

固态电池系列 3：全固态电池工程化核心难点在哪？

报告要点

全固态电池工程化核心难点在于压力的处理。从第一性原理角度看，离子传导的前提是材料接触，依赖于一定压力下实现，这分为初始压力、堆叠压力。电池充放电中的膨胀在全固态时代下成为难点，且负极材料迭代方向上是膨胀性更大的硅基/金属锂，对电池的稳定运行带来更大挑战。

等静压是全固态电池初始加压关键，潜力较大。全固态电池生产工艺中，核心在前段的极片辊压、中段的等静压、后段的高压化成等环节，其中等静压可实现较大、均应的压力，是致密化方案核心，其关键在连续化生产、设备大型化等，当前处于完善期。

低堆叠压力是保持全固态电池良好运行关键，本质是对界面问题的改善，主要通过材料、结构设计两方面实现。从材料上看，一方面，在硫化物电解质之外掺杂材料改善界面控制，另一方面采用硫化物基复合电解质等是潜力较大方案，从而实现电池“减压”运行。从结构设计上看，电池外部压强和轻量化之间的平衡是关键。

全固态预计以 2027 年示范性装车为节点，消费类（EV toI 和人形机器人等）场景或将在此前开启示范应用。

从投资机会上，建议关注辊压、等静压、高压化成等设备，以及硫化物、复合电解质的卤化物等方向。

风险提示：

- 1、硫化物、卤化物等电解质材料降本不及预期。
- 2、全固态电池设备规模化和相关工艺进展不及预期。
- 3、假设全固态电池产业进度超预期，则我们预期的量产时间将提前；反之则推迟。
- 4、卤化物和硫化物仍处于产业早期阶段，技术基本收敛，但未来是否有新材料，具备不确定性。

电气设备

评级： 看好

日期： 2025.12.01

分析师 张鹏

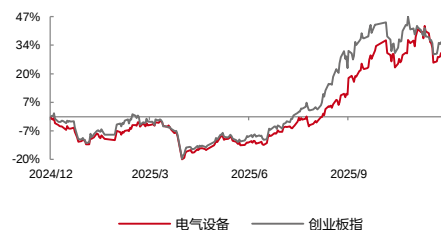
登记编码：S0950523070001

☎：18820232934

✉：zhangpeng1@wkzq.com.cn

行业表现

2025/11/28



资料来源：Wind，聚源

相关研究

- 《25Q3 风电业绩总结：盈利趋势向好 “两海” 指引方向》(2025/11/25)
- 《25Q3 光伏业绩总结：反内卷带来行业曙光》(2025/11/18)
- 《2025Q3 锂电财报点评：产业供需紧平衡有望延续》(2025/11/17)
- 《2025H1 锂电财报点评：新周期有望开启，关注固态电池等新技术》(2025/9/12)
- 《全球储能市场盘点及中长期展望》(2025/9/5)
- 《晶硅电池铜代银方案还有多久产业化？》(2025/8/21)
- 《风驰“电车”系列 4：储能卡点之电池日历寿命如何突破？》(2025/7/24)
- 《固态电池系列 2：从底层逻辑上看全固态电池难点和产业节奏》(2025/7/14)

内容目录

一、全固态电池工程化核心难点在于压力的处理	4
二、全固态电池的初始加压	6
2.1 前道工序中辊压设备是关键	6
2.2 等静压是中道工序加压中潜力较大的方案	7
2.3 高压化成是后道工序关键	10
三、全固态电池的堆叠压力	11
3.1 界面材料改性实现“减压”	12
3.2 电池结构设计保持堆叠压力稳定性	16
四、相关产业链和产业进度	17
风险提示	19

图表目录

图表 1：从本征角度看全固态电池的难点和改进措施	4
图表 2：典型的固态电池由正极、负极和固态电解质组成	5
图表 3：全固态电池需要处理制备压力和堆叠压力	5
图表 4：负极材料未来迭代方向是硅基/金属锂，膨胀性更大	5
图表 5：全固态和传统液态电池工艺对比	6
图表 6：干法多辊双面成膜复合系统	7
图表 7：辊压、等静压等均是致密化手段	7
图表 8：全固态电池等静压机理	7
图表 9：等静压电池帮助材料致密化	8
图表 10：温等静压下材料孔隙率（0.15%）比冷等静压（1.8%）低	8
图表 11：等静压工艺参数情况	8
图表 12：Quintus 等静压机参数	9
图表 13：典型温等静压工艺各道工序流程及加工时间	9
图表 14：先导智能固态等静压设备参数	9
图表 15：等静压设备体积的增大带动成本快速降低	10
图表 16：设备大型化提升电池处理年产能	10
图表 17：等静压设备企业关键参数等进展	10
图表 18：一体式卧式高温夹具机	11
图表 19：全固态电池各个步骤中需要不同的压力	12
图表 20：合适的堆叠压力下电池有较好的循环特征	12

图表 21：不同固态电解质特性不一，硫化物基于电导率占优，潜力较大	12
图表 22：碘掺杂硫化物电解质后外部 0 压力下具备较好循环性.....	13
图表 23：碘掺杂硫化物电解质组装的电池有较低的堆叠压力	13
图表 24：NCA DPF LPSC Li 电池在低压力下循环表现良好	14
图表 25：具有 Ag-C 纳米复合材料层的电池表现出较好循环性能	14
图表 26：基于电解质材料的不同类型电池堆叠压力情况（部分）	14
图表 27：部分卤化物电解质可在较低堆叠压力下工作	15
图表 28：部分卤化物电解质原材料成本对比	15
图表 29：复合电解质方案有较多的产业应用	16
图表 30：全固态电池采用低拘束力方案	17
图表 31：液态电池预紧力要求很小，但也可以帮助降低电阻	17
图表 32：部分全固态电池企业电池结构层面的外压力方案等	17
图表 33：全固态电池和固液混合电池产业进度对比	18
图表 34：部分全固态产业公司情况介绍	18

写在前面：此前我们发布的报告《固态电池系列 2：从底层逻辑上看全固态电池难点和产业节奏》从第一性原理角度分析指出全固态的核心难点在于界面问题的处理，从产业节奏上，或处于新能源车 2009-2010 年阶段(第一阶段、元年)。

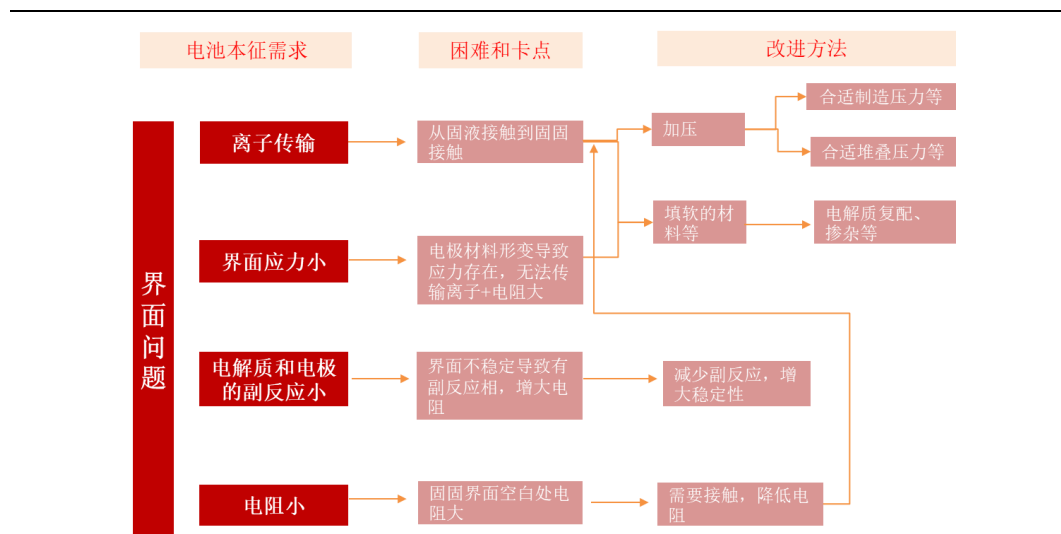
站在当下，从全固态电池的材料和工程化两大方面卡点看，材料的核心问题在于降本，工程化的核心问题在于压力的处理，后者是本文研究的重点。

