

# 动力电池深度：从芯出发，回归技术本源、聚焦发展主线

电气设备

评级：看好

日期：2021.10.12

分析师 葛军

登记编码：S0950519050002

☎：021-61097705

✉：gejun@w.kzq.com.cn

分析师 孙景文

登记编码：S0950519050001

☎：021-61097715

✉：sunjingwen@wkzq.com.cn

联系人 李铭全

☎：15356158680

✉：limingquan@w.kzq.com.cn

行业表现

2021/10/11



资料来源：Wind，聚源

相关研究



## 报告要点

**我们关于动力电池的两大判断：性能螺旋式升级、应用倒锥形发展。**动力电池是新能源汽车的“心脏”，占整车成本30%-40%。目前阶段，电池性能仍然具备广阔的提升空间，我们预计未来将呈现螺旋式升级：电化学体系需要综合考虑能量和功率密度、循环寿命、安全性等多个维度，因此基于差异化的出行需求，将形成各有侧重、多元的动力电池产品线。同时，受益技术迭代、提质降本，电池的能力边界在逐步扩大，从而持续开辟全新的储能场景与市场，形成倒锥形的发展格局，终局将实现对移动式与固定式化石能源的替代。

**提升比能为主线，电池材料持续渐进式迭代，从液态、半固态向全固态演进。**

1) 纵观电动化进程，提高能量密度是全球技术发展的主线，同时电化学的特点是遵循渐进式革新。2) 锂作为自然界最轻、标准电极电位最低的金属元素，锂电体系的理论比能最接近化石燃料、综合性能最适配动力的应用场景，因此将作为长期的主流选择。3) 正极的开发方向是高镍、富锂、高电压；目前即便三元正极的比容也仅为石墨负极的55%，因此提升正极的性能尤其迫切：一方面，三元在于高镍低钴，针对钴镍锰等过渡金属嵌锂化合物开展改性，未来270mAh/g或5V级先进正极有望靠近电芯400Wh/kg的目标；另一方面，对于理论比容低的磷酸铁锂，在于开发磷酸锰铁锂提升电压，比能有望提升15%-20%；4) 负极的主要开发方向是低成本高比容；碳负极作为基体材料有望长期存在，理论比容可达4200mAh/g的硅负极正逐渐导入商用，最为理想的金属锂负极尚处于小规模生产阶段；5) 电解质与隔膜相对成熟，伴随正负极的迭代，将持续开展改性与新材料开发；液态电池中电解质溶剂基本定型，将重点研制新型锂盐及添加剂；隔膜趋势是轻薄化，可选基体材料有望进一步拓展；6) 固态电池可谓真正的颠覆；液态锂离子电芯的比能上限约350-400Wh/kg，且有机液态易燃，固态将在增强安全性的同时打开比能空间，但受制于技术、工艺和配套难点，其产业化仍需渐进开展；我们预计半固态+成熟正负极/金属锂负极将率先导入，全固态车载动力的产业化或仍需5-10年。

**电池结构创新、系统集约化提高技术进步曲线的斜率。**在锂电材料遵循电化学的特性渐进式升级的同时，通过工艺精进亦可加快电池系统能量密度和综合性能的提升，方向有二：1) 结构创新：主要包括做大电芯，方形电池优势独特，但4680大圆柱也可使能量增加五倍，软包则有望在固态导入中扩大应用；2) 系统集约化：去掉冗余零件、功能及繁杂工艺，电池系统将向无模组化演进，不止步于CTP或刀片电池技术，未来CTC等将实现更高程度集成。

**五维塑造深厚护城河，看好中国电池龙头的全球竞争力。**我们认为，动力电池的高壁垒主要体现在下述五个维度，因此有利于形成强者更强的行业格局，龙头企业将引领锂电技术的发展方向：1) 要求高强度的研发投入，及深厚的技术积淀；2) 精益生产，极限制造创新；3) 有效、高质的产能扩张，形成规模效应；4) 构建完备的供应链体系；5) 与全球领军车企深度协作。在此基础上，中国的电池龙头还背靠强大的本土汽车消费市场，并受益中国能源结构转型的时代红利，因此我们积极预期宁德时代、比亚迪等企业的长期发展。

**风险提示：**

- 1、全球新能源汽车推广低预期、市场竞争加剧、产业政策退坡或安全事件导致电池需求和产品价格下滑；
- 2、关键原材料及汽车芯片的供应风险、氢燃料技术发展或带来替代、全球宏观经济及汽车消费走软的风险。

# Focusing on Automotive Battery, from the Perspective of Battery Technology

Electrical Equipment

Rating: Positive

Date: 2021.10.12

Jun Ge

Research Analyst

S0950519050002

☎: 021-61097705

✉: gejun@wkzq.com.cn

Jingwen Sun

Research Analyst

S0950519050001

☎: 021-61097715

✉: sunjingwen@wkzq.com.cn

Mingquan Li

Contact

☎: 15356158680

✉: limingquan@wkzq.com.cn

Sector Performance 2021/10/11



Source: Wind, Juyuan

Correlative Research



## Overviews

**Our two major judgments on the Automotive Battery: spiral performance improvement & inverted cone-shaped application adoption.** Automotive Battery is the heart of new energy vehicles, accounting for 30%-40% of the entire vehicle costs. At present, there is still broad space to improve the battery performance, and we expect a spiral performance improvement. The electrochemical system needs to consider energy and power density, cycle life, safety, etc., therefore a rather diversified product line will be needed for automotive batteries according to differentiated travelling scenarios. Besides, benefiting from technology upgrades and improvements, the capability of the lithium-ion battery will constantly expand, which will create brand new energy storage applications and markets. That will bring about an inverted cone-shaped adoption pattern, and will eventually replace the fossil energy consumption world-wide. **The major roadmap is to increase the specific energy, driving by the gradual upgrades of battery materials, and evolving from liquid to solid state battery.** 1) Throughout the process of electrification, increasing energy density is the main route of global technological development, and electrochemistry is characterized by gradual innovation. 2) Lithium is the lightest metal and it has the lowest standard electrode potential. The theoretical specific energy of the lithium battery system is closest to fossil fuels and is the most suitable for EV application, therefore it is set to be the long-term mainstream choice. 3) The development direction of the positive electrode is high nickel, rich lithium, and high voltage. At the current stage, it is particularly urgent to improve the performance of the positive electrode: on the one hand, the Ternary will be high nickel and low cobalt in the short term. 270mAh/g or 5V advanced cathodes are expected to achieve the goal of 400Wh/kg in the future; on the other hand, for LiFePO<sub>4</sub> cathode, the development of LiMn<sub>x</sub>Fe<sub>1-x</sub>PO<sub>4</sub> cathode can increase the voltage. 4) The main development direction of the negative electrode is low-cost and high specific capacity; carbon anode is expected to exist as a matrix material for a long time, and silicon with the theoretical specific capacity of 4200mAh/g is gradually being introduced into commercial application. Lithium anode, the future's most ideal anode type is still limited in the small-scale production stage so far. 5) The electrolyte and separator technologies are relatively mature, and new material development will continue in order to support the innovations of anode and cathode. Ideal electrolyte in liquid LIB has been developed, the focus is on the new lithium salts and additives; the trend of diaphragm is to be lighter and thinner; the selection of potential base material will be widened. 6) Solid-state battery could be a real technology breakthrough and subversion; the upper limit of the specific energy of liquid lithium-ion batteries is about 350-400Wh/kg, and the organic liquid is flammable. The solid state will open up the specific energy space while enhancing safety. However, due to technical limitations and the immature of supporting materials, its commercialization progress still needs to be step by step. We expect semi-solid with mature cathode and mature anode (or mature cathode with lithium anode) will be introduced first on EV, and the true all solid-state may further take 5-10 years.

**Innovative battery structure and integrated system accelerate battery performance optimization.** Although the innovations of battery materials are gradual due to electrochemical characteristics, energy density and the overall performance of the battery system can be increased significantly by optimized design and manufacturing from two aspects: 1) Structural innovations: the main idea is to enlarge the battery cell. The prismatic cell has unique advantages, the 4680 large cylinders can also increase its energy five times, while the pouch cell also has a chance to expand its application in the solid-state. 2) System integration: by removing redundant parts, functions and complicated processes, the future's battery system will be moduleless. The integration work of the battery system will not stop at CTPs or Blade Battery's level, advanced technology such as CTC is already on the horizon.

**Shaping high entry barrier by five dimensions, and the reasons we hold positive outlook for China's leading battery makers global competitiveness.** We believe that the high entry barrier of EV battery can be summarized in the following five dimensions, therefore the existing global market leaders have a greater opportunity to win in the long-term and will lead the technology development of lithium-ion battery: 1) Intensity R&D investments, and deep technical accumulation. 2) Lean production, and constant manufacturing innovation. 3) Effective and high-quality capacity expansion to enhance scale effect. 4) A complete supply chain system. 5) In-depth collaboration with global leading automotive companies. Besides, China's top battery makers are also backed by a big and vital automobile consumption market and benefit from the energy structure transformation in China. Therefore, we hold an optimistic outlook for companies represented by CATL and BYD.

## Risks

1. If global electrification fails to meet our estimation, the price of battery cell would further drop.
2. Key materials supply risk, and technologically innovative products may replace traditional ones.

## 内容目录

投资主题：拥抱全球电气化变革，开启电化学储能大时代 .....	9
化学电源的演进：实现电存储的绝佳方式 .....	10
走进化学电源：多样体系的全面渗透 .....	10
化学电源是具备存储与转换能量功能的装置 .....	10
历经多年开发与推广，持续渗透生产生活场景 .....	11
探秘电池本源：性能往往不可兼得，需有所取舍 .....	12
能量密度：性能基石，上限由物质理化性能决定 .....	13
高倍率性能：影响输出功率以及充电速度，本质是扩散能力 .....	15
循环性能：衡量使用寿命的指标，全生命周期多因素影响 .....	16
安全性能：商用首要考量的“红线”，持续改善增强可靠性 .....	17
动力领域的体系演进：追求更高比能为主线，锂电体系脱颖而出 .....	18
车用化学电源有更严格的标准要求 .....	18
动力的性能诉求持续推动更高比能电池在车用领域的发展 .....	20
锂离子电池：动力电池的优选技术，内部体系多元 .....	21
锂电材料开发：渐进迭代为主旋律，革命性突破需量变到质变 .....	22
材料体系迭代升级，电池成本持续下降 .....	23
正极开发主旋律：高比能为主线，多维性能渐进革新 .....	26
锂离子电池正极组分中，镍钴锰等过渡金属往往不可或缺 .....	26
锂电正极的应用以高比能为主线 .....	28
高镍正极是已商用，最明确的产业研发方向 .....	29
正极“无钴化”是高镍的终极演进目标，“代钴”元素的引入是关键 .....	34
改性已有的高比能潜力嵌锂化合物是“无钴”的另一路径 .....	35
革命式的正极开发方向是无锂化，涉及多组分变动 .....	40
硫化物是无锂正极开发热点，无人机应用测试顺利推进 .....	42
负极突破主基调：研制更高比容低成本的材料 .....	46
负极当下格局：碳基是商用主流，钛酸锂因高安全应用于细分领域 .....	46
现有负极比容已接近上限，高比容潜力负极中硅基优势显著 .....	48
硅基负极产业化持续铺开，“硅基时代”临近 .....	50
负极预锂化是硅基负极产业化的关键改性技术 .....	51
负极的革命式目标是金属锂的产业应用，难点在于安全性 .....	53
“无负极”电池：锂金属电池研发的可行创新策略 .....	55
电解质：匹配电池体系持续优化，固态则是革新形式 .....	56
有机液态电解液是主流的锂电池电解质体系 .....	56
电解液产品优化路径：针对溶剂、锂盐及添加剂开展改性 .....	57
跟随体系升级，开发多元电解质产品 .....	58
电解质的形态演进：固态形式将大幅提升综合性能 .....	59
隔膜：电池的安全屏障，未来部分场景或以电解质形式存在 .....	62
隔膜影响电池体系综合性能，动力领域要求严苛 .....	62
聚烯烃微孔膜及改性产品是当下主流隔膜材料 .....	64
基于隔膜生产工艺改进，隔膜产品性能持续升级 .....	64
未来的隔膜形态：趋于轻薄，部分场景下将被固态电解质替代 .....	65
材料从研发到商用的思考：多样出行场景意味着多元的性能推进路径 .....	67
钠离子电池：性能比肩铁锂，或将在低速动力等场景规模导入 .....	68
燃料电池：高能环保的终极形态，成本等限制短期发展，未来商用领域大有可为 .....	70
材料到电芯：细节精益求精，体系紧扣实际 .....	71

每一生产环节是“与”门的构成，乘数放大基于严格标准.....	72
工艺精进是非活性材料体系外，渐进集约化的性能提升抓手.....	73
电芯生产全环节有着高环境要求，追求精密优质高效.....	74
小细节中的大价值：特斯拉干电极技术的启示.....	75
大体系中的充分竞争：电池封装演进下的格局之变.....	77
不同封装工艺存在性能和应用潜力的差异.....	77
封装的核心工序：卷绕更贴合实际，叠片代表高性能的未来.....	79
工艺格局演化之思：先进技术与产业实践的契合是发展关键.....	81
电芯到整车：演进理念是优化中间环节，提升集成效率.....	83
Cell to pack: 淡化模组概念，提高成组效率.....	83
模组在动力电池系统中起到提升稳定性的关键作用.....	84
无模组技术的演进：目标在于降本提效.....	84
CTP 与刀片电池出世：精巧的设计用以满足轻量紧凑诉求.....	86
CTP 方案的开发热度提升，车企的电池子公司入局.....	88
无模组技术的推出将增强电池环节的议价，将改变产业格局.....	89
集成大势所趋，是做减法，更是做加法.....	90
高集成的下一步：CTC 技术.....	91
集约化的代表：特斯拉优秀的垂直整合理念与实力.....	91
投资建议：紧跟具备核心竞争力的技术型龙头企业.....	94
回溯行业格局：把握市场主流技术变化，是企业关键生存之道.....	95
深厚多元的技术积淀既提升抗风险力，又是下一代体系的基础.....	96
强者更强，全球电池龙头持续拓宽能力辐射圈.....	98
风险提示.....	99

## 图表目录

图表 1：化学电源工作原理图（以锂离子电池为例）.....	11
图表 2：化学电源技术发展的历史可追溯至 2000 年前，电池如今已成为现代社会不可或缺的储能设备.....	12
图表 3：根据不同电池类型的性能特征，适配不同的应用场景.....	12
图表 4：能量密度公式及能斯特方程推导.....	13
图表 5：周期表上方元素的电位与电化学当量，能够依据数值构成多个高理论比能电池体系.....	14
图表 6：实际比能量与理论比能量关系示意图.....	15
图表 7：不同类型电池电芯级别的能量比较拉贡图，比能的提升往往伴随的是比功率的下降.....	16
图表 8：影响锂离子电池高倍率性能的主要因素.....	16
图表 9：铅酸电池的循环次数随放电深度的增加而降低.....	17
图表 10：从设计到工艺，再到产品使用层面，均会影响电池的循环性能.....	17
图表 11：电池老化衰减机理与安全性能演变的关系.....	18
图表 12：1881 年 Gustave Trouve 制造可充电铅酸电池三轮车，推进电动车应用.....	19
图表 13：电动汽车用动力电池性能要求.....	19
图表 14：不同类型电动汽车对动力电池能量和功率的要求.....	19
图表 15：市面上主流的电池性能比较，锂离子电池的优势突出.....	20
图表 16：锂电池技术发展时间相对较短但性能提升较快，且仍在持续改善.....	22
图表 17：通过不断优化现有材料并寻找新材料组合，持续的提升锂离子电池的综合性能.....	23
图表 18：2010 年以来动力电芯能量密度已增长 2 倍至 300Wh/kg.....	24
图表 19：2020 年全球电池包均价同比下降 13% 至 137 美元/千瓦时.....	24
图表 20：新能源车售价指数预计在 2025 年前后低于燃油车售价指数.....	24
图表 21：解构电池包，能够了解到发挥核心功能的基石是电极材料.....	24

图表 22: PHEV 37Ah 的三元/石墨型电芯中材料成本占 74.9%.....	25
图表 23: 该款电芯的材料成本占比中, 正极份额为 49.5%.....	25
图表 24: 6 种主要的材料改性思想, 不仅是当下提升已有材料性能的手段, 也是构造复合新材料的方法.....	26
图表 25: Co、Ni、Mn 等是嵌锂化合物中合适的过渡金属之选.....	27
图表 26: 磷酸铁锂正极是主要的商业化聚阴离子材料, 未来磷酸锰铁锂的开发是提升比能的重要路径.....	28
图表 27: 常见的正极材料性能对比.....	29
图表 28: 不同材料组成的锂离子电池性能有所差异, 也因此带来应用的区别.....	29
图表 29: 比容与电位的提升都能增加以电极质量计算的能量密度.....	30
图表 30: 钴含量的减少使高镍三元的成本具备竞争力.....	30
图表 31: 不同组分三元材料放电比容量、热稳定性和容量保持率的关系.....	31
图表 32: 三元材料的工业合成过程中, 每个步骤均对高镍三元的生产有更严格的要求, 从而在工艺上形成挑战.....	31
图表 33: 充电电压提升, 三元的比容量也将提高.....	32
图表 34: 但同时会使得正极材料的循环性能降低, 容量保持率下降.....	32
图表 35: 单晶没有晶界, 可以有效应对传统多晶晶界破碎的问题.....	32
图表 36: 1000 次充放循环后, 单晶三元颗粒不发生破碎, 性能相对稳定.....	32
图表 37: 2020 年中国高镍装机达到 17.9GWh, 占三元比例 46%.....	33
图表 38: 2020 年 1-9 月 LG 化学与 CATL 高镍总装机份额达 95.1%.....	33
图表 39: LG 化学自产正极, 在正极开发与生产上有先进的技术及工艺储备.....	33
图表 40: LG 化学官网上列出的多元正极产品可满足动力及储能应用需求.....	33
图表 41: 对比新旧两款雷诺 Zoe 的性能指标, NCM712 体系提升续航.....	33
图表 42: 从不同方面展示钴在高镍中的关键作用仍可由 Al、Mg 或 Mn 元素所发挥.....	34
图表 43: NCMA 与 NCM、NCA 材料相比, 性能优势突出.....	35
图表 44: 从横断面 SEM 图像来看, NCMA 对于微裂纹抑制效果更好.....	35
图表 45: 蜂巢能源 2019 年 7 月全球首发的 NCMA 四元电池的能量密度达到 265Wh/kg, 各项性能指标优异.....	35
图表 46: 不同三元材料的半电池和软包电池的电化学性能表征.....	35
图表 47: NMA89 有更高的热效应温度, 具备更好的热稳定性.....	35
图表 48: 层状镍锰酸锂材料的 SEM 图像.....	36
图表 49: 层状镍锰酸锂在 2.5-4.5V 之间约有 200mAh/g 的比容量.....	36
图表 50: 蜂巢能源已规划四款无钴电池量产产品, 覆盖全部车型超长里程.....	36
图表 51: 无钴 H 系列的 115Ah 产品已率先量产装车.....	37
图表 52: 无钴 E 系列电芯比能达 220Wh/kg, 成本接近铁锂.....	37
图表 53: 富锂锰基材料与 NCM811、LFP 正极相比, 综合性能优异, 能量密度指标突出.....	38
图表 54: 首次充电结束后净脱出 Li <sub>2</sub> O, 在随后的嵌锂过程中, Li <sub>2</sub> O 无法回到材料中, 造成循环效率低的问题.....	38
图表 55: 采用慢速扫描循环伏安估计的尖晶石材料的氧化还原电位.....	39
图表 56: 5V 级尖晶石型 LNMO 具备较高的比能量, 达到 650Wh/kg.....	39
图表 57: 尖晶石型镍锰酸锂与其他传统正极材料相比, 具有较突出的成本与比能优势.....	40
图表 58: 掺杂 Al 后材料的循环性能提升.....	40
图表 59: 掺杂 Al 后高倍率下容量保持率优于未掺杂的材料.....	40
图表 60: 根据热力学计算筛选出低成本、低毒、比能 > 1200Wh/kg 的部分无锂正极, 主要是过渡金属氟化物、硫化物和氧化物.....	41
图表 61: 1972-2019 年由锂金属电池到锂离子电池的发展时间线.....	41
图表 62: 一些无锂正极的充放电曲线和循环性能, 转化反应是主要机理.....	41
图表 63: 严重的过电位和材料体积变化大是无锂正极应用的主要阻碍.....	42
图表 64: 无锂正极开发过程中遇到的阻碍及相应的改善方式.....	42
图表 65: 基于转化反应的锂硫电池充放电原理示意.....	43
图表 66: 循环过程 S-S 键断裂, 会生成多种硫化锂中间产物.....	43
图表 67: 与锂硫电池相关的文章发表逐年增加, 2020 年截至 2 月 2 日发表 123 篇, 中美韩三国发表量占比大.....	43
图表 68: 实现高能量锂硫电池的过程中, 硫正极的持续改性以及电解液、负极的匹配是必经之路.....	44

图表 69: 在实验室中取得的锂硫电池体系的性能难以在产业应用中复制 .....	45
图表 70: Oxis Energy 拥有一流的产业合作伙伴, 对于推动锂硫电池应用能形成较好的正向循环 .....	45
图表 71: Oxis 开发的锂硫电池样品具备较高的能量密度, 但同时较差的循环性能也限制其应用 .....	45
图表 72: 当下实现商用的一些锂电负极材料的性能对比 .....	46
图表 73: 按结构特点分类的碳负极材料, 其中人工石墨是动力领域主流 .....	47
图表 74: 中国锂电负极材料历年出货量中, 人造石墨占比持续提升 .....	47
图表 75: 通过强碱改变孔隙结构表面, 增加表面微孔和嵌锂路径 .....	47
图表 76: 在石墨颗粒周围充填炭黑, 构筑锂离子的传输孔道 .....	47
图表 77: $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ 嵌锂向 $\text{Li}_7\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ 转变示意 .....	48
图表 78: 温和煅烧温度使 LTO 材料保持较小粒径, 倍率和循环性能提升 .....	48
图表 79: LTO 及掺杂 $\text{Co}^{3+}$ 的 LCTO 材料的 SEM 图像 .....	48
图表 80: 硅具有较高的比容和适宜的嵌锂电位 .....	49
图表 81: 硅的丰度高, 价格低廉 .....	49
图表 82: 硅材料与锂反应, 经历体积膨胀, 产生裂纹直至粉化的结构破坏过程 .....	49
图表 83: 采用现代分析与结构改性结合的方式处理硅负极实用化遇到的三大问题 .....	49
图表 84: 硅基负极专利申请总量排名中, 中日美韩位居前四 .....	50
图表 85: 日本、韩国和美国注重海外专利的布局 .....	50
图表 86: 全球前 100 名专利申请人中, 日本申请人数量具备优势 .....	50
图表 87: 中国国内专利申请人中, 以海外申请人为主 .....	50
图表 88: 新型硅负极的应用使电池能量密度提升, 缓解里程焦虑 .....	51
图表 89: 循环过程中 SEI 的生长于锂离子的扩散路径示意, 不稳定的 SEI 膜使锂损耗增加 .....	52
图表 90: 通过负极预锂化降低首次活性锂损耗 .....	52
图表 91: 针对提高 ICE 所采用的几种预锂化技术 .....	52
图表 92: d-SiO/G/C 复合材料制备流程、SLMP 预锂化过程及所带来的性能提升 .....	53
图表 93: 检索系统显示中国国内具备丰富的补锂相关技术专利 .....	53
图表 94: 宁德时代新型极片补锂装置能够保证生产产能 .....	53
图表 95: 锂是最轻的金属元素, 是能够大幅提升比能的理想的负极材料 .....	54
图表 96: 高反应活性叠加不均匀的沉积脱出, 使安全性能显著下降 .....	54
图表 97: LiPON 作为人造 SEI 膜, 有效抑制锂金属与电解液的反应 .....	55
图表 98: 玻璃纤维放置在锂负极表面, 避免突起周围锂离子的积累 .....	55
图表 99: NCA 正极+石墨负极的体系转换为 NCA 正极的“无负极”体系后, 能量密度有望达到 500Wh/kg 以上 .....	55
图表 100: 无负极电池容量衰减快, 只有当库伦效率达到 99.99% 时, 循环寿命才能与商业化的石墨负极体系相当 .....	56
图表 101: 不同电解质体系性质比较 .....	56
图表 102: 电解液是动力电池重要组分 (以铁锂电芯为例展示成本结构) .....	57
图表 103: 锂离子电池有机液态电解质主要组成结构 .....	57
图表 104: 部分有机溶剂的物理性能 (若非特殊指明, 一般为 25°C) .....	58
图表 105: 电解质锂盐的种类、典型代表及特征 .....	58
图表 106: 电解液添加剂的不同类型、典型代表及作用原理 .....	58
图表 107: 根据电池应用需求以及正负极等组分匹配要求, 需要开发不同类型电解液 .....	59
图表 108: 全固态电池中, 电解液、隔膜、粘结剂等均不需要使用, 大大简化电池的结构 .....	60
图表 109: 在渐进式的路线中, 由混合固液体系逐渐转变为全固态体系, 正负极材料体系能够不断拓展 .....	61
图表 110: 现有固态电解质特性一览, 聚合物、氧化物和硫化物是主要的适合产业化的固态电解质 .....	61
图表 111: 隔膜置于正负极之间, 将正负极隔开, 防止两极直接接触发生短路 .....	63
图表 112: 锂离子电池对隔膜材料的性能要求 .....	63
图表 113: 已商业化的三种聚烯烃微孔隔膜的综合比较 .....	64
图表 114: 通过不同的改性手段能够提升基材的综合性能 .....	64
图表 115: 干法与湿法工艺比较, 湿法隔膜具备性能优势 .....	65

图表 116: 星源材质主要产品工艺流程.....	65
图表 117: 锂离子电池用隔膜/固态电解质的发展历程.....	66
图表 118: 两种先进隔膜的制备以及性能参数.....	66
图表 119: 中国动力电池技术路线图 2.0 版本不再一味追求能量密度, 将充分考虑市场需求的多样性.....	68
图表 120: 铅酸电池、锂离子电池与钠离子电池性能对比, 锂离子电池具备比能优势, 钠离子电池具备原料成本竞争力.....	68
图表 121: 宁德时代第一代钠离子电池在部分性能上优于铁锂.....	69
图表 122: 钠离子与锂离子电池的集成混合共用方案有助于取长补短.....	69
图表 123: 全球主要钠离子电池生产厂家产品性能对比.....	69
图表 124: 多种一次/二次储能体系的理论能量密度 (kWh/kg).....	70
图表 125: 主要燃料电池类型的性能参数与应用范围.....	70
图表 126: 氢燃料电池与锂电池相比存在的优势.....	71
图表 127: 根据大众测算, 电池驱动下汽车动力效率在 70% 以上, 而氢动力电动车的效率仅 25%~35%.....	71
图表 128: 材料到电芯的关键在于, 组合后材料之间能够较好匹配, 保持良好性能.....	72
图表 129: 奥迪 Q7 e-tron 动力电池系统结构拆分.....	73
图表 130: NCM523 电池包成本构成.....	74
图表 131: LFP 电池包成本构成.....	74
图表 132: CATL 展示的动力电池产品工艺全流程.....	74
图表 133: 动力电芯制造工艺全流程及各工序所需设备.....	75
图表 134: 特斯拉子公司 Maxwell 的干电极制造工艺.....	76
图表 135: Maxwell 的干电极技术具备较强的竞争力, 能够降本增效, 更加适配下一代材料体系.....	76
图表 136: 特斯拉展示由 960 个 4680 电芯组成的电池包.....	77
图表 137: 大众推出标准化电芯, 预计 2030 年内部占比达到 80%.....	77
图表 138: 主流的动力电池产品具有三种不同的封装形式: 圆柱、方形、软包, 及其相应的电池组实物图.....	78
图表 139: 不同封装形式的电池类型各有优缺点.....	78
图表 140: 方形电池和圆柱电池分别的卷绕工艺.....	79
图表 141: 方形或软包电池可以通过叠片工艺制作而成.....	79
图表 142: 不同封装形式的电芯制造在核心工艺上有差别, 对应的制造设备也不同.....	80
图表 143: 卷绕电芯存在弯折区域, 是影响产品综合性能的重要因素之一.....	80
图表 144: 卷绕工艺更贴合实际, 生产效率高, 叠片工艺生产的电芯性能更优.....	80
图表 145: 2020 年全球动力电池装机 142.8GWh, CATL 装机 34.3GWh 排名第一.....	81
图表 146: 2020 年中国方形动力电池出货量占比达到 80.8%.....	81
图表 147: 中国 2020 年装机 TOP10 大部分主营方形电池 (GWh).....	81
图表 148: 松下为特斯拉供应圆柱电芯, 由 18650 逐渐过渡至 21700, 未来特斯拉主导下将推出 4680 大圆柱.....	82
图表 149: 宁德时代与三星 SDI 主要以方形产品为主, 覆盖多元动力场景 (因企业持续开发新产品, 图中性能参数仅供参考).....	83
图表 150: LG 化学具有深厚的软包电池开发工艺技术积淀, 供应的产品包括电芯、模组及电池包.....	83
图表 151: 奥迪 Q7 e-tron 的模组结构图.....	84
图表 152: 早期空间的多样带来模组的多样化.....	85
图表 153: 标准化到无模组化布置的演进史.....	85
图表 154: CATL 推出的 CTP 电池技术将是降本的重要手段.....	86
图表 155: 搭载刀片电池的比亚迪汉最高续航达 600km 以上, 安全性高.....	86
图表 156: 宁德时代与比亚迪各自无模组技术的细节展示.....	87
图表 157: 宁德时代 CTP 技术与比亚迪刀片电池的全面对比.....	87
图表 158: 据蜂巢能源, 其开发的长电芯方案具有较强的兼容性, 并且正在探索不同材料体系的应用.....	88
图表 159: 沿车身宽度放置模组形成电池包的宝能 CTP 方案.....	89
图表 160: 宝能 CTP 方案中, 采用多个电芯串联形成长电芯.....	89
图表 161: 多个电芯水平叠放后一步焊接形成叠片体, 再构成大模组.....	89
图表 162: 冷却组件及导热元件的加入提升软包 CTP 的安全性.....	89

图表 163: 动力电池制造工艺及相应的不同电池类型的成本拆分测算, 磷酸铁锂电池 Pack 极限度电成本预计可达 442 元/kWh.....	90
图表 164: 2021 年 1-8 批推荐目录中, 新能源乘用车领域配套铁锂车型的占比提升至 39%.....	90
图表 165: 系统结构创新时间线, CATL 预计 2028 年前后推出智能化 CTC 电动底盘系统.....	91
图表 166: 特斯拉已经通过多种技术创新进行电池系统的升级, 降低系统成本.....	92
图表 167: 特斯拉计划 3 年内通过垂直整合, 使每 kWh 的电池成本下降 56%, 推动续航提升 54%.....	93
图表 168: 电芯的无极耳设计能够降低电阻, 提高散热能力.....	93
图表 169: 开发 4680 大圆柱电芯, 续航能够提升 16%.....	93
图表 170: 采用表面覆膜稳定结构的方式减少硅负极的应变.....	93
图表 171: 高镍正极+生产工艺优化+上游延伸+金属回收方式实现降本.....	93
图表 172: 高度集成的电池+车身工厂将降低投资成本, 减少占地面积.....	94
图表 173: 锂基电池供应链全貌, 涵盖上游资源、中游材料及电芯制造、下游电池系统以及丰富终端, 极具纵深和广度.....	95
图表 174: 历年热门车型销量份额持续变动, 直接影响供应电池的上游企业份额.....	96
图表 175: 2015-2020 年全球动力电池装机份额的格局演变.....	96
图表 176: 全球 4 家动力电池龙头均有长期的电池开发历史, 具备深厚的技术储备, 并且持续积极开展基础研究.....	97
图表 177: 动力电池龙头历年来保持较大的研发投入 (亿人民币).....	97
图表 178: 企业研发占收入比重在行业中属于高水平, 体现强研发特质.....	97
图表 179: 拥有独特优势而产品线丰富, 是海外动力电池龙头竞争力的一大体现.....	98
图表 180: 基于创新研发理念, 宁德时代形成完整动力电池研发链条, 开发出综合性能优势突出的产品.....	99

## 投资主题：拥抱全球电气化变革，开启电化学储能大时代

发展新能源汽车产业已经成为全球主导型经济体的战略共识，同时以疫情后的绿色复苏为契机，2021年中国、欧洲新能源汽车的销量已经迎来导入斜率向上提升的拐点。着眼新能源汽车供应链，其涵盖上游资源的采选冶、中游材料、下游电池、整车制造及智能驾驶系统，极具纵深与广度。其中，动力电池作为新能源汽车的核心驱动零部件，成本占整车比重30%-40%，地位可类比燃油车的发动机。目前阶段，动力电池的技术升级依然具备广阔空间，我们认为未来其性能将呈现螺旋式升级，应用场景将形成倒锥形发展、逐步渗透和扩大。

我们认为，化学电源是最适配移动场景的能量存储设备，其中锂电体系是新能源汽车动力系统的最理想选择。化学电源以电化学氧化还原反应为理论基础，可避开卡诺循环限制，拥有可超80%的能量转换效率，是实现移动式化石能源替代的理想路径。在化学电源的演进过程中已开展数亿种材料组合试验，但仅形成屈指可数的主流商用电池类型。其中，以自然界中最轻、标准电极电位最负的锂元素为基，锂电在目前商用体系中能量密度最高，也将是未来动力电池的长期主流选择（钠离子电池、氢燃料在细分场景存在应用需求）。同时，锂电体系的材料多元、潜力大，未来综合性能还有望持续提升。此外，通过逐级降本和规模效应，锂电需求在加速外溢，替代铅酸等传统电池体系的存量市场，并开辟全新的应用场景。

回顾发展历程，不同于半导体行业的摩尔定律，电池的技术进步主要遵循电化学的渐进式革新，构建更高比能、更稳定、寿命更佳的体系。与此同时，尽管多元的终端应用场景对于电池性能的要求各有侧重，但更高的能量密度始终是贯穿全球电池技术发展的主线。产业围绕质量及体积能量密度两大线条优化产品，主要策略有二：1) 锂电材料技术的渐进革新，其中我们认为未来正负极的变革将更具想象力，电解质与隔膜则将跟随两极不断优化，未来十年，锂离子电池从液态向半固态、乃至全固态发展和演进，将为行业带来最大的颠覆。2) 另一层面，在活性材料之外，从工艺维度入手，开展性能的边际改善，要求制造环节的优化与电池系统的集约化，例如4680大圆柱电芯、CTP无模组、JTM技术等均在重塑产业格局。我们认为，未来掌握极限制制造创新与CTC等集约化系统设计的电池厂商将位于生态链的顶端。

综合以上，在体系升级层面，我们判断未来电池技术将呈现“框架内逼近极限”的趋势，即以电化学为基础的能量存储框架下，持续开展能量密度为主线的电池体系多维性能优化：

- 即期产业化落地层面，我们认为，三元或铁锂为正极的电池体系仍是未来中短期的主导，并且将迎来丰富的改性和组分变动。三元体系将迈向高镍低钴乃至无钴，铁锂材料与锰等结合提高电压。此外，成熟的三元及铁锂电池混装有望使系统性能“扬长避短”；
- 中期若比能需达到350-400Wh/kg及以上，传统液态体系下富锂锰基、高电压正极等是可行的方向；负极方面，具备高比容的硅基负极也有望进一步导入；
- 长期维度，固态电池将带来体系颠覆。固态电解质“零自燃”特性将使高比能活性材料可用性提高（如负极应用金属锂），进一步打开能量密度提升空间。全固态电池将改变电解质以及隔膜的行业生态，体系中可不包含传统液态与隔膜。但中短期层面，成熟正负极+混合固液形式更靠近产业化，仍然需要有机液态电解质与传统隔膜产品的支持。

背靠中国—全球最大的汽车消费市场以及中国完备且高效的供应网络，同时身处“中国能源消费电气化、电力生产清洁化”的时代变革，尽管面临原材料价格大幅上涨以及全球供应链从“Go Global”走向“Go Glocal”趋势加剧的挑战，我们坚定看好中国电池头部企业的长期发展，以及中国新能源汽车产业链的全球“溢出”，产业链未来有望走出一批全球性的领军企业，成为中国先进材料与高端制造的优秀代表。

## 化学电源的演进：实现电存储的绝佳方式

应用场景的持续铺开，推动电池产业的快速发展。无论是如火如荼的新能源车行业，还是方兴未艾的储能产业，能量存储设备是最关键的一环。以电化学氧化还原反应为理论基础的化学电源能够避开卡诺循环的限制，拥有可高达 80% 以上的能量转换效率，是最适配大储能产业的工具产品。当下对于电池综合性能提升的诉求正不断加强，但也遭遇材料理化性能限制、工艺与成本优化等难点。我们认为，从产品的本质入手，理解底层运行逻辑，将能够更迅速地在变革当中做出反应，辨别产品是否具备核心竞争力。回溯行业演进历程，数亿种材料组合试验仅形成可数的商用主流电池类型，其中锂电体系因多维性能相对最优而在动力电池技术中脱颖而出，并且随技术迭代与工艺创新，锂电的需求将持续外溢，以倒锥形发展推动全球储能迈入 TWh 时代。

### 走进化学电源：多样体系的全面渗透

化学电源经历百年积淀，在仍可继续挖掘的科学理论指导下形成完善的体系。这个体系包括组成电池的各部分材料和配套的生产制造工艺。体系十分庞杂，但通过梳理，我们认为基础的枝干（各部分的影响因素和诉求）是一致的。通过把握枝干，在完善的体系之中寻找技术继续发散的方向，是了解产业的正确路径。我们认为，未来仍将是多元电池技术持续共存的局面，但有主流与非主流之分，同时单个体系中也会有多样产品来满足下游不同需求。

