

证券研究报告
交通运输行业/行业深度报告
2025年11月30日

固态电池曙光在即，eVTOL有望迎来全新升级

——eVTOL电池篇

证券分析师：李景星 S0370522090001

行业评级：增持

目录



一、eVTOL对于能源系统提出全新要求

二、固态电池：eVTOL电池的理想解决方案

三、曙光在即，固态电池面临的挑战与机遇

四、相关上市公司

风险提示：产业化进程不及预期，固态电池大规模量产遇到挑战；技术突破与工艺创新遭遇瓶颈；政策支持力度不及预期；原材料成本和制造成本压降不及预期



一、eVTOL对于能源系统提出全新要求

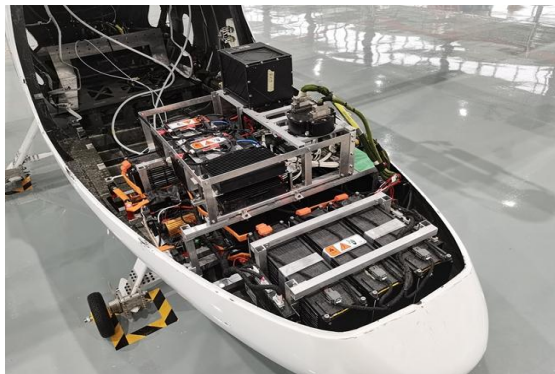


1.1 eVTOL中能源系统的重要性

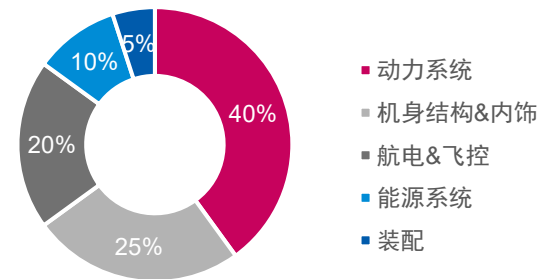
能源系统作为eVTOL的能量储存和释放来源，决定着航行过程中的续航里程和起降能力，是eVTOL中的核心系统之一，主要由动力电池组（Pack）、电源管理系统（BMS）、高压配电单元、热管理系统、快充接口与线束等关键部件构成。通常，整个能源系统在eVTOL中的重量占比在30%左右，根据构型、设计航程和有效载荷会有所差异。

- 成本方面，能源系统通常在整体BOM中占比10%-20%左右，取决于具体构型和产品设计。根据Lilium数据，其eVTOL的能源系统成本占比约10%，推进系统占比约40%，结构和内饰占比约25%，航电和飞控占比约20%，装配件占比约5%。一方面，受益于新能源车产业的蓬勃发展，锂电池产业链的成本得到整体压降；另一方面，在分布式电推进技术下，eVTOL需要多个高功率电机和电控系统，使得动力系统的成本占比达40%以上，占到大头；另外，为满足轻量化需求，大量的碳纤维复合材料也占据大量成本，因此能源系统在eVTOL整机成本中的相对占比不高。
- 然而，eVTOL能源系统的价值量却并不低，由于“开发周期长、材料成本高、产品要求严、测试环节多”等因素，航空级电池Pack的成本在2元/Wh左右，是车规动力电池的3-5倍，若按照200kWh设计能量推算，成本可以达到40万元，已经超过大部分新能源车整车价格；若考虑后续电池需要更换、拆解，则实际成本更高。

eVTOL
中的能
源系统



Lilium
成本结
构



1.2 eVTOL对电池提出更高要求

eVTOL在初步设计阶段需重点考虑对于能源系统的需求，设计步骤如下：

Step 1: 根据市场调研明确eVTOL的应用场景和相对应的功能需求（如载货vs载人、长途vs短途、城市vs城际等），决定合适的构型并提出最大起飞重量、有效载荷、续航里程等性能要求；

Step 2: 根据上述性能要求开展产品设计，包括桨盘载荷、功率载荷、悬停效率、升阻比等；

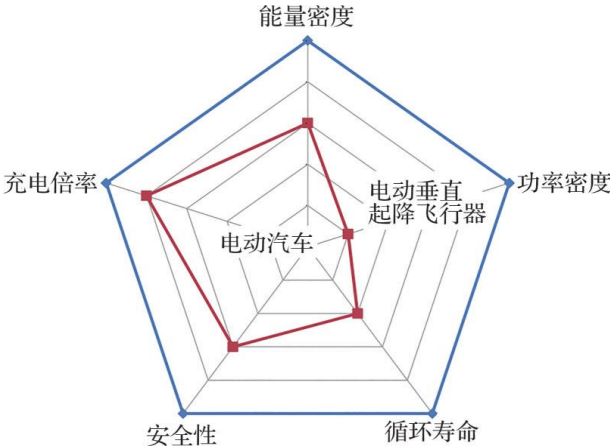
Step 3: 测算eVTOL在飞行的5个阶段（初始悬停、起飞爬升/上升过渡、巡航飞行、下降过渡、着陆悬停）中所需的任务功率，结合每个阶段的任务时间，计算出eVTOL在飞行过程中所需总共的电池能量；

Step 4: 根据电池能量的总需求，通过电池包的比能量倒算出电池包重量；

Step 5: 进行重量汇总并不断调整重量设计，在机身结构、动力系统、有效载荷等进行重新重量分配，并反复重算、试验以达到重量分配的最优解。

综合来看，eVTOL电池相较新能源车用电池在比能量、比功率、充电倍率、循环次数与安全性五大维度上都提出了更高的要求：

eVTOL电池
较新能源车用电池
要求更高



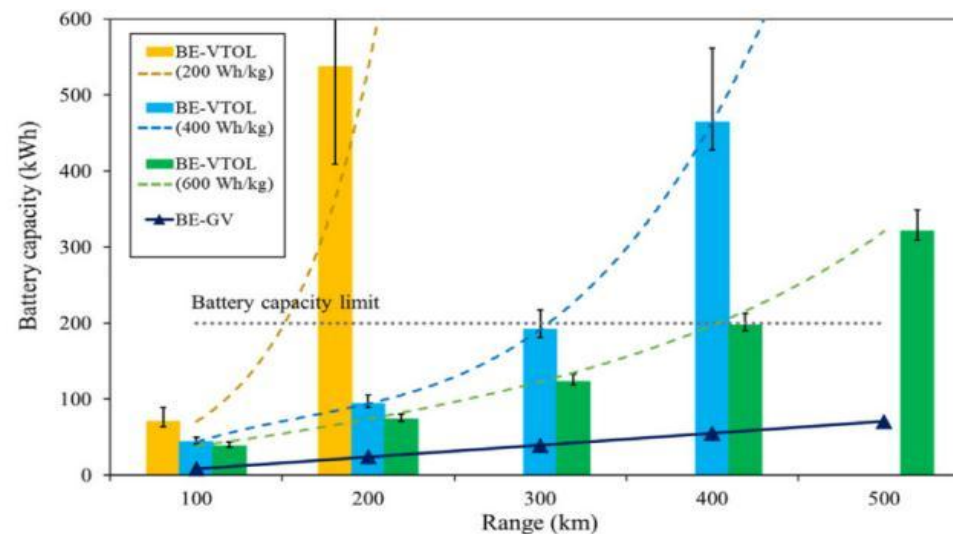
	eVTOL电池目标	新能源车用电池
比能量	初步门槛300Wh/kg; 大规模应用需达到500Wh/kg	三元锂200Wh/kg; 磷酸铁锂150Wh/kg
比功率	持续 1.2 kW/kg 峰值 4-5 kW/kg (起飞/降落)	持续 0.6 kW/kg 峰值 1-1.5 kW/kg
充电倍率	>5C	1C-2C, 超充可达4C
循环次数	500次以上, 1000次为目标	三元锂1000次 - 2000次 磷酸铁锂3000次- 4000次
安全性	极高	较高

1.3 (1) 核心要求一：高比能量

核心要求一：高比能量

- eVTOL重量分配可谓“存克存金”，目前大部分eVTOL重量在2吨以下，意味着能够分配给能源系统的重量在600kg左右（30%占比），若需要满足200kwh的能量设计以较好完成城市、城际的运输要求（对应航程约300km），则能源系统的比能量需要达到330Wh/kg。另外，还需考虑到：
 - ① 包装损失：电池包装（BMS、线缆和外壳）会损失 20%-30%的能量；
 - ② 老化损失：电池材料老化过程会损失 1-10%的能量；
 - ③ 充放不完全损失：由于无法完全充电和自动放电，也会损失 5-10%能量；
 - ④ 安全冗余：安全备用电量20%左右。
- 因此，电池的比能量需要在400Wh/kg以上。另外，电池老化会使得内部阻抗会增加，降低峰值功率，使起降过程变得极其危险；所以对于eVTOL而言，当电池的健康状态达到90%的时候就需要更换电池；较新能源车要求更严格（80%健康状态以下需更换电池）。

