质则能够保证优秀的安全性能。
- **固态电解质是固态电池成功应用的关键：**理想的固态电解质应该具有小到可以忽略不计的电子电导率、优良的 Li⁺电导率、良好的化学兼容性、宽的电化学稳定窗口、优异的热稳定性以及能够低成本的大规模生产等特点。通常来说，具有代表性的固态电解质包括硫化物固态电解质、氧化物固态电解质、金属卤化物固态电解质和聚合物固态电解质。
- **固态电解质各有特点，复合固态电解质可以实现优势互补，是最具发展潜力的方向：**聚合物电解质具有良好的界面相容性和机械加工性，但室温离子电导率低，限制其应用温度；无机氧化物电解质电导率较高，但存在刚性界面接触的问题以及严重的副反应，且加工困难；硫化物电解质电导率高，但化学稳定性差，可加工性不良。针对这些问题，目前复合固态电解质是最具发展潜力的体系，一方面，可以在聚合物电解质中引入惰性无机纳米粒子，改善聚合物电解质性能；另一方面，可以通过氧化物陶瓷或硫化物与聚合物进行复合，实现优势互补。复合固态电解质具有更高的离子电导率和力学性能，同时与电极具有更好的兼容性。
- **离子运输机制、锂枝晶生长机制、固-固界面问题是固态电池面临的三大问题：**明确高离子电导率的实现条件是发展高性能固态电解质、提高全固态电池充放电速度的关键，目前主要通过掺杂、开发纳米尺度结构以及界面工程等手段来改善离子电导率，但目前业界对于离子运输机制的理解程度还不够，这对于充放电速度提升是一个挑战；此外，固态电解质虽然具有高机械强度，但仍然难以完全抑制锂枝晶的生长和实现锂金属的均匀沉积，锂金属可能在负极表面形成枝晶，甚至在

固态电解质内部成核，导致电池短路，从而引发安全风险，这对固态电池的安全是一个较大的挑战；同时，由于缺少电解液的浸润，固-固界面问题直接影响固态电池的循环寿命等性能，尽管目前在工艺和材料维度有一些改进措施，但界面问题仍是固态电池最大的挑战。

- **全固态电池有望 2027 年开始量产装车：**2022 年以来，固态电池的研发和产业化取得了明显的进展，尤其是以卫蓝新能源和赣锋锂电等为代表的中国企业的半固态电池量产装车，标志着半固态电池已实现了产业化。我们预计固态电池的大规模生产和装车应用将在 2027 年左右开始到来。
- **2030 年固态电池市场规模超 2500 亿元：**预计到 2030 年全球固态电池的出货量将达到 614.1GWh，在整体锂电池中的渗透率预计在 10% 左右，其市场规模将超过 2500 亿元，主要出货电池仍然是半固态电池。作为固态电池最重要的组成部分，固态电解质在 2030 年的需求将超 6 万吨，市场规模超过 60 亿元。
- **投资建议：**固态电解质方面，建议关注固态电解质及其原料厂商【三祥新材】、【上海洗霸】、【东方锆业】等；正极材料方面，建议关注三元材料厂商【当升科技】、【容百科技】等；负极材料方面，建议关注【璞泰来】、【中科电气】等；电池方面，建议关注【宁德时代】、【金龙羽】、【鹏辉能源】、【赣锋锂业】等。维持行业“领先大市”评级。
- **风险提示：**固态电池技术攻关不及预期；半固态电池技术替代风险；上游原材料价格波动风险；半固态/固态电池产能释放不及预期。

内容目录

1 固态电池：理想的电池形态	5
1.1 传统液态电池体系成熟，但难以出现大幅性能突破.....	5
1.2 固态电池具有技术颠覆的性能潜力.....	6
2 固态电解质：固态电池成功应用的关键，复合电解质是最具潜力的发展方向	7
2.1 氧化物固态电解质：综合性能最优，加工性能差.....	9
2.2 硫化物电解质：性能优异，稳定性差.....	11
2.3 金属卤化物电解质：低成本，低电导率.....	12
2.4 聚合物电解质：加工简单，室温下离子传输效率低.....	13
3 固态电池发展面临的问题及解决策略	15
3.1 离子运输机制：制约充放电速度的关键.....	16
3.2 锂枝晶生长机制：固态电池安全性挑战.....	17
3.3 固-固界面问题：固态电池性能及安全性关键挑战.....	18
4 产业化进展及市场空间	20
4.1 固态电池技术成为热门概念，多元化发展.....	20
4.2 半固态已经量产装车，全固态 2027 年有望开始量产装车.....	23
4.3 市场空间：预计 2030 年出货超 600GWh，市场超 2500 亿元.....	24
5 重点企业	25
5.1 卫蓝新能源.....	25
5.2 清陶能源.....	26
5.3 赣锋锂电.....	28
5.4 宁德时代.....	29
5.5 辉能科技.....	30
6 投资建议	30
7 风险提示	31

图表目录

图 1：动力电池技术路线图.....	5
图 2：全固态锂电池的构造图.....	6
图 3：不同种类固态电解质性质图.....	8
图 4：几种典型的氧化物电解质结构.....	9
图 5：四方相 LLZO 晶体结构、锂离子分布、立方相 LLZO 晶体结构及锂离子分布....	10
图 6：LGPS 晶体结构图.....	12
图 7：以 Li_3YCl_6 为例的 P3m1 结构，(c)以 Li_3YBr_6 为例的 C2/m 结构.....	13
图 8：单离子导体化学结构式.....	14
图 9：固态电池发展面临的应用层面问题.....	15
图 10：全固态电池发展面临的核心科学问题.....	16
图 11：PVDF-LATP 复合固态电解质离子传输示意图.....	17
图 12：复合电解质中锂离子扩散路径示意图.....	17
图 13：固态电解质内部锂枝晶生长示意图.....	18
图 14：固态电池内部结构及阻抗来源.....	19
图 15：液态电解质 SEI 膜.....	19
图 16：固态电解质界面反应示意图.....	20

图 17: 固态电池论文发表数量.....	21
图 18: 各国固态电池论文及专利数量占比.....	21
图 19: 各国/地区内公司的固态电池产业化现状和未来计划.....	24
图 20: 固态电池出货量预测 (Gwh).....	25
图 21: 卫蓝新能源生产基地.....	26
图 22: 清陶能源目前主要产品.....	27
图 23: 智己 L6 搭载的固态电池.....	28
图 24: 超级半固态“新锋”电池.....	29
图 25: “新锋”电池性能表现.....	29
图 26: 宁德时代凝聚态电池.....	29
图 27: 辉能科技主要产品.....	30
表 1: 固态电池与液态电池特性比较.....	7
表 2: 主流电解质优缺点对比及改进策略.....	8
表 3: 不同类型硫化物固态电解质优缺点比较.....	11
表 4: 以结构划分的聚合物性能对比.....	14
表 5: 改善固态电解质离子传输速率技术手段.....	17
表 6: 抑制锂枝晶生长手段.....	18
表 7: 各国政府固态电池发展政策及计划.....	22
表 8: 企业固态电解质三大技术路线总结.....	23
表 9: 卫蓝新能源主要产品及参数.....	26

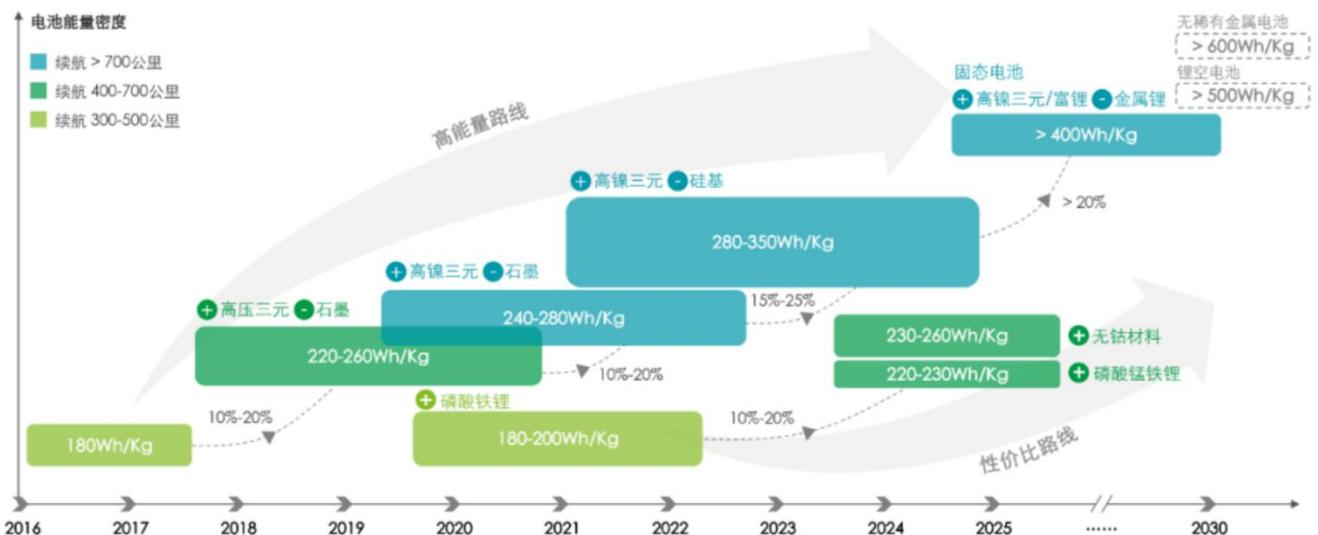
1 固态电池：理想的电池形态

1.1 传统液态电池体系成熟，但难以出现大幅性能突破

锂离子电池已经得到广泛应用，体系成熟：锂离子电池是一种在储能领域、动力电池及便携式电子设备中均得到广泛应用的一种储能器件，具有开路电压高、能量密度大、使用寿命长、无记忆效应、无污染及自放电小等优点，是目前综合性能最好的电池产品，也是可适用范围最广的电池产品。锂离子电池体系成熟，由正极、负极、电解液、隔膜等部分组成，其工作原理为：锂离子电池在充放电过程中，锂离子在正负极之间嵌入和脱出，同时伴随着电子在外电路中进行移动而形成外部电路的电流。充电时，电池正极生成锂离子，经过电解液移动到负极并嵌入到负极碳层的微孔中。放电时，嵌在负极的锂离子经过电解液移动回到正极。

传统液态锂离子电池无法同时满足安全和更高能量密度的要求：电动汽车和储能等领域对电池的需求日益增长，这对电池能量密度和安全性能也提出了越来越高的要求。根据工信部 2020 年制定的《节能与新能源汽车技术路线图 2.0》，单体电芯比能量要在 2025 年达到 400Wh/kg，2030 年达到 500Wh/kg。尽管目前电池的研究和工业化已经取得了阶段性的成功，但是锂电池的能量密度仍不满足需求；目前行业内通常采用高镍正极和掺硅负极的搭配来提升能量密度。然而，一方面高镍体系会带来安全性能的降低，另一方面即使采用高镍体系，传统的液态锂离子电池体系也难以满足 400Wh/kg 的单体电芯能量密度需求。此外从安全性能的角度来看，常规的液态有机电解质具有易燃、易泄漏等缺点，容易引发起火、爆炸等安全问题。