#### 化学电源是具备存储与转换能量功能的装置

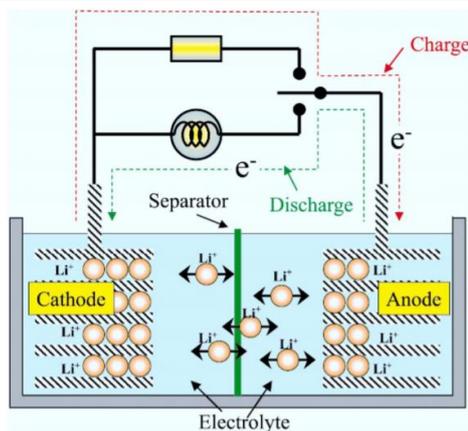
电池，电力之源，即借助于某些变化（化学或物理变化）将某种能量（化学能或光能等）直接转换为电能的装置。通过化学反应直接将化学能转换为电能的装置称为化学电源，如锌锰干电池、铅酸电池、锂电池等。化学电源能量转换的两个必要条件是：

- 必须把化学反应中失去电子的过程和得到电子的过程分隔在两个区域中进行；
- 两电极分别发生氧化反应和还原反应时，电子必须通过外线路做功。

化学电源一般包括 5 个基本部分，组分之间相互匹配而发挥效用：分别用两种不同材料组成的电极——正极和负极；用以将电极分隔在两区域的隔膜；电解液和外壳。

- 电极：由活性物质、导电骨架和添加剂等组成，作用是参与电极反应，是决定电池电性能的主要部件。其中活性物质又更为关键，要求是：正极电位越正负极电位越负、电化学活性高、电化当量低、电解液中稳定、导电性好、资源丰富、便于制造；
- 隔膜：防止正负极活性物质直接接触而短路，但要允许离子顺利通过。对隔膜的具体要求是：对电解质离子运动的阻力越小越好、电子导电绝缘体、具备化学稳定性、一定的机械强度和抗弯曲能力、价格低廉等；
- 电解液：作用是 1) 在与活性物质接触面附近形成双电层，建立电极电位；2) 保证正负极间离子导电作用；3) 参与电极反应。具体要求是：电导率高、成分稳定、使用方便等。完成离子导电的同时不能完成电子导电，保证正常回路的形成；
- 外壳：即电池容器，具体要求是：高机械强度、耐高低温环境、能经受电解质腐蚀。

图表 1: 化学电源工作原理图 (以锂离子电池为例)



资料来源:《The combustion behavior of large scale lithium titanate battery》, 五矿证券研究所

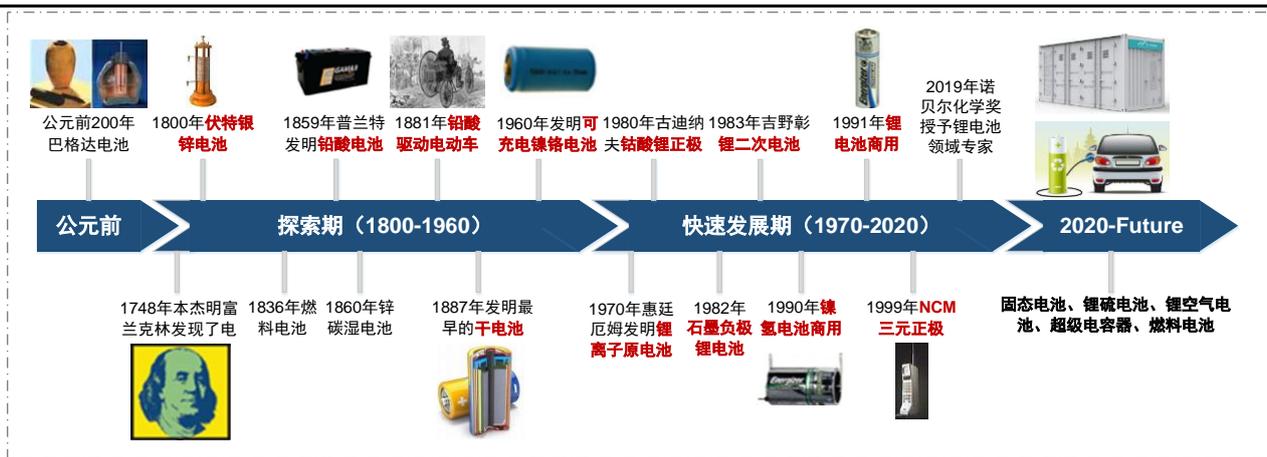
### 历经多年开发与推广, 持续渗透生产生活场景

化学电源技术可追溯至公元前, 20 世纪 70 年代后进入快速发展期。1983 年在巴格达附近发现的装有用铁棒卷起来的铜板的陶器罐被认为是原电池, 存在于公元前 250 年左右。而后, 富兰克林在 18 世纪 40 年代发现了电。1800-1960 年是技术的探索阶段, 相继发明伏特电池、燃料电池、铅酸电池、干电池、镍镉电池等; 1970 年以后开始快速发展, 主要是锂离子电池的发明与完善。1991 年索尼实现锂离子电池商业化, 时隔 28 年后的 2019 年将诺贝尔化学奖授予在锂电池领域做出突出贡献的古迪纳夫、惠廷厄姆、吉野彰。在下一代电池的研发中, 固态电池、锂硫电池、锂空气电池、超级电容器、燃料电池等是较受关注的类型。

化学电源发展至今, 品种繁多, 用途广泛, 外形差异大, 按照工作性质及贮存方式进行分类, 主要可分为一次电池、二次电池、贮备电池和燃料电池四种:

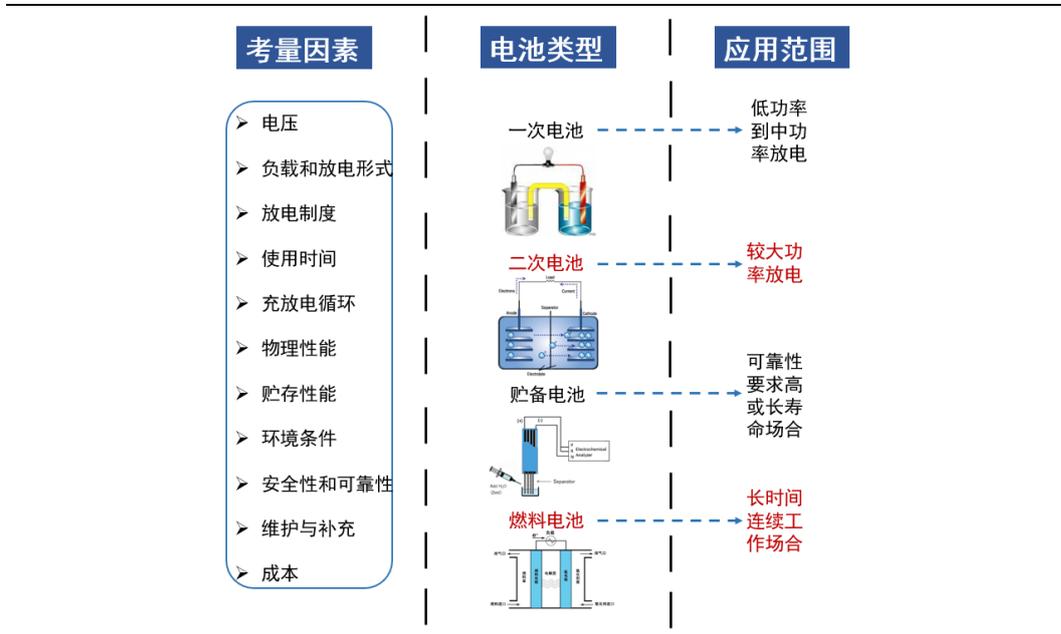
- 一次电池又称“原电池”, 因其电池反应本身不可逆或可逆反应较难进行, 通常放电一次后便无法使用。主要有锌锰干电池、锂原电池等。一般的应用范围是低到中功率放电, 以其便携性与低价格用于各类电气与电子设备。
- 二次电池又称“蓄电池”, 实际是电化学能量贮存装置, 电池可反复使用。主要有铅酸电池、镍镉电池、镍氢电池及锂离子电池等。二次电池及其电池组主要用于较大功率的放电场合, 以及充当辅助和应急电源。由于在能量密度、功率密度等电化学性能方面的改善, 在车辆动力领域, 逐渐显示出较强的竞争力。
- 贮备电池又称“激活电池”, 由于其仅在使用前激活电池, 因此可使电池贮存较长时间。主要有镁银电池等。常在特殊环境下使用, 因其自放电性能好及工作寿命长等特点, 对于可靠性要求高的场合是较好的选择。
- 燃料电池又称“连续电池”。只要将活性物质连续注入, 就能长期运行。主要有氢燃料电池等。由于具备较好的能量以及功率密度, 因此常用于长时间连续工作的场合。随着技术的进步与产品的完善, 燃料电池将在各类重要用电领域开展试验及应用。

图表 2: 化学电源技术发展的历史可追溯至 2000 年前, 电池如今已成为现代社会不可或缺的储能设备



资料来源: upsbattery center, 集群大讲堂-《固态电池研究及产业化》-张锐博士, 五矿证券研究所

图表 3: 根据不同电池类型的性能特征, 适配不同的应用场景



资料来源: 《新型化学电源技术概论》, 五矿证券研究所

### 探秘电池本源: 性能往往不可兼得, 需有所取舍

我们认为, 化学电源体系下多元性能的最优难以达到, 往往某种性能的提升需要牺牲另一种性能, 即电池“技能树”无法全部被点亮。因此, 基于丰富的下游应用场景, 决定不同电池体系仍将在长时期内共存。但必须认识到, 共存并非意味着平均的市场份额, 静态上会有主流与细分的差别, 动态上会有数类体系对其他体系的需求挤压:

- 性能变化受多种因子共同作用, 影响方向可能不同。包括正负极材料类型、配比, 以及设计与制造工艺等, 都会影响电池的能量密度、倍率性能等, 这就意味着若影响方向不同, 将使得性能无法兼得。如锂离子电池中, 电极材料与电解液在固液相界面形成的 SEI 膜能够保证 Li<sup>+</sup>嵌入脱出的同时对电子绝缘, 但作为钝化膜也将使 Li<sup>+</sup>的扩散受到限制, 同时 SEI 膜的更新将造成 Li<sup>+</sup>和电解质的持续损耗, 进而使电池容量下降;
- 某些电池体系从本质上看无法较好满足某些性能需求。例如从最本征的载流子传导与输

运行为出发，锂电体系的“快充性”并非最优，主要系基于脱嵌机理，Li<sup>+</sup>的扩散系数普遍比水系二次电池中的异相氧化还原反应的速率常数低数个数量级。此外，有机电解液的离子电导率通常比水系电解液低 2 个数量级。因此，基于丰富的下游应用场景，不同场景的性能要求不同，决定不同电池体系将在长时期内共存；

- ▶ 大容量领域的技术之争决定格局走向。大容量的市场意味着更大的份额，因此若某类体系较好适应大容量市场的需求，产品的导入将使体系份额明显提升。车用动力领域对能量密度的严格要求，使得较高比能的电池体系能够脱颖而出，对其他体系形成替代。

我们通过由表及里的方式探究影响电池性能的本质，在接下来的篇幅里，重点讨论影响性能的本质要素。性能是与直观需求联系的概念，也是直击下游需求的痛点所在。我们选取较受关注的几个性能指标开展探讨，包括能量密度、高倍率性能、循环性能和安全性能等。

### 能量密度：性能基石，上限由物质理化性能决定

化学电源储存能量的能力是基础，涉及到的关键指标是能量密度，理论输出能量大小取决于电动势与理论容量。当电池在放电过程中始终保持平衡状态，放电电压保持电动势（E<sup>0</sup>）的数值，且活性物质利用率为 100%，即放电容量为理论容量（C<sup>0</sup>）时，电池输出的能量称为理论能量（W<sup>0</sup>）：

$$W^0 = C^0 \cdot E^0$$

能量密度 w<sup>0</sup> 即单位质量或单位体积的电池输出能量，在理论条件下又称理论比能量，单位为 Wh/kg 或 Wh/L。理论质量比能量根据正负极活性物质的理论质量比容量以及电池电动势测算得到，此外，若电解质也参与到成流反应中，需加上电解质理论用量：

$$w^0 = E^0 / (1/Q_a + 1/Q_c + m_{inact})$$

式中：Q<sub>a</sub>、Q<sub>c</sub> 分别为负极和正极活性物质理论比容，m<sub>inact</sub> 为参与反应的电解质电化学当量。因此，若电池的电动势越大，活性物质比容量越大，则能够获得更大的理论比能量。

图表 4：能量密度公式及能斯特方程推导

$w^0 = E^0 / (1/Q_a + 1/Q_c + m_{inact})$		
条件	公式推导	公式说明
恒温恒压系统中，化学反应 $aA(a_A) + bB(a_B) \rightleftharpoons gG(a_G) + hH(a_H)$ 在电池中可逆进行	$\Delta rG_m^0 = -RT \ln K_a$ ①	① ②为热力学公式 $\Delta rG_m^0$ 为标准状况下吉布斯自由能 $K_a$ 为电池反应的平衡常数 $Q_a$ 为产物与反应物的活度商 $a_A/a_B/a_G/a_H$ 为物质活度 $E^0$ 为标准状况下电动势
	$\Delta rG_m = \Delta rG_m^0 - RT \ln Q_a$ ②	
	$\Delta rG_m^0 = -nFE^0$ ③	
	$\Delta rG_m = -nFE$ ④	
	$E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_G^g a_H^h}{a_A^a a_B^b}$ ⑤	

资料来源：《关于能斯特方程的推导》，五矿证券研究所

电池体系的元素优选需考虑电极电位和电化学当量（数值上为比容量倒数）。选取周期表上方的元素，了解元素的标准电极电位以及电化学当量，通过数值比较便能初步地筛选出适合作为高比能量电池体系的元素，而物质理论上能达到的比能量，也成为其无法突破的天花板。

一般来说，周期表中靠左的元素电极电位偏负，而靠右元素电极电位偏正。Li的电极电位最负，达到了-3.03V，且具有较低的电化学当量，理论比容量可达3861mAh/g。理论情况下若以电极电位最高和最负物质分别作正负极，形成的电池体系有最高的电动势，较高的比能量。

依据元素周期表，能构成多个高理论比能量电池体系，如锂金属电池、钠-空气电池、锂-硫电池等。而实际上，由于物质的理化性能的特殊性，高理论比能量电池在实际开发过程中也有较多问题。例如硫电极在常温下活性小，高温时易挥发；F<sub>2</sub>、Cl<sub>2</sub>等气体具有毒性，因此常采用化合物代替单质作为活性物质，导致比能量的下降。

图表 5：周期表上方元素的电位与电化学当量，能够依据数值构成多个高理论比能电池体系

周期	I A	II A	III A	IV A	V A	VIA	VII A
1	H <sub>2</sub> /H <sup>+</sup> (2.016) 0.00V 0.0376g/Ah						
2	Li/Li <sup>+</sup> (6.94) -3.03V 0.259g/Ah	Be/Be <sup>2+</sup> (9.013) -1.847V 0.618g/Ah	B/H <sub>3</sub> B <sub>3</sub> O <sub>3</sub> (10.82) -0.867V 0.135g/Ah	C/H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (12.00) 0.228V 0.112g/Ah	N <sub>2</sub> /NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (28.02) 0.275V 0.174g/Ah	O <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O (32.00) 1.229V 0.299g/Ah	F <sub>2</sub> /F <sup>-</sup> (38.00) 2.866V 0.709g/Ah
3	Na/Na <sup>+</sup> (22.99) -2.714V 0.858g/Ah	Mg/Mg <sup>2+</sup> (24.32) -2.363V 0.454g/Ah	Al/Al <sup>3+</sup> (26.98) -1.663V 0.335g/Ah	Si/H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (28.09) -0.780V 0.262g/Ah	P/H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> (30.98) -0.383V 0.231g/Ah	S/H <sub>2</sub> S (32.07) 0.171V 0.598g/Ah	Cl <sub>2</sub> /Cl <sup>-</sup> (70.91) 1.359V 1.323g/Ah
4			Sc/Sc <sup>3+</sup> (44.96) -2.077V 0.560g/Ah	Ti/Ti <sup>3+</sup> (47.90) -1.209V 0.596g/Ah	Ga/Ga <sup>3+</sup> (69.72) -0.529V 0.867g/Ah	As/AsO <sup>+</sup> (74.91) 0.254V 0.932g/Ah	
	K/K <sup>+</sup> (39.10) -2.924V 1.459g/Ah	Ca/Ca <sup>2+</sup> (40.08) -2.865V 0.748g/Ah		Ti/Ti <sup>2+</sup> (47.90) -1.630V 0.894g/Ah	Ga/Ga <sup>2+</sup> (69.72) -0.45V 1.301g/Ah	Ge/Ge <sup>2+</sup> (72.60) -0.369V 1.355g/Ah	Se/H <sub>2</sub> Se (78.96) -0.369V 1.473g/Ah
							Br <sub>2</sub> /Br <sup>-</sup> (79.90) 1.066V 2.982g/Ah

锂硫电池：2600Wh/kg  
锂空气电池：11400Wh/kg  
氢燃料电池：32700Wh/kg

资料来源：《化学电源-电池原理及制造技术》，五矿证券研究所

在了解决定电池比能量的上限的基础上，我们从理想回到现实，通过探究各类因素对比能量的影响程度，将更清楚产业界如何去靠近所能达到的比能量上限。

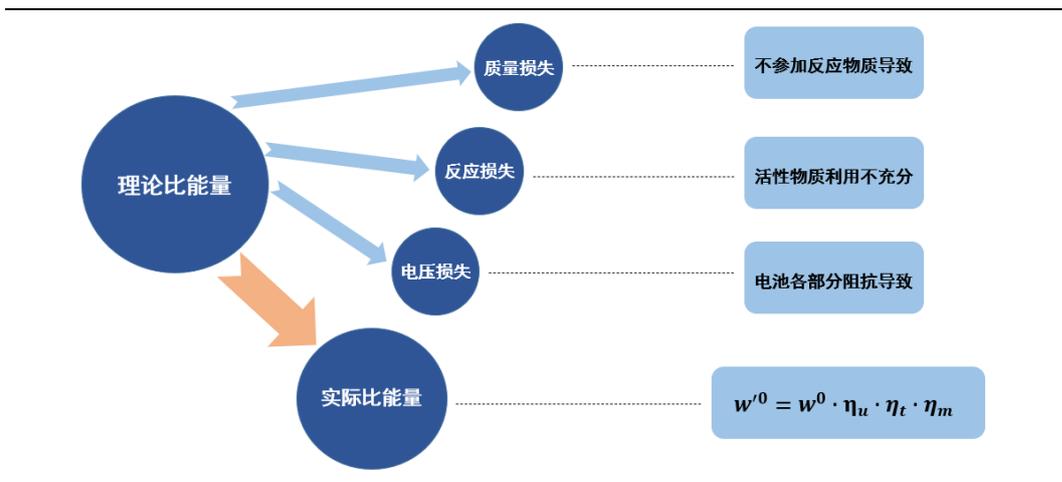
总体来说，各类因素通过影响电动势或比容量，导致比能量的下降，带来能量转换过程中的损失。实际比能量与理论比能量的关系如下述公式所示。式中， $\eta_u$ 、 $\eta_t$ 、 $\eta_m$ 分别表示电压效率、反应效率、质量效率。

$$w^0 = w^0 \cdot \eta_u \cdot \eta_t \cdot \eta_m$$

- 电压效率：即工作电压与电动势之比。工作电压因各类因素无法达到理论电动势。电动势为电池断路时正负两极之间的电位差，而在正常工作时由于存在内阻产生能量损耗，即工作电压永远小于电动势；
- 反应效率：指活性物质利用率，即实际容量与理论容量之比。事实上，活性物质的利用率永远小于1。主要系活性物质数量与活性、副反应的存在、电池结构和制造工艺、电池放电条件等的影响；
- 质量效率：即完全反应的活性物质质量与电池总质量之比。电池中含不参加反应的物质使质量效率下降，不参加反应的物质包含：电池外壳、板栅、骨架、不参与反应的电解质、过剩的活性物质等。有些电池体系中，如Cd-Ni、Zn-AgO电池，为防止过充时负极

析出 H<sub>2</sub>，负极活性物质要有一定的过剩量，以便和正极上产生的 O<sub>2</sub> 反应。

图表 6：实际比能量与理论比能量关系示意图



资料来源：《化学电源-电池原理及制造技术》，五矿证券研究所

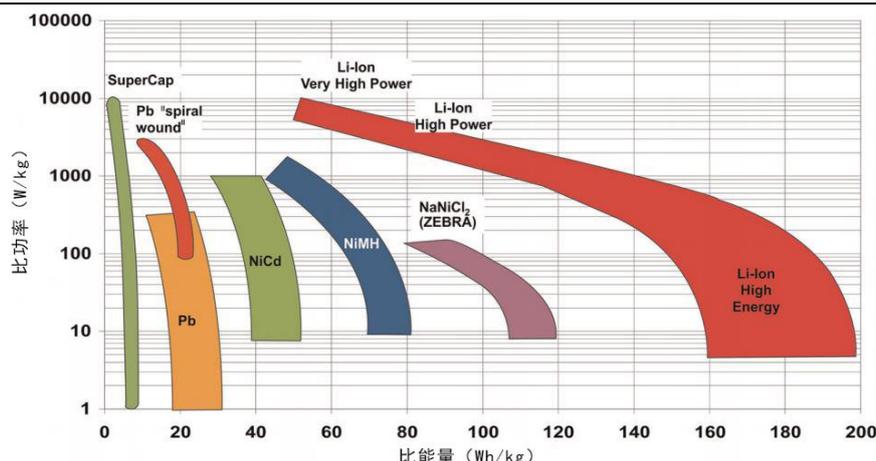
### 高倍率性能：影响输出功率以及充电速度，本质是扩散能力

倍率指电池在规定时间内放出或达到额定容量所需的电流大小。倍率性能则为不同倍率充放电电流下表现出的容量大小、保持率和恢复能力。尤其在高倍率充放条件下，对电池的性能影响增大，包括寿命、安全性等，因此产业更关注高倍率性能。在高倍率放电下，一般会有更大的输出功率，但前期化学电源主要应用于便携式电子设备，对功率要求不高，研究开发重点主要聚焦在提高设备工作时间、便携性能以及安全性能等。

当化学电源应用于车辆时，对于高倍率性能要求更加严格，主要系输出功率影响着汽车的最高时速、加速性能及爬坡性能，此外车用动力场景要求较好的快充能力。一般来说，当以高倍率放电时，电池极化作用增强，电压下降导致比能量降低，因此常常是功率与能量不可兼得的情况。以铅酸、镍氢、锂离子电池的一般情况来讲，铅酸电池的能量功率特性较差，而锂离子电池的变化范围宽，镍氢电池具备较好的倍率性能但比能量较低。值得注意的是，长时间的高倍率充放对于封闭的电池体系并不友好，因此我们认为短期内“换电模式”是一种痛点解决方式，而长期视角下还应关注开放式电池如燃料电池体系的开发。

高倍率下的充放性能，实质是大电流条件下的反应速度保持能力，与电解质的电导率，以及离子在电极、电解质和相关界面处的迁移能力相关。落实到具体参数，主要是正负极材料的结构、尺寸、比表面积、导电性、孔隙率和电解质的传导能力、稳定性等方面，可以通过材料改性来改善倍率性能。

图表 7: 不同类型电池电芯级别的能量比较拉贡图, 比能的提升往往伴随的是比功率的下降



资料来源: 《A review of current automotive battery technology and future prospects》, 五矿证券研究所

图表 8: 影响锂离子电池高倍率性能的主要因素

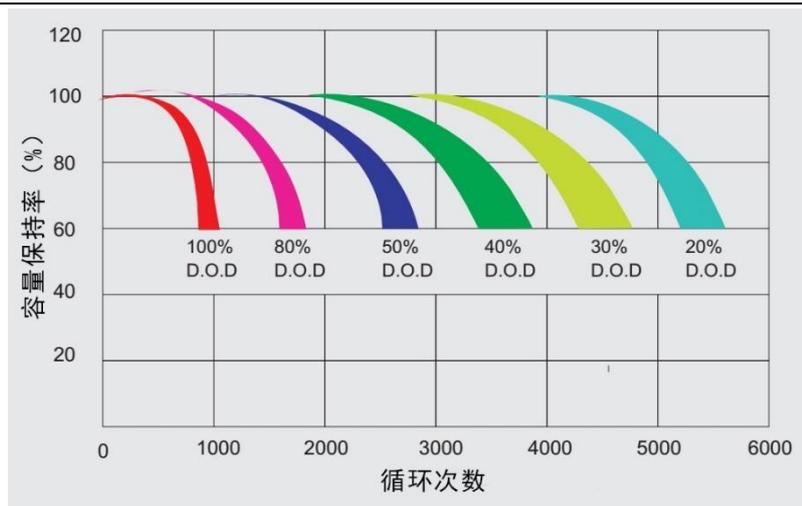
类型	影响因素	影响机制
正极	结构	三维比二维更有利于锂离子的快速迁移
	粒径	纳米颗粒有正向作用
	电极膜厚	薄膜化有正向作用
	导电性	导电剂含量与分布均匀性有正向作用
	孔隙率	多孔材料减小离子扩散路径
负极	结构	应有利于离子多个方向嵌入和脱出从而降低扩散电阻
	材料尺寸	粒径较小的颗粒和纳米结构有正向作用
	电极表面电阻	添加导电剂有正向作用
	孔隙率	适当选择孔隙率有正向作用
电解质	传导能力	高导电率有正向作用
	稳定性	高的化学稳定和热稳定性减小氧化分解

资料来源: 《影响锂离子电池高倍率充放电性能的因素》, 五矿证券研究所

### 循环性能: 衡量使用寿命的指标, 全生命周期多因素影响

在一定的放电制度下, 电池容量降至规定值之前, 电池所经受的循环次数, 称使用周期。影响电池循环寿命的主要因素有: 在充放电过程中, 反应条件如温度、电流密度、放电深度的变化, 将导致: 电极活性表面积减小, 使工作电流密度上升, 极化增大; 电极上活性物质脱落或转移; 电极材料发生腐蚀; 电池内部短路; 隔膜损坏和活性物质晶型改变, 活性降低。

从电池产品的生产流程来考虑, 多个方面会影响电池循环性能: (1) 电池本身的设计, 如原材料的选择、正负极活性物质的配比、电解液的选择及用量等, 都会影响电池充放电过程的表现; (2) 与电池制造过程的工艺相关, 例如锂离子电池制造工艺的好坏影响电池的内阻大小; (3) 电池的使用方法, 例如大电流充放电条件、充放电截止电压超限等都会造成结构的损伤; (4) 电池的使用环境, 尤其是环境温度, 对电池的循环寿命影响较大。

**图表 9：铅酸电池的循环次数随放电深度的增加而降低**


资料来源：sunray africa, 五矿证券研究所

**图表 10：从设计到工艺，再到产品使用层面，均会影响电池的循环性能**

项目	影响因素	影响机制
电池设计	正负极主料选择及用量	其中的磁性物质降低材料的比容量等；不合理的配比造成循环失效
	电解液的选择及用量	添加剂影响循环性能；不合理的注液量使循环衰减严重
	粘结剂的选择及用量	首次充电中粘结剂的参与影响 SEI 膜的形成
	导电剂	种类、含量、粒度及分散程度和表面处理情况影响阻抗与极化
制造工艺	极片碾压	压实密度高降低容量增加计划；压实密度低造成高孔隙率，内阻大
	卷绕过程	极片插入及收尾位置、电芯松紧程度等影响容量衰减程度
	装配过程	极耳与电池盖板引线的焊接工艺影响电池内阻大小
	化成等其他工艺	一般是影响内阻导致容量的变化
使用方法	充放电电流	电流过大损伤材料导致容量损失
	充放电截止电压	过充使活性物质损失；过放使负极阻抗增加、极化加强
	PACK 过程中机械压力	压力过大使离子扩散速度变慢；压力小使离子扩散到负极的通道变长
	环境温度	高温下电解液分解等；低温下影响电导率、限制传输速率

资料来源：《影响锂离子电池循环寿命的因素》，五矿证券研究所

### 安全性能：商用首要考量的“红线”，持续改善增强可靠性

当下商用的各类电池均具有较好的安全性能，但不同类型电池的安全性能依然有所差异。铅酸电池主要的安全隐患来自其构成材料，主要系硫酸溶液电解液稳定性较低，若发生漏液或爆炸事故，造成的危害较大。此外，与锂离子电池相比，铅酸电池的安全保障也较少。对于镍氢电池，其采用的物质材料与配备的安全阀等保障系统也提升了该类型电池的安全性。不同类型的锂离子电池因电池材料的差异等原因，安全性各异，铁锂体系结构稳定安全性较好。

材料性能与工艺质量改善是提升安全性能的关键。要求电池的安全性好，即电池材料应具有较好的化学稳定性和热稳定性，同时在电池制造方面，要求材料的匹配性要好，装配性能佳，还需配备系统的电池保护措施，从整体上保障电池的安全工作。影响电池安全性能的关键因素包括内部因素与外部因素，内部因素指构成电池的各部分材料的性能，外部因素指电池使用过程中因操作不当带来的过充过放等现象。可以通过调控影响机制改善体系的安全性能。

**图表 11：电池老化衰减机理与安全性能演变的关系**

电池组分	老化衰减机理	电池安全性能变化及原因
正极	正极晶体结构变化	正极材料热稳定性下降，引起电池热稳定性下降，热失控温度降低
	表面形成钝化膜	内阻增加，导致电池充放电过程焦耳热增加，耐过充能力下降
	过渡金属离子溶解	加速负极 SEI 膜稳定，电池热稳定性提升，自产热起始温度增加
	活性物质损失	电池耐过充能力下降
负极	表面析锂	负极材料热稳定性下降，引起电池热稳定性下降，自产热起始温度降低，自产热速率增加
	SEI 膜增厚	电池热稳定性提升，自产热起始温度增加
	活性物质损失	电池耐过充能力下降
其它	电解液氧化分解产气	电池内压增加，体积膨胀
	内阻增加（粘结剂失效等引起）	电池充放电过程焦耳热增加，耐过充能力下降
	铜集流体溶解并在正极析出	电池内短路
	卷芯由于应力发生变形	电流分布不均，容易发生局部析锂，并导致局部热点增加，电池热稳定性下降
	隔膜老化失效	内短路概率增加

资料来源：《锂离子电池全生命周期安全性演变研究进展》，五矿证券研究所

## 动力领域的体系演进：追求更高比能为主线，锂电体系脱颖而出

锂电池因高比能长循环等优势，在社会日常场景中持续渗透。全球碳中和目标下，新能源汽车产业已率先发力，带动锂电体系迈入新增长。拉长周期看，我们认为，具有最优综合性能、且能够不断升级的锂电池，未来仍将继续在动力领域扮演主导角色，并逐渐向固定式储能等场景渗透。但需注意，锂电内部体系多种多样，以锂为核心的技术迭代仍在进行，研发依然是企业的重心。因此，持续关注动力电池的技术变化，更有利于找寻胜者，增加投资的确定性。

### 车用化学电源有更严格的标准要求

化学电源在电动车上的应用，甚至早于内燃机车。按照电动车的发展状况，可分为四个阶段：

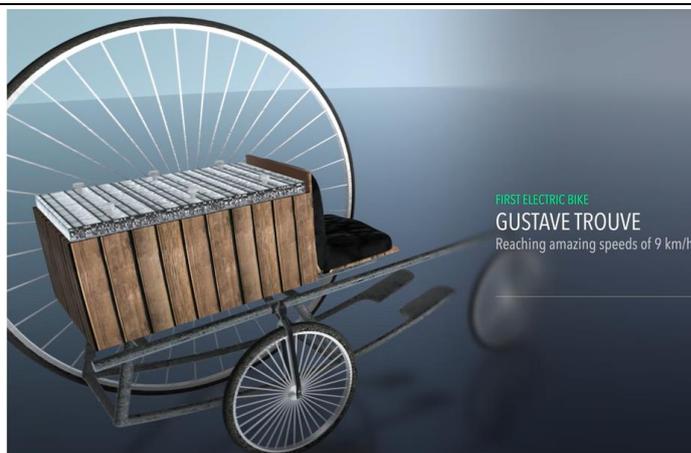
- 发展初期（1834-1880）：1834年由 Thomas Davenport 制造了世界上第一辆不可充电干电池驱动的电动三轮车，化学电源开始在陆路交通发挥作用。
- 快速导入（1881-19世纪末）：1881年 Gustave Trouve 制造了可充电铅酸电池为动力的三轮车，因实用性提升而开始在欧美地区快速发展，在19世纪末达到一个高潮。
- 应用低潮（20世纪初-20世纪80年代）：19世纪末内燃机技术的发明与突破，使内燃机汽车迅速发展，而车用电池技术始终没有解决比能量、比功率以及循环寿命等方面的问题，叠加化石燃料的充足供应，车用电池的明显劣势使电动车逐步淡出市场。
- 重焕生机（20世纪末-至今）：上世纪末，锂离子电池技术的诞生与持续完善使其在数码产品领域首先得到广泛应用，以及社会对能源枯竭的焦虑与燃烧污染的关注，综合促进电动车开始新一轮的蓬勃发展，随之而来的政策支持也进一步推动车用电池的改进。

化学电源在电动汽车上的应用，因场景的差异而带来特殊的技术要求。车用电池与一般启动用电池有所差异，以较长时间的中等电流持续放电为主，大电流放电辅助进行启动、加速或爬坡。电动车对化学电源的性能要求主要有：高能量密度、高功率密度、较好的充放电性能以及较长的循环寿命。此外还要求电池一致性好、安全稳定、使用维护方便、价格较低等。

随电动汽车发展，对动力电池的能量和功率要求逐渐提升。从微混合-中等混合-全混合-插电

混动到纯电动汽车，动力电池的质量要求提高，必须具有更高的能量密度和功率密度。全球绿色经济指引下，全面电动化大势所趋，因此对电池技术的优化将更加迫切。

图表 12: 1881 年 Gustave Trouve 制造可充电铅酸电池三轮车，推进电动车应用



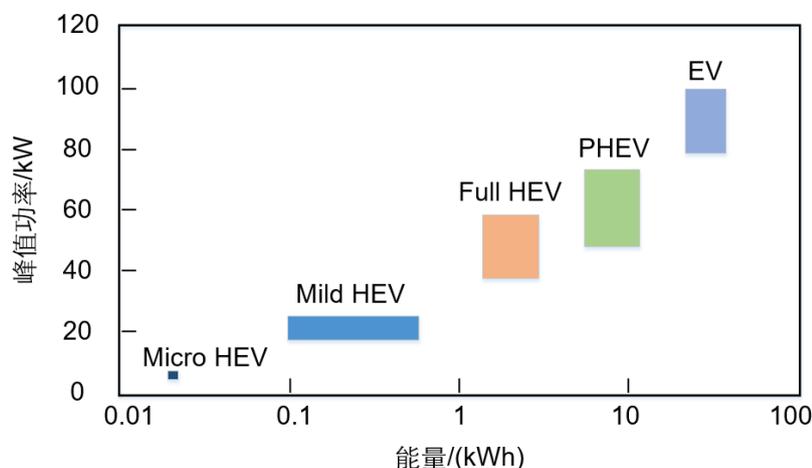
资料来源: Subject Zero Science, 五矿证券研究所

图表 13: 电动汽车用动力电池性能要求

性能类型	性能要求	对应参数	说明
动力性能	续航里程充足	比能量	比能量高有助降低动力电池质量与体积，提高电动汽车有效载荷
	加速性能优越	比功率	比功率高，单位时间内电池的输出能量越大
可靠性能	使用寿命长	循环寿命	循环寿命越长，正常使用周期内里程数越多
	环境适应性强	高低温性能	要求电池能够在极冷气温与炎热环境下稳定工作
	贮存时间久	自放电率	贮存期间自放电率低则相应提高运行可靠性和寿命
安全性能	事故率低	充放性、结构性等	能有效避免因泄露、短路、撞击、颠簸等引起的危险事故
	材料环保	材料污染度	电池材料与环境友好
经济性能	电池价格低	—	材料应来源丰富、制造成本低以降低整车价格
	材料循环利用度高	—	材料可再生利用

资料来源: 《纯电动车电池的发展现状和前景》，《电动车、电动车用电源及其发展战略》，五矿证券研究所

图表 14: 不同类型电动汽车对动力电池能量和功率的要求



资料来源: 《动力电池材料》，五矿证券研究所

### 动力的性能诉求持续推动更高比能电池在车用领域的发展

对电动汽车动力性能要求提升，推动动力电池技术发展。由原电池驱动开始，电动汽车中的化学电源不断发展，从可反复循环使用的铅酸电池，到镍镉电池，再到镍氢电池，以及锂二次电池，这些驱动源在应用上相比同时代电池技术，具备较高的能量密度与功率密度，可靠性较强，因此成为不同时期的主流动力电池。