比能量提升使得eVTOL巡航航程有所突破



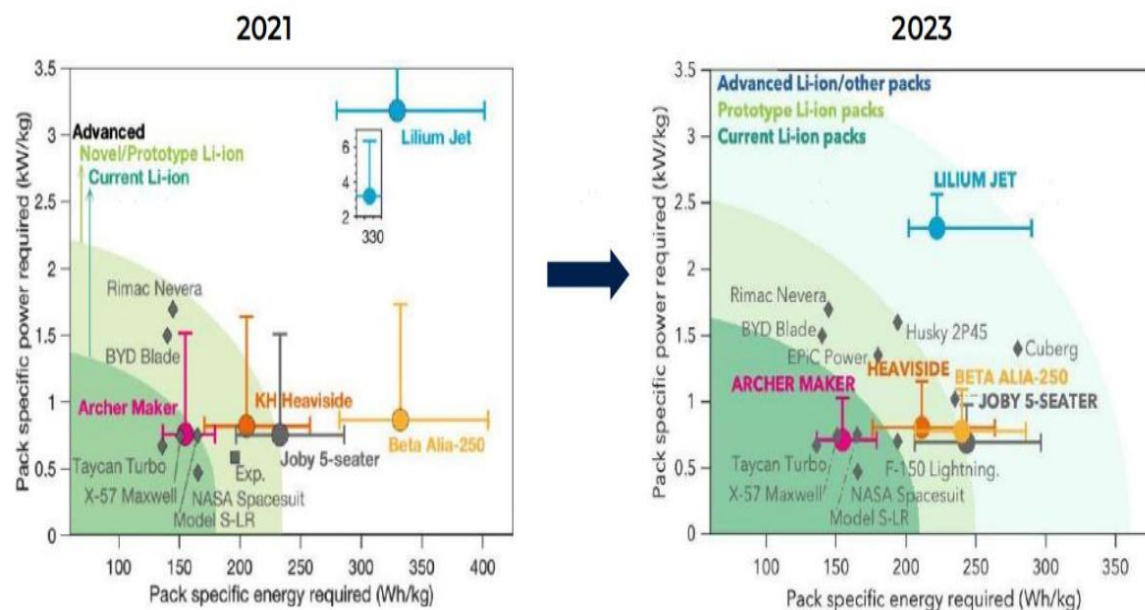
- 比能量的大小决定了电池容量的大小，进而决定了航程的长短：当电池的比能量突破300Wh/kg，对应可支持续航200-250km；若比能量进一步提升至400Wh/kg，则能够支持续航300km；若比能量进一步提升至600Wh/kg，则能够支持续航400km。
- 《通用航空装备创新应用实施方案（2024-2030年）》和《绿色航空制造业发展纲要（2023-2035年）》对eVTOL电池提出“推动400Wh/kg级航空锂电池产品投入量产，实现500Wh/kg级航空锂电池产品应用验证”的要求。

1.3 (2) 核心要求二：高比功率

核心要求二：高比功率

- 比功率用来衡量能量系统可以以多快的速度提供功率，决定了eVTOL 整机的起降能力以及加速性能。在eVTOL巡航阶段电池保持在1C左右的放电倍率即可；然而，在垂直起降阶段需要瞬间释放巨大功率，功率需求是巡航阶段的4倍，要求电池在30%SOC时仍具备12C放电能力。
- 在悬停阶段，需要电池维持在5C左右的放电能力，考虑到目前大部分eVTOL的功率载荷在4-5kw/kg（主要取决于产品设计和构型），则2吨级的eVTOL需要满足500kw左右的悬停功率，因此需要电池的比功率在1.2kW/kg以上。
- 新能源车对于功率需求相对平缓，主要满足加速和爬坡需求，因此eVTOL电池相对要求要更高。

eVTOL 电池需求与锂电池技术发展趋势



由上图可见，锂电池在比能量和比功率的性能上在不断取得进步，目前量产水平（深绿部分）已经能满足大部分新能源车需求，然而离eVTOL电池要求仍有差距。目前可满足eVTOL电池需求的电池尚未开始大规模量产（高性能电池[浅绿部分]和新型电池[浅蓝部分]）。

对比维度	eVTOL航空级电池	新能源车电池
功率密度	>1.2kW/kg	>0.6kW/kg
放电倍率	5C以上（起降阶段）	0.5C-2.5C
瞬时功率	起降时达12C脉冲	相对较低



1.3 (3) 核心要求三：高安全性

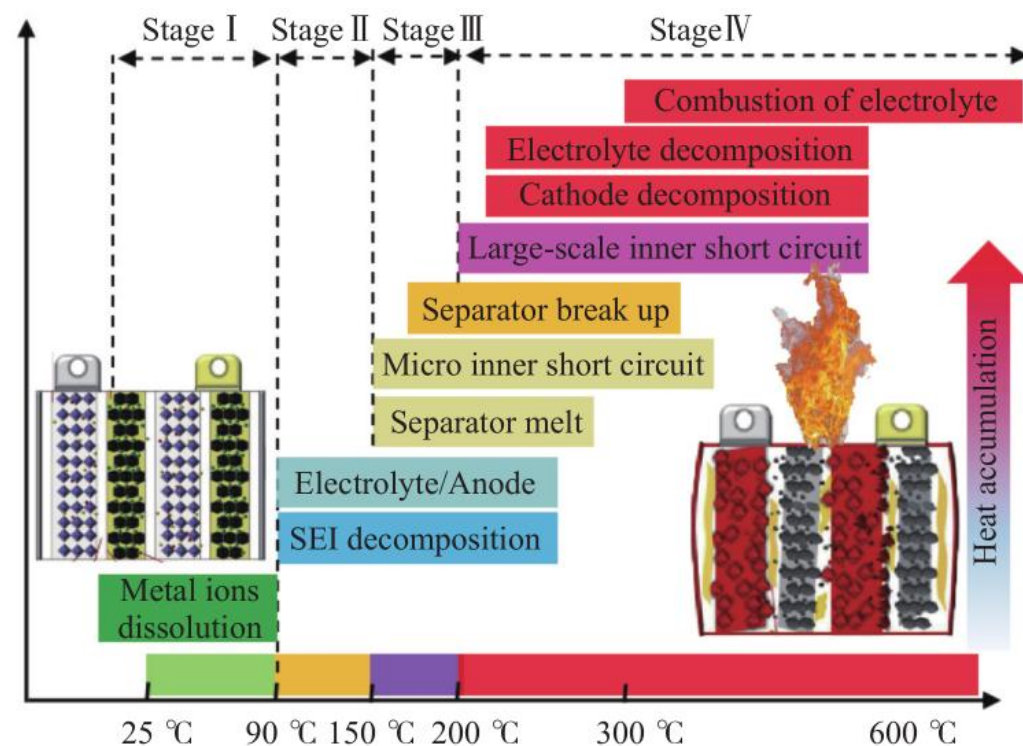
核心要求三：安全性

- eVTOL 电池的安全性遵循航空业“零容错”的铁律，能源系统必须在任何可预见的单一故障甚至多重故障下，都能够避免火灾、爆炸等灾难性事件，以及减少高空坠落、起火等二次灾害。航空法规要求电池系统设计必须证明，在单个电芯发生热失控时，关键功能的灾难性故障概率需低于 10^{-9} 。
- eVTOL 电池需要通过多项严苛的测试，包括加热测试、低温测试、冲击测试、碰撞测试、短路测试、穿透测试、切角测试、不正常的充电和放电测试、极端高电流测试和深度放电测试。

主要安全要求：

- 热失控防扩散：**单个电芯热失控后，不蔓延至相邻电芯，且电池包表面温度不超过 150℃；严禁出现起火、爆炸、有毒气体泄漏。
- 故障容错与冗余：**电池管理系统（BMS）需采用双冗余架构，核心传感器（电压、温度、电流）毫秒级监控、通信链路、控制模块均备份，单一故障时仍能正常监测和控制电池状态；预留 $\geq 20\%$ 的安全冗余电量，确保支撑飞机完成备降。
- 环境适应性：**需通过 $-40^{\circ}\text{C} \sim 85^{\circ}\text{C}$ 宽温域循环测试（覆盖高空低温、地面高温场景）、海拔 5000 米以上低压测试、盐雾腐蚀测试、15 米跌落测试时不起火、不爆炸。

锂电池热失控传导路径



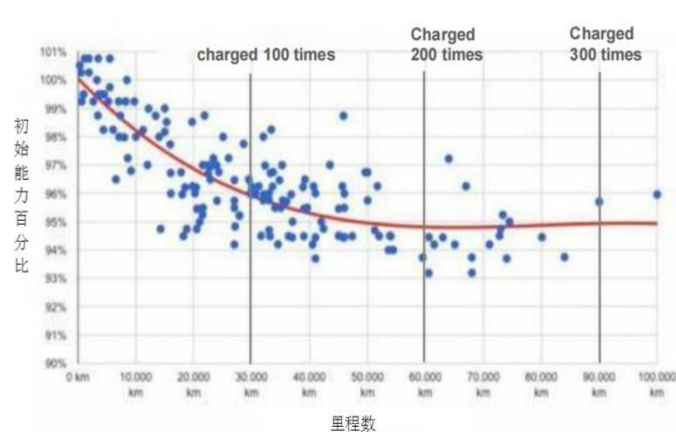
1.4 (4) 核心要求四：循环寿命与快充

核心要求四：循环寿命与快充

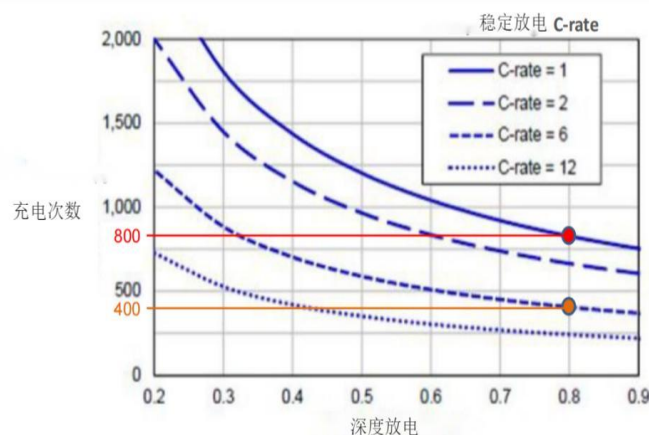
为保障eVTOL商业化运营的经济性，eVTOL充电倍率需要在5C左右（15分钟充至80% SOC），以增加运营时间；同时，希望eVTOL电池的循环寿命在500次以上，最好能够达到1000次，以满足高强度下的运营（如单日运行8次，一年执行1600架次飞行），避免频繁更换电池。然而同时满足电池“长寿命+高倍率+快充+高比能量”具备较大的难度：