一、全固态电池工程化核心难点在于压力的处理

从第一性原理角度看，离子传导的前提是材料接触，依赖于一定压力下实现。由于全固态电池是固体和固体的接触，不同于液态电池的固体和液态间有效接触。其难点在于如何用一固体和固体的接触替代原先固体和液体的有效接触，达到工业化的循环、倍率、稳定性等电池性能要求。对于固固材料接触界面，主要有离子传输、界面应力小、电解质和电极副反应小、电阻小等需求，为了顺利实现工业化的传导目标，保持一定压力下的紧密接触是关键，主要赖于设备和材料两方面实现。

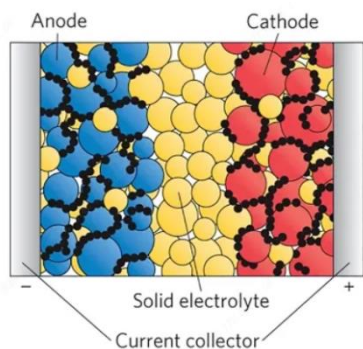
压力分为初始加压和堆叠压力两个问题。由于电池在日常循环中的“呼吸”造成的膨胀，除了初步制造中保持固固有效接触之外，保持使用中的良好的固固接触难度也很大。本质上看，电池性能的发挥前提是固固界面的良好有效接触，这分为两个问题，一个是电池制造中实现良好接触，电极制备压延过程中的外部压力通常为几十、几百 MPa，甚至几个 GPa，称为制备压力，即解决一次加压问题；另一个在使用中在不断的膨胀中实现良好加压，从而保持固体和固体间的良好接触，即解决堆叠压力问题，这影响电极和电解质的孔隙率和离子电导率等。

图表 1：从本征角度看全固态电池的难点和改进措施



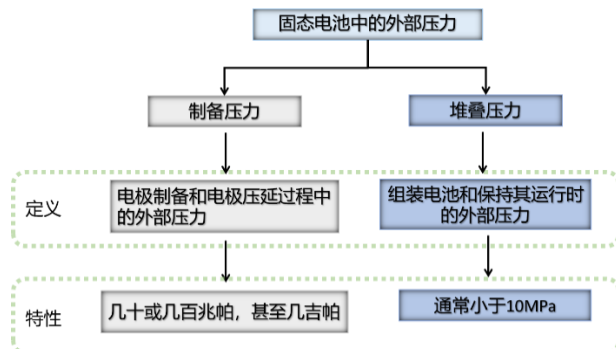
资料来源：五矿证券研究所整理

图表 2: 典型的固态电池由正极、负极和固态电解质组成



资料来源:《A review of the effect of external pressure on all-solid-state batteries》Fengyu Zhang 等, 五矿证券研究所

图表 3: 全固态电池需要处理制备压力和堆叠压力



资料来源:《A review of the effect of external pressure on all-solid-state batteries》Fengyu Zhang 等, 五矿证券研究所

电池充放电中的膨胀在全固态时代下成为难点，且负极材料迭代方向上是膨胀性更大的硅基/金属锂，对电池的稳定运行带来更大挑战。一般正极材料相变引起的晶胞体积变化小于负极材料，例如充电中，NCM 晶胞体积变化约 2%，橄榄石结构的磷酸铁锂晶胞体积变化约 7%，而石墨嵌锂后晶胞体积膨胀约 10%。根据 2025 年 10 月中国汽车工程学会发布的《节能与新能源汽车路线图 3.0》，负极材料未来迭代方向从石墨到硅基/金属锂，膨胀性问题更大。硅负极膨胀远高于石墨负极（硅在充电过程中与锂的合金化反应时会产生剧烈膨胀，其最大体积膨胀率高达 300%）。同时金属锂也存在严重的膨胀性，其在充放电过程中随着锂的溶出和沉积会产生显著的体积变化。

图表 4：负极材料未来迭代方向是硅基/金属锂，膨胀性更大

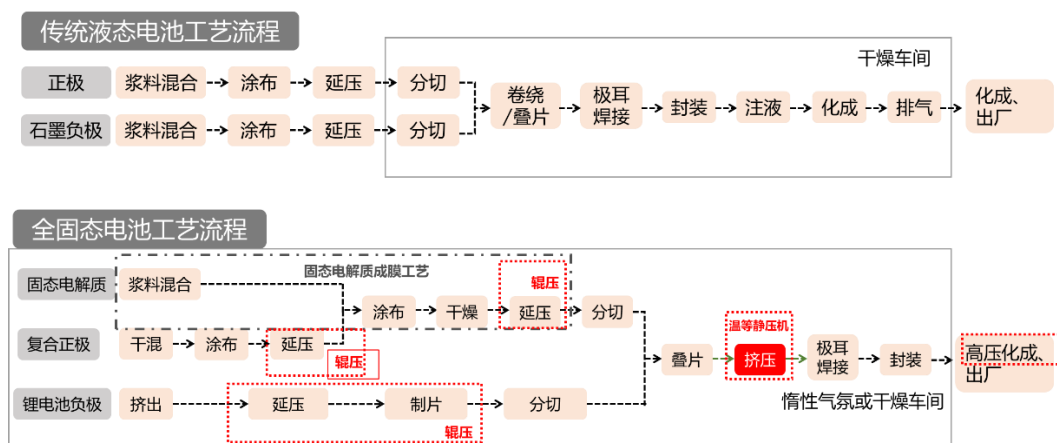


资料来源：《节能与新能源汽车路线图 3.0》，五矿证券研究所

二、全固态电池的初始加压

物理学角度看，固固界面的接触决定了离子的美好传输，在全固态电池工艺中涉及几方面工序。从本征需求上看，电池制备中初始压力帮助材料等致密化，强化“固固”界面的接触，才会有后续的离子电子等的流动。需要解决两方面问题，一是同种材料之间的界面致密度不足问题，比如正极材料本身致密度；二是不同材料层之间的结合性差的问题，正极与电解质，或电解质和负极接触。一般电极或者电解质的孔隙率如压缩在 5% 以内，界面接触电阻显著降低，不同于湿法孔隙率 25-35%，常见的致密化方法包括辊压、单轴面压制和等静压等。从全固态电池生产工艺中，往往通过加压实现致密化要求，核心在前道的极片辊压、中道的等静压、后道的高压化成等环节，其中等静压可实现较大、均应的压力，是致密化方案核心，潜力较大。

图表 5：全固态和传统液态电池工艺对比



资料来源：《All-solid-state lithium-ion and lithium metal batteries – paving the way to large-scale production》Joscha Schnell 等、五矿证券研究所

2.1 前道工序中辊压设备是关键

全固态电池往往需升级辊压设备，且和干法工艺搭配，未来有较大潜力。极片辊压是前道成膜环节关键工序，实现单独正极或负极致密化，辊压有相关干法电极方案等。干法工艺可以在不使用溶剂的情况下，消除湿法工艺烘干后，溶剂分子的残留问题，减少了其与固态电解质发生副反应的风险，提高了电池的安全性和能量密度，具备较大潜力。根据曼恩斯特企业干法多辊双面成膜复合系统数据，可通过精确调节压辊间隙、压力及温度，实现膜片的多级压延成型，压力调节范围是 0-50 吨，满足材料初步致密化和压实密度等要求。

