

全固态电池：锂电池的下一代解决方案

——固态电池专题（一）

民生电新邓永康团队



01

全固态电池的优势：高能量密度+高安全性

02

固态电解质：硫化物是未来主流路线

03

核心问题：固固界面润湿性

04

其他环节变化：设备、负极、集流体是关键变量

05

产业节奏：政策托底，空间星辰大海

06

投资建议

07

风险提示

CONTENTS

目录



摘要

- **全固态电池相比传统锂离子电池具有显著优势**，传统锂离子电池能量密度接近理论上限，且有机电解液易燃导致热失控问题难以根除。而全固态电池正极材料沿用高镍三元，因此**负极是提升固态电池能量密度的关键**，其能适配高比例硅基负极或锂金属负极，能量密度有望突破500Wh/kg。全固态电池因采用固态电解质，在抑制锂枝晶生长与穿透、具备不可燃性及拥有更高耐热极限方面显著优于液态电池。
- **固态电解质主要分为聚合物、氧化物、硫化物、卤化物四大类**。聚合物加工性好但离子电导率低；**氧化物**稳定性高，不过加工性能较差；**卤化物**稳定性较强，却存在界面接触性差、成本高且易吸潮的问题；**硫化物**离子电导率最高，但其电化学稳定性和空气稳定性欠佳，易与水分反应产生 H_2S 气体，但工艺突破后有望成为未来主流路线。目前，硫化物在国内外均被作为重点攻关方向，丰田、华为、宁德时代等企业均布局了相关技术。
- 全固态电池面临的**核心问题是固固界面润湿性**，包括**化学/电化学界面**的电化学稳定窗口窄、元素扩散和空间电荷层等问题，以及**物理界面**的接触不良、体积变化导致的阻抗增加等，进而引发锂枝晶生长和循环寿命缩短。
- **全固态电池部分环节有明显变化**，工艺上干法电极因适配硫化物电解质成为关键，等静压设备可增强界面接触，是全固态的核心增量环节；正极短期沿用高镍三元，长期向低成本锰酸锂和高性能富锂锰基等锰系材料发展；负极中期转向硅基以提升容量，远期将采用锂金属负极；集流体由于硫化物的腐蚀性问题，镍铁合金有望成为主流路线。
- **政策托底，消费→低空→动力，产业化节奏明确**。工信部2024年投入约60亿元支持头部电池厂和车厂的固态电池研发，产业化节奏方面，我们预计消费领域2025-2026 年规模化、eVTOL领域2026-2028年打开中长期市场、动力领域2027年后量产装车，2030年后规模化的节奏逐步推进，市场空间广阔。
- **风险提示**：新技术进展不及预期、下游需求不达预期及技术路线改变等风险。

01. 全固态电池的优势： 高能量密度+高安全性

01 传统锂离子电池：能量密度接近上限，热失控难以根除

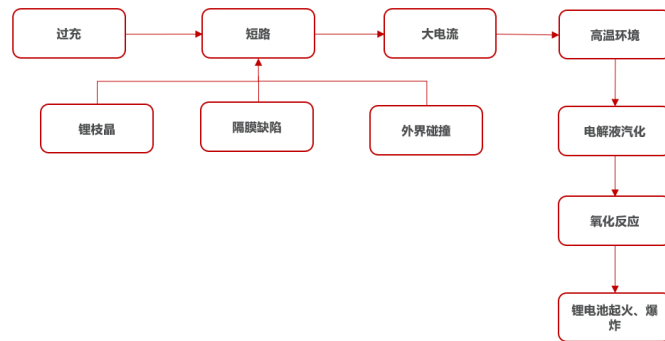
- **传统锂离子电池能量密度已经接近理论上限。**当前高镍三元体系的单体电芯，搭配10%硅基负极，能量密度接近300Wh/kg，现有锂电池的材料体系基本使得能量密度逼近上限，因此近年来电池能量密度提升速度放缓。
- **热失控难以根除。**有机电解液有较强的易燃性，过充电、过放电、电池内部短路、外部短路和电池外部受热等条件均可以引起电池热失控。电池在热失控情况下，正负极电极材料和电解液间发生剧烈的化学反应，放出大量热。电解液溶剂的主要成分是有有机碳酸酯，闪点和沸点较低，在一定条件下会燃烧甚至发生爆炸。

图表：宁德时代CTP3.0麒麟电池（能量密度255Wh/kg）



资料来源：锂电网，民生证券研究院

图表：锂电池爆炸起火原因

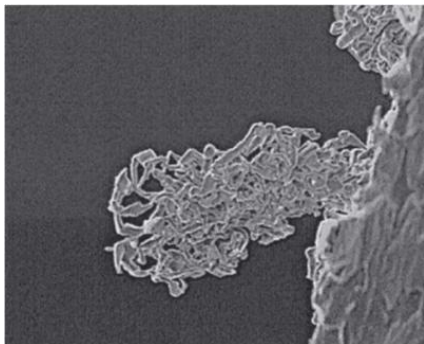


资料来源：中国电池工业协会，民生证券研究院

01 高能量密度：采用更高掺杂比例的硅基负极/金属锂负极

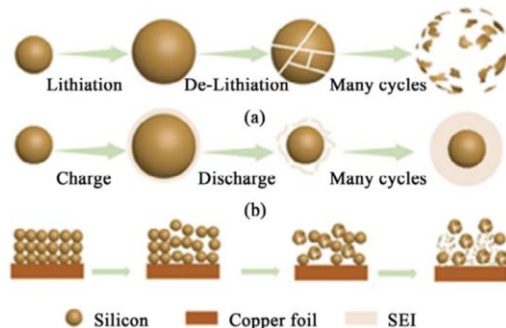
- 正极材料沿用高镍三元，因此负极是提升固态电池能量密度的关键。
- 人造/天然石墨负极：已接近理论比容量372mAh/g。
- 硅基负极：理论比容量高达4200mAh/g，但存在体积膨胀、导电性差和SEI膜不稳定的问题，在传统液态电池中，掺杂比例通常不超过10%，因为过高的体积膨胀系数会导致极片断裂，从而造成电池内部短路。
- 锂金属负极：理论比容量达到3860mAh/g，电位低（-3.04V），导电性优异，具有巨大潜力，但存在锂枝晶、循环时体积变化等问题，在传统液态电池中，锂枝晶容易刺穿隔膜，导致正负极短路，并且锂金属很活泼，会直接和有机电解液反应。
- 全固态电池可以适配硅基负极和锂金属负极。全固态电池电解质有较强的机械强度，可以有效地抑制硅基负极的膨胀和锂枝晶的生长，界面修饰可以降低电解质和金属锂负极之间的界面反应，因此使用全固态电池有望搭配高比例的硅基负极和锂金属负极体系，能量密度有望突破500Wh/kg。

