



信达证券
CINDA SECURITIES

Research and
Development Center

固态电池系列 2：多元路径的电解质，进阶的 供应链

电力设备新能源
行业

证券研究报告

行业研究

行业专题

电力设备与新能源

投资评级 看好

上次评级 看好

武浩 电新行业首席分析师

执业编号: S1500520090001

联系电话: 010-83326711

姚云峰 电力设备与新能源行业联系人

联系电话: 18840829584

邮箱: yaoyunfeng@cindasc.com

信达证券股份有限公司

CINDA SECURITIES CO., LTD

北京市西城区宣武门西大街甲127号金隅大厦

B座

邮编: 100031

固态电池系列 2: 多元路径的电解质, 进阶的供应链

2025 年 2 月 27 日

本期内容提要:

- **固态电解质是固态电池核心部件, 增量价值最高。**从固态电池各原材料远期价值量来看, 我们测算固态电池正极价值量最高, 单 GW 价值量 1.9 亿元, 其次为硫化物电解质, 单 GW 价值量为 8250 万元, 若使用氧化物、聚合物路线, 则电解质单 GW 价值量为 3960、3300 万元。
- **半固态氧化物已量产, 全固态硫化物、卤化物最有潜力。**氧化物量产难度小, 原材料成本低, 单吨物料成本 4.65 万元/吨, 已实现半固态装车, 但全固态其界面阻抗问题较大, 目前仅有 QS 坚持全固态氧化物路线。硫化物性能最佳, 但制备成本高, 成本端需实现硫化锂国产化、技术端需优化水汽稳定性。卤化物近年来关注度逐步提升, 化学性质与硫化物相似, 电导率可实现较高水平, 且锆基物料成本低, 具有发展潜力。
- **原材料: 锆元素&硫化锂为核心, 硫化锂工艺分化。**1) 半固态氧化物 LLZO 最为成熟, 全固态卤化物最低成本路线为锆基, 锆元素需求必要性很强。2) 目前硫化锂价格高昂, 进口价格上百万元/吨, 占硫化物成本 80%。未来低成本工艺、国产化替代为重要降本路径, 我们预计远期目标成本有望降至约 20 万元/吨, 目前主要成熟工艺为球磨、碳还原法, 液相法降本空间值得关注。
- **设备: 干法电极带来辊压设备增量。**从全固态角度, 硫化物、卤化物均比较活泼, 干法工艺更加适配, 且具备降本空间。干法核心设备为辊压。辊压主要指标为车速、压力、幅宽等, 目前国内厂商在性能、价格均领先海外 PNT 等公司。
- **投资建议:** 固态电池产业化加速推进, 路线、供应链正在逐步走向成熟, 半固态关注氧化物、聚合物厂商, 全固态关注卤化物、硫化物厂商, 建议关注宁德时代。电解质原材料供应商建议关注锆基东方锆业、三祥新材, 硫化锂建议关注赣锋锂业、天赐材料、恩捷股份、厦钨新能、有研新材等, 成膜设备建议关注纳科诺尔、璞泰来、赢合科技等。
- **风险因素:** 固态电池进展不及预期, 技术路线发生变更, 竞争格局加剧风险。

目 录

电解质：固态电池核心原材料，路线逐步过渡	4
电解质供应链：原材料、粉末与成膜工艺	11
投资建议	16
风险因素	17

表 目 录

表 1：固态电池用量及价值量测算（%）	4
表 2：固态电解质分类、对比	5
表 3：氧化物主要优化方案	6
表 4：QS 官网样品参数	7
表 5：主要硫化物性能指标	7
表 6：硫化物主要优化方案	8
表 7：硫化物主要企业及产品	9
表 8：聚合物主要类型及指标	10
表 9：电解质成熟度汇总	11
表 10：氧化物电解质原材料成本测算	12
表 11：硫化物电解质原材料成本测算	12
表 12：硫化锂生产工艺	14
表 13：主要硫化锂生产厂商布局	14
表 14：：卤化物物料成本测算	15
表 15：电解质粉体工艺	15
表 16：成膜工艺对比	16
表 17：设备参数对比	16
表 18：可比公司估值表	17

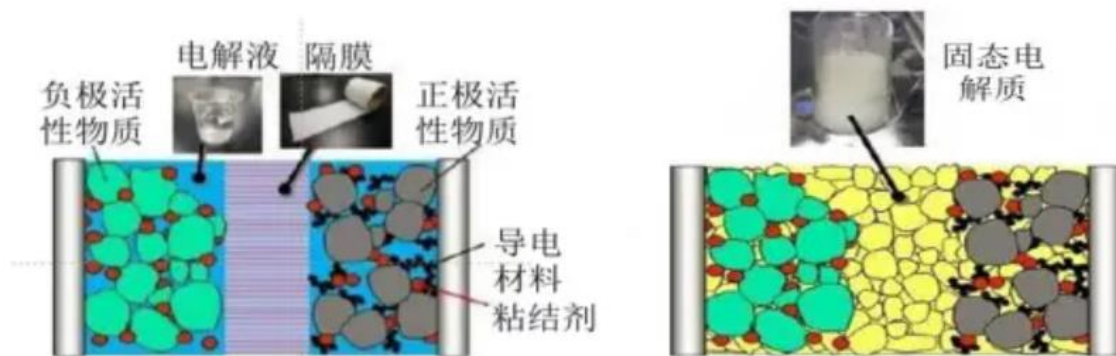
图 目 录

图 1：液态、固态电池结构对比	4
图 2：氧化物电解质分类	6
图 3：卤化物发展历程	10
图 4：氧化物工艺流程	11
图 5：硫化物生产工艺流程	12
图 6：硫化锂市场规模	13
图 7：各卤化物成本预测	15

电解质：固态电池核心原材料，路线逐步过渡

固态电解质作为固态电池区别于传统液态电池的核心部件，是固态电池发展的技术重点。全固态锂电池的电解质材料很大程度上决定了固态锂电池的各项性能参数，如功率密度、循环稳定性、安全性能、高低温性能以及使用寿命。

图 1：液态、固态电池结构对比



资料来源:国际电池展, 信达证券研发中心

固态电解质是增量价值最高的原材料之一。从远期估算价值量来看，固态电池正极价值量占比最高，我们预计单 GW 价值量 1.9 亿元，其次为硫化物电解质，我们预计单 GW 价值量为 8250 万元，金属锂负极目前造价较高，后续随锂价下跌、工艺进一步成熟，有望实现成本进一步降低，我们预计远期单 GW 价值量为 8000 万元。若使用氧化物、聚合物路线，我们预计电解质单 GW 价值量为 3960、3300 万元。从增量材料的角度，固态电解质、锂金属负极是相较于增量材料里面价值量最多的物料。