图表 6：干法多辊双面成膜复合系统

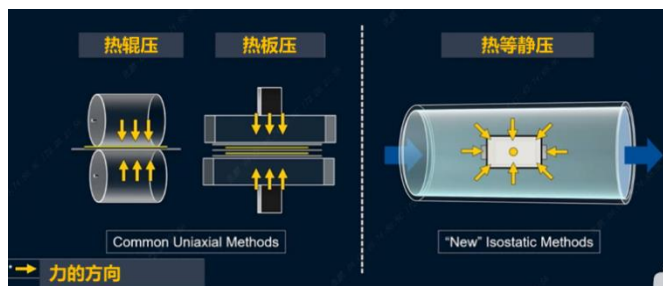
项目	数据
制膜最大速度	50m/min
制膜宽度	700mm
制膜厚度	60-300(±3)um
压辊压力	0~50T
压辊加热温度	室温-200°C
压辊直径	200-300mm
压辊幅宽	800mm

资料来源：曼恩斯特、五矿证券研究所

2.2 等静压是中道工序加压中潜力较大的方案

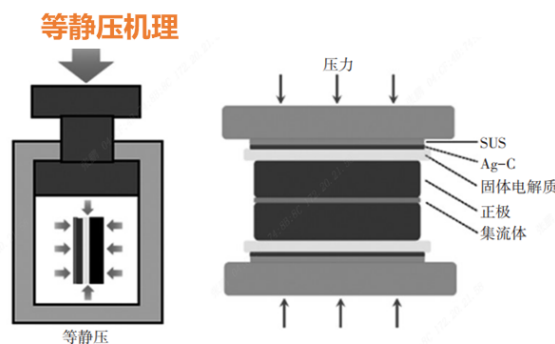
等静压是全固态电池中道核心设备，实现正负极、电解质材料之间的致密化，是全固态电池初始加压中潜力大的方案。致密化一般有传统热压与辊压、等静压等，等静压基于帕斯卡原理，压力各向均应，而传统热压与辊压因压力方向单一、分布不均，易产生边缘效应与层间滑移，难以实现三维致密化和一致性。根据 Quintus Technologies 公众号引用的数据，单轴辊压虽具备连续加工能力，难以突破致密化极限，电极复合材料密度最高仅达 85%，且伴随颗粒破裂、集流体变形等缺陷。而等静压具备一定的优势，比如 Quintus 温等静压在 500MPa、85°C 条件下可使电极密度提升至 95%。

图表 7：辊压、等静压等均是致密化手段



资料来源：Quintus、哔哩哔哩、五矿证券研究所

图表 8：全固态电池等静压机理

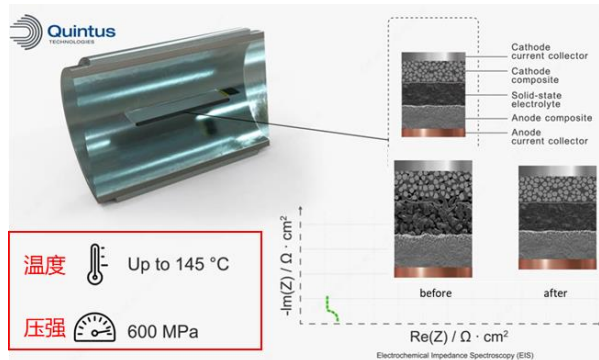


资料来源：《全固态电池生产工艺分析》翟喜民等、五矿证券研究所

温等静压在性能（致密化、生产效率）与成本之间实现较好平衡，潜力较大。等静压技术最初主要应用于金属与陶瓷领域，“冷-温-热”等静压依次对应工作温度递增、生产成本递增，而生产效率递减。其中温等静压在致密化性能、生产效率与成本之间实现相对平衡（冷等静压致密化程度有限，热等静压温度过高导致副作用突出）。根据《The Role of Isostatic Pressing

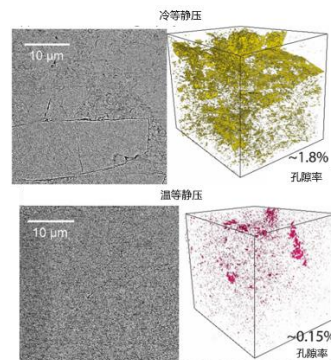
in Large-Scale Production of Solid-State Batteries》（Marm Dixit 等）学术论文数据，单轴压制制备的坯体孔隙率约为 12%，冷等静压的孔隙率 1.8%，温等静压孔隙率 0.15%，温等静压具备更好的致密化要求。

图表 9：等静压电池帮助材料致密化



资料来源：Quintus，哔哩哔哩、五矿证券研究所

图表 10：温等静压下材料孔隙率（0.15%）比冷等静压（1.8%）低



资料来源：《The Role of Isostatic Pressing in Large-Scale Production of Solid-State Batteries》 Marm Dixit 等、五矿证券研究所

图表 11：等静压工艺参数情况

指标	冷等静压 CIP	温等静压 WIP	热等静压 HIP
标准额定温度/°C	20	145	2000
标准压力/MPa	600	600	200
压力介质	油/水	油/水	气体-氢气/氮气
循环时间	分钟	分钟	小时
循环成本	低	中	高

资料来源：Quintus、《The Role of Isostatic Pressing in Large-Scale Production of Solid-State Batteries》 Marm Dixit 等、五矿证券研究所

等静压产业化关键在于连续化生产、设备大型化等，当前处于完善期。

一、连续化生产提效率

等静压虽能有效降低固态电池的孔隙率并优化界面接触，但其批次式生产模式（电芯需在压力釜中逐批压制）与规模化生产所需的高速、连续化和高一致性要求存在矛盾。与此对比的是，液态电池依赖于卷对卷连续生产的效率优势实现了商业化的普及。传统等静压立式腔体自动化程度低，产线适配性不足，连续化是发展方向。目前有卧式等相关设计，包括包头科发、先导智能等企业采用卧式工作缸，实现自动进出料。

等静压工艺时间较长，仍有改进空间。等静压主要包括四个步骤：1) 材料处理、2) 加压、3) 保压和泄压、4) 最后的材料处理。按照 Quintus 的数据，整个过程约 10-39min，时间的不同取决于加工时间、装载和机器规格的差异。通过适当优化升温和降温时间节奏，减少保压时间实现效率的提升。比如添加散热组件等，支持电芯等静压处理后能够以更快速度降温。

图表 12：Quintus 等静压机参数

压力	600 兆帕	600 兆帕	600 兆帕
温度	140 °C	145 °C	145 °C
容器直径	直径 = 80 毫米	直径 = 170 毫米	直径 > 300 毫米
容器长度	375 毫米	420 毫米	电池单元规格
产品	MIB 120 研发	QIB 180 工艺开发	QIB 300, 600, 800 从试点到量产

资料来源：Quintus、哔哩哔哩、五矿证券研究所

图表 13：典型温等静压工艺各段工序流程及加工时间



资料来源：Quintus、五矿证券研究所

等静压设备在安全方面也有一定的改善空间。等静压本身是高温高压环境，有潜在爆炸与泄漏风险，设备必须满足压力容器安全标准；另一个层面看，对全固态电池，硫化物等电解质等对水汽等敏感，也涉及设备的水汽管理。

二、等静压设备的大型化降本

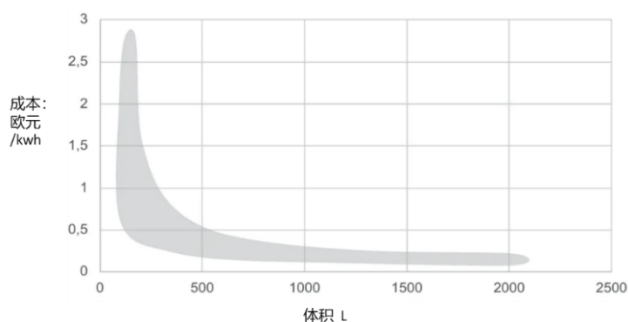
等静压尺寸正在完成大型化过程。以 Quintus 为例，其直径 300mm、600mm、800mm 产品正处于试点到量产的过程。国内 500 L 级卧式温等静压已实现交付与验证，我们预计下一步或将是 1000L 以上尺寸。根据先导智能企业数据，等静压设备可实现有效内径 $\geq 400\text{mm}$ ，有效长度 $\geq 4000\text{mm}$ ，对应容积约 500L。从生产效率上，大型化有利于大批量生产。根据我们相关假设条件测算，典型 400mm 直径，4000mm 长度设备预计年产能 2.7Gwh。从成本上看，大型化也有利于降本。