图表：锂枝晶的微观结构



资料来源：西努光学，民生证券研究院

图表：硅基负极失效机理



资料来源：锂电负极材料，民生证券研究院

01

高安全性：固态电池相比传统液态电池大幅提高

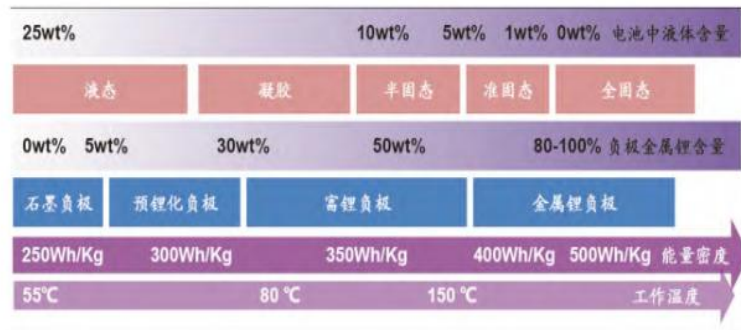
- 全固态电池采用固态电解质，安全性相较液态电池显著提升。
- 1)锂枝晶方面，固态电解质可抑制锂枝晶生长速度，且锂枝较难穿透固态电解质造成正负极短路；
- 2)可燃性方面，固态电解质具备不可燃性，而有机电解液的闪点在40度以下；
- 3)热稳定性方面，不同成分的固态电解质耐热极限差异较大(400度-1800度不等)，但均显著高于液态电池隔膜耐热极限(160度)。半固态电池由于保留少量电解液，安全性稍差于全固态电池，但仍旧大幅优于液态电池。

图表：固态电池不惧破损，剪开后还可使用



资料来源：NE时代，民生证券研究院

图表：固态电池分类与发展策略



资料来源：国际储能网，民生证券研究院

02. 固态电解质：硫化物 是未来主流路线

02 固态电解质分类：聚合物、氧化物、硫化物、卤化物

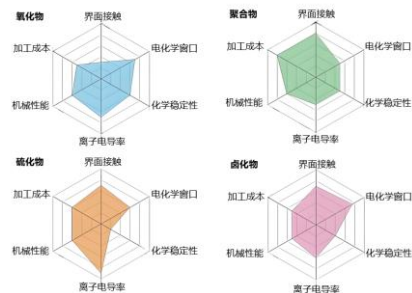
- 固态电解质，使用固体离子导体作为锂离子电池的电解质，主要包括聚合物固态电解质（SPE），硫化物固体电解质，氧化物固体电解质、卤化物固态电解质等。
- **聚合物**：有良好的界面相容性和机械加工性，但离子电导率低且难以抑制锂枝晶生成。
- **氧化物**：机械稳定性、化学稳定性好，离子电导率一般，且材料脆性高，加工性能较差，界面问题严重。
- **硫化物**：离子电导率最高，且颗粒较软，只需简单的粉末冷压就能表现出很高的离子电导率，但硫化物固态电解质大多能与潮湿空气反应，且化学稳定性较差，开发难度大。
- **卤化物**：离子电导率处于氧化物和硫化物之间，且与高压正极材料具有更好的兼容性，可以实现高电压窗口下的稳定循环，但成本较高，且容易吸水潮解。

图表：固态电解质类型及优缺点

类型	聚合物	氧化物	硫化物	卤化物
材料	PEO、PPC、PCL、PTMC等	LiPON、LATP、LLTO、LLZO等	LiGPS、LiSnPS、LiSiPS等	三元氯化物 Li3MX6 M为过渡金属，X为卤素F、Cl、Br、I
电导率	10^{-7} - 10^{-4} S/cm	10^{-6} - 10^{-3} S/cm	10^{-4} - 10^{-2} S/cm	10^{-3} S/cm
优势	低成本，易加工，高灵活性	机械稳定性，化学稳定性，温度稳定性	电导率高、加工性能好	电化学稳定性，离子电导率高，与正极相容性好
劣势	离子电导率低，氧化电压低，难以抑制锂枝晶生成	高烧结温度，材料脆性，电导率一般	稳定性差，制备难度较大	成本高，对水高度敏感

资料来源：材料科学与工程，民生证券研究院

图表：固态电解质雷达图



资料来源：《高性能硫化物基全固态锂电池设计：从实验室到实用化》刘元凯，民生证券研究院

02

聚合物电解质：界面接触性好，离子电导率过低

- **聚合物易于合成和加工，率先实现商业化应用，但常温电导率低，整体性能提升有限，制约大规模应用与发展。**聚合物固态电解质由高分子基体和锂盐络合形成。基体包括聚氧化乙烯（PEO）、聚丙烯腈(PAN)、聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)等；常用的锂盐包括LiPF₆、LiClO₄和LiAsF₄等。
- **导电原理：**迁移离子同高分子链上的极性基团络合，在电场作用下，随着高弹区中分子链段的热运动，**迁移离子与极性基团不断发生络合——解络合过程**，从而实现离子的迁移。
- **特点：**具有较好的**弹性模量和界面接触性能**，这是由于聚合物本身具有极佳的弹性和柔韧性，可承受电极在电池充放电过程中产生的体积膨胀和收缩，与界面保持良好接触，减小界面阻抗，保障固态电池的充放电循环稳定性。

图表：聚合物电解质主流材料及对应性能

材料	优势	劣势
PEO	锂离子传输能力强，负极兼容性好，电极间界面阻抗小	室温下离子电导率低
PAN	化学稳定性好，耐热性强	力学性能差
PMMA	与锂电极界面阻抗低，锂离子传输能力强，制造成本低	离子电导率低

资料来源：高分子材料成型原理，化学进展，民生证券

02

氧化物电解质：稳定性强、界面接触性差、电导率一般

- 氧化物固态电解质主要包括NASICON型 (LATP)、钙钛矿型 (LLTO)、石榴石型 (LLZO) 以及LiPON型等。
- **LLZO**: 离子电导率一般、对锂金属稳定、电化学窗口宽以及化学和电化学稳定性优异，机械性能优异，但LLZO易在空气中反应产生钠化层。
- **LATP**: LATP晶体骨架内具有三维离子迁移通道，因此电导率相对石榴石型 (LLZO) 更高，但缺点是：低电位下，Ti⁴⁺易被金属锂还原，导致界面不稳定，增大电子电导率并造成电池短路。
- **LLTO**: 具有较高的离子电导率，但在还原性较强的锂金属作用下，Ti⁴⁺被还原为 Ti³⁺，电子电导率增大并可能造成电池短路，限制了其应用于全固态锂电池。另外，LLTO晶界处离子的高迁移势垒会增大其晶界阻抗。

