

证券研究报告 | 机械设备 | 2025年07月31日

机械团队·行业深度报告

固态电池产业加速发展，关注设备投资机遇

分析师

赵璐

登记编号：S1220524010001

并购家 免费行业报告网

IPOIPO.CN 每日更新 不用注册会员 无广告 永久免费

- **全固态电池**：核心是**将电解液+隔膜替换为固态电解质**。固态电解质虽然本身不能提升能量密度，但相比电解液，固态电解质具备更稳定、更安全，电化学窗口宽（可达5V以上）等性质，因此可以兼容高比容量的正负极，如高电压正极、富锂基、硅负极、锂金属负极等材料，进而大幅提升电芯能量密度。此外，在安全性方面，固态电解质的热稳定性、化学稳定性较高，不会泄漏、燃烧或爆炸，从而降低了热失控的风险，提高了电池的本征安全性。进展方面，各电池厂/车企在2027年前后量产，预估产量可于2027年前达GWh水平，各国普遍规划2030年能量密度达500Wh/kg。
- 对此，日、韩联盟式研发，欧美自主研发+投资入局，各国开启“军备竞赛”，各国均出台政策支持。国内国资委、工信部也先后出台重大支持项目，**25、26、27年分别有工信部项目中期审查、硫化物全固态装车示范（能量密度400Wh/kg）、1000辆示范性装车应用等关键节点**。在支持政策加持下，国内固态电池商业落地有望加速。
- **半固态电池**：是在锂离子电池中引入固态电解质，同时保留少量电解液，正负极为三元/磷酸铁锂/磷酸锰铁锂+石墨/硅碳/锂金属，制备工艺仍主要沿用传统锂离子电池工艺与装配技术。目前，国内半固态电池产业化进度领先海外2-3年，在技术与成本上基本达到商业化量产要求。
- **电解质**：主要分为硫化物、氧化物、聚合物、复合固态电解质等路线。综合来看，硫化物综合表现最佳（尤其在离子电导率、电化学稳定窗口等方面），但需突破成本问题。分地区来看，亚洲更关注硫化物路线，北美、欧洲更关注聚合物、氧化物路线。SMM预计到2035年，硫化物的路线占比有望达到43%左右，有望逐步成为主流路线。
- **正负极材料**：1) 正极：固态电池的正极材料可以继续沿用当前的磷酸铁锂、锰酸锂、钴酸锂、三元NCM等材料体系，其中比较常用的材料主要是高镍多元材料、富锂锰基材料。2) 目前已广泛应用的负极材料包括石墨类、 $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ 、无定形碳（硬碳、软碳）、硅基材料、锂合金等。固态电池的负极材料主要有碳族负极、硅基负极、金属锂负极3类。其中，**锂金属、硅负极最具成为固态电池负极材料的潜力**。3) 但目前，正极-电解质仍然存在物理接触不良、空间电荷层、元素交叉扩散，负极-电解质存在弱稳定性、物理接触不良等问题。
- **设备变化**：EV Tank在白皮书中指出，全固态电池在**纤维化、胶框印刷、等静压环节**需要引进全新的定制设备，在**干混、辊压、叠片、化成分容**环节，需要对设备进行精细化升级改造，在其他工序段则对现有设备进行适当改造。据Ofweek锂电网，目前，**液态电池单GWh设备成本约为1亿元，而全固态电池约为4-5亿元**。这种差异主要源于设备效率降低、设备数量增加（等静压机需多台配置提升产能）、干法工艺难度指数级上升三个方面，但随着未来设备国产替代+规模效应显现，设备有望逐渐降本。
- 根据我们的初步测算，预计到2030年固态电池出货量将达到209GWh，其中，半固态电池147GWh，全固态63GWh。**预计2030年固态电池设备市场规模约为408亿元**，其中半固态设备市场规模220亿元，全固态设备市场规模189亿元。当前，固态电池设备企业形成“**传统锂电龙头转型+新兴势力专精**”的双轮驱动格局，液态电池龙头设备企业依托规模化制造经验快速切入，而清陶能源等则通过全链条自研构建技术护城河。随着2025年固态电池初步商业化，国产设备商有望复制光伏、锂电设备的国产替代路径，在全球高端装备市场占据主导地位。
- **投资建议**：重点关注：**先导智能**（具备整线交付能力）、**赢合科技**（涂覆设备已成功发货到国内头部客户现场）、**联赢激光**（固态电池激光焊接设备）；前道设备厂商**纳科诺尔**（最早参与固态设备研发的企业之一，开发了锂带压延、电解质成膜、转印等设备）、**宏工科技**（先发布局干法混料纤维化设备）、**曼恩斯特**（“湿法+干法”的双线产品布局）；布局中道设备焊接厂商**海目星**（激光焊接）、**骄成超声**（超声波焊接）；后道设备厂商**杭可科技**（化成分容设备）。
- **风险提示**：宏观经济及产业政策波动风险、技术进展不及预期风险、原材料价格波动风险、技术迭代风险

1. 固态电池产业进程加速

1.1 固态电池: 锂枝晶问题出现及锂电池发展路径的分化

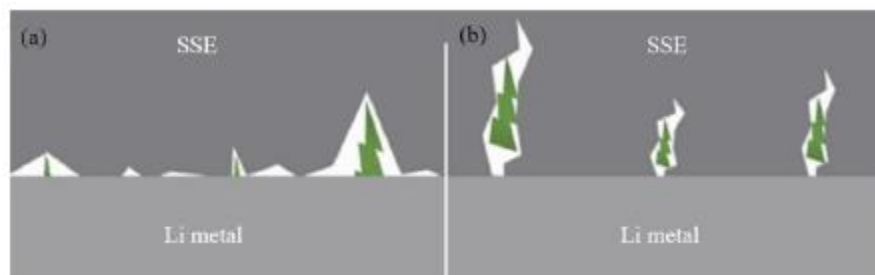
1958 年, 锂金属因低比重、极低电势、极高质量能量密度被引入电池材料。锂电池发展早期均以**锂金属电池**为研究对象(金属锂电池主要采用锂金属(也称为锂合金)作为负极材料)。加拿大 MoIi 公司于 80 年代末实现 Li/Mo₂ 锂金属电池的首次商用。然而在 1989 年, Li/Mo₂ 电池因**严重的锂枝晶问题起火**, 引发了锂电池安全性恐慌, 锂金属二次电池发展陷入停滞。

锂枝晶: 在充放电循环过程中, **Li⁺在电极(负极)表面被还原, 且不均匀沉积而形成树枝状金属锂**, 其生长速度与充放电电流的大小相关。锂枝晶的生长会导致锂离子电池在循环过程中电极和电解液界面的不稳定, 破坏生成的固体电解质界面(SEI)膜, 在生长过程中不断消耗电解液并导致金属锂的不可逆沉积, 形成**死锂**, 造成低库伦效率; 甚至还会**刺穿隔膜导致锂离子电池内部短接, 造成电池的热失控引发燃烧爆炸**。随着电池循环使用, 锂枝晶会不断扩大, 有潜在风险穿破隔膜引起短路, 进而增加安全风险。

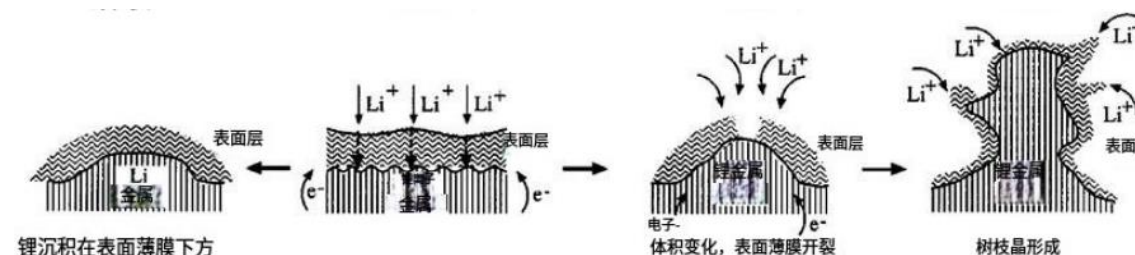
影响锂枝晶生长的主要因素包括:

- (1) 物理接触条件不理想: 锂枝晶能够在电极与电解质之间的空隙中自由生长, 当存在一个较好的物理接触时, 就可以一定程度上避免锂枝晶形成。
- (2) 生成混合导体型界面: 导致锂枝晶可能在电解质的晶界或缝隙中形成。
- (3) 固态电解质的表面孔隙: 为锂枝晶的生长提供条件, 特别是当锂离子向晶界的迁移速率超过晶内扩散速率时, 晶界处锂枝晶的形成更为显著。

(a) 负极界面处的锂枝晶; (b) 负极界面处的锂枝晶生长扩大



锂枝晶的形成过程



1.1 固态电池:锂枝晶问题出现及锂电池发展路径的分化

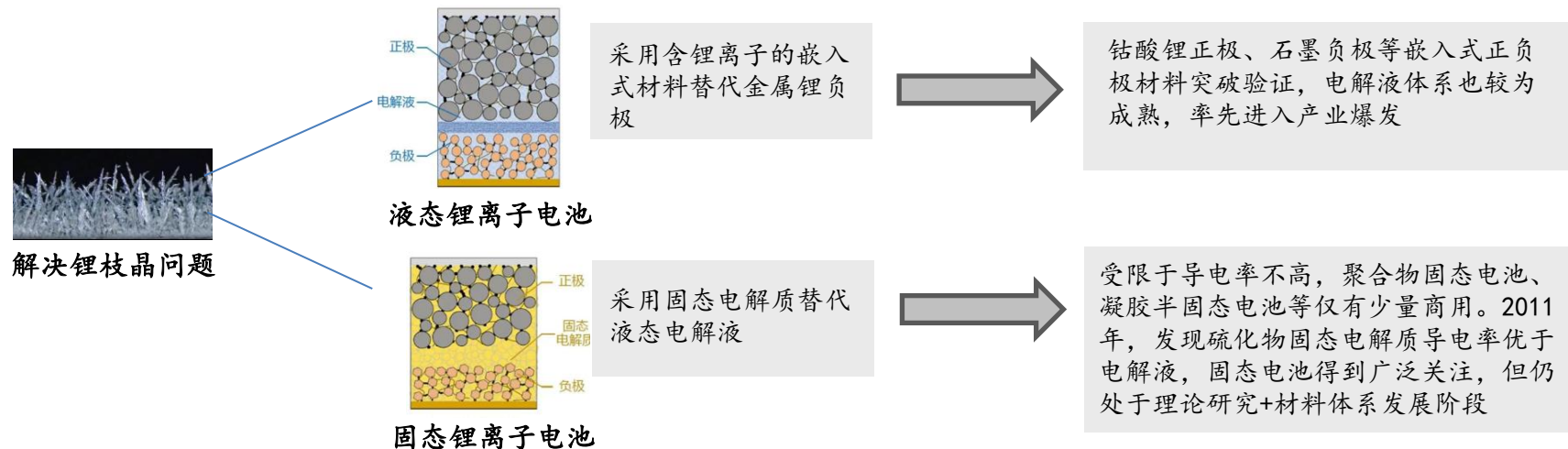
在锂金属锂枝晶安全问题的十字路口，有两种主要方案，锂电池产业发展路径开始分化。

一是替代**锂金属负极**，即**液态锂离子电池**路线；

液态锂电池：理论研究+材料体系+需求驱动其率先爆发。1980年，Armand提出锂离子电池模型，认为可以采用含锂离子的嵌入式材料替代锂金属。与此同时，**钴酸锂正极、石墨负极**等嵌入式正负极材料的突破进一步验证了锂离子模型的商业化可能性，再加之电解液体系发展相对成熟，1991年索尼首次实现了锂离子电池商业化。液态锂离子电池也在消费电池和新能源电池的浪潮中率先完成产业爆发。

二是替代**电解液**，即**固态锂电池**路线：

固态锂电池：历经30年实现固态电解质突破，初步具备产业化逻辑。锂金属负极的锂枝晶问题第二种路线是替代电解液。1978年，固态电解质开始得到研究，1999年松下等企业离子电导率不高的聚合物固态电池和凝胶半固态电池实现少量商用。直至2011年，科研发现Li₁₀Ge₂S₁₂硫化物固态电解质离子电导率达到12mS/cm（优于电解液），固态锂电池才开始得到产业更广泛的关注。对比液态锂离子电池的商业爆发逻辑，固态电池目前仍处于理论研究+材料体系发展阶段，但固态电解质离子电导率上的关键突破，使得固态锂电池的产业化具备一定理论前提。



1.1 固态电池：与液态锂电池的区别

正极、负极、隔膜、电解液是锂离子电池的四大关键材料，液态电池到全固态电池核心是**将电解液+隔膜替换为固态电解质**。锂电池根据电解质的不同，可以分成**液态锂离子电池、混合固液电池（半固态或准固态）、全固态电池**3类。其中，混合固液电池使用固态电解质部分取代液态电解液；而全固态电池使用固态电解质取代电解液，电池中完全不含液体。

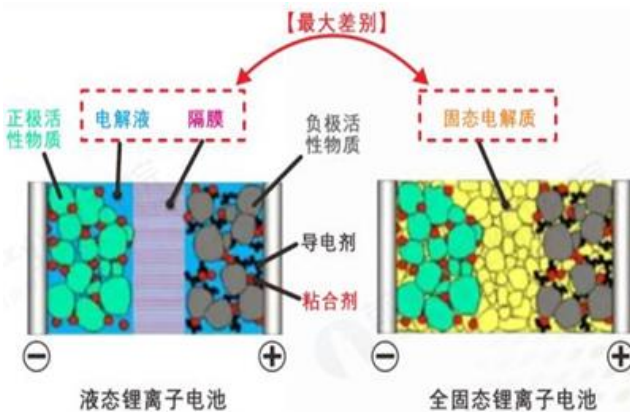
目前，我国依托液态锂离子电池，已构建了全球领先的新能源汽车产业体系。但现有的锂离子电池采用了易燃的**液态电解质**，难以同时满足**电动汽车、储能、电动航空、智能终端等行业对高能量密度、高安全性、长寿命、低成本锂电池的迫切需求**。而**固态电解质本身不可燃、且热分解温度高，固态特性完全避免了电解液腐蚀、挥发、漏液等问题，安全性能大幅提高**。高比能、高安全性和长寿命的固态电池被全球公认为是取代现有锂离子电池的颠覆性技术之一。

1) **能量密度**是动力锂电池的一个关键指标。《中国制造2025》和《新能源汽车产业发展规划(2021~2035)》等规划提出到2025年和2030年，电芯的单体能量密度逐步实现400~500Wh/kg的目标。然而液态锂离子电池受化学体系限制，预计能量密度上限为300Wh/kg，这难以满足未来战略需求。固态电解质的杨氏模量较高，可以有效抑制锂枝晶的生长，有望实现金属锂负极的应用，使电池的能量密度大幅提升。实际上，**固态电解质本身不能提升能量密度，但相比较电解液，固态电解质具备更稳定、更安全，电化学窗口宽（可达到5V以上）等性质，因此可以兼容高比容量的正负极，如高电压正极、富锂基、硅负极、锂金属负极等材料，进而大幅提升电芯能量密度**。

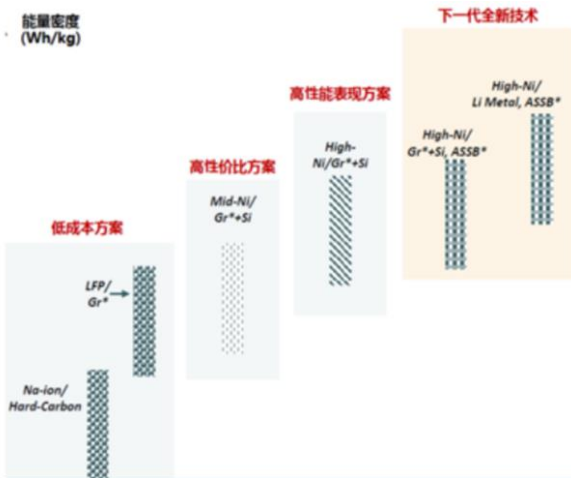
2) **安全性**：全固态锂电池的结构与工作原理与液态锂离子电池类似，但**固态电解质的热稳定性、化学稳定性较高，不会泄漏、燃烧或爆炸，从而降低了热失控的风险，提高了电池的本征安全性**。

3) 全固态电池的**封装更加简便**。在固态电池中使用**双极堆积技术**可以减少极耳、引线等非活性材料的使用，而且电池模组不需要冷却系统，且由于不使用液体，可简化外壳与电池组装工艺，有望进一步提高系统的体积和质量能量密度。

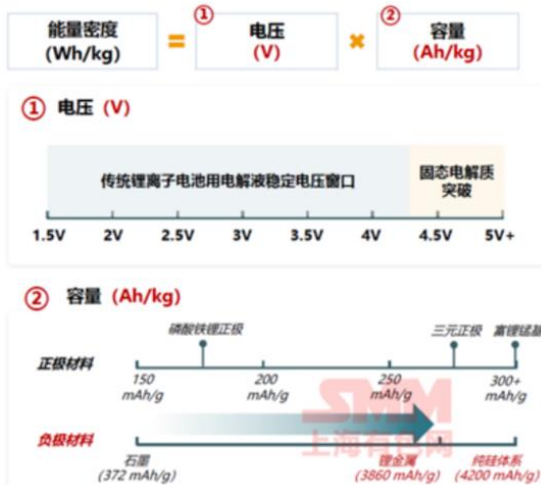
液态锂离子电池与全固态锂离子电池结构对比



锂离子电池Roadmap：能量密度不断提升



能量密度拆解：为什么固态电池能量密度更高？



各类电池性能对比

指标	液态锂离子电池	半固态电池	全固态电池
液态含量	25%	5-10%	0%
电芯能量密度	250-300Wh/kg	350Wh/kg	500Wh/kg
电池寿命	2000次+	1000次+	/
主要材料体系	正极+负极+隔膜+电解液	正极+负极+隔膜+复合电解质	正极+负极+固态电解质
封装形态	卷绕/叠片+圆柱/方形/软包	叠片+方形/软包	叠片+方形/软包

1.1 固态电池

全固态电池的材料体系基本遵循电解质替代、新型负极替代、新型正极替代的次序；全固态电池性能开发以能量密度为标志性指标，同时持续提升倍率性能、循环寿命等指标。盖斯特将固态电池发展概括为以下三个阶段：

1.0阶段（即当前发展阶段），企业研发全固态电池正极可选用高镍三元，并探索富锂锰基；负极材料选择硅碳负极和锂合金负极；开发氧化物或硫化物的电解质，争取将能量密度400Wh/kg的全固态电池落地量产。

2.0阶段（即到2030年），正极材料以硫碳复合、富锂锰基为主，负极材料为锂合金或锂负极，电解质采用氧化物复合、硫化物或卤化物，追求达到500Wh/kg的高能量密度指标。

3.0阶段（即到2035年），构建正极为硫碳复合正极或空气、负极为金属锂、电解质为硫化物/卤化物的全固态电池体系，做出能量密度超过500Wh/kg、循环寿命大于10000次的锂硫电池、锂空电池产品，真正意义上建立全新的电池材料体系。

其他指标：电池耐高温性能趋势将是先逐渐提高至200℃左右，再逐渐降低至100-120℃（锂金属负极）；耐低温性能则持续向-30℃~-40℃发展；

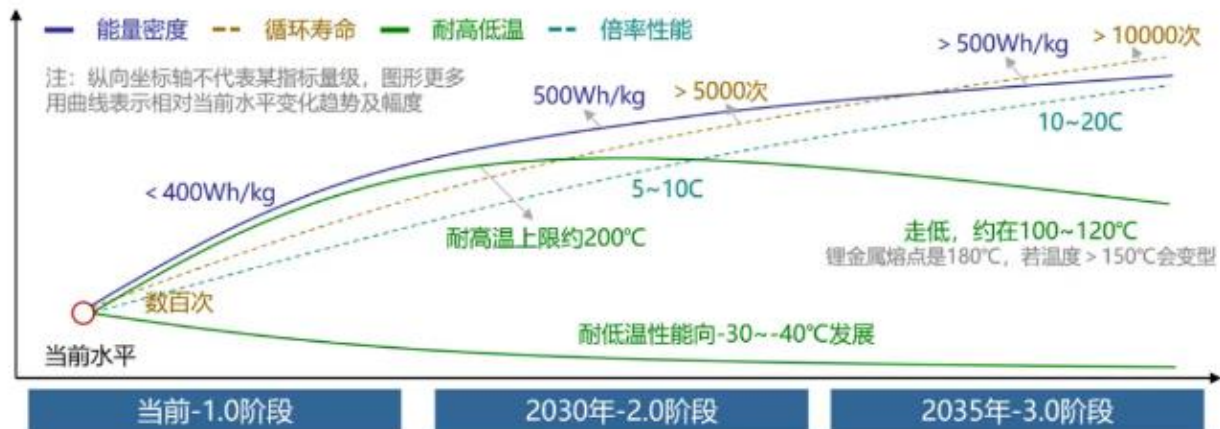
循环寿命指标从数百次向上万次持续提升；

倍率性能持续提高，第三阶段可能达到10-20C的水平。

锂电池技术路径演变



全固态电池性能指标发展趋势预测



1.2.1 半固态电池：原理及主要技术路径

半固态电池：是在锂离子电池中**引入固态电解质,同时保留少量电解液**，正负极为三元/磷酸铁锂/磷酸锰铁锂+石墨/硅碳/锂金属，制备工艺仍主要沿用传统锂离子电池工艺与装配技术。

正极：早期，半固态电池正极材料的发展路径，在2023年之前，主要以**中镍三元**与**磷酸铁锂**的应用为主导。此后，**高镍三元**凭借其卓越的高能量密度特性，成为了半固态电池正极材料的一个优选方案。而磷酸铁锂技术路线，则呈现出向高压密材料及**磷酸锰铁锂**方向发展的明显趋势，随着半固态电池技术的持续进步，正极材料的涂层改性与界面优化成为了进一步优化的关键方向，旨在显著提升材料的电子电导率和离子扩散系数，从而全面增强电池的整体性能。

负极：**硅基负极、锂金属负极**因具备高比容量和潜在的低成本优势，成为了未来技术发展的主流趋势。特别是**锂金属负极**，作为半固态电池负极材料的终极形态，其高理论比容量和低电极电位为实现高能量密度的半固态电池提供了无限可能。

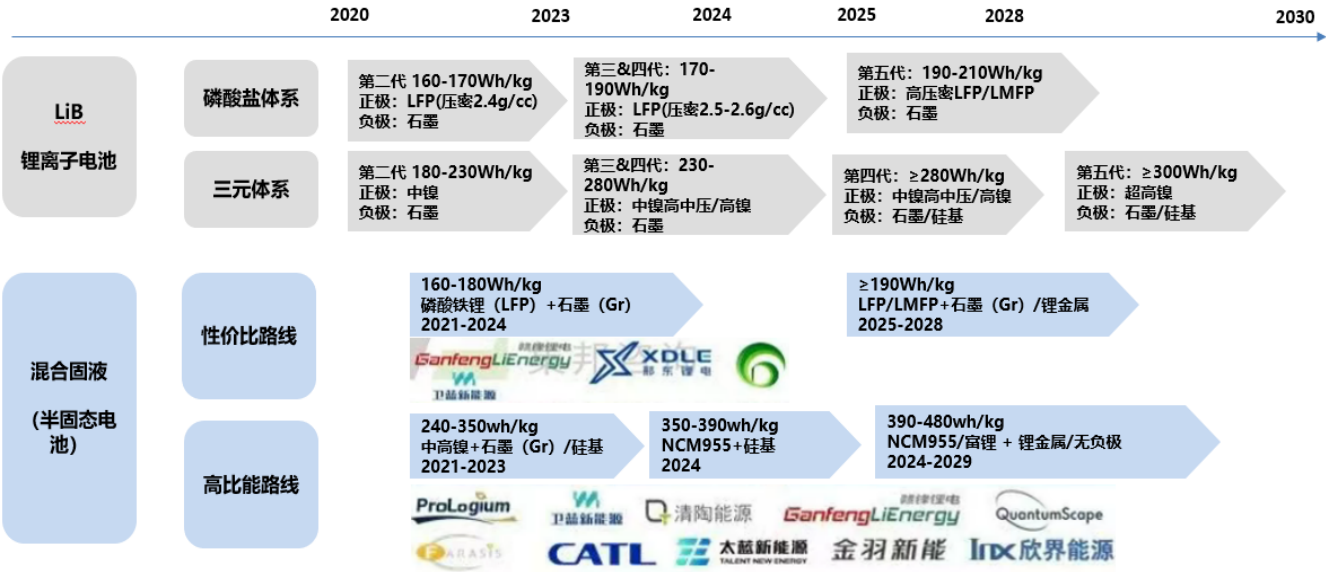
电解质：半固态电池技术路线包括**氧化物、聚合物、有机-无机复合型**。中国半固态电池制造商包括**宁德时代、亿纬锂能、赣锋锂业、国轩高科、蜂巢能源等锂电巨头**，同时还包括**太蓝新能源、清陶能源、卫蓝新能源、辉能科技等固态电池企业**，侧重方向主要为**氧化物路线**。

目前，半固态电池低成本路线多选择成熟的**磷酸铁锂（LFP）+石墨+聚合物SE**体系，高比能体系多为**高镍正极+硅基/锂金属负极+氧化物/聚合物SE**，技术重点在于SE与正负极界面接触性能的改善、负极体积膨胀、锂枝晶以及正极析氧的抑制等。

半固态电池电解质技术路线

电解质技术路线	氧化物	聚合物	有机-无机复合型
优点	热稳定性好、电化学窗口宽、机械强度高、耐受高电压	粘弹性好、质量轻、机械加工性能优良	综合聚合物、氧化物电解质的各自优点，取长补短，如改善了纯聚合物电解质的离子电导率、电压耐受性、改善纯氧化物电解质的加工性能等。
缺点	离子电导率一般、固固接触差、脆性高导致加工难度大	离子电导率低、热稳定性差、电化学窗口窄、安全问题	
主流代表	石榴石型：LLZO/LLZTO 钙钛矿型：LLTO NASICON型：LATP LiPON型：LiPON	聚环氧乙烷（PEO）基 聚碳酸酯（PC）基 聚丙烯腈（PAN）等	氧化物聚合物复合： LATP/LLZO/...+聚合物 (LiBF4+LiODFC+ES+LiP Sx+...)
室温离子电导率	10 ⁻⁶ ~ 10 ⁻³ S/cm	10 ⁻⁷ ~ 10 ⁻⁴ S/cm	10 ⁻⁶ ~ 10 ⁻³ S/cm
代表企业/研究机构			