图 1：动力电池技术路线图



资料来源：锂电派，德勤，财信证券

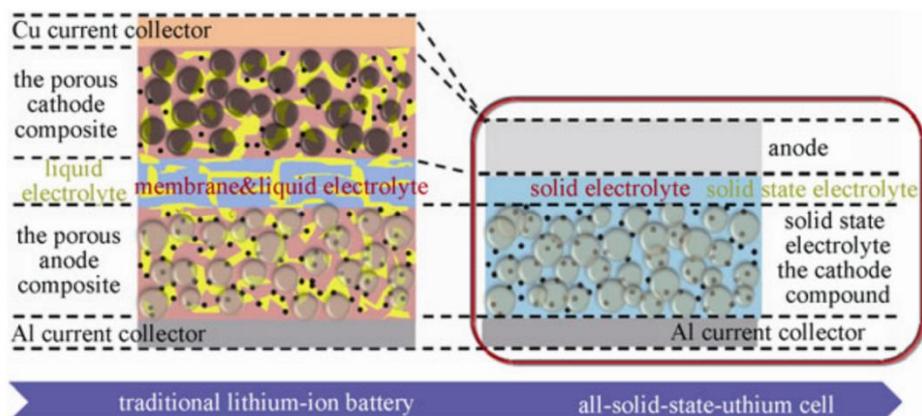
1.2 固态电池具有技术颠覆的性能潜力

锂金属负极是打破能量密度瓶颈的关键：提高电池系统的能量密度可以通过提升成组效率和电芯单体能量密度来实现，宁德时代的CTP方案和比亚迪的刀片电池方案即通过提升成组效率来提升能量密度，而提高电池单体能量密度极具前景的策略之一就是使用质量更轻的锂金属（相对原子质量为6.941，密度为 0.534g/cm^3 ）作为负极材料。锂金属作为负极材料具有高达 3860mAh/g 的理论比容量，是石墨负极的10倍，同时还具有最低的电极电势（ $-3.04\text{V vs. Li/Li}^+$ ），是下一代可充电电池最有前景的电极材料。然而，极度活跃的锂金属化学稳定性差，且在循环过程中锂金属不均匀沉积和剥离可能形成锂枝晶，进一步刺穿隔膜从而造成电池内短路引发安全问题。

使用固态电解质才能从根本上解决安全问题及提升对锂金属的兼容性：使用液态电解液的锂离子电池，不可避免地存在热失控问题，这也是近年来大多数纯电动汽车发生严重自燃、爆炸事故的罪魁祸首。一方面，目前商用锂离子电池使用的电解液一般由有机碳酸酯类有机溶剂与锂盐组成，这些有机溶剂包括碳酸丙烯酯(PC)、碳酸二甲酯(DMC)、碳酸二乙酯(DEC)和碳酸乙烯酯(EC)等，在使用时均存在氧化分解、挥发和泄漏的风险；另一方面，若采用锂金属负极，活泼的锂金属在循环过程中容易与电解液发生副反应，持续消耗电解液和电极材料，在电池容量下降的同时诱生锂枝晶，进而造成严重的安全问题。目前电池单体的热失控难以杜绝，而电池系统级别的防止热扩散设计也仅能防止单体电芯热失控蔓延。如果要从根本杜绝安全问题，则要用新的材料替代当前的液态有机电解液，而使用不可燃且坚固的固态电解质来代替有机液态电解液不仅可以消除燃烧爆炸的风险，同时也可以大幅提升对锂金属的兼容性和电池的能量密度。

固态电池兼顾能量密度和安全性，具有技术颠覆的潜力：从兼顾高能量密度和本征安全性两方面出发，以锂金属作为负极，使用稳定、不易燃烧的固态电解质的全固态锂离子电池将成为未来最有技术颠覆潜力的电池。双极堆叠的可能性、锂金属负极的使用能保证其具备大幅领先的能量密度，固态电解质则能够保证优秀的安全性能。

图 2：全固态锂电池的构造图



资料来源：《全固态锂电池技术的研究现状与展望》，财信证券

表 1：固态电池与液态电池特性比较

类别	全固态电池		传统锂离子电池	
电池结构				
电解质	全无机类材料 (硫化物、氧化物等)	高分子聚合物材料 (PEO 基等)	有机电解液 (PC 等聚 碳酸酯+LiPF ₆ 等)	聚合物浸润有机电解 液
优点	安全性极高 循环寿命长 适合长时间储存 能量密度高 高温适应性好	安全性较高 可卷对卷生产 具有柔性加工特性	广泛使用于 3C 产品 储能领域有示范应用	在小型电子产品有应 用
缺点	功率密度偏低 成本偏高	功率密度偏低 成本偏高 温度适应性不佳 循环寿命待提升	含有电解液，高温下有挥发与燃烧可能 因有电学位窗口限制，放电电压无提升空间	

资料来源：《全固态锂电池技术的研究现状与展望》，财信证券

2 固态电解质：固态电池成功应用的关键，复合电解质是最具潜力的发展方向

固态电解质是全固态电池成功应用的关键因素。一般来说，理想的固态电解质应该具有小到可以忽略不计的电子电导率 ($<10^{-10} \text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)、优良的 Li^+ 电导率 ($>1 \text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$)、良好的化学兼容性、宽的电化学稳定窗口、优异的热稳定性以及能够低成本的大规模生产等特点。通常来说，具有代表性的固态电解质包括硫化物固态电解质、氧化物固态电解质、金属卤化物固态电解质和聚合物固态电解质。

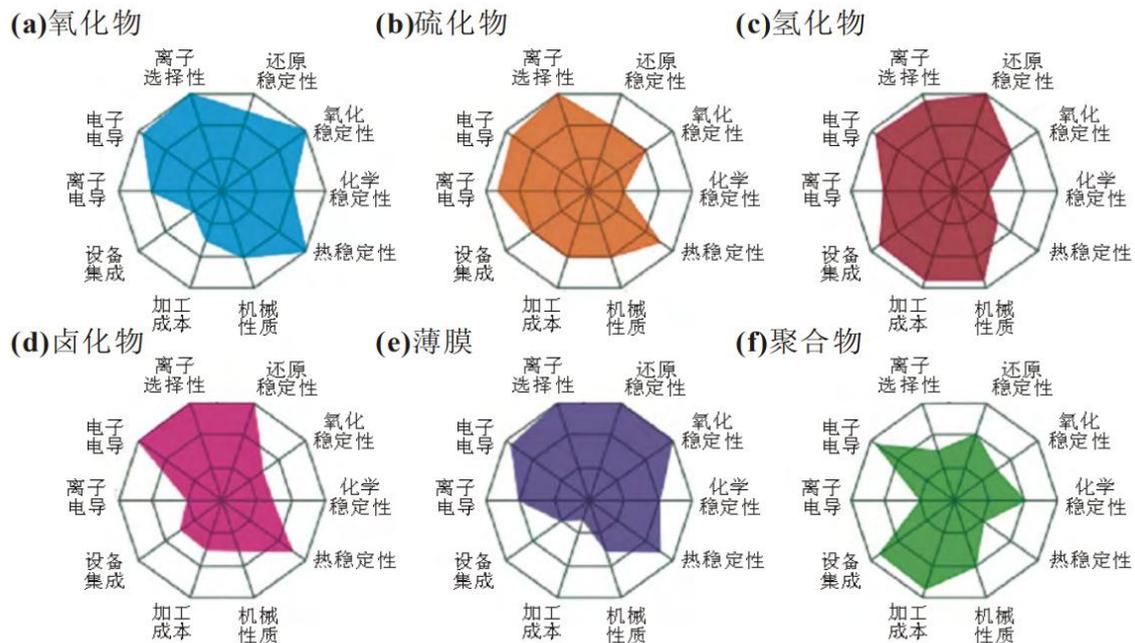
固态电解质各有特点，复合固态电解质可以实现优势互补，是最具发展潜力的方向：聚合物电解质具有良好的界面相容性和机械加工性，但室温离子电导率低，限制其应用温度；无机氧化物电解质电导率较高，但存在刚性界面接触的问题以及严重的副反应，且加工困难；硫化物电解质电导率高，但化学稳定性差，可加工性不良。针对这些问题，目前复合固态电解质是最具发展潜力的体系，一方面，可以在聚合物电解质中引入惰性无机纳米粒子，改善聚合物电解质性能；另一方面，可以通过氧化物陶瓷或硫化物与聚合物进行复合，实现优势互补。复合固态电解质具有更高的离子电导率和力学性能，同时与电极具有更好的兼容性。

表 2：主流电解质优缺点对比及改进策略

类型	优点	缺点	离子电导率 (s/cm)	改进方向	主要布局企业
聚合物	① 低成本 ② 易加工 ③ 高灵活性	① 离子电导率低 ② 氧化电压低 ③ 难以抑制锂枝晶形成	$10^{-7} \sim 10^{-4}$	① 抑制锂枝晶：人造 SEI 膜、薄锂电极 ② 提高电流电压耐受力：电解质复合化、单离子导体	SEEO、Solid Energy、SolidPower、Bolloré
氧化物	① 机械稳定性 ② 化学稳定性 ③ 温度稳定性 ④ 氧化电位高	① 高烧结温度 ② 材料脆性 ③ 复合正极离子电导率低 ④ 薄膜制备困难 ⑤ 锂金属稳定性低	$10^{-6} \sim 10^{-3}$	① 提高材料韧性：与聚合物复合、添加剂或元素掺杂 ② 提高离子电导率：添加剂或元素掺杂，与凝胶电解质混用	卫蓝新能源、辉能科技、清陶能源、赣锋锂业、SONY、SAKTI3、Quantum Scape
硫化物	① 高离子电导率 ② 加工性能较好	① 高压正极材料兼容性差 ② 敏感易氧化，制备难度较高	$10^{-4} \sim 10^{-2}$	① 提高电解质稳定性：涂层和表面处理 ② 降低成本：扩大规模	丰田、松下、LG 化学、出光兴产、日立造船、宁德时代

资料来源：《固态电池发展现状综述》，财信证券

图 3：不同种类固态电解质性质图

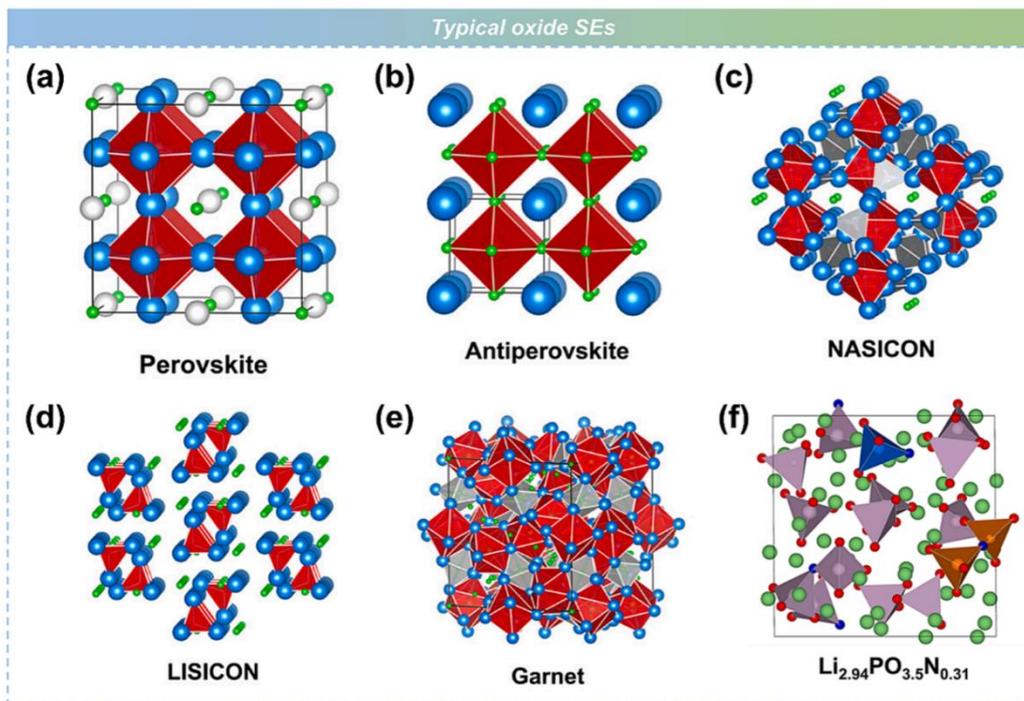


资料来源：《固态电池研究进展》，财信证券

2.1 氧化物固态电解质：综合性能最优，加工性能差

氧化物固态电解质性能最全面，但刚性不足：氧化物固态电解质由于具有较高的热稳定性和离子电导率在固态电池中具有显著的优势。然而，为了实现商业化应用，还需要解决界面阻抗、加工难度和成本等问题。氧化物固态电解质根据形态不同可以分为晶态和非晶态。晶态氧化物根据结构不同主要分为钙钛矿型、反钙钛矿型、钠超离子导体型和石榴石型。