- **高充放电率有损循环寿命**：高充放电率会导致极化现象加剧、热量积聚、SEI膜在不断“破裂-再生”过程中化学损耗更多、机械应力与结构损伤等，使得循环寿命缩减，尤其是起降阶段的瞬时12C放电率会对电池使用寿命造成较大折损。
- **高比能量有损循环寿命**：高比能量电池的电解液更不耐氧化、负极体积易膨胀和粉化、离子通道变窄等因素会使循环寿命缩减。

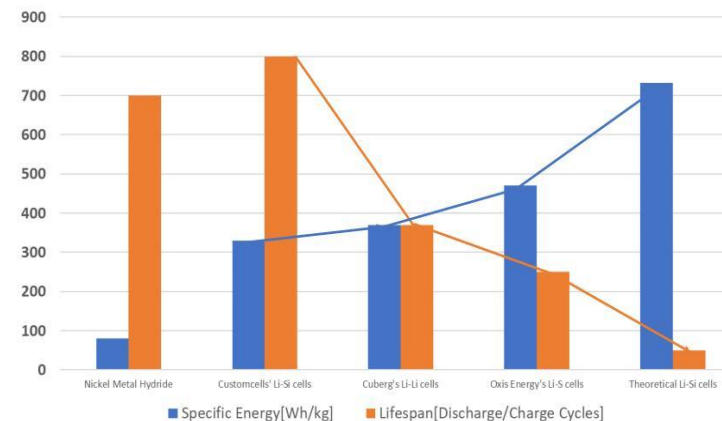
里程数和充电次数增加，电池容量衰减



放电率越大则电池生命周期越短



高比能量电池的生命周期更短



二、固态电池：eVTOL电池的理想解决方案

2.1 传统液态锂电池装配eVTOL存在的问题

目前传统的液态锂电池使用在eVTOL中存在以下问题：

一、能量密度低

液态锂电池的能量密度上限为300Wh/kg（三元锂），现使用的大规模量产电池通常在160-250Wh/kg，难以满足eVTOL 400Wh/kg的要求，使得续航里程大幅受限，主要由于：

- 隔膜和电解液等非活性组件占用了电池重量和空间；
- 电压窗口受限，正负电压差超过4.5V易分解；
- 难以使用能量密度更高的锂金属负极，易形成锂枝晶。

二、安全性差

低空中工作环境更为复杂，且空中灾害造成的危害性更高，液态锂电池主要存在以下安全问题：

- （1）热失控：电池负极容易析出树枝状的锂枝晶，可能刺穿仅有12-25微米厚的隔膜，造成漏液导致内部短路，瞬间释放大量热量，最终发生热失控。
- （2）有毒物质释放：电解液通常为易燃有机溶剂，高温下分解产生可燃气体和氧气，形成燃烧条件，且可能释放氟化氢等有毒物质。

三、循环寿命有限

液态锂电池循环寿命较为有限，容量衰减较快（尤其在快充条件下），主要由于：

- 锂枝晶的形成不仅消耗活性锂，还会增加电池内阻，加速容量衰减；
- 液态电解液干涸、挥发会导致容量衰减；
- 液态电解液与电极材料之间的持续副反应使得容量衰减。

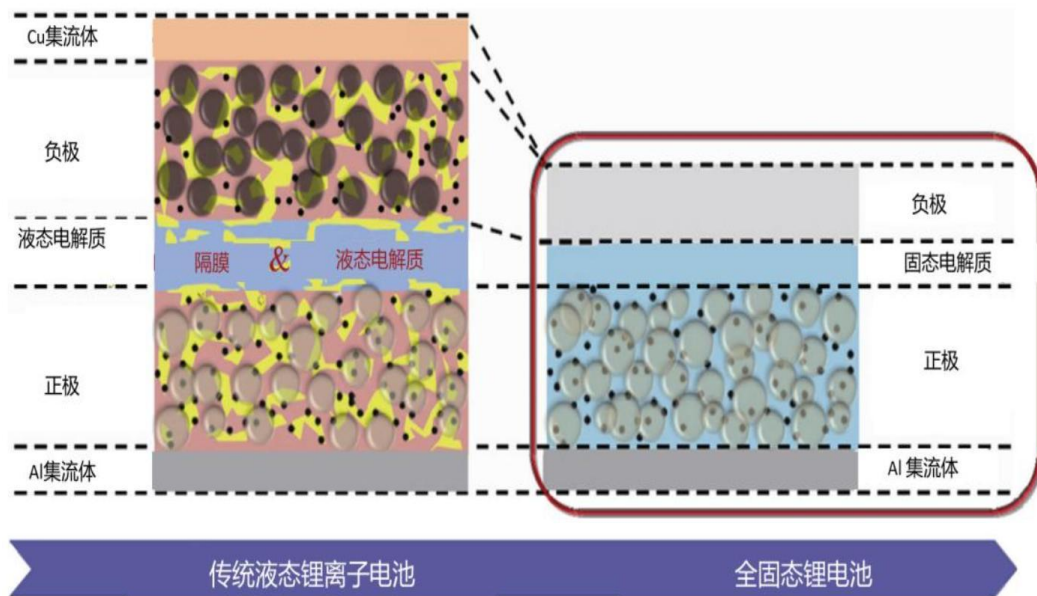
锂电池热失控造成航空器着火发生火灾



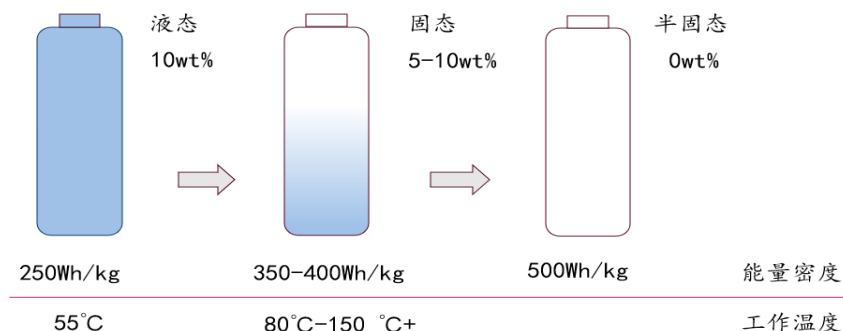
2.2 固态电池更加适配eVTOL电池需求

固态电池作为一种采用固态电解质替代传统液态电解液的新型电池技术，它通过固态材料实现锂离子的传导，从根本上解决了液态锂电池的安全隐患和能量密度瓶颈。相比传统的液态锂电池，固态电池凭借（1）更高的能量密度，（2）更好的安全性和（3）更长的循环寿命；因此能够更好适配eVTOL。

固态电池中电解质取代电解液+隔膜



液态
向全
固态
电池
的转
变



根据电解质中的液体含量，主要分为液态、半固态和固态电池：

- **液态电池（含量>10%）**：以有机溶剂作为电解液并配合使用20微米左右的薄膜，Li⁺在“液态电解液+隔膜”中来回穿梭，技术成熟，已经大规模量产装配于新能源车。
- **半固态电池（含量5%-10%）**：作为液态电池向全固态电池演进的“过渡方案”，在电池结构中部分使用固态电解质材料，同时保留5%-10%的液态电解液，通过固液混合设计，既保留了传统产线 70% 以上的工艺兼容性，又在能量密度、安全性和低温性能上“半步跨越”，实现了性能、成本和量产可行性的平衡，被视为2025 - 2027 年最先可规模化上车的技术路线。
- **全固态电池（含量 0%）**：完全固态形式的电解质，没有电解液和隔膜，安全性、能量密度达到最理想水平，有望在2027年小规模装车，2030年实现商业化。



2.3 固态电池满足eVTOL高能量、高安全、长寿命和快充的核心要求

一、高能量密度：

固态电池可以满足eVTOL 400Wh/kg的能量密度要求，打破续航里程的限制，主要原因在于：

- **锂金属负极得以应用：**锂金属负极的理论比容量高达3860mAh/g，是传统石墨负极（372mAh/g）的10倍以上，固态电解质具有高机械强度，能够有效抑制锂枝晶生长，使得锂金属负极的应用成为可能。
- **更宽的电化学窗口：**传统液态电解液在电压超过4.5V时就会分解，而固态电解质可以承受5V以上的工作电压。这意味着可以选用高电压正极材料，通过提升工作电压直接增加能量密度。
- **结构优化：**固态电池将电解液和隔膜合二为一，取消了隔膜层，大幅缩小了正负极间距。这不仅降低了电池厚度，还减少了非活性材料的体积占比。同时，固态电池可以实现电芯内部的串联堆叠，避免过度封装，进一步提升体积能量密度。