液态锂离子电池与半固态锂离子电池结构演化历程



1.2.2 半固态电池：国内半固态电池产业化进度领先海外2-3年

电池厂商半固态电池布局情况

企业	半固态方案	正极	负极	电芯能量密度	半固态电芯进展	计划量产时间
宁德时代	氧化物涂覆+聚合物	高镍NMC	硅基负极	≥350Wh/kg	中试 (Gen 1)	2025 (Gen 1)
国轩高科	氧化物涂覆+聚合物	高镍NMC	SiOx-C	≥330Wh/kg	C样	2024
卫蓝新能源	氧化物+聚合物复合	超高镍NMC	硅碳负极	360Wh/kg	量产	2023
清陶能源	氧化物-聚合物	高镍NMC	硅碳负极	> 300Wh/kg	量产 (Gen 1)	2024(Gen1)
辉能科技	氧化物	高镍NMC	硅基负极	≥350Wh/kg	C样 (Gen 3)	2024(Gen3)
孚能科技	氧化物-聚合物	高镍NMC	硅基负极	≥330Wh/kg	B样 (Gen 2)	TBD, 预计 2027
赣锋锂业	氧化物-聚合物	高镍NMC	锂金属	≥400Wh/kg	A样, 70Ah电芯 (Gen 2)	2027 (Gen2)
Quantum Scape	氧化物	高镍NMC	锂金属 (无阳极)	≥300Wh/kg	B样, 5Ah级电芯	2026
蜂巢能源	聚合物	中镍NMC	硅基负极	≥266Wh/kg	B样, 100+Ah电芯	2026
欣旺达	聚合物	高镍NMC	硅基负极	≥360Wh/kg	中试 (Gen 2)	TBD
Factorial	聚合物	高镍NMC	锂金属	≥391Wh/kg	B样, 100+Ah电芯	2026
SES	聚合物	高镍NMC	锂金属	≥400Wh/kg	B样, 100+Ah电芯	2026

国内车企半固态电池布局情况

公司名称	固态电池技术路线	技术发展进展
蔚来	氧化物	2021年1月，蔚来发布150kWh的半固态电池； 2024年4月，蔚来宣布搭载150kWh电池包的2024款ET7,实测续航均突破了1000km。全新ES6、ET7、ES7、ET5、EC7和ET5旅行版共6款车型的手册中都添加了关于150kWh电池包的详细信息； 蔚来使用的半固态电池，采用硅碳复合负极材料和超高镍正极材料；
赛力斯	氧化物	赛力斯SERES5搭载 赣锋锂业第一代固态电池 ，能量密度为260 Wh/kg,2023年6月已经实现交付；
上汽	氧化物	第一代即今年搭载在智己L6上的半固态电池，其液含量降低到10%;按计划，2024年10月，搭载 上汽年固态电池 的上汽智己L6新车将正式交付用户，新车搭载的电池能量密度超过300Wh/kg,续航里程超过1000公里
东风汽车	氧化物	2022年1月,由东风公司与赣锋锂业合作开发高比能固态电池，成功在东风E70搭载； 2023年1月13日，东风岚图“追光”量产车型正式下线，搭载82kWh电池包，采用能量密度为 170Wh/kg的半固态电池 ；
长安汽车	氧化物	2023年11月,长安汽车召开电池规划发布会，介绍长安汽车开展的半固态、固态电池能量密度达到350-500Wh/kg，将于不晚于2027年逐步量产应用,2030年实现全面普及应用； 2030年，推出液态、半固态、固态等8款自研电芯，电池产能将达到150 GWh以上； 2024年4月，长安汽车表示集团研发的 半固态电池将于2026年年底上市 ；
江淮汽车	氧化物	2024年4月22日，江淮钇为与卫蓝新能源在合肥正式签署固态电池战略合作协议，双方将合作开发4695大圆柱半固态电芯； 4695 大圆柱半固态电芯 应用的车型将采用原位固态技术，电芯单体容量为34Ah,能量密度高达300Wh/kg，实现整车600km-1000km的续航水平，并 计划于2025年实现批量生产 ；

1.2.3 半固态电池的应用

- 车用半固态电池：受限于良品率、充电倍率、循环寿命等，渗透率仍然有限
- 目前，市场上半固态电池版本上市车型在逐渐增加，但受限于良品率、充电倍率、循环寿命等关键指标仍需优化，实际装车量增长相对有限。根据Trendforce数据，2024年全球动力电池装车超过800GWh，但半固态电池实际装车车辆不足2GWh，对应市场渗透率不足0.25%。
- 据TrendForce统计，按照各家企业商业化时间表，2027年将开始ASSB小规模装车示范应用。近期，**上汽集团也推出了10万级半固态电池车型，使用的是清陶能源的第二代半固态技术**，标志着半固态电池在技术与成本上基本达到商业化量产要求。

全球电动汽车半固态电池使用量及预测



■ 储能：磷酸铁锂（LFP）半固态为主，配套示范性项目

项目名称	储能场景	规模	项目状态	地点	电池类型	电池供应商
众军联工商业储能项目	工商业储能	25.37MWh	投运	浙江慈溪	固液混合LFP	卫蓝新能源
华能长兴电厂共享储能项目	共享储能	27MWh	投运	浙江沪舟	固液混合LFP	卫蓝新能源
半固态电池储能系统的燃机联合循环机组黑启动与调频协同	黑启动与调频	27.5MWh	投运	广东深圳	固液混合LFP	卫蓝新能源
富士康数据中心铅改锂项目预研	数据中心	46kWh*2	调试	广东深圳	固液混合LFP	卫蓝新能源
原位固态化半固态电池电网侧大规模储能电站项目——浙江龙泉磷酸铁锂储能示范项目	电网侧储能	400MWh	投运	浙江丽水	固液混合LFP	卫蓝新能源
乌兰察布源网荷储项目	发电侧储能	2MWh	投运	内蒙古乌兰察布	固液混合LFP	卫蓝新能源
乔治费歇尔金属成型科技（昆山）有限公司4.5MW/8.94MWh储能项目	用户侧储能	8.94MWh	施工	江苏昆山	固液混合LFP	清陶能源
中电建新疆巴里坤156MW/624MWh储能项目	电力储能	624MWh（半固态10MWh）	投运	新疆	磷酸铁锂/半固态/全钒液流/钠离子	
淄博高新区石桥75号配电箱215kWh分布式储能	分布式储能	215kWh	投运	山东淄博	固液混合LFP	
华润财金光渔业800MW光伏项目配建储能（160MW/320MWh）	独立储能	320MWh	投运	山东东营	固液混合LFP	福建巨电
嘉兴悉科1237产业园466kWh固态电池储能项目	工商业储能	466kWh	投运	浙江嘉兴	固液混合LFP	长三角储能
华电汕尾独立储能项目	独立共享储能	294.8MWh	规划	广东汕尾	固液混合LFP	

1.2.3 半固态电池的应用

- 消费电子：半固态电池逐步导入阶段
- 2024年，vivo X Fold3 凭借首发的蓝海半固态电池技术，成为首款能在 -20°C 极寒环境下正常运行的折叠屏手机。而今年即将发布的新一代 vivo X Fold5，在性能与防护上实现了全方位突破。
- 这一次，vivo X Fold5 首发第二代半固态电池技术，将固态电解质从正极延伸至负极，带来了颠覆性的电池防冻能力升级，使蓝海电池首次实现 -30°C 正常供电，相比前代，极寒环境适应性更上一层楼。

全球电动汽车半固态电池使用量及预测



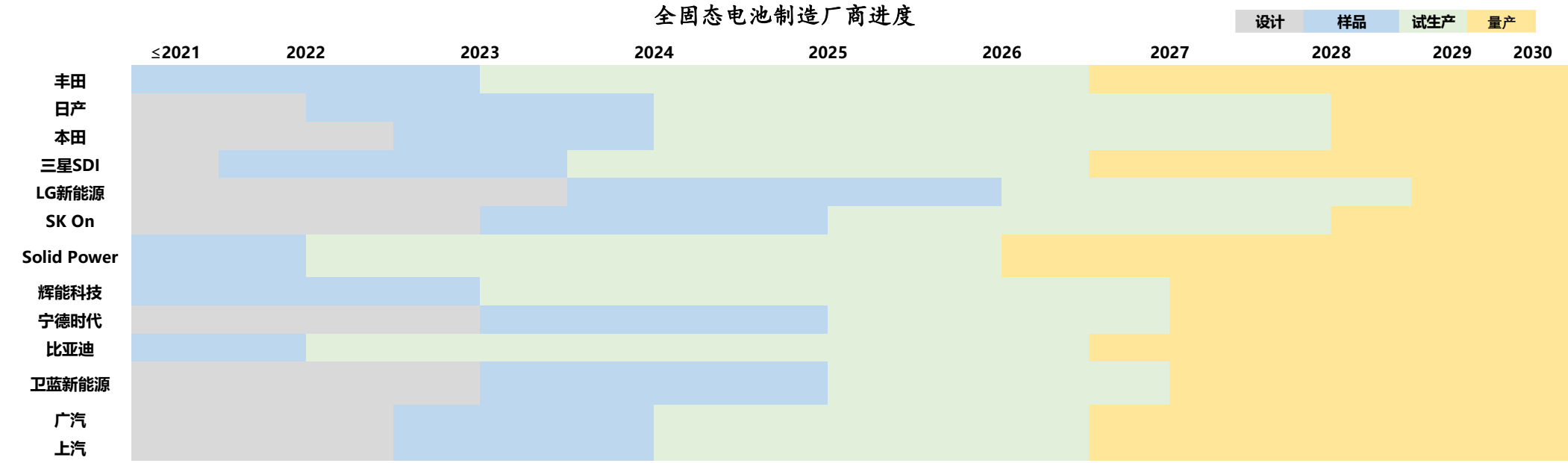
- 低空经济（eVTOL/UAM）：半固态电池
- 低空飞行作为新兴产业，涉及军用、商用、民用等多个应用场景，产品包括无人机、eVTOL、UAM等航空器，而eVTOL垂直起飞所需的动力，是地面行驶的10-15倍，对电池的需求可以概括为“三高一快”：高能量密度、高功率、高安全、超级快充。
- 国家工信部发布的《通用航空装备创新应用实施方案(2024-2030年)》，对航空锂电池的性能给出了明确的发展目标：**推动400Wh/kg级航空锂电池产品投入量产，实现500Wh/kg级航空锂电池产品应用验证**。而当前eVTOL电池的能量密度达到285Wh/kg，已经接近液态电池能量密度的上限，半/固态电池或为最贴近eVTOL需求的电池技术。
- 在航空锂电池对安全和能量密度提升的要求下，固态电池更加贴近eVTOL/UAM对电池的需求。据Trendforce数据，BOM成本中，eVTOL电池价值量占比约为15-20%。
- 近期阿联酋10亿美元购买350架中国eVTOL，采用的均为国内电池厂商——孚能科技的半固态电池。

eVTOL对电池性能需求	
指标	参数
高能量密度	• 目前已达到$\geq 280\text{Wh/kg}$ • 2030年目标500Wh/kg • 2040年目标1000Wh/kg
高功率	• $\geq 12\text{C}$ 放电（低SOC）
高安全	• 零热扩散 • 航天级热阻隔材料 • ppb级标准
快充	• 快充 $\leq 15\text{min}$

1.3 全固态电池：各电池厂/车企在2027年前后量产，各国普遍规划2030年能量密度达500Wh/kg

尽管前十年已有QuantumScape、Solid Power、SES、Factorial Energy等创业企业致力于固态电池的商业化，但由于工艺和制造成本等因素，固态电池的商业化充满挑战，至今还未达到规模化量产，当前仍面临包括成本高、工艺复杂、缺乏成熟的供应链支持等挑战。但前十年的基础研究和原型电芯开发的实现，产业已完成对固态电池技术可行性的探索和判断，本十年内将成为固态电池产品商业落地的关键期。根据TrendForce集邦咨询最新调查，丰田、日产、三星SDI等全球制造商已开始试制全固态电池，随着业者竞相量产，**预估产量可于2027年前达GWh 水平**。

而从各国动力电池技术发展规划来看，普遍计划到**2030年后单体电池能量密度达500Wh/kg**，全固态电池将成为此目标的关键技术



各国单体动力电池能量密度目标 (Wh/kg)

	2020	2025	2030	2030年后
中国		350	400	500
韩国	300	330	400	500
日本	250	300		500
美国	250			500
欧洲	235			500

1.3.1 全固态电池：产业端：日、韩联盟式研发，欧美自主研发+投资入局，各国开启“军备竞赛”

【日本】动力电池发展初期，日资企业凭借技术优势占据主导地位，但随着中国、韩国电池厂成本优势提升，日本液态电池市占率下降，从2015年的52%下降至2020、2024年的21%、5%。但随着全固态电池的出现，日资企业再次被寄予厚望。2018年，本田、丰田、松下等组成“锂电池技术与评估中心”，共同研发固态电池。近年来，日本加大对固态电池的研发投入，并成立LIBTEC等组织推动固态电池。

据《日本蓄电池产业战略》，目标是到2030年左右实现全固态正式商用。2022-2030年，日本计划投资1510亿日元支持日产、本田等企业进行全固态电池的开发。

2024年，日本经济产业省公布《电池供应保证计划》，包括丰田全固态电池等在内的27个蓄电池相关零部件/材料/生产设备研发生产项目获批，**政府补贴额达3500亿日元。**

技术路线：日本以**硫化物**体系为主，**预计27-28年量产。**

日本分阶段推进全固态锂电池商业化

环节		供应商	工程化现状
基础原料	硫化锂前驱体	出光兴产等	小试阶段，吨级
固态电解质	硫化物电解质	出光兴产、旭硝子、三井金属、三菱材料等	中试阶段，规划百吨级产能
正极材料	NMC/NCA	住友金属、日亚化学等	量产，万吨级产能
负极材料	硅负极	信越化学、大阪钛业、日立化成等	量产，千吨级产能
全固态电解质	电芯	• 特种小电池：TDK、日立造船、Maxell、Murata等 • 车用电池：丰田、松下、Gs汤浅等	• 特种小电池：已商业化 • 车用电池：中试阶段
终端应用	电动汽车	丰田、本田、日产	丰田 ：中试阶段，计划27-28年实用化； 本田 ：试制阶段，计划28年量产； 日产 ：中试阶段，计划28年商业化

【韩国】2018年，韩国三大电池企业LG化学、三星SDI、SK On组成联盟，共同开发包括固态在内的下一代电池核心技术。

LG新能源：21年与高校合作卡勒纯硅阳极高性能硫化物基固态电池。23年建设**聚合物半固态电池产线**，**目标26年商用化**，能量密度650Wh/L；28年计划实现聚合物全固态商业化，并完成硫化物电池开发，**2030年实现硫化物商业化**，能量密度超900Wh/L；

三星SDI:22年启动全固态中试线建设；23年完成建设，首批固态电池样品交付汽车oem测试，24年样品供应5家客户；**26年计划量产用于可穿戴设备的小型全固态电池，27年量产车用全固态。**

SK On:21年与Solid Power联合开发，合作硫化物全固态；24年在大田电池研究所建设全固态电池试验线；同年与德克萨斯大学合作成功开发新型聚合物电解质SIPE；计划在25、26年分别生产聚合物-氧化物复合、硫化物基两重固态电池试点原型，28、29年生产商业原型。

技术路线：兼顾**硫化物、聚合物**路线，三大电池厂持续投入研发。

韩国正在构建固态电池全产业链



【欧美】与日韩联盟式研发相反，欧美企业多采取自主研发，大型车企通过投资入局。

主要参与者:1)车企:通用、福特、大众、宝马等;2)专业化企业: Solid Power、Solid Energy Systems (SES)、Quantum Space等。

技术路线：聚合物、氧化物为主，电芯开发进入A/B样验证阶段。

车企	布局情况
戴森	2015年收购Sakti3, 并以14亿美元建立固态锂电池厂。2019年表示未来5年公司向新技术和产品追加27.5亿英镑, 一大重点就是固态点电池商业化。
通用	2016年宣布投资14亿美元固态锂电池厂, 2019年宣布关于固态研发将在沃伦技术中心进行。
福特	2019年联合三星投资Solid Power, 2021年, 同宝马向Solid Power增资。
雷诺	22年, 与空客合作, 研发运用FCEV汽车、飞机混动系统的固态电池。预计25年旗下电动车将使用钴含量为0的固态电池, 由雷诺日产-三菱联盟投资的Inoic Materials提供技术支持。
大众	2018年投资QuantumScape布局固态, 目标在25年前建立固态生产线。24年, 旗下电池公司PowerCo和QuantemScape达成协议, 实现后者下一代固态技术。
宝马	自建电芯研发中心, 研发固态, 并有望于26年实现突破性进展, 随后量产; 同时也积极与Solid Power合作, 提升研发能力。

欧美电池厂商技术路线及进展

代表企业	≤2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Factorial	40-AH 能量	20kWh 电压交付	100-AH A 样交付	100-AH B 样交付	交付	100-AH 有价量产				
QuantenScape	24 款A0产品		5-AH Q1E 交付		5-AH Q1E 交付		交付			
SES	100-AH A样	0.2CWh/㎡ 量产	100-AH A样		EV 量产电压交付		EV 量产电压交付			
Solid Power	2Ah 电压能量	20Ah 电压能量	60Ah A-1 样交付	A-2 电压交付		交付				
Blue Solutions	Gent1-3 量产电压能量		Gent4 电压交付		Gent4 电压交付		Gent4 电压交付			
Solidion	AH 电压能量	Gent1 量产电压能量	Gent1 量产电压能量	Gent1 量产电压能量	Gent1 量产电压能量	Gent1 量产电压能量	Gent1 量产电压能量	Gent1 量产电压能量	Gent1 量产电压能量	Gent1 量产电压能量
ilika	Gent1-3 量产电压能量		Gent1-3 量产电压能量		Gent1-3 量产电压能量		Gent1-3 量产电压能量			
BASQUE		AH 电压能量	20 0Ah A 样交付		交付		交付			
ION	小容量 4.4V 电压能量		100Ah 电压能量		交付		交付			

1.3.1 全固态电池：产业端：中国全固态产业化加速，有望提前至2027年前后量产

中国电动汽车百人会相关负责人表示，全固态电池预计2027年开始装车，2030年是完全可以实现量产的，国内主要汽车电池企业聚焦硫化物全固态，目标实现动力电池能量密度400wh/kg+。从企业端看，比亚迪、国轩高科、一汽集团60Ah车规级电芯已下线，能量密度可达350-400Wh/kg，充电倍率1C，循环寿命1000次，节点时间早于预期半年左右（此前预期25年年底）。据思瀚产业研究院预测，预计26年进入车企全固态路试的密集期。

此外，随着低空、机器人、AI等新兴应用场景打开固态电池市场空间，固态电池产业化落地有望提速。清陶能源预计26Q4即可实现全固态量产，这也是目前国内厂商披露的量产时间中最早的公司之一。其他电池厂商如宁德时代、国轩高科、孚能科技，以及车企长安、吉利、一汽等，预计于2026-2028年实现不同批量的全固态电池量产。

企业	全固态路线	正极	负极	电芯能量密度	半固态电芯进展	计划量产时间
宁德时代	硫化物	高镍NMC	锂金属	≥400Wh/kg	A样，20Ah级电芯	2027
比亚迪	硫化物（复合卤化物）	高镍NMC	硅基负极	≥400Wh/kg	A样，电芯≥20Ah	2027
一汽	硫化物	高镍NMC	硅基负极	375Wh/kg	A样，20Ah级电芯	2027
卫蓝新能源	氧化物-聚合物/硫化物	高镍NMC	硅基负极	≥400Wh/kg	A样(氧化物-聚合物体系) /B样（硫化物体系）	2027
吉利	硫化物	高镍NMC	硅基负极	≥400Wh/kg	A样，5Ah级电芯	2027
国轩高科	硫化物	高镍NMC	硅基负极	350Wh/kg	A样，30Ah级电芯	2030
广汽	硫化物	高镍NMC	硅基负极	≥400Wh/kg	A样，31Ah级电芯	2026
辉能科技	氧化物-聚合物/硫化物	高镍NMC	硅基负极/锂金属	> 320Wh/kg	C样，100+ Ah级电芯	2025
赣锋锂业	硫化物	高镍NMC	锂金属	≥420Wh/kg	A样，在研Ah级电芯	TBD
亿纬锂能	硫化物（复合卤化物）	高镍NMC	硅基负极	≥400Wh/kg	A样，在研Ah级电芯	2028
蜂巢能源	硫化物	高镍NMC	硅基负极	380Wh/kg	A样，20Ah级电芯	TBD

1.4 政策端：欧美日韩及国内均出台政策支持，国内25年底迎来重大专项中期审查关键节点

	政策
美国	2019年8月，美国能源部宣布，总共向通用汽车投入910万美元研究资金，其中200万美元明确表示与固态电池的研发有关。 ·2021年6月，美国发布《锂电池国家蓝图(2021-2030)》，提出到 2030年实现固态电池、锂金属电池规模化量产，能量密度达到500Wh/kg 。 ·2023年9月，美国发布《国家实验室征求加强国内固态和液流电池制造能力的建议》，宣布为5个项目投入1600万美元，以提升国内固态电池制造能力。
欧盟	·2018年12月，《电池2030+》发布，提出加速固态电池等未来电池技术研发， 目标2030年电池耐用性和可靠性至少提升3倍 。 ·2021年，《2030电池创新路线图》发布，路线图提出，固态电池作为第四代动力电池应用于新能源汽车，需要提前布局回收制度，做到固态电池全生命周期的经济效益。 ·2022年，《固态电池技术路线图2035+》发布，该路线图基于大量的文献调研和深入的专家咨询，从宏观角度预测并详细讨论了最有前景的固态电池发展路线，并总结了固态电池在材料、组分、电芯和应用层面上的现状和前景。
日本	·2018年，《日本汽车电动化的基本政策和具体行动》发布，明确提出下一代电池的技术开发方向，主要包括固态电池和创新电池。 ·2020年，《2050年碳中和绿色增长战略》进一步强调了全固态电池和创新电池的实际应用。 ·2022年9月，日本发布《蓄电池产业战略》， 力争在2030年左右实现全固态电池的全面商业化 。
韩国	·2021年7月，《K电池发展战略》发布，提出要 提供税收优惠，推动2027年全固态电池实际商业化应用 。 ·2022年11月，《充电电池产业革新战略》发布，目标是 2030年韩国电池全球市占率达到40%以上 。

发布时间	政策名称	主要内容
2020年10月	《新能源汽车产业发展规划(2021-2035年)》	开展正负极材料、电解液、隔膜、膜电极等关键核心技术研究，加强高强度、轻量化、高安全、低成本、长寿命的动力电池和燃料电池系统短板技术攻关，加快固态动力电池技术研发及产业化。
2021年10月	《2030年前碳达峰行动方案》	聚焦化石能源绿色智能开发和清洁低碳利用、可再生能源大规模利用、新型电力系统、节能、氢能、储能、动力电池、二氧化碳捕获利用与封存等重点，深化应用基础研究。
2022年1月	《“十四五”新型储能发展实施方案》	开展钠离子电池、新型锂离子电池、铅炭电池、液流电池、压缩空气、氢(氨)储能、热(冷)储能等关键核心技术、装备和集成优化设计研究，集中攻关超导、超级电容等储能技术，研发储备液态金属电池、固态锂离子电池、金属空气电池等新一代高能量密度储能技术。
2022年6月	《科技支撑碳达峰碳中和实施方案(2022-2030)》	研发压缩空气储能、飞轮储能、液态和固态锂离子电池储能、钠离子电池储能、液流电池储能等高效储能技术;研发梯级电站大型储能等新型储能应用技术以及相关储能安全技术。
2023年1月	《关于推动能源电子产业发展的指导意见》	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、钠离子电池、氢储能/燃料电池等新型电池。
2023年12月	《关于加强新能源汽车与电网融合互动的实施意见》	加大动力电池关键技术攻关，在不明显增加成本基础上将动力电池循环寿命提升至3000次及以上，攻克高频度双向充放电工况下的电池安全防控技术。
2023年12月	国资委项目	固态电池产业创新联合体 成立，由中国一汽牵头，有研广东院、国联研究院、东风汽车、长安汽车等27家单位联合组建， 目标26年实现硫化物全固态装车示范应用，能量密度400wh/kg，循环寿命1000次 。
2024年2月	《锂电池行业规范条件(2024年本)》	增加固态单体电池产品性能要求:单体电池能量密度>300Wh/kg,电池组能量密度≥260Wh/kg。循环寿命≥1000次,容量保持率≥80%。
2024年	工信部重大研发专项	24年2月，开始组织申报，4月进行答辩，4月底出评审结果，5月份进行公告， 资金体量共60亿 ，12月开启发放。每个项目8亿，其中 硫化物三家 （宁德时代、比亚迪、一汽集团）， 聚合物三家 （卫蓝新能源、清陶能源、吉利汽车）， 凝聚态一家 （宁德时代），此外，含知识产权体系的构建2亿，表征体系的构建2亿。
2025年		25年年底前，工信部项目预计进行中期审查，对车规级电芯性能进行阶段性测试。
2027年		目标27年单项目实现1千辆示范性装车应用。
	发改委超长期国债	目前 对布局固态电池的企业和机构给予实际投资额15%的资助 ，企业自行进行申报，需当地发改委推荐至国家发改委审核。

2. 电解质及正负极材料

2.1 电解质

2.1 电解质：主要分为硫化物、氧化物、聚合物、复合固态电解质等路线

根据电解质材质，固态电池可以分为**无机物固态电解质（ISE, inorganic substance electrolyte）、聚合物固态电解质（SPE, solid-state-polymer electrolyte, SPE）**，ISE又可以分为硫化物、氧化物、卤化物等三类技术路线，此外，也有有机-无机复合固态电解质技术路线。