图表 14：先导智能固态等静压设备参数

基本参数	参考值
工作压力	max600Mpa，控制精度 $\leq \pm 2\%$
工作温度	最高温度 150°C，控制精度 $\pm 5^\circ\text{C}$
工作缸规格尺寸	有效内径 $\geq 400\text{mm}$ 容积约 500L，有效长度 $\geq 4000\text{mm}$
升温时间	首次升温至 150°C 时间 $\leq 3\text{h}$

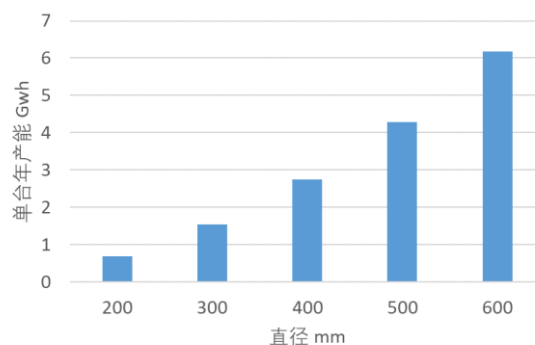
资料来源：先导智能、五矿证券

图表 15：等静压设备体积的增大带动成本快速降低



资料来源：Quintus、五矿证券研究所

图表 16：设备大型化提升电池处理年产能



资料来源：Quintus、五矿证券研究所测算

备注：假设长度是 4000mm，60%效率，每批次 30min，电芯 650wh/L

图表 17：等静压设备企业关键参数等进展

公司	内容
Quintus	固态电池的温等静压机最高压力可达 600 MPa，最高温度可达 145℃。公司正在研发卧式温等静压设备（内径>300 mm、容积 2000 L 级、缸长达数米），单机年产能可达约 22.6 GWh。
先导智能	研发出 600MPa 大容量等静压设备，通过提高一次装载电芯数量来提高设备效率，可提供高效温等静压作业环境，温度最高 150℃。
Hana Technology	开发了实现 700MPa 和 200℃的温等静压设备，已向 LGES 梧仓基地交付Φ400×2000 mm 温等静压整线。2025 年将追加Φ600×3000 mm 机型用于中试线建设。
Mplus	三星 SDI 天安工厂和 LGES 的核心设备供应商，其温等静压设备已出货 LGES 中试线。
川西机器	2023 年 7 月，公司研制的温等静压机 WDJ600/1000-250.85（厂内代号 794A）在厂内顺利通过用户验收。
利元亨	目前正与多家压力容器制造企业合作，正在积极推进。
纳科诺尔	截止 2025H1，公司掌握了干法电极、锂带压延、电解质成膜、转印等设备制造的多项技术，同时加快等静压设备的研发及验证工作，目前部分产品已交付客户。
星楷科技	2025 年 2 月，公司承接的车规级全固态电池卧式量产型等静压机已完成客户交付。
四川力能	目前具备全系等静压。2020 年已生产温等静压机 WIP500/40-250℃，水域式温等静压机 WIP500/500-120MPa/85℃。

资料来源：wind、粉体网、Quintus、科创板日报、中航工业川西机器、先进陶瓷材料产业链、星楷科技、五矿证券研究所

2.3 高压化成是后道工序关键

高压化成是后道工序关键，实现首次充放电循环中的加压。全固态的化成供工序压力显著高于液态电池，全固态电池后端工序中，往往通过高压（10-30MPa）强制使固态电解质与电极颗粒发生塑性变形，填补孔隙，形成面接触，从而显著降低界面阻抗。以国内某企业设备数据为例，可提供 5-120 吨压力范围的调节。

图表 18：一体式卧式高温夹具机



资料来源：先导智能、五矿证券研究所

总的来看，目前等静压是产业较多选择的致密化核心技术方案，但致密化方案未完全技术收敛。SK On 将率先在全固态量产线上引入温等静压工艺；有部分企业在探索非等静压致密化方案，三星 SDI 认为温等静压工艺存在效率瓶颈，其研发重心正转向可扩展性更强的辊压工艺，也有企业提出“多级辊压+干法电极”等方案。

三、全固态电池的堆叠压力

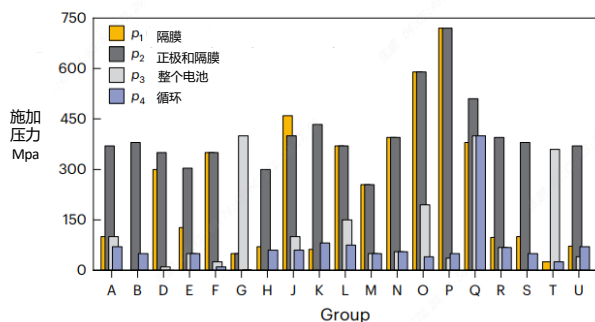
全电池保持一定的堆叠（运行）压力具有必要性。外部堆叠压力主要是为了解决固态电池制造中三个关键挑战：界面接触不均匀性、树枝状锂生长和工艺可扩展性。从第一性原理上看，这是固固界面带来的问题，材料之间导电的前提是接触，一定的外部压力保障了电池充放电时材料间良好的接触。尤其采用硅基、锂金属等高容量负极材料时，其在充放电过程中会发生剧烈体积变化，需要压力来抑制锂枝晶生长、防止形成空洞和“死锂”。

但电池堆叠压力需要保持合适值，太高或太低都不合适。从逻辑上看，压力太小，达不到固体和固体材料之间良好接触的效果；压力太大，一方面电池循环性能变差，另一方面，高压需要电池壳体有极高的机械强度，不仅增加了设计复杂度和重量，还推高制造成本、降低生产良率、增大安全隐患。从数据上看，根据高工锂电引用的数据，在 5MPa 低堆叠压力下，硫化物固态电池可稳定循环超过 1000 小时；而当压力增至 25MPa 时，电池在几十个小时内便迅速失效，过高的压力反而会加速电池短路失效等。从材料本身的要求上看，根据《Atmospheric-Pressure Operation of All-SolidState Batteries Enabled by Halide Solid Electrolyte》（Benjamin Hennequart 等）论文，金属锂负极屈服强度为 0.7 ± 0.2 MPa，过高压力会导致塑性变形，需要显著降低堆叠压力；该论文引用的研究表明金属锂正常运行需压力控制 5 MPa 以下，工业化则要求更低的压力。

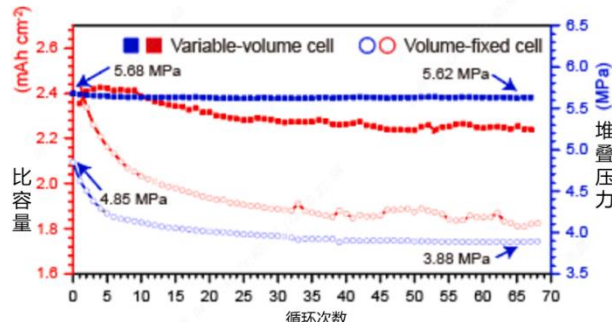
低堆叠压力是全固态电池产业趋势，本质是对界面问题的改善，主要通过材料、结构设计两方面实现。根据高工锂电报道，一般行业对“低压”的共识目标是低于 10MPa，而终端汽车

提出的可接受上限更是指向 2MPa。全固态电池的“减压”运行依赖于界面问题的妥善处理，核心在于材料、结构等层面的创新。从学术论文角度参考，有利用低杨氏模量的电解质、复合电解质材料设计、电解质结构设计、恒压系统等改进。总的看，是通过材料和结构设计两方面实现“减压”。