二、高安全性：

固态电池可满足eVTOL航空级的高安全要求，在极端环境和工况下表现更优，减少灾害发生的可能性，并将灾害损失降低，主要原因在于：

- **热失控阈值更高：**固态电池采用不可燃的固态电解质，从根本上解决了液态电解液易燃易爆的安全隐患。固态电解质的热分解温度可高达500°C，远高于液态电解液的200°C，热失控风险降低90%以上。
- **更高的稳定性：**针刺测试显示，固态电池在极端条件下仅出现微小电压波动，不会发生冒烟、起火现象。
- **更宽的工作温度带：**得益于低温下仍能保持稳定的离子传导性能，固态电池在-30°C环境下容量保持率可达80%以上，解决了在低温地区的电池“趴窝”问题。



2.3 固态电池满足eVTOL高能量、高安全、长寿命和快充的核心要求

三、长循环寿命与快充：

固态电池可以满足eVTOL高强度运营下对于长循环寿命以及快充的要求，解决液态锂电池“循环寿命-快充”难以兼得的问题，更有利于eVTOL投入商业化运营：

- **电解质稳定性：**固态电解质不易挥发、不泄漏、化学性质稳定，从根本上解决了液态电解液干涸、挥发导致的容量衰减问题。固态电解质在充放电过程中体积变化较小，减少了材料结构破坏；
- **抑制锂枝晶：**固态电解质具有更高的机械强度，可有效抑制锂枝晶的生长，避免枝晶刺穿隔膜导致的内短路，显著延长电池寿命。
- **副反应较少：**固态电解质对电极材料的腐蚀性较低，避免了液态电解液与电极材料之间的持续副反应，维持了更好的电池性能；
- **高离子电导和高电压窗口：**固态电解质（硫化物）具备高离子电导率；同时可安全使用5V级等高电压材料，而传统液态锂电池受限于电解液电位窗口，电压限制在4V级左右，可设置的电压越高，恒流充电区域越长，充电速度越快；
- **接触界面优化：**通过“界面涂层”等技术降低界面阻抗，打通高倍率下离子传输的瓶颈。

固态电池与液态锂电池的各项对比

对比维度	固态电池	液态锂电池
能量密度	300-500Wh/kg（实验室达600Wh/kg）	160-300Wh/kg
安全性	较高（不可燃、不挥发，热失控温度>300℃）	一般（易燃易爆，热失控温度<200℃）
循环寿命	4000次以上（理论>10000次）	500-1500次
快充性能	15分钟充电至80%（理论支持10分钟）	20-30分钟充电至80%
低温性能	-30℃容量保持率80%以上	-20℃容量保持率<50%
工作温度	-40℃ - 150℃	-10℃ - 60℃
电化学窗口	>5V（可适配高电压正极）	<4.3V
成本	1.5-2.5元/Wh（当前）	0.4-0.8元/Wh
技术成熟度	半固态已量产，全固态2027年小批量装车	成熟，大规模量产，广泛应用
核心优势	高能量密度、高安全性、长寿命	成本低、产业链成熟

2.4 固态电池主要技术路线对比

根据电解质的不同，固态电池主要分为硫化物、氧化物和聚合物三大技术路线：**硫化物路线**以高离子电导率（ 10^{-3} – 10^{-2} S/cm）和良好的界面兼容性见长，但化学稳定性差且成本高昂；**氧化物路线**具有优异的热稳定性和成本优势，但室温电导率偏低（ 10^{-6} – 10^{-3} S/cm）且界面接触困难；**聚合物路线**加工性能好且与现有产线兼容，但室温电导率低（ 10^{-7} – 10^{-6} S/cm）且需要加热工作。

三大技术路线的多维度特性对比

维度	硫化物	氧化物	聚合物
离子电导率	约 10^{-3} ~ 10^{-2} S/cm，已接近液态电解质水平	约 10^{-6} 至 10^{-3} S/cm，通过掺杂优化，最佳样品可达 10^{-3} S/cm	在60-80度高温下可达 10^{-4} S/cm，但室温下较低，仅 10^{-7} ~ 10^{-6} S/cm
目标能量密度	高（400 - 600Wh/kg）	较高（300 - 400Wh/kg）	较低（< 300Wh/kg）
安全性	化学稳定性差，遇水产生H ₂ S剧毒气体	化学稳定性好，热稳定性高达1000℃，适合工业化环境	化学稳定性较差，在高温下可能会起火
电化学窗口	较宽（0-5V）	较宽（0-5V）	较窄（0-4V）
界面接触	界面接触良好	界面接触较差、易产生空隙、界面阻抗高	柔性好，界面相容性最佳
工艺难度	难度最高，对水/氧极其敏感，在干燥室内加工或需惰性气体	难度较高，需要高温烧结或掺杂解决界面与加工问题	工艺难度较低，与现有电解液兼容，易加工，可沿用液系产线
成本	最高，关键原料硫化锂（Li ₂ S）价格可高达 200-300万元/吨	中等，涉及La ₂ O ₃ 、ZrO ₂ 等稀土和稀有金属的氧化物	较高，为提升电导率和机械强度，需加入单价较高的锂盐（LiTFSI、LiFSI 等）和无机填料（LLZO、LAGP等）
商业化进展	预计2027 - 2030进入小规模量产	2024 - 2025年已开始装车（如蔚来等）	已实现量产（消费电子领域）



2.4 固态电池主要技术路线对比

固态电池在理想状态下，需同时具备高离子电导率、锂枝晶产生抑制能力、良好的化学稳定性、较低的制造成本和原材料成本等特点，但目前三个技术路线各有优缺点，难以同时满足以上要求。硫化物路线凭借高电导率、机械性能好等优势，在单一电解质中最具潜力，逐渐成为整车企业和动力电池企业的主流选择；氧化物路线则通常在过渡阶段的半固态电池生产制造中受到青睐；聚合物由于离子电导率上限较低，且需要升温工作，较少应用在新能源交通工具的场景下。

三大技术路线的优势与挑战

维度	硫化物	氧化物	聚合物
典型材料	• LPS 系：LiGPS • LPG 系：LiSnPS/LiSiPS	• 晶态：NASICON/LLZO/LLTO • 非晶态：LiPON	• 聚环氧乙烷 PEO、聚丙烯腈 PAN、聚苯乙烯 PS、聚甲基丙烯酸甲酯 PMMA、聚偏氟乙烯 PVDF 等聚合物加其他电解质材料
核心优势	• 高离子导率（多数$>10^{-3}\text{S/cm}$，部分达$\sim 10^{-2}\text{S/cm}$），接近液态电解质 • 机械性能好，界面接触与电极（锂金属）相对容易	• 化学与电化学稳定性极好，尤其是石榴石氧化物（LLZO）对锂金属与高电压正极的稳定性 • 机械模量高，有利于抑制锂枝晶萌生（理想界面和应力条件下）	• 工艺简单、成本低、与现有锂电生产强兼容（可直接涂布在电极上） • 柔性好、界面接触优秀，易与电极颗粒和隔膜形成连续离子通路
主要挑战	• 对空气湿度敏感，制备与封装要求高，需要严格干燥条件 • 界面稳定性差，与正极（尤其氧化物正极）或锂金属负极易产生界面阻抗反应 • 可扩展制造 / 成本 / 安全（如 H_2S 释放）制约商业化	• 高温烧结、工艺复杂且与现有 LIB 产线不兼容 • 对锂润湿性差，界面电阻高，枝晶沿孔隙 / 裂纹传播风险大 • 离子导率低于硫化物，能量密度提升有限	• 室温离子导率偏低，需升温或引入大量可塑化成分 • 机械模量有限，对锂枝晶抑制效果不如无机电解质 • 与高电压正极 / 锂金属的长期稳定性仍需通过配方和保护层优化



2.5（1）多项支持政策推动固态电池发展

2020年10月国务院发布《新能源车产业发展规划（2021-2030）》，明确提出加快固态动力电池技术研发及产业化，首次将固态电池研发提至国家层面规划；随后多项支持政策发布，提出建设固态电池技术标准体系，肯定固态电池作为锂电池高能量化的主要技术路线选择，对固态电池产业发展起到积极推动作用。

固态电池支持政策梳理

政策	时间	相关政策内容
《新能源汽车产业发展规划（2021—2035年）》	2020年10月	实施电池技术突破行动。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。
国家重点研发计划“新能源汽车”重点专项公示	2021年3月	科技部国家科技管理平台上，“十四五”‘新能源汽车’重点专项2021年度拟立项项目公示，其中已经包含多项“高比能全固态金属锂电池关键技术研究”等项目，项目周期 48 - 60 个月（4 - 5 年），由清华、北大、上交大等牵头。
《“十四五”新型储能发展实施方案》	2022年3月	将“固态锂离子电池/新型电池储能技术”列为“多元化关键储能技术路线”之一，为政策连贯性提供支持。
《锂电池行业规范条件（2024年本）》	2024年2月	功率型单体电池功率密度 $\geq 500\text{W/kg}$ ， 电池组功率密度 $\geq 350\text{W/kg}$ 。
《国家锂电池产业标准体系建设指南（2024版）》	2024年7月	到 2026 年要新制定100项以上国家和行业标准、推动 1000 家以上企业开展标准宣贯与实施、参与制定 10 项以上国际标准，构建覆盖基础通用、材料与部件、生产与检测、安全与性能、回收利用、绿色低碳六大板块的标准体系，为锂电池尤其是高能量密度下一代电池的安全可控和绿色发展提供了制度基础。
《新型储能制造业高质量发展行动方案（2025 - 2027）》	2025年2月	明确支持锂电池固态化、储能用固态电池研发及工程化应用。政策通过技术攻关、试点示范、绿色金融、保险与地方专项支持等综合措施，推动固态电池在多场景落地，同时强化标准体系、安全体系与产业链协同，提升我国新型储能制造业竞争力。
《2025 年工业和信息化标准化工作要点》及《2025年汽车标准化工作要点》	2025年4月	明确将全固态电池技术标准体系建设列为年度重点任务，推动下一代电池的基础标准、测试标准和安全标准加速制定，形成从材料到系统层面的完整标准体系，为未来固态电池产业化应用提供监管与统一技术底座。