图 4：几种典型的氧化物电解质结构



资料来源：《Solid-state lithium batteries—from fundamental research to industrial progress》，财信证券

注：a)钙钛矿型；b)反钙钛矿结构；c)NASICON；d)Lisicon 型；e)Garnet 型；f) $\text{Li}_{2.94}\text{PO}_{3.5}\text{N}_{0.31}$

钙钛矿型：钙钛矿型结构固态电解质的结构与 CaTiO_3 的结构相同，其结构式为 ABO_3 ($\text{A}=\text{Li}, \text{La}$; $\text{B}=\text{Ti}$)。典型的钙钛矿型 $\text{Li}_{3-x}\text{La}_{(2/3)-x}\square_{(1/3)-2x}\text{TiO}_3$ (LLTO, \square 为空位) 具有高体积 Li^+ 电导率 (室温下为 $1 \times 10^{-3} \text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)，而高晶界电阻导致其总 Li^+ 电导率低 ($2 \times 10^{-5} \text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)，LLTO 的晶界电导率可以通过添加材料或优化 Li 含量和熔炼温度来提高。虽然这种材料具有适当的电化学窗口和高氧化稳定性，但其会由于 Ti^{4+} 的还原而与锂金属发生反应。

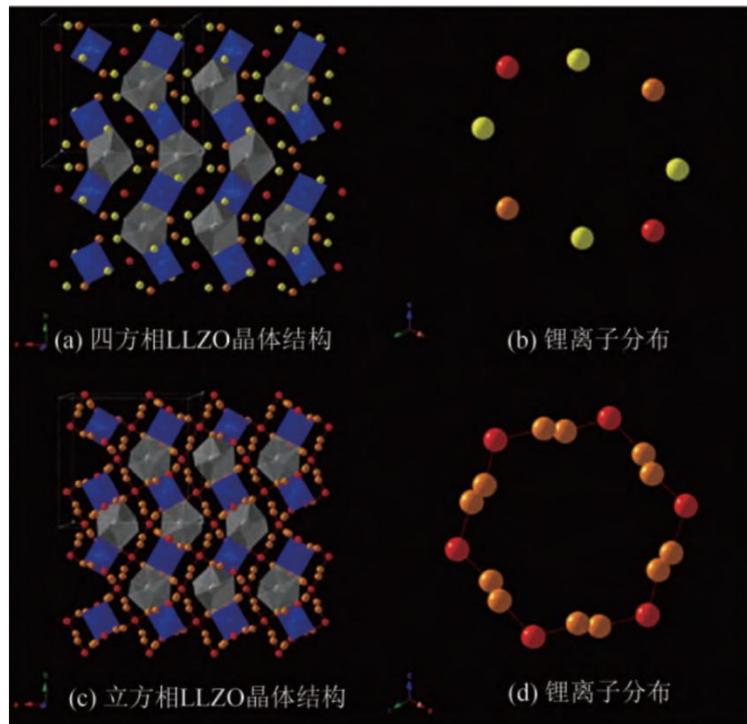
反钙钛矿型：2012 年，分子式为 $\text{X}^3\text{B}^2\text{A}$ 的富锂反钙钛矿 (LiRAPs) (例如： Li_3OCl) 被研究人员发现，反钙钛矿的阴离子亚晶格呈体心立方 (bcc) 堆积模式， Li^+ 离子占据立方晶面中心位置，形成八面体单元，而这种结构恰好可以提升离子迁移率。因此，LiRAPs 通常具有约 $10^{-3} \text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 的高 Li^+ 电导率。通过卤素混合， $\text{Li}_3\text{OCl}_{0.5}\text{Br}_{0.5}$ 的 Li^+ 电导率可达

1.94mS · cm⁻¹。此外，通过二价阳离子掺杂 Li₃OCl, Li_{3-2x}M_xOCl (M=Mg、Ca、Sr 或 Ba) 玻璃电解质 Li⁺电导率在 25℃时可达到 25mS · cm⁻¹。除了相当高的 Li⁺电导率外，LiRAPs 还具有对锂金属等低电位阳极的高稳定性。然而，LiRAP 对水分敏感，难以在大气中合成。

钠超离子导体型 (NASICON 型)：钠超离子导体型锂离子电解质的化学通式为 A_xMM'(XO₄)₃，其中 A 代表 Li、Na、K、Mg 等碱金属和碱土金属元素，M 和 M'代表 Fe、Ti、Zr 等过渡金属元素，X 代表 S、P、Si 等非金属元素，研究较为广泛的主要有 Li_{1+x}Al_xTi_{2-x}(PO₄)₃ (LATP) 等。NASICON 型化合物的晶体结构如图 4 所示，其主要由 M/M'与 O 组成的[MO₆]和[M'O₆]八面体，以及 X 和 O 组成的[XO₄]四面体组成。

石榴石型：另一种研究较多的氧化物固态电解质材料具有石榴石构型，目前研究最常见的是锂镧锆氧 Li₇La₃Zr₂O₁₂ (LLZO)。LLZO 晶体结构较为复杂，其存在两种相态，室温下为四方相，在 100~150℃会发生相变，形成立方相。在两种相态的 LLZO 中，锂离子在相应的位点之间不断迁移，实现高效运输。如图 4(a)、(b)所示，在四方相 LLZO 中，红、橙、黄色的球分别代表处于 Li1 (8a) 位、Li2 (16f) 位、Li3 (32g) 位的锂离子，这些锂离子两两相距较远，且锂离子所处的三种位置被完全占据。而如图 4(c)、(d)所示，在立方相 LLZO 中，红、橙两色分别代表处于 Li1 (24d) 位、Li2 (96h) 位的锂离子。由于这些锂离子相距较近，传输距离短，且锂离子所处的两种位置并未被完全占据，所以立方相 LLZO 具有更高的锂离子迁移率，导电性能更加优异。

图 5：四方相 LLZO 晶体结构、锂离子分布、立方相 LLZO 晶体结构及锂离子分布



资料来源：《全固态锂离子电池的研究进展与挑战》，财信证券

2.2 硫化物电解质：性能优异，稳定性差

硫化物电解质性能最优异，但稳定性不足：硫化物电解质因其离子电导率高、电化学窗口宽、机械性能好、晶界抗阻低等优异性能，被认为是目前极具发展潜力的固态电解质，相比氧化物固态电解质，硫化物固态电解质有着更好的离子电导率，这使得其在固态电池的应用中能表现出更优异的倍率性能，此外某些硫化物电解质与锂的电化学窗口在 10V 以上，对高压正极材料兼容性强。但由于硫化物空气稳定性差，在空气中遇水反应生成有毒气体 H_2S ，导致电解质结构被破坏和电化学性能衰减，这使得其制备条件较为苛刻，制造成本高。硫化物电解质的第二个困境在于其热稳定性较差，在高温下易发生相变，影响其稳定性和离子电导率。目前主流研究的硫化物电解质主要有三类：玻璃陶瓷态电解质、硫代锂快离子导体(Thio-LISICON)、硫银锗矿型 Li_6PS_5X ($X = Cl, Br, I$)，其性能各异。

表 3：不同类型硫化物固态电解质优缺点比较

材料	优点	缺点	离子电导率 ($S \cdot cm^{-1}$)
玻璃-陶瓷态电解质	离子电导率较高	合成步骤复杂	$>10^{-3}$
Thio-LISICON 型电解质	合成简单，热稳定性好，电子电导率小	离子电导率相对较低	$>10^{-3}$
硫银锗矿型	电化学稳定性好	空气稳定性较差	$>10^{-3}$

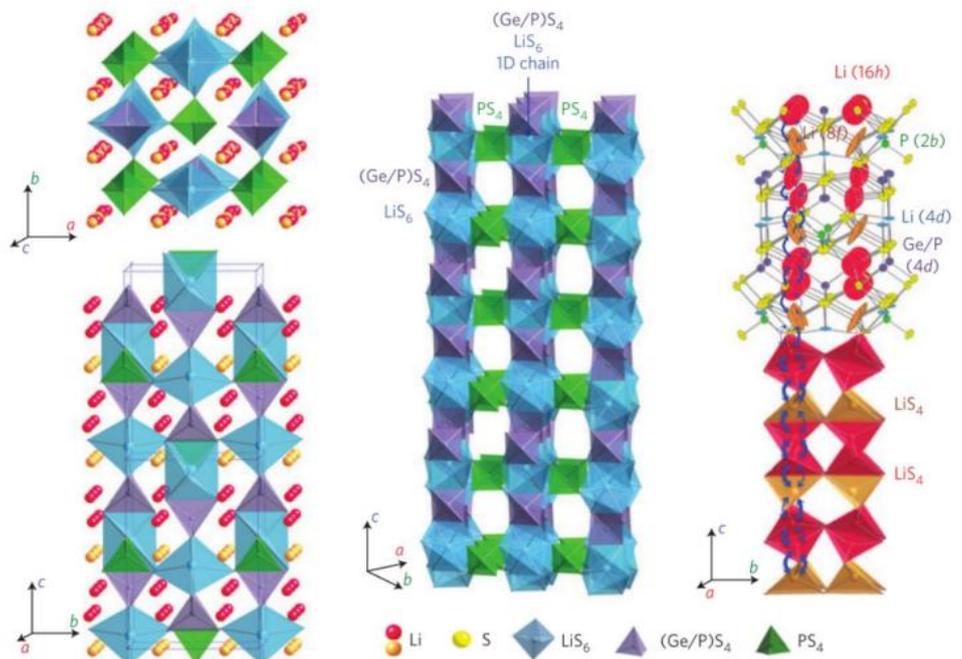
资料来源：《“双碳”背景下固态锂电池用硫化物固态电解质的发展趋势》，财信证券

玻璃-陶瓷态硫化物：玻璃陶瓷态硫化物电解质是一类具有独特结构和性能的固态电解质，通过热处理非晶态的玻璃态前驱体使得部分材料发生结晶，从而在非晶态的玻璃基体中形成分散的纳米尺度的晶体相，形成的晶体相能提供更多的离子传输通道，这使得玻璃陶瓷态硫化物的离子电导率更高，但由于在制备过程中需要额外的热处理步骤来形成晶体相，其制备工艺更复杂。