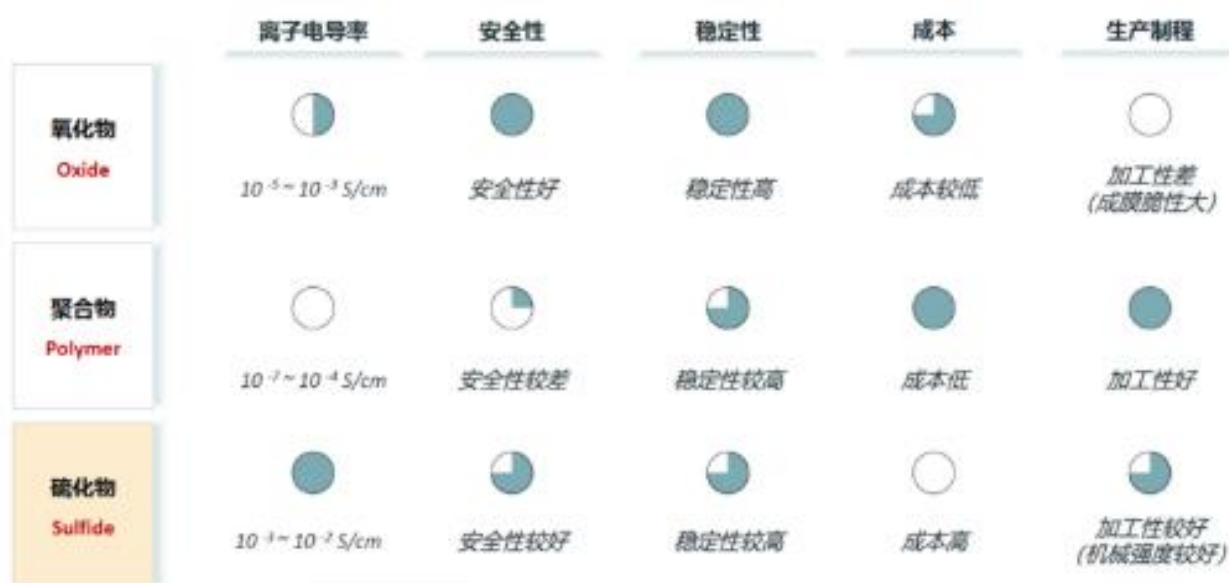
主要技术路线	硫化物固态电池	氧化物固态电池	聚合物固态电池
电解质材料	LPS体系 : LiGPS LPGS体系 : LiSnPS/LiSiPS	晶态 : 石榴石型（LLZO）、钙钛矿型LLTO、钠超离子导体（NASICON） 非晶态 : LiPON	聚氧化乙烯(PEO)、聚丙烯腈(PAN)、聚硅氧烷(PS)、聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)等聚合物电解质+其他类别电解质
电解质离子导电率	LiSnPS、LiGPS: 10 ⁻³ -10 ⁻² S/cm;	NASICON: 10 ⁻⁴ S/cm; LLZO: 10 ⁻⁶ -10 ⁻⁵ S/cm; LLTO: 10 ⁻⁵ -10 ⁻³ S/cm	PEO: 10 ⁻⁷ -10 ⁻⁶ S/cm; PAN、PS: 10 ⁻⁵ -10 ⁻⁴ S/cm
电化学窗口	较宽（0-5V）	宽（0-5.5V）	较窄（0-4V）
界面抗阻	大	很大	较大
界面相容性	低	高	高
热稳定性	高	高	高
空气稳定性	较差（水解生成H2S）	高	高
能量密度	预期达900Wh/kg	预期达700Wh/kg	预期达600Wh/kg
技术难点	对空气敏感	机械加工容易脆裂	离子导电率较低、循环寿命较短

2.1 电解质：主要分为硫化物、氧化物、聚合物、复合固态电解质等路线

综合来看，硫化物综合表现最佳（尤其在离子电导率、电化学稳定窗口等方面），但需突破成本问题。

根据SMM整理全球不同技术路线的固态电池市场规模，预计到2035年，硫化物的路线占比有望达到43%左右，有望逐步成为主流路线。而目前，已经有包括比亚迪、宁德时代、日产、SK等在内多家产业链企业布局硫化物全固态路线。

各类固态电解质性能对比



SMM预计硫化物电解质占比未来会逐步提升



2.1.1 电解质：硫化物电解质

【硫化物电解质】

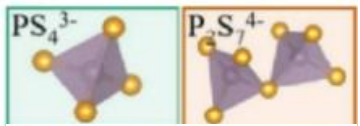
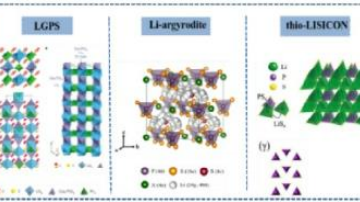
硫化物固态电解质是一种无机固体电解质，主要由硫、氧、氢等元素组成。硫化物固态电解质其实是由氧化物固态电解质衍生出来的，氧化物基体中氧元素被硫元素取代，形成了硫化物固态电解质。而硫的电负性比氧小，对锂离子的束缚力更低，同时硫离子半径大，使晶体结构中锂离子的传输通道更宽，有利于离子的迁移，因此硫化物固态电解质有着三类电解质中最高的离子电导率。因为这个原因，硫化物固态电解质成为以丰田为代表的各类企业及机构的研究热点。硫化物类固态电解质也是目前研究进展最快的一类电解质体系。

- 按元素构成分类：硫化物固态电解质主要包括Li2S—GeS2、Li2S—P2S5、Li2S—SiS2等二元化合物，以及Li2S—MeS2—P2S5（Me=Si，Ge，Sn，Al等）三元化合物。按形态分类：硫化物固态电解质主要有玻璃态（如20Li2S-80P2S5）、玻璃陶瓷态（如Li7P3S11）、晶态（如Li10GeP2S12）。

硫化物电解质按元素构成分类

硫化物类型	代表	优点	缺点
二元硫化物	Li2S—P2S5、Li2S—GeS2、Li2S—SiS2等，前者研究最多	Li2S—P2S5基玻璃部分晶化后形成的微晶玻璃电解质具有更高的离子电导率，对金属锂高度稳定，电化学窗口大约为10V。	材料的锂离子电导率仍然较低、化学稳定性稍差、活化能较高，同时制备成本偏高，并且该体系容易与水反应生成H2S气体、难以实现工业化的生产和利用。
三元硫化物	Li2S—MeS2—P2S5（Me=Si，Ge，Sn，Al等）	在二元硫化物基础上加入另外一种硫化物网络改性剂以改善电导率低、电化学稳定性差等问题。2011年，室温离子电导率达1.2x10-2S/cm的Li10GeP2S12首次被制备出来，导致了块体材料上离子迁移率的基础研究，促进了下一代电池的发展。	由于Ge价格昂贵，Roling等人以Sn替代Ge使材料的成本降三倍。实验表明，在27℃时Li10SnPS12具有较大的晶界阻抗，有望通过合成条件的优化来减小晶界阻抗。

硫化物电解质按形态分类

形态	结构图	化学组成	离子电导率 (S cm-1) (粉体/块体)	介绍
玻璃态		Li2S-SiS2 Li2S-P2S5-LiI Li2S-SiS2-LiI Li4SnS4·LiI	5.3×10^{-4} 6.5×10^{-4a} 1.8×10^{-3} 2.1×10^{-4a}	通过机械球磨或高温熔融后快速冷却的方法获得，在XRD表征下没有明显的峰。玻璃态固态电解质主要由正硫代磷酸盐，焦磷酸盐，偏硫代磷酸盐，次硫代磷酸盐四类微小晶体构成，其传导离子的机理尚不十分明确。
玻璃陶瓷态		Li7P3S11 80Li2S-20P2S5 95(0.8Li2S-0.2P2S5)·5LiI 9Li2S·3P2S5·Ni3S2	1.7×10^{-2a} 1.7×10^{-4} 2.7×10^{-3a} 2.0×10^{-3}	通常为球磨后经过一步低温烧结后获得，属于玻璃态和晶态混合的亚稳相，在XRD表征下有少量的峰。
晶态		Li3.25Ge0.25P0.75S4 Li3.833As0.166Sn0.833S4 Li5.5PS4.5Cl1.5 Li6.6Ge0.6P0.4S5I Li6.6Si0.6Sb0.4S5I Li10GeP2S12 Li9.54Si1.74P1.44S11.7Cl0.3	2.2×10^{-3a} 1.4×10^{-3} 9.6×10^{-3} 5.4×10^{-3} 2.4×10^{-2a} 1.2×10^{-2a} 2.5×10^{-2a}	一般通过高温烧结制成，有明确的晶体结构与XRD峰。也有部分研究采用高能球磨、研磨后烧结及液相法制备得到。晶态的硫化物固态电解质按晶体结构主要分为thio-LISICON型、Li-argyrodite型、LGPS型。这三种类型的电解质都有具体的晶体结构和锂离子传输通道，其结构组成和离子迁移机理都较为明确。

2.1.1 电解质：硫化物电解质

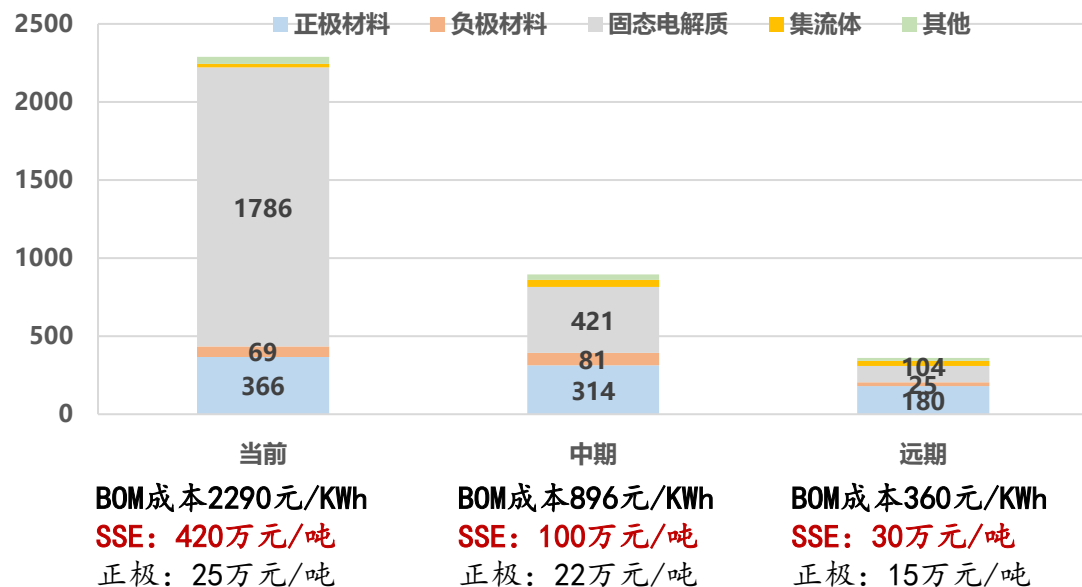
【硫化物电解质】

• **优点：**是离子电导率最接近且有望超越液态电解质的一类固态电解质，加上硫化物材料质地柔软，易于机械加工，制备电极时能与活性材料保持良好的固固接触，因此基于硫化物路线的固态电池性能潜力大，被丰田、日产、三星SDI、LGES、SK On等日韩企业以及中国的CATL、比亚迪、国轩高科等多家企业选择。

• **缺点：**硫化物电解质面临材料成本偏高等劣势，目前硫化物固态电解质及其前驱体硫化锂材料尚未实现工业化批量制备，且硫化物电解质空气稳定性差、对水分非常敏感，因此对电池制造的环境要求较高，最终导致硫化物基固态电池成本高。

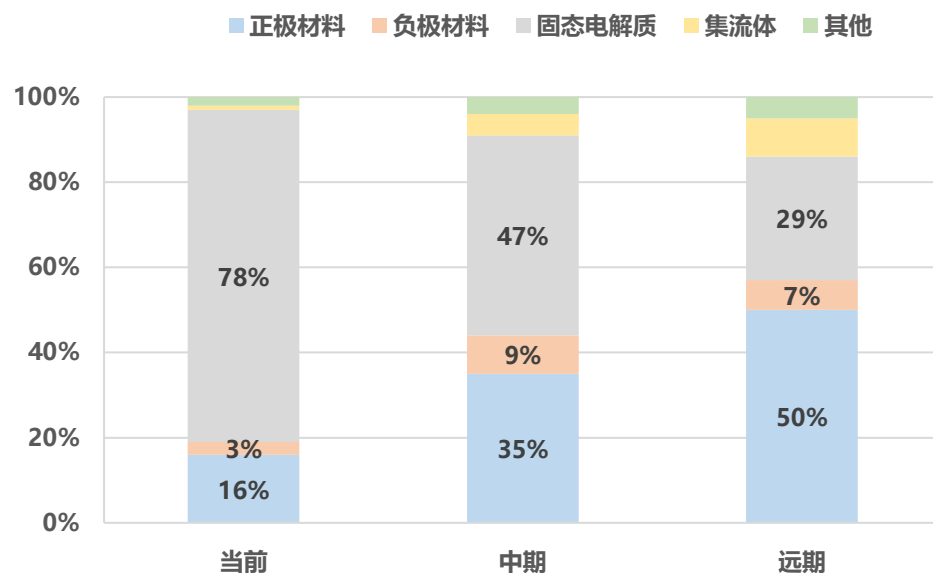
据Trendforce数据，预估硫化物基固态电池产业化初期电芯BOM成本在1-2元RMB/Wh，当硫化物电解质规模量产后，中期（2030年）电芯BOM成本预计在1元RMB/Wh以内，远期（2035年）当固态电解质成本降至30万元RMB/吨以内时，电芯BOM成本有望降至0.4元RMB/Wh以下。

硫化物固态电池电芯BOM成本预测 (RMB/KWh)



SSE：硫化物固态电解质
BOM成本：核算基于超高镍正极 (Ni90)+硅基负极+硫化物电解质 (LPSC)
电芯能量密度：假设初期微360Wh/kg, 中期400Wh/kg, 远期500Wh/kg

硫化物固态电池电芯BOM成本占比预测

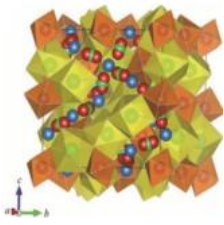
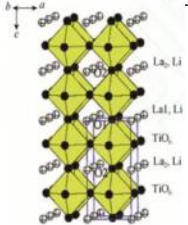
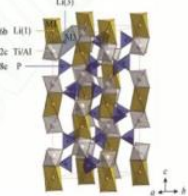


2.1.2 电解质：氧化物电解质

【氧化物电解质】

- 优点：机械强度高、热稳定性和空气稳定性好（制备对环境要求不苛刻，易于大规模生产）、电化学窗口宽，可适配高容量的正负极材料。
- 缺点：固态电解质与正负极活性材料的固固界面接触差，导致电池的内阻偏高，因此电池设计时通常会在正/负极侧添加电解液浸润，改善界面接触。

氧化物电解质材料主要类型及介绍

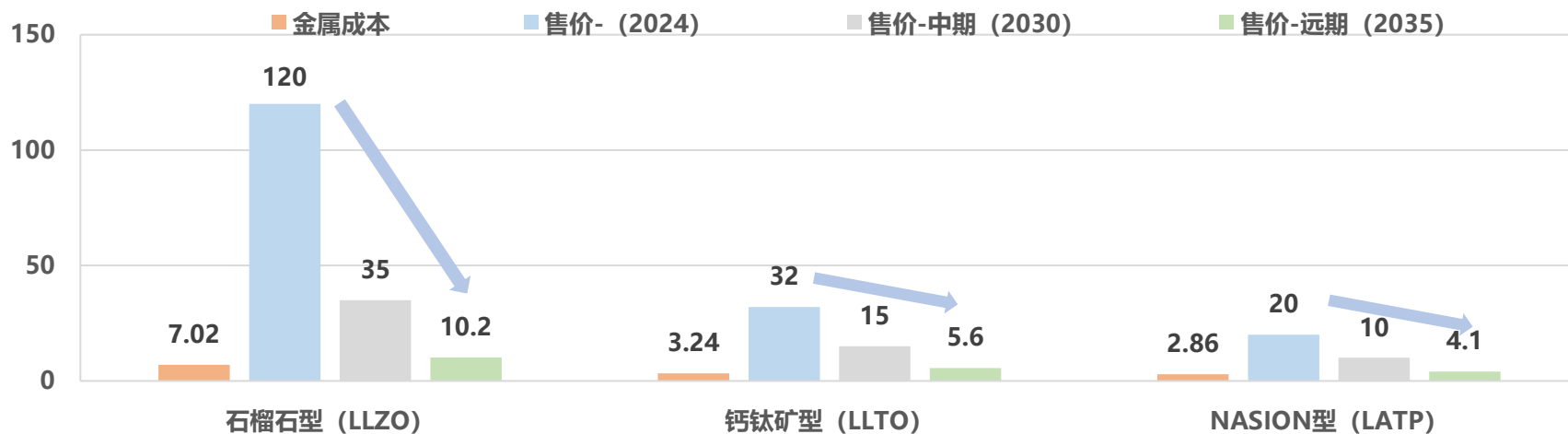
	图片	介绍
石榴石型 (LLZO)		石榴石型固态电解质为Li7La3Zr2O12，代表材料为LLZO（锂镧锆氧/锆酸镧锂，Li7La3Zr2O12），有两种结构，其中立方相结构比四方相结构电导率高，其晶体骨架网络由La3+、Zr2+和O2-离子构成，Li离子分布在晶体网格之内，这种相邻位置之间Li离子的最短距离是导致快速离子传输的主要原因，并进而提供了高的离子电导率。在25℃时LLZO的离子电导率为3×10-4S/cm，其晶界电阻占总电阻的比例<50%，因此，LLZO的总体离子电导率与晶内离子电导率处于同一量级，保证了其作为固态电解质的高的总体离子电导率。LLZO固体电解质在全固态电池中的应用潜能非常大，因为其不与金属锂反应，低的界面和晶粒阻抗，在空气中性质比较稳定，并且热处理烧结的致密化陶瓷的强度和硬度都比较高。 通常未掺杂的LLZO具有电化学性能稳定、电化学窗口宽等优点，但相结构稳定性差，振实密度低，具有较大的晶界电阻和室温离子电导率低，在全固态电池的应用中会存在较大的界面电阻。而且LLZO在具有水分和CO2的空气中暴露，由于H+/Li+交换的作用，会在表面生成Li2CO3，导致性能逐渐劣化。 因此，如何增强LLZO体系固态电解质在大气环境中的化学稳定性，是其面临的关键问题。主要通过掺杂不同金属元素等对LLZO进行改性，目的是稳定立方相结构、优化制备路线、减小其界面电阻和晶界电阻、提高其室温离子电导率。
钙钛矿型 (LLTO)		钙钛矿结构的Li3xLa2/3-xTiO3（简称LLTO，0<x<0.16），代表材料为（锂镧钛氧/钛酸镧锂，Li0.33La0.56TiO3），并且在x=0.11时，其室温电导率达到最高，晶体电导率为10-3S/cm，也即现在提到最多的Li0.33La0.56TiO3。典型钙钛矿结构陶瓷的分子式为ABO3，A位一般是稀土或碱土元素离子，B位为过渡金属离子，A位和B位都可以被半径相近的金属离子部分取代而保持其晶体结构基本不变。 钙钛矿结构复合氧化物在结构上通常很稳定，其中Li+通过空位跃迁机制进行传输，即Li+向相邻的空位定向跃迁从而产生锂离子电导。室温LLTO体电导率可以达到1x10-3S/cm，但是其晶界电导率比体电导率小两个数量级，短板效应使得LLTO陶瓷的总电导率较低，以致未能满足在锂电池中实际应用的要求。 目前，需通过一定的掺杂改性等手段提高总电导率。
NASICON型 (LATP)		NASICON（钠超离子导体）类氧化物固态电解质的通式为AM2(PO4)3，代表材料为LATP（磷酸钛铝锂，Li1.3Al0.3Ti1.7(PO4)3），在室温下的离子电导率高达10-4S/cm。此外，与石榴石型电解质(2.91 V)相比，LATP在湿化空气或二氧化碳中化学稳定，预计其氧化电位(4.21 V)较高。这类电解质具有较高的离子电导率和较宽的电化学窗口，被认为是最适合高压固态电池的固体电解质材料。而且NASICON型电解质对空气和水稳定，可以在空气氛围中进行材料的规模化制备和电池组装，有望实现工业化生产。 不过虽然LATP体系的离子电导率很高，但是其体系中Ti4+很容易被Li+还原，其对Li/Li+的稳定窗口小于2.5V。 除了LATP，另一种广受关注的NASICON结构电解质材料就是Li1+xAlxGe2-x(PO4)3（LAGP），LAGP的室温离子电导率也可以达到10-4S/cm级别。与LATP类似，LAGP的总体离子电导率受到晶界离子电导率的影响。不过，GeO2是一种非常昂贵的原料，如何通过有效的取代减少Ge的用量是下一步的研究课题。

2.1.2 电解质：氧化物电解质

【氧化物电解质】

- 成本：**综合成本介于聚合物和硫化物基固态电池之间，但氧化物固态电解质也存在**加工难度大**等缺点，尤其是超薄型氧化物固态电解质隔膜（ $<30\mu\text{m}$ ），因此其**隔膜厚度通常较厚**，**不利于电池能量密度的提升和单位瓦时成本的降低**。
- 目前常用的几种氧化物电解质，如石榴石型（LLZO）、钙钛矿型（LLTO）、NASICON型（LATP）等，虽然已有部分企业具备千吨级量产能力，但市场应用层面该材料还未规模化放量，材料实际售价接近其金属总成本的10倍左右，未来还有较大降本空间。

氧化物电解质材料成本趋势（单位：万元/吨）



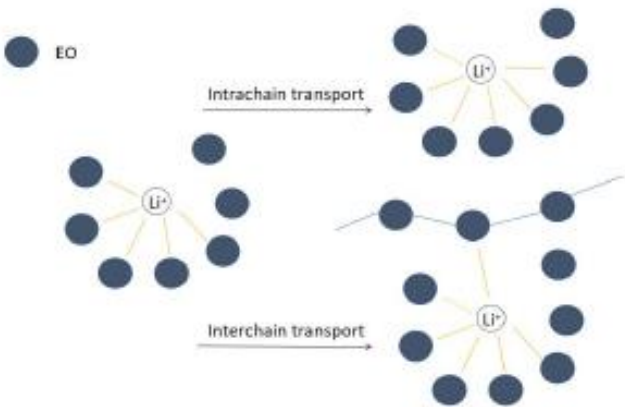
	金属成本	售价- (2024)	售价-中期 (2030)	售价-远期 (2035)
石榴石型 (LLZO)	7.02	~120	35	10.2
钙钛矿型 (LLTO)	3.24	~32	15	5.6
NASICON型 (LATP)	2.86	~20	10	4.1

2.1.3 电解质：聚合物电解质

【聚合物电解质】（solid-state-polymer electrolyte, SPE）

- 为了克服无机固体电解质与电极之间存在刚性界面的问题，人们开发了聚合物固体电解质。聚合物基体和锂盐共同构成聚合物固体电解质。常见的聚合物电介质有PEO（聚氧乙烯）、PAN（聚丙烯腈）、PMMA（聚甲基丙烯酸甲酯）和 PVDF（聚偏二氟乙烯）等。PEO因其易于与锂离子配对、低玻璃化转变温度以及容易形成膜的特性，被认为是最受关注的聚合物固体电解质基底之一。锂盐的锂离子与PEO中的氧原子结合，形成了络合作用；在PEO基体中，这些锂离子以PEO分子链的动态移动来进行迁移。
- 此外，聚合物固体电解质中的离子电导率与其结晶度是成反比的，当结晶度下降时，非晶态区域会增加，从而导致离子电导率上升。因为锂离子需要在PEO的非晶区进行传输，然而PEO需要在55℃以上的高温环境下才能转变为非晶状态，因此PEO在室温下具有较高的结晶度，在室温下其离子导电性相对较低。
- 另外，选择合适的锂盐对于提升PEO基聚合物固体电解质的性能也很重要；小分子锂盐在PEO中的溶解性较差，不利于锂离子的释放，而大阴离子锂盐在PEO中则更容易分离，能够增加游离的锂离子数目；所以LiTFSI作为大阴离子锂盐的一种，在聚合物固体电解质研究中备受关注。
- PEO、PAN、PMMA、PVDF聚合物材料是当前锂离子用聚合物固体电解质体系的研究热点，其中PEO是聚合物电解质中最为常见的基体材料，PAN和PMMA材料多用于制备凝胶聚合物电解质，或者和其他聚合物共混或共聚制备复合固体电解质。比如PEO与PMMA制备成复合固体电解质膜，可以有效弥补各自的缺点，以获得一种拥有低结晶度，优良力学性能的复合凝胶电解质等。

锂离子在PEO基体中的扩散方式



常见聚合物电解质优劣势对比

聚合物类型	优点	缺点
PEO(聚氧乙烯)	PEO材料被发现最早，能和许多锂盐发生络合，对锂盐溶解性好，而且PEO在高于其熔点(65℃)的温度时具有高锂离子导电率以及与电极材料间较小的界面阻抗。因此PEO可以被用作无液体固体电解质的基底以增加锂离子电导率和减少界面阻抗。	PEO室温下结晶度高、离子电导率低，机械强度差，还有就是PEO黏性较大会影响成膜性，不适宜直接作为电解质使用，需要对其进行一定的改性。
PAN(聚丙烯腈)	PAN是一种稳定性好、耐热性强、阻燃性好的聚合物，合成简单，稳定性好，较为适合用作基质材料，采用有机电解液对其进行增塑后，可形成凝胶电解质。	PAN中的CN基团容易吸引锂离子，但本身离子传导性并不好，且对金属Li不稳定。
PMMA(聚甲基丙烯酸甲酯)	PMMA基聚合物主链中存在羰基侧链，能够作用于碳酸酯类溶剂中的O原子，可以大量吸附电解液，同时PMMA结构稳定且对金属Li稳定，与电极接触面形成的钝化膜阻抗较小。	结晶度低，成膜后硬脆、柔韧性差、机械强度差
PVDF(聚偏二氟乙烯)	材料熔点较高、热稳定性良好，具有较高的电化学稳定性，介电常数高，有助于促使锂盐离子化，且成膜性较好	其结构导致分子内结晶度仍较高（65%-78%），不利于离子导电，因此研究者使用HFP和PVDF共聚，研发了PVDF的衍生物PVDF-HFP。

2.1.3 电解质：聚合物电解质

【聚合物电解质】

- 优点：柔韧性好，能与电极在界面上形成良好结合。聚合物固态电池**制造工艺发展较早，相对成熟**，和现有的锂电池制造工艺较为接近，其**生产制造具有较大成本优势**，尤其以PEO基聚合物最为常见，以PEO基聚合物锂金属固态电池为例，其电芯总成本（不含税）约**0.5元/Wh**，与液态电池相当，法国Blue Solutions已在前十年（2011-2020年）将此路线固态电池在欧洲地区推向商业化应用。
- 缺点：此类固态电池存在固态电解质**室温离子电导率低、电压窗口窄**的缺点，**较难适配高电压型正极材料**（如NMC、LCO、尖晶石镍锰酸锂等），**高电压下的化学稳定性不佳**，不利于高比能电芯的设计。其次是PEO基聚合物电解质**需要在50-80℃温度范围内运行**，限制了其大规模商业化推广。（在高温条件下，熔融态聚合物的机械强度较低，难以有效抵抗锂枝晶的生长，从而导致锂枝晶穿透电解质，引发电池短路）。
- 目前，还需设计电化学窗口更宽、离子电导率更高的聚合物电解质复合材料，以提升电池性能。

2.1.4 电解质：“后起之秀”——卤化物路线

【卤化物电解质】

同时具有**较高的室温锂离子电导率**和**高电化学稳定性**($>4.0V$)和**电极材料兼容性**的固态电解质依然是一项艰巨的挑战。目前已经报道的室温锂离子电导率接近甚至超过液态电解质水平($10^{-2} S \cdot cm^{-1}$)的固态电解质有**氧化物电解质**和**硫化物电解质**这两类材料。然而，氧化物固态电解质受限于其**超高的烧结温度**和**较差的机械加工性能**。硫化物固态电解质则存在**电化学窗口较窄**，与**正极材料兼容性较低**，且在潮湿环境下极易分解产生 H_2S 气体。这些问题限制了它们在全固态电池领域的应用。