2.5（2） 地方政策因地制宜发展固态电池

据中国日报报道，工信部2024年启动60亿元固态电池重大研发专项，行业迎来里程碑事件。各地结合区域产业特点推出补贴、产业集群打造等针对性举措，珠海率先发布《珠海市推动固态电池产业发展行动方案（2025-2030年）》，提出在2027年形成固态电池产业集群的目标，并在2030年实现批量交付；其他地方（如北上广天津）主要在储能产业政策中提及对固态电池技术突破、示范化和规模化的支持。

政策	时间	相关政策内容
《珠海市推动固态电池产业发展行动方案（2025-2030年）》	2025年9月	到2027年形成固态电池产业集群，到2030年实现批量交付和产业初步规模。重点发展半固态电池量产和全固态电池研发，设立5家工程研究中心、重点实验室等科技创新平台
《上海市新型储能示范引领创新发展工作方案（2025 - 2030年）》	2025年1月	明确提出要“重点突破高安全、高能量密度全固态电池”关键技术，并构建“先进锂电池-固态电池”上下游材料和装备产业链。项目补贴部分：独立储能可享受充放电价格机制、容量补贴、度电奖励等，先进技术项目可纳入示范补贴目录，按放电量给予奖励。
《北京市新型储能产业发展实施方案（2024—2027年）》	2024年12月	将半固态/全固态电池列为重点示范路线，鼓励在部分区域开展安全性储能示范项目和产业化应用；将半固态/全固态电池等高安全新型电化学储能技术列入重点发展方向；将开发高电导率、高稳定性固态电解质，突破固态电池低成本规模化生产关键工艺作为核心任务之一
《广东省促进新型储能电站发展若干措施》	2023年6月	将固态锂离子电池等新型储能技术纳入省级储能发展战略，以制度性支持、政策倾斜、市场/电力机制优化、示范与创新平台建设为主要抓手，推动储能电站建设、产业化与规模化应用。提供政策性支持：包括土地用地优先、配套用地/接网工程、简化审批流程、绿色通道审批、金融支持 / 绿色金融、财政扶持以及对先进优质储能产品和制造企业的质量监管与推广引导。
《天津市推动制造业高质量发展若干政策措施实施细则》	2025年1月	2025 年修订版将‘先进新型电池（含固态锂电池）及储能系统’纳入重点支持范围。对符合条件的企业/项目，将通过综合评价给予一次性奖励，或按项目/装备给予补贴扶持。



三、曙光在即，固态电池面临的挑战与机遇



3.1 (1) 固态电池核心挑战1：关键技术瓶颈

纵然固态电池相较液态锂电池具备诸多优势，但当下距离大规模的商业运用还需解决技术瓶颈、工艺适配、材料成本和规模化生产四大核心挑战：

一、关键技术瓶颈

1. 固-固界面接触难题

- 机械失效性：**在充放电过程中，正负极材料（特别是硅基负极）会发生体积膨胀和收缩，而固态电解质（如氧化物、硫化物）通常脆性高、弹性模量低，无法同步形变，导致界面分离、接触失效，大幅缩短循环寿命。
- 接触机制改变：**固态电池中电极与电解质之间由液态的“面接触”转变为固态的“点接触”，导致有效接触面积小，界面阻抗显著增加，达到 $500\text{--}1000\ \Omega \cdot \text{cm}^2$ ，严重影响锂离子的传输效率。

2. 离子电导率不足

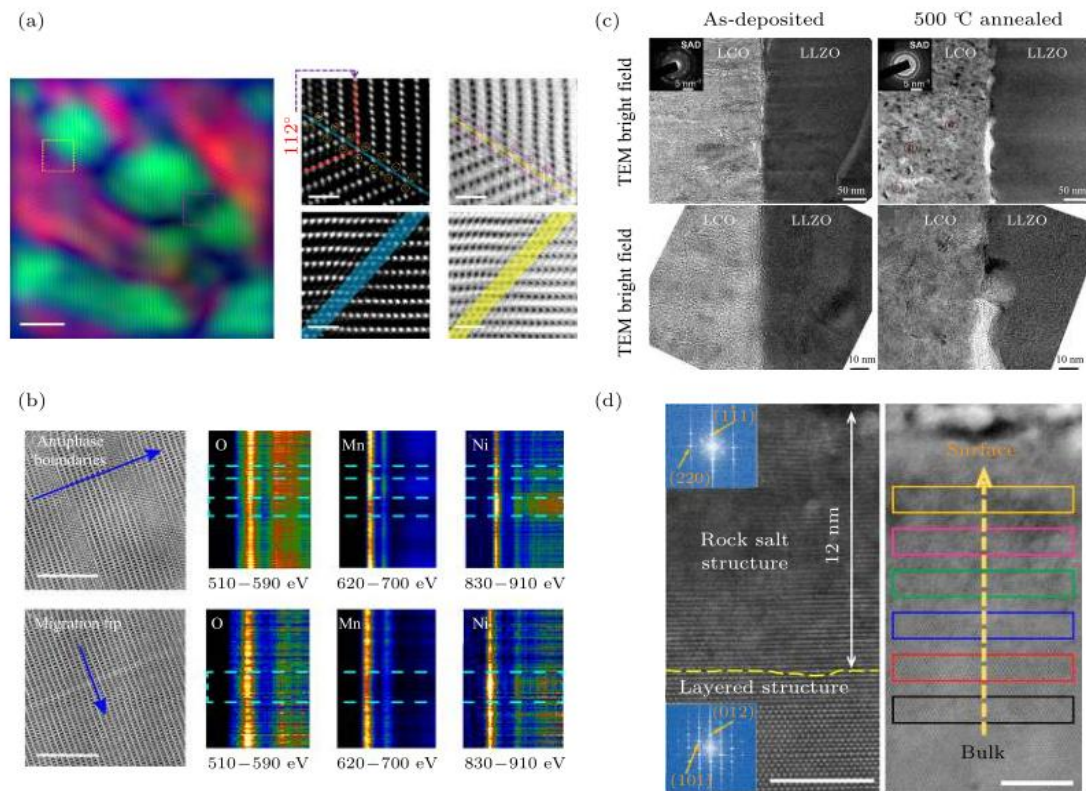
离子电导率反映电解质材料传导离子的能力，电导率越高离子传输越顺畅，高电导率能减少极化反应，实现快充快放。固态电池的理想电导率需接近 $10^{-3}\ \text{S/cm}$ （液态电池水平），目前主流电解质的室温离子电导率普遍偏低：

聚合物： $10^{-7}\sim 10^{-6}\ \text{S/cm}$ ，高温下接近 $10^{-4}\ \text{S/cm}$ ；

氧化物： $10^{-6}\sim 10^{-3}\ \text{S/cm}$ ；

硫化物： $10^{-3}\sim 10^{-2}\ \text{S/cm}$ ，但易水解产生有毒气体（如 H_2S ）。

由于固-固界面点接触造成的正极侧结构的巨大改变



www.jyzq.cn



全国统一客服电话：95372

此文件版权归金元证券股份有限公司所有，未经许可任何单位或个人不得复制、翻印。



金元证券股份有限公司
GOLDSTATE SECURITIES CO., LTD.