- **铅酸电池：**高可靠性且价格低，但比能量较低。单体铅酸蓄电池主要由正极板（活性物质  $PbO_2$ ）、负极板（主要是  $Pb$ ）、硫酸电解液、隔板、蓄电池盖与槽组成。蓄电池中，正负极板浸在硫酸溶液中，由耐腐蚀耐氧化的隔板分开，而槽体的耐酸与耐温范围宽，机械强度高。铅酸电池因其理化和结构特性，具有使用可靠安全性高、可大电流放电、工作温度范围较宽、大容量电池技术成熟、维护简单、使用寿命长、材料易得而价格低廉的特点。但铅酸电池的理论比能量仅有  $170Wh/kg$ ，实际比能量由于活性物质利用率低而仅有  $35\sim 45Wh/kg$ 。受限于能量密度，铅酸电池在电动汽车应用方面不具备优势。
- **镍镉电池：**容量损失大，比能量低，有记忆效应。镍镉电池的体系以氧化镍（ $NiOOH$ ）为正极，镉（ $Cd$ ）为负极，氢氧化钾（ $KOH$ ）或氢氧化钠（ $NaOH$ ）溶液为电解液，是一种碱性蓄电池。镍镉电池具有使用寿命长（充放电循环周期可达数千次）、自放电小、低温性能好、耐过充过放、耐冲击和振动等优点，因此在民用军用多个领域得到广泛应用。但镍镉电池的电效率、能量效率、活性物质利用率较低、镉材有毒、价格也相对昂贵，以及记忆效应（电池可逆失效）带来的容量损失。镍镉电池的理论比能量为  $214Wh/kg$ ，但一般情况下正极活性物质利用率为  $70\%$  左右，负极活性物质利用率在  $75\%\sim 85\%$  之间。因此其实际比能量也较低，在  $50Wh/kg$  左右。
- **镍氢电池：**安全性及比能量较高。镍氢电池的正极为氧化镍，负极则是氢电极，可以说是镍镉电池与燃料电池结合的产物。密封镍氢电池也叫做高压镍氢电池（ $H_2-Ni$ ），用来区别以金属氢化物为负极的低压镍氢电池（ $MH-Ni$ ）。镍氢电池具备比能量较高（比镍镉电池高  $1.5\sim 2$  倍）、充放电循环寿命长、过充过放承受能力强等优点，但初始成本较高，自放电速度随氢压提升而增加。
- **锂离子电池：**与其他主要的电池类型相比，综合性能更佳。锂离子电池正极一般采用插层化合物，如  $LiCoO_2$ 、 $LiMn_2O_4$  等，负极采用碳基、硅基等可嵌锂的高比容量材料，传统电解质则为可溶解锂盐的有机溶剂。循环充放电依靠锂离子在正负极材料中嵌入脱出实现。锂离子电池的优点表现在容量大、工作电压高、荷电保持能力强、循环使用寿命长、安全性高，结构上因比能量高而有体积小重量轻的特点。但传统锂离子电池还存在内部阻抗高、电压变化大、成本仍有待继续降低等不足。

图表 15：市面上主流的电池性能比较，锂离子电池的优势突出

性能参数	铅酸电池	镍镉电池	镍氢电池	锂离子电池		
				钴酸锂	锰酸锂	磷酸铁锂
实际能量密度(Wh/kg)	30-50	45-80	60-120	150-190	100-135	90-120
内阻(mΩ)	< 100	100-200	200-300	150-300	25-75	25-50
	12V pack	6V pack	6V pack	7.2V	单电芯	单电芯
循环寿命(80%放电)	200-300	1000	300-500	500-1000	500-1000	1000-2000
快充时长	8-16h	1h	2-4h	2-4h	< 1h	< 1h
耐过充能力	高	中等	低		低	
自放电率(室温)	5%	20%	30%		< 10%	
电池电压(名义)	2V	1.2V	1.2V	3.6V	3.8V	3.3V
充电截止电压(V)	2.40		通过电压信号		4.20	3.60

	浮充 2.25		检测是否满电量			
放电截止电压(V,1C)	1.75		1.00		2.50-3.00	2.80
峰值电流	5C	20C	5C	> 3C	> 30C	> 30C
最佳结果	0.2C	1C	0.5C	< 1C	< 10C	< 10C
充电温度	-20~50℃		0~45℃		0~45℃	
放电温度	20~50℃		-20~65℃		-20~60℃	
维护要求	3-6 月 (充满)	30-60 天 (放电)	60-90 天 (放电)		无要求	
安全防护	热稳定		热稳定, 常用保险丝保护		强制保护电路	
记忆效应	无	有	无		无	
环保性	较差	差	好		好	

资料来源: PVEDucation, 五矿证券研究所

### 锂离子电池：动力电池的优选技术，内部体系多元

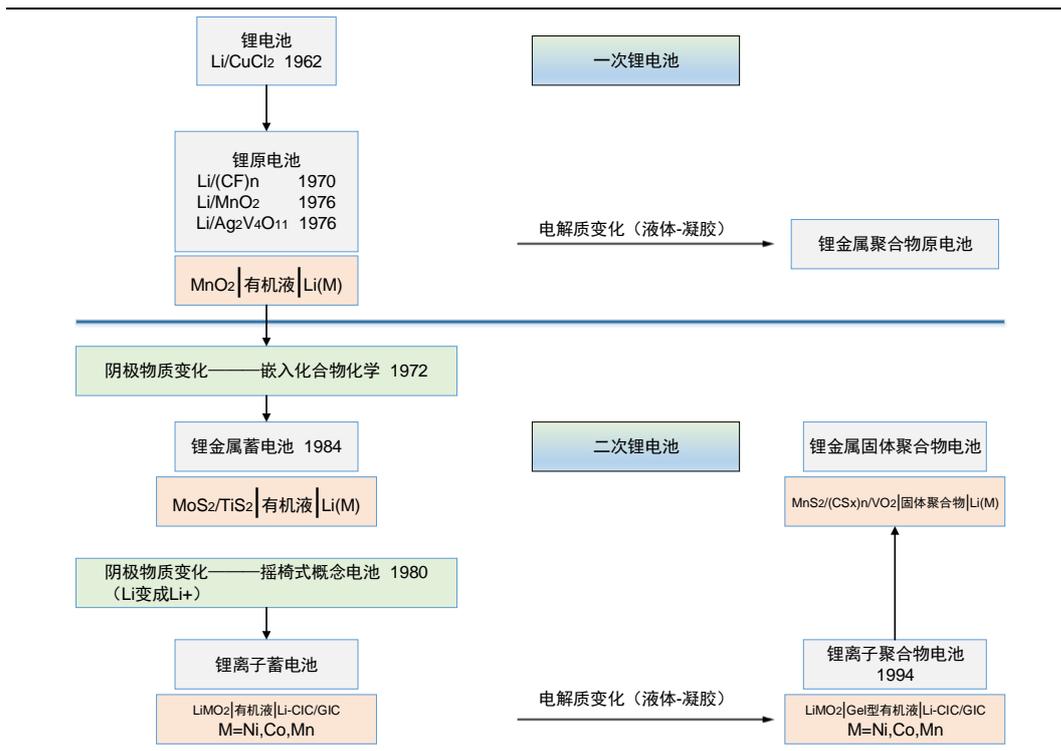
锂电池是较好的动力电池之选。从理化本质讲，锂电池在各类商用化学电源中具备较高的理论比容量及理论比能量，而车用动力电池的关键应用要求便是高比能的动力系统；从系统构成讲，化学电源的材料选择、用量及匹配性与高倍率性能、循环性能等密切相关，锂电池的“嵌入-脱出”机制使其在综合性能上具备优势以及较大的改进空间；从商业化角度讲，综合性能方面，随技术发展、工艺完善，锂电池在车用领域竞争力逐渐提升，成为主流动力电池。

锂电池的技术发展史不到百年，但持续在拓展应用空间，本质是技术提升的潜力较大。20世纪60、70年代的石油危机促使替代能源的需求更加迫切，同时军事、航空、医药等领域对电池提出新的要求，如更高的能量密度。因为具有较高的能量密度，锂金属在1958年被引入电池领域，并在1970年代实现了锂原电池的军用与民用。

锂原电池的成功使研究重心转向电池循环利用，推动锂二次电池的发展。锂金属二次电池研究只比锂原电池晚了十年，在20世纪80年代就推向市场，但由于无法从根本上解决安全性等问题，研究逐渐向锂离子电池技术倾斜。日本索尼于1991年推出第一块商品化锂离子电池。电池技术发展过程中，抛弃液体电解质，采用离子导电聚合物电解质进行离子传导属于另一种方案。在1999年由松下公司等推出锂离子聚合物电池相关产品，正式投入商业化生产。锂聚合物电池的制备技术成熟度还有待加强，目前仍处于推广发展期。

锂离子电池具备较优异的综合性能，但不同类型的锂电池，其性能差异依然存在。主要原因在于构成锂电池的主要材料范围广、差异大，尤其是在正极、负极、隔膜、电解质的选择与匹配上，因应用需求不同而需要选择不同的类型，最终的产品性能可能差距较大。

图表 16：锂电池技术发展时间相对较短但性能提升较快，且仍在持续改善



资料来源：《锂电池发展简史》，五矿证券研究所

## 锂电材料开发：渐进迭代为主旋律，革命性突破需量变到质变

强政策驱动下新能源汽车市场快速增长，产品力驱动逐渐强化，推动行业保持向上态势。车用动力领域的关键诉求涉及续航、安全及循环等性能，锂离子电池体系因其应用潜力及适配性而不断升级，比能已由 1991 年的 80Wh/kg 提升至当下的 300Wh/kg，其发展的根本建立在不断优化材料体系并寻找新材料组合的基础上。以往的开发路径以高比能低成本为主线，因此历经钴酸锂至三元高镍的需求份额变动。站在全球电动化提速、向市场化驱动的新节点，我们认为，锂电材料体系将继续沿高比能主线演进，需求外溢效应不断凸显。

- 车用动力领域，高比能主线下，按照开发难度与体系变动呈正相关的逻辑，能够梳理出相对清晰的演进路径。正极方面，短期高镍正极相对明确，中期无钴富锂高压材料更满足高比能需求，长期无锂正极将是革命性突破的重点；负极方面，碳基材料因优势的导电及承载作用将贯穿于硅基、金属锂等高比容负极的渐进开发之中。

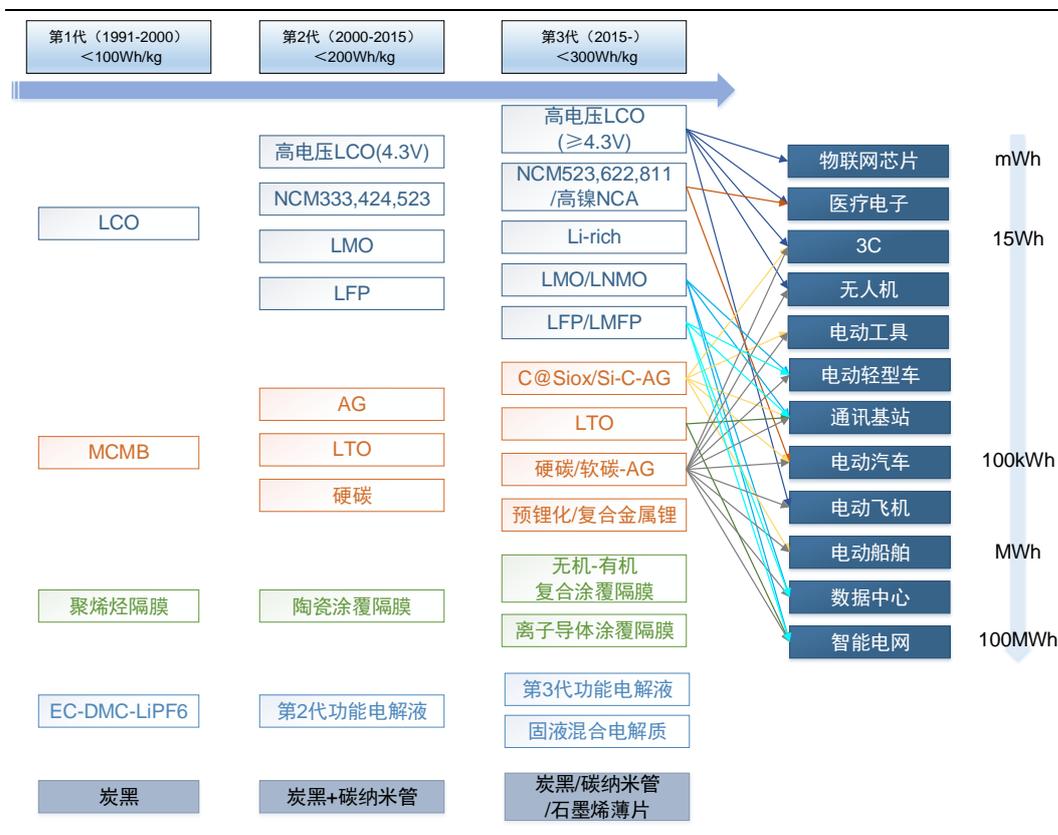
但必须注意，动力电池一味的追求长续航既遭遇技术难点，又难满足其他性能要求。高镍体系适用城际长续航，而铁锂体系更满足市内短途，同时还有快充等细分市场。因此，多类需求场景下，在功率、安全等性能上的改善允许一定比能的牺牲，从而可能使得整体的材料体系演进相对多元，呈现综合性能螺旋升级的情形；

- 锂电技术升级产生的替代效应正在发生，推动体系向其他场景持续渗透。锂电池从小容量的医药航空领域导入，再逐渐替代铅酸、镍氢体系等成为车用动力领域的主流，伴随的是电池各组分的演进，尤其是关键的正负极活性材料的变化。材料改性、组合后的体系升级不仅体现在比能的提升，更在于成本竞争力的增强。这是锂电技术具有的丰富衍生材料给予的性能潜力空间。

据我们测算，具备高安全长循环优势的方形铁锂电芯不含税售价已降至 0.53 元/Wh 左右，基站备用电源全生命周期成本已低于铅酸电池；此外，铁锂等高性价比锂电体系正

在向电动工具、两轮电动等低带电量领域渗透。我们认为，体系性能指标仍将持续改善，应保持多样场景导入的积极预期；同时正向反馈将是体系革新的重要动力，因此不容忽视固态等前沿技术的进展，产业进程可能超预期推进。

图表 17：通过不断优化现有材料并寻找新材料组合，持续提升锂离子电池的综合性能



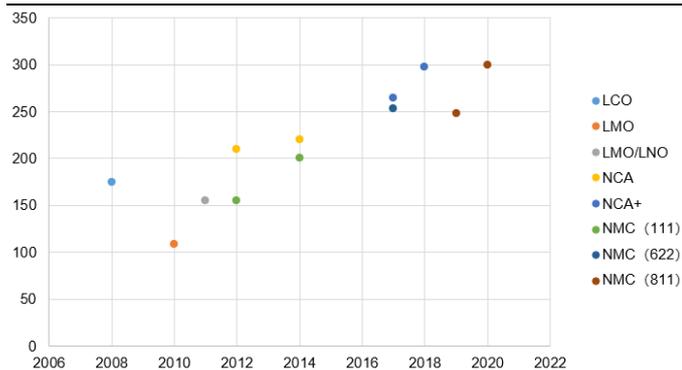
资料来源：《Practical Evaluation of Energy Densities for Sulfide Solid-State Batteries》，五矿证券研究所

## 材料体系迭代升级，电池成本持续下降

动力电池能量密度与成本管控问题对应新能源汽车两大焦虑，我们认为未来关键焦虑有望逐步消除。1) 首先动力电池的能量密度直接关系到电池包的体积、续航里程等。动力电池能量密度的提升能够减小电池包的整体体积，也能带来更长的续航里程。据 BNEF，动力电池电芯能量密度十年间持续提升，2020 年达到 300Wh/kg。也能够看到近年来因逐渐靠近传统锂电材料理论极限，能量密度增长趋缓；2) 动力电池系统作为新能源车核心部件，成本占比大，而 2010 年以来全球电池包均价持续下降，2020 年来到 137 美元/kWh，2023 年有望降至 101 美元/kWh，与燃油车相比，价格竞争力逐步凸显。

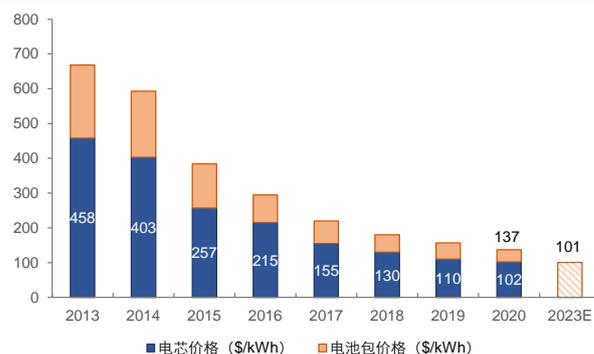
电芯的活性材料是发挥功能的基础，其成本占比高，围绕材料降本增效是主要的研究方向。解构电池包，其由多电芯组成模组后，多个模组排列而成。电芯包括电极、隔膜、电解液与集流体等，而电极则由活性材料、导电剂、粘结剂等构成，其中活性材料是电化学反应的主要参与者。据《Nature Energy》发表的研究，对三元 NCM/石墨型电芯进行成本拆分，其中材料成本占电芯成本比例达到 74.9%，在材料成本当中，正极材料成本又占到 49.5%。

图表 18: 2010 年以来动力电池能量密度已增长 2 倍至 300Wh/kg



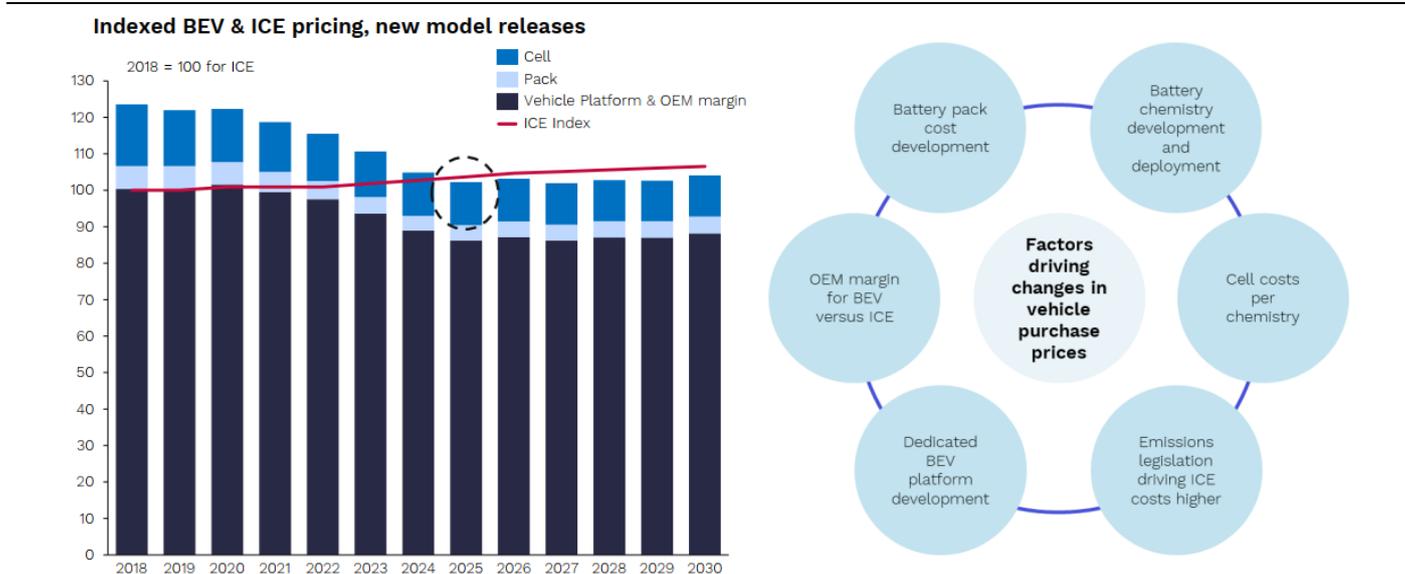
资料来源: BNEF, 五矿证券研究所

图表 19: 2020 年全球电池包均价同比下降 13%至 137 美元/千瓦时



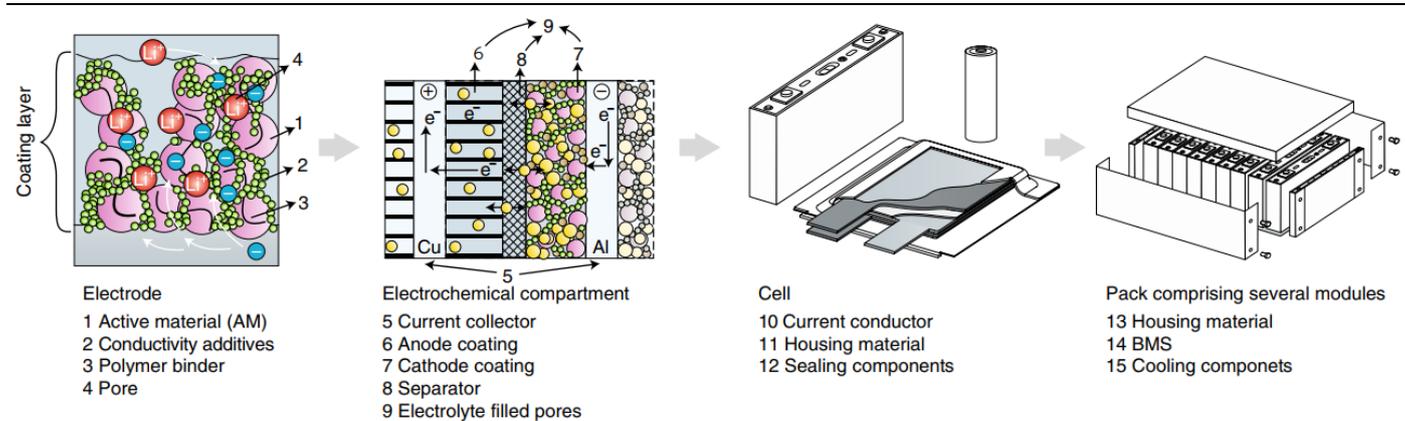
资料来源: BNEF, 五矿证券研究所

图表 20: 新能源车售价指数预计在 2025 年前后低于燃油车售价指数



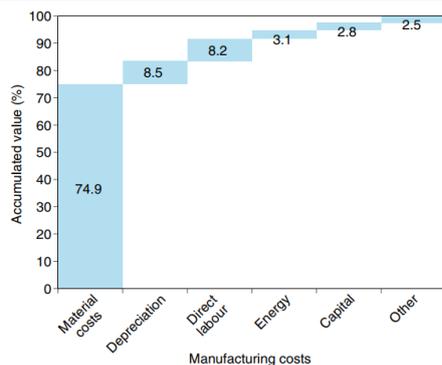
资料来源: Rho Motion, 五矿证券研究所

图表 21: 解构电池包, 能够了解到发挥核心功能的基石是电极材料



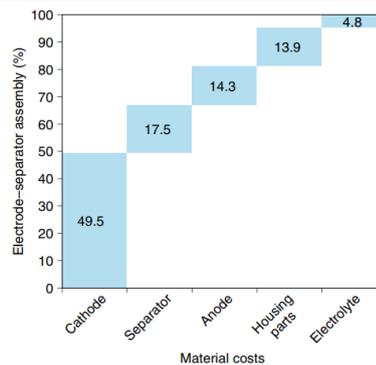
资料来源: 《Current status and challenges for automotive battery production technologies》, 五矿证券研究所

图表 22: PHEV 37Ah 的三元/石墨型电芯中材料成本占 74.9%



资料来源: Nature Energy, 五矿证券研究所

图表 23: 该款电芯的材料成本占比中, 正极份额为 49.5%

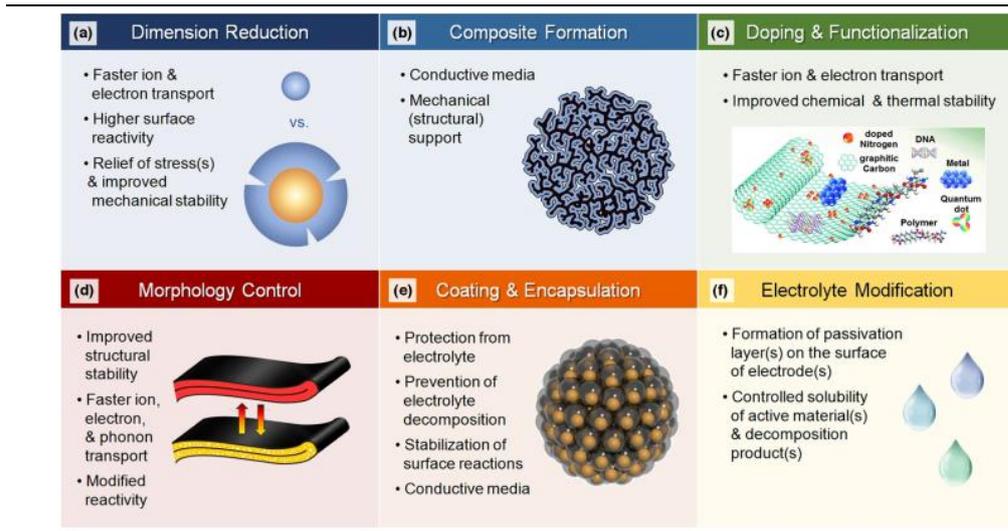


资料来源: Nature Energy, 五矿证券研究所

材料体系的主要研发目标是构成更高比能、更加稳定的电池体系。总结来看有两种开发路径, 一是开展材料改性, 方式主要有降低尺寸、复合结构、掺杂和功能性化、形态控制、涂覆和封装、电解质改性等; 二是合成新型电芯材料, 如硫正极、硅负极、固态电解质等。

- 降低尺寸: 多为纳米化, 高比表面积下能够增强扩散能力; 小尺寸效应减少离子嵌入脱出的深度和行程; 纳米材料的超塑性和蠕变性使其具有较强的体积变化承受能力。但制备工艺难度较大、生产成本较高;
- 采用复合结构: 由 2 种或 2 种以上理化性质不同的材料组分按照不同比例组合而成, 一般通过各组分性能的互补和关联来获得更优的综合性能。电池材料的复合通常由功能体组元和基体组元形成, 基体作为支撑、加入导电材料等, 如复合正极材料。
- 掺杂和功能性化: 主要是杂原子掺杂, 包括非金属掺杂和金属离子掺杂。研究发现其能有效地调整本征材料的载流子/离子迁移、吸附能力、反应活性、结构稳定性等, 结合不同杂原子掺杂的优势及协同效应, 指导制备更佳的电池材料。如常见的三元 NCM 材料中掺杂 Al、Mg、Ti、Zr、F 等元素, 定向的提高电导率或结构稳定性等。
- 形态控制: 因不同结构反映的外在性能有差异, 对材料生长或使用过程中的形态、微观结构进行控制, 能够调整材料的电化学表现。如 LiCoO<sub>2</sub> (LCO) 材料具备多种晶型, 包括 O<sub>2</sub>、O<sub>3</sub>、O<sub>4</sub> 等层状结构, 其中 O<sub>3</sub> 结构的 LCO 是热力学稳定的。而在电化学循环中随 Li 含量变化会发生 Co 和 O 阵列的重排导致新相出现。开展形态控制, 保持 O<sub>3</sub> 结构, 更利于性能稳定发挥。
- 涂覆与封装: 对材料展开表面包覆, 主要有以下作用: 与电解质分隔避免反应, 进行材料防护和防止电解质分解; 使材料表面反应更加稳定; 涂覆导电物质增强导电性, 如在导电性差的磷酸铁锂材料表面包覆碳来提升导电性能。
- 电解质改性: 调整电解液组分等方式能改变电解质性能, 和电极材料产生协同。改性后可在电极表面形成钝化层, 或控制活性物质的溶解程度以及分解后的产物。如青岛能源所开发的基于氟代溶剂和双锂盐电解质的高性能电解液, 对富锂锰基正极表现出高匹配兼容性, 提升其电化学性能, 主因电解液在正极表面形成保护膜而稳定正极结构, 抑制电解液的分解对正极造成的腐蚀; 同时会在负极表面形成稳定保护膜, 改善循环稳定性。

图表 24: 6 种主要的材料改性思想, 不仅是当下提升已有材料性能的手段, 也是构造复合新材料的方法



资料来源: 《Li-ion battery materials: present and future》, 五矿证券研究所

## 正极开发主旋律: 高比能为主线, 多维性能渐进革新

正极是电池发挥性能的基石之一, 针对正极材料的开发十分关键。但材料的研制方向相对繁杂, 有必要进行开发策略的梳理。在此章, 我们从正极的理化本质着手, 回答五个问题: (1) 针对正极为什么要持续改性? (2) 如何确定改性的方向? (3) 改性后不同材料具备的核心优势是什么? (4) 改性后材料仍然存在哪些不足? (5) 具备技术竞争力的企业有哪些?

我们认为, 以能量密度为主要性能提升点的正极材料开发路径是主线。但同样要承认这是一个动态过程, 期间依然有针对其他性能的改善, 相对低比能的材料亦有应用价值。总体上, 正极开发遵循产业化优先, 体系兼容性优先的理念, 能量密度将螺旋式上升:

- 短期 1-2 年, 高镍正极是较明确的开发及应用方向: 高镍正极能够提升比容, 并且“去钴化”将降低成本。高镍正极是众多具有高比能潜力材料中, 商业进展最快的类型。但动力领域要求较好的综合性能, 高镍正极开发仍需关注安全性等方面的改善;
- 中期 3-5 年, 富锂锰基、高电压正极等更满足比能要求: 能量密度的提升在产业进程前期是重点的关注方面, 但随着续航提升、电动车其他性能提高的诉求增强, 未来并不会一味的追求比能。但同样要认识到, 产业推进中比能提升不可或缺, 中期看, 高镍正极较难满足 350-400Wh/kg 以上的要求, 而富锂锰基、高电压正极等类型具备更高的理论比能上限, 因此是较好的研发选择, 但还将遭遇其他组分如电解液匹配的问题;
- 长期 8-10 年, 无锂正极的应用将使体系发生较大革新: 正极比容提升相比负极比容提升更为关键, 从元素周期表看, 右上方元素如 S、O、F、Cl 等具备提升比能的较大潜力, 通过无锂正极+锂金属负极的体系革新, 电池的性能将获得革命性的提高。但是无锂正极的开发意味着传统电池体系的较大变动, 涉及负极、电解液等多组分和结构的改进。

### 锂离子电池正极组分中, 镍钴锰等过渡金属往往不可或缺

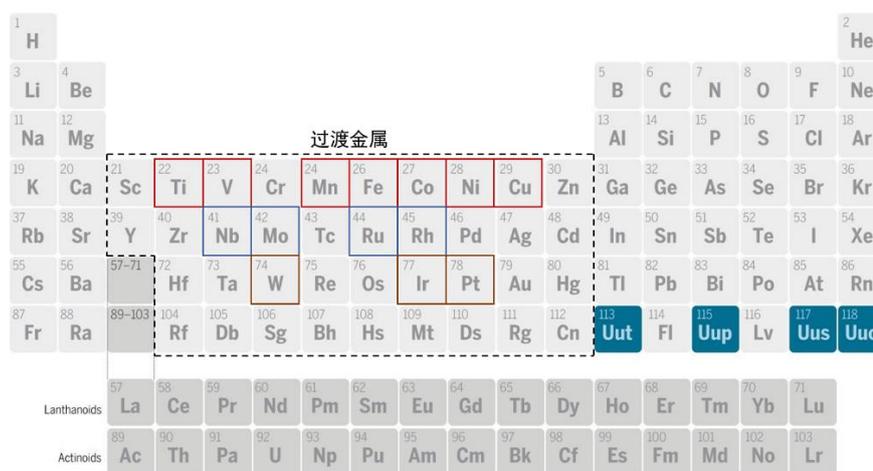
正极一般为含锂的过渡金属氧化物或聚阴离子化合物, 且过渡金属中 Co、Ni、Mn 等较为合适, 主要系: (1) 过渡金属一般具有多种价态, 可保持锂离子嵌入和脱出过程中的电中性; (2) 嵌锂化合物具有相对锂的较高的电极电势, 可保证电池有较高的开路电压。

在元素周期表中, 理论上能够匹配锂形成  $\text{LiMO}_2$  型材料的元素主要包括第四周期 3d 类 (下

图红框)、第五周期 4d 类 (下图蓝框)、第六周期 5d 类 (下图棕框), 但 4d 与 5d 类金属主要为贵金属或重金属, 3d 类中钒有毒、钛铁铜的复合氧化物因结构不稳定可逆性太差, 实用性低。因此综合来看, Co、Ni、Mn 等是合适的能够形成  $\text{LiMO}_2$  型材料的过渡金属。

镍酸锂材料的 Li/Ni 混排等问题阻碍其商用, 正极发展主要聚焦在几类材料及衍生材料上。合成的镍酸锂中总存在未氧化的  $\text{Ni}^{2+}$ , 而  $\text{Ni}^{2+}$  离子半径(0.068nm)与锂离子半径(0.076nm)相近, 因此易占据锂离子所在位置。当材料充电时造成 Li/Ni 混排,  $\text{Ni}^{2+}$  随后形成半径更小的  $\text{Ni}^{3+}$  而导致局部结构塌陷, 使周围正常嵌锂位发生失效, 最终材料比容量降低, 循环性变差。因此, 正极活性发展聚焦在结构相对稳定可产业化的几类材料, 如钴酸锂、锰酸锂, 以及通过多种改性形成的各类衍生材料。

图表 25: Co、Ni、Mn 等是嵌锂化合物中合适的过渡金属之选



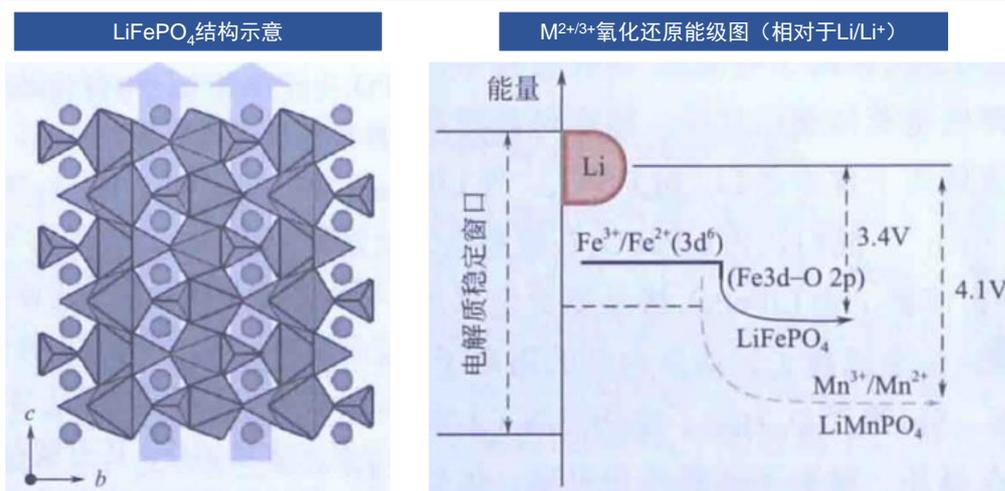
The periodic table shows transition metals (d-block) highlighted in red boxes, including Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Y, Zr, Nb, Mo, Tc, Ru, Rh, Pd, Ag, Cd, Hf, Ta, W, Re, Os, Ir, Pt, Au, Hg, and Pt. Other elements are highlighted in blue (Uut, Fl, Uup, Lv, Uus, Uuo) and brown (La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Ac, Th, Pa, U, Np, Pu, Am, Cm, Bk, Cf, Es, Fm, Md, No, Lr).