卤化物基固态电解质在室温下的离子电导率能达到 $10^{-3} S \cdot cm^{-1}$ ，且理论离子电导率可达 $10^{-2} S \cdot cm^{-1}$ 量级。锂离子电池中的卤化物电解质源于**在卤化锂 LiX ($X = Br, Cl, F$) 中引入高价态的过渡金属元素阳离子，调节 Li^+ 及空位浓度，进而形成类似 Li_a-M-X_b 类化合物**，通过调控不同卤族元素阴离子的组分特性，此类化合物中阴离子骨架一般具有较大的极化率，且与锂离子的相互作用较弱。

离子电导率

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**（氯化物 $> 4V$ vs. Li/Li^+ 、氟化物 $> 6V$ vs. Li/Li^+ ），**与高压正极材料具有更好的兼容性，可以在高电压窗口下的稳定循环**。

稳定性

- 1) **温度稳定性**：卤化物电解质结构多变，在不同温度下易发生相转变而影响电导率，进而影响安全和循环性能。
- 2) **空气/湿度稳定性**：卤化物固态电解质在空气中极易吸水形成水合物并进一步分解，但在**干燥的空气中表现出良好的稳定性**，例如 Li_3InCl_6 在经过严格控制的脱水过程后， $Li_3InCl_6 \cdot 2H_2O$ 可以重新转化为 Li_3InCl_6 ，展现出良好的水合物可逆性。相比硫化物固态电解质在空气中完全分解并反应产生有毒的 H_2S 气体，卤化物电解质展现出**更高安全性，环境友好性和可回收性**。

与电极材料的兼容性

- 1) **正极材料兼容性**：卤化物电解质**对大部分含锂氧化物正极都有较好的兼容性**。 $LiAlCl_4$ 电解质与钴酸锂正极在 $100^\circ C$ 循环150圈后仍保持较高的循环比容量。此外，还有许多其他类的卤化物固态电解质都与未包覆的 $LiCoO_2$ 正极材料表现出良好的循环效率。许多卤化物如 Li_3YCl_6 与三元材料 $LiNi_{0.8}Co_{0.1}Mn_{0.1}O_2$ 、 $LiNi_{0.88}Co_{0.11}Al_{0.01}O_2$ 等也具有较好的兼容性，由于卤化物一般具有较高的电化学稳定窗口，适合匹配高压正极来构筑高能量密度的全固态锂电池。
- 2) **负极材料兼容性**：卤化物固态电解质与锂金属的不稳定性主要取决于卤化物组成中的**过渡金属元素种类**，卤化物固态电解质与锂金属具有较高的电势差，使其**直接与锂金属或锂合金负极接触时极其不稳定**，目前的研究中，仅有少部分电解质在与 Li 金属及 $Li-In$ 合金直接接触时能保持稳定，例如 Li_3HoCl_6 电解质能够实现组装 $Li-In$ 对称电池实现稳定循环，此外， $Li_3YBr_5 \cdot 7F_2O_3$ 电解质也显示出比 Li_3YBr_6 具有更好的对 Li 金属稳定性，这可能是由于**氟化物**与锂金属接触形成的产物能更好地填补位于固态电解质和相关界面上的空位和缺陷，形成更加致密的中间层，从而阻止进一步反应的生成。由于卤化物具有较高的还原电位，与锂合金或锂金属直接接触时极易发生反应，进而产生锂枝晶穿透造成短路。因此，卤化物固态电解质的全固态电池结构中一般采用复合多层电解质的方法来避免卤化物电解质与负极的直接接触，由于目前**硫化物具最高的锂离子电导率和较好的负极稳定性**，所以多采用**卤化物硫化物-负极的分层设计**思路将卤化物应用在全固态锂离子电池中。
- 3) **与其他电解质的兼容性**：对于卤化物、硫化物电解质接触时会产生界面阻抗、层间化学不相容的问题，在双电解质层间通过**ALD涂覆**的办法额外引入一层致密的 Li_3PO_4 薄膜，可以抑制这类界面不兼容问题，并实现更加稳定的电池循环性能。

2.1.5 电解质：有机-无机复合固态电解质

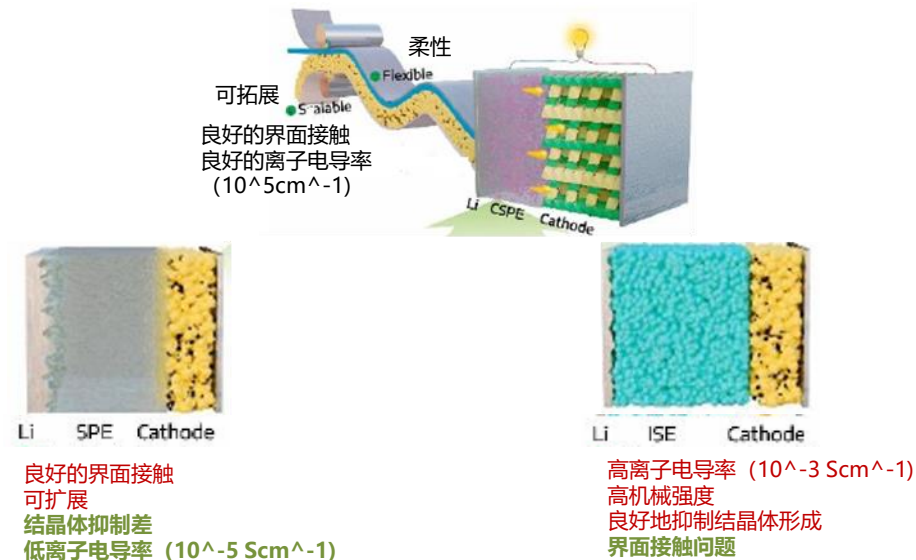
【有机-无机复合固态电解质】

尽管无机和聚合物固态电解质各自拥有独特的优势，它们的综合性能仍有待提升。因此，研究者们提出了一种新型的复合固态电解质，这种电解质结合了无机固态电解质和聚合物固态电解质的特性，从而继承了两者的优点。这种复合固态电解质具有较强机械性能的同时，还拥有优秀的离子电导率，且能够有效应对锂枝晶生长等界面问题，进一步增强了固态电解质的整体性能表现。构建有机-无机复合固态电解质可以有效提高固态电解质的整体性能。

通过结合无机固态电解质与聚合物固态电解质，可以提升复合电解质中的离子电导率。这种复合体系中的无机填料根据是否含有锂离子，可划分为惰性和活性两种类型。

惰性填料：作用为降低聚合物的结晶度，以提高电解质的电导率和机械稳定性，常见的惰性填料有Al₂O₃、TiO₂、SiO₂、ZrO₂、Y₂O₃等。

活性填料：通过提供额外的锂离子来优化电解质的导电性能，活性填料包括石榴石型、钙钛矿型、NASICON型、LISICON型等无机填料。

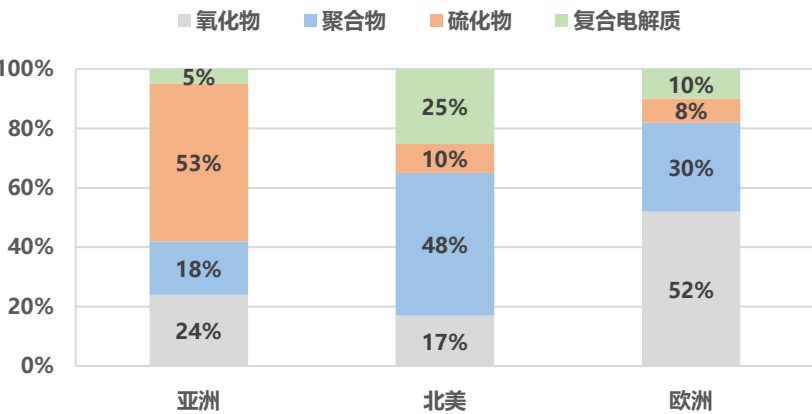


2.1 电解质：亚洲更关注硫化物路线，北美、欧洲更关注聚合物、氧化物路线

据Trendforce数据，从全球来看：

- **亚洲：**对**硫化物**电解质技术路径关注较多，硫化物占比达到53%，其次为氧化物、聚合物。其中，日本固态电池产业起步最早，主流技术路线是**硫化物电解质**，韩国的发展思路则是研发**重量轻的硫化物全固态电池**以及高安全性的**氧化物固态电池**。
- **北美：**更偏重于**聚合物**路线，选择聚合物路线的企业占比48%，其次为有机-无机复合电解质、氧化物；美国固态电池在航空领域的应用处于世界前列。
- **欧洲：**更关注**氧化物、聚合物**路线。法国博洛雷集团研发的金属锂聚合物电池是全球首个实现商业化应用的固态电池，已成功搭载于BlueCar电动汽车，但欧洲后续的固态电池产业化进展较为缓慢。目前，宝马集团、大众集团等大型汽车企业通过技术投资方式来推动欧洲固态电池产业的发展。

各地区不同固态电池技术路线布局情况



2.2 正极

2.2 正极：沿用当前的材料体系，可使用较高电压平台的电极材料

【正极材料】

固态电池的正极材料可以继续沿用当前的磷酸铁锂、锰酸锂、钴酸锂、三元NCM等材料体系，其中比较常用的材料主要是高镍多元材料、富锂锰基材料。

当电压超过4V时传统有机电解液开始分解，很难提高电池电压上限，而固态电解质与电极材料的界面反应时，几乎不存在固态电解质分解的副反应，能承受更高的电压（5V），因此可以在固态电池中使用具有较高电压平台的正极材料，通过提升工作电压以获得更高的能量密度。例如，通过向LiMn₂O₄中掺入少量过渡金属离子，形成的LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O₄；富锂锰基正极由层状Li₂MnO₃与层状LiMO₂（M=Ni，Co，Mn或任意组合）按不同比例形成的固溶体，克容量和电压平台均显著高于传统中低镍三元和磷酸铁锂正极材料，是全固态电池可选用的理想正极材料。

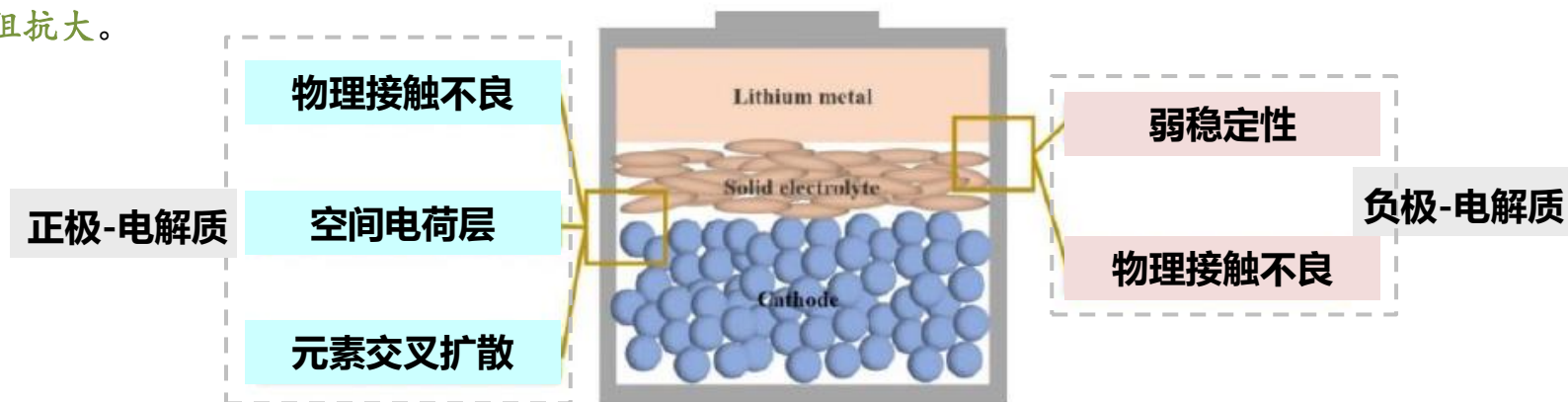
然而，电极与固态电解质之间的界面问题。由于固态电解质已经替代了传统电池中的隔膜和电解液，这些电解质与正极材料和负极材料的表面形成了直接的接触。

因此，为了避免电池的正负极直接接触导致短路的风险，固态电解质需要起到阻隔作用；还需要确保锂枝晶不会生长，从而影响其循环使用的寿命；此外，固态电解质还具有迅速传递锂离子的能力，确保电池内部放电反应是完全可逆的。

所以，固态电池在电解质与正、负极界面上存在着以下问题：

固态电解质与电极之间的问题

- ①正极、负极与固态电解质界面固-固接触，界面阻抗大。
- ②电解质与负极之间的化学/电化学不稳定界面。
- ③正极与电解质之间存在空间电荷层。
- ④正极与电解质之间元素交叉扩散的问题。



2.2 正极：正极材料与电解质界面的问题

■ 电解质与正极之间的电阻较大、空间电荷层、元素扩散等问题，可以被分类为**化学-电化学界面问题**、**物理界面问题**两类。

■ **【1. 界面抗阻大】** 固态电解质与电极之间的界面阻抗之所以较大，主要是因为它们之间的**接触状况并不理想**。在电池的充放电过程中，**正极活性材料会经历锂的嵌入和脱出，导致晶格参数的变化，从而引起材料颗粒的体积变形**。电极材料体积变化导致电极与固态电解质之间出现间隙，减少了它们之间的接触面积，从而限制了锂离子在界面传导；由于**接触面积的逐渐减少**，电池的循环表现受到了严重的影响。与无机固态电解质相比，虽然聚合物电解质的界面问题得到了一定的缓解，但离子的传输仍然面临一些挑战。

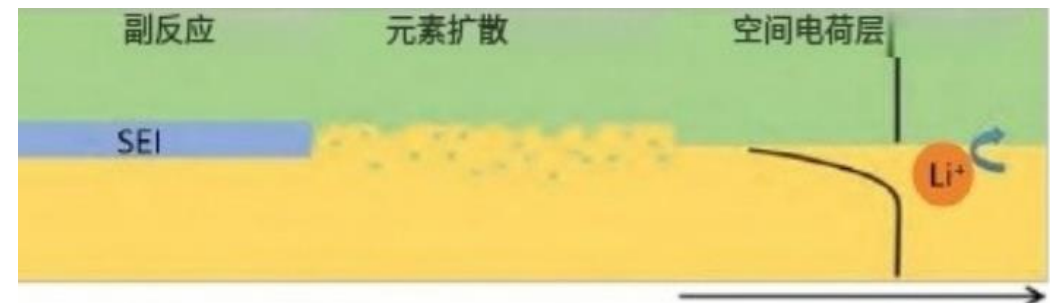
正极材料与电解质的物理界面问题



■ **【2. 空间电荷层】** 当电极和电解质的化学势不能互相匹配时，会导致**界面上的载流子移动和重新排列**，从而形成一个**空间电荷层**。空间电荷层是指当两个接触相互作用的物质，经过界面接触和化学反应后，由于它们各自拥有不同的锂离子电势，导致锂离子在界面上形成积累或耗尽的特定区域。这种现象常见于各种电极和电解质界面。空间电荷层的形成可能导致较大的离子和电荷梯度场，增加了正极与电解质界面的电阻，从而限制了锂离子在该界面上的传输速度。

■ **【3. 元素扩散】** 在电极与硫化物以及氧化物的固态电解质之间，元素会发生扩散，这会导致具有高电子/离子导电性的**混合导电界面层**的形成，从而增加界面电阻并降低电池的循环性能。元素扩散可以引起电子/离子混合导体界面上的持续副反应，这会导致界面阻抗的增加。

正极材料与电解质的化学-电化学界面问题



■ **解决方案：**为了解决这些难题，可以考虑加入**惰性的包覆层**，从而减少界面副反应发生；也可以在**正极材料颗粒上直接原位生长固态电解质**，确保它们能够充分地相互接触；此外，采用**柔性的界面包覆层**设计也被认为是一种行之有效的策略，目的是加强两者之间的紧密接触；此外，为了提高固态电解质在高压环境下的耐受性，可以考虑对其进行**离子掺杂**的改性技术；最后，在正极材料和电解质之间，可以构建一个相对较薄的、不会导电的**过渡层**，作为电压的过渡区域。

2.3 负极

负极材料是决定锂电池性能的关键因素之一，不同的负极材料可以通过**嵌入、合金化、转换反应**实现储锂。目前已广泛应用的负极材料包括石墨类、Li4Ti5O12、无定形碳（硬碳、软碳）、硅基材料、锂合金等。固态电池的负极材料主要有**碳族负极、硅基负极、金属锂负极**3类。

	金属Li负极材料	碳族负极材料	氧化物负极材料
		碳族的碳基、硅基和锡基材料	主要包括金属氧化物、金属基复合氧化物和其他氧化物。典型的氧化物负极材料有：TiO2、MoO2、In2O3、Al2O3、Cu2O、VO2、SnOx、SiOx、Ga2O3、Sb2O5、Bi2O5等，
优点	因其 高容量、低电位 的优点成为全固态电池最主要的负极材料之一	碳基以石墨类材料为典型代表，石墨碳具有适合于锂离子嵌入和脱出的层状结构，具有 良好的电压平台，充放电效率在90%以上	这些氧化物均具有 较高的理论比容量
缺点	1) 金属Li在循环过程中会有 锂枝晶 的产生，使可供嵌/脱的锂量减少，造成短路等安全问题。 2) 易与空气中的氧气和水分等发生反应，且不耐高温，给组装和应用带来困难。	理论容量较低（仅为372mAh/g）是这类材料最大的不足，且目前实际应用已经基本达到理论极限，无法满足高能量密度的需求。	在从氧化物中置换金属单质的过程中，大量的Li被消耗，造成巨大的容量损失，并且循环过程中伴随着巨大的 体积变化 ，造成电池的失效
解决方案	其它金属与 锂组成合金 ，这些合金材料一般都具有高的理论容量，且锂的活性因其它金属的加入而降低，可以有效控制锂枝晶的生成和电化学副反应的发生，从而促进了界面稳定性。锂合金的通式是LixM，其中M可以是n、B、Al、Ga、Sn、Si、Ge、Pb、As、Bi、Sb、Cu、Ag、Zn等。 (但锂合金依然存在循环过程中电极 体积变化大 ，甚至电极粉化失效、循环性能下降等问题，改善方法包括 合 成新型合金材料、制备超细纳米合金 、复合合金体系((如活性/非活性、碳基复合以及多孔结构)等。)	最近，石墨烯、碳纳米管等纳米碳作为新型碳材料出现在市场上，可以使电池容量扩大到之前的2-3倍。	通过与碳基材料的复合可以改善这一问题

2.3.1 负极材料：锂金属、硅负极是最具潜力负极材料

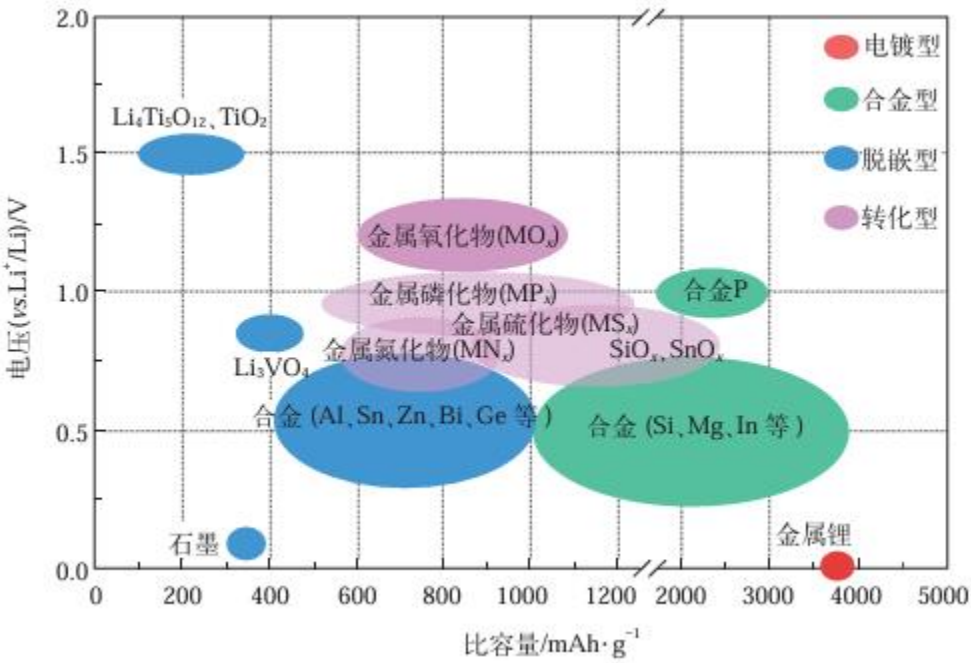
负极材料是决定锂电池性能的关键因素之一，不同的负极材料可以通过嵌入、合金化、转换反应实现储锂。根据锂离子存储机制的不同，可以将负极材料分为四种类型，分别为电镀型、合金型、脱嵌型、转化型。

电镀型锂金属、脱嵌型石墨、部分合金型负极（如Si、Al、Mg）在电极电势方面的优势较为显著。综合比容量与电极电势两方面优势。图中右下方位置的电镀型、部分合金型负极优势明显，被认为是固态锂电池实现高比能量最有前途的两大类负极材料体系。德国Fraunhofer ISI《固态电池路线图2035+》中指出：**锂金属**是最具潜力成为固态锂电池负极的材料，紧跟其后的是具有市场应用潜力的**硅负极**。

根据储锂机制不同划分负极材料

	电镀型	合金型	脱嵌型	转化型
	一般指锂金属	包括Si、In、Al、Sn、P等第IV和第V主族元素，其中Si、In、Al合金负极的研究相对较多	石墨、Li4Ti5O12、TiO2、Li3VO4等	金属氧化物Mox、金属磷化物MPx、金属硫化物MSx、金属氮化物MNx等
优势	从 比容量还是从电极电势 角度上看，锂金属负极都被认为是最具优势的负极体系。相比传统石墨负极，锂金属做负极的固态电池能量密度可以提升50%。	合金型负极材料拥有 仅次于锂金属负极的高比容量和相对较低的电极电势 。合金负极中Si的应用更能满足高比能量固态电池的发展需求。	由于充电过程中锂离子是嵌入到电极材料晶格内部，因此 不会引起显著的体积变化 。嵌入型负极材料在循环稳定性以及技术成熟度方面均具有较大优势。	理论比容量一般为石墨的2~3倍
劣势	1) 金属Li在循环过程中会有锂枝晶的产生，使可供嵌/脱的锂量减少，造成短路等安全问题。 2) 易与空气中的氧气和水分等发生反应，且不耐高温 3) 锂金属负极在锂的沉积与溶出过程中会发生较大的体积膨胀与收缩。 4) 超低的临界电流密度严重制约了电池充放电速度，影响快充需求。	锂化过程中会产生较大的 体积膨胀 ，并伴随脱锂后严重的电极粉化，导致电解质/负极界面稳定性差，严重影响了合金负极的库仑效率及循环稳定性能。	储锂容量相对较低 （通常<400mAh·g ⁻¹ ），难以满足高比能固态电池的发展需求。	通常具有较低的库仑效率和相对较高的电极电势，同时还伴有严重的电压滞后以及电极极化等现象，相比于电镀型和合金型负极材料并没有明显优势，因此其在固态锂电池中应用的研究相对较少
解决方案	其它金属与锂组成合金，电解质/锂金属界面调控和修饰，采用三维结构载体。 高温下（>50度）锂金属临界电流密度得到提高，通过一定界面保护修饰，可实现稳定循环。	活性物质的颗粒尺寸缩小到纳米级别、设计出特定的微观结构、与活性材料/非活性材料进行复合	将其用于特殊的快充电池（如Li4Ti5O12）或者是具有长寿命的固态锂电池，可能会是一种比较好的选择。此外，脱嵌型负极可以与其他类型的负极进行有效复合，取长补短构建“脱嵌-合金”复合型负极。	

锂电池负极材料电压与比容量分布图



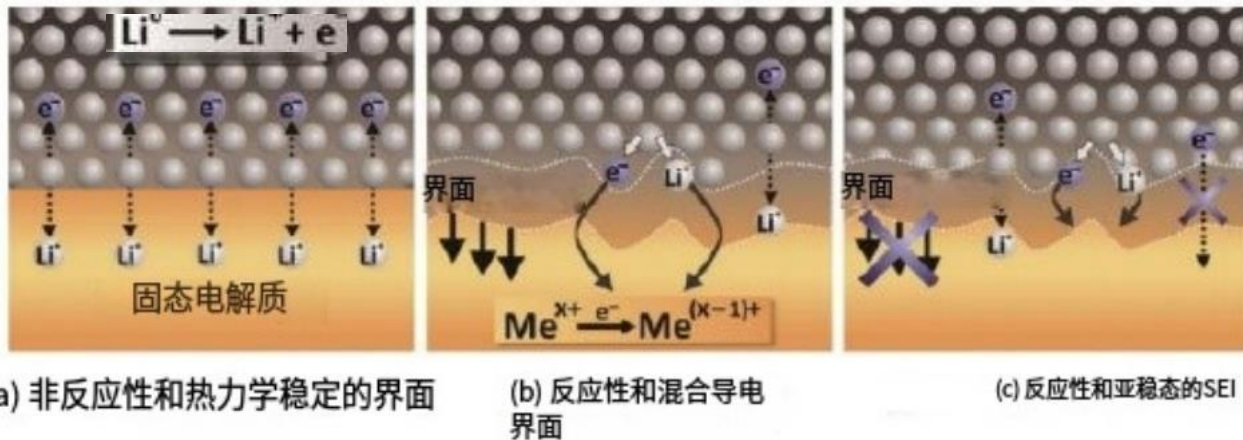
资料来源：高比能固态锂电池，崔光磊，

2.3.2 负极：锂金属负极材料与固态电解质的界面问题

在固态电解质与锂金属之间，存在三种独特的界面类型，分别是热力学稳定界面、混合导体型界面以及亚稳态型界面。

- **热力学稳定界面：**界面处不会发生任何化学反应，形成稳定的离子导体界面层。
- **混合导体型界面：**界面处发生化学反应生成一个负责传递离子和电子的界面层，这层界面随着导电路径的形成而逐步增长，因界面反应持续发生，使得电解质侧的界面层不断扩大，从而使界面层逐步变厚，固态电解质完全腐蚀，这种情况很可能会引发电池的自放电现象。
- **亚稳态型界面：**若形成的界面层只允许离子通过，则能有效抑制固态电解质的进一步腐蚀，类似于液态电解质负极表面的SEI膜，起到钝化作用。
- 通常情况下，固态电解质与负极界面出现的问题主要是因为固-固界面的相容性不佳，以及存在大量的裂缝和孔洞；从另一个角度看，金属锂的还原性强，与许多电解质材料不匹配，易引发负面反应，这些反应产生的物质妨碍了锂离子在界面的扩散。另外，当锂离子在负极表面沉积不均匀时，会导致锂枝晶的形成。随着电池循环使用，锂枝晶会不断扩大，有潜在风险穿破隔膜引起短路，进而增加安全风险。为了克服固态电池在负极界面上存在的难题，目前普遍采用的解决方案有两种：