Thio-LISICON 型 (LGPS)：在 Li_2S-GeS_2 、 $Li_2S-GeS_2-Ga_2S_3$ 和 Li_2S-GeS_2-ZnS 体系中发现的 Thio-LISICON 结构来自 LISICON 型的 $\gamma-Li_3PO_4$ 氧化物电解质，通过用 S 取代 O 得到，由于 S 的电负性比 O 低，半径更大，可降低 Li^+ 结合能，拓宽 Li^+ 迁移通道。因此硫化物 Thio-LISICON 电解质通常具有比氧化物 LISICON 电解质更高的离子电导率；2011 年报道了一种超离子固体电解质 $Li_{10}GeP_2S_{12}$ (LGPS)，其离子电导率高达 $1.2 \times 10^{-2} S \cdot cm^{-1}$ ，甚至超过了传统的电解液 ($1.0 \times 10^{-2} S \cdot cm^{-1}$)。LGPS 较高的离子电导率得益于其具有三维框架结构，LGPS 由 $(Ge_{0.5}P_{0.5})S_4$ 四面体、 PS_4 四面体、 LiS_4 四面体和 LiS_6 八面体组成。但是由于合成需要的 Ge 成本昂贵，研究者于是用更丰富的 Si 及 Sn 取代锗，合成出成本更低廉 Li_4SiS_4 及 Li_4SnS_4 ，发现 Li_4SiS_4 在常温下的离子电导率仅为 $\approx 10^{-8} S/cm$ ，相对较低， Li_4SnS_4 的离子电导率在 $100^\circ C$ 时为 $3 \times 10^{-4} S/cm$ ，在 $20^\circ C$ 时下降到 $7 \times 10^{-5} S/cm$ ，

电化学稳定性较差。

图 6: LGPS 晶体结构图



资料来源:《硫化物基固态电解质及其与正极界面的基础研究》, 财信证券

硫银锗矿型硫化物: 硫银锗矿型硫化物因其低成本和高室温 Li^+ 电导率 ($>10^{-3} \text{ S/cm}$) 等特性, 被认为是另一种有前途的硫化物固态电解质; 硫银锗矿型硫化物电解质主要有 Li_7PS_6 和 $\text{Li}_6\text{PS}_5\text{X}$ ($\text{X}=\text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$) 两类。其中 Li_7PS_6 以高温相和低温相存在(分别为 $\text{LT-Li}_7\text{PS}_6$ 和 $\text{HT-Li}_7\text{PS}_6$), 两相的离子电导率均极低($\text{LT-Li}_7\text{PS}_6$ 的电导率为 $1.6 \times 10^{-6} \text{ S/cm}$, $\text{HT-Li}_7\text{PS}_6$ 的电导率为 $3.0 \times 10^{-5} \text{ S/cm}$); 另一种结构的硫银锗矿 $\text{Li}_6\text{PS}_5\text{X}$ ($\text{X}=\text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$) 具有立方 F43m 面中心对称(FCC)结构, 具有优良的 Li^+ 离子传输效率。

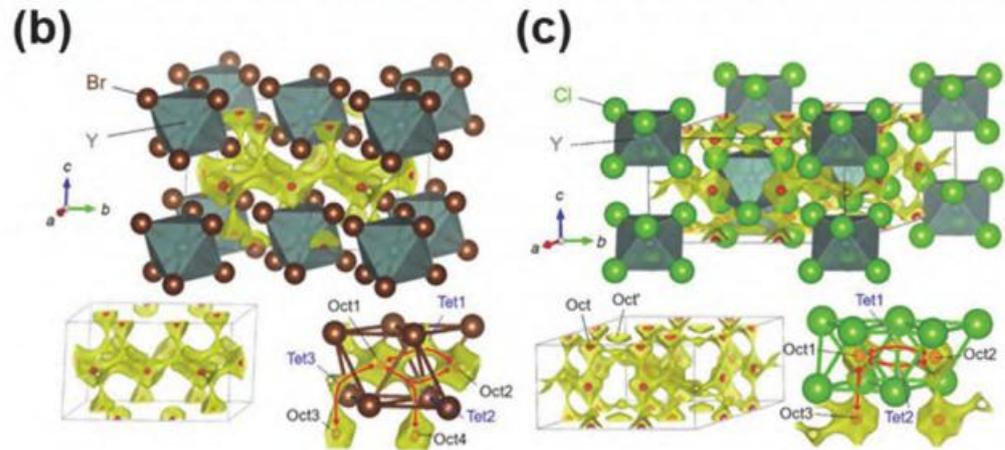
2.3 金属卤化物电解质: 低成本, 低电导率

金属卤化物电解质电化学窗口宽, 但电导率低: 金属卤化物电解质兼顾了高氧化稳定性和宽电化学窗口的同时有部分材料兼顾了离子电导率。作为一类新兴的无机固态电解质材料, 卤化物基固态电解质在室温下的离子电导率能达到 $10^{-3} \text{ S cm}^{-1}$, 且理论离子电导率可达 $10^{-2} \text{ S cm}^{-1}$ 量级, 理论模拟结果表明, 相比其他固态电解质, 卤化物一般具有较高的氧化还原电位, 与高压正极材料具有更好的兼容性, 可以实现在高电压窗口下的稳定循环。尽管目前卤化物电解质的研究进展较快, 但是其低离子电导率、正极材料兼容性、空气/潮湿环境稳定性等问题还有待进一步改善, 常见的卤化物电解质一般有三类: 1) $\text{Li}_a\text{-M-X}_6$; 2) $\text{Li}_a\text{-M-X}_4$ 及 3) $\text{Li}_a\text{-M-X}_8$ 类卤化物($\text{M}=\text{过渡金属元素}$)其中, 电导率达到 $10^{-3} \text{ S cm}^{-1}$ 的卤化物电解质多为 $\text{Li}_a\text{-M-X}_6$ 类电解质以及部分 $\text{Li}_2\text{-M-X}_4$ 类电解质。

$\text{Li}_a\text{-M-X}_6$ 类: $\text{Li}_a\text{-M-X}_6$ 电解质通常由 IIIB 族金属离子构成, 具有较高的室温离子电

导率。它们的锂离子传导特性主要受过渡金属离子和 Li^+ 离子共同占据的八面体点位影响。典型的晶体结构包括三方晶系(hcp-T)、正交晶系(hcp-O)以及立方晶系(ccp)。

图 7：以 Li_3YCl_6 为例的 P3m1 结构，(c)以 Li_3YBr_6 为例的 C2/m 结构



资料来源：《卤化物固态电解质研究进展》，财信证券

$\text{Li}_a\text{-M-X}_4$ 类：由二价金属离子 M 构成的正尖晶石相，如 Li_2MnCl_4 等以及由三价及其他价态金属离子 M 形成的卤化物电解质。这类电解质的离子电导率较低，且部分在常温下无法稳定存在。

$\text{Li}_a\text{-M-X}_6$ 类：以 suzuki 晶格为主， MX_6 结构中的八面体相互分离，所有八面体空隙都被 Li^+ 占据，因为金属 M 的取代量低，提供的 Li^+ 传输空位较少，所以这类电解质的离子电导率一般不高。

2.4 聚合物电解质：加工简单，室温下离子传输效率低

聚合物固态电解质技术成熟，室温下电导率低：固态电解质与电极界面接触良好，通常具有良好的柔韧性和可塑性，这使得其加工简单，它们可以适应不同的电池设计，包括柔性和可穿戴电池；此外复合聚合物电解质材料可以提供比液态电解质更宽的电化学稳定窗口，对高压正极材料的兼容性更强。由于聚合物基材料易于加工，在实现高比能固态锂电池产业化方面具有明显优势，因此研发高性能聚合物固态电解质也成为研究人员关注的焦点。但不得不提及的是许多聚合物固态电解质在室温下的离子电导率较低，这限制了电池在低温下的性能；此外在电池充放电过程中，聚合物固态电解质可能会发生体积变化和膨胀，这可能导致电解质层的破裂或与电极的分离，这严重影响了电池的循环性能和安全性；根据聚合物的结构特性，聚合物电解质通常被分为三种主要类型：固态聚合物电解质 (SPEs)、凝胶聚合物电解质 (GPEs) 和复合聚合物电解质 (CPEs)。

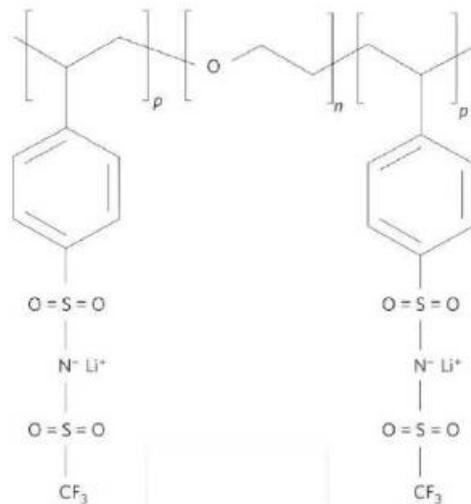
表 4：以结构划分的聚合物性能对比

聚合物种类	固态	凝胶态	复合态
主要成分	聚合物基体+锂盐	聚合物基体+液态增塑剂	聚合物基体+无机填料
性能	<p>优点：机械性能优异，便于加工</p> <p>缺点：室温下电导率低，电化学窗口窄</p>	<p>优点：电导率优异</p> <p>缺点：基体与增塑剂相容性差，界面稳定性差</p>	<p>优点：高电导率，宽电化学窗口</p> <p>缺点：界面阻抗高，机械强度差</p>

资料来源：《聚合物基固态电解质研究进展》，财信证券

固态聚合物电解质：SPEs 是由固态聚合物基体和溶解在其中的锂盐或其他离子盐组成，与液态电解质 (LEs) 相比，固态聚合物电解质挥发性更低，机械性能更优异，电解质泄露的风险更低，此外柔性 SPEs 相对于无机固态电解质，其与电极界面接触良好，成本更低，便于加工，更容易实现大规模生产。然而几乎所有 SPEs 在室温下的 Li^+ 电导率都非常有限 (10^{-7} — 10^{-5}S cm^{-1})，锂离子迁移数低 ($t_{\text{Li}^+} < 0.5$)，并且电化学窗口狭窄，这限制了其在固态电池的广泛应用。

图 8：单离子导体化学结构式



资料来源：《固态聚合物电解质/高电压正极界面构筑及固态电池性能研究》，财信证券

凝胶聚合物电解质：GPEs 是一种介于液态和固态之间的电解质，其中聚合物链形成了一个三维网络，而电解质盐则溶解在这个网络中。GPEs 中的液态增塑剂负责提供离子传输通道，而聚合物基质则起到提供结构支撑和抑制液态泄露的作用，这种结构使得 GPEs 既保持了聚合物的高机械强度，又具有较高的离子电导率。GPEs 拥有高室温 Li^+ 电导率 (超过 10^{-3}S cm^{-1})，然而液态成分仍然会引起一定的安全问题，在这方面使用不易燃且热稳定的离子液体的离子凝胶电解质在一定程度上能提高电池的安全性，此外聚合物基质和液态增塑剂之间的相容性较差、GPEs 与电极材料的界面稳定性等问题也可能影响以 GPEs 作电解质的固态电池的长期性能。