资料来源: Sciencemag, 五矿证券研究所

聚阴离子正极同样含有过渡金属元素, 结构稳定, 其中磷酸盐类是已规模商用产品。1997 年古迪纳夫等人最先提出并研究一些列聚阴离子化合物  $\text{LiMXO}_4$  ( $\text{M}=\text{Fe}$ 、 $\text{Ni}$ 、 $\text{Mn}$ 、 $\text{Co}$  等,  $\text{X}=\text{S}$ 、 $\text{P}$ 、 $\text{As}$ 、 $\text{V}$ 、 $\text{Mo}$ 、 $\text{W}$  等), 即磷酸盐、硫酸盐、硅酸盐等聚阴离子正极体系。聚阴离子正极因具有稳定的聚阴离子框架结构而表现出优良的安全性能、耐过充性能和循环稳定性, 但共同缺点是电导率偏低, 不利于大电流充放电。磷酸铁锂  $\text{LiFePO}_4$  结构稳定, 无污染且价格便宜, 在商用车推广阶段广泛应用。尽管铁锂正极理论比容量低 ( $170\text{mAh/g}$ ), 但随材料压实密度增加、电池结构创新, 系统能量密度得以提升, 有望在产品力驱动时代持续渗透乘用车场景。

磷酸锰铁锂 (LMFP) 是重要的新型材料开发方向, 相比磷酸铁锂可提升电池能量密度。铁锂正极相对于  $\text{Li}^+/\text{Li}$  的电极电势为 3.4V, 而磷酸锰铁锂 ( $\text{LiMn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{PO}_4$ ) 的工作电压最高可达 4.1V, 因此能够提升能量密度。此外, 由于  $\text{Mn}^{2+}$  半径略大于  $\text{Fe}^{2+}$ , 能够形成晶格缺陷, 扩大锂离子传输通道, 从而增加离子电导率。在材料优化层面, 改进 LMFP 电化学性能与铁锂类似, 主要是通过减小材料颗粒尺寸和碳包覆等手段提高电导率等性能。

图表 26：磷酸铁锂正极是主要的商业化聚阴离子材料，未来磷酸锰铁锂的开发是提升比能的重要路径



资料来源：《锂离子电池三元材料：工艺技术及应用》，五矿证券研究所

### 锂电正极的应用以高比能为主线

高比能诉求下，以正极材料分类的动力锂离子电池发展大致分为三个阶段：

- 第一代 LCO：数码领域成熟，但车用领域因安全性差等因素应用受限。钴酸锂  $\text{LiCoO}_2$  (LCO) 因具有较高的能量密度而首先广泛应用于数码领域，产业成熟度相对较高使其在电动车上得到较快的转换应用。LCO 能够表现出 O3 和 O2 两种类型的层状结构，其中 O3 结构是热力学稳定的，对于 O3 结构的钴酸锂正极材料，具有电化学性能稳定，易于合成等优点。在充放电过程中，由于锂离子在键合强的  $\text{CoO}_2$  层间进行二维运动，因此锂离子扩散能力较强，扩散系数优于其他正极材料。

为适应电动车应用需求，需要在更小空间释放出更高的能量，材料朝高电压方向发展，高电压下更多的锂离子从晶体结构中脱出，但锂的大量脱出会因为结构的破坏而影响电池的循环性能和安全性能。循环性能变差主要系材料发生相变、晶格失氧，造成结构不稳定性；此外，材料还会与电解液发生反应，造成 Co 的溶解。表现出的安全性差、寿命短且成本高的劣势限制其在动力电池领域的应用。

- 第二代 LMO/LFP：安全性提升，但能量密度较低。对于安全性要求的提升，扩大对锰酸锂  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  和磷酸铁锂  $\text{LiFePO}_4$  的需求。 $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  不同于层状型锰酸锂  $\text{LiMnO}_2$ ，其为尖晶石型结构，稳定性好，故而安全性高。但是其对放电电压有特殊要求，因为若放电电压降低到一定程度，会由于  $\text{Mn}^{3+}$  的 Jahn-Teller 效应引起尖晶石结构由立方对称向四方对称转变，材料的循环性能恶化。此外其高温循环性能和储存性能也存在问题，会带来较大的比容量衰减。

LFP 材料在安全性和寿命方面优势较大，主要系 LFP 为橄榄石结构，在该结构中，磷酸根聚阴离子团把锂和铁原子在 a-c 面上形成的 Z 字形链连接在一起，构成磷酸铁锂的骨架结构，锂离子的完全脱出不会造成橄榄石结构的破坏。此外，材料还含有强的 P-O 共价键，由于诱导效应，在充放电过程中可以保持材料结构的稳定性，有效提高电池的安全性能。但材料的电子导电率低、锂离子扩散速率慢、振实密度较低，导致较差的倍率性能、低温性能和实际能量密度。

受限于低比能，应用场景主要是混动车或公交大巴。近年来，随着国内政策对于能量密度要求标准的提升以及下游消费者的里程焦虑推动，催生更符合市场的改性新型材料。

- 第三代 NCM/NCA：助力提升电动汽车续航里程，安全性与成本仍需改善。三元材料

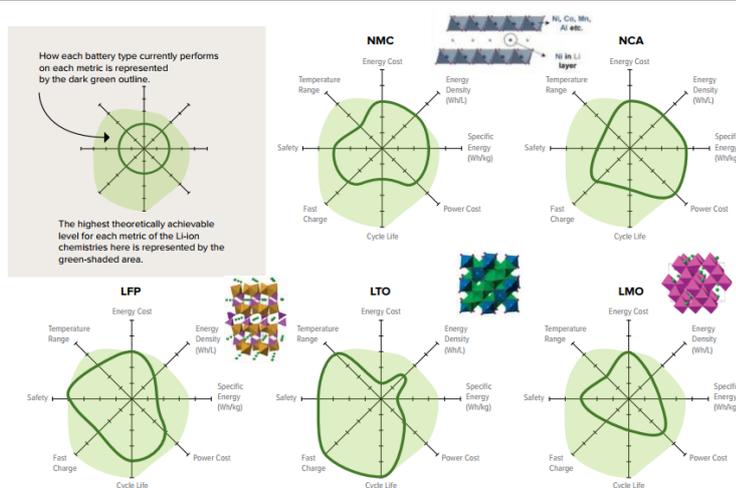
NCM/NCA 因具有比能高、电压平台高、循环性能好等优势，逐渐成为重要的动力电池。在 NCM 中，随着 Ni-Co-Mn 三种元素比例的变化显示出不同的性能，Ni 含量高提升比容量，Co 主要减少锂镍混排和抑制相变，Mn 则可以增强结构稳定性。在 NCA 当中，Al<sup>3+</sup>替代了 Mn<sup>4+</sup>，充放电过程中铝离子保持价态不变，同样起到稳定结构的作用。但传统三元材料因元素特点，仍存在安全性较低、成本较高的缺陷。

图表 27：常见的正极材料性能对比

项目	磷酸铁锂(LFP)	三元材料			钴酸锂(LCO)
		镍钴锰酸锂(NCM)	镍钴铝酸锂(NCA)	锰酸锂(LMO)	
结构类型	橄榄石	层状	层状	尖晶石	层状
电压平台	3.3	3.6	3.7	3.8	3.7
理论密度/(g/cm <sup>3</sup> )	3.6	—	—	4.2	5.1
振实密度/(g/cm <sup>3</sup> )	0.8~1.1	2.6~2.8	—	2.2~2.4	2.8~3
压实密度/(g/cm <sup>3</sup> )	2.2~2.3	>3.4	—	>3	3.6~4.2
锂离子表观扩散系数/(cm <sup>2</sup> /s)	1.8×10 <sup>-16</sup> ~2.2×10 <sup>-14</sup>	10 <sup>-11</sup> ~10 <sup>-10</sup>	—	10 <sup>-14</sup> ~10 <sup>-12</sup>	10 <sup>-12</sup> ~10 <sup>-11</sup>
理论比容量/(mAh/g)	170	273~285	275	148	274
实际比容量/(mAh/g)	130~140	160~220	180	100~120	135~150
相应电芯比能量/(Wh/kg)	130~160	180~240	—	130~180	180~240
循环寿命/次	2000~6000	1500~2000	1500~2000	500~2000	500~1000
安全性能	高	低	低	较高	较低
环保性	无毒	镍、钴有毒	镍、钴有毒	无毒	钴有放射性
适用温度/°C	-20~75	-20~55	—	>50 快速衰退	-20~55
所含金属资源储量	丰富	较丰富	较丰富	丰富	钴贫乏

资料来源：《锂离子电池三元材料工艺技术及应用》，五矿证券研究所

图表 28：不同材料组成的锂离子电池性能有所差异，也因此带来应用的区别



资料来源：Rocky mountain institute, 五矿证券研究所

### 高镍正极是已商用，最明确的产业研发方向

正极的改性方向包括高镍化、富锂化、高电压等，其中高镍正极推进商用进展较快。高比能

长续航的需求推动下，正极材料性能的提升主要通过提高比容和工作电压。材料研发主要围绕三个方面：(1) 研发低电位下能实现高比容的正极材料，例如高镍正极；(2) 提高正极的脱嵌锂电位，例如高电压 LCO、NCM 和富锂锰基层状氧化物正极；(3) 开发工作电压高的正极，例如尖晶石镍锰酸锂材料。其中高镍化已开展商用，是相对明确的产业开发方向。

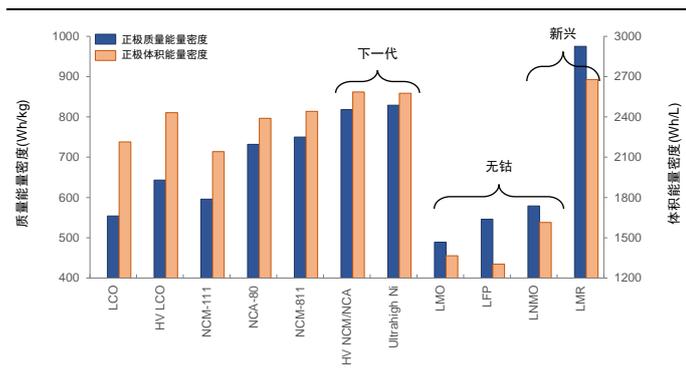
正极材料高镍化是降本增效的重要路径，主要是调整三元材料镍钴及锰（铝）等过渡金属配比，其中高镍正极通常指镍相对含量在 0.6（含）以上的材料型号。(1) 增加 Ni 含量可提升正极比容。按照 Ni-Co-Mn 三种元素比例的变化，主要有三元 111、523、622、811 型以及 Ni55/65 等产品，随 Ni 含量增加，材料实际放电比容量由 160mAh/g 提高到 200mAh/g 以上；(2) 因钴价相对昂贵，钴含量的下降使原材料成本优势提升。据容百科技招股说明书，随高镍三元钴含量的降低，预计金属钴价格在 20-30 美元/磅的范围时，NCM811 较 NCM523 的单位容量成本降低 8%-12%。

高镍化技术难点多，壁垒高，因此批量供货家数较少，集中度高：

- 阳离子混排严重，容易造成材料结构坍塌，导致容量衰减，稳定性降低等问题；
- Ni 含量增加，材料热分解温度降低，放热量增加。此外，相同电位下，高镍三元脱锂量较高，导致 Ni<sup>4+</sup>含量高，其具有强氧化性，可氧化电解液产生氧气，安全性降低；
- 高镍三元循环过程中，氧化还原峰偏移程度加大，产生多相转变，带来不可逆的体积收缩。颗粒更易出现裂纹，继而发生碎裂，加快电解液对材料的腐蚀；
- 材料表面碱性高，811 型 PH 高达 11-12，易与空气中的水分及 CO<sub>2</sub> 发生反应带来杂质，并在表面形成 NiO 薄层，严重影响材料的储存性能。

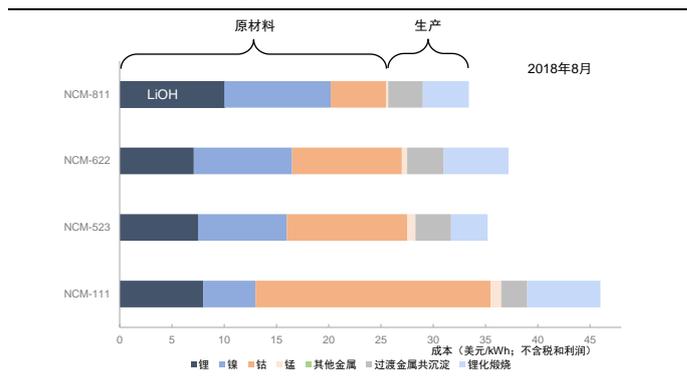
为保证安全性，高镍三元对电池厂商的产品设计、制造工艺及设备环境提出更高要求。811 型及以上的三元材料较低镍三元在理化性质上差异大，因此带来在原材料选用（使用性能更优的氢氧化锂作为锂源材料）、生产设备（需在纯氧环境中制造）、生产环境（需要专用除湿、通风设备，严格的磁性物控制）等方面的变动。因生产环节要求的提升，高品质、高一致性的材料量产难度加大，整体合格率偏低。

图表 29：比容与电位的提升都能增加以电极质量计算的能量密度



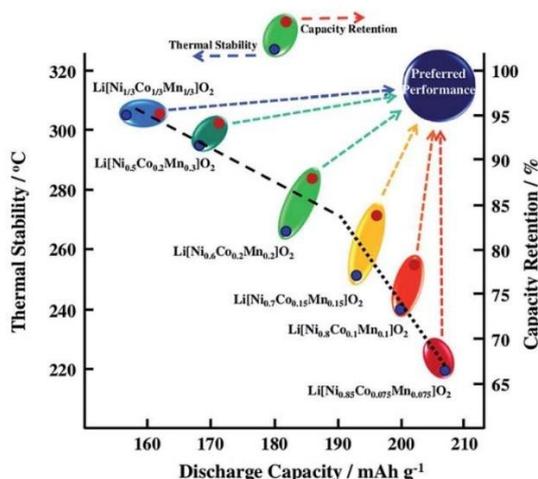
资料来源：Nature Energy，五矿证券研究所

图表 30：钴含量的减少使高镍三元的成本具备竞争力



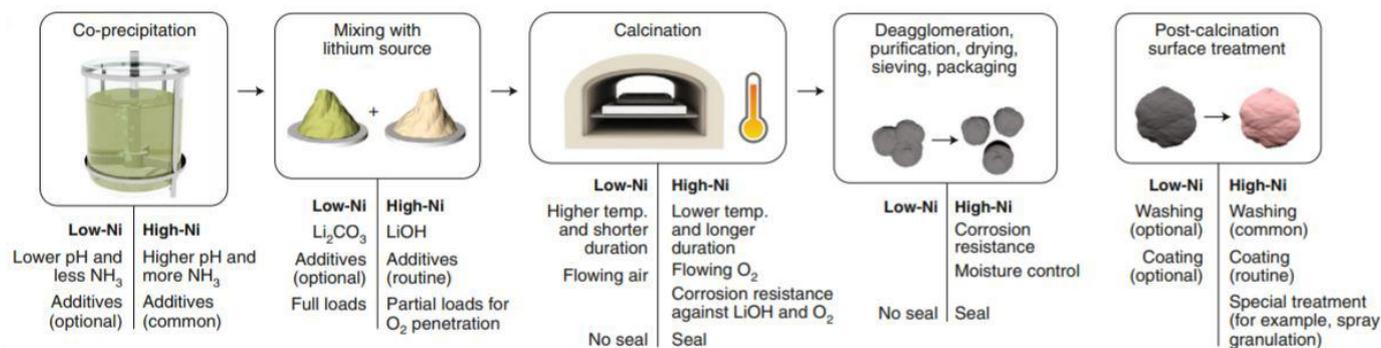
资料来源：Nature Energy，五矿证券研究所

图表 31：不同组分三元材料放电比容量、热稳定性和容量保持率的关系



资料来源：《Lithium-ion batteries: outlook on present, future, and hybridized technologies》，五矿证券研究所

图表 32：三元材料的工业合成过程中，每个步骤均对高镍三元的生产有更严格的要求，从而在工艺上形成挑战



资料来源：《High-nickel layered oxide cathodes for lithium-based automotive batteries》，五矿证券研究所

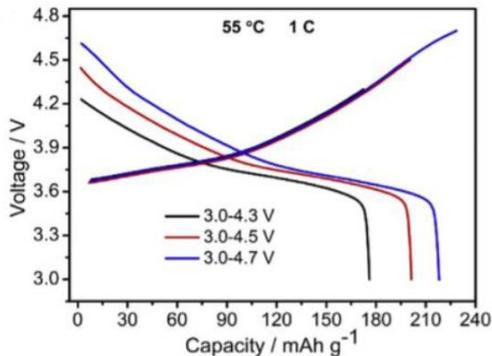
传统多晶三元正极改性提升比容的过程中面临材料循环及安全性能降低的问题。三元正极提升比容主要包括提高 Ni 含量与提升充电电压两种方式：1) Ni 含量提升至 90% 则比容可提高到 210-220mAh/g；2) 不改变材料成分前提下，通过提高充电电压的手段提升容量，例如 NCM622 在 4.3V 时比容为 176mAh/g 左右，电压增大至 4.5V 和 4.7V 时比容分别可达 201.3 和 218.1mAh/g。但在提升比容的同时，也导致正极材料循环性能和安全性能显著的降低，体现为容量保持率及热稳定性的下降。主要原因是当下商业化的三元正极大多是由纳米级别一次颗粒团聚形成的 10 微米左右的二次球型多晶材料，其内部存在大量晶界，循环过程中因各向异性的晶格变化，易出现晶界开裂，颗粒破碎等现象，电池阻抗上升，性能快速下降。

单晶三元的开发能够较好解决多晶材料面临的结构稳定性问题。单晶材料直接由直径 2-5 微米的独立晶体构成，内部没有晶界，具备更高的结晶度、更稳定的层状结构、各向异性特征，因此单晶材料无论是在循环性能，还是在热稳定性，以及产气量等指标上都要优于传统的二次颗粒 NCM 材料。据李林森等人研究，1000 次充放循环后单晶三元颗粒仍不发生破碎。

各大材料厂家积极开发单晶材料，但高镍单晶研制难度较大，单晶中镍高电压是较为合适的过渡型产品。相比 523、622 等传统正极，811 及以上的单晶高镍在制备工艺难度上显著提高，仅少数材料厂商宣称具备单晶高镍研制能力，包括容百科技、振华新材等。产业化推进上，我们认为，短期技术安全性待提升、安全诉求增加的背景下，单晶中镍高压相比传统三

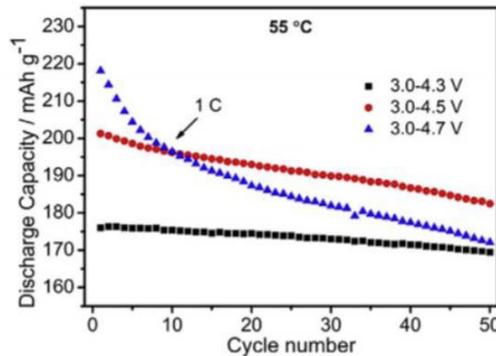
元高镍，具备一定的商用竞争力。中国主流的材料厂家，如当升科技、容百科技等推出单晶高电压三元 5 系、6 系等型号产品，主要系单晶相比二次颗粒材料，容量的发挥能力较低，因此通过提升单晶中镍材料的工作电压以提升比能，可接近 NCM811 水平。应用层面，已有多款车型搭载高电压 Ni 55 电池技术（如蔚来 100kWh 电池包）。

图表 33：充电电压提升，三元的比容量也将提高



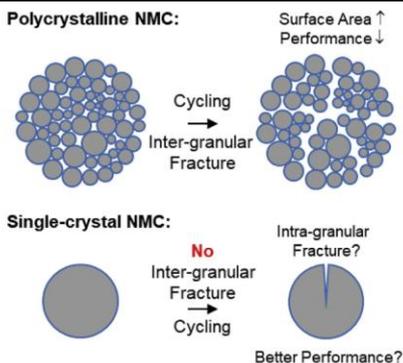
资料来源：Journal of Power Sources, 五矿证券研究所

图表 34：但同时会使得正极材料的循环性能降低，容量保持率下降



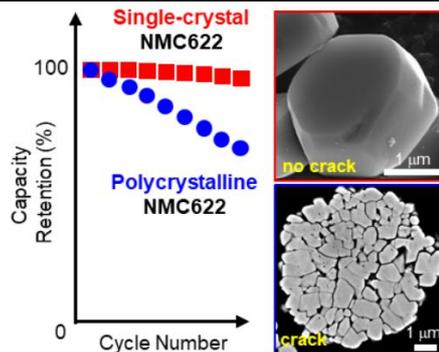
资料来源：Journal of Power Sources, 五矿证券研究所

图表 35：单晶没有晶界，可以有效应对传统多晶晶界破碎的问题



资料来源：上海交通大学官网, 五矿证券研究所

图表 36：1000 次充放电循环后，单晶三元颗粒不发生破碎，性能相对稳定



资料来源：上海交通大学官网, 五矿证券研究所

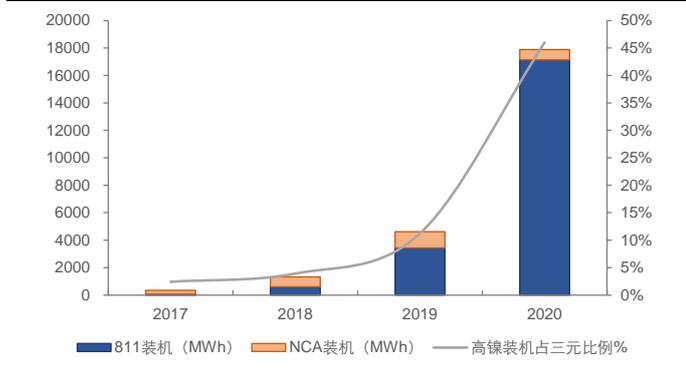
2020 年中国高镍装机迎来加速增长，占三元比例持续提升。据鑫椏资讯，2020 年中国高镍装机达到 17.9GWh，同比增长 287%，占三元比例达到 46%，主要系宁德时代、LG 化学高镍电池出货量快速提升。高镍市场集中度高，2020 年 1-9 月，LG 化学和宁德时代的市占率分别为 53%和 42%，且二者供货类型均为 NCM811 类型。高镍正极的商用中随活性材料更换还面临电池设计、循环特性等方面的问题，对技术能力要求提高。全球一线电池厂因技术与产业链整合实力较强，高镍供应量较大，包括松下（NCA）、LG 化学、CATL、SKI 等。

LG 化学在正极材料方面具备较强的技术竞争力，助力其成为高镍三元的优质提供商，多元产品布局全球。LG 化学作为全球优质电池企业，2020 年装机量位居全球第二，其关键的优势之一在于自产正极，并且在正极材料开发层面具有：1) 前驱体设计及生产的技术储备；2) 掌握核心的正极材料煅烧制备工艺；3) 正极改性方面的技术包括先进的掺杂及表面涂覆工艺等。基于较强的正极材料开发能力，LG 化学持续推出优质三元正极，包括 NCM111、424、523、622 及 712 正极产品，趋势是高镍化。

在动力领域，LG 化学当下主要的产品是 NCM622 电芯，但围绕高镍商用正进行全球化的布局：1) 中国区域，特斯拉 Model 3 部分车型曾采用圆柱 NCM811 电池，未来 Model Y 或将应用 NCMA 电池；2) 欧洲区域，新一代 NCM712 电池由波兰工厂生产，已向大众、雷诺等

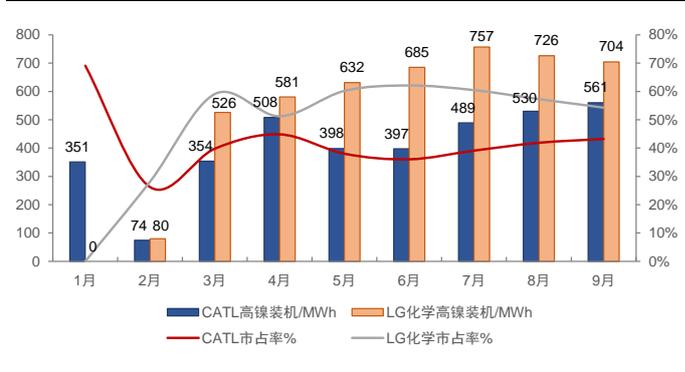
供应，大众 ID.4 和雷诺新一代 Zoe 将采用该款电池；3) 美国区域，2021 年起计划开始生产 NCM 电池，搭载在通用汽车生产的皮卡上。全球化的高镍电池技术拓展初显成效。

图表 37：2020 年中国高镍装机达到 17.9GWh，占三元比例 46%



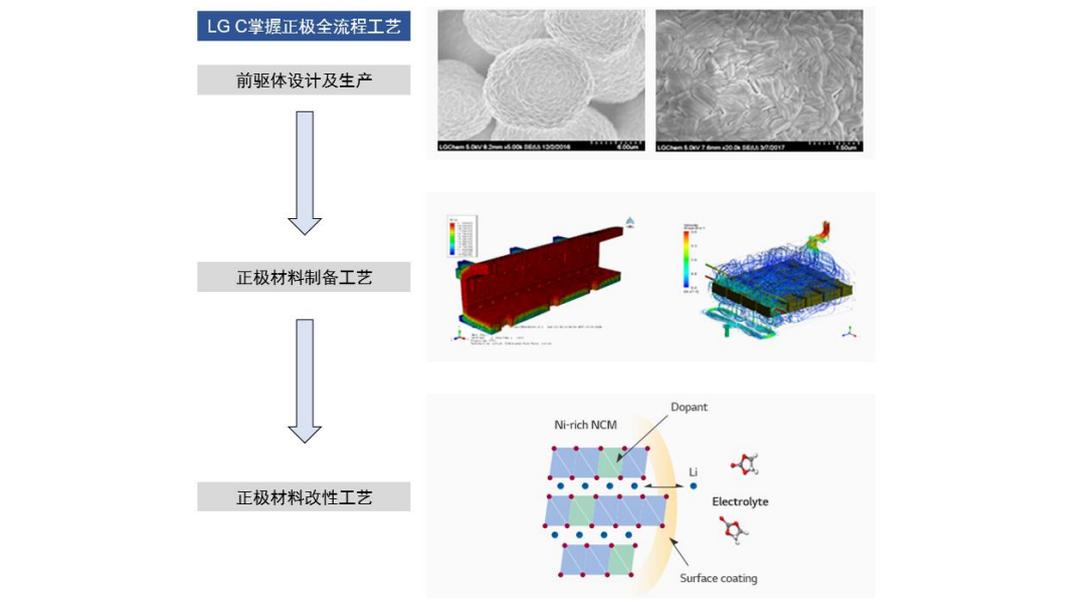
资料来源：鑫椏资讯，五矿证券研究所

图表 38：2020 年 1-9 月 LG 化学与 CATL 高镍总装机份额达 95.1%



资料来源：鑫椏资讯，五矿证券研究所

图表 39：LG 化学自产正极，在正极开发与生产上有先进的技术及工艺储备



资料来源：LG 化学官网，五矿证券研究所

图表 40：LG 化学官网上列出的多元正极产品可满足动力及储能应用需求

Category	Grade	Features	Applications
Cathode Material	NCM111	Long cycle life, Safety	Automobile, ESS
Cathode Material	NCM424	Cycle life, Power	Automobile, ESS
Cathode Material	NCM523	Cycle life, Safety	Mobile, ESS
Cathode Material	NCM622	Capacity, Cycle life, Power, (Gas generation suppression)	Automobile, ESS
Cathode Material	NCM712	Capacity, Cycle life, High Temperature Storage	Automobile, ESS

资料来源：LG 化学官网，五矿证券研究所

图表 41：对比新旧两款雷诺 Zoe 的性能指标，NCM712 体系提升续航

	LG 化学 NCM622 体系	LG 化学 NCM712 体系
电池总容量(kWh)	44.1	55 (估算值)
可用电池容量(kWh)	41	52
电池包重量(kg)	305	326
电池包重量密度(Wh/kg)	145	169
电芯数量	192	192
WLTP 续航(km)	317	395

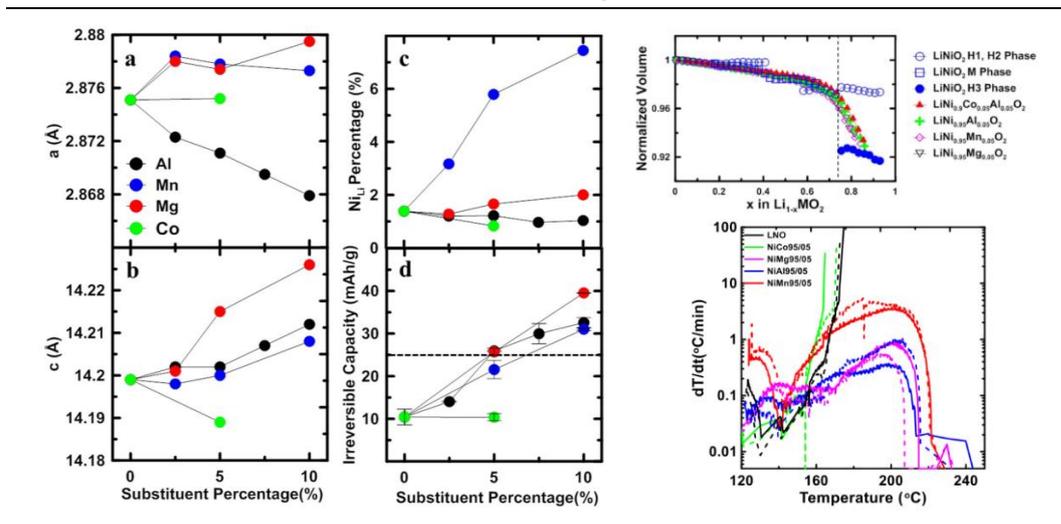
资料来源：Pushevs, 五矿证券研究所

### 正极“无钴化”是高镍的终极演进目标，“代钴”元素的引入是关键

高镍的下一步是“无钴”。钴元素在正极材料中起到减少 Li/Ni 混排、抑制充放电过程中的相变以提高结构稳定性的作用。尽管钴在三元电池中承担关键作用，但并非不可或缺。据特斯拉 Jeff Dahn 团队研究，高镍含钴电池中钴的作用较小并可被替代：

- Co 对于高镍材料 (Ni 含量 > 90%) 的容量保持率几乎没有贡献；
- 用 Al 或 Mg 替代钴仍可抑制锂镍混排，提高稳定性；
- 掺杂 Al 或 Mg 均可抑制材料的 H2-H3 相变，改善循环性能；
- 5% 的 Al、Mg 或 Mn 的阳离子替代可降低正极与电解液间的反应活性。

图表 42：从不同方面展示钴在高镍中的关键作用仍可由 Al、Mg 或 Mn 元素所发挥



资料来源：《Is Cobalt Needed in Ni-Rich Positive Electrode Materials for Lithium Ion Batteries?》，五矿证券研究所

“代钴”元素的引入主要通过离子掺杂等改性方式实现，在多种开发路径中，四元 NCMA、三元 NMA 等加入 Al 的方式是无钴进程的主要尝试：

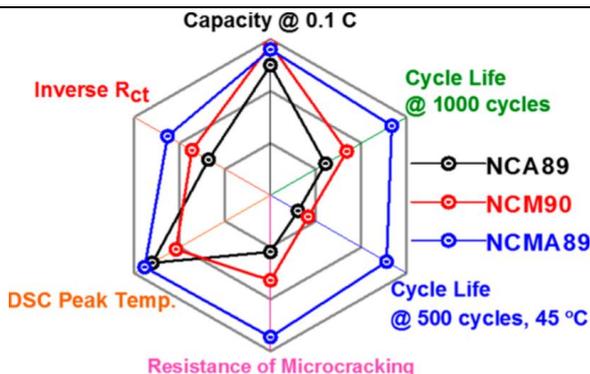
- NCMA 四元材料，加入 Al 后进一步降低钴的含量，实现成本优化，并且在体系稳定性、循环性、安全性方面也有一定优势。发表在 ACS 上的研究显示，NCMA89 (含 Ni 89%) 与 NCA89、NCM90 相比，比容可达 228mAh/g，1000 次循环后容量水平在 85%。此外，该种四元材料对微裂纹的成核及扩散的抑制效果更好，从而减轻材料内表面的退化。

NCMA 是电池高镍化路线的重要分支，制造工艺需满足严格要求，并且四元前驱体作为新产品，技术难度大。对于 NCMA 四元材料的应用，中国材料厂商已有突破，包括格林美、华友钴业、杉杉股份等均有布局。在电池产品产业化方面，蜂巢能源和 LG 化学进展较快。2019 年 7 月，蜂巢能源全球首发 NCMA 四元电芯，公司预计 2022 年 11 月实现电芯 SOP；LG 化学则计划 2021 年推出 NCMA 四元电池，并与通用、特斯拉等优质车企合作，配套相关车型。

- 将钴替换为其他元素，掺杂 Mn、Al、Mg、Ti 等元素形成高镍三元材料，其中高镍 NMA 在实验中表现较为突出。据德克萨斯大学奥斯汀分校的 Arumugam Manthiram 研究团队，通过共沉淀和煅烧的方法制备高镍 NMA 材料，展现了与 NCM 和 NCA 材料相近的倍率性能和循环稳定性。与石墨负极组成软包电芯后，1000 次充放电的循环性能优于传统三元。Mn、Al 元素的掺杂不仅使六方层状结构在脱嵌锂过程中更为稳定，同时材料

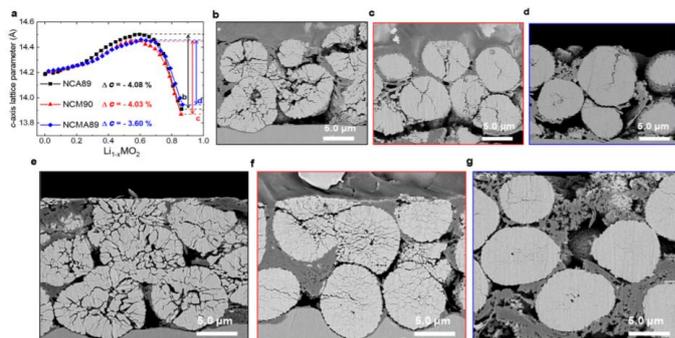
的热稳定性也得到改善。

图表 43: NCMA 与 NCM、NCA 材料相比, 性能优势突出



资料来源: ACS Energy Letters, 五矿证券研究所

图表 44: 从横断面 SEM 图像来看, NCMA 对于微裂纹抑制效果更好



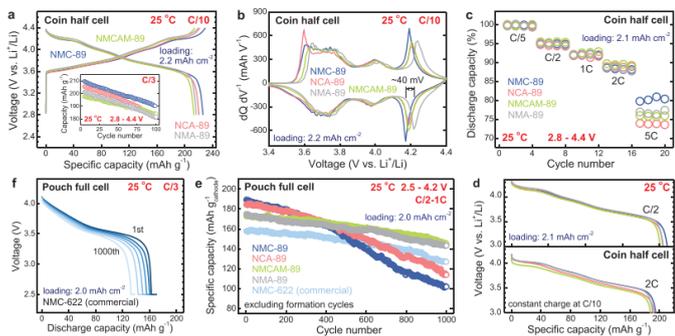
资料来源: ACS Energy Letters, 五矿证券研究所

图表 45: 蜂巢能源 2019 年 7 月全球首发的 NCMA 四元电池的能量密度达到 265Wh/kg, 各项性能指标优异



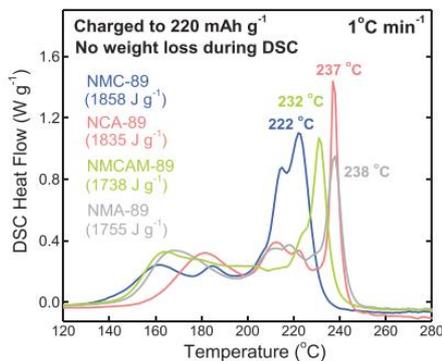
资料来源: 蜂巢能源公开演讲 PPT, 五矿证券研究所

图表 46: 不同三元材料的半电池和软包电池的电化学性能表征



资料来源: Advanced Materials, 五矿证券研究所

图表 47: NMA89 有更高的热效应温度, 具备更好的热稳定性



资料来源: Advanced Materials, 五矿证券研究所

**改性已有的高比能潜力嵌锂化合物是“无钴”的另一路径**

基于已有的正极材料进行改性, 是无钴的另一种可行理念。以 Ni、Co、Mn 为主要元素形成多种的衍生材料, 包括镍锰酸锂 (LNMO)、富锂锰基等。

层状镍锰酸锂材料比容量高且易合成, 但锂镍混排等问题增加产业化难度。镍锰酸锂材料开

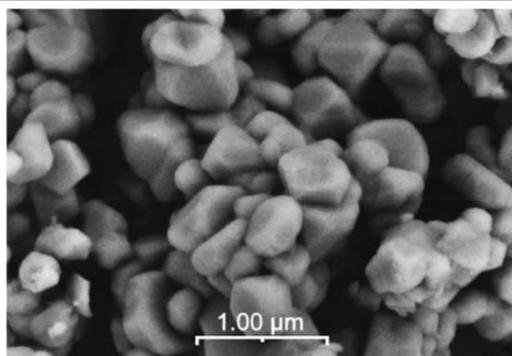
发已久，主要包括层状镍锰酸锂 ( $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{O}_2$ ) 和尖晶石型镍锰酸锂 ( $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_2$ )。其中层状 LNMO 比容量高,理论比容约 280mAh/g。Ohzuku 等 2003 年发表的研究显示,LNMO 电池在 2.5-4.5V 之间约有 200mAh/g 的比容量。此外,材料制备方法较多且易控制,包括离子交换、水热合成、氢氧化物共沉淀法等,材料成本较低。但层状 LNMO 存在大量的锂镍混排以及较多的杂质,因此难以获得高的电池活性,从而使其商业化进程受阻。

蜂巢能源通过多项改性技术提升 LNMO 性能,开发出 NMx 无钴电池。在层状 LNMO 材料的商业推广上已取得关键进展,主要代表是蜂巢能源推出的 NMx 无钴电池,材料层面通过三项技术改性:

- 阳离子掺杂,通过强化学键稳定氧八面体结构,减少锂镍混排,提升能量密度;
- 采用单晶技术,使颗粒强度更高,结构更加稳定,提升电芯循环寿命;
- 纳米网络化包覆,表面包覆一层纳米氧化物,减少正极与电解液间的副反应,有效改善高电压下的材料循环性能。

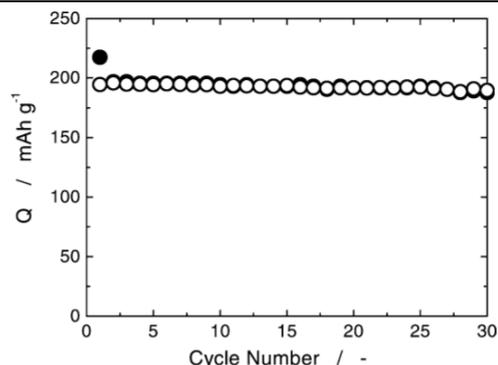
蜂巢能源的无钴材料工厂已投入使用 2 条产线产能共计 5000 吨(常州规划 2 万吨),已规划四款无钴电池量产产品,覆盖全部车型超长里程。其中无钴 H 系列 115Ah 产品已率先实现量产装车,电芯比能达 240Wh/kg。基于材料与产品层面的突破,我们认为蜂巢能源在无钴电池技术的产业化推进方面较有成效,未来有望持续导入优质客户,提升市场份额。

图表 48: 层状镍锰酸锂材料的 SEM 图像



资料来源: Journal of Power Sources, 五矿证券研究所

图表 49: 层状镍锰酸锂在 2.5-4.5V 之间约有 200mAh/g 的比容量



资料来源: Journal of Power Sources, 五矿证券研究所

图表 50: 蜂巢能源已规划四款无钴电池量产产品,覆盖全部车型超长里程



资料来源: 蜂巢能源公开资料, 五矿证券研究所

图表 51: 无钴 H 系列的 115Ah 产品已率先量产装车



资料来源: 蜂巢能源公开资料, 五矿证券研究所

图表 52: 无钴 E 系列电芯比能达 220Wh/kg, 成本接近铁锂



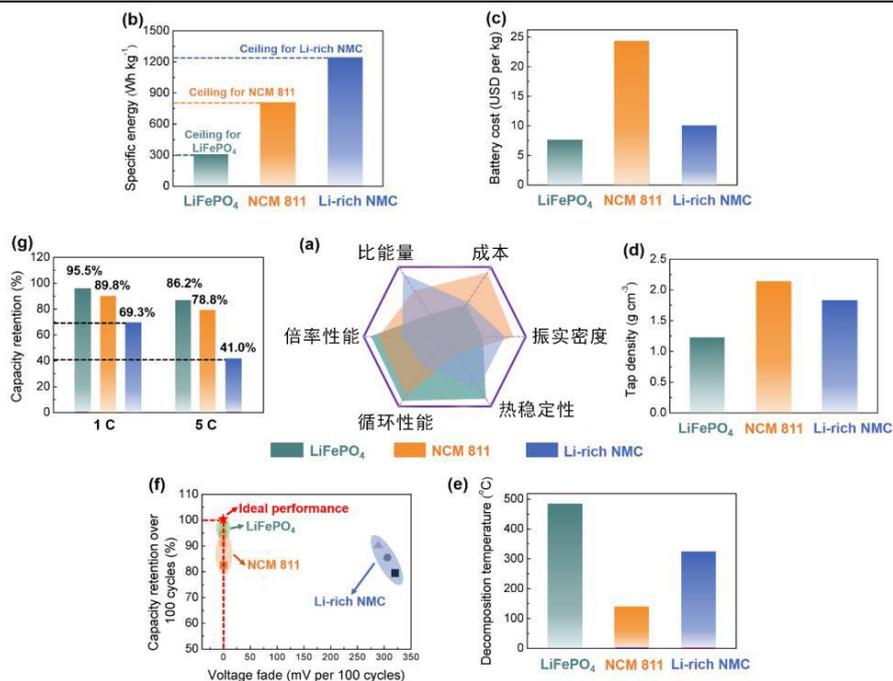
资料来源: 蜂巢能源公开资料, 五矿证券研究所

富锂化不仅能够去钴, 且能够释放更高比容量。对于传统正极材料, 理论比容量最高一般为 280mAh/g, 并且因完全脱锂造成结构破坏, 通常只能可逆脱出约 0.65 个锂。富锂正极材料  $x\text{Li}_2\text{MnO}_3 \cdot (1-x)\text{LiMO}_2$  ( $M=\text{Ni}$ 、 $\text{Co}$ 、 $\text{Mn}$  等) 由  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  和  $\text{LiMO}_2$  两种层状结构按不同比例复合而成, 因含更多的锂而具有高的理论比容量 (320-350mAh/g)。2004 年 Johnson 等报道的  $x\text{Li}_2\text{MnO}_3 \cdot (1-x)\text{LiMn}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{O}_2$  材料, 在 2-5V 电压内可释放出 250mAh/g 的比容量, 充电电压降为 4.6V 时, 也可释放出 200mAh/g 的容量。在与 NCM811、LFP 正极的综合性能对比中, 富锂锰基材料具备最高的能量密度, 并且有与 LFP 正极相近的成本, 因此是重点开发推进产业化的材料之一。