图表 19：全固态电池各个步骤中需要不同的压力



图表 20：合适的堆叠压力下电池有较好的循环特征



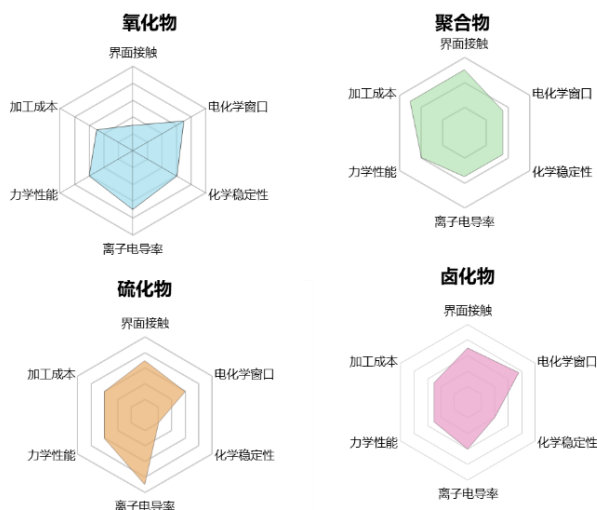
资料来源：《Benchmarking the reproducibility of all-solid-state battery cell performance》Sebastian Puls 等，五矿证券研究所

资料来源：《Enhancing electrochemomechanics: How stack pressure regulation affects all-solid-state batteries》Chanhee Lee 等，五矿证券研究所

3.1 界面材料改性实现“减压”

基于电导率这一核心优势，硫化物为主的固态电解质成为企业较多选择，潜力较大。从四类主流电解质上看，聚合物电解质最早商业化，但室温离子电导率一般 (10^{-7} - 10^{-5} S/cm)，性能潜力有限；氧化物化学稳定性强，但电导率一般，界面接触较差；卤化物化学稳定性较好，但电导率不够好；硫化物电导率好，但化学稳定性一般。从物理学上看，固态电解质本质是提供电导率，替代隔膜和电解液，电导率是核心指标。硫化物电解质室温离子电导率可以达到 10^{-3} - 10^{-2} S/cm，其离子电导率最接近液态电解质，潜力最大，宁德时代、比亚迪等企业均是硫化物为主的技术方案。

图表 21：不同固态电解质特性不一，硫化物基于电导率占优，潜力较大



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》刘元凯等，五矿证券研究所

硫化物虽是潜力较大的方案，但界面问题有一定缺点，一般采用复合电解质或者掺杂两种方式来改性，同时降低电池堆叠压力。硫化物电解质化学稳定性一般，其在与锂金属负极接触时可能被还原分解，而在与高电压正极材料接触时则可能发生氧化分解。

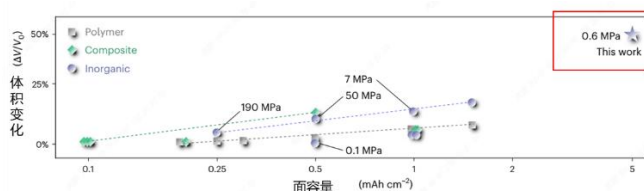
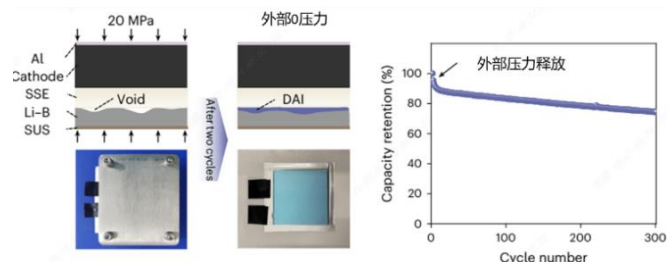
一方面，在硫化物电解质之外掺杂材料改善界面控制，实现电池“减压”运行。

从学术研究上看，有较多种方案：

- 1) **碘离子**：在硫化物固体电解质中预置可迁移阴离子（以碘离子为代表），原位形成“动态自适应界面”，能自我填充界面孔隙与裂缝，改善固固接触并在低/零外加压力下维持离子传输与循环稳定性（图 22、23）。从数据上看，采用碘掺杂的硫化物电解质 $\text{Li}_{3.2}\text{PSI}_{0.2}$ 组装的电池在原位形成了约 $5\mu\text{m}$ 均匀富 LiI 的界面层，零外部压力条件下循环 300 次后，容量保持率达 74.4%。

图表 22：碘掺杂硫化物电解质后外部 0 压力下具备较好循环性

图表 23：碘掺杂硫化物电解质组装的电池有较低的堆叠压力

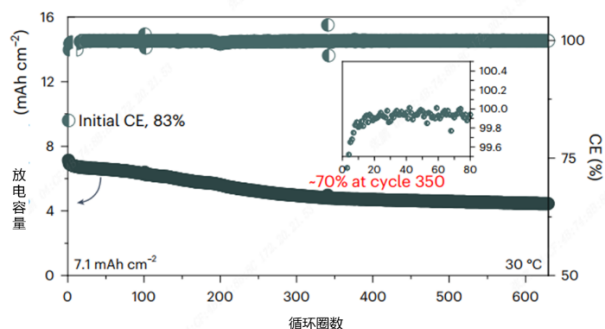


资料来源：《Adaptive interphase enabled pressure-free all-solid-state lithium metal batteries》Xuejie Huang 等，五矿证券研究所

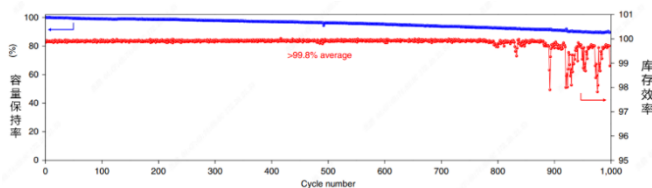
资料来源：《Adaptive interphase enabled pressure-free all-solid-state lithium metal batteries》Xuejie Huang 等，五矿证券研究所

- 2) **化合物等**：根据相关学术研究（见图 24），利用含磷和氟的化合物（DPF）在硫化物电解质表面生成原位生成超薄界面层，在 30°C 、 2.5MPa 低堆叠压力下，装载的锂金属全固态电池能够实现高库仑效率 ($>99.9\%$)、长循环寿命 (~ 10000 小时，约 600 圈) 和高负载 ($>7\text{mAh cm}^{-2}$)。学术上也有引入氧官能团帮助硫化物基电池提升循环性能等研究。
- 3) **银 (Ag)**：根据相关学术研究（见图 25），具有 Ag-C 纳米复合材料层的固态电池表现出更优的循环性能 (60°C 下， 0.6Ah)。

图表 24: NCA || DPF LPSC || Li 电池在低压力下循环表现良好



图表 25: 具有 Ag-C 纳米复合材料层的电池表现出较好循环性能



资料来源:《Revitalizing interphase in all-solid-state Li metal batteries by electrophile reduction》Chunsheng Wang, 五矿证券研究所

资料来源:《High-energy long-cycling all-solid-state lithium metal batteries enabled by silver-carbon composite anodes》Dongmin Im 等, 五矿证券研究所

图表 26: 基于电解质材料的不同类型电池堆叠压力情况 (部分)