复合聚合物电解质：复合聚合物电解质 (CPEs) 是由聚合物基体和无机填料组成的。CPEs 结合了聚合物和无机 SEs 的优点，向 SPEs 中添加无机填料（特别是无机 SEs）可以显著提高其室温 Li^+ 电导率 ($\sigma > 10^{-4} \text{ S cm}^{-1}$)。此外，无机填料还可以提升电池的机械性能阻止电池内部的短路和燃烧等安全问题。具有更宽电化学稳定窗口的 CPEs 可以更好地抵抗高压阴极和 Li 阳极接触时的自降解，更重要的是，由于 CPEs（通常为 PEO/PVDF(HFP)/PTFE）的优异延展性和加工性，它们易于被加工成薄 SE 膜，这使得其大规模生产和应用在柔性电子设备中处于有利地位，但界面问题（无机填料可能影响电解质与电极的界面接触导致界面阻抗增加）及机械性能问题（虽然其柔韧性较好，但 CPEs 的机械强度不如纯 SPEs）也成为目前的技术痛点。

3 固态电池发展面临的问题及解决策略

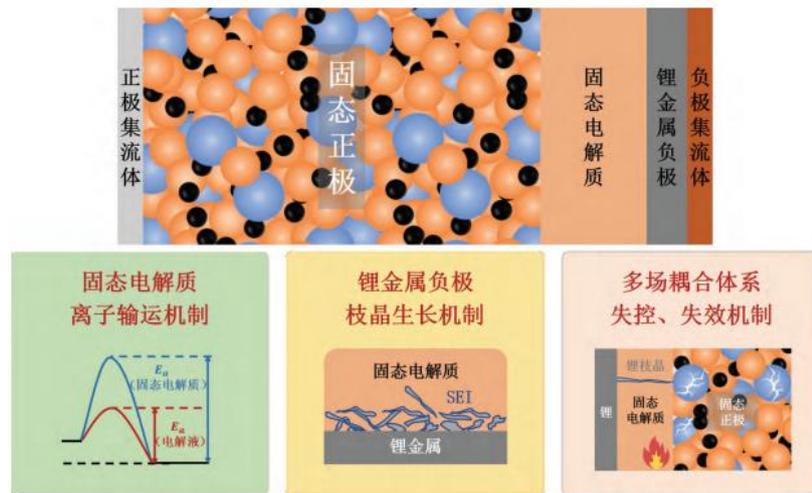
离子运输机制、锂枝晶生长机制、固-固界面问题是固态电池面临的三大问题：尽管固态电池能量密度与安全性占优，然而固态电池内部固-固界面能垒高导致锂离子传输速率低、锂枝晶生长、界面反应、以及锂金属和固体电解质(SE)之间的物理接触等仍然存在问题，导致成品固态电池充放电速度差，循环寿命低于传统液态电池，加之当前固态电池制造工艺不成熟等挑战可能会限制固态电池整体性能，阻碍全固态电池的广泛应用。

图 9：固态电池发展面临的应用层面问题



资料来源：《下一代动力电池技术：固态锂离子电池前景几何？》，财信证券

图 10：全固态电池发展面临的核心科学问题



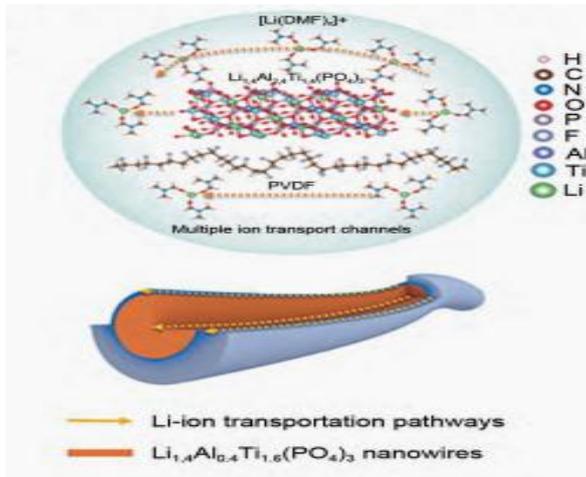
资料来源：《全固态电池的研究进展与挑战——以表征技术和理论机制的突破推动固态电池的原始创新》，财信证券

3.1 离子运输机制：制约充放电速度的关键

高离子电导率是提高全固态电池充放电速度的关键： 固态电解质的离子电导率和固态电池多尺度界面性质共同决定固态电池的电化学性能，相比之下，离子在固态电池界面的迁移相对缓慢，这也是提高电化学性能的关键所在。当前固态电池面临的主要应用瓶颈包括较慢的充放电速度和较快的容量衰减，这与固态电解质的物理化学性质密切相关。与液态电解质不同，固态电解质中离子间相互作用力强，离子迁移能垒高（是液体的 10 倍以上），其导致离子电导率低。因此明确高离子电导率的实现条件是发展高性能固态电解质、提高全固态电池充放电速度的关键。

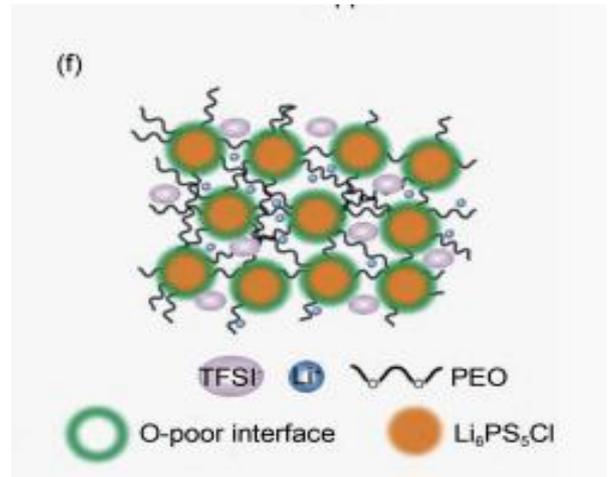
离子运输性能取决于在表界面的运输速度： 固态电解质中的离子运输性能由离子在相、表界面中的运输过程共同决定，在多晶固态电解质中，表界面离子运输（晶界和跨晶界离子运输）被认为是离子运输过程中的限速步骤。但目前对表界面的结构组分以及运输机理的研究尚不充分，需要业界继续发展更为先进的表征技术和计算方法以深入研究晶格动力学和表界面的离子传输机理。

图 11: PVDF-LATP 复合固态电解质离子传输示意图



资料来源:《固体核磁共振技术解析固态电池离子运输机制研究进展》, 财信证券

图 12: 复合电解质中锂离子扩散路径示意图



资料来源:《固体核磁共振技术解析固态电池离子运输机制研究进展》, 财信证券

目前主要通过掺杂、开发纳米尺度结构以及界面工程等手段来改善离子电导率: 目前主要通过掺杂、开发纳米尺度结构以及界面工程等手段来改善离子电导率, 近年来也有研究发现体相中电导率的优化可以通过调控晶体结构特点实现, 比如晶格体积、运输瓶颈尺寸、晶格畸变、缺陷等。总体来说, 目前业界对于离子运输机制的理解远远不够, 不同固态电解质体系的离子运输机制也存在较大的差异, 仍需要对离子运输过程进行详尽且全面的研究, 从而揭示可在各类固态电解质体系中使用的离子运输机制。

表 5: 改善固态电解质离子传输速率技术手段

掺杂/合金化	纳米结构化	界面工程
通过掺杂或合金化来增加固态电解质中的离子浓度和晶格缺陷, 从而提高离子传输效率	开发具有纳米尺度结构的固态电解质, 以缩短离子的传输路径和增加晶格缺陷, 促进离子传输	通过界面涂层或改性技术, 减少电极与固态电解质之间的界面阻抗, 提高离子传输效率

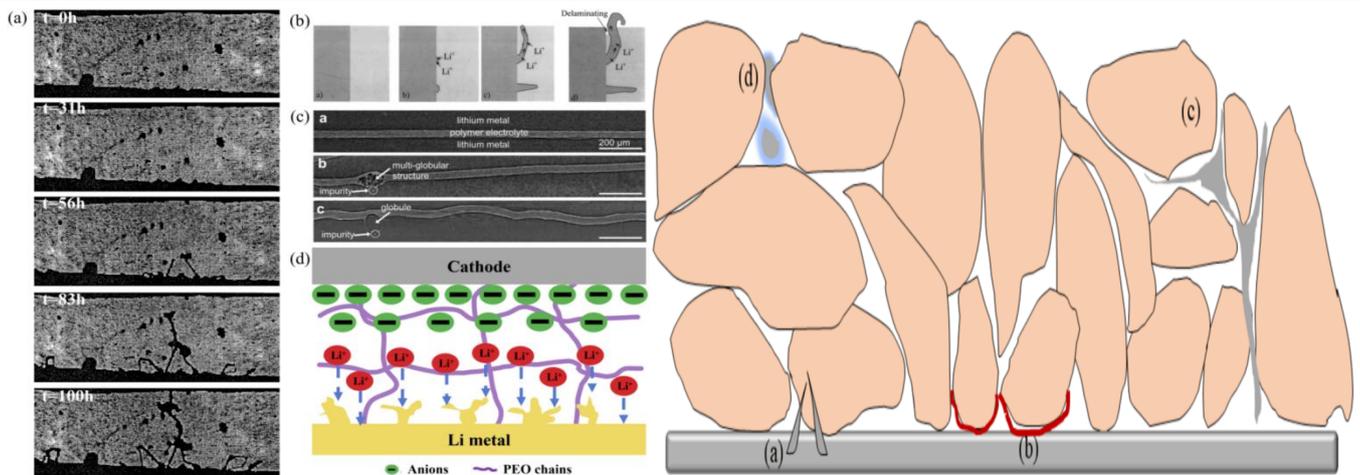
资料来源:《固态电解质锂离子运输机制研究进展》, 财信证券

3.2 锂枝晶生长机制: 固态电池安全性挑战

锂枝晶在电池内部生长易引发安全风险: 固态电解质虽然具有高机械强度, 但仍然难以完全抑制锂枝晶的生长和实现锂金属的均匀沉积。锂金属可能在负极表面形成枝晶, 甚至在固态电解质内部成核, 导致电池短路, 从而引发安全风险。

根据著名的 Monroe 和 Newman 模型, 在基于聚合物电解质的锂金属电池体系中, 当固态电解质的剪切模量高于锂金属剪切模量的两倍时, 可以抑制锂枝晶的生长。基于此理论, 高剪切模量的无机固态电解质被认为能有效解决锂金属负极的枝晶问题。然而, 对于剪切模量较高的无机固态电解质, 其在有限的电流密度下循环时却也容易形成锂枝。

图 13：固态电解质内部锂枝晶生长示意图



资料来源：《Solid-state batteries encounter challenges regarding the interface involving lithium metal》，财信证券

添加剂及结构设计可抑制锂枝晶的生长：对于聚合物固态电解质而言，其柔软的特性很难阻止枝晶的形成，但是也可以通过提高离子导电性、添加无机填料、添加额外的聚合物等方式来改善锂枝晶的形成；而对应无机固态电解质而言，可以通过改变微观结构缺陷、提高相对密度、降低电子导电率、管理电流密度等方式来抑制锂枝晶的形成。