富锂锰基结构复杂增加机理研究的难度, 倍率及循环性能差, 阻碍材料的商业化。因为富锂正极材料组成的复杂性, 对于其结构和脱嵌锂机制的认识存在分歧, 同时也增大了机理研究的难度。材料的首放效率、倍率性能、高温性能、全电池性能、长期循环性能和充放电循环过程放电电压平台衰减方面仍存在问题, 性能较差, 因此也阻碍了材料自 1991 年被开发以来的产业化进程。据发表在《Angewandte Chemie》的研究显示, 材料的首次充电曲线分为两段, 以 4.4V 为分界, 由于脱出的锂部分无法回到材料中, 并且一般认为过渡金属层中的锂空位无法被再次填充, 因此造成循环效率低、容量衰减等问题。

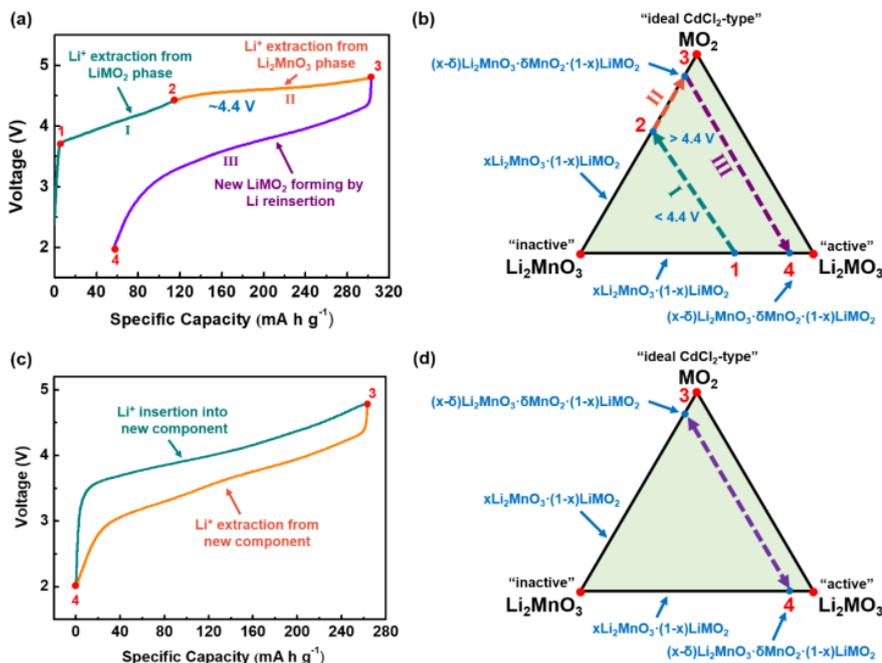
通过改性能够提高材料性能, 但商用之路仍有电池其他部分匹配的挑战。为保持材料的结构稳定, 容量、电压稳定, 以及尽量减少电压和容量衰减过程中伴随的微孔、裂纹和位错等结构缺陷, 可以通过表面改性、元素掺杂、预循环处理等方式来改善性能。但对于层状富锂锰基正极材料在未来全电池中的商业应用, 缺乏合适的负极材料是另一个挑战。考虑到传统的碳酸酯类电解液在高工作电压下不稳定, 还需要开发全新的电解液来提升材料的循环稳定性。

图表 53: 富锂锰基材料与 NCM811、LFP 正极相比, 综合性能优异, 能量密度指标突出



资料来源: Angewandte Chemie, 五矿证券研究所

图表 54: 首次充电结束后净脱出 Li<sub>2</sub>O, 在随后的嵌锂过程中, Li<sub>2</sub>O 无法回到材料中, 造成循环效率低的问题



资料来源: Angewandte Chemie, 五矿证券研究所

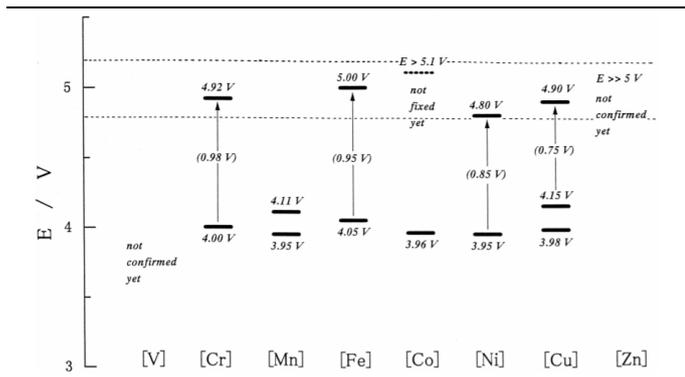
开发高电压正极是提高比容之外的另一种策略, 其中尖晶石型 LNMO 综合性能较好。1999 年, Ohzuku 等测试了不同的过渡金属掺杂的 LiM<sub>x</sub>Mn<sub>2-x</sub>O<sub>4</sub> (M=Ti, V, Cr, Fe, Co, Ni, Cu, Zn)。研究结果表明当 x=0.5 时, 这类尖晶石材料均具有更高的工作电压, 大部分在 5V 左右。其中掺杂 Fe 或 Ni 后, 材料性能相对优异, 如尖晶石 LNMO 的理论放电比容量为 146.7mAh/g, 比能量可达 650Wh/kg。尖晶石 LNMO 具备 3 维的锂离子扩散通道, 功率密度较好, 与尖晶石 LMO 相比循环稳定性增强, 从而匹配动力领域的应用需求。在产业化过程中, 还有其他

高电压正极具备较高的电压平台，如高电压 LCO、高压型 NCM 和 NCA 等，但综合性能弱于尖晶石 LNMO。值得注意的是，已商用的高压材料主要是中镍 NCM，牺牲部分比能提升空间，但总体上比能靠近一般高镍，且稳定性优于高镍。

传统电解液不匹配高电压正极，且歧化反应阻碍锂离子传输。(1) 尖晶石 LNMO 具有高达 4.7V 的工作电压，超过当下商业化的传统有机电解液 4.5V 的电压极限。高电压下电解液发生分解，导致活性物质消耗和电池阻抗增加，使材料电化学性能恶化。(2) 材料中含少量  $Mn^{3+}$ ，会发生歧化反应，生成的  $Mn^{2+}$  会被 HF 还原成金属锰沉积到负极锂片表面，形成钝化层，同时也造成活性物质的溶解，影响电池的循环性能。

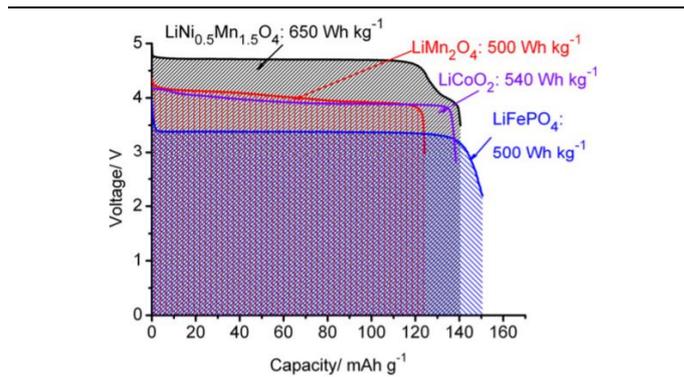
通过掺杂或包覆等方式能够提升性能，但为达到商用，还需进一步改善。(1) 通过一些金属离子对 Ni、Mn 元素部分取代，达到稳定晶体结构，调控材料的 Ni/Mn 无序程度，进而改善性能的目的。Chen 等研究 Al 掺杂对材料的影响，发现掺杂后晶体结构改变，循环和倍率性能提高， $Li_{1.05}Ni_{0.5}Mn_{1.45}Al_{0.05}O_4$  在 55 °C 下其 100 次循环容量保持率达 98%， $LiNi_{0.475}Mn_{1.475}Al_{0.05}O_4$  在 10C 放电时仍保持 114mAh/g 比容量。(2) 通过表面包覆，保护材料免受 HF 的侵蚀，提升循环性能。主要的实验包覆材料有 ZnO、 $Al_2O_3$ 、 $SiO_2$  等。但在商用化进程中，5V 级尖晶石 LNMO 尚处于研发和小批量生产阶段，针对高温循环稳定性、倍率性能、与电解液的匹配等方面依然需要继续研究。

图表 55: 采用慢速扫描循环伏安估计的尖晶石材料的氧化还原电位



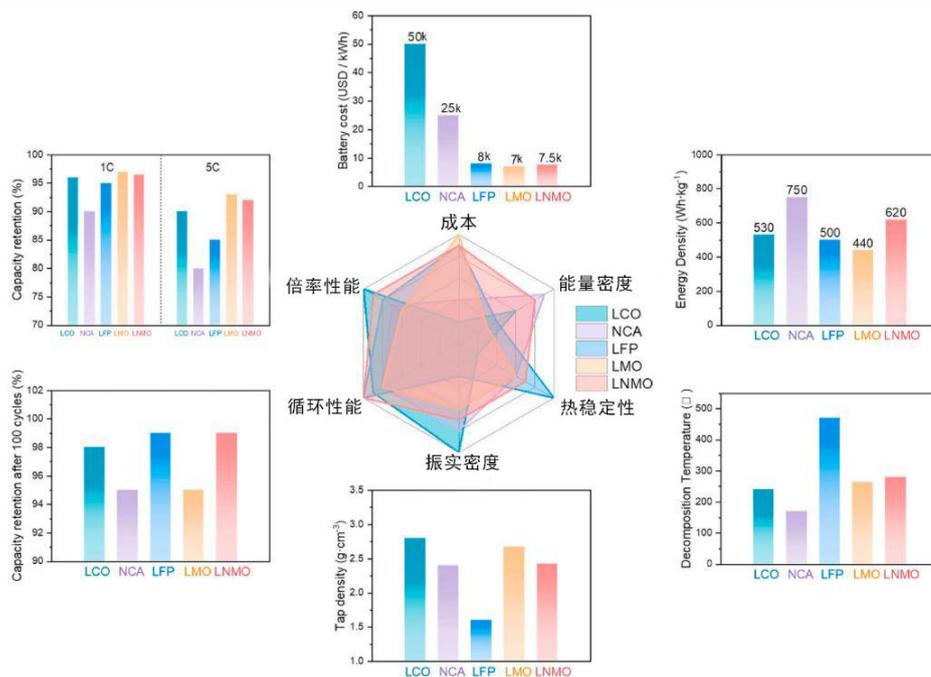
资料来源: Journal of Power Sources, 五矿证券研究所

图表 56: 5V 级尖晶石型 LNMO 具备较高的比能量，达到 650Wh/kg



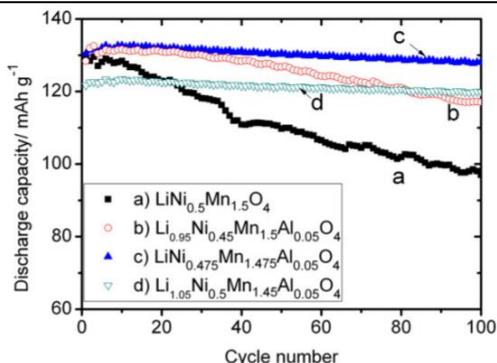
资料来源: Electrochimica Acta, 五矿证券研究所

图表 57：尖晶石型镍锰酸锂与其他传统正极材料相比，具有较突出的成本与比能优势



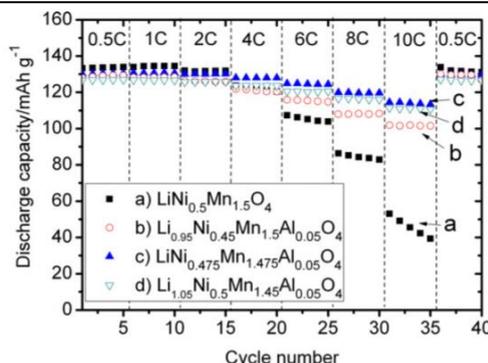
资料来源：Journal of Power Sources, 五矿证券研究所

图表 58：掺杂 Al 后材料的循环性能提升



资料来源：Electrochimica Acta, 五矿证券研究所

图表 59：掺杂 Al 后高倍率下容量保持率优于未掺杂的材料



资料来源：Electrochimica Acta, 五矿证券研究所

### 革命式的正极开发方向是无锂化，涉及多组分变动

正极的最高阶：无锂正极，重点聚焦周期表右上方元素。高比能诉求下，理论上讲，材料若具备小的电化当量、高的电极电位，将更有作为正极的潜质。依据元素周期表可知，F、Cl、O、S 等元素具备以上条件，理论上适合作为高能电池的正极活性物质。但 F<sub>2</sub>、Cl<sub>2</sub> 是有毒气体，因此一般采用氟化物或氯化物。O<sub>2</sub> 无毒且无腐蚀性，可制成气体扩散电极或制成氧化物后用作正极。S 单质常温下活性小，高温时易挥发，一般采用硫化物。化合物替代单质，理论比能将下降，但仍高于传统含锂正极。

筛选高比能无锂正极，与过渡金属结合的部分卤化物、硫化物和氧化物具备优秀的能量密度。根据热力学计算，可以筛选出具备应用前景的高比能无锂正极，如 S、MnO<sub>2</sub>、FeS<sub>2</sub>、CuF<sub>2</sub> 和 FeF<sub>3</sub> 等，表现出优异的能量密度 (>1600Wh/kg 以及 >6700Wh/L)。以现有电池工艺，使用固态电解质情形下，电池能量密度可达 1000-1600Wh/kg 和 1500-2200Wh/L。具备高比能的另一原因在于，此类材料一般通过可逆化学转换反应机理与金属锂发生反应，而非传统的锂离子嵌入脱出机理，转化反应下可充分利用材料所有的化合价，因而循环过程交换电子

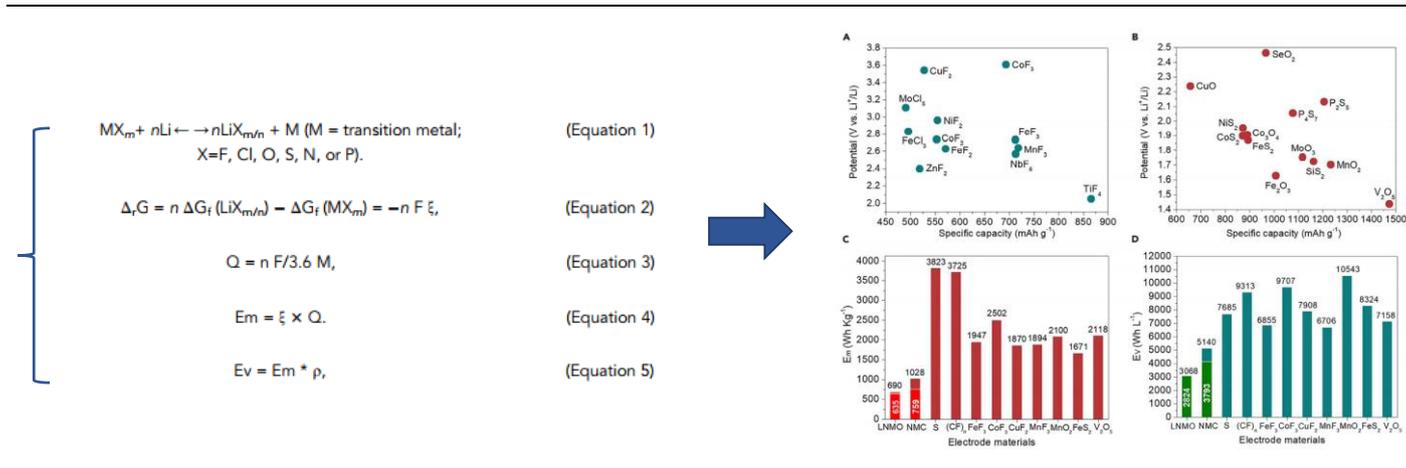
多，电池电压高。

无锂正极开发已有 50 年历史，但电池其他组分匹配问题及本身理化性质缺陷使其暂不具备商用条件。二十世纪七十年代早期，无锂正极匹配金属锂负极的二次电池开发受到关注，但对锂负极的认识和有效改善策略的缺乏，造成该类电池循环差、安全性低，逐渐转向含锂正极研究。而从材料本身实际的电化学性能来看，依然存在共性的问题：

- 第二次循环后容量快速衰减，倍率表现差，并且电压滞后显著，与低电子电导率、低锂离子扩散系数和缓慢的相变动力学有关；
- 转化反应型材料具有严重的过电位，主要受欧姆极化、电化学反应极化和浓差极化影响。对于转换反应，本质上是与不对称反应路径和主体原子缓慢扩散有关；
- $\text{Li}^+$ 或  $\text{Li}^+$ -溶剂在正负极之间的穿梭通常会引起材料体积膨胀或收缩。例如 100% DOD 下理论上 S 至  $\text{Li}_2\text{S}$  体积增加 78.69%。全电池中，所有活性物质在 100% DOD 下产生体积收缩，其中  $\text{Li-FeS}_2$  的体积收缩率最小，为 17.93%。

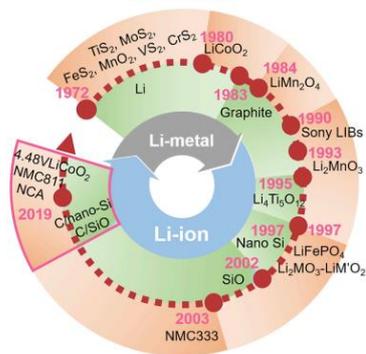
针对材料存在的问题，通过纳米化、掺杂及表面修饰等持续优化，有望使其更快推进产业化。

图表 60：根据热力学计算筛选出低成本、低毒、比能 > 1200Wh/kg 的部分无锂正极，主要是过渡金属氟化物、硫化物和氧化物



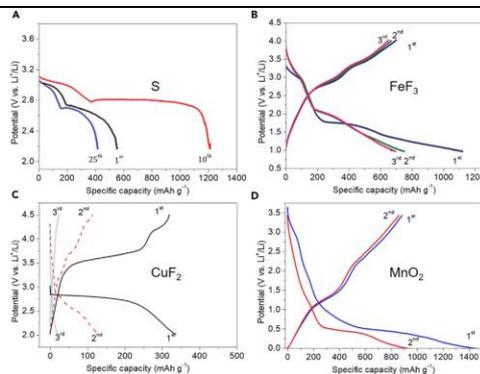
资料来源：《Li-free Cathode Materials for High Energy Density Lithium Batteries》，五矿证券研究所

图表 61：1972-2019 年由锂金属电池到锂离子电池的发展时间线



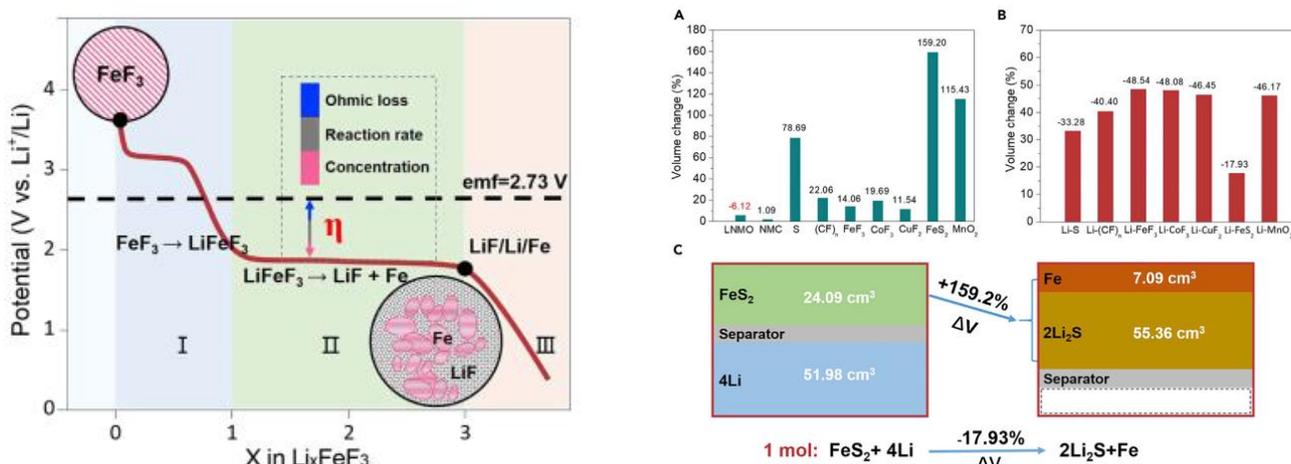
资料来源：Joule，五矿证券研究所

图表 62：一些无锂正极的充放电曲线和循环性能，转化反应是主要机理



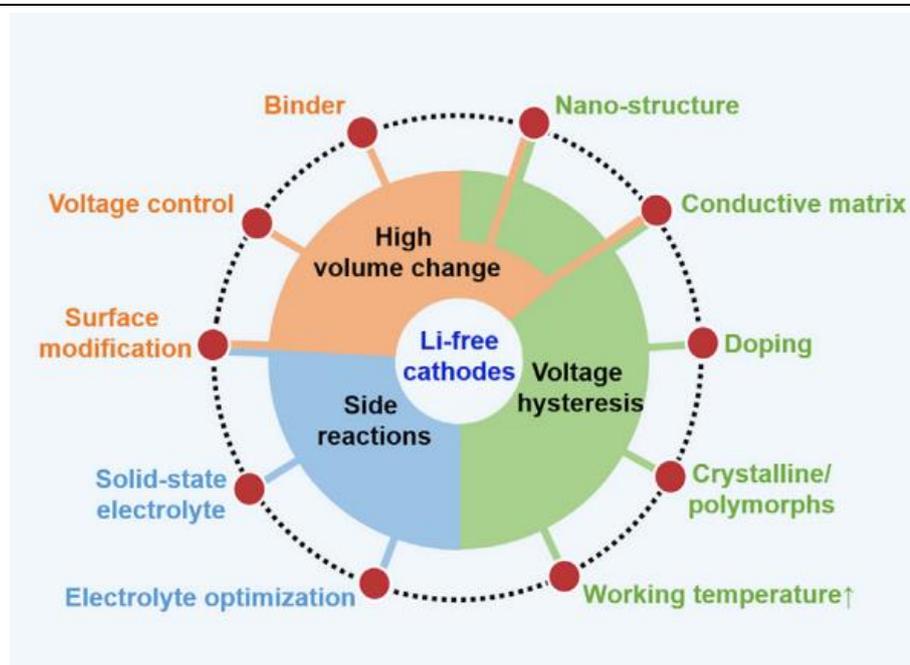
资料来源：Joule，五矿证券研究所

图表 63: 严重的过电位和材料体积变化大是无锂正极应用的主要阻碍



资料来源: 《Li-free Cathode Materials for High Energy Density Lithium Batteries》, 五矿证券研究所

图表 64: 无锂正极开发过程中遇到的阻碍及相应的改善方式



资料来源: 《Li-free Cathode Materials for High Energy Density Lithium Batteries》, 五矿证券研究所

### 硫化物是无锂正极开发热点, 无人机应用测试顺利推进

在无锂正极产业化之路上, 以硫为基的正极开发是重要热点。硫的理论比容量达到 1672mAh/g, 以硫为正极金属锂为负极理论比能可达 2600Wh/kg。并且硫储量丰富(地壳中丰度为 0.048%), 价格低廉, 仅为 LCO 的 1/60, 性价比高。因此以硫为基的正极成为研究热点。锂硫电池基于转化反应, 理论工作平均电压为 2.1V, 放电时 Li<sup>+</sup>从负极通过隔膜自发地扩散到正极, 与硫材料发生化学反应。反应中通过 S-S 键的断裂和生成实现化学能与电能的转换, 期间会生成多种硫化锂中间产物。统计 2009-2020 年 2 月 2 日与锂硫电池相关的文章发表数量, 达到 5000 件以上, 主要由中国、美国和韩国贡献。文章发表逐年增加, 体现领域热度的提升。

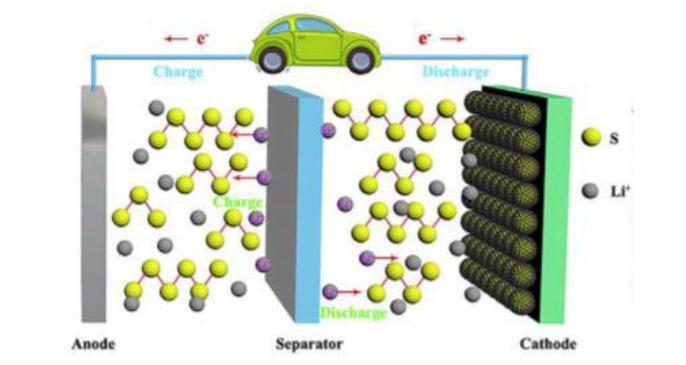
实际应用中锂硫电池循环性能差、容量衰减快, 主因硫正极存在较多缺陷。(1) 室温下, 单

质硫和最终还原产物 ( $\text{Li}_2\text{S}_2$  和  $\text{Li}_2\text{S}$ ) 为电子/离子绝缘体, 导致硫的利用率较低; (2) 产生“穿梭效应”, 多硫化物溶于电解液中, 在正负极间来回穿梭, 扩散至负极形成自放电, 降低库伦效率, 此外溶解增大电解液黏度, 离子电导率减小; (3) 充放电过程硫正极体积变化大, 破坏电极结构, 循环稳定性降低。

以硫为基作为正极, 应从多维度考虑性能改善的方式, 来推进产业化, 其中硫正极改善是关键。硫正极应与锂负极来配合形成高比能电池, 因此需从硫电极、电解质及金属锂保护多方面协作开发出更具优势的锂硫电池体系。而在改善策略中, 对于硫正极的改善至关重要:

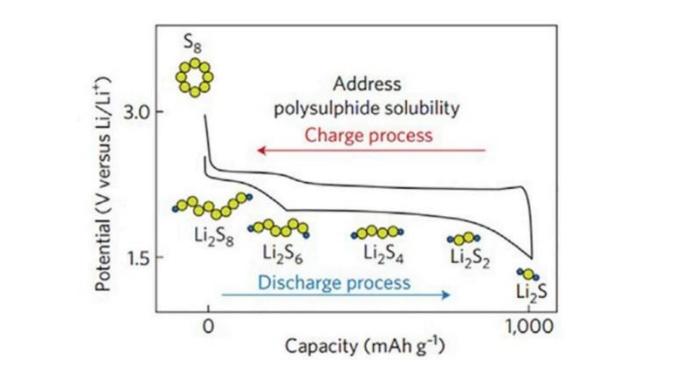
- 提升正极导电性, 维持稳定的离子/电子导电网络。例如硫碳复合材料, 纳米碳材料形成高效的正极导电骨架结构, 改善硫和硫化锂低电导率的问题;
- 适当提高硫载量、硫利用率, 降低电解液用量。如开发具有导电能力的粘结剂可降低导电碳含量。但过度增大硫载量等也影响电解液在电极表面和内部的润湿性, 导致内部极化增大;
- 增强与正极匹配的其他组分的安全性。电解质中采用高闪点的溶剂或阻燃添加剂, 或开发聚合物、固态电解质; 负极提升均匀性和稳定性, 改善锂枝晶及“死锂”等不良现象。

图表 65: 基于转化反应的锂硫电池充放电原理示意



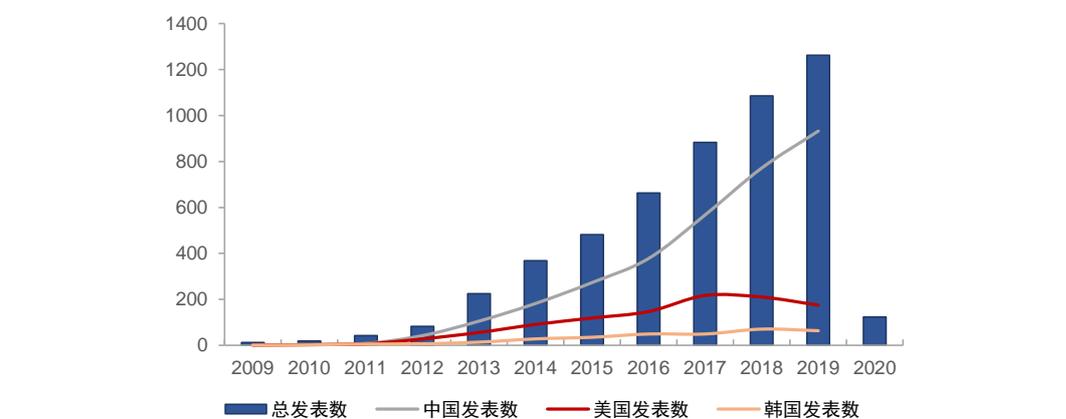
资料来源: iScience, 五矿证券研究所

图表 66: 循环过程 S-S 键断裂, 会生成多种硫化锂中间产物



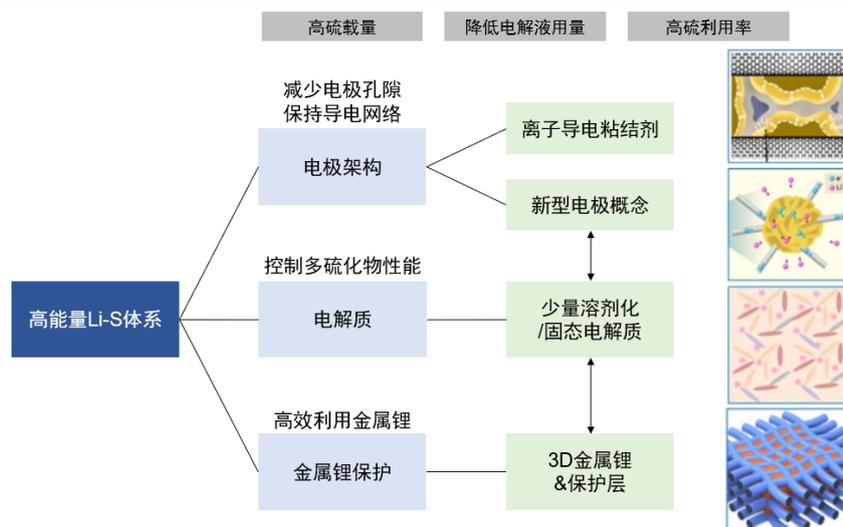
资料来源: iScience, 五矿证券研究所

图表 67: 与锂硫电池相关的文章发表逐年增加, 2020 年截至 2 月 2 日发表 123 篇, 中美韩三国发表量占比大



资料来源: 《12 years roadmap of the sulfur cathode for lithium sulfur batteries (2009–2020)》, 五矿证券研究所

图表 68：实现高能量锂硫电池的过程中，硫正极的持续改性以及电解液、负极的匹配是必经之路



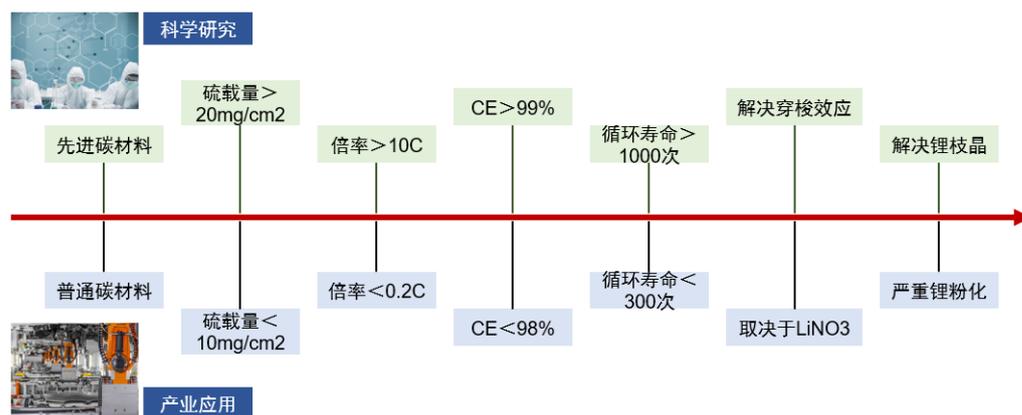
资料来源：《基于溶解沉积机制锂硫电池的研究进展简评》，五矿证券研究所

对于锂硫电池体系的实验室研究结论往往不适用产业化，主要系材料及关键指标存在差异。1) 科研领域常采用扣式电池研究锂硫电池，体系简单易控制，倍率可达 10C，循环寿命可超 1000 次；但产业化下的软包体系更为复杂，倍率更低，循环寿命难以突破 300 次，主要系产业化过程中需要平衡材料用量，如电解质中添加  $\text{LiNO}_3$  将提升循环性能，但过量则带来安全问题；2) 针对 S 的溶解穿梭以及导电性差等问题，实验室可以采用匹配先进碳材料、电极表面设计涂层等方式来改善，但产业化将面临成本与工艺可实现性等问题。

锂硫电池产业化渐有成效，有望在无人机等细分领域实现应用突破。英国 Oxis Energy 是锂硫电池开发的先驱，新款锂硫电池能量密度已达 471Wh/kg。公司长期为欧美和日本客户提供 400Wh/kg 的锂硫电池，产品可满足无人机等领域的轻量化诉求。在产业化推进上，公司于 2019 年 6 月宣布计划建立首个用于批量生产锂硫电池电解质和阴极活性材料的工厂，并于 2020 年 5 月宣布将在巴西建设首个锂硫电池制造厂，目标是 2023 年投产。公司的电池技术已经在飞机电池系统中得到成功运用并进行地面测试。除 Oxis Energy 之外，2020 年 9 月搭载 LG 化学锂硫电池的无人机完成超高空首秀。LG 化学表示，将于 2025 年后量产能量密度为现有锂离子电池两倍以上倍的锂硫电池。相关产品有望在无人机等领域持续导入。

循环性差等关键问题较难解决，限制锂硫电池的应用，持续攻关锂硫体系的 Sion Power 已转向其他体系的研究。据 Oxis Energy 披露的产品信息，锂硫软包样品有高功率及高能量两种类型，但循环寿命仅 60-100 次，因此难以实现大范围的产业应用。另一家较早开发锂硫电池的美国电池企业 Sion Power 正从锂硫体系过渡到自研的 Licerion 金属锂体系（正极为嵌锂氧化物、负极为金属锂）。Sion Power 能够生产高比能锂硫电池，并早在 2014 年便应用于无人机上。但公司认为锂硫体系在循环性等方面的缺陷限制应用，并于 2015 年开始转向 Licerion 技术的研发。基于 Licerion 技术的电芯循环次数可达 1000 次，并具有高比能。因此持续开发锂硫体系的同时，也应当注意中短期其他体系的替代性，无锂正极在电池上的商用进程仍然相对遥远，特别是针对动力领域，体系还需继续优化。

图表 69: 在实验室中取得的锂硫电池体系的性能难以在产业应用中复制



资料来源: 《How far away are lithium-sulfur batteries from commercialization?》, 五矿证券研究所

图表 70: Oxis Energy 拥有一流的产业合作伙伴, 对于推动锂硫电池应用能形成较好的正向循环



资料来源: Oxis Energy 公司官网, 五矿证券研究所

图表 71: Oxis 开发的锂硫电池样品具备较高的能量密度, 但同时较差的循环性能也限制其应用

类型	高功率	高能量
可用性		评估样品
工作电压(V)		1.9-2.6
标称电压		2.1
典型容量(Ah) 20°C下0.2C放电至1.9V	19±0.5	14.7±0.5
质量能量密度(Wh/kg)	300±5	400±10
循环次数 100%DoD, 80%BoL	60-100	60-100
电芯重量(g)	141±2	85±2

资料来源: Oxis Energy 公司官网, 五矿证券研究所

## 负极突破主基调：研制更高比容低成本的材料

负极的格局相比正极的格局更加清晰，传统的石墨负极仍然是主流的应用产品。但是更高比容负极的开发对于未来先进电池体系的推进仍然是有必要的，硅基负极、金属锂负极是研发的热点。总体来说，负极的开发方向是低成本、高比容。

我们认为，碳材料无论是当下还是未来，仍然是重要的负极基体，在实现更高比容负极的过渡阶段，碳材料的加入不仅能够起到提升导电性的作用，也是重要的承载物质。在中期的产业应用上，硅基负极则具备较大的推广可能性，特斯拉的硅碳负极已经实现商用，但并非完全的硅负极，为将硅的性能更完全的释放，仍然需要通过材料改性等手段持续开发；长期来看，金属锂负极因高比容低电位而具有应用潜力，但是在动力领域所面临的困难需要较长时间来解决，如锂枝晶带来的安全风险等，因此金属锂负极可能中短期在无人机等细分领域进行推广商用，在渐进式的演进前提下，在车用动力领域预计还需 5-10 年的产业化过程。