图表：氧化物系固态电解质分类和性能

结构分类	典型材料	离子电导率 (S/cm)	优点	缺点
NASICON结构	Li _{1.3} Al _{0.3} Ti _{1.7} (PO ₄) ₃ (LATP) Li ₃ Zr ₂ Si ₂ PO ₁₂ (LZSP) Li _{1+x} Al _x Ge _{2-x} (PO ₄) ₃ (LAGP)	1.40×10 ⁻⁴ 3.59×10 ⁻³ 2.3×10 ⁻⁴	热稳定性好、对空气不敏感	低电位下Ti ⁴⁺ 易被锂电极还原、与电极接触的固-固界面阻抗大、生产成本高难以量产
石榴石结构	Li ₇ La ₃ Zr ₂ O ₁₂ (LLZO)	2.20×10 ⁻⁴	高温下稳定、电化学窗口宽、对锂电极稳定	易在空气中产生钠化层、与电极接触的固-固界面阻抗大
钙钛矿结构	Li _{0.33} La _{0.56} TiO ₃ (LLTO)	1.31×10 ⁻⁴	离子电导率高、对空气不敏感、电化学稳定窗口宽、断裂韧性强、易于加工	晶界电导率低、低电位下Ti ⁴⁺ 易被锂电极还原、与电极接触的固-固界面阻抗大
非晶态结构	Li _{3x} (PO ₄) ₄ N _z	4.91×10 ⁻⁶	良好电化学窗口和热稳定性、对电极材料不敏感、界面相容性强、电子电导率极低	离子电导率有限、材料易碎裂、制备工艺复杂成本高

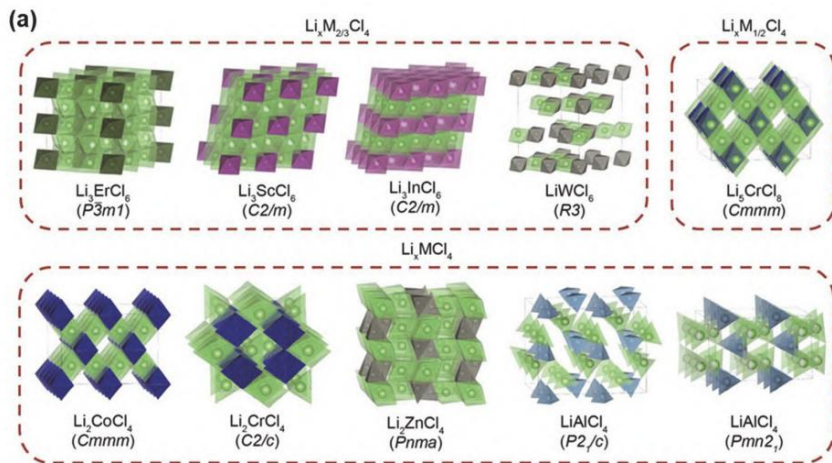
资料来源：《氧化物系锂离子固态电解质研究进展》王雅秋，民生证券研究院

02

卤化物电解质：稳定性强、界面接触性差、电导率一般

- 金属卤化物电解质的化学式为 $\text{Li}_a\text{M-Xb}$ ，其中M为金属元素，X为卤元素（Cl、Br、I、F）。按照金属元素对Li离子的取代量可以将卤化物电解质分为3类：1) $\text{Li}_a\text{M-Cl}_6$ ；2) $\text{Li}_a\text{M-Cl}_4$ ；3) $\text{Li}_a\text{M-Cl}_8$ 。其中， $\text{Li}_a\text{M-Cl}_6$ 类卤化物电解质普遍具有较高室温离子电导率，典型的电解质为 Li_2ZrCl_6 ，可以通过异价取代或掺杂，产生不同的空位和间隙，有效提升室温电导率。
- 总体来说，卤化物电解质的离子电导率处于硫化物和氧化物之间，同时，卤化物电解质与正极材料具备较好的兼容性（循环一定圈数后仍保持较高循环比容量）。

图表：卤化物固态电解质结构

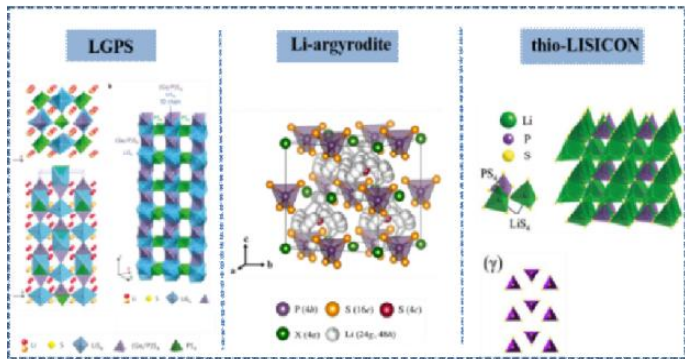


资料来源：《卤化物固态电解质研究进展》陈帅，民生证券研究院

02 硫化物电解质：电导率最高，稳定性较差，潜力最大

- 硫化物固态电解质是由氧化物固态电解质衍生出来的，**氧化物晶体中氧元素被硫元素取代**，形成了硫化物固态电解质，主要包括玻璃及玻璃陶瓷态电解质和晶态电解质等。
- 与氧元素相比，硫元素的半径大且极化作用强，用硫替换氧化物晶态电解质中的氧，一方面可以起到**增加晶胞体积、扩大锂离子传输通道尺寸的作用**；另一方面，**硫的电负性更比氧低，弱化了骨架对锂离子的吸引和束缚，增大可移动载流子锂离子的浓度**。因此，与氧化物电解质相比，硫化物固态电解质表现出更高的离子电导率。
- 硫化物固态电解质的**电化学稳定性差、空气稳定性差**。电化学稳定性差直接限制了其在高能量密度(高工作电压正极、锂金属负极)动力电池中的应用。空气稳定性差使得其易与空气中的H₂O反应生成H₂S，而降低电解质的使用寿命。**目前硫化物固态电解质仍处于研发阶段，但后续发展潜力最大，工艺突破后，可成为未来主流路线。**