表 6：抑制锂枝晶生长手段

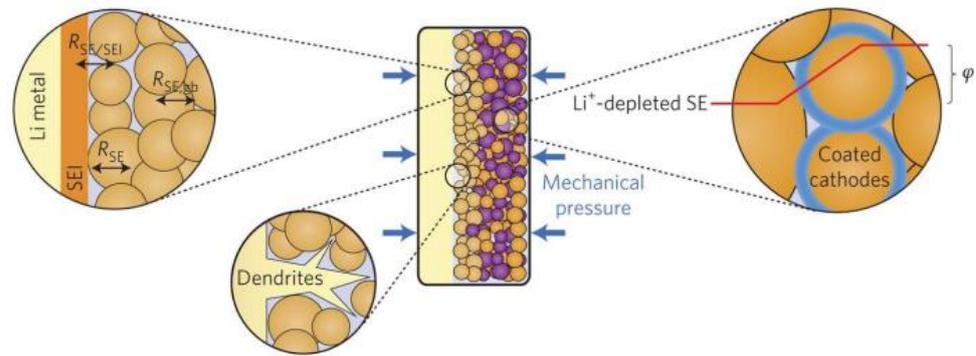
聚合物	无机物（氧/硫化物）
添加剂和涂层： 在固态电解质中添加特定的化学添加剂或在电极表面施加保护层，以抑制锂枝晶的生长	多层电解质结构： 研究多层固态电解质结构，通过不同材料的组合来抑制锂枝晶的穿透
界面工程： 通过改善固态电解质与电极之间的界面接触，减少界面缺陷，可以降低锂枝晶形成的风险	电池设计： 采用电池设计策略，如控制充放电速率和电池内部压力，以减少锂枝晶的形成
	电场调控： 通过设计电池内部结构或使用外部电场调控技术，实现电池内部电场的均匀分布

资料来源：《锂枝晶的成核、生长与抑制》，财信证券

3.3 固-固界面问题：固态电池性能及安全性关键挑战

固-固界面问题直接影响固态电池的循环寿命等性能：固态电池固固界面接触大部分情况下，接触方式为点接触，接触面积小。部分电池体系下，界面初始可能是面接触，但是随着电池的循环，电极材料不可避免地发生体积膨胀，使得原本良好的接触恶化，从而增加界面阻抗，电池性能持续恶化。同时持续应力累积也可能导致正极和固态电解质层中产生微米级裂纹，正极与电解质之间的接触恶化，加剧电池性能衰减。

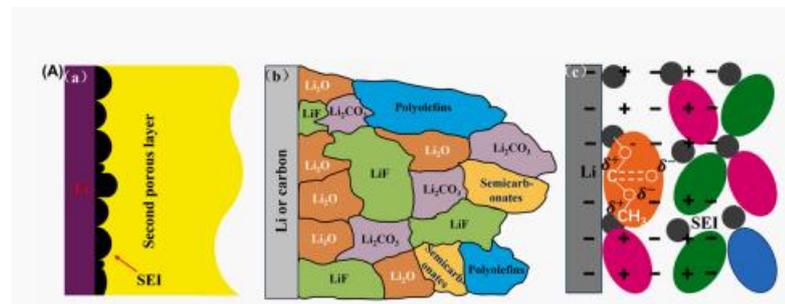
图 14：固态电池内部结构及阻抗来源



资料来源：《固态金属锂电池关键界面问题研究》，财信证券

固态电解质与金属锂在外加电位下会发生电化学反应，固态电解质与锂金属之间的接触界面通常比较脆弱，接触电阻可能比较大，如果界面不稳定，可能会引发剧烈的界面反应，导致界面性能迅速退化。而在液态电解质系统中，锂金属表面会形成动态 SEI，SEI 层能够在一定程度上缓解电解质与锂金属之间的副反应，同时保持锂离子的导通性。此外，液态电解质具有良好的接触性和润湿性，可以在一定程度上自我修复或重新形成 SEI 层，从而适应锂金属沉积过程中表面形态的变化，并使锂枝晶的形成和生长更容易控制，因为在液态电解质的作用下，锂可以更均匀地沉积。

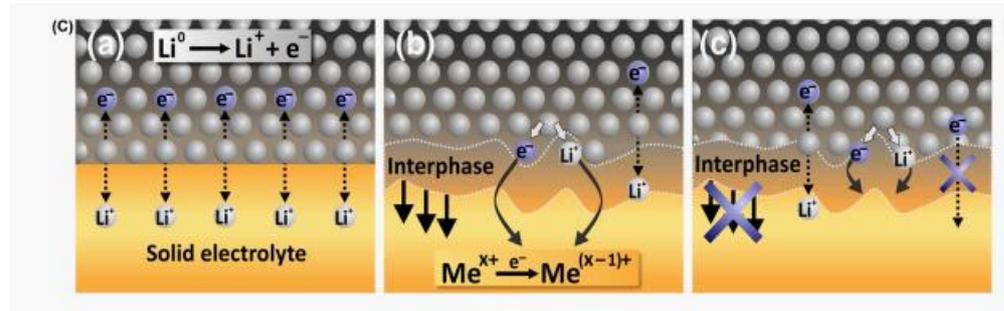
图 15：液态电解质 SEI 膜



资料来源：《Solid-state batteries encounter challenges regarding the interface involving lithium metal》，财信证券

固态比液态更容易由于界面问题出现热失控：固态电解质一旦形成裂缝或与锂金属接触不良，就不像液态电解质那样能形成 SEI 膜并具有自愈性，更容易导致锂离子传输通道断裂，形成锂枝晶，枝晶持续生长可能穿透电解质，造成电池短路大量产热、温度升高。而高温可能会引起正极发生分解，高比容三元正极材料在热分解时可能产生氧气，与锂金属负极反应，引发放热反应，导致电池温度进一步升高和热失控。

图 16：固态电解质界面反应示意图



资料来源：《Solid-state batteries encounter challenges regarding the interface involving lithium metal》，财信证券

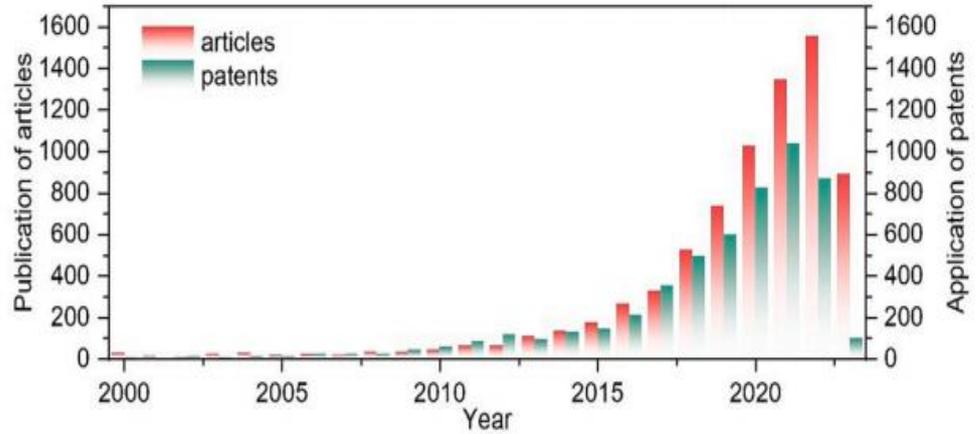
界面工程与改性能有效解决固固界面问题：针对固态电池存在的固固界面问题，目前主流通过界面工程与改性来改善，通过材料与工艺两个维度实现改善。1) 材料维度：选择体积变化更小的 Li 金属负极和包覆复合正极。2) 工艺维度：宏观界面问题，通过增大制备过程中的压力，以消除孔隙、增强界面接触。

4 产业化进展及市场空间

4.1 固态电池技术成为热门概念，多元化发展

技术飞速发展，政策催化固态电池产业化：过去二十年中锂固态电解质和固态锂电池相关研究的进展可以大致分为三个阶段。从 2000 年到 2010 年，年度文章发表和专利申请数量保持在较低水平。从 2011 年到 2015 年，文献数量的稳步增长表明该领域的逐渐发展。2015 年之后，文章和专利的数量实现了爆炸性增长，并且今天仍在迅速增加。显然，固态锂电池技术已成为学术界和工业界的热门概念，并受到全球科学家和工程师的广泛关注。

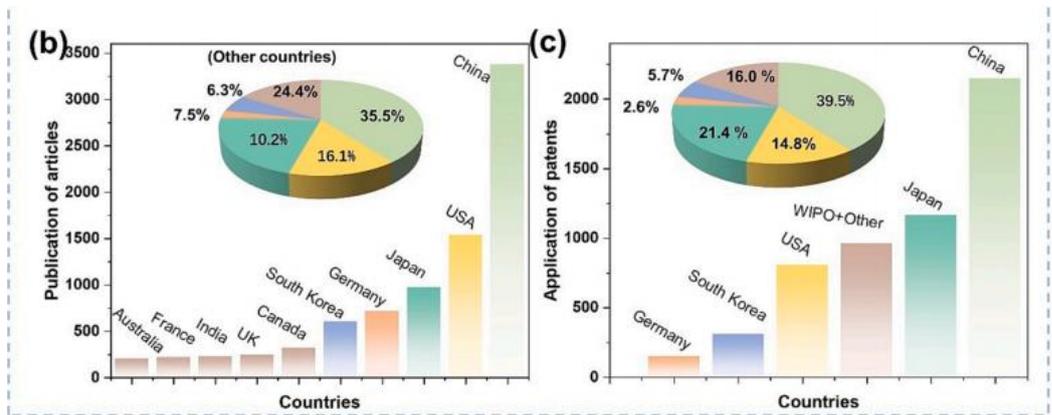
图 17：固态电池论文发表数量



资料来源:《Solid-state lithium batteries-from fundamental research to industrial progress》,财信证券

中国专利领先：在文章发表数量和比例方面，中国、美国、日本、德国和韩国排名前五，分别占 35.5%、16.1%、10.2%、7.5% 和 6.3%。显然，在文章发表方面，中国目前在固态锂电池领域处于领先地位。此外，专利申请数量和比例显示，中国（39.5%）、日本（21.4%）、美国（14.8%）、韩国（5.7%）和德国（2.6%）排名前五。

图 18：各国固态电池论文及专利数量占比



资料来源:《Solid-state lithium batteries-from fundamental research to industrial progress》,财信证券

中日韩欧美技术领先：中国、日韩、欧洲和美国在固态电池技术方面具有较强的研发能力和自主创新能力，并且现在是该领域的主要研发国家，除了各国当前在科研方面取得的显著进展以外，固态电池产业发展迅速也与相关政策和计划有着深刻的关系。

表 7：各国政府固态电池发展政策及计划

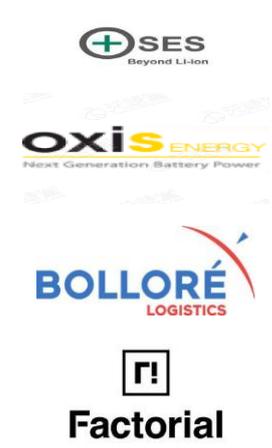
国家	政策/计划
中国	1987 年，中国科技部将 SSLB 列为“863”计划的第一个主要课题。2020 年 10 月，国务院发布了《新能源汽车产业发展规划（2021-2035）》，强调了固态动力电池技术研发和工业化的重要性；2023 年发布《关于推动能源电子产业发展的指导意见》开发安全经济的新型储能电池，加强新型储能电池产业化技术攻关，推进先进储能技术及产品规模化应用；加快研发固态电池，加强固态电池标准体系研究。
日本	2010 年在日本经济产业省、新能源与产业技术开发机构（NEDO）和产业技术综合研究所（AIST）的支持下，成立 LIBTEC 研究中心，负责“下一代电池材料评估技术开发”项目，成员包括丰田、本田、日产、马自达、松下等 35 家企业。2018 年 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。2022 年，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。
韩国	2018 年 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，贸易、工业和能源部宣布了 K-Battery 发展战略。韩国政府将把电池定位为国家战略技术，并通过允许研发投入高达 50% 的减免和设施投资高达 20% 的减免来加强税收激励。此外还将启动一项 1.5 万亿韩元的特别财政支持计划。
美国	2021 年 6 月，联邦先进电池联盟（FCAB）发布了《2021-2030 年锂电池国家蓝图》，其中将 SSLB 的发展列为他们的五个目标之一。长期目标（2030 年）是加速研发，实现革命性电池技术（包括无钴/镍固态和锂金属）的示范和大规模生产，生产成本低于 60 美元/千瓦时，比能量达到 500 Wh/kg。
欧洲	德国政府在 2018 年 11 月投资了 10 亿欧元支持电池生产（包括固态电池技术），并且许多汽车领导者加入了联盟。此外，欧洲电池联盟（EBA）250 在 2020 年 3 月发布了 BATTERY 2030+路线图，其中提到固态聚合物电解质可以启用不同的自我修复策略并开发智能/长寿命电池。2020 年 6 月，欧洲汽车和工业电池制造商协会（EUROBAT）发布了 2030 年电池创新路线图。NMC 和固态技术将在 2030 年成为发展目标，届时能量密度将达到 400Wh/kg。