金属锂-固态电解质界面类型



解决方案

1、对SEI膜进行调控：鉴于电解质与电极材料间的反应活性，它们之间的接触可能会引发不良反应，从而导致SEI膜的形成，而SEI膜则可以有效地隔离电解质和电极材料。因此，可以人工创建一个可以提高负极界面稳定性的理想SEI膜。

- **原位化学技术：**通过挑选适当的物质与电极表面进行化学作用，从而生成SEI薄膜；
- **非原位方法：**不是通过材料与电极表面的化学反应来生成SEI膜，而是采用物理或化学手段将选定的合适材料覆盖在电极表面，作为一层缓冲层使用。常见的非原位法有液相包覆、固相烧结包覆法、原子沉积法、磁控溅射法、化学气相沉积法等。

2、对固态电解质进行改性：调整复合电解质成分并构建多层结构可以增强其机械性能、提高与电极的相容性，以及有效控制锂枝晶。例如，目前硫化物具最高的锂离子电导率和较好的负极稳定性，所以有时采用卤化物硫化物-负极的分层设计思路将卤化物应用在全固态锂离子电池中。

2.4.1 汇总：国内科研机构及企业固态电池发展路线

国内以市场驱动为主，短期聚焦半固态电池和固态电池技术，同时布局聚合物、氧化物、硫化物路线。

代表厂商为卫蓝新能源、清陶能源、辉能科技、中科深蓝汇泽新能源等。同时传统锂离子电池企业如比亚迪、宁德时代等也已经进军固态锂电池相关领域。比亚迪宣布**2027年全固态电池示范装车**，卫蓝新能源/清陶能源等新势力布局**2026年量产**；

中国科学院青岛生物能源与过程研究所开发出的深海特种固态锂离子电池，可满足全海深电源系统对高耐压、高安全、高能量密度的“三高”苛刻要求，打破国外技术垄断，为国产深海装备提供了高可靠能源动力供给。

公司/科研机构	路线	固态电解质				正极	负极	能量密度/Wh·kg-1	应用领域
		聚合物	氧化物	硫化物	其他				
宁德时代	凝聚态				硫化物/凝聚态聚合物复合电解质			500	
比亚迪	全固态	√	√	√					自供
卫蓝新能源	半固态	√	√			高镍三元	硅基/预锂化	360	蔚来
清陶新能源	半固态	√	√			高镍三元	硅基/预锂化	368	上汽、北汽、广汽
亿纬锂能	半固态+全固态	√	√	√	聚合物+氧化物	高镍三元	硅基/预锂化	330	
赣锋锂业	半固态	√	√			高镍三元	含锂负极	360	大众、东风、广汽、赛力斯、曙光
辉能科技	半固态		√			高镍三元	硅基/预锂化	270	奔驰、VinFast、ACC、FE、Gogoro、蔚来、一汽
国轩高科	半固态	√	√			高镍三元	硅基/预锂化	360	高合
孚能科技	半固态	√	√			高镍三元	硅基/预锂化	330	奔驰、广汽、吉利、东风
蜂巢科技	半固态	√	√			高镍三元	硅基/预锂化	300	
中科深蓝汇泽	全固态	√	√			高镍三元	无锂负极	≥550	无人机、空天领域等
	固态	√				高镍三元	硅碳	≥360	深海特种电源、民用等

2.4.2 汇总：海外科研机构及企业固态电池发展路线

• **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，以快速融资上市为主要目的，技术路径多为**聚合物电解质、氧化物电解质**，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。**丰田计划2026年量产硫化物固态电池**，**本田/日产分别锁定2025/2028年装车节点**；

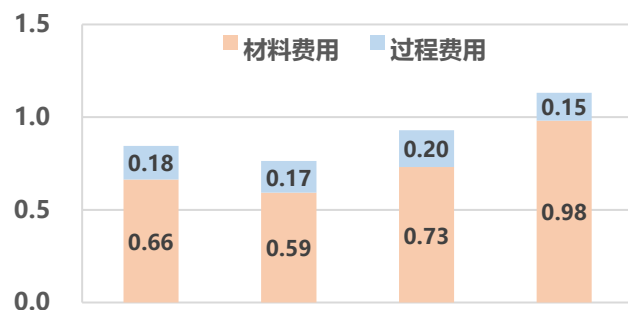
• **韩国**：内部研发与外部合作并行，主攻**硫化物**技术体系。研究模式以企业自行研究和外部合作并行为主，技术路线集中于硫化物体系，电芯开发速度稍逊于日本，但韩企延续正负极材料研发优势，有望较快搭建固态电池材料供应链。领先厂商包括三星SDI、LG、SKI等企业。

国家	公司	固态电解质				正极	负极	研发/产能进展
		聚合物	氧化物	硫化物	其他			
美国	Quantum Scape		√	√ (储备)			无负极设计	计划在2024年实现0.25GWh产能，2025年提高至0.75GWh，最终目标在2028年实现91GWh产能
	Solid Power			√		NCM正极	FeS2+硅基/金属锂基负极	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2024年、2026年实现量产
	SES	√						2023年后有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	√					负极结构预计将转向硅主导和锂金属材料	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比在液态电解液中还要快，其材料工作电压高达5V，且能在室温环境下稳定工作
	Factorial Energy				FEST(专有固态电解质材料)			在2021年与梅赛德斯-奔驰公司达成了战略协议，获得其约10亿美元投资金额以支持固态电池研发，并计划在5年内实现小批量量产
日本	丰田			√		层状氧化物正极	碳素负极	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、稳定的固态电池生产
	松下			√	卤化物	NCA正极	合金（硅基）负极	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			√				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			√		NCM811正极	全硅负极	计划2026年推出650Wh·L-1的聚合物固态电池；2028年推出750Wh·L-1的聚合物固态电池和完成硫化物全固态电池开发，2030年推出超过900Wh·L-1的硫化物固态电池
	三星SDI			√		NCA正极	新型负极	2022年3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	计划在2025年前推出使用镍锰和硅、石墨的固态电池，并于2030年前推出锂金属负极电池

2.5 半固态、固态电池的经济性

- 【半固态电池】目前已扩大到GWh级别量产，但量产初期综合成本偏高，主要在于量产制造经验不足，尤其是电解液的**原位固化**工艺环节难以有效控制**固化的均匀性**，导致生产良品率较低（行业领先企业良品率仅50%-80%），另一方面与半固态电池生产规模小，尚未形成规模效应有关。
- 据Trendforce数据，目前半固态电池出货规模正在扩大，**预计2025年将超过10GWh**。随着技术成熟度的提升，中期（2030年）当半固态电池制造良率高于90%，同时随着制造规模的扩大，预计电芯综合成本将降至**0.6元/Wh**以下，远期（2035年）成本有望低于**0.4元/Wh**。目前半固态电池在电动汽车领域已实现GWh级小规模应用，电芯能量密度**300-360 Wh/kg**，但电芯价格仍高于1元RMB/Wh。全固态电池正处于**从样件电芯向工程化转化**的阶段。
- 【全固态电池】据前瞻产业研究院数据，聚合物电解质（PEO）、氧化物电解质（LLZO）、硫化物电解质（LGPS）、电解液的价格分别为700/2000/69500/5美元/kg。
- 据Trendforce数据，固态电池在量产初期（2027-2028年）预计成本较高，电芯价格将落在**1-3元RMB/Wh**，EV市场应用规模≤1GWh。2030年后当全固态电池形成一定规模时（≥10GWh），预计电芯价格将降至**1元RMB/Wh**左右，到2035年经过市场大规模的快速推广后，预计全固态电芯价格有望降至**0.6-0.7元RMB/Wh**。

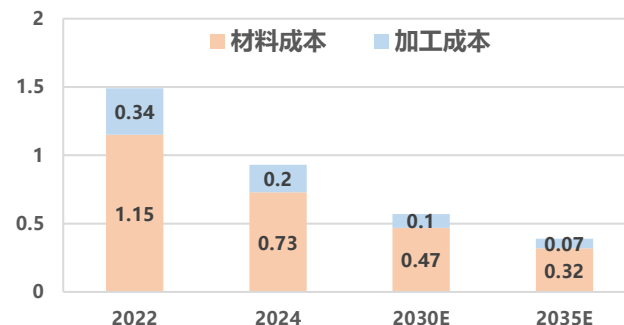
传统锂电、半固态、固态电池成本比较
(单位：元/Wh)



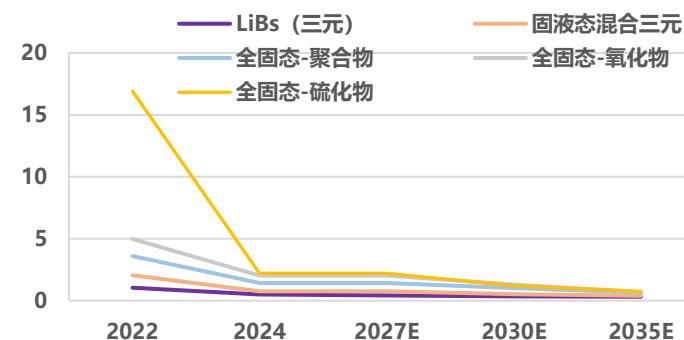
指标	传统锂电池 (石墨负极)	传统锂电池 (硅碳负极)	半固态电池	固态电池 (硫化物、石墨负极)
材料费用	0.66	0.59	0.73	0.98
过程费用	0.18	0.17	0.20	0.15
总计	0.85	0.76	0.93	1.13

注：过程费用包括人员、折旧、能源、利息等。

半固态电池电芯成本趋势 (单位：元/Wh)



固态电池电芯成本趋势 (单位：元/Wh)



	2022	2024	2027E	2030E	2035E
LiBs (三元)	1.05	0.5	0.42	0.36	0.32
固液态混合三元	2.05	0.76	0.76	0.53	0.4
全固态-聚合物	3.6	1.42	1.42	1.01	0.66
全固态-氧化物	4.98	2.03	2.03	1.3	0.7
全固态-硫化物	16.92	2.21	2.21	1.2	0.74

2.6 固态电池还有哪些瓶颈需要突破？



3. 设备

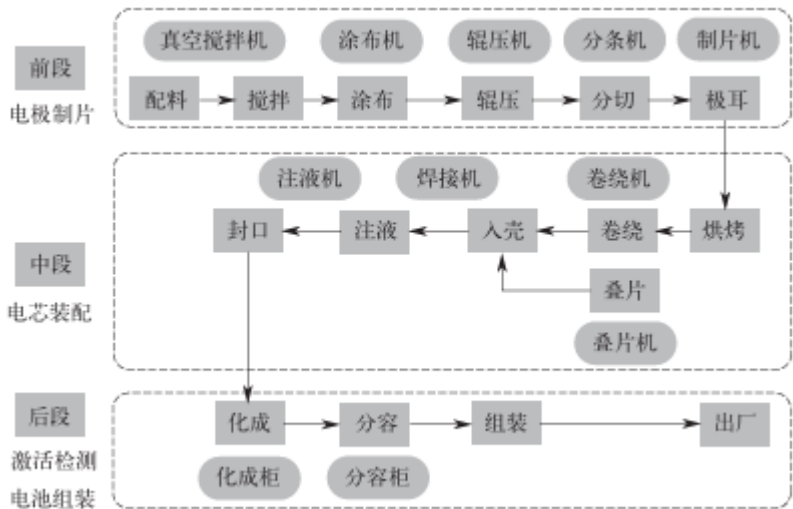
3 传统锂电池 vs 固态电池工艺及设备

锂电池的制造工艺流程非常长，大致可分为前段电极制造工艺、中段电芯装配工艺、后段激活检测工艺。

- 前段工序：与传统液态锂离子电池相比，固态锂电池的前段工序基本与液态锂离子电池相同，但锂金属负极的应用、固体电解质混料与包覆处理需要额外的工艺流程。
- 中、后段工序：固态锂离子电池需要加热、加压或者烧结，不需要注液化成。

总体上看，目前较为先进的液态电池生产工艺有60%~80%可用于固态锂电池的生产当中（具体则根据电解质的类型有所差异）。但由于固态电解质体系不同，且随着金属锂负极、高镍及超高镍、富锂锰等电极材料应用于高比能固态锂电池，在电极生产、电解质膜制备、组装及封装技术等方面仍需要进一步的努力，少溶剂或无溶剂的干法电极制备工艺越来越受到重视。

传统液态锂离子电池制备工艺流程图



不同生产工艺与各种固态锂电池组分的兼容性

	干法工艺				湿法工艺	
	干法辊压	干法喷涂	熔融挤出	气相沉积	涂覆/流延	溶液灌注
复合正极	✓	✓	✓	✓	✓	✗
锂金属	✗	✗	✓	✓	✗	✗
硅碳	✓	✓	✓	✓	✓	✗
氧化物SE	✗	✗	✗	✓	✓	✗
复合物SE	✓	✓	✓	✗	✓	✓
硫化物SE	✓	✓	✗	✗	✓	✓

3 传统锂电池 vs 固态电池工艺及设备

- 根据EVTank在白皮书中指出，相比传统的液态电池产线，固态电池生产线面临着现有设备的升级改造、新设备的引进和定制开发等。全固态电池在**纤维化、胶框印刷、等静压环节**需要引进全新的定制设备，在**干混、辊压、叠片、化成分容**环节，需要对设备进行精细化升级改造，在其他工序段则对现有设备进行适当改造。
- 《中国固态电池设备行业发展白皮书（2025年）》指出全固态电池生产的主要工艺将包括干法电极工艺、等静压工艺、叠片工艺、高压化成工艺等，从而将带动干法电极设备、辊压设备、等静压设备、叠片机、高压化成分容设备等关键设备的市场规模飙升。

工序			设备名称	液态	半固态		全固态			全固态设备变化
				液态电池	固液混合工艺	原位固化工艺	氧化物	聚合物	硫化物	
前段	湿法	匀浆搅拌	搅拌机	√	√	√	可用	可用	可用	适当改造
		涂布烘干	涂布机	√	√	√	可用	可用	可用	适当改造
	干法	干混	干混机				可用	可用	可用	升级
		纤维化	纤维化设备				可用	可用	可用	干法新增
		辊压	辊压机	√	√	√	√	√	√	升级
		分切/模切	分切/模切机	√	√	√	√	√	√	适当改造
		制片	制片机	√	√	√	√	√	√	适当改造
		胶框印刷	胶框印刷机				√	√	√	新增
中段		叠片	叠片机	可用	可用	可用	√	√	√	升级
		极耳焊接&包装	组装设备	√	√	√	√	√	√	适当改造
		干燥	烘干机	√	√	√				
		注液	注液机	√	√	√				
		等静压	等静压机				√	√	√	新增
		原位固化	烘烤设备			√				
后段		化成分容	化成分容机	√	√	√				
		高压化成分容	高压化成分容				√	√	√	升级

3.1.1 干法成型技术：基于聚四氟乙烯（PTFE）成纤化的干法成型技术

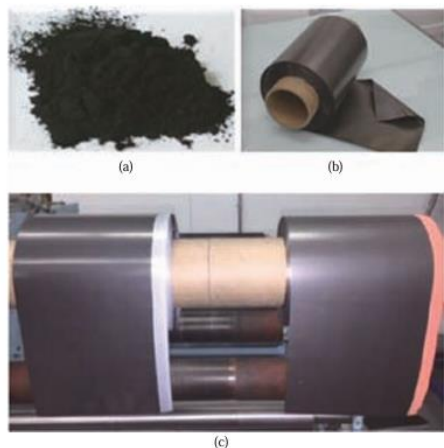
传统的电极或固态电解质的湿法成型技术，是将原材料混匀分散在溶剂中，然后再进行湿法涂覆和干燥。干法成型技术指的是不使用溶剂的电极或固态电解质的加工成型技术。目前该技术主要包括三大类：基于聚四氟乙烯（PTFE）成纤化的干法成型技术、基于挤出或热压的干法成型技术、干法喷涂成型技术。

基于PTFE成纤化的干法成型技术，最早是由麦斯威尔开发，是目前最常用、适配性最广的干法工艺，尤其适合将粉末状的材料黏合成膜，所成膜具有较好的蠕变性，能够通过压延实现薄层化。2005年该公司申请专利，并于2018年公布该技术进展，并命名无溶剂干法电池电极（dry battery electrode, DBE），2019年，特斯拉收购了麦斯威尔技术有限公司，宣布将在其后续电池制造过程中采用DBE技术。主要步骤包括：

1) 干粉混合：将导电剂、导离子剂、活性材料、PTFE按一定比例配比，再配备强力搅拌棒的V形混合器中混合形成较均匀的干混合物。**2) 剪切成纤化：**使用强剪切力剪切混合粉末，例如喷射研磨机等，促进PTFE成纤化，形成纳米级纤维网络，缠绕、黏附和支撑其它干粉颗粒。**3) 压延成膜：**将含有成纤化PTFE的混合物通过辊压机进行压延、成膜、摊薄，形成连续的自支撑薄膜，并以卷筒形式卷绕。**4) 将干膜层压到集流体上：**制备得到目标规格的自支撑干膜后，将其压制到集流体箔上，根据实际需求和压制效果可以在集流体和干膜之间使用中间层黏结剂，如一些具有导电性的聚合物或碳层；或使用具有更大比表面积的三维集流体（如微孔金属箔）。

该种干法电极技术的关键是PTFE的成纤化。在工业化规模制备中，成纤化与提供剪切力的方式、剪切的工艺参数、活性材料和导电剂的物性密切相关。

传统液态锂离子电池制备正极、负极极片



(a) 由活性材料、导电碳和聚合物黏结剂组成的干粉混合物；(b) 由中试规模的卷对卷设备制造的自支撑的干法电极膜；(c) 干膜NCM卷（左）和石墨卷（右）双面层压到集流体上

基于PTFE成纤化干法制备电解质膜



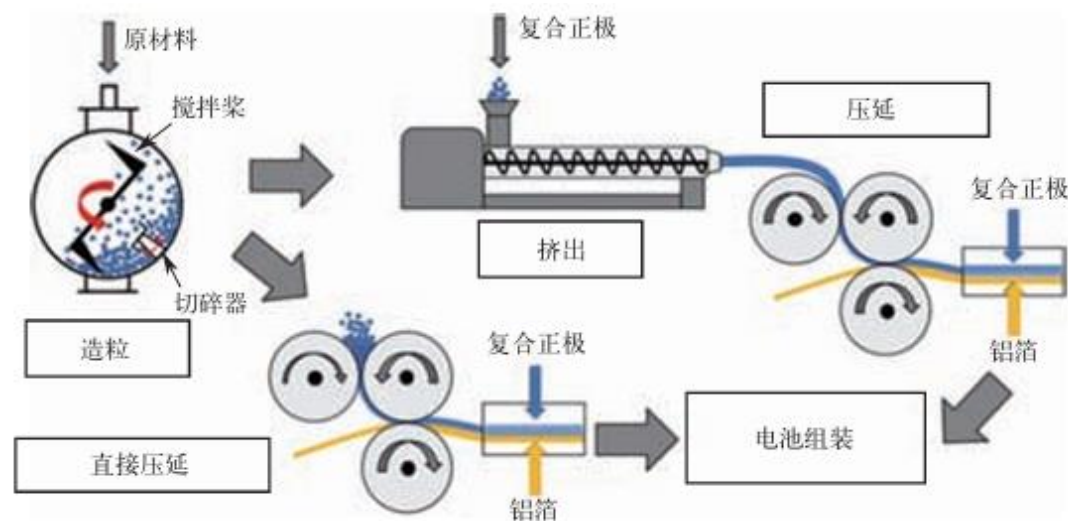
3.1.2 干法成型技术：基于挤出/热压的干法成型技术

【挤出工艺】以正极为例，将聚合物熔融作为流动相，以此溶解或混匀锂盐、电极材料、各种添加剂等。以电解质膜为例，工艺路线包括两种，**1) 造粒-挤出-压延**：在搅拌设备中熔融造粒，颗粒由称量装置进入挤出机进料口，挤出机螺杆包含28个输送元件和5个捏合元件，然后将挤出物压延成目标厚度的正极膜片，并将膜片层压粘在涂碳集流体上；**2) 造粒-直接压延路线**。

干法工艺主要包括干燥、混合造粒、塑化和压延等几个工艺环节，无需额外加入任何溶剂，部分工艺可以进行增减。聚合物挤出压延加工，已有百年历史，可视为传统聚合物加工的一个小分支。

适用于：聚合物-氧化物复合固态电解质

复合正极制造工艺流程

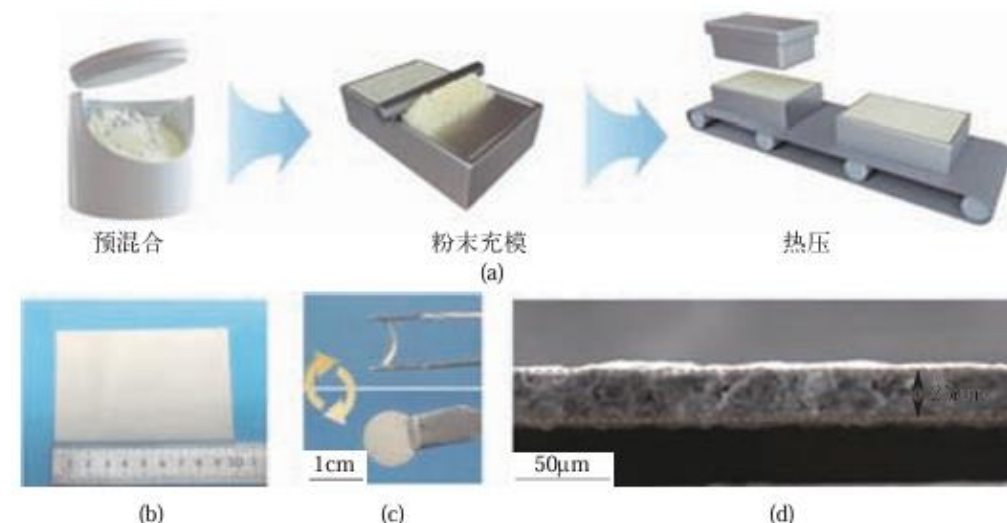


【热压工艺】对于硫化物、卤化物固态电解质，考虑到化学敏感性，对聚合物的极性官能团不稳定性，多采用无机固态电解质为主的成膜策略，少量聚合物只能充当黏结剂，很难适配挤出工艺。因此多采用热压成型工艺。提前预混合经过提前预混合Li6PS5Cl与聚酰亚胺粉末，再使用高温高压，将聚酰亚胺（20%）和硫化物（80%）热压成膜（60 μm厚）。

该工艺的难点在于聚合物与无机固态电解质的均匀混合，以及对聚合物、无机固态电解质的聚集态结构调控。

适用于：硫化物、卤化物固态电解质

熔融黏结干法成膜技术



(a) 工艺流程；(b) 10cm级Li6PS5Cl薄膜展示；(c) 柔韧性展示；(d) 膜厚度的SEM照片

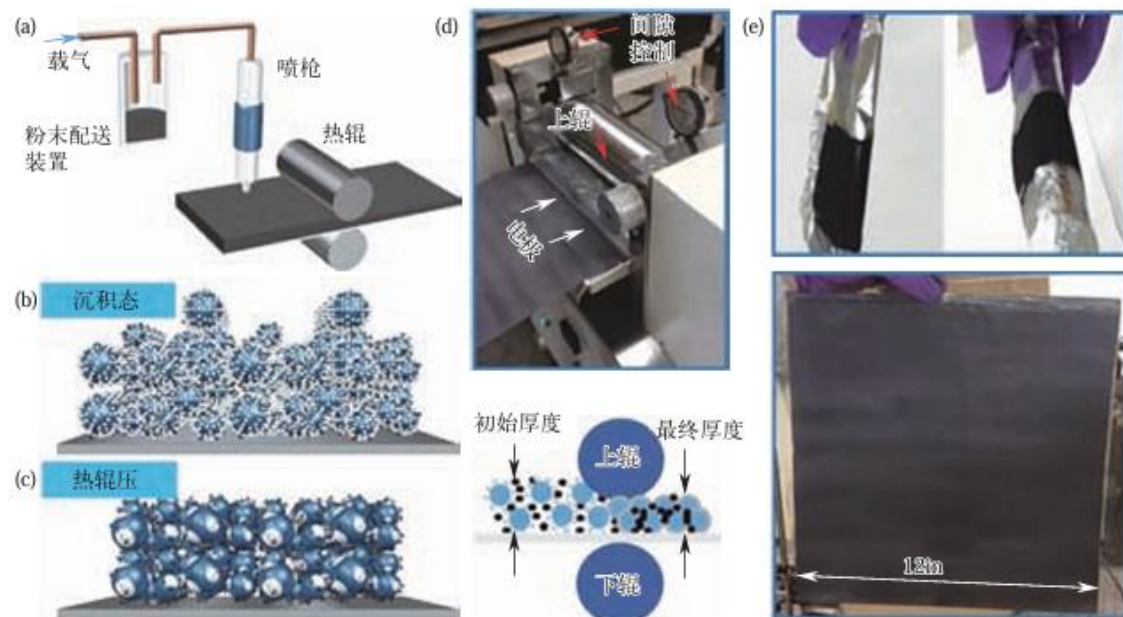
3.1.3 干法成型技术：干法喷涂成型技术

干涂：是将完全干燥的电极材料混合物直接喷涂并沉积到集流体上的制备工艺，使用的黏结剂多为PVDF。

基本过程：将完全干燥的活性材料混合物均匀沉积到集流体上，随后通过热辊压、热压或在对流烘箱中加热后在室温下进行压延，从而获得机械稳定性高的电极极片。采用该工艺制备的电极，其机械黏合强度达到148.8kPa，远大于采用传统湿法工艺制备的电极黏合强度