电池类型	电解质材料	全电池堆叠压力要求
聚合物基	elastic electrolyte	Li μm-Si & 0 MPa
	xPEO/xGCD-PCL composite	Li NMC622 & ≤ 0.43 MPa
	CPS-6 electrolyte	Li NMC811 & 1 MPa
	PVDF-HFP; PVCA	— & 0.1-0.5 MPa
	PTF-PE-SPE	Li LRMO & 1 MPa
	Li ₆ PS ₅ Cl(LPSC)	Li-In μm-Si & 10 MPa
	g-C ₃ N ₄ @Li ₆ PS ₅ Cl	Li LiNi _{0.6} Mn _{0.2} Co _{0.2} O ₂ & 30 MPa
硫化物基	Li ₆ PS ₅ Cl thin film	Li Li ₄ Ti ₅ O ₁₂ & 2-5 MPa
		Li-In S & 2-5MPa
	Li ₆ PS ₅ Cl	Li-In NCA & 25 MPa
	Li ₆ PS ₅ Cl	Li NMC811 & 5-20 MPa
	UDSH@LPSC	Li NMC & 30 MPa
	Li _{9.54} Si _{1.74} P _{1.44} S _{11.7} Cl _{0.3}	Li LTO & 12.7 MPa
	LLZ0	— & 30-40 MPa
氧化物基	xLi ₂ O-MCl _y (M=Ta or Hf, 0.8≤x≤2, y=5 or 4)	Li-In Ni _{0.83} Co _{0.11} Mn _{0.06} O ₂ (NCM-83) & 80 MPa
	Li _{1.75} ZrCl _{4.75} O _{0.5}	Li-In LiCoO ₂ (LCO) & 190 MPa
	LATP	LiFePO ₄ -PILG LATP-PILG PILG Li & 20 MPa
	LATP	Li LATP-Li ₃ InCl ₆ nDMF Li & 500 MPa
陶瓷基	thiophosphate or argyrodite electrolyte	Li NMC622 & ≥ 5 MPa
	Li ₃ InCl ₆	10Li-Ag _x 10Li-Ag _x & 27 MPa
卤化物基	Li _{3-x} In _{1-x} Zr _x Cl ₆	n-type OEMs NMC83 & 7 MPa

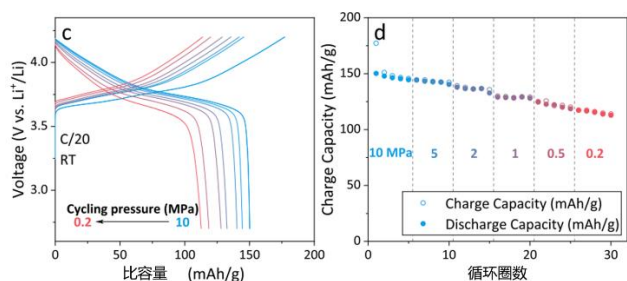
资料来源:《Reducing External Pressure Demands in Solid-State Lithium Metal Batteries: Multi-Scale Strategies and Future Pathways》Qiang Zhan 等, 五矿证券研究所

从工业化上看, 碘和银的方案得到了应用。1) 当升科技称其研发的氯碘复合硫化物电解质已实现稳定制备, 离子电导率高, 且可在低于 5Mpa 的低压下运行。2) 三星 SDI 采用银-碳 (Ag-C) 复合负极材料, 计划 2027 年实现相关固态电池量产。

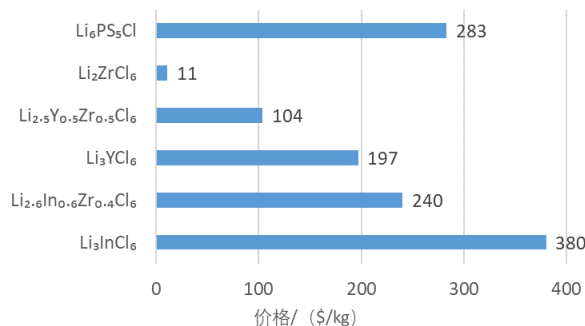
另一方面，采用硫化物基复合电解质是潜力较大的方案。集合其余材料界面性优点和硫化物复合，比如通过硫化物-卤化物复合，可在“高导电性+高稳定性”之间取得平衡，是产业认可度高的方案。卤化物固态电解质有优于硫化物的正极稳定性(兼容更高电压)，但离子导电率普遍不高，因此产业会通过硫化物复合进行应用。也有企业在硫化物和卤化物体系添加部分聚合物电解质的技术方案。

卤化物电解质处发展早期阶段，锆基有较大潜力。常见的金属卤化物电解质的化学式为 Li_aMX_b ，其中 M 为金属元素，X 为卤素元素。常见的卤化物电解质有三类： Li_aMX_4 、 Li_aMX_6 及 Li_aMX_8 。此前的卤化物发展相对缓慢，2018 年发现的 Li_3YCl_6 和 Li_3YBr_6 卤化物电解质室温电导率很高，化学稳定性较好。有研究表明，锆基卤化物有低成本潜力。2023 年，中科大马骋课题组开发了氧氯化锆锂 ($\text{Li}_{1.75}\text{ZrCl}_{4.75}\text{O}_{0.5}$) 电解质，很好满足了离子电导率、可变形性和成本竞争力这三个条件。在室温下有 2.42 mS/cm 离子电导率，且原材料成本不高 (\$11.60/kg)，产业进展加速。根据《Atmospheric-Pressure Operation of All-SolidState Batteries Enabled by Halide Solid Electrolyte》(Benjamin Hennequart 等) 学术研究，采用卤化物固态电解质 $\text{Li}_3\text{YBr}_2\text{Cl}_4$ 在 0.1 MPa 的压力下，对 LiIn 合金和 0.2 MPa 压力下对锂金属负极能可靠运行，且容量损失有限，该卤化物电解质可在较低堆叠压力下工作。

图表 27：部分卤化物电解质可在较低堆叠压力下工作



图表 28：部分卤化物电解质原材料成本对比



资料来源：《Atmospheric-Pressure Operation of All-SolidState Batteries Enabled by Halide Solid Electrolyte》Jean-Marie Tarascon 等，五矿证券研究所

资料来源：《低成本卤化物固态电解质的研究与开发》何天贤等，五矿证券研究所

备：左图是从 10MPa 下降到 0.2MPa 堆叠压力下的全固态电池电化学性能图

从产业层面，单卤化物电解质方案有一定尝试，硫化物+卤化物复合电解质方案也有较广泛应用。

- 1) 在单独使用上，2025 年信宇人公司试制了卤化物固态电解质样品，并完成了首轮电化学测试，离子电导率 1.5-2 mS/cm，导电性能良好。
- 2) 在复合搭配上，卤化物材可被用于富锂锰基、高镍三元等高压正极的包覆或涂覆改性，以拓宽电压窗口，并和硫化物搭配使用。据高工锂电统计，目前宁德时代、比亚迪、清陶能源、中创新航、一汽、湖南恩捷等企业均已布局卤化物固态电解质复合应用。

图表 29：复合电解质方案有较多的产业应用

企业	搭配	具体内容
当升科技	卤化物+硫化物电解质均有涉及	开发了低成本、高电压窗口的卤化物电解质，正在稳定制备过程中
湖南恩捷	专注于硫卤化物复合固态电解质	公司计划于 2026-2027 年实现千吨级硫卤化物固态电解质量产
清陶	/	第二代固态电池选择了氧化物+卤化物+聚合物的路径
宁德时代	/	宁德时代的一项“掺杂型卤化物固态电解质”专利于 2025 年 1 月获授权，旨在进一步提升离子导电率
中创新航	/	探索卤化物电解质在优化硫化物电解质电化学窗口方面的作用，通过对高镍正极材料进行卤化物包覆，以提高离子电导率并优化界面特性
亿纬锂能	硫化物+卤化物	全固态电池研发中选定硫化物+卤化物复合电解质路线
比亚迪	硫化物(复合卤化物)	/
一汽	有涉及卤化物	借助高通量分析筛选技术开发出离子电导率达 4.6mS/cm 的卤化物电解质