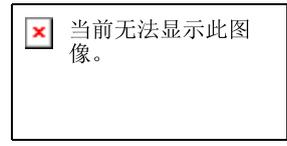
资料来源：《Solid-state lithium batteries-from fundamental research to industrial progress》，财信证券

各国技术路线各异：在技术方向上，日韩起步最早并选择了硫化物固态电解质路线；欧美选择氧化物固态电解质路线居多，且均在直接开发锂金属负极应用；中国三种固态电解质路线均有布局，在开发全固态电池的同时也在大力发展对现有产业更友好的半固态电池。

表 8：企业固态电解质三大技术路线总结

电导率由低到高

	聚合物电解质	氧化物电解质	硫化物电解质
性能对比	<p>优点：高温下性能好，易加工适合大规模制备</p> <p>缺点：常温下电导率低，电化学窗口窄</p>	<p>优点：循环性能好，电化学稳定性高</p> <p>缺点：材料总体电导率低，界面接触性差</p>	<p>优点：电导率高，工作性能优异</p> <p>缺点：易氧化，界面稳定性差</p>
成本	高	低	较低
布局企业	<p>欧美企业主要选择聚合物作为研究路线</p> 	<p>国内企业主要以固态/混合固态氧化物为研究路线</p> 	<p>日韩企业主要选择硫化物作为研究对象</p> 



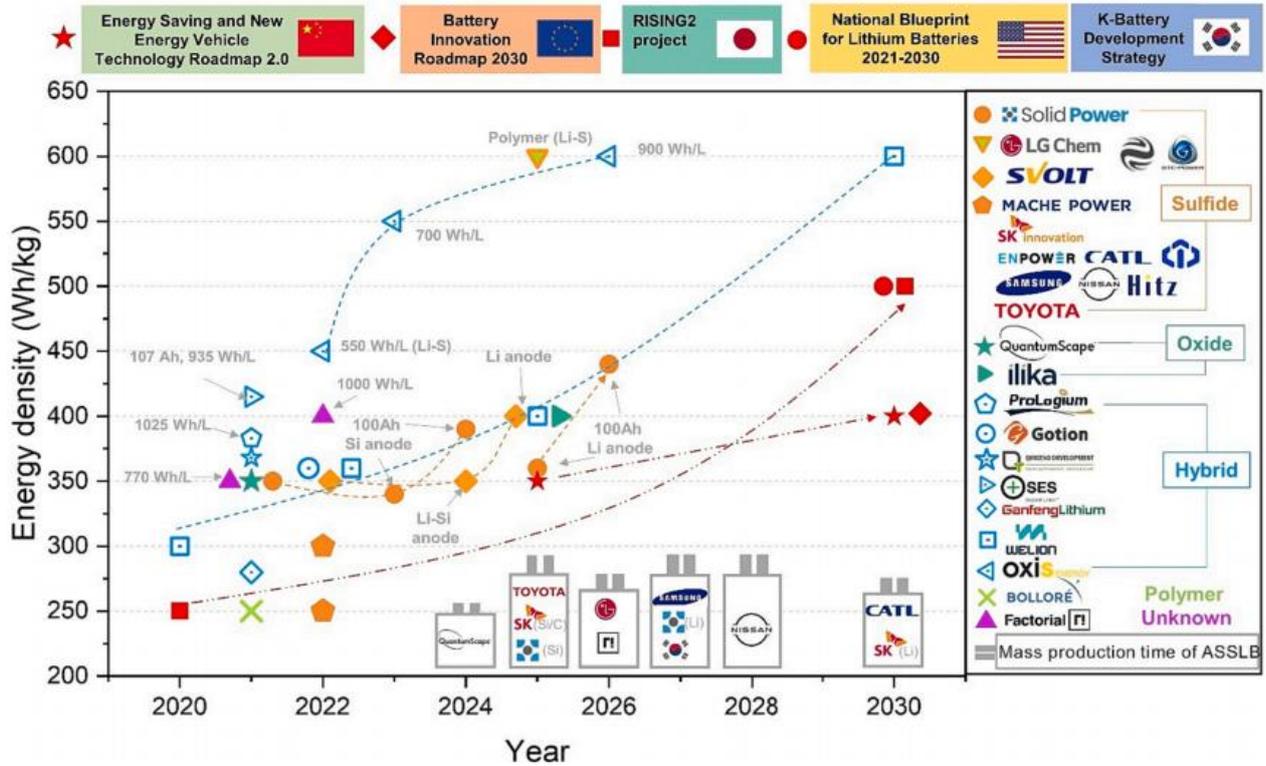
资料来源：《下一代动力电池技术：固态锂离子电池前景几何？》，财信证券

4.2 半固态已经量产装车，全固态 2027 年有望开始量产装车

半固态电池已经量产装车：2022 年以来，固态电池的研发和产业化取得了明显的进展，尤其是伴随着以卫蓝新能源和赣锋锂电等为代表的中国企业的半固态电池的量产装车，标志着半固态电池在 2023 年实现了经济学意义上的产业化。

全固态 2027 年有望实现量产装车：尽管许多公司声称已经实现了性能非常好的固态电池制样和测试，但到目前为止，全固态电池仍处于实验室研究和开发阶段。综合工信部针对固态电池的专项计划和目前业内专家学者的观点，我们预计固态电池的大规模生产和装车应用将在 2027 年左右开始到来。

图 19：各国/地区内公司的固态电池产业化现状和未来计划

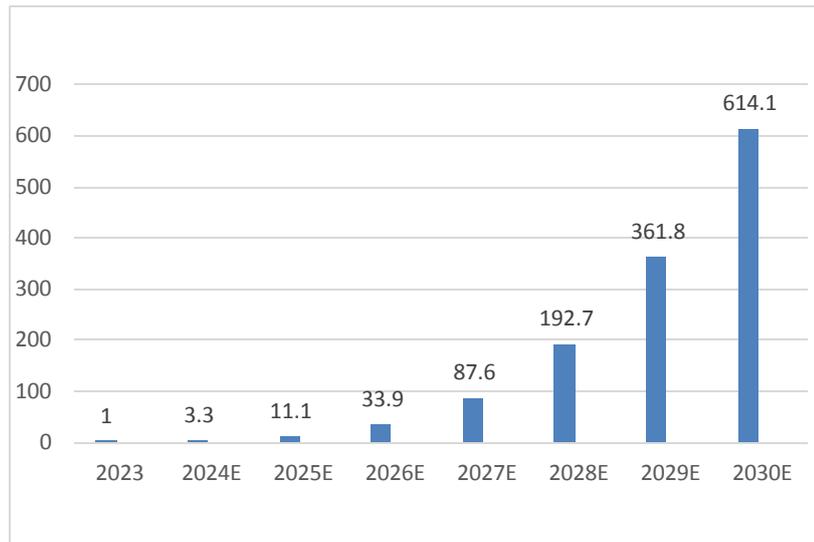


资料来源：《Solid-state lithium batteries-from fundamental research to industrial progress》，财信证券

4.3 市场空间：预计 2030 年出货超 600GWh，市场超 2500 亿元

半固态率先产业化，预计 2030 年市场规模超 2500 亿元：2022 年以来，固态电池的研究和产业化已经取得了较为明显的进展，尤其是清陶、卫蓝固态电池企业的半固态电池交付车企并实现装车。基于目前的现状，预计到 2030 年全球固态电池的出货量将达到 614.1GWh，在整体锂电池中的渗透率预计在 10% 左右，其市场规模将超过 2500 亿元，主要出货电池仍然是半固态电池。

图 20：固态电池出货量预测 (Gwh)



资料来源：EV tank，财信证券

预计 2030 年固态电解质需求超 6 万吨，市场规模超 60 亿元：作为固态电池最重要的组成部分，固态电解质的需求也将随着固态电池需求增长而增长。若按照平均每 GWh 需求固态电解质质量为 100 吨来计算，预计 2030 年固态电解质的需求将超 6 万吨，市场规模超过 60 亿元（以价格 10 万元/吨进行计算）。

5 重点企业

5.1 卫蓝新能源

背靠中科院物理研究所，由陈立泉院士等专家共同发起创办：卫蓝新能源是中国科学院物理研究所固态电池产学研孵化企业，成立于 2016 年，位于北京房山窦店，主营固态锂离子电池，集研发、生产、市场、销售于一体，是国家级专精特新小巨人企业、独角兽企业，具有 CNAS 资质，具有 40 余年固态电池产业研究经验，在多个固态锂电技术领域实现“首次”突破。公司由中国工程院院士陈立泉、中国科学院物理研究所研究员李泓、教授级高级工程师俞会根共同发起创办，汇聚了电池材料、电芯、系统等领域的高精尖人才，公司现有人员超 1100 人，研发人员占比 32%，其中博士 20 多人，硕士 200 多人。

产品应用领域覆盖广，已量产交付蔚来汽车：公司产品主要应用领域涵盖新能源汽车、储能、小动力三大部分，其中典型电芯产品包括：360Wh/kg 高能量密度动力电芯，具备超高能量密度，单次续航里程 1000+km，已于 2023 年底量产交付蔚来汽车，并在多家知名整车厂获得定点；280Ah 超高安全储能电芯，已于 2023 年下半年量产交付，为三峡、海博思创、国电投等多个储能项目供货；320Wh/kg 高能量密度小动力电芯，目前已

为国内外多家无人机、机器人、便携电源等客户供货。

表 9：卫蓝新能源主要产品及参数

电芯产品	SHE360S 汽车动力电池	SHE360C 汽车动力电池	4695 SHP800L 汽车动力电池
技术路线	NCM 固液混合	NCM 固液混合	NCM 固液混合
质量能量密度	≥360Wh/kg@0.33C	≥350Wh/kg@0.33C	≥300Wh/kg@0.33C
体积能量密度	≥775Wh/L@0.33C	≥745Wh/L@0.33C	≥800Wh/L@0.33C
标称容量	111Ah	106Ah	35Ah
标称电压	3.51V	3.35V	3.58
充电时间	≤60min(10%-80% Soc)	≤35min(10%-80% Soc)	≤20min(10%-80% Soc)
尺寸(长*宽*高)	359*118*11.9mm	359*118*11.9mm	φ46*95mm
循环寿命	≥600cycles	≥1000cycles	≥1200cycles@90%DOD