表 1：固态电池用量及价值量测算（%）

材料	细分	单 GW 用量（吨）	单 GW 价值量（现价，万元）	单 GW 价值量（远期，万元）
负极	锂金属负极	100	15000	8000
	氧化物/卤化物	330	13200	3960
电解质	聚合物	330	9900	3300
	硫化物	330	33000	8250
封装	铝塑膜	90（万平）	1800	1200
	高镍三元/富锂	1600	19200	19200
正极	锰基			
正极集流体	铝箔	200	640	640
	铜箔/多孔铜箔/	279	2500	2500
负极集流体	复合铜箔			

资料来源：能源学人，百川盈孚，电池中国 CEBA，各公司公告，SMM 新能源，鑫锂锂电，我的钢铁网，澎湃新闻，每日经济新闻、阿拉丁铝，产业链服务平台、东方财富网，我的电池网，同花顺，信达证券研发中心测算

目前固态电解质发展路线分化，主要分为氧化物、硫化物、卤化物、聚合物等。固态电解质需要满足诸多条件，包括高离子导率、宽电化学窗口、高锂离子选择性（即高锂离子迁移率）、具有优异的机械性能并且对环境友好。其中，离子导率是固态电解质最受关注的特性。固态电解质可分为无机陶瓷类电解质、有机聚合物电解质以及最近出现的复合电解质。无机陶瓷类电解质按照元素还可分为氧化物、硫化物、卤化物等。

表 2：固态电解质分类、对比

类型	材料	室温离子导率 / (S / cm)	优势	劣势
氧化物（晶态）	Perovskite $\text{Li}_{3.3}\text{La}_{0.56}\text{TiO}_3$	$10^{-5} \sim 10^{-3}$	高化学与电化学稳定性	柔性有限
	NASICON $\text{LiTi}_2(\text{PO}_4)_3$		机械性能好	电解质-电极固固界面阻力大
	LISICON $\text{Li}_{14}\text{Zn}(\text{GeO}_4)_4$		电化学窗口宽	目前批量生产成本较高
	石榴石型 $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$		成本低廉	
硫化物	$\text{Li}_2\text{S-P}_2\text{S}_5$	10^{-3} 左右	离子导率高	化学与电化学稳定性一般
	$\text{Li}_2\text{S-P}_2\text{S}_5\text{-MSx}$		有较好的机械强度和柔性	对水分敏感
聚合物	PEO	10^{-5} 左右	对金属锂电极稳定性好	热稳定性有限
	PAN		批量制备工艺较成熟	氧化电压低 (<4V)
氧化物（非晶态）薄膜电解质	LiPON	10^{-6}	对金属锂电极稳定性好	目前批量生产成本较高
			对含锂正极稳定性好	
氢化物	LiBH_4	$10^{-7} \sim 10^{-4}$	低界面电阻	对水分敏感
	$\text{LiBH}_4\text{-LiX}$ (X=Cl, Br, I)		对金属锂稳定	与电极相容性差
	$\text{LiBH}_4\text{-LiNH}_2$		有较好的机械强度和柔性	
	LiNH_2			
	Li_3AlH_6			
	Li_2NH			
卤化物	LiI	$10^{-3} \sim 10^{-5}$	对金属锂稳定	对水分敏感
	尖晶石型 Li_2ZnI_4		有较好的机械强度和柔性	氧化电位低
	反钙钛矿型 Li_3OCl			低离子导率
硼酸盐或磷酸盐	$\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$	$10^{-7} \sim 10^{-6}$	批量制备简单	
	Li_3PO_4		重复性好	离子导率相对较低
	$\text{Li}_2\text{O-B}_2\text{O}_3\text{-P}_2\text{O}_5$		耐久性好	

资料来源：田桂丽《固态锂电池发展现状与技术进展》，信达证券研发中心

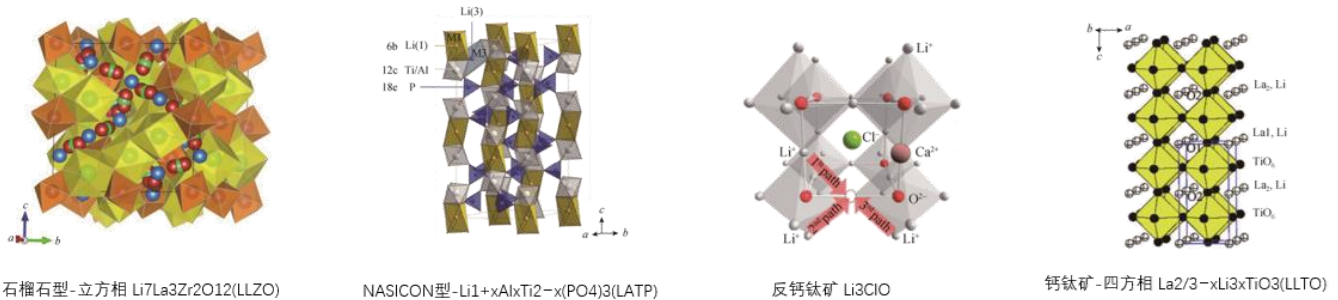
氧化物：目前性价比高。根据物质结构，氧化物固态电解质可分为晶态电解质（石榴石型、钙钛矿型、NASICON型）、非晶态电解质（反钙钛矿型、薄膜固态电解质 LiPON）。

- 1) 石榴石型：稳定性好，进展快。LLZO 具有立方相和四方相两种结构。其中，四方相 LLZO 离子电导率较低，即使通过热压烧结合成致密度较高的 LLZO，离子电导率仍然只有约 $2.3 \times 10^{-5} \text{ S/cm}$ 。立方相 LLZO 为高温相，在室温下不能稳定存在，但通过掺杂的方式可以使立方相 LLZO 在室温下保持稳定。
- 2) NASICON 型固体电解质具有离子电导率高、热稳定性好、机械性能高和对空气稳定的优点，在 NASICON 型固体电解质中， $\text{Li}+\text{xAlxTi}_2-\text{x}(\text{PO}_4)_3$ (LATP)、 $\text{Li}+\text{xAlxGe}_2-\text{x}(\text{PO}_4)_3$ (LAGP) 和 $\text{Li}_3\text{Zr}_2\text{Si}_2\text{PO}_{12}$ (LZSP) 等几