资料来源：《固态电池产业链研究报告》，《全固态电池中界面的结构演化和物质输运》，金元证券研究所整理

3.1（2）固态电池核心挑战2：工艺适配与设备依赖

二、工艺适配挑战

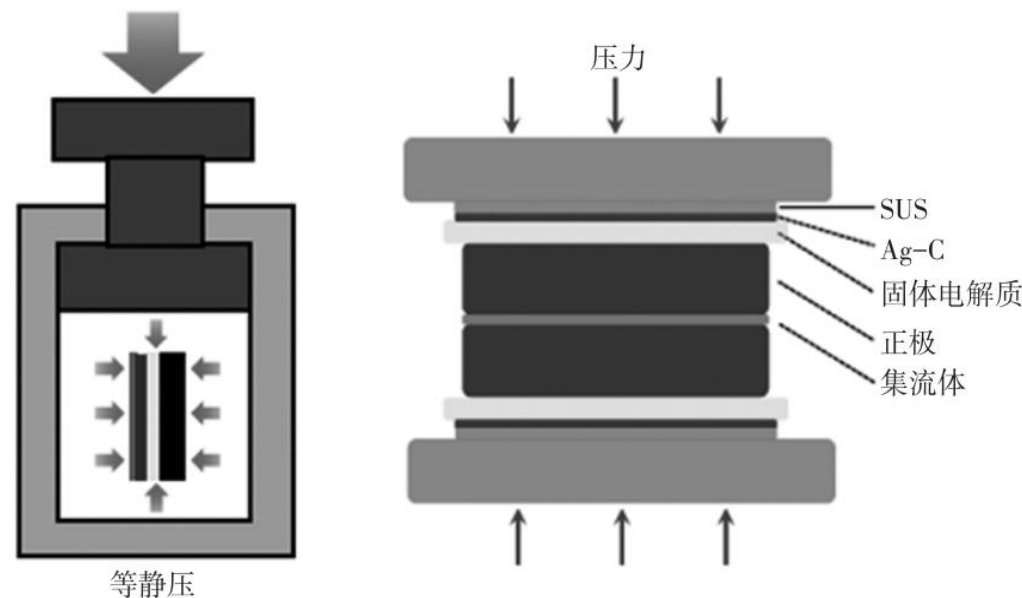
1. 干法工艺成熟度低

- **成膜难度大：**干法工艺是全固态电池大规模量产的必经之路，但目前正极干法成膜在粘接剂选择、纤维化程度控制上仍有难度。现有设备生产的极片厚度（40-50微米）与目标（100-150微米）存在差距，且生产速度（3-5米/分钟）远低于液态电池（60-80米/分钟），严重影响效率。
- **混合均匀性：**干法混料过程中，由于无溶剂体系下粉末流动性差，活性材料、导电剂与电解质粉末难以均匀分散，易出现团聚或板结，影响电池性能。
- **膜层与电解质的界面融合：**固-固界面接触的天然难题使得电极膜表面粗糙度需控制在纳米级，否则与电解质膜接触时产生缝隙。

2. 关键设备依赖与精度要求

- **高压致密化需求：**由于材料的均匀性成为较难实现的目标，因此对辊压的精度、均匀度以及压实密度要求更高，需要新增高压致密设备，等静压设备需满足 600MPa 高压 + 150℃温控，批量生产效率低；
- **环境控制严苛：**硫化物电解质对极性有机溶剂极为敏感，传统湿法工艺无法适用，生产需全封闭干燥室 + 惰性气体氛围，环境管控成本高。

全固态电池等静压示意图



3.1 (3) 固态电池核心挑战3：材料成本高企

三、材料成本高企

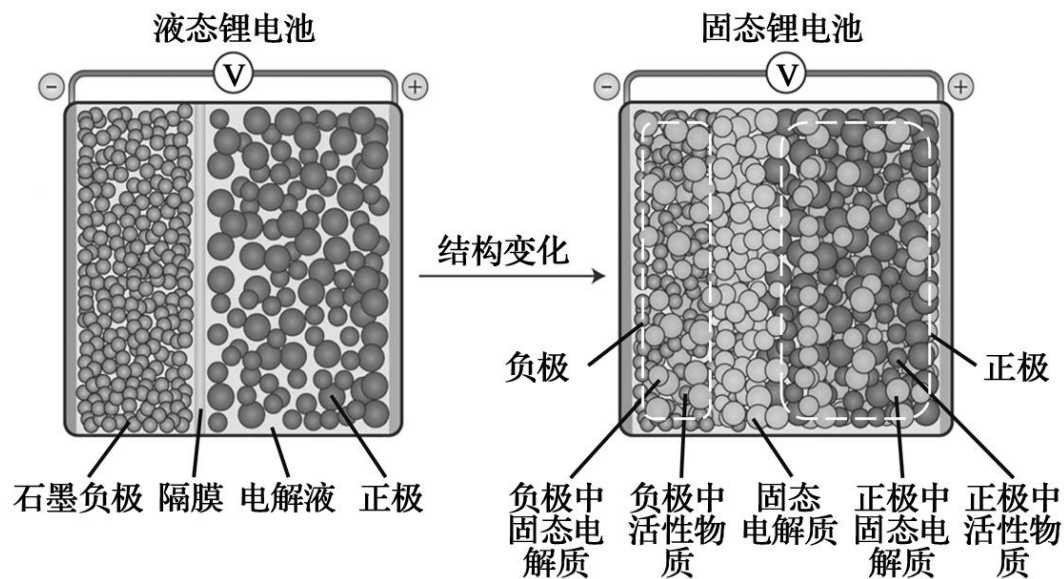
1. 核心材料成本悬殊

硫化物电解质材料200-250万元/吨，其中关键材料硫化锂单价超 300 万元/吨；
氧化物电解质材料30-40万元/吨，关键原材料包括氧化锆、氧化铜等；
聚合物电解质材料50-60万元/吨，关键原材料包括PEO、LiTFSI 锂盐；
相比之下，液态电解液成本仅为1.7-3 万元 / 吨，远低于固态电解质材料成本；
另外，硅基负极加工成本是石墨负极的 5-8 倍，锂金属纯化能耗大、成本也高。

2. 规模效应缺失

2024 年全球固态电池产能不足 20GWh，仅为锂电池总产能的 0.5% ，小批量采购导致原材料议价能力弱，设备折旧、环境管控成本分摊压力大。

固态电池中固态电解质替代电解液+隔膜



3.1 (4) 固态电池核心挑战4：大规模量产困难

四、大规模量产困难

1. 产线兼容性差

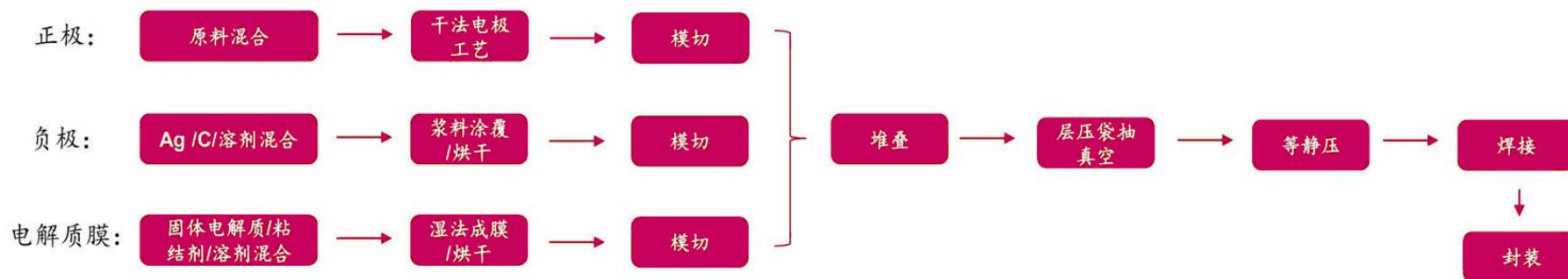
全固态电池需全新干法 / 真空镀膜 / UV 固化产线，较现有液态电池产线新增大量设备，且原先辊压、叠片等设备也需要升级；单 GWh 产线投资可达 4-5 亿元，是液态电池产线的 2-3 倍。

2. 良率与标准问题

行业领先企业良率仅 50%-80%，界面缺陷、材料一致性差导致报废率高；技术路线分散（硫化物 / 氧化物 / 聚合物），行业标准未统一，供应链配套不成熟。

3. 供应链协同不足

固态电解质、硅碳负极等关键材料产能有限，规模化供应能力不足；设备端（干法混料、等静压）国产化率低，依赖进口设备导致扩产周期长。



全固态电池生产工艺（三星）：较传统液态锂电池工艺新增大量产线设备



www.jyzq.cn



全国统一客服电话：95372

此文件版权归金元证券股份有限公司所有，未经许可任何单位或个人不得复制、翻印。

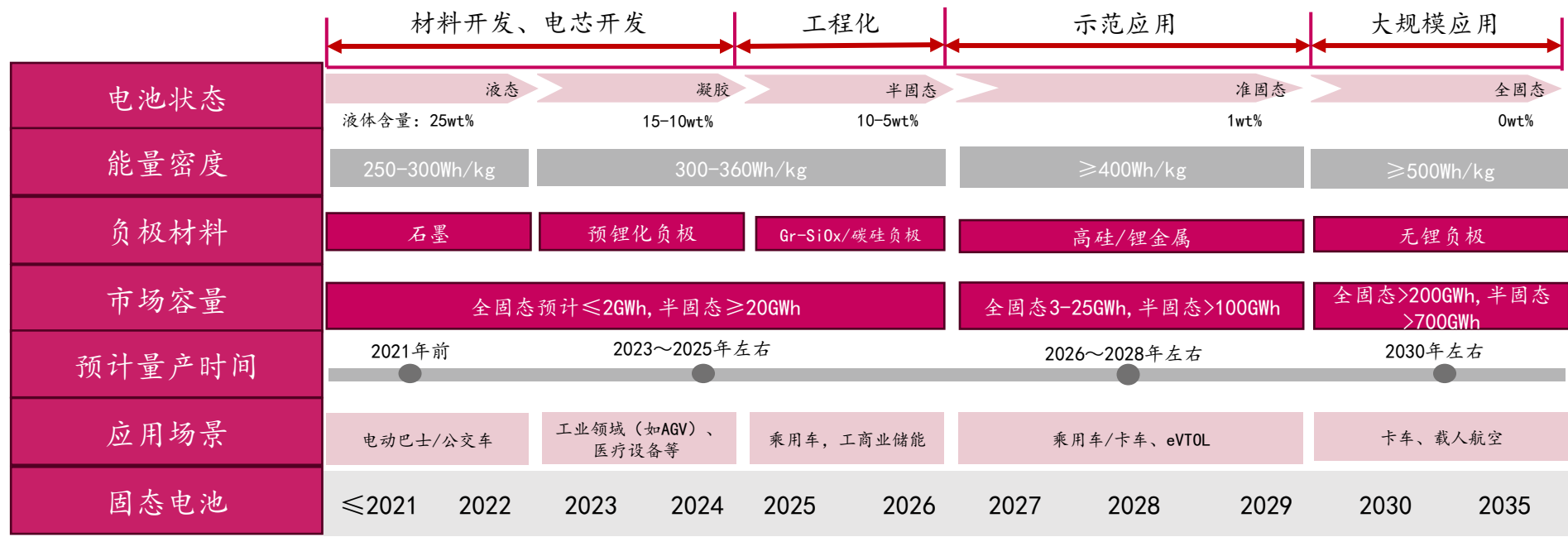


金元证券股份有限公司
GOLDSTATE SECURITIES CO., LTD.