资料来源：卫蓝新能源官网，财信证券

公司规划有四大电池基地：卫蓝新能源目前规划江苏溧阳、浙江湖州、山东淄博和北京房山四大生产基地，目前总共有 5.6GWh 产能，规划产能超 100GWh。公司溧阳基地于 2020 年投产，湖州基地已于 2022 年全面投产并成功交付产品，山东淄博一期于 2023 年投产。

图 21：卫蓝新能源生产基地



资料来源：公司官网，财信证券

5.2 清陶能源

固态产业化领跑者，由南策文院士领衔创办：清陶能源成立于 2016 年，由中科院院士、清华大学教授南策文团队领衔创办，专注于固态锂电池及相关配套产业链的研发生

产，并已在固态电池核心材料、核心工艺、定制设备方面实现了自主可控。公司专注于新能源材料的产业转化，率先实现了固态锂电池的产业化，并建成了规模化固态动力锂电池量产线，着力打造整合“固态锂电池—关键材料—核心装备—综合利用”全产业链。

产能扩张积极：清陶能源总部位于江苏昆山，目前在江苏盱眙建有核心材料生产基地，在江苏昆山和江西宜春分别建成 0.6GWh、1GWh 电池生产基地，在广东惠州和江苏盱眙分别建有电池相关设备生产基地，在贵州铜仁建有电池回收基地。同时，为了满足不断增长的市场需求，扩大生产规模，清陶能源已经布局并获批建设在江苏昆山的 10GWh 固态动力电池生产基地、浙江台州的 10GWh 固态电池生产基地和四川成都的 15GWh 固态储能电池生产基地。

图 22：清陶能源目前主要产品



资料来源：清陶能源官网，财信证券

深度绑定上汽：上汽集团分别于 2020 年和 2022 年通过基金方式参与投资清陶能源，2023 年，上汽集团再次通过嘉兴创领与嘉兴颀骏一号再向清陶能源追加投资不超过 27 亿元。技术研发方面，上汽集团与清陶能源在 2022 年 7 月共同设立了固态电池联合实验室，推动固态电池材料、电芯与系统的联合开发，加快推进固态电池产品的量产装车。2024 年 4 月，上汽旗下的智己汽车发布智己 L6，搭载与清陶共同研发的第一代固态电池。

图 23：智己 L6 搭载的固态电池



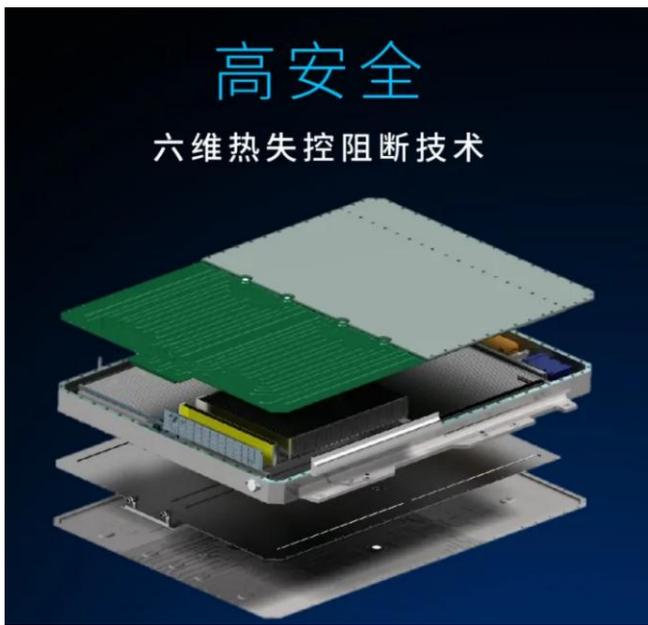
资料来源：智己汽车官微，财信证券

5.3 赣锋锂电

依托锂资源优势，从事固态电池产业化：江西赣锋锂电科技股份有限公司是赣锋锂业的控股子公司，背靠赣锋锂业的品牌、技术、资源。赣锋在 2016 年便已着手固态电池布局，浙江锋锂新能源科技有限公司是固态电池及材料的核心研发、生产基地，产品包括固态锂离子电池、固态锂金属电池、固态锂电池模组、固态电解质材料等。公司在氧化物和硫化物固态电解质、半固态和锂金属负极固态电池均有储备，其中半固态电池已经进入了产业化的阶段。

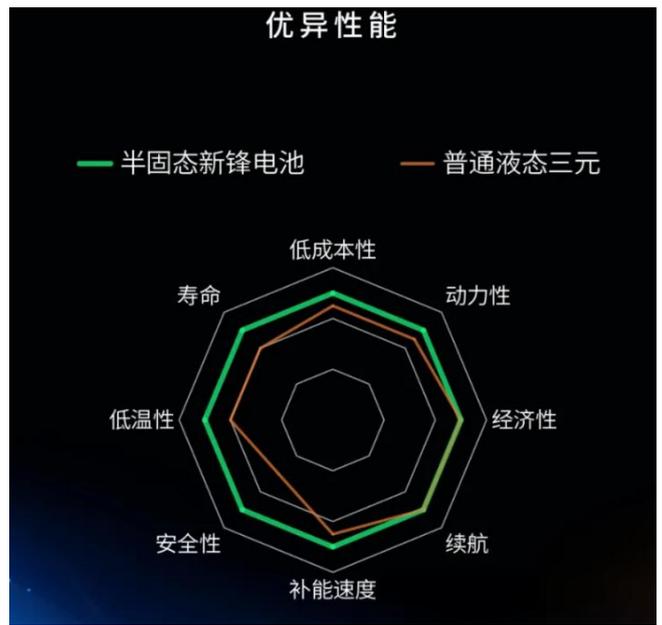
实现固态装车，发布“新锋”电池：赣锋锂电选择锂金属负极体系作为公司固态电池技术路线的发展方向，该技术路线能量密度高，发展潜力大，第二代固态电池能量密度达到 400Wh/kg。2022 年，赣锋-东风 E70 固态电动车实现装车运营，2023 年 7 月，由赣锋锂电重庆项目生产的首批固态电池开始交付。2023 年 9 月，公司发布了半固态“新锋”电池，可以实现 10 万公里无衰减、3000+次循环寿命等性能提升。

图 24：超级半固态“新锋”电池



资料来源：赣锋锂电官微，财信证券

图 25：“新锋”电池性能表现



资料来源：赣锋锂电官微，财信证券

5.4 宁德时代

传统锂电巨头布局固态电池:宁德时代是全球领先的锂离子电池研发制造公司，专注于新能源汽车动力电池系统、储能系统的研发、生产和销售。作为传统的锂电巨头，公司 2023 年 4 月发布了凝聚态电池，能量密度最高可达 500Wh/kg，目前正在进行民用电动载人飞机项目的合作开发，执行航空级的标准和测试，同时还将推出凝聚态电池的车规级应用版本。

图 26：宁德时代凝聚态电池



资料来源：宁德时代官网，财信证券

5.5 辉能科技

与梅赛德斯深度合作：辉能科技于 2006 年在中国台湾成立，是一家专注于固态电池研究、开发和制造的能源创新公司。通过多年的电池研究和开发，辉能的电池满足了包括极高的安全性、高能量密度和低成本等要求。凭借其自动化中试生产线，辉能已为全球汽车制造商提供了近 8000 个固态电池样品电池，用于测试和模块开发。2022 年，公司与梅赛德斯-奔驰签署了就固态电池的技术合作协议，以开发下一代电池。2023 年，公司宣布在法国建设 48GWh 超级工厂。

拥有坚实的技术护城河，商业模式独特：公司拥有超过 17 年的研发经验，并已取得超 760 项专利。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。

图 27：辉能科技主要产品



资料来源：辉能科技官网，财信证券

6 投资建议

固态电池具有技术颠覆能力，在能量密度、安全性等方面均拥有极高的潜力，在乘用车、航空等领域均拥有广泛的应用前景，近年来半固态电池已逐步商业化应用。随着未来固态电池产业化程度不断推进，我们认为全固态电池有望在 2027 年左右开启规模化应用，固态电池产业链各环节将充分受益。

固态电解质方面，建议关注固态电解质及其原料厂商【三祥新材】、【上海洗霸】、【东方锆业】等；正极材料方面，建议关注三元材料厂商【当升科技】、【容百科技】

等；负极材料方面，建议关注【璞泰来】、【中科电气】等；电池方面，建议关注【宁德时代】、【金龙羽】、【鹏辉能源】、【赣锋锂业】等。维持行业“领先大市”评级。

7 风险提示

固态电池技术攻关不及预期：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，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。

半固态电池技术替代风险：半固态电池仍为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，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。

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。

半固态/固态电池产能释放不及预期：半固态与固态电池产能相比液态锂离子电池较小，尽管当前欧美、日韩、国内均有相关企业布局固态电池产能，但是若固态电池产能释放不及预期，将影响固态电池产业化发展速度。

投资评级系统说明

以报告发布日后的 6—12 个月内，所评股票/行业涨跌幅相对于同期市场指数的涨跌幅度为基准。

类别	投资评级	评级说明
股票投资评级	买入	投资收益率超越沪深 300 指数 15% 以上
	增持	投资收益率相对沪深 300 指数变动幅度为 5%—15%
	持有	投资收益率相对沪深 300 指数变动幅度为-10%—5%
	卖出	投资收益率落后沪深 300 指数 10% 以上
行业投资评级	领先大市	行业指数涨跌幅超越沪深 300 指数 5% 以上
	同步大市	行业指数涨跌幅相对沪深 300 指数变动幅度为-5%—5%
	落后大市	行业指数涨跌幅落后沪深 300 指数 5% 以上

免责声明

本公司具有中国证监会核准的证券投资咨询业务资格，作者具有中国证券业协会注册分析师执业资格或相当的专业胜任能力。

本报告仅供财信证券股份有限公司客户及员工使用。本公司不会因接收人收到本报告而视其为本公司当然客户。本报告仅在相关法律许可的情况下发放，并仅为提供信息而发送，概不构成任何广告。

本报告信息来源于公开资料，本公司对该信息的准确性、完整性或可靠性不作任何保证。本公司对已发报告无更新义务，若报告中所含信息发生变化，本公司可在不发出通知的情形下做出修改，投资者应当自行关注相应的更新或修改。

本报告中所指投资及服务可能不适合个别客户，不构成客户私人咨询建议。任何情况下，本报告中的信息或所表述的意见均不构成对任何人的投资建议。在任何情况下，本公司及本公司员工或者关联机构不承诺投资者一定获利，不对任何人因使用本报告中的任何内容所引致的任何损失负任何责任。投资者务必注意，其据此作出的任何投资决策与本公司及本公司员工或者关联机构无关。

市场有风险，投资需谨慎。投资者不应将本报告作为投资决策的唯一参考因素，亦不应认为本报告可以取代自己的判断。在决定投资前，如有需要，投资者务必向专业人士咨询并谨慎决策。

本报告版权仅为本公司所有，未经书面许可，任何机构和个人（包括本公司客户及员工）不得以任何形式复制、发表、引用或传播。

本报告由财信证券研究发展中心对许可范围内人员统一发送，任何人不得在公众媒体或其它渠道对外公开发布。任何机构和个人（包括本公司内部客户及员工）对外散发本报告的，则该机构和个人独自为此发送行为负责，本公司保留对该机构和个人追究相应法律责任的权利。

财信证券研究发展中心

网址：stock.hnchasing.com

地址：湖南省长沙市芙蓉中路二段 80 号顺天国际财富中心 28 层

邮编：410005

电话：0731-84403360

传真：0731-84403438