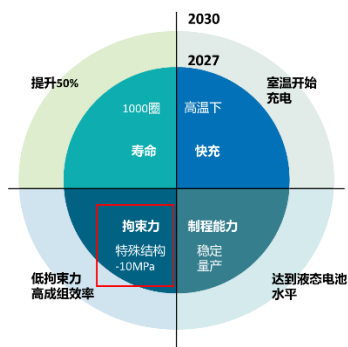
资料来源：鑫椏锂电、高工锂电、维科网锂电、SMM 新能源、五矿证券研究所

3.2 电池结构设计保持堆叠压力稳定性

电池外部压强和轻量化之间的平衡是关键，往往采用结构化设计保持较强预紧力。对液态电池，几十到上百公斤的压力基本上能满足全生命周期的预紧力要求（一般 0.1 到 1 兆帕），而在全固态电池中至少需要兆帕级别预紧力。外部高压本身不难，比如某电池企业表示，单纯从高约束力出发，10 兆帕、20 兆帕都没问题，但是会牺牲能量密度。包括过程当中当中一些形变，断面平整度、一致性问题均很关键。

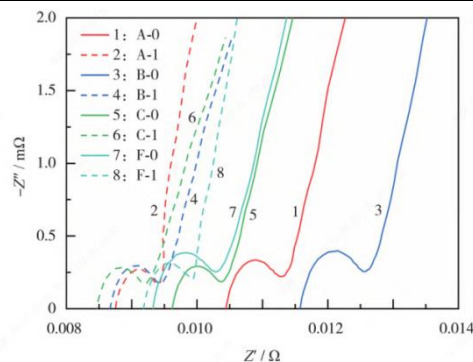
从结构设计角度，一般有金属模组框架约束、一体式铝材基础框架、模组形式的金属/非金属绑带约束、甚至金属箱体整体约束等方案来保持电池堆叠压力。但结构设计需要考虑两个方向，一个是循环过程中体积膨胀收缩能否在全生命周期保持稳定，另一个是成组率可能大幅度下降，系统层面的能量密度低，需尽可能降低外部结构的重量。按照宁德时代引用相关研究数据，锂金属全固态电池外部压力的消除可以显著延缓电池锂枝晶短路现象。成组外压力需求上，理想的是 < 2Mpa，上限 < 5Mpa。

图表 30：全固态电池采用低拘束力方案



资料来源：NE 时代新能源、五矿证券研究所

图表 31：液态电池预紧力要求很小，但也可以帮助降低电阻



资料来源：《一定预紧力下过放电对锂离子电池性能的影响》李艳红等，五矿证券研究 备注：序号尾端 1 代表有夹具压力

图表 32：部分全固态电池企业电池结构层面的外压力方案等

企业	技术方案	情况
比亚迪	拘束力系统	/
中国一汽	外压系统	从仿真和实验情况看，模组结构可以实现工作压力大于 20 MPa，基本能满足整包需求
国轩高科	非金属绑带、复合的非金属端板等	金石电池单体预紧力下降 90%，可以为电芯提供 15 兆帕左右的预紧力，把重量减到之前的 20%。以 0.33C 作为基准，1C 的性能到 80%以上放电
宁德时代	外压系统	引用相关研究，锂金属全固态电池外部压力的消除可以显著延缓电池锂枝晶短路现象。成组需求上，理想的是 <2Mpa，上限<5Mpa

资料来源：NE 时代新能源、中国汽车动力电池产业创新联盟、高工锂电、天目湖储能学堂、五矿证券研究所

四、相关产业链和产业进度

全固态预计以 2027 年示范性装车为节点，消费类（EV tol、人形机器人等）场景或在此前开启示范应用。根据汽车工程学会 2025 年发布的《节能与新能源汽车路线图 3.0》，全固态电池的量产应用还需重点突破材料层面的关键科学问题和产业层面的高效生产工艺/低成本化，2030 年前后可能实现全固态小规模量产。

从产业进度上看，全固态电池企业较多计划 2027 年形成示范装车。一般而言，车端对电池循环性等要求较高，消费类场景在该性能上要求相对较短，或将先开启示范使用。

图表 33：全固态电池和固液混合电池产业进度对比

半固态/固液混合	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
产业进度	半固态首次做出来	东风E70示范性（50辆）	车端示范性需求，小批量；消费类市场渗透			接近平价，卡点解决，渗透率攀升	
全固态	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030前后
产业进度	工信部补贴	车端B样测试	消费类市场示范性需求	消费类市场初步渗透+车端小批量验证	车端小批量；消费类市场小幅度渗透		走向商业化，小规模量产

资料来源：东风汽车研发总院、《节能与新能源汽车路线图 3.0》、经济观察报、电池中国、财联社、五矿证券研究所整理

图表 34：部分全固态产业公司情况介绍

类型	公司	具体情况
设备	先导智能	公司已成功打通全固态电池量产的全线工艺环节，实现了从整线解决方案到各工段的关键设备覆盖，并研发出 600Mpa 等静压设备。
	纳科诺尔	在干法电极与固态电池领域，公司掌握了干法电极、锂带压延、电解质成膜、转印等设备制造的多项技术，同时加快等静压设备的研发及验证工作，目前部分产品已交付客户。
	包头科发	非上市公司。公司业务有等静压设备，适合新能源电芯材料，粉末冶金，陶瓷组件等高科技新材料。
	川西机器	公司主要生产冷、热、温等静压设备，现已具备工作缸内径为 3000mm、高度为 5000mm 等静压设备的制造能力。
材料	当升科技	公司与江苏金坛经济开发区管理委员会签署协议，计划在当地投建年产 3000 吨固态电解质材料生产线。
	中科固能	非上市公司。公司建设的世界首条年产百吨级硫化物固态电解质材料生产线已在溧阳调试完成投产并具备满产能力。
	厦钨新能	实现氧化物固态电解质的吨级生产和稳定可靠的产品性能，同时，开发出独特的硫化锂合成工艺，样品在客户端测试良好
	上海洗霸	上海洗霸竞得有研稀土硫化锂相关资产，并计划合资扩产，预计 25 年底扩产至百吨级。
电池	国轩高科	全固态金石电池目前处于中试量产阶段，并已启动 2GWh 量产线的设计工作。
	宁德时代	将 2027 年定为全固态电池小批量装车的关键节点，目前已同步推进中试线产能爬坡与车规级样品验证。

资料来源：起点固态电池、高工锂电、wind、粉末冶金与注射成形产业链、包头科发官网、星楷科技、粉体圈、五矿证券研究所

风险提示

- 1、硫化物、卤化物等电解质材料降本不及预期。
- 2、全固态电池设备规模化和相关工艺进展不及预期。
- 3、假设全固态电池产业进度超预期，则我们预期的量产时间将提前；反之则推迟。
- 4、卤化物和硫化物仍处于产业早期阶段，技术基本收敛，但未来是否有新材料，具备不确定性。

分析师声明

作者在中国证券业协会登记为证券投资咨询(分析师)，以勤勉的职业态度，独立、客观地出具本报告。作者保证：(i) 本报告所采用的数据均来自合规渠道；(ii) 本报告分析逻辑基于作者的职业理解，并清晰准确地反映了作者的研究观点；(iii) 本报告结论不受任何第三方的授意或影响；(iv) 不存在任何利益冲突；(v) 英文版翻译若与中文版有所歧义，以中文版报告为准；特此声明。

投资评级说明

投资建议的评级标准		评级	说明
报告中投资建议所涉及的评级分为股票评级和行业评级（另有说明的除外）。评级标准为报告发布日后 6 到 12 个月内的相对市场表现，也即以报告发布日后的 6 到 12 个月内的公司股价(或行业指数) 相对同期相关证券市场代表性指数的涨跌幅作为基准。其中：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；美国市场以纳斯达克综合指数或标普 500 指数为基准。	股票评级	买入	预期个股相对同期相关证券市场代表性指数的回报在 20%及以上；
		增持	预期个股相对同期相关证券市场代表性指数的回报介于 5% ~ 20%之间；
		持有	预期个股相对同期相关证券市场代表性指数的回报介于-10% ~ 5%之间；
		卖出	预期个股相对同期相关证券市场代表性指数的回报在-10%及以下；
		无评级	预期对于个股未来 6 个月市场表现与基准指数相比无明确观点。
	行业评级	看好	预期行业整体回报高于基准指数整体水平 10%以上；
		中性	预期行业整体回报介于基准指数整体水平-10% ~ 10%之间；
		看淡	预期行业整体回报低于基准指数整体水平-10%以下。