种固体电解质的性能较为优异。但不可忽视的是 LATP 对锂金属负极热力学不稳定。LATP 中的 Ti^{4+} 可被锂金属还原为 Ti^{3+} ，从而在电解质/锂负极界面形成具有电子导电性的界面层。

3) 钙钛矿型固体电解质($Li_xLa_{2/3-x}TiO_3$, LLTO)离子电导率可以达到 $10^{-3}S/cm$ ，并且可以掺杂多种离子，是一种具有很大发展潜力的固体电解质，但 LLTO 耐湿能力差，与 LATP 类似，LLTO 含有可变价的 Ti^{4+} ，与锂金属接触时仍面临被锂金属还原的问题。

图 2：氧化物电解质分类



资料来源：陈龙等《全固态锂电池关键材料——固态电解质研究进展》，信达证券研发中心

目前瓶颈：界面阻抗高。由于氧化物刚性较强，制成的薄膜易碎，很难集成到全固态锂电池内。同时，氧化物固态电解质烧结温度通常在 $1200^{\circ}C$ 以上，易造成锂流失、性能变差，可通过与聚合物复合或引入助剂等方法解决以上问题，主要解决方案如下：

表 3：氧化物主要优化方案

难点	解决方案	效果
界面阻抗高	构建界面修饰层	Al_2O_3 层 界面电阻降低 99%
		镁金属层 界面电阻降低 93%
		锆金属层 界面电阻降低 87%
加工性能差	在绝缘性纤维状多孔基材中	
	与聚合物复合	填充固体电解质 制备面积大于 1 cm^2 的电解质片
烧结温度高	引入助剂	Al_2O_3 Li_3ClO 烧结温度降低到 $1000^{\circ}C$ 以下 烧结温度降低到 $1000^{\circ}C$ 以下

资料来源：高玉李等《全固态锂电池技术的商业化和研究进展》，信达证券研发中心

技术成熟度：全固态氧化物 LiPON 已经较为成熟，用于制备薄膜电池，但 LiPON 离子电导率仅为 $10^{-6}\sim 10^{-5}S/cm$ ，并且制备工艺较为复杂，难以应用于大容量固态电池中。面向动力领域，清陶能源、天目先导、赣锋锂业、青岛大学郭向欣团队等已可吨级以上制备石榴石型、NASICON 型氧化物固体电解质，清陶能源可量产 LLTO 陶瓷粉体，成熟度在 6~8 之间。

产业化方面：国内半固态氧化物已经实现了装车，但全固态暂无明确进展，代表企业为 QuantumScape。

表 4：QS 官网样品参数

	QSE-5 B Sample
实测/预估数据	实测
是否完全封装	完全封装
是否有部件缺失	tabs 排除在外
体积状态	100% SoC
放电速率	C/5
放电温度	25 °C
压力	< 3.4 atm
框架	FlexFrame

资料来源: QuantumScape, 信达证券研发中心

硫化物：性能最佳，难度最大。相比于离子电导率集中在 10^{-4} ~ 10^{-3} S/cm 的氧化物固体电解质，部分硫化物电解质的离子电导率可达 10^{-2} S/cm 以上，并且，硫化物固体电解质具有更柔软的质地和更高的可塑性，易于实现全固态电池的组装。

表 5：主要硫化物性能指标

组分	类别	电导率(25 C)/S.cm-1
Li _{3.25} Ge _{0.25} P _{0.75} S ₄	晶态	2.2 X10 ⁻³
Li ₀ GeP ₂ Si ₂	晶态	1.2 X10 ⁻²
Li ₁₀ SiP ₂ S ₁₂	晶态	2.3 X 10 ⁻³
U ₇ P ₂ S ₈	晶态	6.3 X10 ⁻⁴
70U ₂ S+30P ₂ S ₅	玻璃陶瓷	3.2 X10 ⁻³
70U ₂ S+29P ₂ S ₅ +P ₂ S ₃	玻璃陶瓷	5.4 X10 ⁻³
Li ₂ S-P ₂ S ₅ -Ge _{0.35} Ga _{0.05} Se _{0.60}	玻璃陶瓷	1.5 X10 ⁻³
80U ₂ S+20P ₂ S ₅	玻璃态	1.7X10 ⁻⁴
70U ₂ S+30P ₂ S ₅	玻璃态	5.4 X10 ⁻⁵
42L ₁₂ S-28S ₁ S ₂ -30L ₁ I	玻璃态	1.8 X10 ⁻³
30L ₁₂ S+26B ₂ S ₃ +44L ₁ I	玻璃态	1.7 X10 ⁻³
Li ₂ S+S ₁ S ₂ +Li ₄ S ₁ O ₄	玻璃态	~10 ⁻³

资料来源: 李杨等《全固态锂离子电池关键材料研究进展》，信达证券研发中心

目前瓶颈：水氧稳定性差&界面问题。当其暴露于水氧中，会产生有害气体硫化氢，造成电解质结构破坏、电化学性能降低，致使其合成、储存、运输和后处理过程都严重依赖惰性气氛或干燥室，不仅增加环境控制复杂性还增加生产成本。主要通过开发新材料、涂覆或复合材料解决。

表 6：硫化物主要优化方案

难点		解决方案	效果
水氧稳定性差	开发新材料	由 Li ₂ S、P ₂ S ₅ 和 LiCl 制备	硫化氢产生量降低 67%
	材料涂覆	在电极-电解质层叠体四周涂覆氮化硅、氧化铝或氧化硅绝缘膜以阻隔湿气	湿气透过率降低 2 个数量级
		制备硫化物-PVDF-HFP 复合电解质	获得稳定的循环性能
	无机有机复合材料	制备硫化物-疏水聚苯乙烯复合电解质	硫化氢产生量降低约 73%
		减小阴极和电解质的粒径： 将 Li ₂ S 粒径 从 100nm 以上研磨到约 10nm	初始放电容量提高 25%
界面问题	增强界面接触	湿法涂层：LiPS ⁺ Cl ⁻ 和碳纤维（VGCF）/涂覆在阴极上	获得稳定的循环性能
	构建缓冲层提高化学/电化学稳定性	粘合剂：Li _{5.4} PS _{4.4} Cl ₆ 与 PTFE 混合	获得稳定的循环性能
		LLSTO 缓冲层	获得稳定的循环性能
		LNO 缓冲层	LNO 可以抑制 LGPS 与 LCO 的界面反应
	构建缓冲层改善空间电荷效应	LNO 缓冲层	初始放电容量提高 10%