图表：三种晶态的硫化物固态电解质结构



资料来源：中国粉体网，民生证券研究院

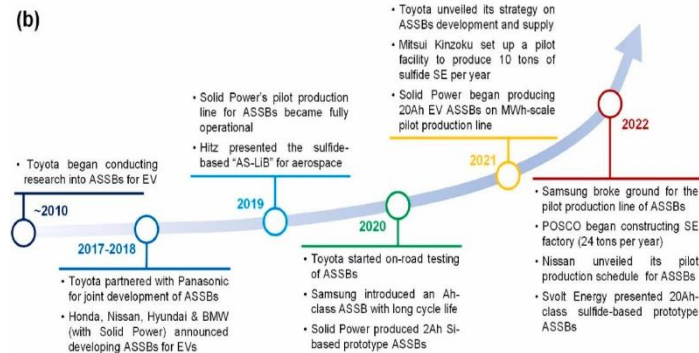
图表：硫化物电解质类型及对应性能

类型	简称	化学式	代表材料	电导率	优势	劣势
Li-P-S型	LPS	Li_xPS_x	Li_3PS_4 、 $\text{Li}_4\text{P}_2\text{S}_6$	10^{-3}S/cm	电化学窗口宽(5V)、热稳定性好、成本低	离子电导率相对低、空气中不稳定
Argyrodite型	LPSCI/LP SI	$\text{Li}_6\text{PS}_5\text{X}$ (X=Cl, Br, or I)	$\text{Li}_6\text{PS}_5\text{Cl}$ 、 $\text{Li}_6\text{PS}_5\text{I}$	$10^{-3}-10^{-2}\text{S/cm}$	离子电导率高、热稳定性好、成本低	电化学窗口窄(< 2.2V)、空气中不稳定
LGPS型	LGPS	$\text{Li}_x\text{MP}_x\text{S}_x$ (M=Ge, Sn, Si, Al)	$\text{Li}_{10}\text{GeP}_2\text{S}_{12}$	10^{-2}S/cm	离子导电性最高、电化学窗口宽(5V)	锂金属不稳定、成本较高
Thio-LISICON型	LGPS (LISICON)	$\text{Li}_{4-x}\text{M}_{1-x}\text{M}'_x\text{S}_4$ (M=Si, Ge, Zr, M'=P, Al, Zn, Ga)	$\text{Li}_{3.25}\text{Ge}_{0.25}\text{P}_{0.75}\text{S}_4$	10^{-3}S/cm	电化学窗口宽(5V)、电化学稳定性高	离子电导率相对低、成本较高

资料来源：《固态锂电池技术发展白皮书》，民生证券研究院

- **海外：**24年11月19日，丰田官网更新内容显示其研发的高性能固态电池已获得日本经济产业省的认定，这意味着丰田自研电池即将进入量产阶段，预计将于2026年开始逐步实施量产计划，**路线上选择硫化物**，续航里程有望超1200KM。24年11月21日，Honda首次公开自研全固态电池面向量产化的示范生产线，生产线主要将用于全固态电池量产工艺的技术验证，同时还将确定电芯的基本规格。计划于2030年前搭载上车，**路线上同样选择硫化物**。
- **国内：**24年11月5日，**华为**公布了一项硫化物固态电解质专利，名为《掺杂硫化物材料及其制备方法、锂离子电池》；24年11月5日，根据晚点独家报道，**宁德时代**在今年增加了对全固态电池的研发投入，已将全固态电池研发团队扩充至超 1000 人，主攻硫化物路线，在近期已进入 20Ah 样品试制阶段；24年11月8日，**广汽集团**宣布其全固态电池研发成果已于2024年4月发布，并已初步打通全流程制造工艺。公司计划在2026年将该技术应用于汽车搭载。

图表：硫化物全固态电池在过去十年中的重要工业进展



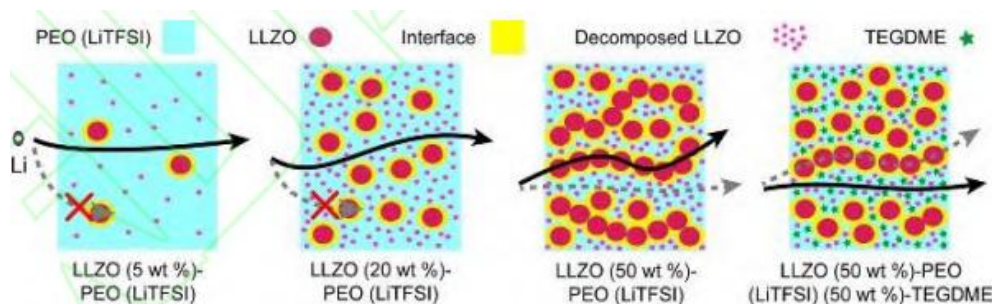
资料来源：《硫化物全固态电池的挑战和机遇：材料、界面、电极、电芯与规模制造》欧阳明高，民生证券研究院

02

有机-无机复合固态电解质：未来的主流方案

- 有机-无机复合固态电解质主要由聚合物基质、无机填料和锂盐三部分构成，其具有以下优点：
 - (1) 聚合物基体可以使固态电解质的柔韧性显著提高，有助于减小电解质/电极间的界面电阻；
 - (2) 无机填料的掺入可以有效提升固态电解质的机械强度、增加锂离子传输方式和传输通道，扩大聚合物相的无定形区，从而增强锂离子传导。
- 与聚合物固态电解质、无机固态电解质相比，有机-无机复合固态电解质既克服了聚合物固态电解质电导率低的问题又缓解了由于无机固态电解质脆硬导致的电解质/电极界面接触差的问题，从电解质对多种技术指标的综合需求看，有机-无机复合固态是最可能满足实际应用的固态电解质。
- 有机-无机复合固态电解质的传导机制较为复杂，目前对于其离子传导机制观点主要有三种：①通过聚合物基体的链式运动传递；②通过聚合物基体与无机填料间的两相界面传递；③通过活性无机填料组成的连续渗透网络进行离子传导。

图表：有机-无机复合固态电解质中 Li⁺传导机制



资料来源：《全固态锂电池有机-无机复合电解质研究进展》宋鑫，民生证券研究院

03. 核心问题：固固界面 润湿性

03

核心问题：固固界面润湿性

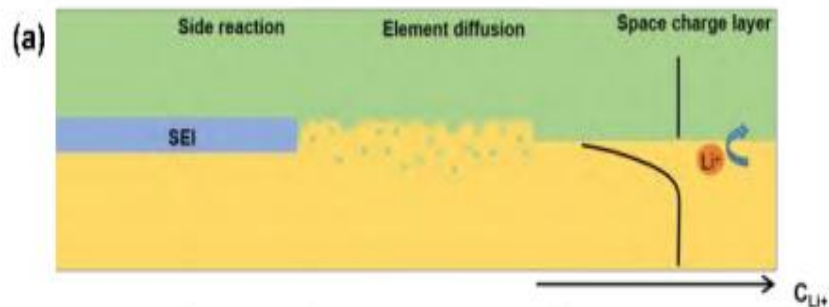
- 根据界面问题产生的原因，可将其分为**化学/电化学界面问题**和**物理界面问题**。
- **化学/电化学界面问题**产生的原因主要包括：**电化学稳定窗口窄、元素扩散和空间电荷层**。

电化学稳定窗口取决于电解质最低未占据分子道(LUMO)和最高占据分子轨道(HOMO)之间的能量差。如果正极的费米能级低于电解质的HOMO或负极的费米能级高于电解质的LUMO，则**电解质在界面发生氧化还原反应形成固体电解质界面层(SEI)**。生成的界面层若为电子/离子混合导体，则会导致持续的界面反应，使得界面阻抗急剧上升甚至发生电池短路。