资料来源：《固态电池行业分析报告》，金元证券研究所整理

3.2 固态电池迎来技术突破与产业进展

固态电池正面临产业化的重要节点，一是支持政策持续加码，二是技术突破和创新方案不断涌现，三是产业端从电池厂商到车企纷纷加快、加大投入。2025年，固态电池技术路线收敛，以硫化物电解质主攻全固态、氧化物过渡半固态的趋势逐渐清晰；工信部年底“固态电池专项中期审查”为行业后续发展带来期待。2026-2027年将有望看到全固态（或准固态）电池小规模产线建成，产能突破2GWh，并尝试小批量生产装车，能量密度突破400Wh/kg；半固态电池持续扩产，产能到2030年前突破100GWh，开启大规模装车测试。除新能源车以外，eVTOL也是固态电池非常重要的下游应用场景，有望为固态电池产业带来新增需求市场。



3.3 技术突破和创新方案频出，近期硕果累累

近期，学术界对于固态电池提出多项技术突破和创新方案，主要围绕固-固接触难题，开发新型固态电解质和工艺与创新方向，若多项科研成果在实际生产制造中应用顺利，将有望解决固态电池核心问题，加速固态电池大规模商业化应用。

突破方向	突破技术	研究团队	研究内容	成果意义
固-固接触难题	引入碘离子保证良好界面接触	中科院物理所黄学杰团队	引入碘离子，解决全固态电池通常需要巨大外部压力 (>10 MPa甚至50 MPa) 来维持固-固接触的工程难题，提出了一种阴离子调控策略。他们在硫化物电解质中引入碘离子，在电池工作时，碘离子会移动到电极界面形成一层“富碘界面”。	这层界面能像“自我修复”一样自动填充孔隙，使得全固态电池不再依赖笨重的外部加压设备即可保持良好的界面接触。制备的软包电池在常压下循环性能优异。
	塑性富无机SEI界面设计, 构建柔性接触	清华大学康飞宇、贺艳兵团队	创新性地提出了“塑性富无机SEI”的设计理念	为锂金属负极表面构建了“外柔内刚”的梯度结构界面层。该技术通过将脆性Li ₂ S/LiF组分转化为塑性Ag ₂ S/AgF组分，解决了传统SEI界面在循环过程中容易发生脆性断裂的问题，使固态电池在-30℃低温环境下仍能稳定循环7000小时以上
	喷雾重结晶提升均匀性	LG化学与汉阳大学合作	利用“喷雾重结晶”技术，制备出粒径高度均匀的电解质材料	这种均匀性显著优化了电极内部的离子传输路径，使电池容量和高倍率充放电能力提升了约15%，攻克了硫化物电解质颗粒尺寸不均的难题
开发新型固态电解质	氟化保护壳耐受高电压	清华大学张强教授团队	新型氟聚醚基聚合物电解质，借助氟元素强大的耐高压能力，能在电极表面形成“氟化物保护壳”，避免高电压击穿电解质	基于该电解质的锂金属电池能量密度达 604Wh/kg，且通过了针刺测试和 120℃高温测试，安全性大幅提升。实现了聚合物电解质电压窗口 >4.8V，室温离子电导率达到10 ⁻⁴ S/cm，组装的软包电池能量密度超过580 Wh/kg。
	新型电解质材料重新平衡性能与成本	中国科学技术大学马骋教授团队	开发了一种新型硫化物固态电解质—LiPOS。该材料不再使用昂贵的硫化锂，而是采用极其廉价的水合氢氧化锂和硫化磷作为原材料合成。	原材料成本仅为 14.42美元/公斤，不到传统硫化物电解质原材料成本的 8%，远低于商业化门槛（50美元/公斤）。同时保持了低密度（1.7 g/cm ³ ）和优异的负极兼容性（与锂金属稳定循环超4200小
工艺与设计创新	干法电极工艺：功能化粘结剂，解决溶剂腐蚀与制造效率	德克萨斯大学奥斯汀分校 Manthiram团队	硫化物电解质遇溶剂易变性，因此“干法电极”是必经之路，但传统PTFE粘结剂绝缘且影响离子传输。德克萨斯大学奥斯汀分校（Manthiram团队）开发了一种功能化干法电极（FDE），通过在PTFE中渗透溶剂化离子液体，解决了PTFE绝缘的问题。	实现了高面容量（10 mAh/cm ² ）下的稳定循环，证明了干法工艺制造高性能全固态电池的可行性
	锂枝晶抑制：新型中间层设计	马里兰大学王春生团队	设计了一种新型电池“中间层”，通过设计Mg/Bi等特殊中间层，诱导锂均匀沉积，有效阻断了锂枝晶刺穿固态电解质的路径。	该技术通过重新设计中间层结构，显著提升了固态电池在高能量密度下的安全性。



3.4 产业端动作频频

一、工信部审查开启

2025年9月工信部启动固态电池专项中期审查，对2024年立项的60亿元重大研发项目进行“期中考核”，以决定后续拨款节奏和产业化提速与否，审查重点集中在电芯核心性能、工艺与量产能力、安全合规性等关键维度，或于12月公布审查结果。头部厂商预计顺利通过审查，若审查结果超出预期则有望加大补贴力度、加速项目进度，加快推动产业发展。

二、技术路线收敛

2025年成为技术收敛的关节年份。尽管大部分电池厂商会选择两个或以上的技术路线以避免单独押注带来的风险，然而硫化物已基本成为全球头部电池厂商必不可少的布局路线，包括宁德时代、比亚迪、国轩高科等国内头部企业以及丰田、三星SDI、LG新能源等国际巨头，都将硫化物路线作为全固态电池的核心攻关方向。氧化物则通常作为半固态电池的过渡阶段的技术路线。技术路线收敛使得行业技术攻关、资源投入都能够更加集中，促进产业发展。

三、招标计划提前，产业推进按下加速键

原本普遍预期头部电池厂商的固态新产线招标会在工信部固态电池专项中期审查结束后才启动，但2025年11月已有头部企业率先开启GWh级别产线招标，为产业化进程加速。目前，国内多家企业已建成百MWh的固态电池中试生产线，已经有半固态产品完成装车，预计2026年将实现GWh级产线投产，2027将成为小批量投产的关键节点。另外，部分头部厂商已经和eVTOL企业达成合作，将在其eVTOL主力机型供货半固态/固态电池。

厂商	电解质技术路线	产业化进展
宁德时代*	硫化物/卤化物	2023年4月发布凝聚态半固态电池，单体能量密度达500 Wh/kg； 2024年11月进入20Ah全固态样品试制，2025Q3推进更大容量全固态电池样品中试，目标计划2026年实现GWh级试产，2027年小批量生产。 - 宁德时代独家投资数亿美元，成为峰飞航空的战略投资者，后续或有电池方面合作
中创新航*	复合电解质（硫化物+氧化物/聚合物）	2024年8月推出“无界”的全固态电池，电池容量50Ah，能量密度430Wh/kg，计划2027年小批量装车，2028年量产。 - 中创新航顶流高能飞行电池兼具高能量密度和高安全的特性，满足航空级安全标准。电芯能量密度360Wh/kg+，系统能量密度达270Wh/kg+，支持1500kW+的瞬时超高功率放电，已独供小鹏汇天X3，配套广汽高域飞行汽车GOVY、沃兰特航空VE25-100、易飞智造EF7等先进垂直起降飞行器。
孚能科技*	半固态-氧化物+聚合物； 全固态-硫化物	0.2GWh中试线建设，60Ah硫化物全固态电池小批量交付； - 第二代半固态电池能量密度达330Wh/kg并推进车规级认证，循环寿命超过4000圈，预计2025年量产； - 目前其第一代eVTOL半固态电芯已实现商业化交付，第二代eVTOL半固态电芯即将进入量产阶段。 向时的科技E20机型独家供应第二代半固态eVTOL电池