资料来源：高玉李等《全固态锂电池技术的商业化和研究进展》，信达证券研发中心

技术成熟度：我们预计硫化物基固态电池正经历小试的技术认证,可以将硫化物固态电池的技术成熟度归于 4~5 级。

产业化方面：

国内在硫化物全固态锂电池产业链上有多家企业进行技术研发，上游材料生产商包括瑞道科技和中科固能，电池制造商包括宁德时代、蜂巢能源、屹锂新能源、高能时代和恩力动力等，下游整车企业包括中国一汽和长城汽车等。宁德时代首席科学家吴凯在 2024 年 4 月的国际电池技术交流会上表示，公司已建成 10Ah 全固态电池性能验证平台，并在正负极材料、工艺和制造设备等方面取得了技术进展。如今，宁德时代进一步进入 20Ah 试制阶段。

海外代表企业主要为日本丰田及本田、美国 SolidPower，韩国 LG、三星等。其中，丰田汽车预测其全固态电池大规模量产时间将推迟到 2030 年以后。SolidPower 已经生产出了首批固态电池 A 样品，SK On 目标在 2028 年实现固态电池的商业化，LG 新能源则预计 2030 年实现全固态电池量产。

表 7：硫化物主要企业及产品

国家	典型代表公司	种类	电解质组成	离子电导率/S、cm-1	电池：正极 电解质 负极	循环寿命
日本	丰田汽车	硫化物电解质	LGPS	1.2 X10 ⁻²	LCO LGPS In 金属	—
			含有 Li、P、S、I、Br 元素的电解质	5 X 10 ⁻³	—	—
			由 15LiBr+10LiI+75(0.75Li ₂ S+0.25P ₂ S ₅) 组成，具有 PS43 结构的电解质	3.2X10 ⁻³	—	—
韩国	LG 新能源	硫化物电解质+有机电解质	Li _{9.54} Si _{1.74} P _{1.44} S _{11.7} Cl _{0.3}	2.5 X10 ⁻²	LNO-LCO Li _{9.54} Si _{1.74} P _{1.44} S _{11.7} Cl _{0.3} LTO-石墨复合电极	循环 500 次，放电容量保持率 75% (100°C)
			Li ₂ S-P ₂ S ₅ -LiCl	3.2X10 ⁻³	—	—
			Li ₂ S+P ₂ S ₅ +LiBH ₄	3.3 X10 ⁻²	NCM811 电解质 Li-Al 合金	—
			LGPS+PVDF-HFP+ LiClO ₄	—	NCM622 LGPS+PVDF-HFP+LiClO ₄ 石墨	循环 500 次，放电容量保持率 90% (55°C)
美国	SolidPower	硫化物电解质	Li ₆ PS ₅ Cl	—	NCM811 Li ₆ PS ₅ Cl 硅	循环 500 次以上，放电容量保持率 80% (25°C)
			Li ₆ PS ₅ Cl	—	LiNi _{0.9} Co _{0.05} Mn _{0.05} O ₂ Li ₆ PS ₅ Cl Ag-C 负极	循环 1000 次，放电容量保持率 89% (60°C)
			Li ₃ PS ₄ +LiBH ₄	8.2X10 ⁻³	—	—
			Li ₄ SbS ₄ I	5.25 X10 ⁻⁴	—	—
中国	中科固能	硫化物	Li _{6.8} Si _{0.8} AS _{0.2} S ₅ I	1.04 X10 ⁻²	Ti ₂ SHLi _{6.8} Si _{0.8} AS _{0.2} S ₅ I Li-In 合金	62500 次 (°C)
			Li ₃ InCl ₆ +Li ₆ PS ₅ Cl	—	NCM90-Li ₃ InCl ₆ Li ₃ In ₆ /Li ₆ PS ₅ Cl Li 金属	循环 30000 次，放电容量保持率大于 70%
			Li _{5.5} S _{4.5} PCl _{1.5} P	1.10 X10 ⁻²	—	—
			Li ₆ PS ₅ Cl	—	NCM811 Li ₆ PS ₅ Cl Li 金属+石墨+氧化锌	循环 108 次，放电容量保持率 80% (50°C)

资料来源：高玉李等《全固态锂电池技术的商业化和研究进展》，信达证券研发中心

聚合物：产业化最早，但性能有瓶颈。聚合物固态电解质柔韧性好、易制备，但存在离子电导率低和耐氧化性差等问题。因此，将聚合物固态电解质与惰性或活性无机填料以及锂盐相结合是提升聚合物基固态电池性能的常用手段。

表 8：聚合物主要类型及指标

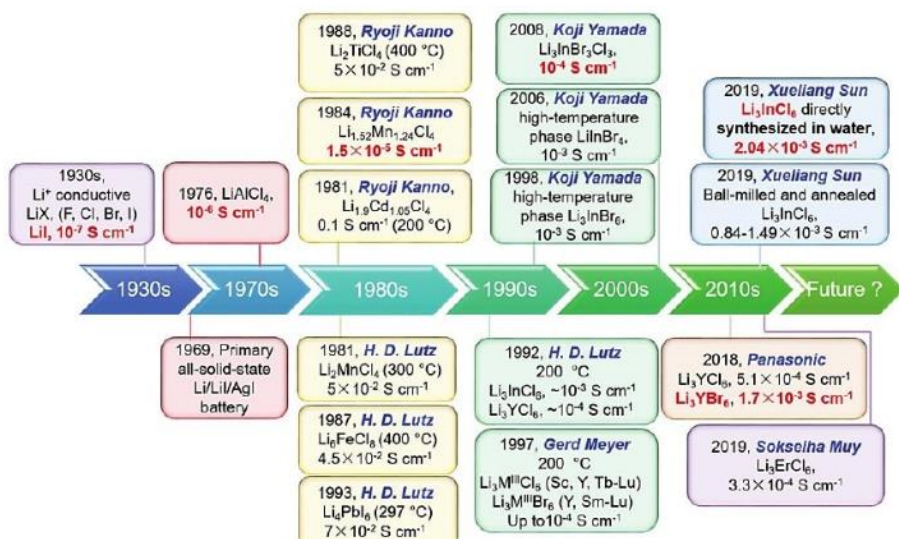
聚合物电解质	基质类型	离子电导率 (S/cm)
PEO+Novolac+ LiClO ₄	共混	10 ⁻³ (25 °C)
(PEO-PMMA)/ [LiCF ₃ SO ₃]	共混	2.02×10 ⁻⁵ (30 °C)
P(EO-PO)/[LiTFSI]	共聚	10 ⁻³ (80 °C)
(PEO-PS)/[LiTFSI]	共聚	>10 ⁻⁴ (60 °C)
(PEO-Tetraglyme)/ [LiTFSI]	交联	10 ⁻⁴ (25 °C)
POSS-EO	交联	9.5×10 ⁻⁵ (30 °C)