元素扩散会造成高电子/离子导电性的**混合导电界面层的生成**，并最终导致大的界面电阻和差的循环寿命。

空间电荷层是指在界面接触和反应之后，由于两个接触相具有不同的锂离子电势，会驱使锂离子从一侧向另一侧转移，从而在**界面处形成**的**锂离子积累/耗尽的空间区**。空间电荷层的形成会导致大的离子/电荷梯度场，极大地限制了界面处的锂离子传输速率。

图表：化学/电化学界面问题示意图



资料来源：《固态锂电池界面优化策略的研究进展》赵永智，民生证券研究院

03

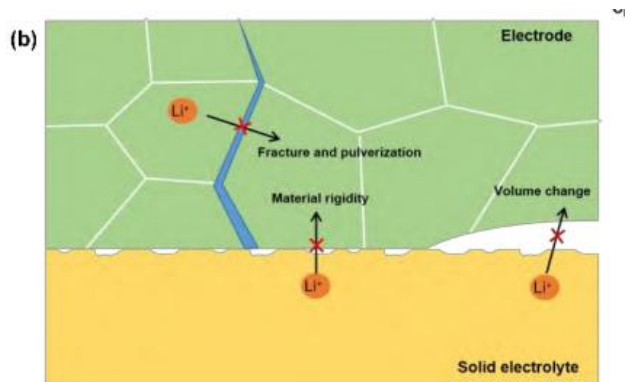
核心问题：固固界面润湿性

- **物理界面问题**是影响锂离子传输和扩散的关键因素。不良的界面接触会阻碍锂离子在电极和电解质之间的有效传输。材料刚性接触、体积变化以及破裂和粉化都会引发接触失效。

与可以自由渗透到电极中并形成良好的离子传导网络的液态电解质不同，**固态电解质由于其非流变性的物质状态而不能自发地渗透到电极材料的间隙中**，使得电极与电解质接触面积小、离子传输路径不足。此外，电极和电解质粗糙的表面上存在大量的突起和孔洞，这会导致界面接触的进一步恶化。

正负极材料在循环过程中体积变化也是诱导接触问题产生的重要原因。大多数电极材料在充放电过程中会产生严重的体积变化，而固态电解质是一个刚性结构，无法通过很好的形变来适应电极的体积变化，若固态电解质和电极界面产生空隙，就无法进行有效的离子传输，从而影响全固态电池持续高效的工作。

图表：物理界面问题示意图



资料来源：《固态锂电池界面优化策略的研究进展》赵永智，民生证券研究院

03

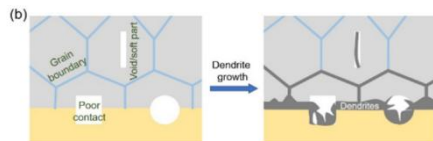
核心问题：固固界面润湿性

- 物理界面问题引发的2个主要问题：锂枝晶+循环寿命。
- **锂枝晶**：由于固态电解质本身的缺陷和不均匀固固界面的存在，使得固态锂电池中仍然存在严重的枝晶生长问题。**聚合物电解质**由于其离子导率和锂离子迁移数都较低，使得聚合物材料需要在高温下操作，**降低了其机械模量**，因此，聚合物电解质中的枝晶生长问题较为显著。**无机电解质**的机械模量高、离子导率和锂离子迁移数都较高，但是，无机电解质中的晶界、孔洞、以及较差的固固界面接触等原因，使得无机固态电解质仍然存在严重的枝晶生长问题。
- **循环寿命**：刚性接触易导致应力堆积，传统液/固接触，界面润湿性良好，不会产生大的阻抗。固-固接触为刚性接触，对电极材料体积变化更为敏感，循环过程中容易造成电极颗粒之间以及电极颗粒与电解质接触变差，造成应力堆积，导致电化学性能衰减，甚至导致裂缝的出现，造成容量迅速衰减，导致循环寿命变差。

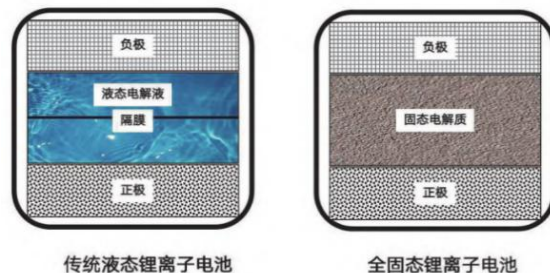
图表：无缺陷理想固态电解质可抑制锂枝晶生长



图表：实际固态电解质中仍有锂枝晶



图表：固-固/固-液接触对比



资料来源：《Controlling the Dendrite Growth in Solid-State Electrolytes》黄佳琦，中南大学资源循环研究院，民生证券研究院