3.4 产业端动作频频

厂商	电解质技术路线	产业化进展
欣旺达*	聚合物 全固态：硫化物	2024年8月宣布第一代半固态电池完成开发； - 第二代全固态实验室原型样品能量密度达到500Wh/kg，预计2027年完成能量密度大于700Wh/kg的全固态电池实验室制作。计划2026年全固态电池产能达到1GWh，电芯容量提升至60Ah，成本控制在2元/Wh以下； - 已量产eVTOL专用电池“欣·云霄1.0”，能量密度320Wh/kg，室温下持续功率密度3300W/kg，支持-30℃到60℃宽温域飞行及2000次循环，并通过极限环境适航测试。
卫蓝新能源	半固态-氧化物+聚合物； 全固态-硫化物	- 已量产360Wh/kg半固态电池，布局新能源汽车、无人机及储能三大场景，2023年6月150kWh半固态电池包交付蔚来ET7，实测1044公里；2023年10月与三峡共同研制的固态电池储能系统实现示范用。 2025年3月珠海基地两条自动化产线投产，总规划年产能6GWh，量产314Ah半固态储能电池。规划2027年产能2GWh全固态电池量产并装车。
比亚迪	全固态：硫化物	2024年完成60Ah全固态电池中试，2025年推进海豹EV的固态电池路试； - 实验室电芯能量密度达450Wh/kg，计划2027年启动全固态电池批量示范装车，2030年后大规模上车。
国轩高科	氧化物+聚合物； 硫化物	2025年5月首条“金石”全固态电池实验线正式贯通，核心设备100%国产化，设计产能0.2GWh，电池中试样品电芯能量密度350Wh/kg，已启动装车路测。 - 规划建立12GWh准固态电池产线。
亿纬锂能	半固态-氧化物、氧化物； 全固态-硫化物	2026年将建成全固态电池中试线；计划2026年推出能量密度达到350Wh/kg和800Wh/L的全固态电池，适配人形机器人及低空飞行器，2028年推出400Wh/kg的高比能全固态电池。
清陶能源	氧化物+聚合物	- 半固态电池已搭载于上汽智己、上汽MG4、北汽福田商用车；半固态电池产能已建成12GWh/年； - 首条全固态电池生产线一期0.5GWh预计在2025年底完工，第三代全固态电池有望在2027年装车。
三星SDI	硫化物	2023年全固态电池试验生产线建设完成；计划2027年量产，目标能量密度达到900Wh/kg
LG新能源	半固态-聚合物； 全固态-硫化物	计划2026年前实现聚合物半固态电池产业化，2028年量产聚合物全固态电池，2030年量产硫化物全固态电池
QuantumScape	氧化物、硫化物	2024年10月开始小批量生产首批原型B样品固态电池，并向汽车客户送样测试。
Solid Power	硫化物	2023年向宝马交付A1样品，投产30吨电解质，并向潜在电池厂客户提供电解质样品进行测试验证；计划2026年开始系列生产，2030年之前实现全固态电池量产。
丰田-松下	硫化物	2019年松下与丰田合资成立公司开发固态电池 2026年小批量生产，目标2027-2028年全固态电池上车。

*为目前与eVTOL有合作的电池厂商



3.4 产业端动作频频

四、车企布局，形成产业上下游协同

国内首条大容量全固态电池产线建成：广汽集团董事长冯兴亚正式官宣，集团在广州番禺建设的全固态电池中试产线已顺利建成并投产，该产线成功打通全固态电池制造全流程，率先具备60Ah以上车规级全固态电池规模量产条件，标志着我国全固态电池技术从实验室研发向工程化落地实现关键跨越，有望彻底解决新能源汽车在续航与安全方面的核心痛点。其他主流车企也纷纷作出规划，计划在2026-2027年实现装车，打通固态电池下游应用场景。

企业	规划目标
广汽集团	已建成国内首条最大容量的全固态电池中试产线，预计2026年在昊铂车型上搭载应用，能量密度超400Wh/kg，续航超1000公里
上汽集团	与清陶能源深度合作，实现了全固态电池产线贯通，计划2027年量产交付。上汽清陶的半固态电芯已于2025年8月搭载在全新MG4上，该车型定价9.98万元，将于2025年12月正式交付
比亚迪	全面系统布局，采用硫化物复合电解质+高镍三元正极+硅基负极的技术路线。公司已完成60Ah全固态电池中试下线，能量密度达400Wh/kg，计划2027年启动批量示范装车应用，2030年实现大规模量产上车。比亚迪在重庆璧山基地规划100GWh产能，首期20GWh产线计划2026年投产
长安汽车	计划2026年完成全固态电池装车验证，2027年推进逐步量产，应用于下一代纯电动车
丰田	采用硫化物电解质路线，计划2027年实现量产装车，目前正与住友金属矿山和出光兴产协同合作，2026年将在日本建设年产10GWh的固态电池工厂
大众	投资 Quantum Scape，专注于氧化物陶瓷电解质路线，旗下电池子公司 PowerCo 正在德国、西班牙和加拿大建设大型电池工厂，规划年产能40GWh。计划 2026年全固态电池装车上市。
宝马	2025年5月宣布宝马i7车型正式启动首批搭载全固态电池（由 Solid Power 提供）的电动汽车道路测试，采用硫化物基电解质及创新模组结构。



四、相关上市公司



www.jyzq.cn



全国统一客服电话：95372

此文件版权归金元证券股份有限公司所有，未经许可任何单位或个人不得复制、翻印。



金元证券股份有限公司
GOLDSTATE SECURITIES CO., LTD.

相关上市公司

看好eVTOL和固态电池相辅相成、互相成就带来的投资机会，eVTOL作为固态电池重要的下游应用市场，为固态电池产业打开新的需求空间；固态电池则为eVTOL的能源系统提供更加安全、高效、长续航的解决方案，助力eVTOL实现产品升级迭代，加速商业化进程，相关上市公司包括：

设备端：最确定、最先兑现收益环节

设备是“量产前夜”的第一落单环节，随着GWh产线招标已提前开启，设备端将最先受益，固态电池生产对混合、等静压、绝缘制痕、干法等设备都提出全新需求，创造0 → 1 的新增需求，细分环节和相关标的包括：

干法整机：纳科诺尔、先导智能

等静压设备：利通科技、荣旗科技

混合均质一体机：宏工科技、灵鸽科技

制痕绝缘设备：德龙激光、联赢激光

ALD包覆设备：微导纳米

高压化成/整线：杭可科技、先导智能、海目星

材料端：高价值量环节

材料价值量远高于设备，硫化锂是固态电解质成本中占比最高的材料，头部厂商明确 2026-2027 年扩产路径，提前布局的材料公司弹性较大，细分环节和相关标的包括：

硫化锂 (Li₂S)：厦钨新能、上海洗霸

硫化物电解质合成：当升科技、三祥新材、恩捷股份、天赐材料

碘化锂（添加剂）：博苑股份、当升科技

负极：贝特瑞、赣锋锂业、天齐锂业

电池厂商：eVTOL深度绑定

部分头部电池厂商已经开始绑定eVTOL企业达成战略合作，有望为固态电池需求打开全新空间，相关标的包括：

电池整装：宁德时代、中创新航、孚能科技、欣旺达

风险提示

风险提示

- 产业化进程不及预期，固态电池大规模量产遇到挑战
- 技术突破与工艺创新遭遇瓶颈
- 政策支持力度不及预期
- 原材料成本和制造成本压降不及预期



投资评级说明

金元证券行业投资评级标准：

增持：行业股票指数在未来6 个月内超越大盘；

中性：行业股票指数在未来6 个月内基本与大盘持平；

减持：行业股票指数在未来6 个月内明显弱于大盘。

金元证券股票投资评级标准：

买入：股票价格在未来6个月内超越大盘15%以上；

增持：股票价格在未来6个月内相对大盘变动幅度为5%~15%；

中性：股票价格在未来6个月内相对大盘变动幅度为-5%~+5%；

减持：股票价格在未来6 个月内相对大盘变动幅度为-5%~-15%； 。



免责声明

本报告由金元证券股份有限公司（已具备中国证监会批复的证券投资咨询业务资格）制作。本报告所载资料的来源及观点的出处皆被金元证券认为可靠，但金元证券不保证其准确性或完整性。该等信息、意见并未考虑到获取本报告人员的具体投资目的、财务状况以及特定需求，在任何时候均不构成对任何人的个人推荐。投资者应当对本报告中的信息和意见进行独立评估，并应同时考量各自的投资目的、财务状况和特定需求，必要时就法律、商业、财务、税收等方面咨询专业财务顾问的意见。对依据或者使用本报告所造成的一切后果，金元证券及/或其关联人员均不承担任何法律责任。投资者需自主作出投资决策并自行承担投资风险，任何形式的分享证券投资收益或者分担证券投资损失的书面或口头承诺均为无效。

本报告所载的信息、材料或分析工具仅提供给阁下作参考用，不是也不应被视为出售、购买或认购证券或其他金融工具的要约或要约邀请。该等信息、材料及预测无需通知即可随时更改。过往的表现亦不应作为日后表现的预示和担保。在不同时期，金元证券可能会发出与本报告所载意见、评估及预测不一致的研究报告。

金元证券的销售人员、交易人员以及其他专业人士可能会依据不同假设和标准、采用不同的分析方法而口头或书面发表与本报告意见及建议不一致的市场评论和/或交易观点。金元证券没有将此意见及建议向报告所有接收者进行更新的义务。金元证券的自营部门以及其他投资业务部门可能独立做出与本报告中的意见或建议不一致的投资决策。

在法律许可的情况下，金元证券可能会持有本报告中提及公司所发行的证券头寸并进行交易，也可能为这些公司提供或争取提供投资银行业务服务。因此，投资者应当考虑到金元证券及/或其相关人员可能存在影响本报告观点客观性的潜在利益冲突。投资者请勿将本报告视为投资或其他决定的唯一信赖依据。

本报告的版权仅为金元证券所有，未经书面许可任何机构和个人不得以任何形式转发、翻版、复制、刊登、发表或引用。