资料来源：陈龙等《全固态锂电池关键材料—固态电解质研究进展》，信达证券研发中心

技术成熟度：由于 PEO 电解质开发历史悠久，在不同领域具有广泛应用，因此，PEO 电解质的技术成熟度可以归为 8~9 级。类似地，用于原位聚合的材料，如碳酸亚乙烯酯(VC)、DOL 以及聚乙二醇二丙烯酸酯(PEGDA)等作为电解液添加剂、溶剂或固化剂等在不同行业或领域实现产业化，因此将其技术成熟度归为 8~9 级。

产业化进展：聚合物固态电解质最早实现应用，但电导率低、安全性差且室温下无法正常使用等问题限制了其进一步发展。欧洲是最早推动聚合物全固态锂电池产业化的地区，个别中美企业选择该路线。法国 Bolloré 是第一家也是目前唯一一家真正实现聚合物全固态锂电池量产的公司；累计投入 3000 辆搭载 30kWh 全固态锂电池的电动汽车；子公司 BlueSolutions，2018 年起为戴姆勒大巴提供全固态锂电池；目前已开发出能够在室温下应用的全固态锂电池。美国初创公司 Factorial Energy，2023 年宣布 200MWh 聚合物固态锂电池中试线正式投产，成为目前美国产能最大的固态锂电池产线；同年公开 100Ah 电芯，并已向斯特兰提斯 (Stellantis) 汽车公司送样测试。

卤化物：近年兴起的路线，具备发展潜力。虽然卤化物固态电解质的发展时间很长，但是与其同年代发现的其他类型固态电解质材料相比，它较低的离子电导率使得卤化物固态电解质在过去十几年中的发展很缓慢。直到 2018 年,Asano 等人取得了重大发现,即 Li₃YCl₆和 Li₃YBr₆ 卤化物固态电解质的室温离子电导率分别为 5.1×10⁻⁴Scm⁻¹ 和 1.7×10⁻³Scm⁻¹。目前的卤化物具有良好的离子电导率和较低的成本，被认为是具备潜力的固态电解质材料之一。首先，卤化物固态电解质表现出宽电化学窗口，氟基固态电解质可以实现超过 4 V (vs. Li/Li+) 的氧化电位，而氟基固态电解质氧化电位高达 6 V (vs. Li/Li+)。

图 3：卤化物发展历程


资料来源：中国粉体网，信达证券研发中心

技术成熟度：针对卤化物电解质的制备技术，目前尚缺乏全面的系统性研究，导致实验所得材料性能与理论预测之间存在显著差异。

产业化进展：目前卤化物国内尝试与其他材料复配，如亿纬锂能、清陶。2024 年 6 月 18 日，亿纬锂能在首届锂

电池大会上披露全固态电池发展规划。在动力电池领域，亿纬锂能选择了硫化物和卤化物复合固态电解质技术路线。

表 9：电解质成熟度汇总

电解质种类	电解质名称	技术成熟度等级
氧化物	LLZO（石榴型）	6~7
	LATP（NASICON 型）	7~8
	LLTO（四方相）	6~7
	LiPON	8~9
	LZSP	4
硫化物	LGPS	4~6
	LPSCI	4~6
	LPS314	4~6
	LPS7311	4~6
聚合物	PEO	8~9
	可聚合	8~9
卤化物	Li-M-Cl(M 为 In、Y、Zr、Ta、La 等)	4

资料来源：陈昕等《当前固体电解质与固态电池技术成熟度分析》，信达证券研发中心

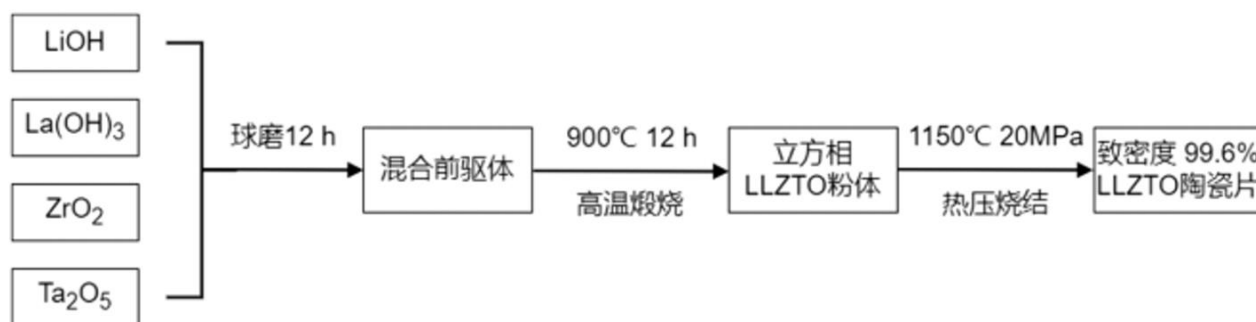
电解质供应链：原材料、粉末与成膜工艺

固态电解质生产流程为原材料→粉末生成→电解质膜合成。

流程 1：原材料选择

氧化物：以 LLZTO 为例，其原材料主要为氢氧化锂、氢氧化镧、氧化锆、氧化钽，通过球磨混合后煅烧得到分体，后续采用热压烧结形成电解质膜。

图 4：氧化物工艺流程



资料来源：陈昕等《当前固体电解质与固态电池技术成熟度分析》，信达证券研发中心

1) **原材料：**氧化锆约占 LLZO 烧结前质量的 25%，氧化镧约占 45%，氢氧化锂约占 35%。从价值量来看氧化镧约 3900 元/吨，而氧化锆约 3.2 万元/吨，显著的增量为氧化锆，氧化物主要物料成本为 4.65 万元/吨。

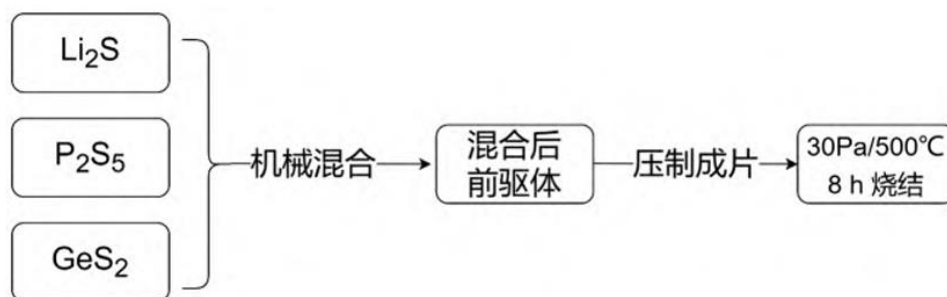
表 10：氧化物电解质原材料成本测算

	质量占比	单价（元/吨）	单吨物料成本（元/吨）
氧化锆	25%	32000	8000
氢氧化锂	35%	105000	36750
氧化铜	45%	3900	1755
物料成本小计（元/吨）			46505