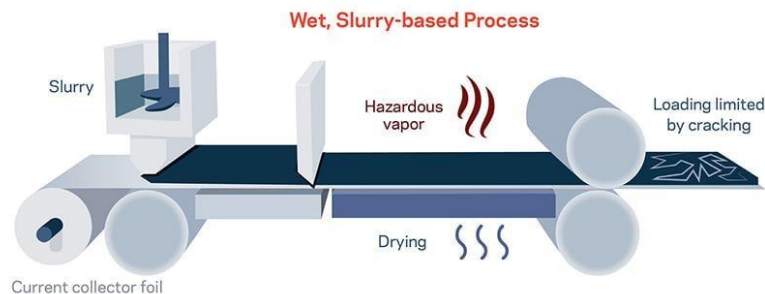
04. 其他环节变化：设备、 负极、集流体是关键变量

04

干法电极：核心变量工艺

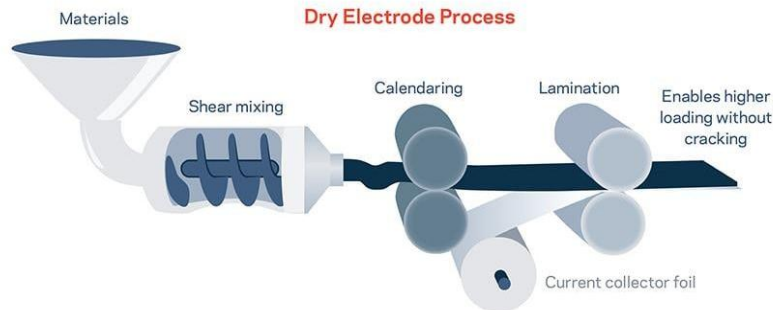
- 固态电解质，尤其是硫化物固态电解质，对水和极性有机溶剂（如醇和酰胺溶剂）极为敏感。因此，开发一种无溶剂的干法制膜技术，制备厚电极以提高LIBs的能量密度和可持续性，是当前固态电池领域的重要研究方向。
- 干法制膜技术在制备过程中避免使用了溶剂，因此具有以下优势：（1）**降低成本**：干法制膜技术节省了溶剂、溶剂蒸发、回收和干燥设备的成本；（2）**抑制分层**：在干混过程中，由于混合器和颗粒的剪切和摩擦，电极材料的不同成分可以均匀分布。并且由于干混过程中不存在浆料，因此不再存在因溶剂蒸发引起的电极分层；（3）**对电极厚度没有限制**：干膜技术可以轻松控制电极厚度和厚电极的均匀性，不会产生裂纹，在制备厚电极方面具有独特的优势；（4）**适配硫化物固态电解质**：由于不会使用与硫化物固态电解质发生反应的溶剂，因此干法工艺有助于更好地制备硫化物固态电解质膜并保持其高离子电导率。
- 据特斯拉估算，相较湿法电极，采用干法电极工艺能够节省18%以上的成本，节约70%的生产线流程，以及减少41%的设备投入。

图表：湿法电极工艺



资料来源：Chemours，民生证券研究院

图表：干法电极工艺



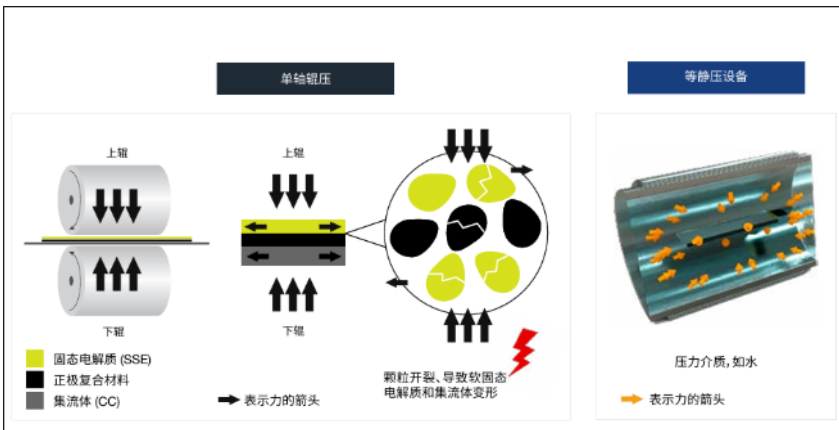
资料来源：Chemours，民生证券研究院

04

等静压设备：全固态新增环节

- 等静压技术，是指利用液体或气体介质对密闭高压容器内产品从各个方向施加均匀、大小相等的力，压强大小不变且均匀地传递到各个方向，使产品成型为致密坯体。工作原理为帕斯卡定律：在密闭容器内的介质（液体或气体）压强可以向各个方向均等地传递。
- 固态电池量产时因电极层间残余孔隙率导致离子传输受阻，内阻提升明显，残余孔隙率是固态电池内阻（阻抗）高的主要成因，因此生产需要施加高压并结合高温来使其致密化，以便去除孔隙和空隙，确保活性组分之间的界面充分接触。

图表：全固态电池温等静压法示意图



资料来源：Quintus Technologies，民生证券研究院

图表：等静压设备



资料来源：Quintus Technologies，民生证券研究院

04

正极：高镍三元与高电压富锂锰基将成为优选

- **短期正极材料沿用高镍体系。** 固态电池电化学窗口更宽，因此可以使用的正极材料更加广泛。半固态/固态电池短期预计仍会沿用三元高镍体系，但或通过单晶化、氧化物包覆、金属掺杂等手段进一步提升电压，从而提升电池能量密度。
- **长期向两个方向迭代：** 1、低成本：锰酸锂，2、高性能：镍锰酸锂、富锂锰基。锰系正极是未来固态电池的迭代方向，锰系正极的优势明显：高工作电压、高放电比容量、低成本，缺点也同样明显：锰溶出导致的循环寿命降低。然而，固态电池中电解液的减少可有效降低锰溶出效应，使得锰系正极的循环寿命大幅提升。
- **1、低成本路线：** 锰酸锂正极材料成本低廉，已被广泛用于两轮车市场，后续如果固态电解质可以解决锰酸锂的循环问题，锰酸锂电池有望上车使用。
- **2、高性能路线：** 富锂锰基和镍锰酸锂正极材料的电压平台远高于三元和磷酸铁锂，同时其具有更高的克容量，更低的成本，是未来固态电池正极材料的理想选择。

图表：富锂锰基、锰酸锂、镍锰酸锂和三元锂正极材料对比

对比项	富锂锰基材料	磷酸锰铁锂	尖晶石锰酸锂	尖晶石镍锰酸锂	三元正极材料
比容量/mAh · g ⁻¹	>250	170	100 - 120	146.7	150 - 220
工作电压/V	2.0-4.8	3.4-4.1	4.0	4.7	3.65
循环性能	差	好	差	好	好
优点	比容量高，成本低廉	电压平台高，成本低廉，热稳定性好，放电电压稳定	成本低，电压平台高，安全性好	结构稳定，电压平台高，高比能量密度	循环性能好，电化学性能好，高比能量密度
缺点	首次不可逆容量损失，倍率性能差，循环过程电压衰减	电子、离子导电性低，电化学性能降低	循环性能差，比容量低	无匹配的电解液	成本高

资料来源：锂电材料工艺，民生证券研究院

04

负极：中期硅基负极，远期金属锂负极

- 中短期向硅基负极发展，长期向锂金属发展。
- 人造/天然石墨负极：已接近理论比容量372mAh/g。
- 硅基负极：理论比容量高达4200mAh/g，但存在体积膨胀、导电性差和SEI膜不稳定的问题，多与石墨掺杂应用。
- 锂金属负极：理论比容量达到3860mAh/g，电位低（-3.04V），导电性优异，具有巨大潜力，但存在锂枝晶、循环时体积变化等问题。
- 液态电解质中，由于硅和电解液发生反应，消耗硅/锂电解液，锂枝晶容易刺穿隔膜引发的短路问题，新型负极应用受到限制。而固态电解质电化学窗口更宽，化学稳定性更高，可以抑制锂枝晶生长，预计中短期向硅基负极发展，长期向锂金属负极迭代。

图表：负极材料性能对比

	负极材料	比容量(mAh/g)	首次效率(%)	电极电位(V)	倍率性能	循环寿命(次)	体积膨胀率(%)
碳材料	天然石墨	340-370	90-93	0.2	一般	>1000	<12
	人造石墨	310-360	90-96	0.2	一般	>1500	<12
	中间相碳微球	300-350	90-94	0.2	良好	>1000	-
	无定形碳(硬碳)	300-400	80-85	0.52	良好	>1500	<1
非碳材料	硅碳	400-700	85-90	0.3-0.5	略差	500-600	>300
	硅氧	450-500	65-75	0.3-0.5	一般	>1000	>100
	钛酸锂	165-170	98-99	1.55	优异	>30000	<1
	锂金属	3860 (理论)	90-95	-3.04	一般	>300	~120