### 负极当下格局：碳基是商用主流，钛酸锂因高安全应用于细分领域

负极是储锂的主体，其中碳材料是负极商业化应用中的首选与主流。锂离子电池负极材料在充放电过程中实现锂离子的脱嵌，选用时遵循比容高、电势低、循环性能好、兼容性强、稳定性好与价格低廉等原则。理论上，金属锂因低电势和高比容是理想的负极，但活性锂与锂枝晶等带来的安全问题阻碍其发展。碳材料因价格低廉、为层状晶体带来较高比容量（LiC<sub>6</sub>理论比容为 372mAh/g）、循环性及安全性好，取代金属锂作负极，推动锂离子电池商业化。

碳基材料种类繁多，当下负极材料中人造石墨和天然石墨是主流产品。若按照结构划分锂离子电池碳材料，包括石墨、非石墨与掺杂型碳，石墨类又可分为天然石墨、人工石墨、中间相碳微球等。天然石墨成本低、技术成熟度高，但首效较低、倍率性能较差，主要用于消费类电池。人造石墨则一般采用致密的石油焦或针状焦作前驱体制成，避免天然石墨的表面缺陷，首次效率与倍率性能提升，因此在动力领域份额不断扩大。据 GGII，2020 年中国锂电池负极材料出货量 36.5 万吨，同比稳健增长，其中人造石墨占比 84%，份额逐年提升。

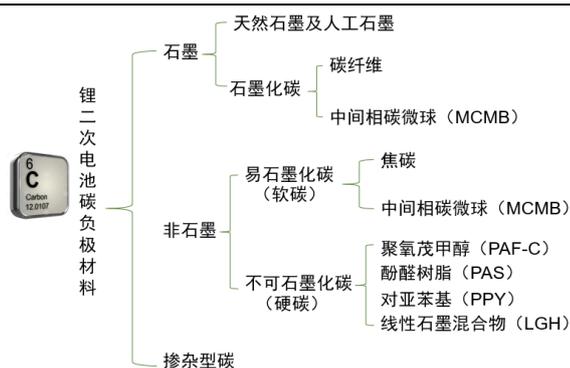
石墨类产品应用中存在缺陷，通过改性来提高产品性能。如天然石墨存在表面缺陷多、各向异性容易析锂等问题：（1）针对其表面缺陷多、电解液耐受性差的问题，采用表面活性剂、包覆等方式进行改性，提高部分性能；（2）针对其强烈各向异性的问题，工业生产中常采用机械处理的手段对颗粒形貌进行球形化整形，处理后粒径 D50 范围 15~20μm，首效和循环性能明显改善。人造石墨因各向异性导致倍率性能、低温性能差，充电易析锂的问题，其改性不同于天然石墨，一般通过颗粒结构重组降低石墨晶粒取向度。

图表 72：当下实现商用的一些锂电负极材料的性能对比

负极类型	材料细分	比容量(mAh/g)	首次效率%	循环寿命/次	安全性	快充特征
碳系负极	天然石墨	340-370	90%	1000	一般	一般
	人造石墨	310-360	93%	1000	一般	一般
	MCMB	300-340	94%	1000	一般	一般
钛酸锂	钛酸锂	165-170	99%	30000	最高	最好

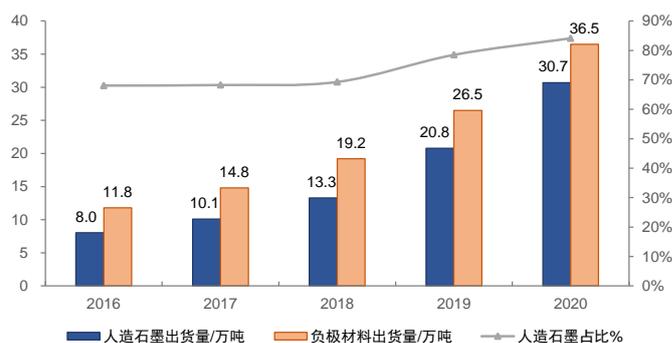
资料来源：翔丰华招股说明书，五矿证券研究所

图表 73: 按结构特点分类的碳负极材料, 其中人工石墨是动力领域主流



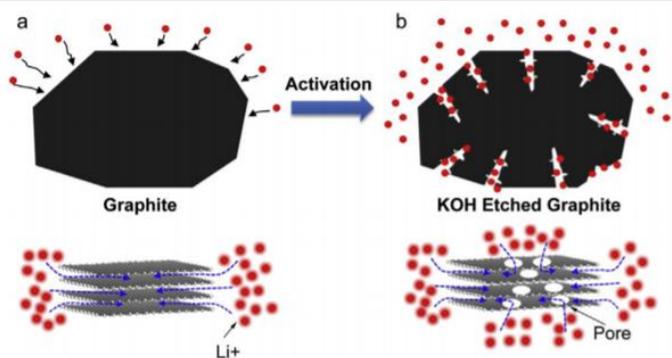
资料来源:《动力电池材料》, 五矿证券研究所

图表 74: 中国锂电负极材料历年出货量中, 人造石墨占比持续提升



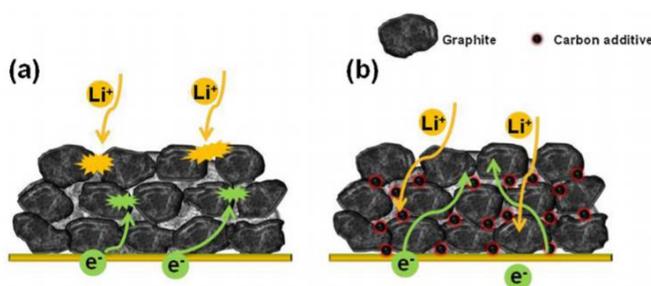
资料来源: GGII, 前瞻产业研究院, 五矿证券研究所

图表 75: 通过强碱改变孔隙结构表面, 增加表面微孔和嵌锂路径



资料来源: Journal of Power Sources, 五矿证券研究所

图表 76: 在石墨颗粒周围充填炭黑, 构筑锂离子的传输孔道



资料来源: Electrochimica Acta, 五矿证券研究所

具备某方面突出性能优势的负极材料如钛酸锂, 可满足特定需求, 适合在部分细分领域应用。嵌锂碳材料因本身理化性质具有以下缺陷: (1) 形成 SEI 膜, 循环过程中造成 Li+ 损耗与碳材料结构的破坏; (2) 析出锂枝晶, 增加安全隐患。在公共交通领域电动化进程中对安全性的诉求落实到负极材料, 需要负极电位稍正于碳、更加安全可靠。尖晶石型钛酸锂(Li<sub>4</sub>Ti<sub>5</sub>O<sub>12</sub>) 因具备突出的安全性能优势, 在公共交通领域有一定应用:

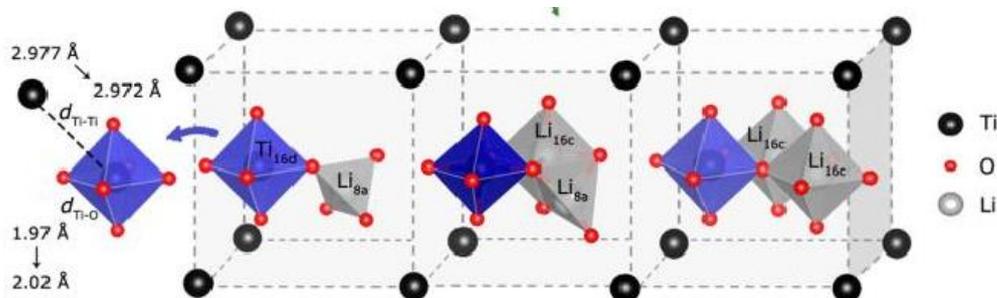
- “零应变材料”, 结构稳定。在循环过程中, 锂离子逐渐嵌入, 最终形成深蓝色的岩盐相 Li<sub>7</sub>Ti<sub>5</sub>O<sub>12</sub>, 晶胞参数由 0.836nm 变为 0.837nm, 体积变化小于 0.2%, “零应变”下材料结构稳定, 循环性好;
- 嵌锂电位高, 不易引起锂枝晶。钛酸锂嵌锂电位为 1.55V, 高于锂离子的还原电位, 因此不易产生锂枝晶, 提升安全性;
- 不生成 SEI 膜, 再次提高安全性。因高于电解液的分解电压而不会生成 SEI 膜, 没有 SEI 膜被破坏脱落的隐患;
- 循环过程中锂离子扩散系数也高于碳负极体系, 因此是具备高循环安全的负极材料。

钛酸锂劣势明显, 克容量低、倍率性能差、成本高等问题限制更大范围的使用。(1) 材料理论克容量 175mAh/g, 电压平台较低, 因此比能量较低; (2) 导电性能差, 导致其在大电流放电条件下极化严重, 容量衰减快, 倍率性能差; (3) 吸湿性强, 导致高温产气严重, 高温循环性能差; (4) 材料制备工艺复杂, 成本高, 电芯成本是相同能量 LFP 电池的 3 倍以上。

钛酸锂改性方法多样, 但往往无法保持综合性能, 有待更深入开发。(1) 改善材料形貌尺寸, 如颗粒纳米化、球化、多孔化等, 缩短锂离子进出路径, 提高比容量, 但易造成与电解液的

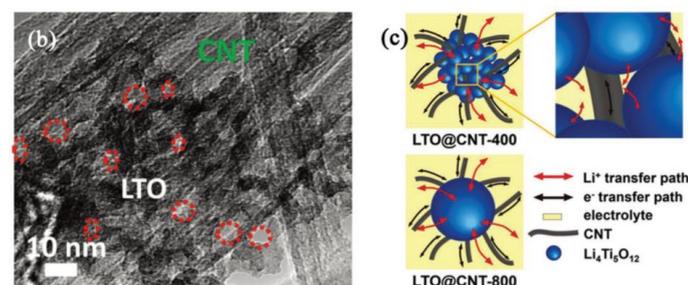
反应而形成 SEI 膜；(2) 金属掺杂后的改性材料导电性提高，但循环稳定性可能会降低；(3) 表面改性如碳包覆技术，可以提高电子电导率，但包覆后锂离子会在脱嵌过程中受到一定阻碍。综合看，寻找合适的离子、适当的掺杂比例、改性技术的结合是未来工作的重点。

图表 77:  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$  嵌锂向  $\text{Li}_7\text{Ti}_5\text{O}_{12}$  转变示意



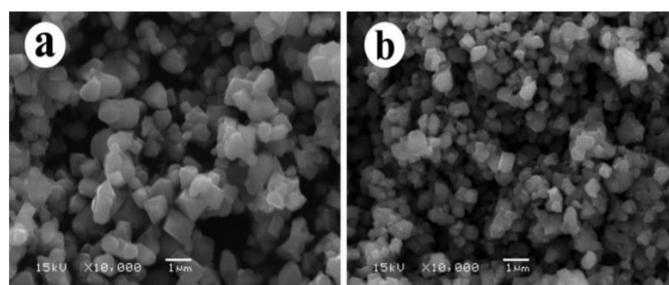
资料来源:《锂离子电池负极材料钛酸锂的制备及其电化学性能研究》，五矿证券研究所

图表 78: 温和煅烧温度使 LTO 材料保持较小粒径，倍率和循环性能提升



资料来源: Advanced Energy Materials, 五矿证券研究所

图表 79: LTO 及掺杂  $\text{Co}^{3+}$  的 LCTO 材料的 SEM 图像



资料来源: Electroanalytical Chemistry, 五矿证券研究所

### 现有负极比容已接近上限，高比容潜力负极中硅基优势显著

高比能诉求下，现有商用负极难以满足需求，需要以更高比容的材料替代。(1) 市场上的高端石墨比容可达 360-365mAh/g，已接近理论上限，而钛酸锂等本身理论比容较小，因此均难以满足更高比能的需求。(2) 商业化负极尤其是碳负极材料，因嵌锂电位低，在循环过程中可能会形成锂枝晶而引起电池短路。需针对问题开发更高比容的新型负极材料。

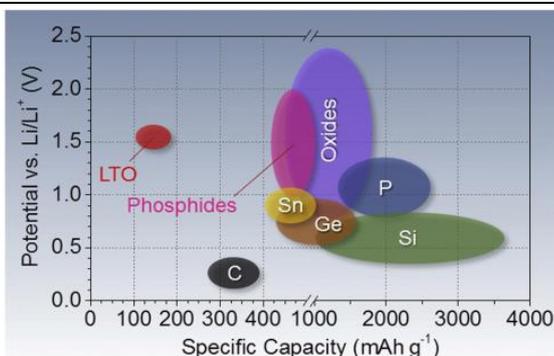
在众多可选的新型负极材料中，硅基材料是较具开发潜力的类型。高比容非碳负极包括锡基、硅基、氧化物、过渡金属氮化物以及金属锂负极等。比较理化性质，硅基具备应用优势：(1) 按照理论比容排序，硅基负极可达 4200mAh/g，而其他负极大部分在 900mAh/g 左右；(2) Si 的嵌锂电位高于碳，析锂风险小；(3) Si 与普遍应用的电解液反应活性低，嵌锂过程中不会引起溶剂分子与  $\text{Li}^+$  共嵌入的问题；(4) Si 是地壳中第二丰富元素，价格低廉。

硅基负极的规模应用需解决体积效应等关键问题：(1) 巨大的体积变化带来材料的粉化与电极的破坏。硅与锂的合金化反应使硅发生 1-3 倍的体积膨胀，材料产生裂纹直至粉化，带来容量的快速衰减，较大的应力下影响结构稳定性，安全风险提高；(2) 体积的变化使 SEI 膜出现破裂与生成的交替，消耗活性物质与电解液，导致电池的内阻增加和容量的迅速衰减；(3) 硅的导电性差，在高倍率下不利于电池容量的有效释放。

针对硅基负极的改性研究集中在解决体积效应、维持 SEI 膜稳定和提高首效三个方面。优化

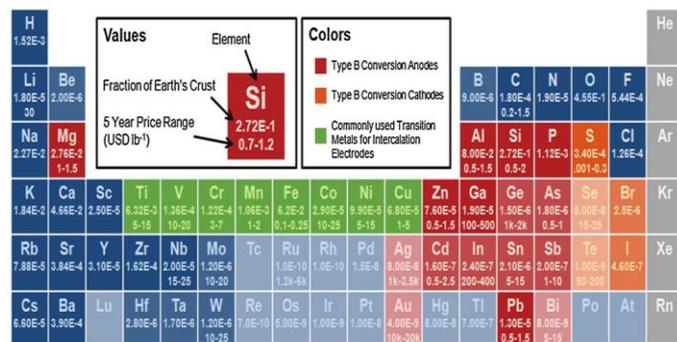
的方向包括：(1) 硅源的改性研究。即通过制备纳米硅、多孔硅或合金硅的方式改善电化学性能，但同时也会面临工艺的复杂性等问题；(2) 制备复合材料。如制备结构稳定的硅碳负极，提高导电性，增强机械强度。在开发过程中，碳源选择和结构设计是造成性能差异的关键；(3) 制备氧化亚硅 (SiOx) 材料。作为石墨与硅的折中方案 (比容 1500mAh/g 左右)，材料体积膨胀大大减小，循环性能提升，但首效较低也限制在全电池中的应用。

图表 80：硅具有较高的比容和适宜的嵌锂电位



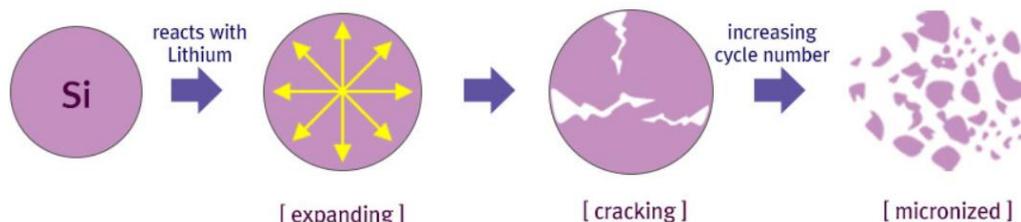
资料来源：《Li-ion battery materials: present and future》，五矿证券研究所

图表 81：硅的丰度高，价格低廉



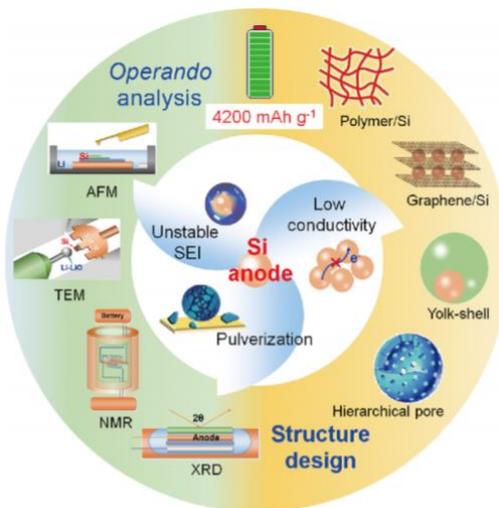
资料来源：《Li-ion battery materials: present and future》，五矿证券研究所

图表 82：硅材料与锂反应，经历体积膨胀，产生裂纹直至粉化的结构破坏过程



资料来源：EG 公司官网，五矿证券研究所

图表 83：采用现代分析与结构改性相结合的方式处理硅负极实用化遇到的三大问题



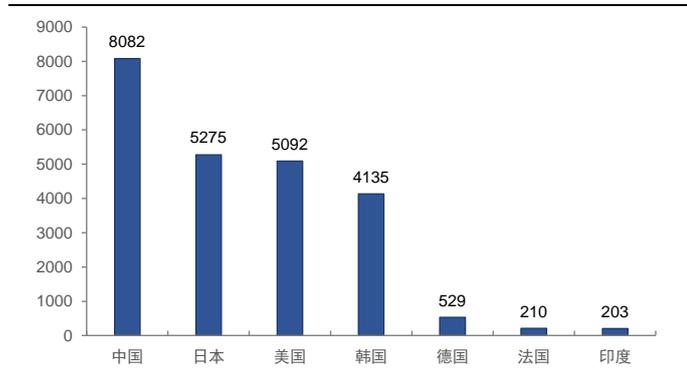
资料来源：《Structure design and mechanism analysis of silicon anode for lithium-ion batteries》，五矿证券研究所

## 硅基负极产业化持续铺开，“硅基时代”临近

硅基负极研发集中度高，中国、日本、美国和韩国为主要申请国。统计 2000-2019 年 6 月与锂离子电池硅基负极相关的专利数量，共计 28131 件，其中中国、日本、美国、韩国分列前 4 位。但日本、韩国和美国注重海外专利布局，中国申请人主要在国内进行专利布局。

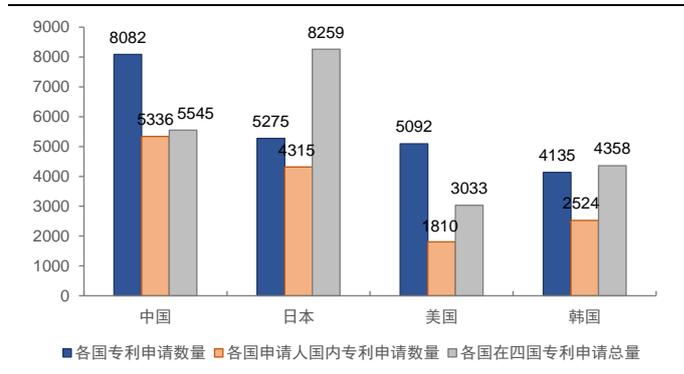
日本申请人具有一定优势，中国申请数量大，但仍需进一步发展。统计前 100 名国际申请人的国别，日本共有 35 家，且不同排名阶段的数量都占据绝对优势，主要有松下、索尼、日立等。韩国则主要由三星和 LG 化学申请。中美分别有 23 家和 18 家申请人进入前 100 名。在中国国内专利申请排名前 20 的申请人中，国外申请人依然占据较大比重，尤其是日本。中国的企业中，比亚迪、贝特瑞、ATL 和万向集团进入前 20 名。

图表 84：硅基负极专利申请总量排名中，中日美韩位居前四



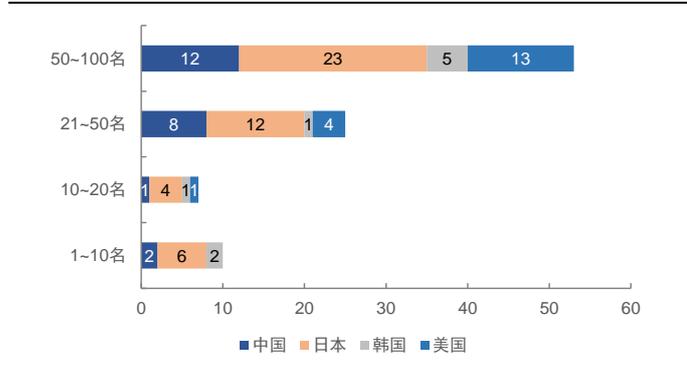
资料来源：《锂离子电池硅基负极专利申请态势分析》，五矿证券研究所

图表 85：日本、韩国和美国注重海外专利的布局



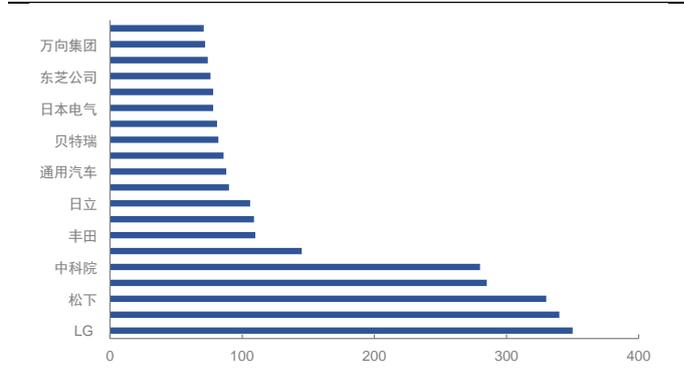
资料来源：《锂离子电池硅基负极专利申请态势分析》，五矿证券研究所

图表 86：全球前 100 名专利申请人中，日本申请人数量具备优势



资料来源：《锂离子电池硅基负极专利申请态势分析》，五矿证券研究所

图表 87：中国国内专利申请人中，以海外申请人为主



资料来源：《锂离子电池硅基负极专利申请态势分析》，五矿证券研究所

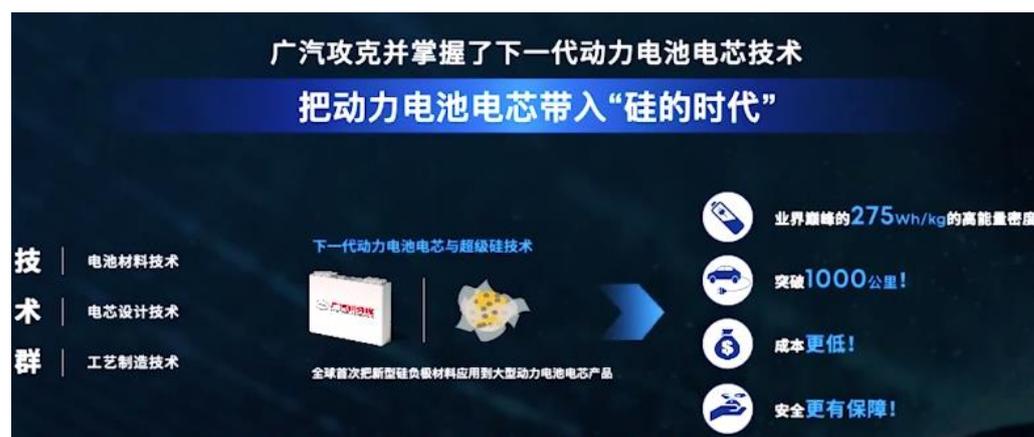
硅基负极产业化持续铺开，推动电池产品性能提升。特斯拉已将硅碳负极应用于 Model 3，在人造石墨中加入 10% 的硅，负极容量提升至 550mAh/g，单体能量密度达 300Wh/kg；日本 GS 汤浅公司的硅基负极已成功应用在三菱汽车上。中国方面，宁德时代、国轩高科、万向集团、比亚迪等正在加紧硅基负极体系的研发和试生产。负极企业贝特瑞已实现硅碳负极量产并为松下配套部分材料，杉杉股份、江西紫宸等具备小量试产能力。CATL 的高镍三元+硅碳负极电芯比能达到 304Wh/kg，力神的 NCA+硅碳负极电芯也已达 303Wh/kg。

产业化进程中，材料成本和生产工艺是两大制约因素。尽管硅基负极材料的性能在持续提高，但在优化材料性能之外，还要考虑到制约产业化的其他因素：（1）材料成本：各家工艺差别

较大，产品尚未达到标准化，导致价格较高。此外制备过程中常用到纳米硅粉，其生产对设备要求高、能耗大，因此增加成本；(2) 生产工艺：制备工艺较为复杂，有待成熟，并且所匹配的主辅材对负极性能发挥影响大，相应的工艺也需要进行优化改善。

广汽应用新型硅负极材料，推动续航再上台阶。2020年7月28日，广汽集团宣布采用新型硅负极材料的方形硬壳电芯比能达到 275Wh/kg，将使电动车续航突破 1000km。2021年4月9日的广汽科技日再次强调长续航技术将于 2021 年量产，采用海绵硅负极片电池技术使电芯比能超过 280Wh/kg（未来提升至 315Wh/kg），同时解决硅材料膨胀问题。这将是全球首次将新型硅负极材料应用到大型动力电池电芯产品，使硅材料的动力领域实用化更进一步。

图表 88：新型硅负极的应用使电池能量密度提升，缓解里程焦虑



资料来源：高工锂电，五矿证券研究所

### 负极预锂化是硅基负极产业化的关键改性技术

硅基负极的应用导致首次库伦效率（ICE）下降，带来不可逆的容量损失。硅基负极的体积应变变大，使 SEI 膜更加不稳定，持续生长的 SEI 膜不断消耗锂，造成电池的内阻增加和容量的迅速衰减。ICE 是重要的性能指标，ICE 下降带来的是不可逆锂损耗，当下的石墨材料一般会有 5%~10%的首次锂损耗，而硅的不可逆容量损失可达 15%~35%。因此，采用硅基负极在提升容量的同时，循环寿命却下降，实际一般是石墨的 1/5 左右。

预锂化技术通过补偿首次锂损耗，能够延缓容量衰减，提升硅基负极性能。尽管通过材料复合等方式可以减轻体积应变，提高 ICE，但硅比例增加的趋势下，ICE 下降问题逐渐突出。针对问题，有效的解决方法是预锂化技术，主要是在负极正式充放电循环前预先加入少量锂源平衡反应中过量消耗的锂，补充副反应和 SEI 膜形成过程中锂的消耗，以提高 ICE，延长循环寿命，改善电池综合性能。

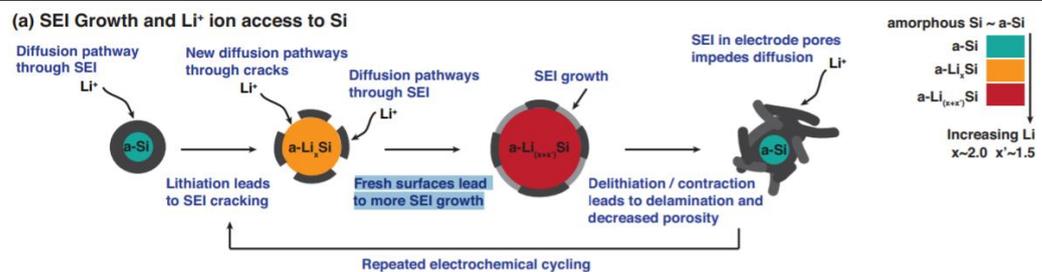
针对负极的预锂化方法多样，而其中稳定金属锂粉末（SLMP）的预锂化是唯一实现广泛工业化的技术。对于负极的预锂化技术主要分为 5 类：

- SLMP 预锂化：采用美国 FMC Lithium 生产的可投入商业应用的稳定金属锂粉作为预锂化试剂，其由质量分数约 97%的金属锂粉和 3%的  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  组成。Pan 等在硅基复合材料表面涂覆 SLMP，使 ICE 从 68.1%提高到 98.5%，200 次循环后仍有 95%的容量保持率。技术广泛用于商业生产，但价格昂贵，裸露环境下进行已造成粉尘。
- 电化学预锂化：通过在构建的临时电池等装置中发生电化学反应形成 SEI 膜实现预锂化，包括硅基与锂材料的直接接触和间接接触两种方式。主要应用于实验室，因条件要求严苛，规模生产难度大；

- 添加剂预锂化：针对硅基负极主要是添加纳米硅化锂粉  $\text{Li}_x\text{Si}$ 。因有着比 SLMP 更小的尺寸，利于均匀分散，对电极体积变化影响小。此种方式可操控性强，但仍需进一步降低成本以及研发多样化的添加剂；
- 化学预锂化：在各种纳米结构正负极中有较广泛应用。成会明等报道了  $\text{LiF}$  纳米颗粒修饰的石墨烯负极在锂离子电池中的效果， $\text{LiF}$  作为额外的锂源及 SEI 膜抑制剂，使 ICE 由 20%~45% 提高至 53%；
- 机械预锂化：通过高能球磨等物理方法对硅基负极进行预锂化。技术操作简单、成本低廉、对环境要求较低，适宜规模生产，但过程中易造成材料内部结构的破坏。

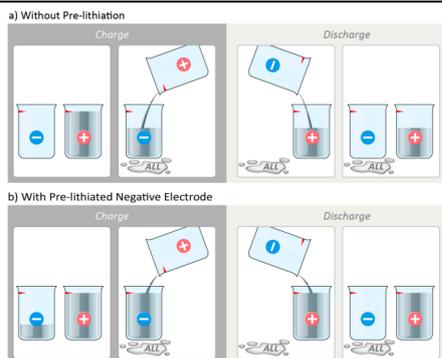
预锂化有效可靠，产业持续开展专利布局，但仍需投入以推进规模化。前人研究表明，预锂化补锂技术可以有效提高电池的 ICE。包括 CATL、国轩高科等企业已经持续布局，尤其是 CATL，在 ATL 基础上已有多年预锂化研发经验。CATL 有多项的与极片补锂装置相关的专利，主要通过工艺的改进，来提高模块的利用率以及装置的生产产能。在产业化推进过程中，未来的重点在于进一步降低预锂化成本，提高预锂化安全性，减少环境污染，改善电池性能。

图表 89：循环过程中 SEI 的生长于锂离子的扩散路径示意，不稳定的 SEI 膜使锂损耗增加



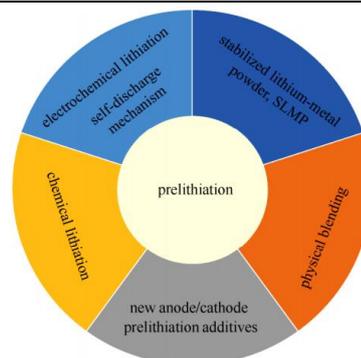
资料来源：《Solid Electrolyte Interphase Growth and Capacity Loss in Silicon Electrodes》，五矿证券研究所

图表 90：通过负极预锂化降低首次活性锂损耗



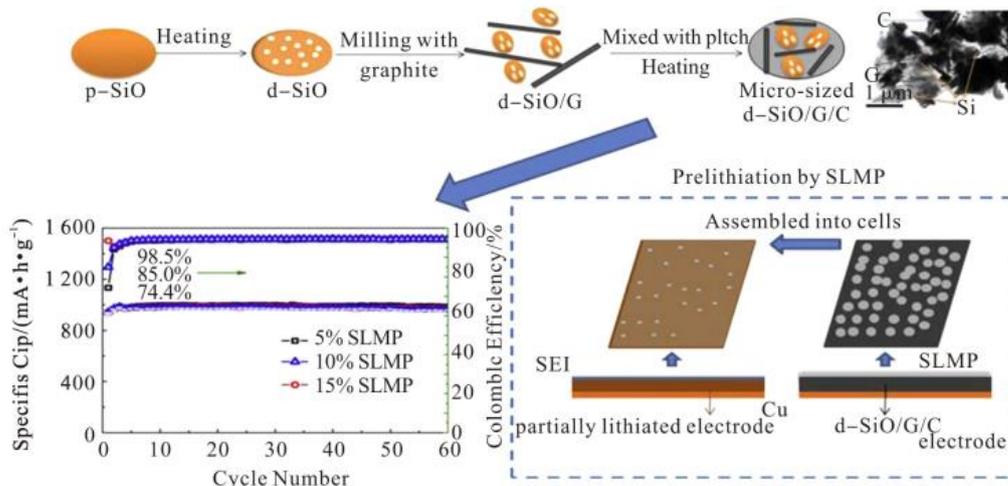
资料来源：Batteries，五矿证券研究所

图表 91：针对提高 ICE 所采用的几种预锂化技术



资料来源：《预锂化技术及其在高比能硅负极中的应用》，五矿证券研究所

图表 92: d-SiO/G/C 复合材料制备流程、SLMP 预锂化过程及所带来的性能提升



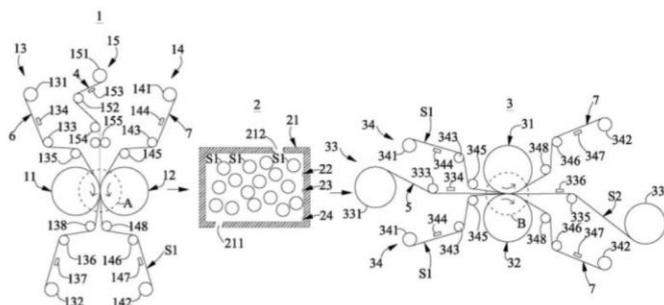
资料来源: Journal of Power Sources, 五矿证券研究所

图表 93: 检索系统显示中国国内具备丰富的补锂相关技术专利



资料来源: 专利之星检索系统, 五矿证券研究所

图表 94: 宁德时代的新型极片补锂装置能够保证生产产能



资料来源: 专利之星检索系统, 五矿证券研究所

### 负极的革命式目标是金属锂的产业应用, 难点在于安全性

金属锂是最理想的负极材料, 是高比能电池不可缺的部分。传统的商用锂离子电池正极无论是采用富锂还是高镍改性手段, 都难以实现 250mAh/g 的比容, 主要系循环过程中为单离子嵌入。高比能电池体系开发诉求推动多离子反应的正极的发展, 如 S 和 O<sub>2</sub>, 而无锂正极只有在与含锂负极配对时方可实用化。金属锂因具有较高的比容量 (3860mAh/g)、最负的电极电势 (-3.04V vs H/H<sup>+</sup>)、低的密度 (0.54g/cm<sup>3</sup>), 是能够大幅提升比能的理想的负极材料。如 Li/O<sub>2</sub> 和 Li/S 电池体系分别具有高达 11400Wh/kg 和 2600Wh/kg 的理论比能。

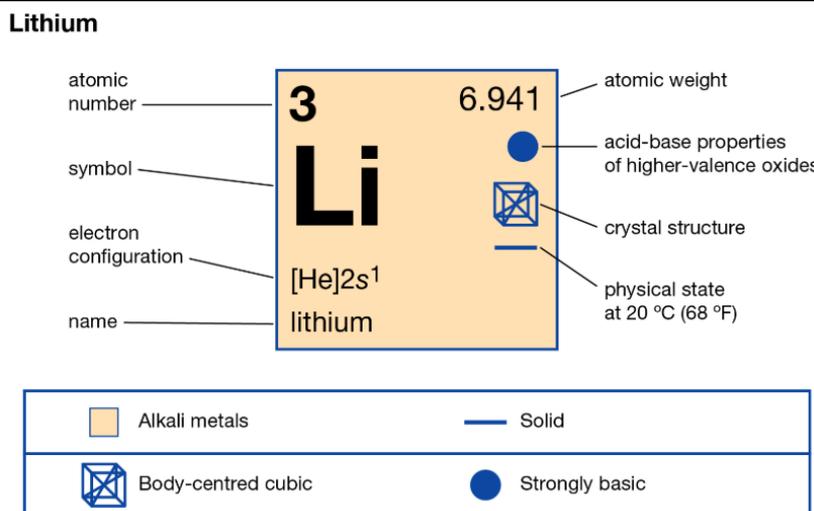
金属锂负极开发早有研究, 但因存在明显缺陷可引发重大安全问题而阻碍发展。20 世纪 6、70 年代左右便已经开始关于以锂为负极的锂二次电池体系的研究, Whittingham 等开发了以 TiS<sub>2</sub> 为正极、金属锂为负极的二次电池。但在有机电解液体系中, 金属锂负极循环过程中的明显缺陷严重影响电池的稳定性, 甚至引起燃烧爆炸, 因此商业化应用进展缓慢:

- 高反应活性带来的容量衰减: 金属锂本身具有强还原性和热力学不稳定性, 与常规电解液反应形成钝化层即 SEI 膜, 但循环过程中具有无限大的体积膨胀变化, 造成 SEI 膜的破裂和重新生长。这种情况一方面导致不可逆的锂损耗, 另一方面造成金属锂的粉化形成“死锂”, 加速容量的衰减;

- 不均匀的沉积脱出形成锂枝晶，引发热失控：溶解-沉积机制下，单位时间内传输到锂电极表面不同部位的锂离子量不同，导致电流密度和反应速度不同，沉积速度产生差异，不均匀的沉积形成锂枝晶。枝晶持续生长会刺穿隔膜，导致电池内部短路，引起热失控，发生电池燃烧爆炸等安全事故。

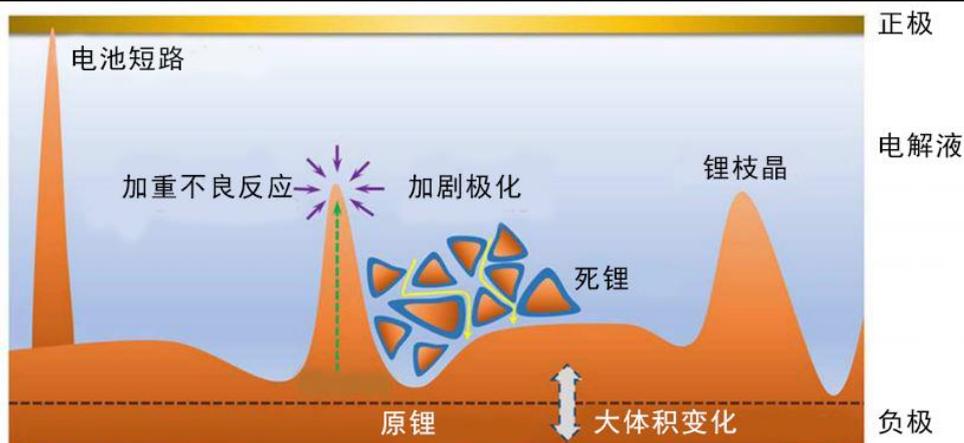
循环过程中严重的锂枝晶生长问题直接影响体系的安全性，是实用化无法忽视的问题。通过大量的机理研究，当下主要从两方面入手，提出缓解措施：第一是降低电极表面的电流密度；第二是均化锂离子到达负极表面的传质流量，尽可能减少锂离子在突出点位的沉积速度。主要的手段有：稳定 SEI 膜法、构筑人造 SEI 膜、开展锂负极结构设计等。此外，通过金属锂负极改性，抑制体积膨胀，既能够减少活性材料降解，同时也对缓解锂枝晶生长有一定帮助。