资料来源：生意社、我的钢铁、金融界，信达证券研发中心测算

氧化锆供应集中且成熟，技术壁垒较高。目前全球氧化锆生产企业主要集中在少数国家，纳米复合氧化锆生产企业主要集中在日本和欧美，2020 年，日本第一稀元素和法国圣戈班的产能占比均为 21.99%，国瓷材料、东方锆业是全球高纯氧化锆的核心供应商，三祥新材目前已规划年产 10 万吨氧氯化锆及 2000 吨纳米氧化锆。

硫化物：LGPS 的合成路径如图所示，将所需前驱体硫化锂等进行机械混合 30min 后压制成片，然后置于 30Pa 的石英管中密封，在 500℃下烧结 8h 即可制成电解质粉体。

图 5：硫化物生产工艺流程


资料来源：陈昕等《当前固体电解质与固态电池技术成熟度分析》，信达证券研发中心

原材料：硫化锂占硫化物成本约 80%，制备工艺难度大，是硫化物核心原材料，硫化锂目前制备成本高，其余材料我们预计远期价格保持稳定。

表 11：硫化物电解质原材料成本测算

	质量占比	单价（现货，万元）	单价（远期，万元）	物料成本（现货，万元）	物料成本（远期，万元）
Li ₂ S	34.5%	200	30	69.10	10.36
P ₂ S ₅	41.8%	15	15	6.27	6.27
LiCl	23.9%	10	10	2.39	2.39
单吨物料成本（万元）				77.76	19.02

资料来源：高工锂电、陈昕等《当前固体电解质与固态电池技术成熟度分析》，北京紫超知新科技有限公司《硫化电解质及其制备方法、复合电解质膜用组合物、制备复合电解质膜的方法、锂离子电池》，生意社，信达证券研发中心测算

硫化锂：下游应用单一，厂商处于起步赛跑中。根据贝哲斯咨询，2024 年全球硫化锂行业市场规模 1.67 亿美元，2024-2029 复合年增长率为 68.53%，下游以电解质为主。目前硫化锂厂商基本处于起步阶段。

图 6：硫化锂市场规模



资料来源：贝哲斯咨询，信达证券研发中心

硫化锂工艺存在分化，或成为后续成本差异化关键。目前布局硫化锂主要采用球磨、液态、碳化还原法等，球磨法工艺简单，但转化率较低。溶剂法合成充分、能耗较低，但对反应条件高，不环保，理论成本更低。碳还原法产品均匀、性能较好、反应容易控制，但工艺尚未成熟，不稳定。

表 12：硫化锂生产工艺

路线	工艺原理	特点
球磨法	在惰性气氛下，将单质硫和金属锂/氯化锂按比例混合后进行机械球磨反应得到硫化锂	工艺简单、环境友好、无废液产生。缺点：原料成本高(氯化锂)、反应时间长、转化率较低，所得产品存在杂质如多硫化锂等，不易提纯，产业化设备不易选型。
溶剂法	将锂/锂化合物和硫/硫化物在溶剂介质中混合反应制备硫化锂。溶剂选用有机溶剂或液氨；有机溶剂多选用脂肪烃、芳香烃或醚溶剂等，比如乙醇、己烷、甲苯、乙醚、四氢呋喃、氮甲基吡咯烷酮等。	液相反应充分完全，不易残留杂质，产品提纯容易；不需要高温处理，能耗较小；工艺简单，工况较易控制。缺点：有机溶剂易燃、易爆、易挥发，环境污染严重，不易回收；工况危险性高，较难控制。
高温、高压法	在惰性/还原保护气氛下，高温、高压使锂/锂化合物和硫/硫化物通过还原或气相等反应制备硫化锂。	工艺流程简单，无有害气体产生，且有效利用了高温高压密闭反应的优势，避免有害溶剂泄漏，大大缩短了制备流程。缺点：高温、高压，工况控制不易，设备选型要求高，增加了反应过程及后处理的风险。
直接碳复合法	利用碳的强还原性，在制备硫化锂的反应中直接加入碳材料/碳材料前驱体，一步法合成分散均匀、性能良好、形貌可控的硫化锂/碳复合材料。	反应更易控制，解决了因硫化锂遇水、氧敏感而导致的生产和储运困难的问题；提高了产品收率和性能，改善了传统硫化锂/碳复合材料制备工序复杂的现状，提高了活性材料在锂硫电池正极中的分散性，提升了锂硫电池的电化学性能。缺点：工艺技术尚需优化完善，产品质量不稳定，复合材料形貌可控性较差。

资料来源：中国粉体网，信达证券研发中心

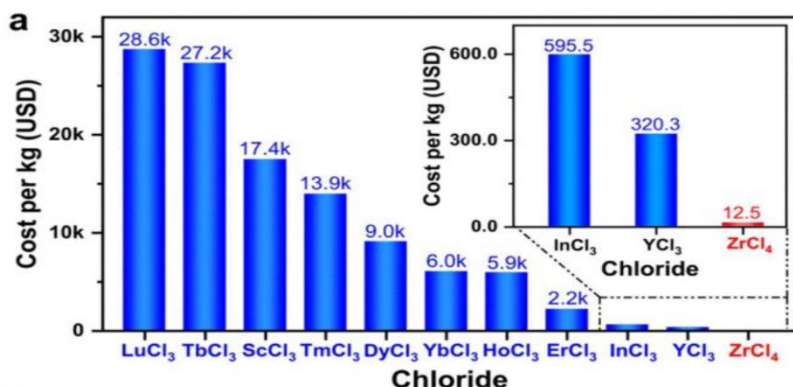
表 13：主要硫化锂生产厂商布局

厂商	布局	原材料	生产工艺路线	成本目标（预估）
赣锋锂业	持续开展技术创新与工艺升级，开发并优化硫化锂材料	硫磺+金属锂	球磨法	20 万元/吨
天赐材料	计划在 2025 年建设中试产线，做小批量的生产应用。	-	-	-
有研新材	公司动力电池用固态电解质材料还处在小批量供货阶段	氢氧化锂/碳酸锂， 硫化氢/二硫化碳	碳热还原法+卤 化铵提纯	-
厦钨新能	公司聚焦于正极材料与固态电解质的匹配问题，在卤化物和硫化物全固态电池均实现初期量产	-	气相沉积	20 万元/吨
恩捷股份	湖南恩捷与中南大学技术团队自 2021 年起开始联合研发低成本、高纯度硫化锂产品，目前湖南恩捷硫化锂产品已完成吨级小试线产能建设和稳定运行，已搭建完成百吨级硫化锂中试生产线。	-	碳热还原法	-
日本三井	-	硫酸锂+碳材料	碳热还原法	现货约 200 万元/吨