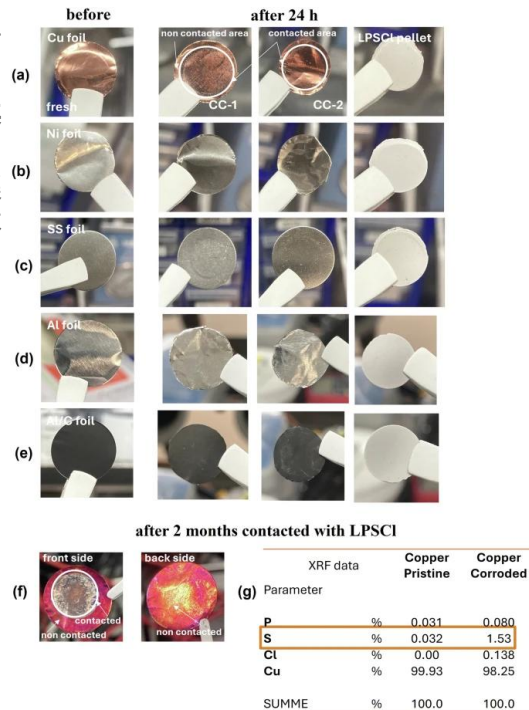
资料来源：固态电池与材料在线，民生证券研究院

04

集流体：镍铁合金有望成为主流路线

- 根据相关专利或者学术文献介绍，硫化物电解质技术路线的全固态电池在负极集流体选择方面有别于传统的液态锂离子电池；根据宁德时代23年申请的《一种集流体、负极极片、二次电池和用电装置》的专利，专利介绍到，**该集流体包括铁镍合金基底层与设置在所述铁镍合金基底层的至少一侧的铜层，能够提高集流体与活性物质的粘接力，同时保证集流体的机械强度，从而改善相应的电池循环性能。**表明以宁德时代为代表的头部电池厂已经开始布局铜镍基集流体方面的技术。专利介绍到，该集流体可以应用的电解质，本申请对电解质的种类没有具体的限制，可根据需求进行选择。例如，电解质可以是液态的、凝胶态的或全固态的。
- 根据Artur Tron等人发表在《Communications chemistry》期刊上题为《Probing the chemical stability between current collectors and argyrodite Li₆PS₅Cl sulfide electrolyte》的论文提到，硫化物固态电解质（如Li₆PS₅Cl）的高活性导致其与传统铜集流体发生严重界面副反应，成为产业化的关键瓶颈：
- 1. 腐蚀机制：Cu在接触硫化物电解质后生成Cu₂S（硫化亚铜）和Li₃P等产物，导致界面电阻24小时内增长300%，而不锈钢（SS）仅增加15%。痕量水分（ppm级）即触发铜的硫化反应，副产物破坏机械强度与离子传输通道。
- 2. 电化学性能衰减：使用Cu集流体的全电池首圈库伦效率仅81%，10圈后极化电压显著升高；而SS集流体对应效率达95.6%，极化降低40%。

图表：不同集流体腐蚀对比



资料来源：《Probing the chemical stability between current collectors and argyrodite Li₆PS₅Cl sulfide electrolyte》Artur Tron, 《探究集流体与Li₆PS₅Cl硫化物固态电解质的化学稳定性：全固态电池产业化关键瓶颈突破》，民生证券研究院

05. 产业节奏：政策托底， 空间星辰大海

05 国内政策：有海外弯道超车风险，国家政策提供底层支持

- 国内液态电池技术具备领先优势，海外车企加速布局固态电池并推进量产计划以图弯道超车，政府层面通过工信部加大支持力度，促使国内加快全固态电池研发，为产业化提供支撑。
- **海外：**海外车企已加速在固态电池领域布局。丰田、本田、日产、现代、宝马、大众等海外主流车企纷纷推进固态电池量产计划，如丰田2026年起逐步实施固态电池量产，目标2030年实现量产；本田计划2025 - 2029年实现量产固态电池。它们通过与松下、QS、SP、SES AI 等企业合作，加速全固态电池技术研发。
- **国内：**此前全固态电池研发多处于实验室阶段，近两年在政策推动下，研发逐渐加速。2024 年，工信部的政策支持进一步落地，计划投入约 60 亿元用于全固态电池研发，旨在加快研发进程，其中宁德时代、比亚迪、一汽、上汽、卫蓝新能源和吉利共 6 家企业获得政府基础研发资金支持，助力全固态电池从实验室走向中试线，推动产业化进程提速。

图表：海外电池厂全固态电池量产/布局机会计划

品牌	全固态电池量产/布局计划	合作企业
丰田	2026年开始逐步施固态电池量产计划，2030 年实现量产	松下、出光兴产
本田	2025 到 2029 年之间实现量产固态电池	SES AI
现代	2025 年尝试生产搭载固态电池的电动汽车，2027 年部分量产，2030 年左右全面量产	SES AI、LG 新能源、SK On、Factorial Energy
大众	2025 年建立固态电池量产线，预计 2027 年实现量产	Quantum Scape
宝马	2025 年全固态电池试装，2030 年前全固态电池量产	Solid Power

资料来源：优视汽车，民生证券研究院

05

产业节奏：消费→eVTOL→动力

- **消费：**2012年，苹果就积极布局全固态电池专利，2015年，苹果公布了全固态电池的专利，2024年3月，vivo X Fold3系列机首次搭载了半固态电池，2024年6月，TDK开发了全固态电池，能量密度达到1000Wh/L，2024年11月5日，华为公布相关硫化物电解质专利。因为消费电池成本敏感性最低，单颗电芯的容量较小，规模化量产较为简单，因此我们预计消费领域会**率先（2025-2026年）**规模化使用固态电池。
- **低空：**eVTOL能量密度要求400Wh/kg以上，为固态电池进一步打开想象空间。2024年3月，低空经济首次纳入政府工作报告，对电池提出高能量密度、高倍率的诉求。四部门发布《通用航空装备创新应用实施方案》指出，推动400Wh/kg级航空锂电池投入量产，实现500Wh/kg级航空锂电池产品应用验证，理论上需搭配固态电池使用。2024年11月14日，亿航智能宣布，EH216-S搭载了高能量固态电池成功完成单次不间断飞行测试，达到48分10秒，适用不同飞行场景，续航时间可显著提升60%—90%。低空对电池能量密度和安全性的要求有望打开固态电池的**中长期市场，预计2026-2028年放量。**
- **动力：**2024年11月8日，广汽表示已初步打通全固态电池全流程制造工艺，计划在2026年将全固态电池技术应用于昊铂车型搭载，2024年11月7日，太蓝新能源与长安汽车携手发布无隔膜固态锂电池技术，预计2027年实现全固态电池装车验证。**我们预计2027年可以看到全固态电池的量产装车，2030年之后规模化应用。**