图表 95：锂是最轻的金属元素，是能够大幅提升比能的理想的负极材料



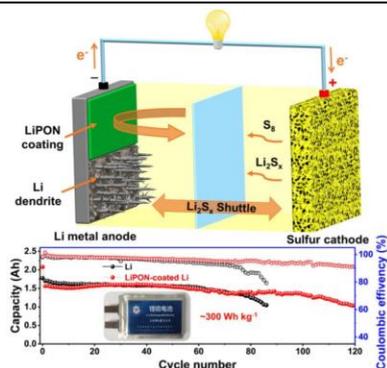
资料来源：Britannica 公司官网，五矿证券研究所

图表 96：高反应活性叠加不均匀的沉积脱出，使安全性能显著下降



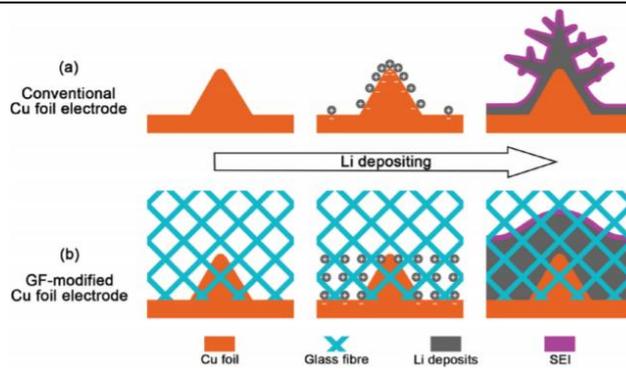
资料来源：《Strategies to Improve the Performance of Li Metal Anode for Rechargeable Batteries》，五矿证券研究所

图表 97: LiPON 作为人造 SEI 膜, 有效抑制锂金属与电解液反应



资料来源: Energy Storage Materials, 五矿证券研究所

图表 98: 玻璃纤维放置在锂负极表面, 避免突起周围锂离子的积累



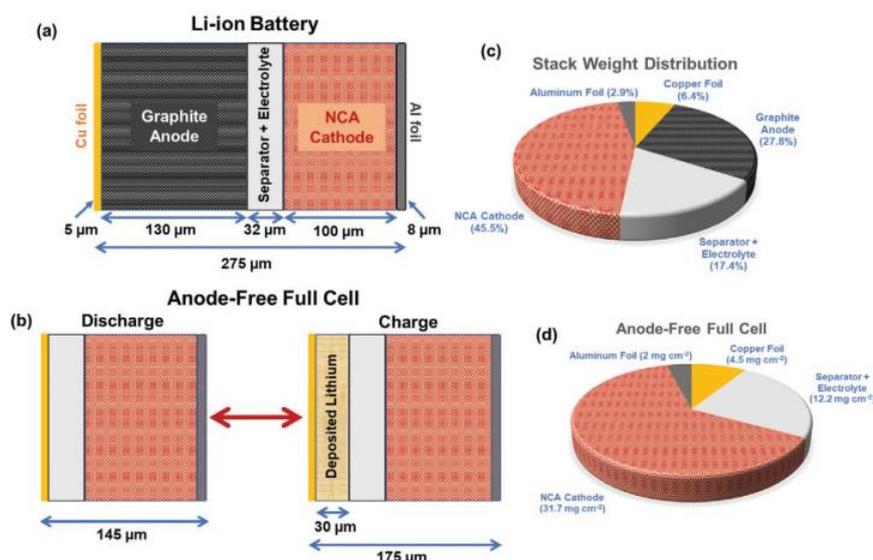
资料来源: Advanced Materials, 五矿证券研究所

### “无负极”电池: 锂金属电池研发的可行创新策略

“无负极”电池: 锂全部来自正极, 负极仅含集流体, 是锂金属电池发展的全新策略。传统的锂电池中, 负极均在电池组装之初便已存在, 但“无负极”电池的锂源全部来自正极, 负极仅有一集流体, 充放电过程中来自正极的锂在负极集流体上发生沉积-剥离。(1) 因避免直接使用负极, 其体积能量密度理论上可提高 85.5%, 即使锂沉积时带来体积膨胀, 依然能够提升 57.1%; (2) 该体系无需考虑负极容量/正极容量比例问题, 且输出电压也能被充分发挥; (3) 利用少量锂的锂金属电池在制备锂箔时困难且昂贵, 但采用集流体作负极则免去麻烦。

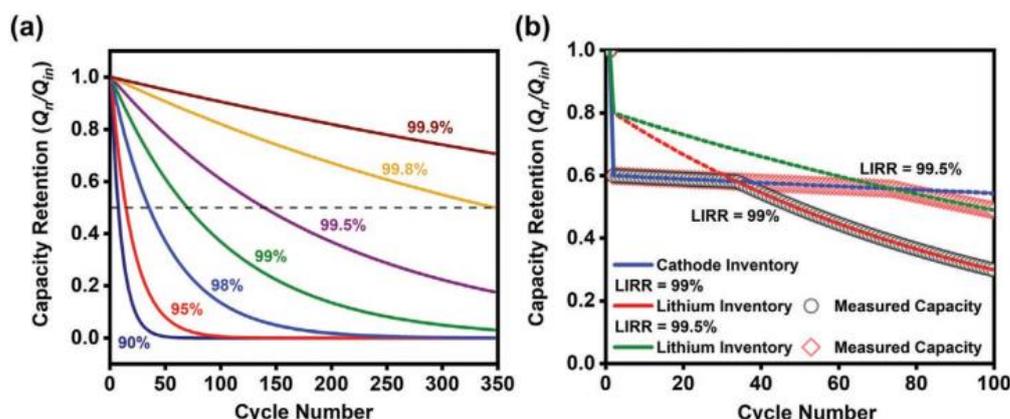
“无负极”电池面临容量衰减快、循环寿命短的挑战, 金属锂的安全问题仍然是应用关键。金属锂在集流体上的不均匀沉积形成具有巨大比表面积的沉积微结构, 与电解质反应生成 SEI 膜, 而体积膨胀下使 SEI 膜破裂, 造成锂的持续消耗, 容量快速衰减。为保持容量, 需尽可能提高电池库伦效率。当库伦效率达到 99.99% 时才能与商业锂离子电池媲美。此外, 金属锂的体积膨胀也将带来安全问题。针对无负极电池性能的提升, 研究策略主要包括电解液组分的调控、集流体表面修饰、优化电池化成和循环参数等。

图表 99: NCA 正极+石墨负极的体系转换为 NCA 正极的“无负极”体系后, 能量密度有望达到 500Wh/kg 以上



资料来源: 《Anode-Free Full Cells: A Pathway to High-Energy Density Lithium-Metal Batteries》, 五矿证券研究所

图表 100：无负极电池容量衰减快，只有当库伦效率达到 99.99%时，循环寿命才能与商业化的石墨负极体系相当



资料来源：《Anode-Free Full Cells: A Pathway to High-Energy Density Lithium-Metal Batteries》，五矿证券研究所

### 电解质：匹配电池体系持续优化，固态则是革新形式

锂离子电池电解质通常为有机液态电解液，被称为锂电池的“血液”。当下电解液主要由溶剂、锂盐及添加剂组成，因下游需求不同，组分上有所差异，形成多元的电解质产品。但总体上历经多年开发，主流锂离子电池电解质产品基本定型。展望未来，随下游动力及储能等场景要求的提升，针对各种导电锂盐的开发、电解液溶剂的体系或配比的优化、新的电解液添加剂的选择或合成是电解质产品能够匹配电池体系升级的关键。

动力领域的安全性至关重要，电解质从液态形式向固态形式转变，可实现“零自燃”，大幅提升锂电池安全性。蜂巢能源已发布基于凝胶电解液的动力电池产品，针刺测试中可实现“不起火、不冒烟、自愈合”。但需注意，倍率及循环寿命等性能有所减弱。蔚来则预计 2022 年 Q4 交付基于混合固液电解质的 150kWh 固态电池包，安全性增强的同时比能提升。我们认为，固态电池是动力电池进阶必须直面的远景技术，其核心之一是固态电解质的开发。我们预计未来混合固液形式有望加速产业化，推动全固态电池在 5-10 年左右导入到动力领域。

#### 有机液态电解液是主流的锂电池电解质体系

锂离子电池的优势与不足均与所用电解质性能密切相关。电解质在电池正负极间起到输送和传导电流的作用，影响电池的多维度性能。化学电源电解质包括水溶液电解质与非水电解质。传统锂离子电池采用非水电解质，主要系水溶液电解质的电化学窗口窄，应用非水电解质使锂离子电池能够在高的工作电压下稳定工作（工作电压比采用水系电解质的电池高出一倍以上）。但非水电解质的导电性通常不足水系的十分之一，使锂离子电池高倍率性能受限，此外有机液体电解质的高度可燃性是液态锂离子电池面临的重要安全问题。

不同种类的锂离子电池电解质各有优劣，当下主流电解质为有机液体电解质。根据电解质存在状态，可将锂离子电池电解质分为液体电解质、固体电解质和固液复合电解质。不同种类的电解质既有各自显著的优点，也有相应的不足。有机液体电解质是将锂盐电解质溶解于极性非质子有机溶剂得到的电解质，具备电化学稳定性好、凝固点低、沸点高、可在较宽温度范围内使用等优势，是当下商品化锂离子电池主要采用的电解质类型。

图表 101：不同电解质体系性质比较

性质	有机液体电解质	固体聚合物电解质	凝胶聚合物电解质	室温离子液体电解质	无机固体电解质
状态	液态	固态	准固态	液态	固态
基体性质	流动性	韧性	韧性	流动性	脆性
Li <sup>+</sup> 位置	不固定	相对固定	相对固定	不固定	固定

Li <sup>+</sup> 浓度	较低	较高	较低	较低	高
电导率	高	偏低	较高	较高	偏低
安全性	易燃	好	较好	好	好
价格	较高	较高	较高	高	较低

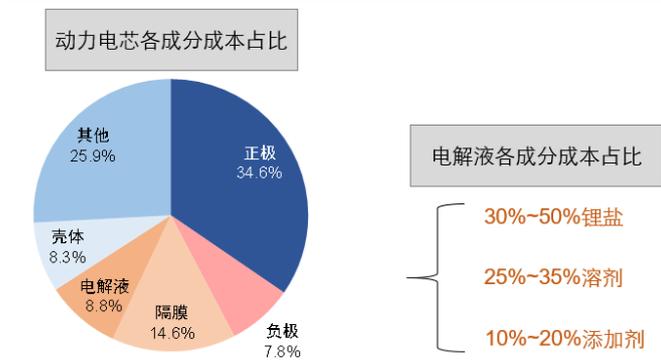
资料来源：《锂离子电池电解质》，五矿证券研究所

### 电解液产品优化路径：针对溶剂、锂盐及添加剂开展改性

历经几十年研究实践，锂离子电池用电解液逐渐成型。商品化电解液一般包括有机溶剂、锂盐及添加剂三部分，当下通常选择 LiPF<sub>6</sub> 作为锂盐，溶剂多为碳酸乙烯酯 (EC) 与碳酸二甲酯 (DMC) 或碳酸二乙酯 (DEC)、加入功能添加剂 (如碳酸亚乙烯酯 VC) 形成有机电解液。但需注意，电解液体系十分丰富，同时随下游动力及储能等场景要求的提升，未来针对各种导电锂盐的开发、电解液有机溶剂的体系或配比的优化、新的电解液添加剂的选择或合成仍然是重点，目标是降低成本、延长使用周期以及提高电池电化学性能等。

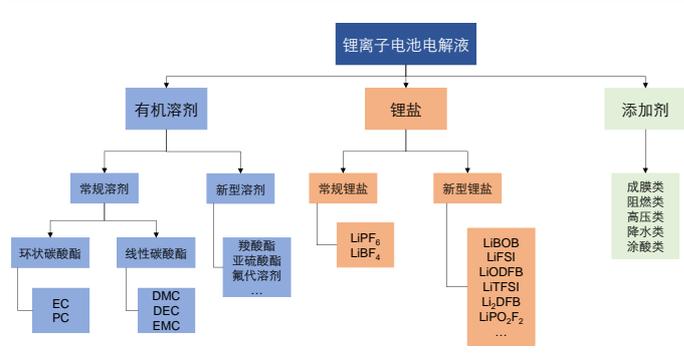
- 有机溶剂体系的替代与优化组合：锂离子电池工作电压 (一般约 3.6V) 高于水的分解电压 (25°C 时约 1.2V)，因此需具有高介电常数、保证锂离子导电性的非水溶剂。常用有机溶剂包括醚类、酯类和碳酸酯类。由于锂电池运行对电解质有多维性能要求，而单一溶剂较少能够满足所有要求，因此通常需要多种溶剂按一定比例混合开展应用。如线型酯 DMC、DEC 等黏度小、但介电常数低；烷基碳酸酯 PC、EC 等介电常数高、但黏度大，因此通常采用 PC+DEC、EC+DMC 等混合溶剂以获得较高的离子导电性；
- 电解质锂盐开发集中在几类物质：尽管锂盐种类丰富，但锂电池适用锂盐相对有限，主要系各类锂盐虽具有独特优势，但也存在难以克服的缺陷。当下 LiPF<sub>6</sub> 是商用锂离子电池锂盐的首选，具有优异的成膜性能、较宽的电化学窗口和相对较小的污染等优势。目前，电解质锂盐的研发集中在配位磷酸锂化合物、配位硼酸锂化合物和 LiTFSI 及类似物质，具有代表性的产品包括 LiFAP、LiFSI、LiTFSI 和 LiBOB 等；
- 不同功能添加剂的应用：在电解液中加入添加剂 (体积分数一般不超 5%)，主要目的包括改善界面特性、提高电解液导电能力、以及进行内部过充电保护等。添加剂通常含有不饱和官能团，主要可划分为有机磷类、氮化物、氟化物、硫化物和含硼类等。目前 VC 是应用相对广泛的添加剂，有利于促进稳定 SEI 膜的形成，提升电解质性能。

图表 102：电解液是动力电池重要组分 (以铁锂电芯为例展示成本结构)



资料来源：Wind，五矿证券研究所

图表 103：锂离子电池有机液态电解质主要组成结构



资料来源：《动力电池电解液用添加剂的研究进展》，五矿证券研究所

**图表 104: 部分有机溶剂的物理性能 (若非特殊指明, 一般为 25°C)**

溶剂	熔点 (°C)	沸点 (°C)	黏度 (mPa·s)	偶极矩 ( $\times 10^{-30}\text{C}\cdot\text{m}$ )	相对介电常数	DN (亲核性大小)	AN (亲电性大小)
EC	39	248	1.86 (40°C)	16.011	89.6 (30°C)	16.4	
PC	-49.2	241.7	2.530	17.379	64.4	15.1	18.3
DMC	3	90	0.59		3.1		
DEC	-43	127	0.75		2.8		
EMC	-55	108	0.65		2.9		
MPC	-49	130	0.78		2.8		
DME	-58	84.7	0.455	3.569	7.2	24	10.2
DEE		124					
乙腈	-45.7	81.8	13.142	13.142	38	14.1	18.9
1,3-DOL	-95	78	0.58		6.79 (30°C)	18.0	

资料来源: 《动力电池技术与应用》, 五矿证券研究所

**图表 105: 电解质锂盐的种类、典型代表及特征**

类别	典型代表	锂盐	特点
配位磷酸类	LiPF <sub>6</sub>	Li[(C <sub>3</sub> F <sub>7</sub> ) <sub>2</sub> PF <sub>4</sub> ], Li[(C <sub>3</sub> F <sub>6</sub> H)PF <sub>5</sub> ], LiPF <sub>4</sub> (C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ), LiPF <sub>3</sub> (C <sub>2</sub> F <sub>5</sub> ) <sub>3</sub>	电导率高, 氧化稳定性好, 但极易水解并受热分解
配位硼酸类	LiBF <sub>4</sub>	LiBC <sub>4</sub> O <sub>8</sub> , LiBF <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , LiB[(OCO) <sub>2</sub> ] <sub>2</sub>	低温性能好, 电导率高, 电化学窗口宽, 热稳定性好, 但价格昂贵
磺酰亚胺类	LiN(SO <sub>2</sub> CF <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (LiTFSI)	Li[N(SO <sub>2</sub> F) <sub>2</sub> ], Li[N(SO <sub>2</sub> F)(SO <sub>2</sub> C <sub>2</sub> F <sub>5</sub> )], Li[N(SO <sub>2</sub> F)(SO <sub>2</sub> C <sub>4</sub> F <sub>9</sub> )]	抗氧化性和热稳定性强, 存在对正极集流体腐蚀的问题
其他类型	LiAsF <sub>6</sub>		热稳定性好, 不易分解, 但 As 有毒, LiClO <sub>4</sub> 电导率适中, 强氧化剂, 但存在电池安全问题

资料来源: 《锂离子电池液态有机电解液的研究进展》, 五矿证券研究所

**图表 106: 电解液添加剂的不同类型、典型代表及作用原理**

添加剂类型	典型代表	作用原理
SEI 成膜剂	磷酸三六氟异丙酯 (HFIP)、乙烯基亚硫酸酯 (VES) 和亚磷酸三乙酯 (TEP)	正极表面形成一层更薄、更稳定且具有保护性能的膜, 一方面抑制高电压下电解液的氧化分解; 另一方面保护正极材料, 从而提高高电压锂离子电池的循环性能和安全性
负极 (过充) 保护剂	硫酸亚乙酯 (DTD)、联苯 (Biphenyl) 和二环二烷氧基芳烃 (BADA)	在 0.3-5.0V 具有完全的电化学可逆性。当发生过充时, 分子被多余的电流氧化, 形成自由基阳离子, 放电时恢复到分子状态, 完成整个循环, 防止材料溶解
锂盐稳定剂	对甲苯磺酰异氰酸酯 (PTSI)、(三甲基硅基) 亚磷酸盐 (TMSP)	电解液中痕量的酸 (HF) 和水对 SEI 膜的形成具有重要的影响。该类添加剂的引入, 可稳定 LiPF <sub>6</sub> , 并与电解液中痕量的 HF 发生反应, 阻止 HF 对电极的破坏
性能提高剂	辛二腈 (SUN)、甲磺酸内酯 (PS)、硼酸三酯 (TMSB) 和甲烷二磺酸亚甲酯 (MMDS)	使用不同的添加剂, 作用原理有所不同, 但在高低温性能、容量保持率和循环稳定性方面起到积极作用

资料来源: 《锂离子电池液态有机电解液的研究进展》, 五矿证券研究所

### 跟随体系升级, 开发多元电解质产品

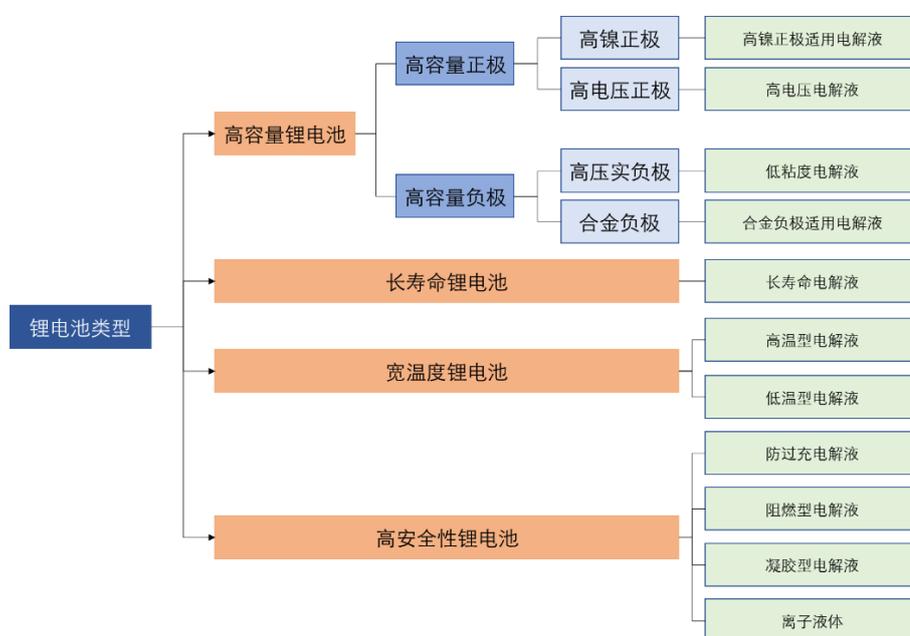
随锂电池下游应用场景的持续拓展, 锂电池技术不断发展, 高电压、高比能 (采用高镍正极及硅碳负极等高比能正负极材料、提高压实密度)、宽温区、高功率、长循环、高安全性是电

池研究的重点方向，电解液作为关键匹配材料，同样需要开展改性等优化工作。

未来在有机液态电解质体系内，主要的创新将体现在对新型锂盐和新型添加剂的开发。过去数十年间，电解液基本构成变化小，考虑到成本及现有电池制备工艺等因素，我们认为，由碳酸酯类及 LiPF<sub>6</sub> 等组成的液态电解质在未来 5 年内预计仍将是动力电池主流，新型锂盐和添加剂的开发成为高性能电解液产品的关键。对电池高比能诉求的提升，带动高比容及高电压材料的发展，针对高电压正极开发匹配的电解液是重点，同时兼顾高容量硅碳负极、避免其在循环过程中体积膨胀带来的 SEI 膜反复破裂、再生导致的电解液过量消耗等问题。

蜂巢能源开发出基于凝胶电解液的电池产品，提升安全性能。以凝胶电解液为电解质的“果冻电池”，具有高电导（可达  $6 \times 10^{-3} \text{S/cm}$ ）、自愈合、阻燃等特点，能够在几乎不降低性能的同时阻止热扩散。在实验室样品满电针刺测试中，果冻电池可实现“不起火、不冒烟、自愈合”。尽管果冻电池在内阻、循环寿命等性能指标上，相比液态电解质有所牺牲，但安全性的改善仍是产品力的重要体现。我们认为，丰富的下游场景将支撑多类型电解质产品的开发。

图表 107：根据电池应用需求以及正负极等组分匹配要求，需要开发不同类型电解液



资料来源：微信公众号-汽车电子设计，五矿证券研究所

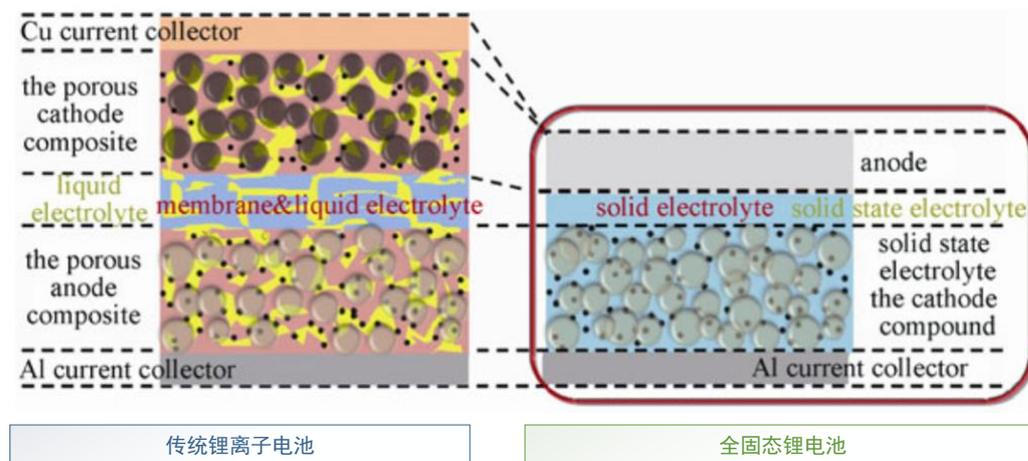
### 电解质的形态演进：固态形式将大幅提升综合性能

传统的液态锂离子电池仍有安全风险，通过引入固态电解质构建固态电池，理论上不仅具备安全优势，并且也将更好挖掘高比能不稳定正负极的应用潜力：

- 传统锂离子电池电解质通常为有机电解液，当出现过充、短路等异常现象时，电解液容易发热，带来自燃甚至爆炸的危险。在小型便携电子设备领域，电池因所用容量小（1~2Ah 以下）、大部分为单体形式，安全问题相对容易控制。但是作为动力电池时更高的容量带来更大的体积及质量，散热性能变差，发生事故可能性增大。在全固态电池中，电解液、电解质盐、隔膜与粘结剂等均无需使用，简化电池的构建步骤。因采用固态电解质，具备（1）不会出现电解液泄露、干涸问题；（2）没有气胀问题；（3）无机电解质“零自燃”特性，体现固态电池在安全性方面的独特优势；
- 固态电池具有相对常规电解液更宽的电化学窗口（可达 5V 以上），能够拓展电池材料选

择范围，例如高电压正极的应用。此外，固态电解质的引入，一方面能够避免液态电解质中发生的持续的副反应，另一方面利用固态电解质的力学与电学特性抑制锂枝晶的形成，从而减少金属锂负极在液态锂离子电池运行中出现的锂枝晶等安全问题。

图表 108：全固态电池中，电解液、隔膜、粘结剂等均不需要使用，大大简化电池的结构



资料来源：《全固态锂电池技术的研究现状与展望》，五矿证券研究所

固态电池自 1950 年以来已有相关体系的开发，并在小容量、低功率逐渐铺开。但作为固态电池的关键组分，多元的固态电解质仍面临低电导高界面阻抗等问题，因此渐进式的体系开发路径也成为推进产业化重要方式，即混合固液逐渐向全固态发展。

固态电解质是固态电池核心部件，各类电解质性能差异较大。固态电解质是固态体系的核心部件，材料类型很大程度上决定电池的各项性能参数，如循环稳定性、安全性、功率密度及高低温性能等。固态电解质主要包括无机陶瓷类电解质和有机聚合物电解质两类，无机陶瓷类按照元素可分为氧化物、硫化物、卤化物等。各类电解质性能差异较大，而具备较好开发潜力的主要有聚合物、氧化物和硫化物电解质等：

- 聚合物电解质：PEO 基为代表，但应用面临室温离子电导率低、电化学窗口窄等问题。通常由聚合物基体和锂盐构成，具有质轻、黏弹性好、易成膜、机械加工性能优等特点。该体系常用锂盐有  $\text{LiPF}_6$ 、 $\text{LiTFSI}$ 、 $\text{LiClO}_4$  等，电解质基体包括聚环氧乙烷（PEO）、聚硅氧烷等，其中 PEO 基是聚合物固态电解质的代表，已在小容量领域有应用。但关键的问题阻碍其扩大使用范围：1) 室温离子电导率可低至  $10^{-6}\text{S/cm}$ ，需通过升温提升性能。一般的工作温度在  $60\sim 85^\circ\text{C}$ ，动力领域需采用热管理，使系统更加复杂且增加能耗；2) 电化学窗口窄，如典型的 PEO 基电解质氧化电位在  $3.8\text{V}$ ，意味着难以与钴酸锂、层状三元、尖晶石型等高比能正极匹配，需开展改性操作；3) 若采用金属锂负极，循环过程中在界面处仍然存在锂枝晶穿过聚合物膜导致内短路的隐患。针对缺陷，开发耐高电压、室温离子电导率高、具备阻挡锂枝晶机制、力学特性良好的材料是重点。
- 氧化物电解质：稳定性好，与锂负极匹配性好，但高界面阻抗下不适宜作为全固态体系电解质。因其稳定性好，且电导率优于聚合物，可与锂负极匹配组成高比能电池。一般可分为 Perovskite 型、Garnet（石榴石）型、LISICON 型和 NASICON 型等结构。当下室温离子电导率最高的是石榴石结构的钽（Ta）掺杂锂镧锆氧（LLZO）电解质，可达  $10^{-3}\text{S/cm}$ ，且电化学窗口宽（相对  $\text{Li}^+/\text{Li}$  大于  $6\text{V}$ ），是高比能体系的重要选用材料。随高电导率氧化物不断开发，其瓶颈逐渐转向电解质-电极界面问题，主要系在各类电解质中其界面阻抗相对较高。因此氧化物电解质不适宜用于全固态体系，更好的改性方法是采用

混合固液体系，降低阻抗。

薄膜型电解质：柔性更佳，小容量领域已商用，大容量领域受限。上述提及的氧化物电解质主要为晶态氧化物，且柔性有限。玻璃态的电解质中，锂磷氧氮（LiPON）型为薄膜形态，柔性更佳，已经有小型全固态薄膜电池产品。但与一般的氧化物电解质相比，电导率较低（ $10^{-6}\text{S/cm}$ ），因此难以做成大容量电池。LiPON型已有较成熟的生产工艺，可由 $\text{Li}_3\text{PO}_4$ 通过射频磁控溅射制备，但制备的严格条件使规模生产成本和难度提升。

- 硫化物电解质：电导率相对高，但稳定性差，不适宜固液混合体系，主要用于全固态体系开发中。氧化物电解质中的O被S取代后即硫化物电解质。S的原子半径和极化率大，晶格畸变形成较大的离子通道，且S与Li+间结合力弱，体系内可移动载流子数量大，表现出较好的电导率（一般为 $10^{-3}\text{S/cm}$ ，可达 $10^{-2}\text{S/cm}$ ）。质地较软的特性则使其更易加工，可通过热压法制备全固态电池。但硫化物电解质存在对空气敏感、容易氧化、遇水容易产生 $\text{H}_2\text{S}$ 等有害气体的问题，使寿命下降，通过改性可有所改善，但是否满足实际要求仍需验证。因此，硫化物活性较高的特性也限制其在混合固液体系的应用，而在全固态体系开发中是关键的材料。

图表 109：在渐进式的路线中，由混合固液体系逐渐转变为全固态体系，正负极材料体系能够不断拓展

	25wt%	15wt%	10wt%	5wt%	1wt%	0wt%	电芯中液体
	液态电解质		混合固液电解质			液态电解质	全固态电解质
	0wt%		5wt%	30wt%	50wt%	80%-100% Li负极	
	石墨/硅负极	预锂化负极		富锂复合负极	金属锂负极		
	250Wh/kg	300Wh/kg		350Wh/kg	400Wh/kg	500Wh/kg	
	55°C		80°C	150°C	最高操作温度		
	液态电解质电池		混合固液电解质电池		全固态电池		
正极	NCM, NCA, Li-rich, LNM, LCO		NCM, NCA, LCO, Li-rich, LNM/SEI		NCM, LCO, Li-rich, LNM, S, MFx/LATP, sulfide/SEI		
负极	GP, C@SiOx, C@nano-Si/C, HC, SC//+Li		Li+HC, SC, C@SiOx, C@nano-Si/C+Li/SEI		Li-composite/SEI		
电解质	EC-DEC-EMC-DMC LiPF6 BP, FEC, VC, BS, LiFSI, LiODFB...		LATP, LLZO, EC-PC-FEC-LiBF4+LiODFB +ES+LiPSx+...		LLZO/Polymer-LiX; sulfide		
隔膜	Al2O3/PE/PVDF-HFP		LATP/PE/PVDF-HFP				
能量密度	250-300Wh/kg, 500-700Wh/L		250-500Wh/kg, 500-700Wh/L		150-400Wh/kg		

资料来源：卫蓝新能源，五矿证券研究所

图表 110：现有固态电解质特性一览，聚合物、氧化物和硫化物是主要的适合产业化的固态电解质

类型	材料	室温离子电导率 (S/cm)	优势	劣势
聚合物	PEO, PAN	$10^{-5}$ 左右	对金属锂电极稳定性好 批量制备工艺较成熟 剪切模量低	热稳定性有限 氧化电压低 (< 4V) 低电导率 锂枝晶
氧化物	Perovskite NASICON LISICON $\text{Li}_{3.3}\text{La}_{0.56}\text{TiO}_3$ $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$	$10^{-5} \sim 10^{-3}$	高化学与电化学稳定性 机械性能好 电化学窗口宽	柔性有限 高界面阻抗 锂枝晶 当下批量生产成本较高

	LiTi(PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> Li <sub>14</sub> Zn(GeO <sub>4</sub> ) <sub>4</sub> Garnet 型			
硫化物	Li <sub>2</sub> S-P <sub>2</sub> S <sub>5</sub> Li <sub>2</sub> S-P <sub>2</sub> S <sub>5</sub> -MSx	10 <sup>-3</sup> 左右	较高电导率 较好的机械强度和柔性 较低界面电阻	稳定性一般 对水分敏感 与电极相容性差
薄膜电解质	LiPON	10 <sup>-6</sup>	对金属锂电极稳定性好 对含锂正极稳定性好 已实现批量制备	当下批量生产成本高
卤化物	LiI, 尖晶石型 Li <sub>2</sub> ZnL <sub>4</sub> 反钙钛矿型 Li <sub>3</sub> OCl	10 <sup>-8</sup> ~10 <sup>-5</sup>	对金属锂稳定 有较好的机械强度和柔性	对水分敏感 氧化电位低 低电导率
氢化物	LiBH <sub>4</sub> , LiNH <sub>2</sub> Li <sub>2</sub> NH, Li <sub>3</sub> AlH <sub>6</sub> LiBH <sub>4</sub> -LiNH <sub>2</sub> LiBH <sub>4</sub> -LiX(X=Cl/Br/I)	10 <sup>-7</sup> ~10 <sup>-4</sup>	较低界面电阻 对金属锂稳定 有较好的机械强度和柔性	对水分敏感 与电极相容性差
硼酸盐或磷酸盐	Li <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> , Li <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> Li <sub>2</sub> O-B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	10 <sup>-7</sup> ~10 <sup>-6</sup>	批量制备简单 重复性和耐久性较好	低电导率

资料来源：《固态锂电池发展现状与技术进展》，五矿证券研究所

## 隔膜：电池的安全屏障，未来部分场景或以电解质形式存在

隔膜产业随全球新能源汽车快速发展，未来隔膜依然是大储能时代不可或缺的组件之一。隔膜作为半工业化产品，依附于储能产品发挥价值，因电池应用场景的变换而带来不同性能要求。在动力及储能领域，有别于消费数码，需要在保障高安全的前提下兼顾电池能量输出与功率特性。我们认为，膜材料历经多年发展，产业十分成熟，当下聚烯烃材料及添加剂作为隔膜基体材料，能够满足规模化要求，同时具备成本优势，未来仍将是主流产品。但长期看，隔膜产业仍会有可预期的变化，驱动材料体系继续革新：

- 大储能时代靠近，电池产品下游场景持续拓展，产生不同的性能要求，因此未来对高性能隔膜产品的需求将继续提升。一方面是提升能量密度诉求下，隔膜轻薄化发展是开发的趋势之一；另一方面，聚烯烃材料面临接近熔点时收缩变形的问题，因此需要通过新材料开发（如耐高温树脂）、高分子复合改性技术等方式满足高功率动力类需求；
- 电池体系可能面临革新，液态锂电池难以消除安全隐患，全固态电池则能具备“零自燃”特性。全固态电池中的固态电解质承担离子传输及分隔正负极的作用，而无需液态电解质与传统隔膜，因此未来不排除某些应用场景下的电池产品不再具有隔膜。但需注意，全固态大规模商用时间尚早，混合固液体系中仍然需要隔膜参与循环。

### 隔膜影响电池体系综合性能，动力领域要求严苛

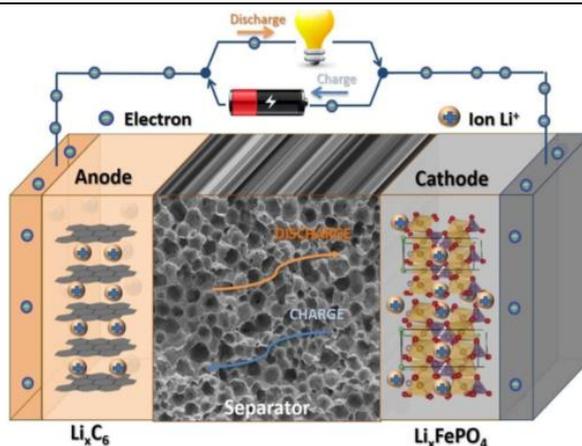
电池隔膜起到离子通道作用，同时通过将电池正负极隔开，降低发生短路概率。传统液态锂离子电池中，隔膜材料吸收电解液后装配在正负极之间。充放电过程中，Li<sup>+</sup>需要经过隔膜在正负极之间发生迁移而导电。同时，隔膜能够防止两极直接接触发生短路，并且体系内部升温时隔膜闭孔能够阻隔离子传导，防止爆炸。隔膜的结构与性能影响电池容量、循环及安全性等，优质的隔膜材料开发是提升锂电池性能的重要路径。

作为锂电池正负极分隔材料，要求隔膜综合性能优异，尤其是在保障结构稳定的前提下，具备高的离子电导率。（1）首先隔膜需要具有足够的稳定性，包括电化学及热稳定性、高的抗

张强度和抗刺穿强度、优秀的热闭合性能等，充当电池循环的安全屏障；(2) 隔膜/电解质体系作为离子传输通道，一般要求其室温下离子电导率  $> 10^{-3} \text{S/cm}$ ，其中孔径大小与分布是重要的影响因子，适宜亚微米级孔径以及均匀的孔径分布能够减少离子迁移阻力。