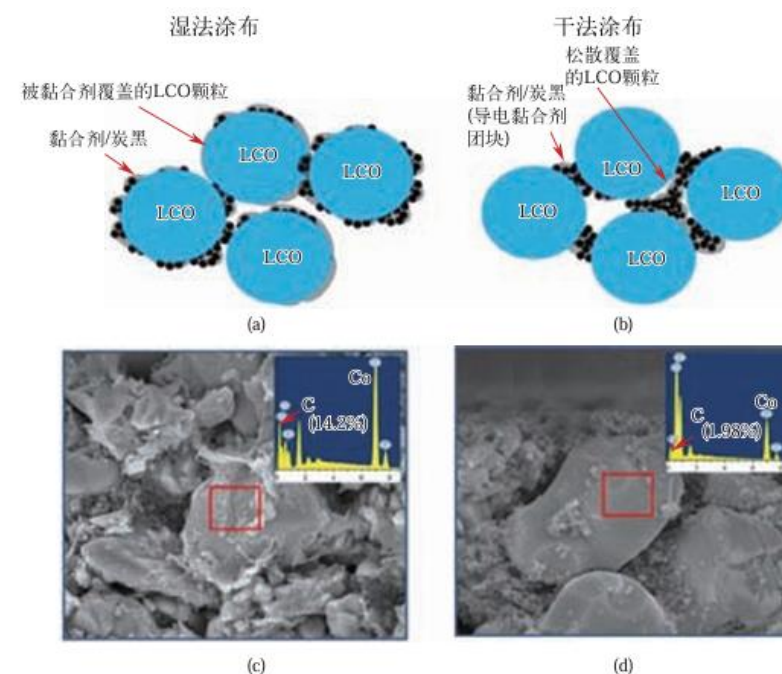
(84.3kPa)，此外，干涂电极比湿法电极具有更高的比容量和循环稳定性，表现出更优的电化学性能（可能是由不同制造方法所引起的黏结剂聚集态结构不同导致的）。**干涂工艺会使得钴酸锂颗粒表面上覆盖的绝缘聚合物层较少，锂离子很容易扩散进/出钴酸锂颗粒。**

干涂技术制备过程示意图



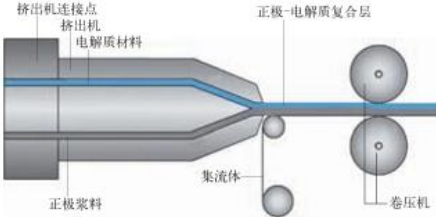
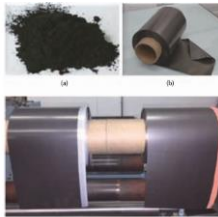
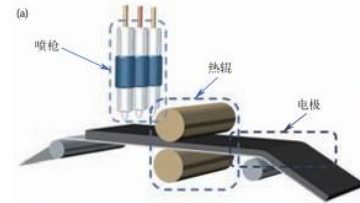
(a) 干粉喷涂工艺电极制造系统；(b) 热激活前干涂电极的3D示意图；(c) 热辊压后干涂电极的3D示意图；(d) 热辊压过程；(e) 成型后的极片

传统湿法工艺和干涂工艺制备正极形貌对比

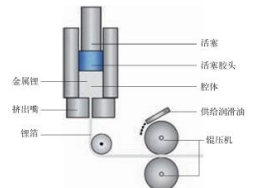


3.2.1 前段工艺：电极极片制造

正极极片：固态电池特别是高载量正极极片的制备，不同于传统液态电池，**需要加入固态电解质充当导离子剂**。为适应固态电解质的理化性质，**湿法工艺需重新选择溶剂并调整相关工艺**；而**干法工艺虽有报道，但还处于工艺成熟验证阶段**。

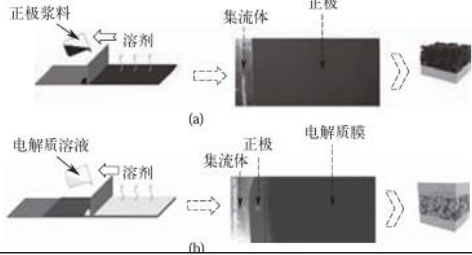
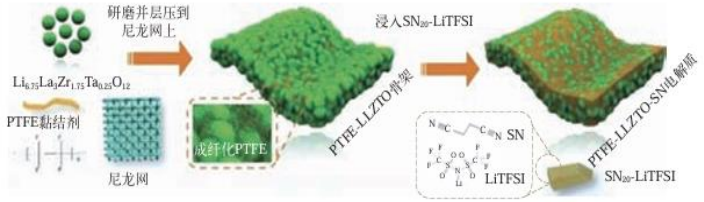
湿法工艺	干法（挤出工艺）	干法（压延工艺）	干法（喷涂工艺）
1) 溶剂：正极混料过程中可能添加固态电解质，而传统正极浆料常用的NMP等极性溶剂可能与固态电解质（如硫化物）不稳定，因此常需要替换成非极性或弱极性溶剂；2) 黏结剂：如PVDF等，极难溶于非极性溶剂，需要切换为相匹配的黏结剂。总体上，采用湿法工艺流程确定，效率高，但仍面临溶剂回收、极片干燥等问题，且需匹配溶剂和黏结剂等。近年来发展出的一些新型匀浆工艺，如使用螺杆机混料后挤出浆料的方式，也同样适用于固态电解质正极，具有匀浆效率高、连续性等优势。新型涂覆工艺如丝网印刷、3D打印等，也同样适用于固态电池正极极片的制备。	 将经过双螺杆挤出机返混均匀的正极活性物质、固态电解质、导电剂、黏结剂形成的干混物，通过口字型挤出口覆于集流体上，需紧跟压延工艺，进一步挤压成片并黏附集流体。	 将正极活性物质、固态电解质、导电剂、黏结剂形成的干混物直接压延成型，其形成干混物的方式包括螺杆机干法挤出、气吹研磨或球磨。	 将干混物料粉体喷涂于集流体上后立即压延成卷。该工艺目前已达到中试生产规模。

负极极片：固态锂电池负极极片中的活性材料可以沿用常规锂离子电池中的**石墨、软碳、硬碳、硅碳复合材料**等，且**固态锂电池负极极片的制造方法与常规液态锂离子制造方法类似**。值得注意的是，在新型高比能固态电池中，可使用金属锂或合金负极。**锂金属**的高活性（与水/氧气/氮气反应）和高蠕变性使其在加工/处理时对环境/设备/安全等方面要求较高（如挤出、熔融、蒸镀），而**无负极工艺**则能避免锂的直接处理，但工艺复杂，均匀性不好控制，效率低。

挤出工艺	熔融工艺	蒸镀工艺	无负极工艺
 金属锂灌入挤出机，通过压力挤出，形成柱状单质锂，通过辊压机，形成薄片状锂箔。挤压工艺生产薄锂箔最为成熟，通过调整辊压机压力、转速等保证锂箔厚度均匀性。挑战在于为避免辊筒粘结造成锂损失，需对辊进行聚合物的涂覆修饰；此外只有少数企业能做到50μm以下，而制备30μm以下厚度且低缺陷的锂箔难度较大。	将金属锂在180℃下液化，然后沉积在多孔电解质或集流体上，或渗透到多孔负极支架或多孔电解质中。 熔融工艺适合多孔结构，且能够生产非常薄的箔。但是需要真空或惰性气氛，而且由于液化锂的反应性，还需要很高的安全防范措施。	可制备超薄且高质量的锂箔。真空蒸发技术已经应用于薄膜固态电池，但该技术需要真空环境，且沉积速率低，导致产量有限且昂贵，未来是否能适用于大规模生产大容量固态锂电池还有待商榷。	在第一次充电循环，将储存在正极中的锂离子镀到负极集流体上，从而原位形成锂金属负极。该工艺避免了锂金属的直接处理，锂层很薄，能够实现高能量密度，且负极生产步骤可以完全省略。 但该工艺锂沉积均匀性很难控制，锂会损失，需要补锂或采用特殊结构的负极集流体以实现高效的锂沉积/溶出。无负极工艺最近几年才发展起来。

3.2.2 前段工艺：电解质膜制造

固态电解质膜为固态电池独有结构，取代了液态电池的隔膜和电解液。固态电解质的成膜工艺是固态锂电池制造的核心，不同的工艺会影响固态电解质膜的厚度和离子电导率，固态电解质膜过厚会降低全固态电池的质量能量密度和体积能量密度，同时也会提高电池的内阻；固态电解质膜过薄力学性能会变差，有可能引起短路，引发电池热失控。

	湿法工艺		干法工艺	气相沉积
	基材支撑	电极支撑(多层涂覆技术)		
示意图				
流程	可分为模具支撑成膜、正极支撑成膜以及骨架支撑成膜：1) 基材支撑 ：需将固态电解质膜涂覆于支撑基材上，如 PET 等，然后卷绕成卷。组装时，常使用 热转印 的方式将其 转印到极片上 。	常用于 无机电解质膜或复合电解质膜 的制备，也称为多层涂覆技术。将硫化物无机电解质溶液 直接涂覆 在电极表面， 蒸发 掉溶剂后，以电极集流体作为支撑，在电极表面形成固态电解质膜。	将固态电解质（如硫化物固态电解质）与聚合物黏结剂 分散成干混物 ，然后对其 施加足够剪切力使其成膜 。	采用化学气相沉积、物理气相沉积、电化学气相沉积和磁控溅射沉积等气相沉积法可以在电极上形成超薄固态电解质膜。
优点	避免了力学性能较差的膜，在叠片过程中发生断带、破损等意外。	与模具支撑相比，正极支撑 可以获得更薄的固态电解质膜和更好的界面接触 。	不采用溶剂，成膜无溶剂残留；直接将固态电解质和黏结剂混合成膜，不需要烘干，成本低；不接触溶剂，电解质结构完整，离子电导率高。	薄膜全固态电池安全性好、循环寿命长。
缺点			干混物延展性不足，固态电解质薄层化困难，会降低固态电池的能量密度。 所以使用促进蠕变性的PTFE黏结剂 ，便于膜压延摊薄，成为目前干法制膜的主流。	成本较高，制备工艺复杂， 只适用于薄膜型全固态电池，目前量产较难 。

3.2.3 前段设备：螺杆挤出机、辊压机等干法设备需求提升, 辊压机工序增加, 技术要求提升

正在你身边

		湿法技术		干法技术							
	工序	工艺	设备	基于PTFE成纤化的干法成型技术	设备	基于挤出的干法成型技术	设备	基于热压的干法成型技术	设备	干法喷涂成型技术	设备
	前段（电极制片）	配料	真空搅拌机	干粉混合	配备强力搅拌棒的V形混合器	造粒	搅拌设备（搅拌桨、切碎器）	预混合		静电喷涂	粉末配送装置
		搅拌		剪切成纤化	喷射研磨机、纤维化设备等		称量装置	高温高压热压成膜			喷枪
		涂布	涂布机	压延成膜	辊压机（成膜、热复合、补锂等，工序增加）	挤出	螺杆挤出机			热辊压	辊压机
		辊压	辊压机	干膜层压到集流体上		压延	压延机				
		分切	分条机			层压					
		极耳	制片机								
液态电池	正极	√	√								
	负极	√	√								
	电解质										
固态电池	正极	（需加入固态电解质，匹配非极性溶剂、黏结剂等）	√	√	√	√	√			√	√
	负极（C/Si）	√	√	√	√	√	√			√	√
	负极（锂）					√	√				
	聚合物SE	√	√	√	√	√	√			√	√
	氧化物SE	（电极中加入氧化物SE，构建固态离子传输网络）	√	√	√	√	√				
	硫化物/卤化物SE	√	√	√	√			√	√	√	√

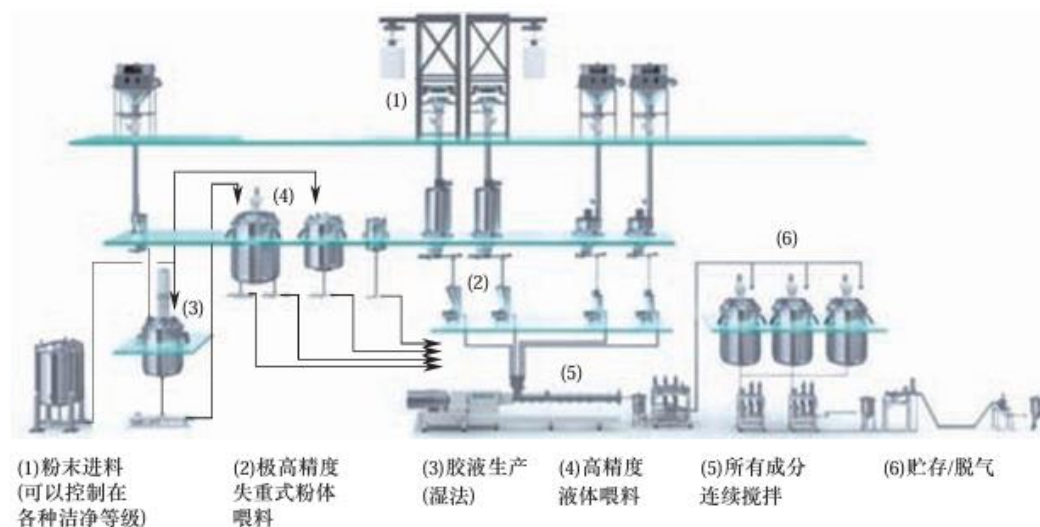
3.2.3 前段设备：双螺杆挤出机匀浆系统

提升固态锂电池能量密度的首要途径是提高浆料在集流体上的负载量，由此需要开发厚极片技术。常规的匀浆设备（如双行星搅拌机等），需要使用大量溶剂调节浆料的黏度和流变性，因此浆料在集流体上的负载量有限。双螺杆连续挤出机便可以实现少溶剂或无溶剂制备厚极片。用于固态锂电池连续制浆的双螺杆连续挤出机主要由两大部分组成：**供料计量系统**（用于粉料和溶剂的连续计量称重）和**主机系统**（双螺杆连续挤出机，用于各组分的分散与捏合）。

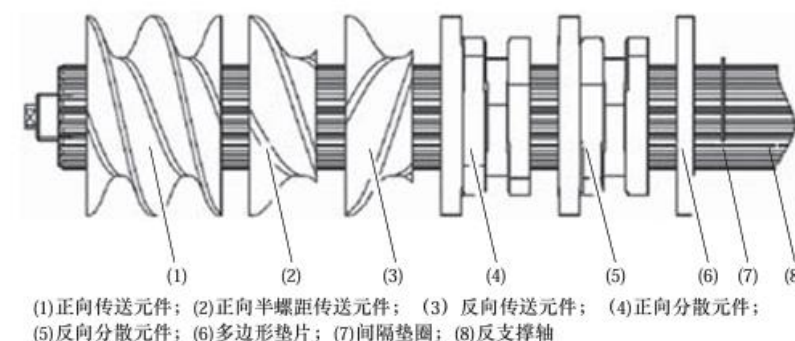
双螺杆挤出机基本工艺过程与正负极匀浆相同，但一般不使用液态有机溶剂，因此可以称作是真正意义的干法工艺。双螺杆挤出机的温控系统还可以对有机小分子电解质前驱体进行加热，使其发生聚合反应，达到原位聚合的目的。**优点主要有：**

- 1) **制浆效率和制浆均匀性方面明显优于传统工艺。**搅拌工作的很大一部分是连续的原料喂料，在连续混浆机中的停留时间通常不超过1min；成分均匀分散，一致性高。
- 2) **大规模生产装置所需的投资低。**借助高生产率（高达 $2500\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$ ），连续混浆工艺可用于一条全连续运行生产线，进而取代多台批次搅拌机。
- 3) **运营成本低。**与批次搅拌机相比，双螺杆挤出工艺只需要三分之一单位能耗即可实现相同的产能和产品性能；此外，占用空间更小，所需干燥车间空间可大幅缩小，因此，维持干燥室环境所需能耗远低于传统批次搅拌系统；另外自动化程度高，可减少50%工厂操作所需人力。
- 4) **大幅度降低有机溶剂使用量或不使用。**相比于传统双行星搅拌工艺，双螺杆挤出机匀浆系统可将有机溶剂使用量降低至20%以下，甚至不使用有机溶剂

双螺杆挤出机匀浆系统



螺杆元器件及作用



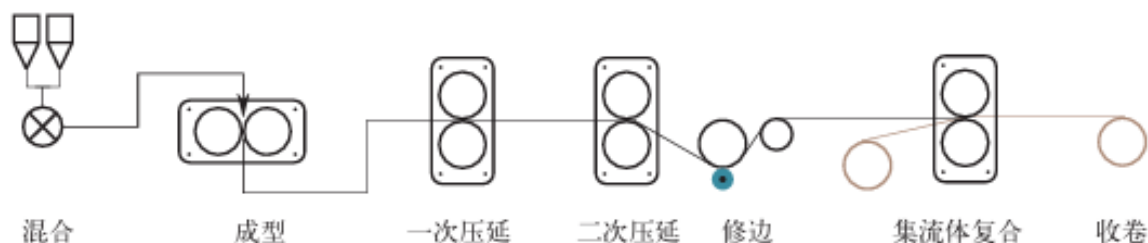
3.2.3 前段设备：热压成膜复合设备

固态锂电池正负极材料或固态电解质材料经匀浆后，必须经过成膜后才能使用。浆料从双螺杆挤出机经口字型出口挤出后辊压成型，再经一次压延、二次压延后，经修边再与集流体复合，最终收卷，得到正负极极片。如果制备固态电解质膜，则不需要集流体复合工艺步骤。

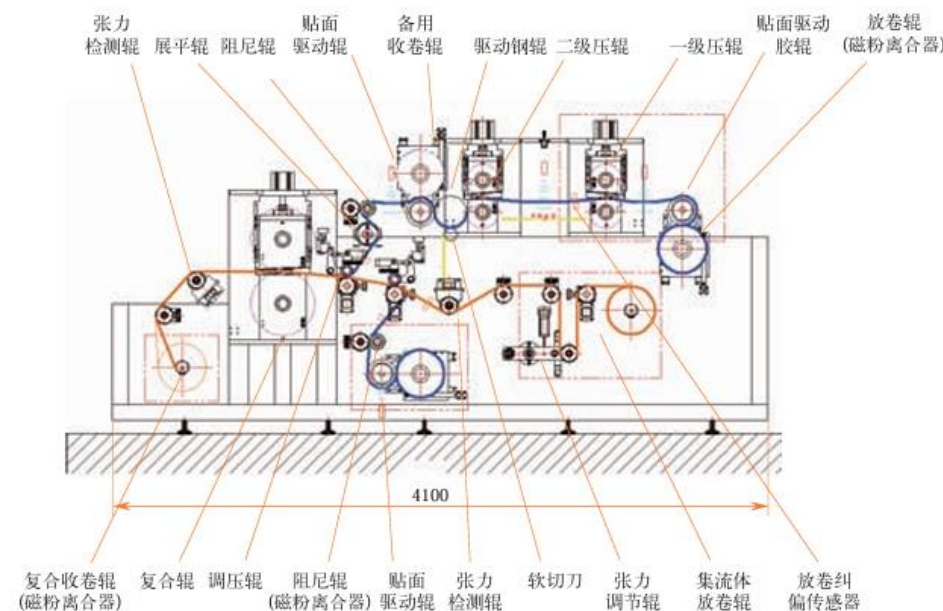
设备用于固态锂电池正负极膜片热压减薄成膜后与集流体进行上下面复合，也可以用于有机-无机复合固态电解质膜热压成型生产（除纯无机电解质外）。

设备可将正负极膜片从3~4mm厚膜两次依次热压减薄成膜，且张力可控，解决减薄及复合过程中放置膜受力不稳定所产生的膜偏位、断裂等工艺问题。设备主要包括正负极膜材放卷机构、一二级辊压机构、张力控制与除皱机构、复合机构、极流体收放卷机构等。

干法（半干法）成膜工艺流程图



热压成膜复合机的机械结构图



3.2.3 前段设备：补锂设备

锂离子电池在首次充放电阶段，会在电极材料表面形成一层具有保护功能的固态电解质界面层（SEI）。形成 SEI 膜是一个不可逆的过程，活性锂永久损失造成电池首次循环的库仑效率（ICE）降低。因此，向锂电池中掺入牺牲性添加剂等预锂化（也就是“补锂”）技术路线应运而生。

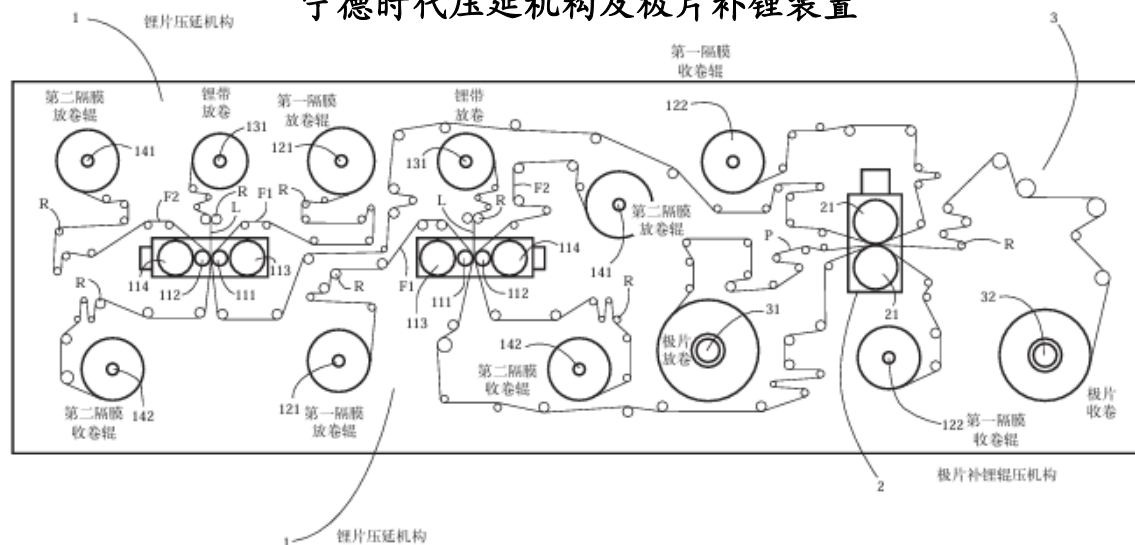
过去提升锂电池能量密度的研究方向主要集中于正极材料，但正极材料尤其是高镍三元正极使用后电池能量密度大幅提升，为进一步提升能量密度，科研人员将研究的重点转向了高比能负极材料，比如容量超过石墨10倍的硅负极材料被认为是最具有应用前景的负极材料。高比能固态锂电池选用高镍三元正极配硅碳负极的动力电池，由于其首次充放电库仑效率较低，补锂为必然。对于石墨负极，约有7%~20%的活性锂在首次充电过程中形成不可逆产物附着在石墨负极表面；而对于硅基负极，约有高达30%的活性锂不可逆地存在于硅中。

补锂设备：主要是通过辊压+复合原理对锂电池负极极片双面进行连续补充或（间歇补充）压延后的锂箔，形成负极极片正反两面实现补锂的设备。间歇补充功能是实现铜箔区不补充锂箔的功能。一种补锂装置（左图）是为保证向极片的正反两面同时补锂，设置两个锂带放卷机构，功能相同。操作过程中，为防止锂带粘辊，锂片压延之前在其正反两面覆盖隔膜材料，压延后，其中一层隔膜收卷，另外一层隔膜随锂片进入到极片补锂辊压机构。但这种装置耗费成本较高，工艺复杂，且占用空间大。

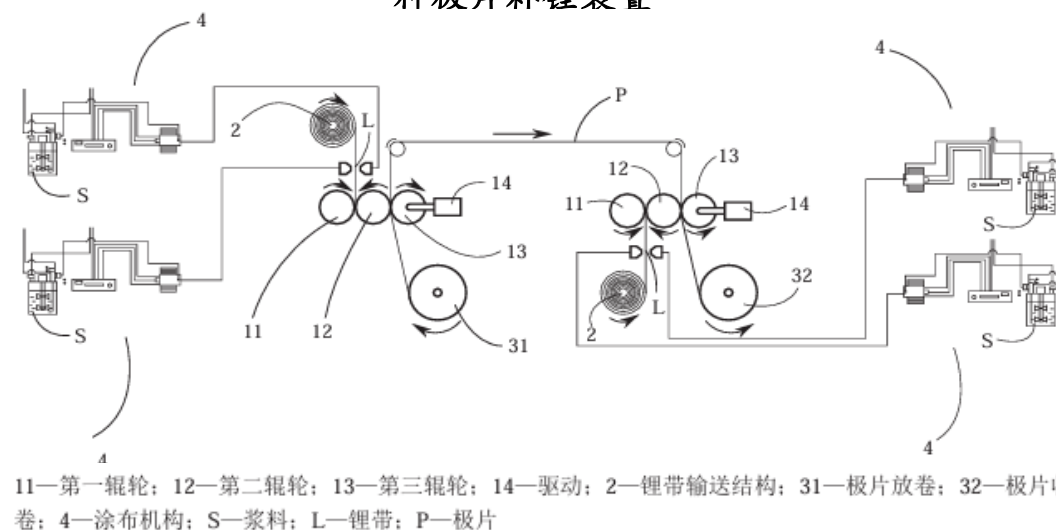
还有一种简易装置（右图），直接将压延后的锂带附着在第二辊轮，并利用第二辊轮直接将锂带覆合到极片上，无需现有技术中的转移膜，从而降低生产成本，简化补锂工艺。

负极补锂过程复杂，程序繁琐，生产成本低。近年来，人们尝试正极补锂化技术，具体过程是：在正极预先加入活性锂，可以向负极释放锂离子，补充负极首次充电过程中的不可逆比容量。正极补锂操作简便、成本较低，且可以直接在正极浆料的匀浆过程中添加补锂材料（如镍酸锂、铁酸锂等），无需做额外工艺改进。

宁德时代压延机构及极片补锂装置



一种极片补锂装置



3.3 中段工艺：电芯制造：叠片工艺及叠片机需求提升，多层电池可使用双极结构

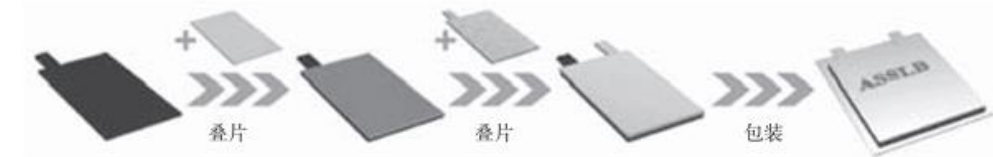
与液态电池相比，固态锂电池最大的特点在于引入了固态电解质，以取代现有的电解液+隔膜的电池构成。按照固态锂电池本身的结构特点，最合适的电池形状是平面（方形或软包电池），这样可以保留固态电解质的结构完整性。典型的方法是通过叠片工艺，将正极、固态电解质和负极堆叠在一起，组装成软包全固态电池。另外，按照裁片与叠片的先后顺序将叠片工艺分为分段叠片和一体化叠片。对于多层电池，可以采用双极结构，实现更小的封装电阻和更高的能量密度。

- 分段叠片：沿用了液态锂电池叠片工艺，将正极、固态电解质层、负极裁切成指定尺寸后按顺序依次叠片后进行包装。即先裁切，后叠片。
- 一体化叠片：在裁切前将正极、固态电解质膜和负极压延成“三明治”夹层结构，之后按照极片尺寸设计要求，将该夹层结构裁切成多个“正极-固体电解质膜-负极”单元片，并将其堆叠在一起后进行包装。即先叠片，后裁切。