一般声明

五矿证券有限公司（以下简称“本公司”）具有中国证监会批复的证券投资咨询业务资格。本公司不会因接收人收到本报告即视其为客户，本报告仅在相关法律许可的情况下发放，并仅为提供信息而发放，概不构成任何广告。本报告的版权仅为本公司所有，未经本公司书面许可，任何机构和个人不得以任何形式对本研究报告的任何部分以任何方式制作任何形式的翻版、复制或再次分发给任何其他人。如引用须联络五矿证券研究所获得许可后，再注明出处为五矿证券研究所，且不得对本报告进行有悖原意的删节和修改。在刊载或者转发本证券研究报告或者摘要的同时，也应注明本报告的发布人和发布日期及提示使用证券研究报告的风险。若未经授权刊载或者转发本报告的，本公司将保留向其追究法律责任的权利。若本公司以外的其他机构（以下简称“该机构”）发送本报告，则由该机构独自为此发送行为负责。

本报告所载的资料、意见及推测仅反映本公司于发布本报告当日的判断，本报告所指的证券或投资标的的价格、价值及投资收入或将产生波动；在不同时期，本公司可发出与本报告所载资料、意见及推测不一致的报告；本公司不保证本报告所含信息保持在最新状态。同时，本公司对本报告所含信息可在不发出通知的情形下做出修改，投资者应当自行关注相应的更新或修改。

本报告的作者是基于独立、客观、公正和审慎的原则制作本研究报告。本报告的信息均来源于公开资料，本公司对这些信息的准确性和完整性不作任何保证，也不保证所包含信息和建议不发生任何变更。本公司已力求报告内容的客观、公正，但文中的观点、结论和建议仅供参考，不包含作者对证券价格涨跌或市场走势的确定性判断。在任何情况下，报告中的信息或意见不构成对任何人的投资建议，投资者据此做出的任何投资决策与本公司和作者无关。在任何情况下，本公司、本公司员工或者关联机构不承诺投资者一定获利，不与投资者分享投资收益，也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。本公司及作者在自身所知范围内，与本报告中所评价或推荐的证券不存在法律法规要求披露或采取限制、静默措施的利益冲突。

五矿证券版权所有。保留一切权利。

特别声明

在法律许可的情况下，五矿证券可能会持有本报告中提及公司所发行的证券并进行交易，也可能为这些公司提供或争取提供投资银行、财务顾问和金融产品等各种金融服务。因此，投资者应当考虑到五矿证券及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一参考依据。

联系我们

上海	深圳	北京
地址：上海市浦东新区陆家嘴街道富城路 99 号 震旦国际大厦 30 楼 邮编：200120	地址：深圳市南山区滨海大道 3165 号五矿金融大厦 23 层 邮编：518035	地址：北京市东城区朝阳门北大街 3 号五矿广场 C 座 3F 邮编：100010

Analyst Certification

The research analyst is primarily responsible for the content of this report, in whole or in part. The analyst has the Securities Investment Advisory Certification granted by the Securities Association of China. Besides, the analyst independently and objectively issues this report holding a diligent attitude. We hereby declare that (1) all the data used herein is gathered from legitimate sources; (2) the research is based on analyst's professional understanding, and accurately reflects his/her views; (3) the analyst has not been placed under any undue influence or intervention from a third party in compiling this report; (4) there is no conflict of interest; (5) in case of ambiguity due to the translation of the report, the original version in Chinese shall prevail.

Investment Rating Definitions

The rating criteria of investment recommendations The ratings contained herein are classified into company ratings and sector ratings (unless otherwise stated). The rating criteria is the relative market performance between 6 and 12 months after the report's date of issue, i.e. based on the range of rise and fall of the company's stock price (or industry index) compared to the benchmark index. Specifically, the CSI 300 Index is the benchmark index of the A-share market. The Hang Seng Index is the benchmark index of the HK market. The NASDAQ Composite Index or the S&P 500 Index is the benchmark index of the U.S. market.	Ratings		Definitions
	Company Ratings	BUY	Stock return is expected to outperform the benchmark index by more than 20%;
		ACCUMULATE	Stock relative performance is expected to range between 5% and 20%;
		HOLD	Stock relative performance is expected to range between -10% and 5%;
		SELL	Stock return is expected to underperform the benchmark index by more than 10%;
		NOT RATED	No clear view of the stock relative performance over the next 6 months.
	Sector Ratings	POSITIVE	Overall sector return is expected to outperform the benchmark index by more than 10%;
		NEUTRAL	Overall sector expected relative performance ranges between -10% and 10%;
		CAUTIOUS	Overall sector return is expected to underperform the benchmark index by more than 10%.

General Disclaimer

Minmetals Securities Co., Ltd. (or "the company") is licensed to carry on securities investment advisory business by the China Securities Regulatory Commission. The Company will not deem any person as its client notwithstanding his/her receipt of this report. The report is issued only under permit of relevant laws and regulations, solely for the purpose of providing information. The report should not be used or considered as an offer or the solicitation of an offer to sell, buy or subscribe for securities or other financial instruments. The information presented in the report is under the copyright of the company. Without the written permission of the company, none of the institutions or individuals shall duplicate, copy, or redistribute any part of this report, in any form, to any other institutions or individuals. The party who quotes the report should contact the company directly to request permission, specify the source as Equity Research Department of Minmetals Securities, and should not make any change to the information in a manner contrary to the original intention. The party who re-publishes or forwards the research report or part of the report shall indicate the issuer, the date of issue, and the risk of using the report. Otherwise, the company will reserve its right to taking legal action. If any other institution (or "this institution") redistributes this report, this institution will be solely responsible for its redistribution. The information, opinions, and inferences herein only reflect the judgment of the company on the date of issue. Prices, values as well as the returns of securities or the underlying assets herein may fluctuate. At different periods, the company may issue reports with inconsistent information, opinions, and inferences, and does not guarantee the information contained herein is kept up to date. Meanwhile, the information contained herein is subject to change without any prior notice. Investors should pay attention to the updates or modifications. The analyst wrote the report based on principles of independence, objectivity, fairness, and prudence. Information contained herein was obtained from publicly available sources. However, the company makes no warranty of accuracy or completeness of information, and does not guarantee the information and recommendations contained do not change. The company strives to be objective and fair in the report's content. However, opinions, conclusions, and recommendations herein are only for reference, and do not contain any certain judgments about the changes in the stock price or the market. Under no circumstance shall the information contained or opinions expressed herein form investment recommendations to anyone. The company or analysts have no responsibility for any investment decision based on this report. Neither the company, nor its employees, or affiliates shall guarantee any certain return, share any profits with investors, and be liable to any investors for any losses caused by use of the content herein. The company and its analysts, to the extent of their awareness, have no conflict of interest which is required to be disclosed, or taken restrictive or silent measures by the laws with the stock evaluated or recommended in this report.

Minmetals Securities Co. Ltd. 2019. All rights reserved.

Special Disclaimer

Permitted by laws, Minmetals Securities Co., Ltd. may hold and trade the securities of companies mentioned herein, and may provide or seek to provide investment banking, financial consulting, financial products, and other financial services for these companies. Therefore, investors should be aware that Minmetals Securities Co., Ltd. or other related parties may have potential conflicts of interest which may affect the objectivity of the report. Investors should not make investment decisions solely based on this report.

Contact us

Shanghai

Address: 30/F, Zhendan International Building,
No.99 Fucheng Road, Lujiazui Street, Pudong
New District, Shanghai
Postcode: 200120

Shenzhen

Address: 23F, Minmetals Financial Center, 3165
Binhai Avenue, Nanshan District, Shenzhen
Postcode: 518035

Beijing

Address: 3/F, Tower C, Minmetals Plaza, No.3
Chaoyangmen North Street, Dongcheng District,
Beijing
Postcode: 100010