资料来源：界面新闻，中国能源报，金融界，格隆汇，恩捷股份，三井金属矿业株式会社《硫化锂及其制造方法以及硫化物固体电解质的制造方法》，雄安稀土功能材料创新中心有限公司；有研稀土新材料股份有限公司；有研稀土高技术有限公司《一种固态电解质用硫化锂粉体及其制备方法》，信达证券研发中心

卤化物：与硫化物固态电解质类似，氯化物固态电解质的生产和储存对环境有着严苛的要求，因为该材料耐潮性差，且因包含大量 Y、Tb-Lu、Sc 和 In 等稀土元素，制备成本居高不下。中国科学技术大学马骋教授课题组在 Nature Communications 上发表了有关固态电解质的最新研究成果，他们设计并合成了一种全新的氯化物固态电解质——氯化锆锂（ Li_2ZrCl_6 ）。目前最廉价的卤化物固态电解质 Li_3YCl_6 在厚度低至 50 微米（该厚度是对现有工艺水平比较大的挑战）时，原材料成本仍高达 23.05 美元/平方米。

图 7：各卤化物成本预测



资料来源：Nature Communications，信达证券研发中心

表 14：：卤化物物料成本测算

	质量占比	单价 (万元/吨)	主要原材料成本 (万元/吨)
氯化锂	26.7%	10	2.7
四氯化锆	73.3%	2	1.5
物料成本合计			4.1

资料来源：生意社，阿拉丁，《卤化物固态电解质及其制备方法》，信达证券研发中心测算

流程 2：粉末制备：对于氧化物来讲，干法合成较为成熟，产业化难度小。硫化物、卤化物目前采用干法的较多，但湿法具有更强的规模化潜力。

表 15：电解质合成工艺

	氧化物	硫化物	聚合物	卤化物
干法	高能球磨	熔融法、高能球磨法		球磨工艺为目前研究中卤化物电解质合成的主流工艺
湿法	液相法成本高、产业化难度高	虽然由熔融和高能球磨法制备的硫化物电解质已经能表现出较高的离子电导率，但是这两种方法耗时长、耗能高，且难以进行大规模推广和生产，因此有研究者推出液相法，在液体中制备固体电解质，可以缩短反应时间	聚合工艺	部分卤化物可以直接在液相中反应，甚至直接在水溶液中反应得到。相比固相反应，液相反应大幅度缩短了混合以及反应时间，且反应温度较低，适合大批量工业生产

资料来源：陈昕等《当前固体电解质与固态电池技术成熟度分析》，信达证券研发中心

流程 3：成膜工艺——短期湿法工艺成熟，干法有望逐步替代。固体电解质成膜工艺是全固态电池制造的核心。固体电解质膜取代液态电池隔膜、电解液，为全固态电池独有结构。固体电解质膜影响电池性能：1) 固体电解质膜过厚→降低全固态电池能量密度&提高电池内阻；2) 固体电解质膜过薄→机械性能较差→电池短路根据是否采用溶剂可将工艺分为湿法工艺与干法工艺，各有优劣。

表 16：成膜工艺对比

工艺	细分	详情	优点	缺点
湿法工艺	模具支撑成膜	模具支撑成膜常被用于制备聚合物电解质膜及复合电解质膜，将固体电解质溶液倾倒在模具上，随后蒸发溶剂，从而获得固体电解质膜，通过调节溶液的体积和浓度来控制膜的厚度。	湿法工艺成膜操作简单，工艺成熟，易于规模化生产，	采用的溶剂可能存在毒性大，成本高的缺点，且残留的溶剂会降低固体电解质膜的离子电导率。
	正极支撑成膜	正极支撑成膜常用于无机电解质膜及复合电解质膜的制备，将固体电解质溶液直接浇在正极表面，蒸发掉溶剂后，在正极表面形成固体电解质膜。		
	骨架支撑成膜	骨架支撑常用于复合电解质膜的制备，将固体电解质溶液注入骨架中，蒸发掉溶剂后，形成具有骨架支撑的固体电解质膜。		
干法工艺		干法工艺是将固体电解质与聚合物粘结剂分散成高粘度混合物，然后对其施加足够的压力使其成膜。	不采用溶剂，直接将固体电解质和粘结剂混合成膜，不需要烘干，具有成本优势；干法成膜无溶剂残留，可获得更高离子电导率	干法工艺形成的固体电解质膜通常厚度偏大，会降低全固态电池的能量密度

资料来源：翟惠民等《全固态电池生产工艺分析》，信达证券研发中心

硫化物、卤化物更适配干法，干法成熟后具有降本空间。1) 湿法混料是常用的复合电极制备方法，但该方法会带来一些问题，如硫化物与有机溶剂之间的副反应、电子绝缘聚合物引发的高界面阻抗等。2) 干法电极省去溶剂、部分加工工序、更少的占地面积，据纳科诺尔公开交流，预计可帮助电池制造成本可下降 10% 以上。

干法电极的制备以粘接剂原纤化为主流方法，包括粉料混合、纤维化、辊压成型三大关键环节。前两道工序主要设备为破碎机和混合机，第三道工序为辊压机，为整个流程的核心。尤其是干法正极，正极粉体材料容易掉落，需要更大外部压力来抵消粉末间的复合力。国内干法电极设备工作压力普遍可达到 50T 以上，纳科诺尔干法电极设备最大可达到 70T。同时对宽幅、走速也有一定要求。

表 17：设备参数对比

	PNT	纳科诺尔	赢合科技	璞泰来（嘉拓）	曼恩斯特
地区	韩国	中国	中国	中国	中国
走速	-	50m/min	-	40m/min	65m/min
宽幅	-	450mm	-	450mm	-
压力	-	70T	-	-	-