图表：消费领域率先应用，eVTOL撑起中期空间，动力市场最大，成本敏感性最高



资料来源：华为，vivo，中国民航网，起点锂工，中信所，亿航智能，民生证券研究院

06. 投资建议

- 固态电池是非常明确的产业趋势，当下推荐3个变化最大的环节：**【硫化锂】**、**【干法电极设备】**、**【集流体】**
- **硫化锂**：全固态电池卡脖子环节，当前可以批量化生产纯度达标的企业非常稀缺，重点推荐**【厦钨新能】**：和欣旺达签订战略合作协议，聚焦固态电解质及其相关材料的研发；建议关注**【上海洗霸】**：收购有研新材硫化锂资产，进军固态电解质领域。
- **设备**：全固态电池新增干法电极设备环节，建议关注**【宏工科技】**：在干法电极前端工序环节，具备全方位技术储备；**【纳科诺尔】**：干法设备已实现交付，行业进展领先；**【德龙激光】**：激光设备龙头，卡位固态电池UV胶印。
- **集流体**：镍铁合金集流体适配硫化物电解质，建议关注**【远航精密】**：镍箔精密加工领域专家，有望进军固态电池进流体领域。

07. 风险提示

07

风险提示

- 新技术进展不及预期：**硫化物路线虽具备最高离子电导率，但化学/空气稳定性差，容易与水分反应产生 H_2S 气体，技术难度高。固固界面润湿性、界面阻抗、锂枝晶问题仍未彻底解决，影响实际性能和安全性。工艺制造难度高，干法电极、等静压成型等新工艺尚未成熟，仍处于研究阶段。若新技术进展不及预期，对固态电池产业化进展或有明显影响。
- 下游需求不及预期：**全固态电池高度依赖下游需求释放，目前消费电子、eVTOL与动力电池虽具潜力，但均存在产业链尚未成熟、产品验证周期长等问题。同时，尽管政策已加大投入，但补贴的持续性仍具不确定性，一旦政策节奏调整，或将影响企业投入强度和产业化推进速度。
- 技术路线改变风险：**目前全固态电池的技术路线存在多种选择，在固态电解质方面，硫化物被视作未来主流路线，但聚合物、氧化物、卤化物及有机-无机复合电解质也在持续研发中，若其他路线有技术突破，对硫化物电解质的产业化有影响。

THANKS 致谢

民生电新研究团队：



分析师 邓永康
执业证号：S0100521100006
邮箱：dengyongkang@mszq.com



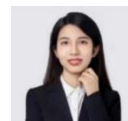
分析师 朱碧野
执业证号：S0100521120001
邮箱：zhubiye@mszq.com



分析师 王一如
执业证号：S0100521050004
邮箱：wangyiru@mszq.com



分析师 赵丹
执业证号：S0100524050002
邮箱：zhaodan@mszq.com



分析师 李佳
执业证号：S0100523120002
邮箱：lijia@mszq.com



分析师 李孝鹏
执业证号：S0100524010003
邮箱：lixiaopeng@mszq.com



分析师 席子屹
执业证号：S0100524070007
邮箱：xidiyi@mszq.com



分析师 林誉韬
执业证号：S01001210200010
邮箱：linyutao@mszq.com



分析师 许俊哲
执业证号：S01001210200010
邮箱：xujunzhe@mszq.com

民生证券研究院：

上海：上海市虹口区杨树浦路188号星立方大厦7层；200082

北京：北京市东城区建国门内大街28号民生金融中心A座18层；100005

深圳：深圳市福田区中心四路1号嘉里建设广场1座10层01室；518048

分析师声明:

本报告署名分析师具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格并登记为注册分析师，基于认真审慎的工作态度、专业严谨的研究方法与分析逻辑得出研究结论，独立、客观地出具本报告，并对本报告的内容和观点负责。本报告清晰准确地反映了研究人员的研究观点，结论不受任何第三方的授意、影响，研究人员不曾因、不因、也将不会因本报告中的具体推荐意见或观点而直接或间接收到任何形式的补偿。

评级说明:

投资建议评级标准	评级	说明
以报告发布日后的12个月内公司股价（或行业指数）相对同期基准指数的涨跌幅为基准。其中：A股以沪深300指数为基准；新三板以三板成指或三板做市指数为基准；港股以恒生指数为基准；美股以纳斯达克综合指数或标普500指数为基准。	公司评级	推荐
		谨慎推荐
		中性
		回避
	行业评级	推荐
		中性
		回避

免责声明:

民生证券股份有限公司（以下简称“本公司”）具有中国证监会许可的证券投资咨询业务资格。

本报告仅供本公司境内客户使用。本公司不会因接收人收到本报告而视其为客户。本报告仅为参考之用，并不构成对客户的投资建议，不应被视为买卖任何证券、金融工具的要约或要约邀请。本报告所包含的观点及建议并未考虑个别客户的特殊状况、目标或需要，客户应当充分考虑自身特定状况，不应单纯依靠本报告所载的内容而取代个人的独立判断。在任何情况下，本公司不对任何人因使用本报告中的任何内容而导致的任何可能的损失负任何责任。

本报告是基于已公开信息撰写，但本公司不保证该等信息的准确性或完整性。本报告所载的资料、意见及预测仅反映本公司于发布本报告当日的判断，且预测方法及结果存在一定程度局限性。在不同时期，本公司可发出与本报告所刊载的意见、预测不一致的报告，但本公司没有义务和责任及时更新本报告所涉及的内容并通知客户。

在法律允许的情况下，本公司及其附属机构可能持有报告中提及的公司所发行证券的头寸并进行交易，也可能为这些公司提供或正在争取提供投资银行、财务顾问、咨询服务等相关服务，本公司的员工可能担任本报告所提及的公司的董事。客户应充分考虑可能存在的利益冲突，勿将本报告作为投资决策的唯一参考依据。

若本公司以外的金融机构发送本报告，则由该金融机构独自为此发送行为负责。该机构的客户应联系该机构以交易本报告提及的证券或要求获悉更详细的信息。本报告不构成本公司向发送本报告金融机构之客户提供的投资建议。本公司不会因任何机构或个人从其他机构获得本报告而将其视为本公司客户。

本报告的版权仅归本公司所有，未经书面许可，任何机构或个人不得以任何形式、任何目的进行翻版、转载、发表、篡改或引用。所有在本报告中使用的商标、服务标识及标记，除非另有说明，均为本公司的商标、服务标识及标记。本公司版权所有并保留一切权利。