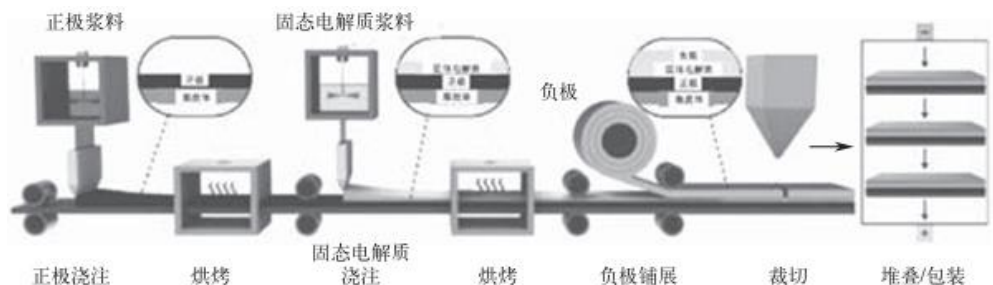
对于全固态电池而言，堆叠工艺势必会存在各种各样的电极/电解质固固界面问题。一般来说，聚合物全固态电池可以通过加热解决聚合物电解质膜同正负极间的界面电阻；对于采用氧化物、硫化物电解质膜的固态锂电池，则需要进行加压处理改善固体电解质与电极之间的机械接触，最大程度降低充放电循环过程中界面失效、内阻增大等问题。

双极电池：目前，单一电芯很难提供5V以上电压和大电池放电的需求。因此，一般需要多个电池通过串、并联的方式成组。目前锂离子电池最常用的成组方式为单极连接引出正、负极端子，然后通过导线连通过排列成组。每个电池含有独立正极和负极（单极极片）。对于传统锂电池，该工艺成熟，且能有效抑制电解液在不同电芯间的串扰和不均匀分布，安全性较高，但传输路径长，且封装件占据较大空间，甚至超过电池组体积的50%。双极电池，通过在集流体两侧分别涂覆正、负极活性材料，得到双极电池集流体（BP）极架构省去了大量封装材料和连接器件，大幅度降低成本，并进一步实现了极片间电流的垂直导通，能够缩短电子传输路径，解决电流分布不均等问题，相比传统连接方式，锂离子双极电池组的功率密度和能量密度的提升能够超过40%。

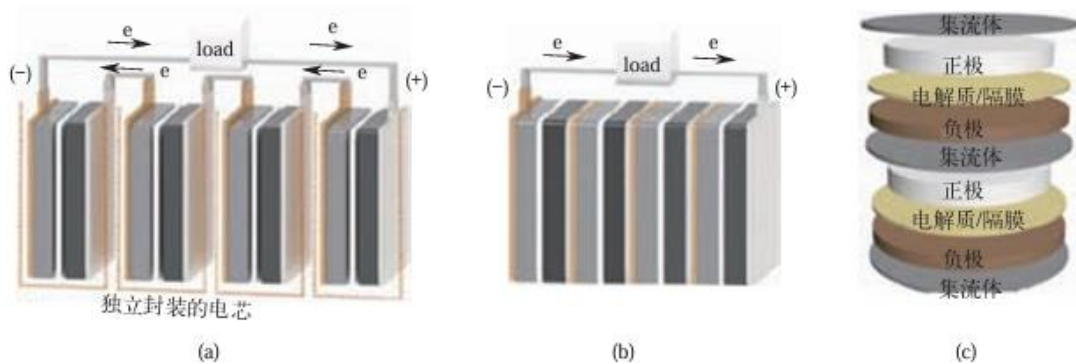
分段叠片工艺



一体化叠片工艺



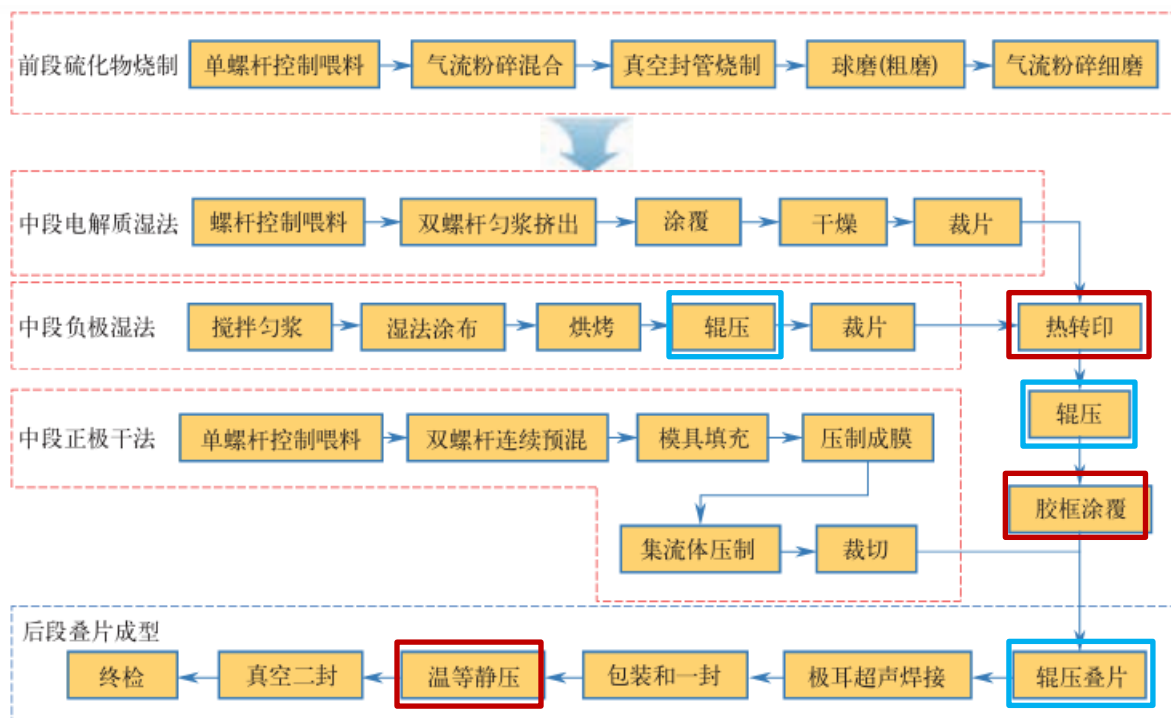
单极串联和双极电池结构对比示意图



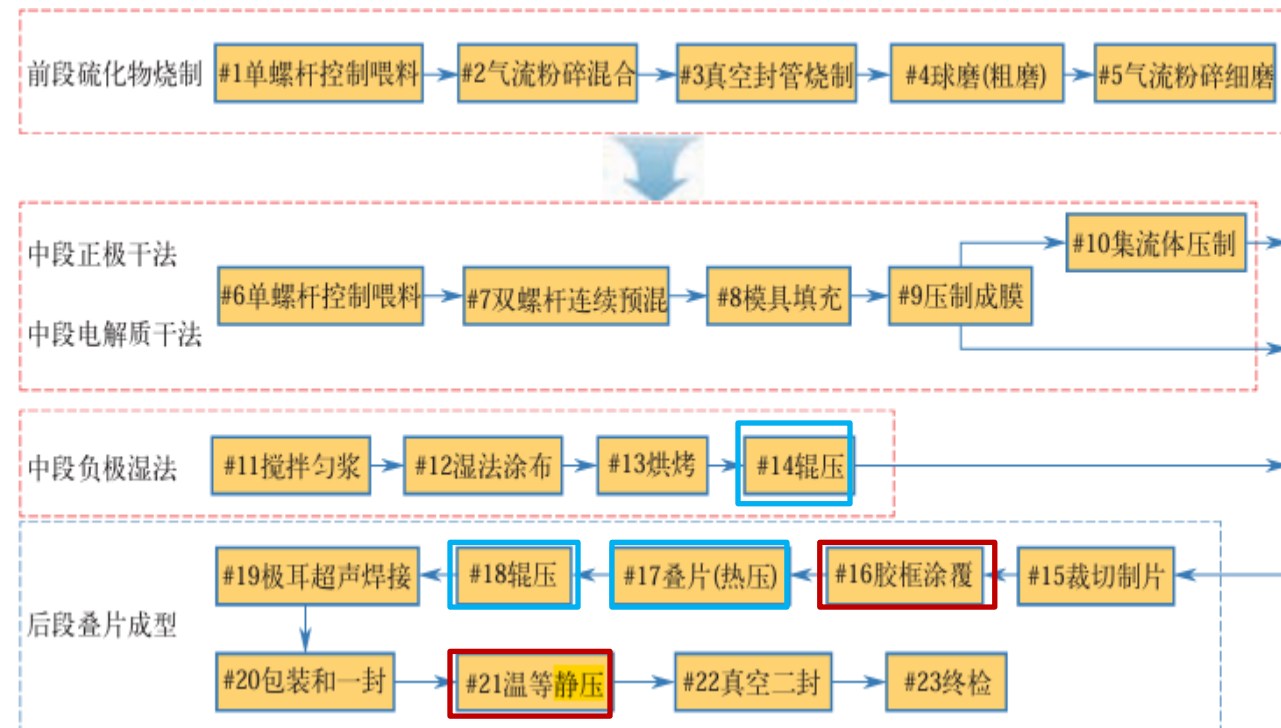
(a) 传统串联电芯；(b) 双极电池架构；(c) 双极固态电池叠片示意图

3.3 中段工艺：电芯制造：胶框涂覆、等静压设备、激光焊接需求增加

硫化物固态软包电池湿法组装流程



硫化物固态软包电池干法组装流程



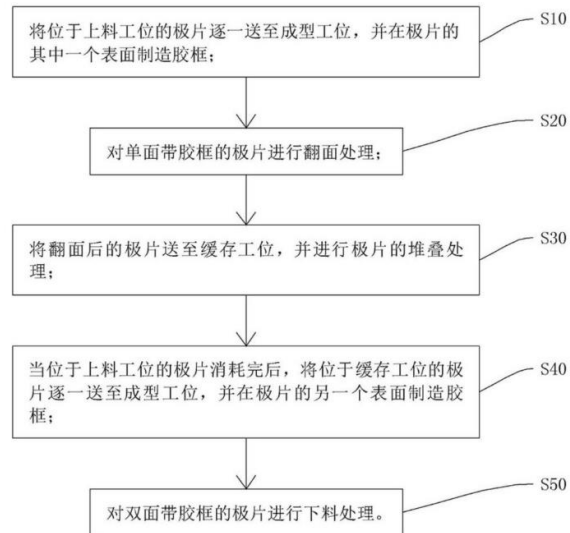
3.3.1 中段工艺：电芯制造：胶框涂覆设备、焊接设备

胶框涂覆设备：固态电解质膜制备分为湿法工艺、干法工艺。湿法工艺可分为模具支撑成膜、正极支撑成膜以及骨架支撑成膜。其中，基材支撑，需将固态电解质膜涂覆于支撑基材上，如PET等，然后卷绕成卷。组装时，常使用**热转印**的方式将其转印到极片上。

在传统的胶框制造过程中，通常将一块块极片依次送至第一成型工位、翻面工位和第二成型工位，通过胶框成型机构分别在极片的两个表面上制造胶框，可是，采用如此的制造方式会导致相应的制造设备结构复杂，占用空间大，而且，成本高。

一种新的转印工艺是，通过成型工艺在正积极片和负积极片中的其中之一的双面制造胶框，另一嵌设于胶框内，以使正积极片和负积极片交错叠置成电芯，并对电芯施以等静压的压合处理；通过胶框的围合限位作用，能够限制正积极片与负积极片之间的横向位移，并保证固态电解质层与极片紧密贴合。

胶框转印极片制造方法



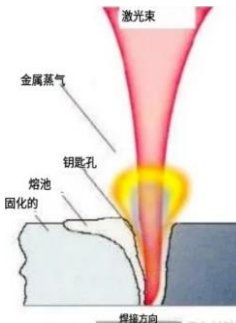
焊接设备：在液态动力电池的生产中，使用激光焊接的环节主要包括：

1) **中道工艺：**极耳的焊接(包括预焊接)、极带的点焊接、电芯入壳的预焊、外壳顶盖密封焊接、注液口密封焊接等；

2) **后道工艺：**包括电池PACK模组时的**连接片焊接**，以及模组后的盖板上的**防爆阀焊接**等。

固态电池中，由于采用固态电解质膜，减少了注液孔密封钉的焊接，但新增了激光清洗、UV打印和超声波焊接等环节，对焊接的需求有所提升。

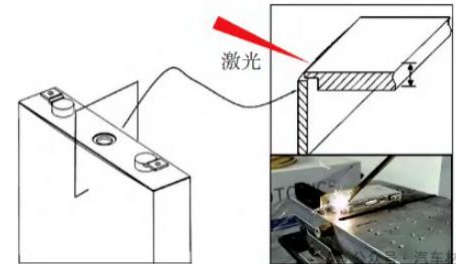
激光焊接的原理



电池极柱焊接



电池壳体与盖板焊接



方形动力电池侧焊



3.3.2 中段工艺：电芯制造：等静压设备

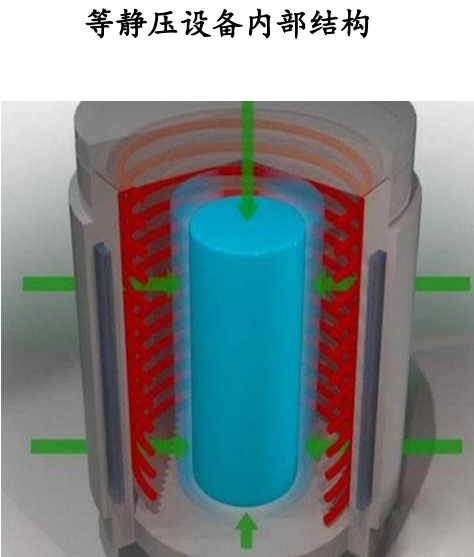
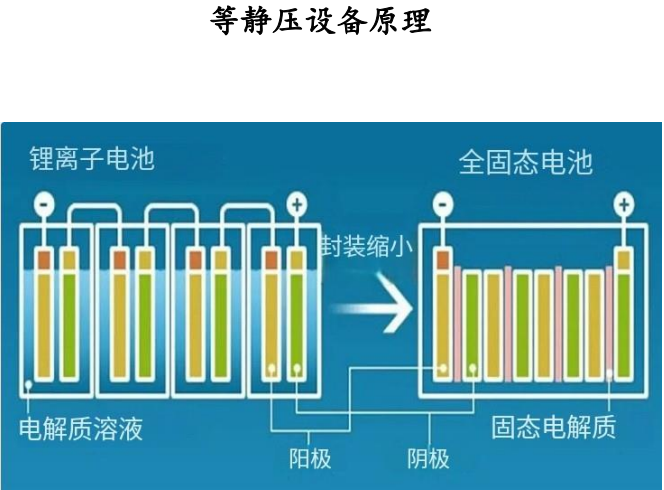
等静压处理是指把被加工的物体放置一种特定的模具中，再把装有工件的模具放入盛满液体的密闭容器中，通过增压系统逐步加压，通过液体/气体传压，使得物体的各个表面受到了相等的压强，并在模具限制下，成型的过程。在压缩过程中，实际工件分子间的距离是缩小了，密度增大了，使得被压制的物品的物理性质乃至化学性质发生变化。**帕斯卡原理**：即在不可压缩的流体中，如果在其任意一点施加压力，所受的压强都会等值地传递到流体的各个方向，使每一点都会达到静力平衡的状态。在粉体工艺中，这个原理已被成功利用并开发出了等静压技术，而等静压成型需要用到的设备为等静压机。

等静压设备：考虑到固态电解质要与电极形成良好的固固接触界面、在循环过程中会发生接触损耗、以及要抑制锂枝晶形成等，**堆叠时需要新增加压设备，施加超过100MPa压力使各材料致密堆积。传统热压、辊压方案提供压力有限且施加压力不均匀，难以保证致密堆积的一致性要求，消除堆叠层之间的微小间隙，进而影响固态电池导电性和电池性能。**等静压技术基于帕斯卡原理，金属、陶瓷、复合材料和聚合物等材料都能实现致密化，消除孔隙，对于固态电池而言，等静压技术可以有效消除电芯内部的空隙，提升电芯内组件界面之间的接触效果，进而增强导电性，提高能量密度，并减少运行期间的体积变化。

冷等静压机（CIP）是在室温下工作的，这有利于制造坚固的“绿色电池体”，使其能够承受后续加工阶段。然而，**温等静压机（WIP）、热等静压机（HIP）**则引入了额外的变量，如受控加热和升温，这些变量必须得到精心管理，以避免损害材料的完整性。目前等静压技术在固态电池领域的推广仍然面临着如何选取合适的压制温度和压力组合，以及如何控制压实质地，如何提高生产效率与良率等挑战。

不同温度等静压设备对比

	冷等静压（CIP）	温等静压（WIP）	热等静压(HIP)
特点	在 常温下运行 ，无需加热装置，一般由加压站、冷却系统、缸体（钢筒）、框架、上端塞（顶盖）、控制柜等组成。通常利用 液体 （例如水或油或乙二醇混合液体）为压力介质，利用橡胶和塑料作包套模具材料。	利用 液体或气体 作为工作介质，在密闭容器中通过增压系统逐步加压，使得被加工的物体在各个表面受到相等的压强，并在模具限制下完成成型过程。	需要以较为 昂贵的氩气、氮气、氦气等惰性气体或其他混合气体作为压力介质 ，向制品（粉体或已经成型的样品）施加各向同等压力（100~200MPa）的同时利用加热炉对制品施加1000~2200℃的高温，从而使制品得以烧结或致密化的过程。
优势&劣势	相比热等静压， 可施加更高的压力（100-630MPa） ，可为下一步烧结、锻造或热等静压等工序提供具有足够强度的“生坯”，并 可在烧结之前对其进行较为精细的机械加工，显著减少烧结后制品的加工量。	在工作过程中会加热介质或工件，以达到特定的温度条件，从而促进材料的致密化、扩散或相变等过程。 工作温度一般不超过500℃，压强范围可达300MPa左右。 但温等静压的温度和压力对于制品有着很大的影响，其主要通过外部干套或内部热交换器施加到工作介质，再通过增压器不断把压力介质加入工作缸内部，达到加热加压的目的，这种工作方式会使压力介质受到摩擦、增压的作用而持续升温，较难实现对温度的精准控制，同时工作缸内均温性也难以得到保证。	热等静压的工作条件压力达到100MPa，温度1100℃。 高度均匀性 ，热等静压机能够确保电池组件在高压和高温下受到均匀的压力，从而产生高度均匀的材料，提高电池的整体性能； 可控性强 ，通过调节压力和温度等参数，可以精确控制固态电池的致密化和界面接触过程，满足不同应用场景的需求； 适用范围广 ，热等静压机适用于不同材料和结构的固态电池生产，具有广泛的适用性。
应用现状	在固态电池的生产中已得到了广泛应用，例如制备石榴石基超薄柔性复合固态电解质膜、硫化物固态电解质无负极全固态电池等（如韩国LG能源）	适用于 需要特定温度条件或无法在室温下成型的材料，如粉末和粘合剂 。三星SDI是等静压技术的推崇和应用者，有报道称其在固态电池产线中测试中采用了水压和辊压工艺的温等静压机。	热等静压机适用于不同材料和结构的固态电池生产，具有广泛的适用性。



3.4 后段工艺及设备：压力化成设备

科研人员提出原位聚合构建固态电解质和固态锂电池的设计理念，即将碱金属盐、可聚合小分子单体、引发剂等混合溶液注入电池中，通过加热或其他外部条件，即可在电池内部原位聚合生成聚合物固态电解质或有机/无机复合电解质。这种工艺方案既可以有效地降低电极/电解质界面电阻，还可以兼容现有电池生产装置和生产环境条件，大幅度降低了生产成本，适用于批量化制备，已经成为固态锂电池制备的主流技术。

加入液态前驱体的固态锂电池电芯，需要进一步的**加压化成**。压力化成设备的高温加压机械单元结构如图，该单元采用卧式结构，每个单元由若干个层板组件、伺服电机以及固定支架组成，每层可放置一个电池，每个单元放置若干个电池。每个电池层板组件包括铝板、加热板、温度传感器等。铝板在伺服电机的控制下实现对电池的加压；加热板可快速将电池加热到设定温度；温度传感器固定在铝板上，用来实时检测电池加热温度。

将注入液态前驱体的软包装电池置于铝制层板组件之间，启动伺服电机加压，并预热（低于前驱体聚合温度），使液态前驱体充分浸渍到电极中，这有利于聚合后固态电解质与电极之间形成良好的交联接触界面。之后进一步加压，温度升至聚合温度，待一定反应时间使得液态前驱体充分反应，形成固态电解质。最后，将电池与外电路连接，进行首次充电化成，在化成过程中，也有助于残存的部分液态前驱体完全聚合固态化。值得说明的是，根据原位聚合前驱体和电极设计方案不同，既可以先进行原位聚合再化成，也可以先化成再进行原位聚合，也可以化成和原位聚合同时进行。采用铝塑膜包装的电池，在现有的市售压力化成设备上就可以进行原位聚合。当采用钢壳或铝壳等外包装材料时，由于金属类外包装材料属于刚性壳体，压力和温度传导效果较差，需要采用其他设备。

压力化成设备的高温加压机械单元



压力化成设备的高温加压



3.5 固态电池设备市场空间测算：预计到2030年固态电池设备市场规模将超过400亿元

据EV Tank数据，2024年全球固态电池出货量5.3GWh，同比大幅增长4.3倍，全部为半固态电池，主要为中国企业生产。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。预计到2030年全球固态电池出货量中全固态的比例将接近30%。

【分下游出货量/渗透率假设】

- 1) 动力：预计车规领域一些高端或特定需求电动车型会接受一定溢价，搭载（半）固态电池，假设到2030年渗透率达到5%。
- 2) 储能：储能市场对电芯成本敏感，仅部分对价格敏感度较低且极度注重安全性的场景才会率先使用固态电芯，短期内需求量有限，假设到2030年渗透率为4%。
- 3) 消费：3c数码消费电池由于体积限制，对能量密度要求更高，叠加用户体验升级等需求，预计固态电池有望率先落地，假设到2030年渗透率率先突破10%。
- 总体上，预计消费电子领域有望率先落地，其次为动力、储能领域。

【单价假设】据Ofweek锂电网，目前，液态电池单GWh设备成本约为1亿元，而全固态电池约为4-5亿元。这种差异主要源于设备效率降低、设备数量增加（等静压机需多台配置提升产能）、干法工艺难度指数级上升三个方面。

前道工艺的路线选择至关重要。在量产线上，湿法工艺成熟度更高，生产速度可达50多米/分钟；而干法工艺生产速度则更慢，建设GWh产能需配置更多设备。因此头部企业多采取折中方案：正极采用湿法工艺，负极用干法工艺，平衡产出与成本。

中道设备面临三大难点：叠片工艺因固态电解质膜强度低易断裂，需采用热复合转印工艺；等静压技术存在温等静压与冷等静压争议；激光焊接需求大幅增加。这些技术挑战正是设备企业创新的焦点。

假设半固态电池设备单GWh价值量初期在2亿元。

【固态/半固态渗透率假设】据EV Tank、《中国固态电池行业发展白皮书（2025年）》预计，到2030年，固态电池中，全固态电池比例将接近30%。

市场规模：根据我们的初步测算，预计到2030年固态电池出货量将达到209GWh，其中，半固态电池147GWh，全固态63GWh。预计2030年固态电池设备市场规模约为408亿元，其中半固态设备市场规模220亿元，全固态设备市场规模189亿元。

	2021	2022	2023	2024	2025E	2026E	2027E	2028E	2029E	2030E
全球电池出货量（GWh）	562	958	1203	1545	1895	2291	2734	3212	3722	4262
yoy	91%	70%	26%	28%	23%	21%	19%	18%	16%	15%
半+全固态渗透率				0.3%	0.9%	1.5%	2.0%	2.9%	3.9%	4.9%
半+全固态出货量（GWh）a+b+c				5.3	17.8	33.2	54	92	145	209
半固态占固态比重				100%	95%	92%	90%	85%	80%	70%
半固态出货量（GWh）				5.3	17	31	48	78	116	147
半固态设备单价（亿元/GWh）				2.0	1.9	1.8	1.7	1.6	1.5	1.5
半固态设备市场规模（亿元）d				10.6	32.1	55.0	82.1	124.6	173.6	219.9
全固态占固态比重				0%	5%	8%	10%	15%	20%	30%
全固态出货量（GWh）				0	1	3	5	14	29	63
全固态设备单价（亿元/GWh）				4.0	3.8	3.6	3.5	3.3	3.2	3.0
全固态设备市场规模（亿元）e				0.0	3.4	9.6	18.8	45.4	92.6	188.5
半+全固态设备市场规模（亿元）d+e				11	35	65	101	170	266	408
1) 动力电池出货量（GWh）	371	684	865	1051	1261	1501	1771	2072	2404	2765
出货量yoy		84%	26%	21%	20%	19%	18%	17%	16%	15%
半+全固态渗透率					1.0%	1.5%	2.0%	3.0%	4.0%	5.0%
固态出货量（GWh）a					13	23	35	62	96	138
2) 储能电池出货量（GWh）	66	159	224	370	499	649	811	973	1139	1310
出货量yoy		140%	41%	65%	35%	30%	25%	20%	17%	15%
半+全固态渗透率					0.5%	1.0%	1.5%	2.0%	3.0%	4.0%
固态出货量（GWh）b					2	6	12	19	34	52
3) 消费电池出货量（GWh）	125	114	113	124	134	141	151	166	179	188
出货量yoy		-9%	-1%	10%	8%	5%	8%	10%	8%	5%
半+全固态渗透率					2%	3%	4%	6%	8%	10%
固态出货量（GWh）c					3	4	6	10	14	19