资料来源：高工锂电，信达证券研发中心

投资建议

固态电池产业化加速推进，路线、供应链正在逐步走向成熟，关注半固态氧化物、聚合物厂商，全固态关注卤化物、硫化物布局厂商，建议关注宁德时代等。电解质原材料供应商建议关注锆基东方锆业、三祥新材，硫化锂建议关注赣锋锂业、天赐材料、恩捷股份、厦钨新能、有研新材等，设备建议关注纳科诺尔、璞泰来、赢合科技等。

表 18：可比公司估值表

股票代码	名称	股价 (元)	归母净利润（百万元）				EPS				PE			
			2023	2024E	2025E	2026E	2023	2024E	2025E	2026E	2023	2024E	2025E	2026E
300750	宁德时代*	269	44121	50393	63406	77890	10.0	11.5	14.4	17.7	27	23	19	15
002460	赣锋锂业	36	4947	333	1679	2740	2.5	0.2	0.8	1.4	14	180	45	26
002709	天赐材料	21	1891	615	1420	2122	1.0	0.3	0.7	1.1	21	69	30	19
002812	恩捷股份	33	2527	651	1045	1520	2.6	0.7	1.1	1.6	13	47	30	21
600206	有研新材	18	226	213	334	436	0.3	0.3	0.4	0.5	61	61	46	37
832522	纳科诺尔	62	124	182	217	262	1.3	1.6	1.9	2.3	48	39	33	27
603659	璞泰来	18	1912	1873	2418	2962	0.9	0.9	1.1	1.4	20	20	16	13
300457	赢合科技	21	554	948	1317	1632	0.9	1.5	2.0	2.5	24	14	11	9
002167	东方锆业	9	-78	-21	-32	-29	-0.1	0.0	0.0	0.0				
603663	三祥新材	23	79	137	196	251	0.2	0.3	0.5	0.6	117	78	47	39

资料来源：ifind，信达证券研发中心，注：标*公司盈利预测数据来自信达电新团队，股价为 2025 年 2 月 26 日收盘价

风险因素

固态电池进展不及预期：目前全固态电池技术尚未成熟，后续放量存在不确定性。

技术路线发生变更：目前全固态电池电解质主要为硫化物、卤化物路线，如出现技术路线变更，则对行业影响较大。

竞争格局加剧风险：布局电解质、设备公司较多，未来存在竞争加剧风险

研究团队简介

武浩，新能源与电力设备行业首席分析师，中央财经大学金融硕士，7 年新能源行业研究经验，2020 年加入信达证券研究所，负责电力设备新能源行业研究。2023 年获得新浪金麒麟光伏设备行业菁英分析师第三名。研究聚焦细分行业及个股挖掘。

孙然，新能源与电力设备行业分析师，山东大学金融硕士，2022 年加入信达证券研发中心，负责工控及机器人行业研究。

姚云峰，新能源与电力设备行业研究员，复旦大学硕士，曾任职于中泰证券、国金证券，目前主要从事新能源锂电池赛道研究，2024 年加入信达证券研究所。

分析师声明

负责本报告全部或部分内容的每一位分析师在此申明，本人具有证券投资咨询执业资格，并在中国证券业协会注册登记为证券分析师，以勤勉的职业态度，独立、客观地出具本报告；本报告所表述的所有观点准确反映了分析师本人的研究观点；本人薪酬的任何组成部分不曾与，不与，也将不会与本报告中的具体分析意见或观点直接或间接相关。

免责声明

信达证券股份有限公司（以下简称“信达证券”）具有中国证监会批复的证券投资咨询业务资格。本报告由信达证券制作并发布。

本报告是针对与信达证券签署服务协议的签约客户的专属研究产品，为该类客户进行投资决策时提供辅助和参考，双方对权利与义务均有严格约定。本报告仅提供给上述特定客户，并不面向公众发布。信达证券不会因接收人收到本报告而视其为本公司的当然客户。客户应当认识到有关本报告的电话、短信、邮件提示仅为研究观点的简要沟通，对本报告的参考使用须以本报告的完整版本为准。

本报告是基于信达证券认为可靠的已公开信息编制，但信达证券不保证所载信息的准确性和完整性。本报告所载的意见、评估及预测仅为本报告最初出具日的观点和判断，本报告所指的证券或投资标的的价格、价值及投资收入可能会出现不同程度的波动，涉及证券或投资标的的历史表现不应作为日后表现的保证。在不同时期，或因使用不同假设和标准，采用不同观点和分析方法，致使信达证券发出与本报告所载意见、评估及预测不一致的研究报告，对此信达证券可不发出特别通知。

在任何情况下，本报告中的信息或所表述的意见并不构成对任何人的投资建议，也没有考虑到客户特殊的投资目标、财务状况或需求。客户应考虑本报告中的任何意见或建议是否符合其特定状况，若有必要应寻求专家意见。本报告所载的资料、工具、意见及推测仅供参考，并非作为或被视为出售或购买证券或其他投资标的的邀请或向人做出邀请。

在法律允许的情况下，信达证券或其关联机构可能会持有报告中涉及的公司所发行的证券并进行交易，并可能会为这些公司正在提供或争取提供投资银行业务服务。

本报告版权仅为信达证券所有。未经信达证券书面同意，任何机构和个人不得以任何形式翻版、复制、发布、转发或引用本报告的任何部分。若信达证券以外的机构向其客户发放本报告，则由该机构独自为此发送行为负责，信达证券对此等行为不承担任何责任。本报告同时不构成信达证券向发送本报告的机构之客户提供的投资建议。

如未经信达证券授权，私自转载或者转发本报告，所引起的一切后果及法律责任由私自转载或转发者承担。信达证券将保留随时追究其法律责任的权利。

评级说明

投资建议的比较标准	股票投资评级	行业投资评级
本报告采用的基准指数：沪深 300 指数（以下简称基准）； 时间段：报告发布之日起 6 个月内。	买入 ：股价相对强于基准 15% 以上；	看好 ：行业指数超越基准；
	增持 ：股价相对强于基准 5%~15%；	中性 ：行业指数与基准基本持平；
	持有 ：股价相对基准波动在±5% 之间；	看淡 ：行业指数弱于基准。
	卖出 ：股价相对弱于基准 5% 以下。	

风险提示

证券市场是一个风险无时不在的市场。投资者在进行证券交易时存在赢利的可能，也存在亏损的风险。建议投资者应当充分深入地了解证券市场蕴含的各项风险并谨慎行事。

本报告中所述证券不一定能在所有的国家和地区向所有类型的投资者销售，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顾问的意见。在任何情况下，信达证券不对任何人因使用本报告中的任何内容所引致的任何损失负任何责任，投资者需自行承担风险。