4. 设备相关标的

4 产业链相关标的

	证券代码	企业名称	市值 (亿元)	公司布局
整线	300450.SZ	先导智能	418	2024年推出 全固态整线解决方案 ，覆盖 全固态电极、电解质膜制备及复合设备、裸电芯组装到致密化设备、高压化成分容 等全固态电池制造关键设备，在电芯结构缓冲件成形、无隔膜叠片、连续致密化、高压化成分容等技术方面极具优势。目前，公司的固态电池设备及干法电极设备已成功发货至欧洲、美国、日韩等国家和地区的知名汽车企业、头部电池客户、新兴电池客户现场，并获得客户认可和重复订单。
	688559.SH	海目星	79	深度参与新一代锂电池技术固态电池设备的开发，与某固态电池的技术领军企业达成5年期战略合作协议，并 签订了价值4亿元的2GWh固态电池设备量产订单 ，成为了行业首家 商业化锂金属高能量密度固态电池整线设备供应商 。
	688499.SH	利元亨	88	攻克 干法电极核心装备 研发难关，实现全流程装备自主化开发，拥有稳定的 正极干法涂布、压制转印、极片胶框成形、高压化成分容 等关键工艺技术，具备实现由实验室向规模化量产的技术转化能力；成功 中标头部企业首条硫化物固态电池整线项目 ，斩获 头部车企批量涂布机订单 。
	300457.SZ	赢合科技	138	掌握了固态电池湿法涂布技术、干法混料技术、干法成膜技术等技术。2024年公司开发的湿法固态极片 涂覆设备已成功发货国内头部客户现场 。在干法技术方面，今年公司推出了第三代干法混料纤维化+干法成膜工艺集成化设备。近期，公司自主研发生产的干法搅拌设备也已成功交付至国内头部客户现场。25年成功研发并推出了全新的固态干法电极生产设备，这些设备已经成功发货并部署到客户的现场。
前段	301662.SZ	宏工科技	85	公司与清研电子 达成战略合作 ，对 “干法电极”前段工序技术进行产业化、规模化攻关 ，专注于核心部件的生产工艺和成（台）套设备的协同研发，共同推进干法电极前段工序的研发与市场应用。固态电池被视为最具潜力的下一代锂电池技术，2024 年公司 与多家客户签订了数千万元的产线及设备订单 。
	301325.SZ	曼恩斯特	89	公司在固态电池领域已初步完成“湿法+干法”的双线产品布局，其中在 干法前段设备、陶瓷化材料应用、双层涂布及自动闭环控制 等方面均有较深的技术沉淀。目前已有多款核心设备陆续交付客户现场，部分设备调试已达客户要求。
	832522.BJ	纳科诺尔	85	公司是最早参与固态电池生产设备相关研发的企业之一，通过与国内外固态电池相关科研院所及客户的深入交流，开发了 锂带压延、电解质成膜、转印 等设备，为固态电池材料、工艺的发展奠定了坚实的基础。
	688155.SH	先惠技术	71	干法辊压设备是固态电池产业化的重要环节，它能够精准满足固态电池的特殊要求。目前，公司与清陶能源合作研发的干法辊压设备已成功交付给清陶能源，并进入精细调试阶段。
	003043.SZ	华亚智能	58	在固态电池业务方面目前主要从事 干法电极的压延装备系统 的研发、生产、销售该套装备具有辊缝在线拟合、膜厚闭环控制全自动生产、面密精准一致、易拆装设计及稳定等技术优势。目前公司 已正在为客户生产200MWh全固态电池生产线 。
	688573.SH	信宇人	31	1) 电解质 ：公司计划 25年年底研制出卤化物固态电解质样品 ， 26年年底研制出复合电解质电芯样品 。但目前进度超预期，卤化物固态电解质样品已试制完成，并完成了初步的电化学测试，离子电导率略高于十的负三次方，展现了良好的电导率性能。卤化物电解质相比硫化物，电化学窗口更宽，可以适应4.3伏以上的高电压平台，对于提升正极的能量密度有好处。其次，稳定性更好，制备工艺没有硫化物复杂，最后，成本也更低。25年下半年，公司将按照规划，积极推进卤化物固态电解质的性能改进及客户验证工作。2) 涂布技术 ：公司积极探索 微孔基材涂布 的商业化运作以及 干法涂布 在固态电池电极中的应用。3) 设备 ：在 辊压分切设备 领域，公司开发了全数字化分切技术和双辊同步防掉粉技术，极大提高了分切精度和涂层剥离强度，降低了极片掉粉率。
	300619.SZ	金银河	46	固态电池领域，公司聚焦干法电极工艺装备及产线的优化与升级。目前 干法涂布连续成膜、覆合成极片设备 已取得突破性进展，完全具备接单能力。后续 从上料及纤维化到出极片的高速连续量产线预计25年度内可完成量产线 。

4 产业链相关标的

	证券代码	企业名称	市值 (亿元)	公司布局
中段	688519.SH	联赢激光	98	公司为客户提供了 包括激光焊接设备在内的固态电池装配线 。2025年3月，公司的首条固态电池生产线出货，这条固态电池生产线，公司做了6台设备，相比以前液态方壳电池一条线做5台设备，量有所提升。对于固态电池的形态选择上，公司在软包模式和方壳模式上都有做。
	300545.SZ	联得装备	56	公司固态电池新工艺涉及到的 超声波焊接工艺设备已经出货到客户 。
后段	300545.SZ	杭可科技	56	公司已与国内外多家相关厂商就 半固态电池的实验线或中试线展开合作并已陆续交付 设备。2024年在研项目中就有“ 固态电池大压力夹具机 ”项目,针对 固态电池需要高强度压力的工艺特点进行预研 。
	300648.SZ	星云股份	64	公司已针对下游固态电池领域客户的主要路线布局，近期公司自主研发生产的 固态电池智能化生产线顺利完成向国内某知名客户交付验收 。公司电池检测设备 已应用于固态电池研发、生产阶段的电池测试 。
	688392.SH	骄成超声	80	公司 超声波焊接设备 可用于 固态电池极耳焊接，并形成小批量订单 。公司也密切关注前沿技术发展趋势，对用于固态电池所需材料制备的相关超声波设备进行了研究开发，相关工作有序推进中。
	688646.SH	ST逸飞	28	公司在固态电池 激光应用与制造装备 方面均有技术储备，公司电芯装配设备、模组PACK 设备以及整厂智慧物流系统等核心设备与相关技术均可应用于固态电池制造领域，并已与多家头部客户形成销售、合作关系， 多个项目已获得客户验收通过 。 同时，公司 与松山湖材料实验室联合开发新型结构化极片与激光微加工技术 ，进一步探索锂电池新材料新工艺的产业化应用路径，加快固态电池关键工艺技术的创新突破与产业化应用。此外，公司 与金羽新能签署战略合作协议，将围绕全极耳固态电池、方形铝壳固态电池的设备研发 ，为金羽新能提供从产品研发到落地的全周期技术支持，协助其完成全新固态电池产品极片段后工序的设备开发、优化及工艺定型。金羽新能将协同公司开展固态电池智能制造关键设备的开发，优化全极耳固态电池、方形铝壳固态电池的产品方案，打通全链条标准智造，降低生产成本，在同等技术及商务条件下，金羽新能将优先向公司采购锂电池生产设备，合作打造固态电池智造标杆工厂。
集流体	002371.SZ	北方华创	2444	
	603659.SH	璞泰来	400	1) 负极材料 ：新型CVD沉积硅碳负极材料可以适配半固态/固态电池。公司已具备固态锂金属负极成型方案，用于锂带压延复合，可同时实现锂带减薄、修边及单双面覆锂功能。 2) 固态电解质 ：已完成固态电解质LATP（磷酸铝钛锂）和LLZO（锂镧锆氧）的中试，已在四川基地建成年产200吨固态电解质中试产线。公司与研究机构合作开发的低温烧结固态电解质进展顺利。 3) 干法电极 ：成功推出了干法电极整线解决方案在多辊转移、分段辊压、双钢带辊压三大干法成膜工艺路线取得了阶段性的成果，并 已实现干法设备出货验收 。 2024年，公司分别与 北京恩力动力技术有限公司、溧阳中科固能新能源科技有限公司签订了战略合作协议 ，致力于共同推动固态电池技术的创新与应用。
	603800.SH	洪田股份	55	公司 高端铜箔装备及“一步法全干法”超精密真空镀膜设备 均可用于固态电池产业链，主要产品包括：纯镍箔设备、高抗拉高延伸基材铜箔单面镀镍/双面镀镍设备、真空磁控溅射镀膜机（可双面镀金属材料）、真空蒸发镀膜机（可双面镀铝）、真空磁控溅射蒸发复合镀膜机（可双面镀铜镀铝）。复合集流体以其安全性、轻量化和能量密度等方面优势，成为固态电池突破性能瓶颈的关键材料。目前公司已与国内外客户在固态电池方面有相关接洽合作。 复合铜箔方面 ，与国际知名的锂电铜箔行业龙头企业诺德股份已签订真空镀膜设备销售订单。
	301392.SZ	汇成真空	147	2024年7月10日与甘肃奥森豪威智能设备制造有限公司正式签订高端锂电池复合铜箔生产设备整体采购暨战略合作协议。针对复合集流体，公司正在研发面向动力锂电池复合铝箔的大型高真空超薄膜双面卷绕镀铝生产线，目前已完成生产线研制，目前在进行新的工艺验证。

4.1 整线设备：

【**先导智能**】公司业务涵盖锂电池智能装备、光伏智能装备、3C智能装备、智能物流、汽车产线、氢能智能装备、激光精密加工装备等领域，是全球领先的新能源智能制造解决方案服务商。多年来，公司研发投入占营收比始终保持在10%以上，并在新能源装备市场，始终保持市占率第一。2023年，先导智能营收突破166亿元。目前，先导智能在全球设立18家境外分/子公司，拥有60多个服务网点，雇员遍布16个国家和地区，产品远销美国、德国、法国、日本、韩国、瑞典等20多个国家和地区。

固态布局：2024年推出全固态整线解决方案，覆盖全固态电极（涵盖混料及干法、湿法极片复合设备）、全固态电解质膜制备及转印复合设备、裸电芯组装到致密化设备（包括新一代固态叠片机、胶框印刷设备）、致密化设备（等静压设备和其他致密化设备）、高压化成分容等全固态电池制造关键设备，在电芯结构缓冲件成形、无隔膜叠片、连续致密化、高压化成分容等技术方面极具优势。目前，公司的固态电池设备及干法电极设备已成功发货至欧洲、美国、日韩等国家和地区的知名汽车企业、头部电池客户、新兴电池客户现场，并获得客户认可和重复订单。

【**海目星**】公司以激光技术应用的前沿需求为导向，先后开发了应用于3c、动力电池、储能电池、光伏电池、钣金加工及新型显示等领域的激光及自动化设备，并为相关领域龙头客户提供智能制造装备的一体化解决方案，并拓展了医疗激光、塑料焊接等新兴业务板块。

固态布局：公司深度参与新一代锂电池技术固态电池设备的开发，与某固态电池的技术领军企业达成5年期战略合作协议，并签订了价值4亿元的2GWh固态电池设备量产订单，成为了行业首家商业化锂金属高能量密度固态电池整线设备供应商。

【**利元亨**】主要从事智能装备的研发、生产及销售，为新能源(动力锂电、3C锂电、固态电池、储能、钙钛矿、氢能)、智慧物流、ICT、AI算力等行业的头部企业提供数智整厂解决方案。在机器人产业方面，能提供移动操作一体化机器人软硬件技术及人形机器人关键零部件的整机组装与调试生产线。

固态布局：在固态电池领域，公司攻克干法电极核心装备研发难关，实现全流程装备自主化开发，拥有稳定的正极干法涂布、压制转印、极片胶框成形、高压化成分容等关键工艺技术，具备实现由实验室向规模化量产的技术转化能力；成功中标头部企业首条硫化物固态电池整线项目，斩获头部车企批量涂布机订单。

【**赢合科技**】公司业务主要涵盖锂电装备、电子雾化产品两部分。是锂电装备行业首批上市企业。产品应用于动力、储能及消费类电池等多个领域，是目前全球少数能够提供锂电池智能化数字工厂解决方案的企业之一。公司的电子烟业务主要以品牌业务为主，为客户提供电子烟、烟弹、雾化器及其他电子烟配件等产品。

固态布局：公司掌握了固态电池湿法涂布技术、干法混料技术、干法成膜技术等技术。2024年公司开发的湿法固态极片涂覆设备已成功发货到国内头部客户现场。在干法技术方面，今年公司推出了第三代干法混料纤维化+干法成膜工艺集成化设备。近期，公司自主研发生产的干法搅拌设备也已成功交付至国内头部客户现场。25年成功研发并推出了全新的固态干法电极生产设备，这些设备已经成功发货并部署到客户的现场。

4.2 前段设备

【宏工科技】公司主要从事物料自动化处理业务，致力于为下游锂电池、食药化塑等行业提供一站式的物料自动化处理解决方案。主要产品涵盖物料自动化处理产线及设备，能够为客户提供物料处理自动化一站式解决方案，包括：解包投料、储存破拱、气力输送、计量配料、混合干燥、搅拌制浆、分散研磨、除尘清洁、成品包装、智能控制等，广泛应用于电池匀浆、电池材料、精细化工、食品医药、橡胶塑料等行业。

固态布局：公司与清研电子达成战略合作，对“干法电极”前道工序技术进行产业化、规模化攻关，专注于核心部件的生产工艺和成（台）套设备的协同研发，共同推进干法电极前道工序的研发与市场应用。固态电池被视为最具潜力的下一代锂电池技术，2024 年公司与多家客户签订了数千万元的产线及设备订单。

【曼恩斯特】公司业务主要分为涂布应用类和能源系统类。涂布应用类主要包含锂电、泛半导体业务，产品涵盖核心部件、智能装备；能源系统类主要包含储能及氢能业务，产品涵盖储能系统解决方案、氢能系统解决方案。

固态布局：公司在固态电池领域已初步完成“湿法+干法”的双线产品布局，其中在干法前段设备、陶瓷化材料应用、双层涂布及自动闭环控制等方面均有较深的技术沉淀。目前已有多款核心设备陆续交付客户现场，部分设备调试已达客户要求。

【纳科诺尔】公司的主要产品为新能源电池极片辊压机，及其他用途（如高分子材料、碳纤维、粉末冶金、贵金属压延等）辊压机，主要服务于新能源电池制造企业。

固态布局：在固态电池领域，公司是最早参与固态电池生产设备相关研发的企业之一，通过与国内外固态电池相关科研院所及客户的深入交流，开发了锂带压延、电解质成膜、转印等设备，为固态电池材料、工艺的发展奠定了坚实的基础。

【先惠技术】公司主营各类智能制造装备的研发、生产与销售，其中新能源电池装备占比最大，其次是汽车底盘系统装备及氢能装备，智能制造数据及软件产品。

固态布局：干法辊压设备是固态电池产业化的重要环节，它能够精准满足固态电池的特殊要求。目前，公司与清陶能源合作研发的干法辊压设备已成功交付给清陶能源，并进入精细调试阶段。

【华亚智能】公司是华东地区的精密钣金制造商之一，主要涉及轨道交通、半导体设备、精密仪器、医疗器械、智能电网、新能源等行业的生产制造和组装。

固态布局：公司在固态电池业务方面目前主要从事干法电极的压延装备系统的研发、生产、销售该套装备具有辊缝在线拟合、膜厚闭环控制全自动生产、面密精准一致、易拆装设计及稳定等技术优势。目前公司已正在为客户生产200MWh全固态电池生产线。

【信宇人】公司专注于智能制造高端装备的研发、生产和销售，产品涵盖锂电池干燥设备、涂布设备、辊压分切设备、光电涂布设备等。在锂电池方面，公司重点推进干法涂布技术、固态电解质研发、钙钛矿薄膜技术等前沿专利技术。

固态布局：1) 电解质：公司计划25年年底研制出卤化物固态电解质样品，26年年底研制出复合电解质电芯样品。但目前进度超预期，卤化物固态电解质样品已试制完成，并完成了初步的电化学测试，离子电导率略高于十的负三次方，展现了良好的电导率性能。卤化物电解质相比硫化物，电化学窗口更宽，可以适应4.3伏以上的高电压平台，对于提升正极的能量密度有好处。其次，稳定性更好，制备工艺没有硫化物复杂，最后，成本也更低。25年下半年，公司将按照规划，积极推进卤化物固态电解质的性能改进及客户验证工作。2) 涂布技术：公司积极探索微孔基材涂布的商业化运作以及干法涂布在固态电池电极中的应用。3) 设备：在辊分设备领域，公司开发了全数字化分切技术和双辊同步防掉粉技术，极大提高了分切精度和涂层剥离强度，降低了极片掉粉率。

【金银河】公司业务涵盖装备制造、有机硅材料、新能源材料及精细化工等领域。在锂电领域，公司的产品目前主要应用于锂（钠）电池生产最前端的电极（极片）制备，包括正负极浆料混合设备、涂布设备和辊压分切设备。固态电池领域，公司聚焦干法电极工艺装备及产线的优化与升级。目前干法涂的连续成膜及覆合成极片设备已取得突破性进展，完全具备接单能力。后续从上料及纤维化到出极片的高速连续量产线预计25年度内可完成量产线。

4.3 中后段

中段：

【**联赢激光**】公司为全球制造业提供高品质激光器、激光焊接头、激光焊接机、机器人焊接工作站、激光焊接自动化成套设备及各种非标自动化解决方案；2024年中国激光焊接成套设备市场销售收入为122.5亿元，按此计算公司在激光焊接成套设备市场占有率约为26%。公司在激光焊接领域的市场占有率保持行业领先地位。

固态布局：公司为客户提供了**包括激光焊接设备在内的固态电池装配线**。**2025年3月，公司的首条固态电池生产线出货**，这条固态电池生产线，公司做了6台设备，相比以前液态方壳电池一条线做5台设备，量有所提升。对于固态电池的形态选择上，公司在软包模式和方壳模式上都有做。

【**联得装备**】公司是国内领先的LCD/OLED整线模组、柔性制造及非标自动化设备专业解决方案提供商；在新型半导体显示、汽车智能座舱系统、半导体封测、新能源等领域，致力为客户提供整套解决方案，产品为新型半导体显示器件生产设备、半导体设备及新能源设备。锂电领域，公司产品包括锂电池**包蓝膜、注液机、切叠一体机、电芯装配及Pack段整线自动化设备**等。固态电池领域，公司固态电池新工艺涉及到的**超声波焊接工艺设备已经出货到客户**。

后段：

【**杭可科技**】公司自成立以来，始终致力于各类可充电电池，特别是锂离子电池的后处理系统，目前在**充放电机、内阻测试仪等后处理系统核心设备**的研发、生产方面拥有核心技术和能力，并能提供锂离子电池生产线后处理系统整体解决方案。

固态布局：公司已与国内外多家相关厂商就**半固态电池的实验线或中试线展开合作**并已陆续交付设备。2024年**在研项目中就有“固态电池大压力夹具机”项目**，针对固态电池需要高强度压力的工艺特点进行预研。

【**星云股份**】公司主要业务包含**锂电池设备、电池检测服务、储能PCS及充电桩**产品的研发/生产/销售等多种形式。公司可提供锂电池全方位测试产品解决方案，业务贯穿锂电池“研发、制造、应用、回收”全生命周期。

固态布局：公司已针对下游固态电池领域客户的主要路线布局，近期公司自主研发生产的**固态电池智能化生产线顺利完成向国内某知名客户交付验收**。公司电池检测设备**已应用于固态电池研发、生产阶段的电池测试**。

【**骄成超声**】公司位于上海市闵行区，上海交通大学背景，聚焦**新能源、半导体、医疗医美**三大战略方向。22年9月成功登陆上交所科创板上市，成为国内工业超声设备第一家上市企业。目前主要产品有**超声波金属焊接设备、非金属焊接设备、超声波检测设备、超声波裁切设备、超声波除尘等**，在半导体、锂电池、光伏储能、汽车线束（充电桩）、橡胶轮胎、医疗医美等众多行业领域有着广泛的应用。

固态布局：公司**超声波焊接设备可用于固态电池极耳焊接，并形成小批量订单**。

【**ST逸飞**】公司是智能激光装备及创新工艺方案提供商，主要产品包括**锂电池电芯自动装配线、模组/PACK自动装配线**等自动化产线，以及**各类精密激光加工智能化专机、工厂智慧物流装备与系统**，能够为客户提供。“激光+工艺+装备”一体的整体解决方案。公司产品主要用于各类锂离子电池、钠离子电池、固态/半固态电池、超级电容等产品的电芯封装、电池结构件组装、模组/PACK 组装、退役PACK回收/拆解等工序段，并延伸至半导体、医疗健康、家电厨卫、装配式建筑、汽车零部件等行业。

固态布局：公司在**固态电池激光应用与制造装备**方面均有技术储备，公司电芯装配设备、模组PACK 设备以及整厂智慧物流系统等核心设备与相关技术均可应用于固态电池制造领域，并已与多家头部客户形成销售、合作关系，**多个项目已获得客户验收通过**。同时，公司**与松山湖材料实验室联合开发新型结构化极片与激光微加工技术**，进一步探索锂电池新材料新工艺的产业化应用路径，加快固态电池关键工艺技术的创新突破与产业化应用。此外，公司**与金羽新能签署战略合作协议**，将围绕**全极耳固态电池、方形铝壳固态电池**的设备研发，为金羽新能提供从产品研发到落地的全周期技术支持，协助其完成全新固态电池产品极片段后工序的设备开发、优化及工艺定型。金羽新能将协同公司开展固态电池智能制造关键设备的开发，优化全极耳固态电池、方形铝壳固态电池的产品方案，打通全链条标准智造，降低生产成本，在同等技术及商务条件下，金羽新能将优先向公司采购锂电池生产设备，合作打造固态电池智造标杆工厂。

4.4 集流体

【璞泰来】公司业务主要涵盖新能源电池材料与服务、新能源自动化装备与服务。新能源电池材料与服务包括负极材料、隔膜涂覆加工、膜材料等。自动化装备领域已覆盖锂电池生产前中后段关键工序，形成包括涂布、分切、卷绕、叠片、注液、化成分容、氦检等关键电芯工艺的综合产品服务能力。

固态布局：1) **负极材料**：新型CVD沉积硅碳负极材料可以适配半固态/固态电池。公司已具备固态锂金属负极成型方案，用于锂带压延复合，可同时实现锂带减薄、修边及单双面覆锂功能。2) **固态电解质**：已完成固态电解质LATP（磷酸铝钛锂）和LLZO（锂锗氧）的中试，已在四川基地建成年产200吨固态电解质中试产线。公司与研究机构合作开发的低温烧结固态电解质进展顺利。3) **干法电极**：成功推出了干法电极整线解决方案在多辊转移、分段辊压、双钢带辊压三大干法成膜工艺路线取得了阶段性的成果，并已实现干法设备出货验收。

2024年，公司分别与北京恩力动力技术有限公司、溧阳中科固能新能源科技有限公司签订了战略合作协议，致力于共同推动固态电池技术的创新与应用。

【洪田股份】公司是国内高端铜箔装备龙头企业及国内首家掌握并采用“一步法全干法”工艺路线的真空镀膜设备厂商，产品广泛应用于锂电、固态电池、泛半导体、光伏、军工航天、消费电子等多个领域。

固态布局：公司**高端铜箔装备及“一步法全干法”超精密真空镀膜设备**均可用于固态电池产业链，主要产品包括：纯镍箔设备、高抗拉高延伸基材铜箔单面镀镍/双面镀镍设备、真空磁控溅射镀膜机（可双面镀金属材料）、真空蒸发镀膜机（可双面镀铝）、真空磁控溅射蒸发复合镀膜机（可双面镀铜镀铝）。复合集流体以其安全性、轻量化和能量密度等方面优势，成为固态电池突破性能瓶颈的关键材料。目前公司已与国内外客户在固态电池方面有相关接洽合作。

【汇成真空】公司的主营业务为真空镀膜设备，同时为客户提供设备相关的配件及耗材、后续技术支持服务，主要客户包括苹果、富士康、比亚迪、维达力、三星电子、信濠光电、麦格纳等国内外知名企业和西安交通大学、长春理工大学、武汉理工等科研院所。

锂电布局：2024年7月10日与甘肃奥森豪威智能设备制造有限公司正式签订**高端锂电池复合铜箔生产设备**整体采购暨战略合作协议。针对复合集流体，公司正在研发面向动力锂电池复合铝箔的大型高真空超薄膜双面卷绕镀铝生产线，目前已完成生产线研制，目前在进行新的工艺验证。

5. 风险提示

5 风险提示

宏观经济及产业政策波动风险。锂电设备行业受下游固定资产投资周期和产能扩张周期影响。若外部经济环境出现不利变化、扶持政策力度下降，或者上述影响市场需求的因素发生显著变化，都将对企业智能装备业务产生较大影响。

技术进展不及预期风险。固态电池、半固态电池作为新技术，目前仍然处于发展初期，技术成熟度有待提升，循环次数、性能等方面较传统液态电池仍有差距，且缺乏规模效应，价格也相对较高，若研发进展不及预期，性能提升不足，或降本进度不及预期，或导致渗透率难以提升。

原材料价格波动风险。固态电池尚处于发展初期，而电极、电解质等材料多采用贵金属，若材料价格大幅波动，或导致下游需求放缓，进而影响资本开支以及对设备厂的采购。

技术迭代风险。半固态、全固态电池技术路线多样，若企业大规模扩产，而其他新技术路线成熟后，可能面临现有技术被替代及产线被淘汰的风险。

分析师声明

作者具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格，保证报告所采用的数据和信息均来自公开合规渠道，分析逻辑基于作者的职业理解，本报告清晰准确地反映了作者的研究观点，力求独立、客观和公正，结论不受任何第三方的授意或影响。研究报告对所涉及的证券或发行人的评价是分析师本人通过财务分析预测、数量化方法、或行业比较分析所得出的结论，但使用以上信息和分析方法存在局限性。特此声明。

免责声明

本研究报告由方正证券制作及在中国（香港和澳门特别行政区、台湾省除外）发布。根据《证券期货投资者适当性管理办法》，本报告内容仅供我公司适当性评级为C3及以上等级的投资者使用，本公司不会因接收人收到本报告而视其为本公司的当然客户。若您并非前述等级的投资者，为保证服务质量、控制风险，请勿订阅本报告中的信息，本资料难以设置访问权限，若给您造成不便，敬请谅解。

在任何情况下，本报告的内容不构成对任何人的投资建议，也没有考虑到个别客户特殊的投资目标、财务状况或需求，方正证券不对任何人因使用本报告所载任何内容所引致的任何损失负任何责任，投资者需自行承担风险。

本报告版权仅为方正证券所有，本公司对本报告保留一切法律权利。未经本公司事先书面授权，任何机构或个人不得以任何形式复制、转发或公开传播本报告的全部或部分内容，不得将报告内容作为诉讼、仲裁、传媒所引用之证明或依据，不得用于营利或用于未经允许的其它用途。如需引用、刊发或转载本报告，需注明出处且不得进行任何有悖原意的引用、删节和修改。

类别	评级	说明
公司评级	强烈推荐	分析师预测未来12个月内相对同期基准指数有20%以上的涨幅。
	推荐	分析师预测未来12个月内相对同期基准指数有10%以上的涨幅。
	中性	分析师预测未来12个月内相对同期基准指数在-10%和10%之间波动。
	减持	分析师预测未来12个月内相对同期基准指数有10%以上的跌幅。
行业评级	推荐	分析师预测未来12个月内行业表现强于同期基准指数。
	中性	分析师预测未来12个月内行业表现与同期基准指数持平。
	减持	分析师预测未来12个月内行业表现弱于同期基准指数。
基准指数说明		A 股市场以沪深300 指数为基准；香港市场以恒生指数为基准，美股市场以标普500指数为基。



方正证券研究所

专注 · 专心 · 专业

北京市朝阳区朝阳门南大街10号兆泰国际中心A座17层
长沙市天心区湘江中路二段36号华远国际中心37层

上海市静安区延平路71号延平大厦2楼
深圳市福田区竹子林紫竹七道光大银行大厦31层

广州市天河区兴盛路12号楼隼峰院2期3层方正证券