隔膜在动力类锂电中的应用要求严格，对于材料性能改善有强诉求。隔膜是锂电池的重要组成部分（成本占比约 10%-20%），其首先应用于消费锂电领域，随后跟随锂电池发展拓展至动力、储能领域。动力电池相比消费电池，使用电芯数目多，对电源一致性要求高，因此隔膜除满足基本性能外，对孔径尺寸大小和分布的均匀性有较高要求（厚度一般 16-60 $\mu\text{m}$ ）；此外，对循环性能和耐高温性要求的提高，驱动隔膜通过工艺创新、材料改性等方式增强综合性能。

图表 111：隔膜置于正负极之间，将正负极隔开，防止两极直接接触发生短路



资料来源：Energy Storage Materials, 五矿证券研究所

图表 112：锂离子电池对隔膜材料的性能要求

性能	理想值	具体说明	动力领域要求
厚度 ( $\mu\text{m}$ )	< 25	过厚增强机械强度，但减少活性物质装载量；过薄增强离子传导性，但保液能力和电子绝缘性降低	厚度一般大于消费锂电隔膜
离子电导性 (S/cm)	室温下 $> 10^{-3}$	影响电池功率与能量传递，匹配锂离子电池电解液室温下的离子电导率	—
化学稳定性	高	必须耐电解液腐蚀，与正负极接触时不发生反应	—
电化学稳定性	0~4.5V (vs. $\text{Li}^+/\text{Li}$ )	要求在 0~4.5V (vs. $\text{Li}^+/\text{Li}$ ) 范围内不发生分解，保证安全性	电化学窗口大于 5V
孔隙率	40%~50%	保持足够孔隙率吸收电解液，以保证较高电导率	—
孔隙大小和分布	孔径 0.03~0.12 $\mu\text{m}$	亚微米级孔径能有效防止锂枝晶穿透；孔径适宜以平衡性能；分布均匀以改善电流密度均匀性	均匀性要求高
透气率 (s)	200~500	固定孔结构下，隔膜的透气率与电阻成正比关系	—
机械强度	高	具备一定的抗张强度和抗穿刺强度（至少为 11.8kgf/mm），提高安全性	—
润湿性	高	较好的润湿性能能够扩大隔膜与电解液的接触面，从而增加离子导电性	吸液率大于 200%
尺寸稳定性	高	被浸润时应保持平整，不能出现褶皱或扭曲现象	—
热闭合性能	低闭孔和高破裂温度	隔膜材料较低的闭孔温度和较高的破裂温度能够提升电池安全性	具有高耐热性，如 200 $^{\circ}\text{C}$ 不收缩

资料来源：《动力电池材料》，《锂离子电池隔膜技术进展》，五矿证券研究所

### 聚烯烃微孔膜及改性产品是当下主流隔膜材料

聚烯烃微孔膜是当下具备较优综合性能、并且已经大规模商业化的隔膜材料。聚烯烃能够提供良好的机械性能、化学稳定性和高温自闭性能，是当下锂电隔膜主要的原材料。隔膜成品主要包括聚丙烯（PP）、聚乙烯（PE）、PP和PE复合材料。聚烯烃微孔膜性能良好，成本低廉，因此成为3C领域以及动力场景的主流产品。

改性聚烯烃膜能够改善一般隔膜的耐热性及润湿性等，提升电池安全性，更加匹配动力锂电。PP及PE隔膜对电解质的亲和性、润湿性以及耐热性较差。采用涂覆、浸涂、喷涂、复合等工艺，通过在一般隔膜上加入或者复合具有亲液性能、耐高温性能等特性的材料，获得性能优异的改性膜，是动力领域严格要求下的材料制备趋势。尤其是随涂覆技术成熟，添加陶瓷、勃姆石等无机材料后，循环过程中发生大面积放热仍能保持隔膜完整性，增强耐热性，提升动力电池安全性，因而能够在中高端动力类持续开拓份额。

图表 113：已商业化的三种聚烯烃微孔隔膜的综合比较

隔膜材质	材质特点	生产工艺	优点	缺点	代表企业
PP	熔点：110-140℃，高密度聚乙烯可使熔点提升	溶液混合后以吹塑法或射出成型再加工	孔隙率、透气率高、机械强度高	熔点较低	东丽、旭化成、Entek、纽米科技、星源材质
PE	熔点：165-174℃，分子量	挤出成型或注塑成型再机械拉伸	材料强度好、加工范围较宽、可进行双向拉伸	在加热条件下易氧化	格瑞恩、星源材质
PP/PE/PP	结合聚烯烃各种材质的不同特性具有自关闭功能	多层共挤技术	低熔点 PE 具有热反应功能、机械性能好、兼顾安全性	PP 机 昂贵、技术难度高	Celgard、宇部、沧州明珠、纽米科技

资料来源：《锂离子电池隔膜技术研究进展》，五矿证券研究所

图表 114：通过不同的改性手段能够提升基材的综合性能

基材	改性方法	电解质类型	电导率(mS/cm)与克容量(mAh/g)	负极/正极	主要改善性能
PAN	涂覆 SiO <sub>2</sub> -MWCNT	1M LiTFS+0.1M LiNO <sub>3</sub> in DOL, DME	2.17;627(1C)	金属锂/硫	提高综合电化学性能
PE	涂覆 PI 与 PVDF-HFP/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	电解液	0.70;107.5(0.5C)	石墨/LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	提升润湿性及循环性能
PET	涂覆 ZrO <sub>2</sub> /PVDF-HFP	1M LiPF <sub>6</sub> in EC+DEC(1/1, v/v)	1.48;100(2C)	金属锂/磷酸铁锂	提升电芯性能
PE	涂覆 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1M LiPF <sub>6</sub> in EC/DEC(1/1, v/v)	~0.8;120(1C)	石墨/钴酸锂	增强水分排斥
PP	涂覆 ZrO <sub>2</sub> 和 PDA/PEI	1M LiPF <sub>6</sub> in EC/DEC/DMC(1/1, v/v)	1.61;159.4(0.1C)	金属锂/磷酸铁锂	热稳定性和低界面阻抗
PI	碱处理	1M LiPF <sub>6</sub> in EC/DEC/DMC(1/1/1, wt)	2.5;70(5C)	石墨/钴酸锂	增加锂离子迁移数
PVDF	等离子体处理	1M LiPF <sub>6</sub> in EC: DMC(1/1, w/w)	—	—	提高吸液率

资料来源：《Recent advances on separator membranes for lithium-ion battery applications: from porous membranes to solid electrolytes》，五矿证券研究所

### 基于隔膜生产工艺改进，隔膜产品性能持续升级

微孔制备技术是隔膜制备工艺的核心，美国日本技艺领先。锂电隔膜生产工艺包括原材料配方和快速配方调整、微孔制备技术、成套设备自主设计等，其中微孔制备技术是工艺核心，主要分为干法（单向和双向拉伸）和湿法工艺。海外干法单向拉伸技术工艺主要由美国 Celgard 公司研发和掌握，当下在美国和日本十分成熟；星源材质于 2008 年自主研发成功干法单向；干法双向则是由中国科学院化学所研究自主开发。湿法工艺则最早由日本旭化成提出，工艺难度大于干法，具备较高技术壁垒。

湿法隔膜与干法隔膜相比存在性能上的显著优势，随动力性能提升而发展。干法包括单向与双向拉伸，双向拉伸技术近年来被普遍采用，主要系能够显著提高薄膜的机械性能、阻隔性能、光学性能、热性能及厚度均匀性等。在动力锂电领域，对于高比能、高性能的要求随新

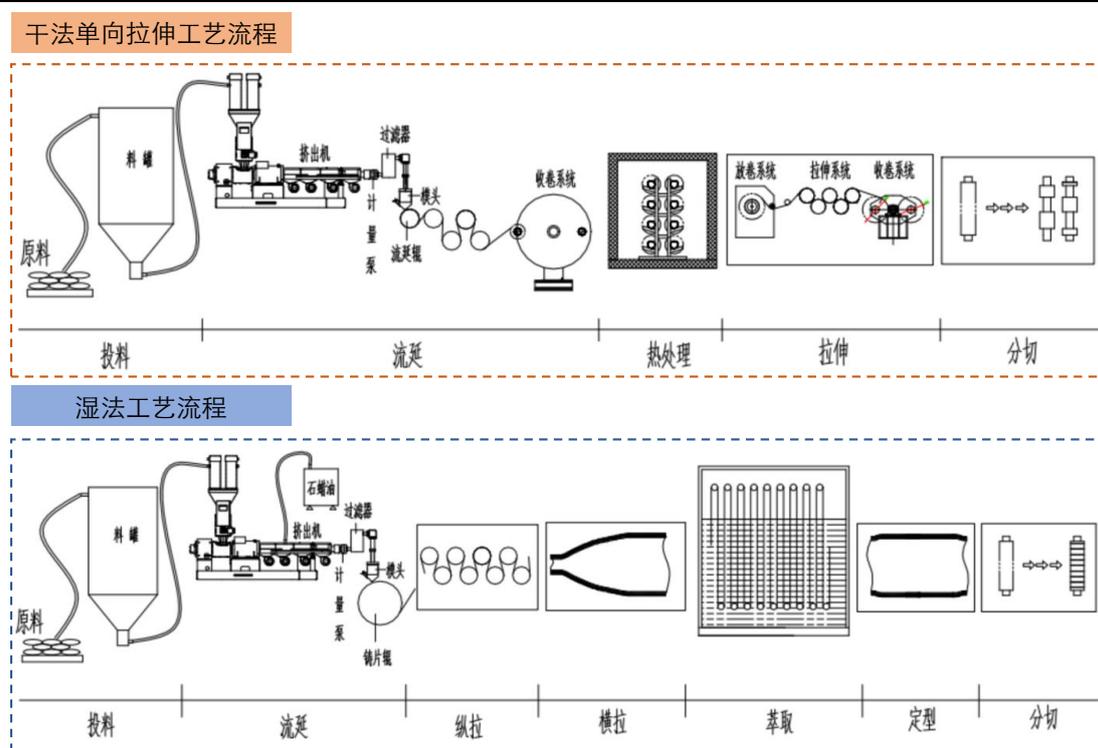
能源车发展而愈加迫切，三元正极因能够满足性能诉求，份额提升，但同时降低热稳定性和安全性。湿法工艺生产的隔膜性能优势显著，相比干法更适合生产中高端动力电池产品，因此得以跟随三元市场发展。此外，湿法技术壁垒较高，因此具备更强的溢价能力。

图表 115：干法与湿法工艺比较，湿法隔膜具备性能优势

参数	干法单向拉伸	干法双向拉伸	湿法
工艺原理	晶片分离	晶型转换	相分离
适用基本材料	单层 PP 膜、单层 PE 膜、双层膜、多层膜	较厚的单层 PP 膜	单层 PE 膜
主要工艺流程	将聚烯烃用挤出、流延制备出特殊结晶排列的高取向膜，低温下拉伸诱发微缺陷，高温下拉伸扩大微孔，经高温定型形成高晶度的微孔膜	在聚烯烃中加入成核改进剂，利用聚烯烃不同相态间的密度差异拉伸产生晶型转变，形成微孔膜	在聚烯烃中加入作为致孔剂的高沸点小分子，经加热、熔融、降温发生相分离，拉伸后用有机溶剂萃取出小分子，形成相互贯通的微孔膜
一致性	孔隙结构与厚度一致性一般		孔隙结构与厚度一致性优秀
拉伸强度	TD 方向拉伸强度 150kg/cm <sup>2</sup>		TD 方向拉伸强度 1500kg/cm <sup>2</sup>
抗穿刺强度	平均为 250gf		平均为 600gf
厚度	12-30μm		5-30μm
适用场景	铁锂等相对低端动力		高性能、高比能动力

资料来源：星源材质招股说明书，恩捷股份公司公告，五矿证券研究所

图表 116：星源材质主要产品工艺流程



资料来源：星源材质招股说明书，五矿证券研究所

**未来的隔膜形态：趋于轻薄，部分场景下将被固态电解质替代**

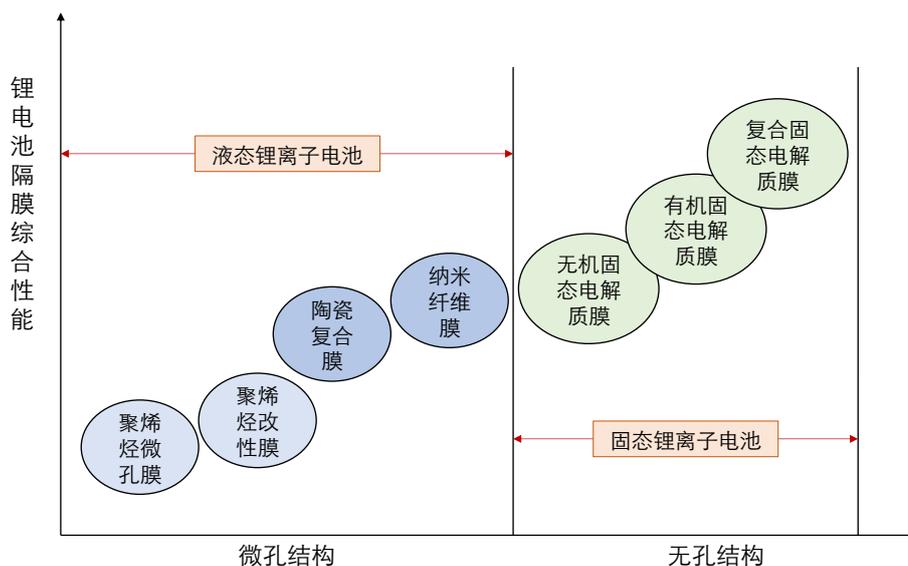
隔膜的发展趋于轻薄化，同时基体材料种类愈加丰富。1) 隔膜将进一步趋于轻薄化，以提升能量密度。但前提是不降低安全性、能够承受高倍率及高功率充放电，同时保障良好的循环

性能；2) 可选基体材料范围进一步拓宽，主要系当下 PP、PE 等主流基材在接近熔点时均会因熔化而收缩变形，无法消除安全隐患，因此需要开发进一步提升热稳定性的材料，例如复合隔膜、耐高温树脂等，为解决大功率动力类电池的安全性提供可行的解决方案。

在传统液态锂离子电池体系中，高性能隔膜的开发在于适宜的基材与改性手段。1) 无纺布隔膜采用特制纤维制作而成，具有良好的力学性能及较高的熔融温度等，与聚烯烃隔膜相比，热尺寸稳定性、安全性、浸润性、孔隙率更佳；2) 无纺布隔膜较厚，孔径大且均匀性差，抗拉伸机械强度差。通过在基材上涂覆无机陶瓷颗粒层或复合聚合物层形成复合型多层隔膜，能够改善隔膜的综合性能；3) 采用静电纺丝法制备纳米纤维膜，所制备纤维直径为纳米级（通常为 100-300nm），纤维成膜后比表面积大、孔隙率高、孔径均匀。此外，纳米纤维膜同样可以通过复合手段进一步提升性能。当下纳米纤维膜机械强度低，较难适应装配工艺，生产效率低导致成本高昂，因此，需要探索低成本耐高温树脂和工程化静电纺丝技术。

安全高性能为要义发展固态电池，终极形态中隔膜与电解液将由固态电解质替代。传统液态锂电池使用易挥发性有机电解液，存在安全隐患，全固态电池采用固态电解质，有望实现“零自燃”，提升安全性。在全固态电池中，隔膜与电解液由固态电解质替代，固态电解质承担传输离子以及分隔正负极的作用。但需注意，全固态动力电池产业化时间尚早，预计仍需 5-10 年，而混合固液体系可以改善固态电解质存在的低电导高阻抗等缺陷，因此是推进产业化的重要方向。在混合固液体系中，仍需要传统隔膜充当分隔材料。此外，锂电体系的下游场景广阔，未来技术演进并非替代关系，液态锂电将长时间存在，针对隔膜的改进仍至关重要。

图表 117：锂离子电池用隔膜/固态电解质的发展历程



资料来源：《锂离子电池隔膜技术进展》，五矿证券研究所

图表 118：两种先进隔膜的制备以及性能参数

无纺布隔膜制备及性能改善					
基材	制备方法	电解质类型	电导率(mS/cm)与克容量(mAh/g)	负极/正极	主要改善性能
PP/SiO <sub>2</sub>	熔喷	1M LiPF <sub>6</sub> in EC-DMC	4.33;152(0.2C)	金属锂/磷酸铁锂	提升电池容量
PVDF/SiO <sub>2</sub>	熔喷	1M LiPF <sub>6</sub> in EC/DMC/EMC(1:1:1)	—;170(0.2C)	金属锂/钴酸锂	提升循环性能
PVDF-	溶液浇铸至无纺布	1M LiPF <sub>6</sub> in	3.45;122(10C)	金属锂/钴酸	优异的界面相容性和容量保

HFP/SiO <sub>2</sub>		EC/DMC/EMC(1:1:1, vol)		锂	持率
PI	原位聚合与交联	1M LiPF <sub>6</sub> in EC/DMC/EMC(1:1:1, wt)	2.7;108.4	石墨/钴酸锂	内部短路保护和界面稳定
静电纺丝膜制备及性能改善					
基材	溶剂与静电纺丝环境	电解质类型	电导率(mS/cm)与克容量 (mAh/g)	负极/正极	主要改善性能
PAN	DMF, 17w t% of PAN, 13kV, 11cm, 1ml/h	1M LiPF <sub>6</sub> in EC/DMC(1:1)	0.935;154(1C)	金属锂/磷酸 铁锂	高抗拉强度、热稳定性、吸 液率、离子电导率
PAN/SiO <sub>2</sub>	DMF, 10w t% of PAN, 16kV, 25cm, 0.75ml/h	1M LiPF <sub>6</sub> in EC/DMC(1:1)	2.6;82(8C)	金属锂/磷酸 铁锂	改善电化学氧化极限、降低 界面阻抗
PVDF/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NMP/丙酮, 16w t% of PVDF	1M LiPF <sub>6</sub> in EC/DMC/DEC(1:1:1, wt)	2.23;120(0.5C)	金属锂 /LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	优异的热稳定性

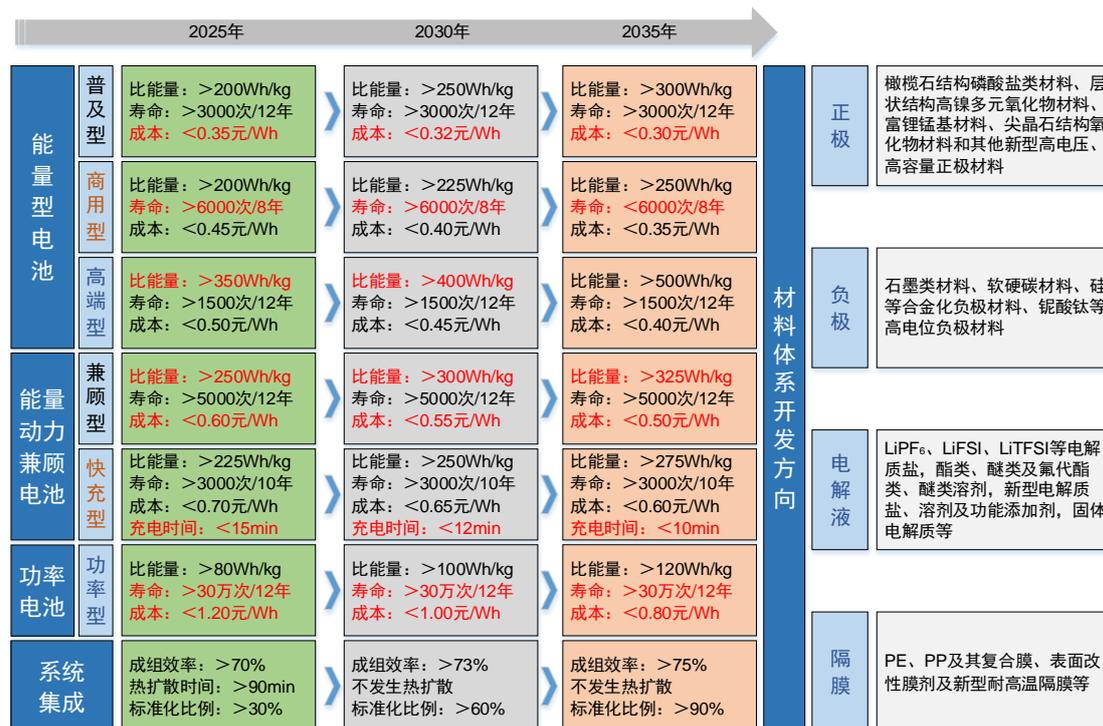
资料来源:《Recent advances on separator membranes for lithium-ion battery applications: from porous membranes to solid electrolytes》, 五矿证券研究所

## 材料从研发到商用的思考: 多样出行场景意味着多元的性能推进路径

动力电池材料的开发虽以高比能为主线, 但针对其他性能的优化是实现产业化的必要条件。能量密度的提升不仅直接推动续航的提升, 同时对于降本有重要作用, 因此是车用动力领域的关键指标与改善重心。但综观主要的正负极材料开发路线, 无论是中短期的高镍正极、硅基负极, 抑或长期革命性的无锂正极、金属锂负极, 阻碍其商用的并非是实际比能, 而是开发中遭遇的材料安全性、循环性等方面的缺陷。材料单方面突出的性能是研究的驱动力, 但综合性能的优异程度则决定其产业化进程, 因此演进过程中多性能优化不可避免。

新能源汽车需求的多样性将形成上游多元产品共存的局面, 但有主流与细分之差。据国家新能源汽车创新工程项目专家组组长王秉刚, 在 2.0 版本的动力电池技术路线图中, 不是单一的高能量密度主导, 而将跟随新能源汽车发展形成多元的电池产品, 包括能量型、能量功率兼顾型及功率型。不同的出行场景的市场规模虽有差异, 但绝对的增量较大, 电池产品的多元化有其必要性。此外还应认识到, 高能量密度与高功率快充在封闭的电池体系中往往不可兼得, 而路线图充分考虑性能的平衡, 给出不同时点不同产品对应的性能指标。合理的行业进程推演下, 材料的开发也将呈现一定的多样性, 并且对单项性能指标要求的放松也将降低研制难度, 推进材料的产业化。在此过程中, 我们预计产品格局将呈现动态的可逆性, 即多样的产品进入市场, 同时也有一定的产品退出市场, 但对于某种材料的市场份额, 并非持续的增加或减少, 可能因为关键性能的突破、或者替代材料的出现, 导致格局的变化。

图表 119：中国动力电池技术路线图 2.0 版本不再一味追求能量密度，将充分考虑市场需求的多样性



资料来源：《节能与新能源汽车技术路线图(2.0版)》，五矿证券研究所

### 钠离子电池：性能比肩铁锂，或将在低速动力等场景规模导入

钠资源储量丰富的属性使其成为关键的电化学储能技术之一，且性能指标并不完全弱于锂离子电池，将是未来重要的产业化方向。钠离子电池的工作原理与锂离子电池相似，相关研究可以追溯至 20 世纪 70 年代。因锂离子电池产业化突破，消费及动力领域推动其快速增长，但随电化学储能场景不断丰富，全球锂资源供应的紧缺及不均匀性将是锂电池发展面临的重要课题。钠资源的地壳丰度是锂的 1000 倍，尽管理论比能劣于高端锂电体系，但与低端铁锂相近，足以成为大规模储能领域的战略补充技术。此外，钠电池在低温性能、快充以及环境的适应性等方面拥有独特的优势，并且基本可沿用锂电工艺，具备一定的产业竞争力。

宁德时代发布第一代钠离子电池，未来有望在低速动力及储能等场景对部分锂离子电池形成替代。宁德时代于 2021 年 7 月 29 日发布第一代钠离子电池，单体能量密度达到 160Wh/kg，是当下全球钠离子产业化最高水平。此外，在快充性能、高低温稳定性、系统集成效率方面可媲美锂离子电池。通过与锂离子电池集成混用形成动力电池系统，可以取长补短，增强产品力。尽管当下钠电池体系比能较低，但预计未来有望突破 200Wh/kg，我们认为，未来产业化的钠离子电池将具备替代低端锂电的实力，或将在低速动力及储能领域规模导入。

图表 120：铅酸电池、锂离子电池与钠离子电池性能对比，锂离子电池具备比能优势，钠离子电池具备原料成本竞争力

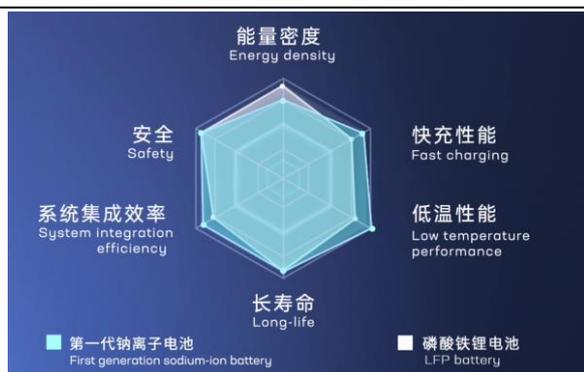
类型	指标	铅酸电池	锂离子液态电池 (磷酸铁锂/石墨体系)	钠离子液态电池 (铜基氧化物/煤基碳体系)
材料体系	正极	PbO <sub>2</sub>	LFP	铜基氧化物
	负极	Pb	石墨	硬碳等
	电解质	稀硫酸	有机电解质 (六氟磷酸锂为主要锂盐)	有机电解质 (六氟磷酸钠为主要锂盐)
	隔膜	微孔塑料/玻璃纤维板等	聚烯烃微孔膜等	聚烯烃微孔膜等

集流体	铝合金板栅	正极：铝箔；负极：铜箔	正负极均为铝箔
生产工艺	成熟	成熟	可沿用锂电设备 (因材料特性可能需额外的处理与控制)
性能参数			
理论比能量 (Wh/kg) ①	170	250	220
质量能量密度 (Wh/kg) ①	30-50	120-180	100-150
体积能量密度 (Wh/L) ①	60-100	200-350	180-280
单位能量原料成本 (元/Wh) ②③	0.40	0.43	0.29
循环寿命①	300-500 次	3000 次以上	2000 次以上
平均工作电压 (V) ①	2.0	3.2	3.2
-20℃容量保持率	小于 60%	小于 70%	88%以上
耐过放电	差	差	可放电至 0V
安全性	优	优	优
环保特性	差	优	优

说明：①单体电芯的对应值；②仅考虑原材料成本，包括正极、负极、电解液、隔膜和其他装配物件；③若考虑回收，铅酸电池原材料成本约 0.2 元/Wh

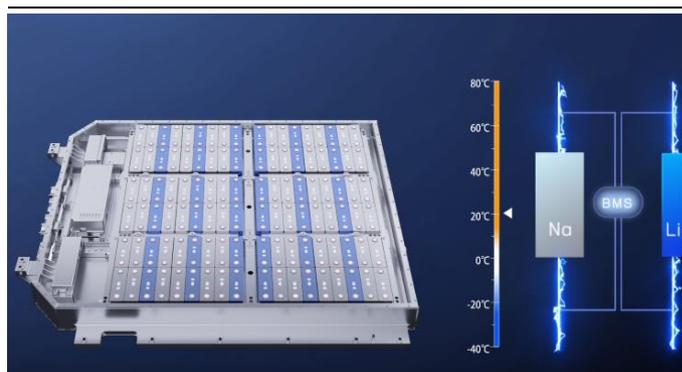
资料来源：《钠离子电池：从基础研究到工程化探索》，《化学电源—电池原理及制造技术》，五矿证券研究所

图表 121：宁德时代第一代钠离子电池在部分性能上优于铁锂



资料来源：宁德时代官网，五矿证券研究所

图表 122：钠离子与锂离子电池的集成混合共用方案有助于取长补短



资料来源：宁德时代官网，五矿证券研究所

图表 123：全球主要钠离子电池生产厂家产品性能对比

企业	国家	电池体系	性能参数	路线优势	路线缺陷
宁德时代	中国	普鲁士白正极/硬碳负极的新型电解液体系	能量密度 160Wh/kg；常温下充电 15 分钟电量可达 80%；-20℃下具有 90%以上的放电保持率	安全性高、系统集成效率达到 80%以上	能量密度略低于当下铁锂电池
中科海钠	中国	铜层状氧化物/煤基碳的有机电解液体系	能量密度 145Wh/kg，4500 次循环容量保持率 83%	与现有锂离子电池生产工艺兼容、原材料成本低廉	有机体系存在安全隐患
钠创新能源	中国	镍层状氧化物/硬碳的有机电解液体系软包电池	能量密度 120Wh/kg，3000 次循环容量保持率 80% 以上	与现有锂离子电池生产工艺兼容	成本优势不明显，有机体系存在安全隐患
Faradion	英国	镍层状氧化物/硬碳的有机电解液体系	能量密度 150-160Wh/kg，80%DOD 循环寿命 1000 次	与现有锂离子电池生产工艺兼容	成本优势不明显，有机体系存在安全隐患
Tiamat	法国	氟磷酸钒钠/硬碳的有机电解液体系	能量密度 90Wh/kg，1C 倍率 4000 次循环容量保持率 80%	与现有锂离子电池生产工艺兼容	氟和钒元素有毒性、成本较高、存在安全隐患
Natron Energy	美国	普鲁士蓝水系电解液体系	能量密度 50Wh/L，2C 循环 10000 次	水系电解液安全性高、高倍率性能优异	能量密度低、生产工艺复杂
Altris	瑞典	普鲁士蓝/生物质硬碳	正极容量 160mAh/g，平均电压 3.25V，25 次循环容	成本与安全性优势	能量密度低

的无氟不可燃电解液 量保持率 94%  
体系

资料来源：各公司官网，中科院物理研究所，中国储能网，五矿证券研究所

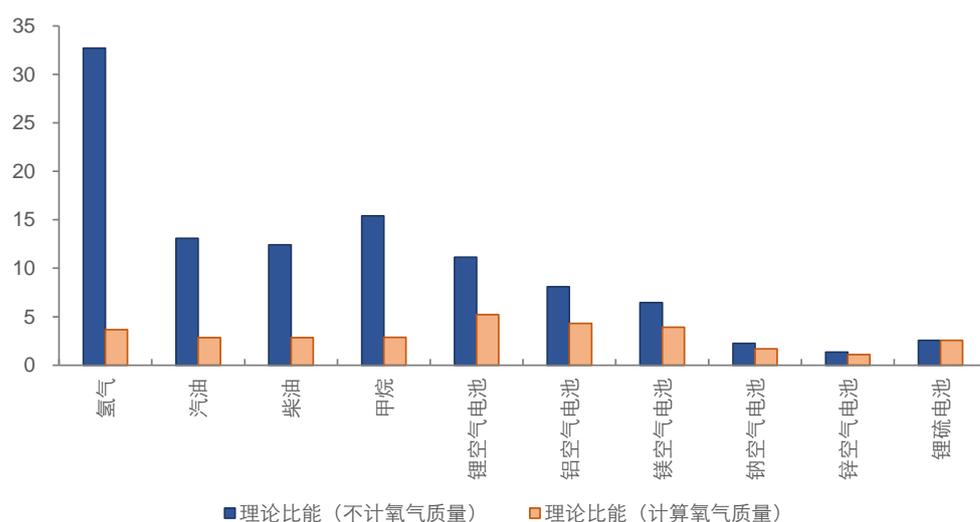
### 燃料电池：高能环保的终极形态，成本等限制短期发展，未来商用领域大有可为

燃料电池能量转化效率高、对环境友好，是具有发展前景的电化学发电技术。燃料电池通常以氢气、甲醇等燃料作为负极，氧气为正极，构成能量转换装置，因不受卡诺循环限制，能量转化效率高。当以氢气作为负极时，氢燃料电池体系的理论能量密度为各类高能电化学储能体系中的最佳，可达 32.7kWh/kg。此外，氢燃料电池对环境友好，原料获取来源广泛等优势，因此具备较好的商业化应用前景。

燃料电池内部体系多元，其中质子交换膜燃料电池（PEMFC）更靠近动力商用。根据工作温度、电池内载流子和前端燃料的不同，燃料电池可细分为质子交换膜电池、固体氧化物电池、熔融碳酸盐电池、磷酸盐电池、碱性电池和直接甲醇电池等。各类技术中，综合考虑工作温度、催化剂稳定性、电效率、功率密度等技术指标，PEMFC 因工作温度低、启动快、结构简单等优点，被公认为电动汽车、固定发电站的首选燃料电池技术。

燃料电池产业化仍面临成本高昂、配套滞后等难题，未来有望在商用车及工业场景持续导入。尽管燃料电池具备高比能、对环境友好、补给速度快等优势，是理想动力源的终极形态，但当下燃料电池技术仍待持续降本增效、配套基础设施（如加氢站、储氢运氢设备等）成本高昂，限制燃料电池动力场景的发展。此外据大众测算，电池驱动下汽车动力效率在 70% 以上，而氢动力电动车的效率仅为 25%~35%。我们认为，动力领域中，因商用车常要求长续航、快速能量加注，与燃料电池适配性高，未来燃料电池商用车有望通过示范项目突围，开拓细分市场。此外，随产业配套成熟度提升，在航运业、工业领域等场景也有望得到规模应用。

图表 124：多种一次/二次储能体系的理论能量密度（kWh/kg）



资料来源：《化学电源-电池原理及制造技术》，Neutrium，五矿证券研究所

图表 125：主要燃料电池类型的性能参数与应用范围

项目	质子交换膜电池 (PEMFC)	固体氧化物电池 (SOFC)	熔融碳酸盐电池 (MCFC)	磷酸盐电池 (PAFC)	碱性电池 (AFC)	直接甲醇电池 (DMFC)
电解质	固体质子交换膜	氧化钇掺杂稳定的氧化	熔融偏铝酸盐-碳酸盐	磷酸	氢氧化钾溶	固体质子交换膜

	固	液	液	液	液	液
燃料	氢气	氢气、天然气	氢气、天然气	氢气	氢气	甲醇
载离子	氢离子	氢离子	碳酸根	氢离子	氢氧根	氢离子
温度/°C	60-80	800-1000	600-700	160-220	0-230	室温-110
电效率/%	40-60	55-65	55-65	36-45	60-70	35-60
优势	工作温度低、比功率高、启动快、结构简单、操作方便	高温加快反应、催化剂非贵金属、提供高质余热	高温反应快、燃料纯度要求低、催化剂非贵金属、易操作	对杂质耐受性强、电解质挥发度低、稳定、构造简单	应用低价金属的潜力	结构简单、体积比能量高、启动时间短、运行可靠性高
劣势	水和热管理问题、催化剂 Pt 昂贵、CO 降低电极性能	启动时间长、电极材料成本高	高温下液体电解质管理困难、腐蚀和渗漏	电效率较低、加热时间较长、催化剂 Pt 昂贵	杂质敏感性高	阳极催化剂活性差、阳极催化层分流问题
应用范围	备用及移动电源、分布式发电、车辆	辅助电源、电力公司、分布式发电	分布式发电、电力公司	公共汽车、分布式发电	太空	便携移动电源、固定发电设备

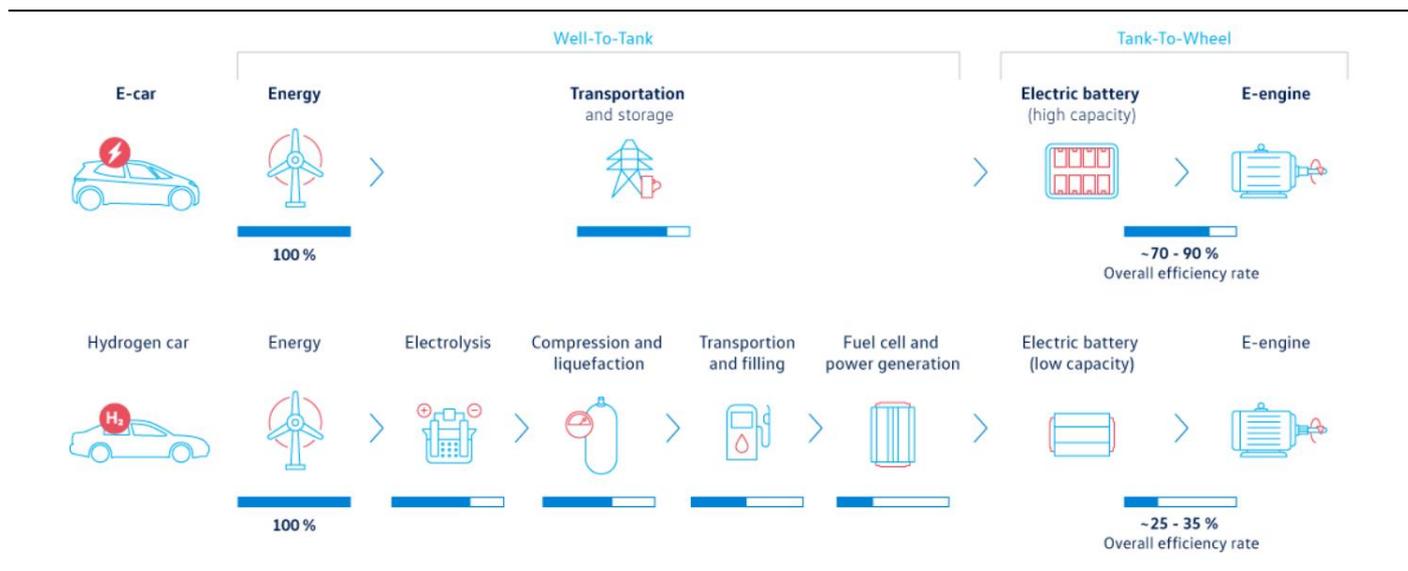
资料来源：中国科学院《燃料电池行业基本情况调研报告》，五矿证券研究所

图表 126：氢燃料电池与锂电池相比存在的优势

性能指标	氢燃料电池	锂电池
续航里程	续航里程均超过 500km	低端集中在 150-300km
安全性	易燃不易爆，相对安全	易燃烧，安全性低
低温性	耐低温性强，可以在-30~40°C内运行	低温下电池容量下降迅速，内阻快速上升
补给时间	不及时剪短，直接加氢，3-5 分钟	一般慢充需 3-8 小时不等
污染程度	不会造成污染	锂离子电池需要进行回收处理防止金属污染和浪费

资料来源：包商研究院《“从 0 到 1”——探寻氢燃料电池汽车行业》，五矿证券研究所

图表 127：根据大众测算，电池驱动下汽车动力效率在 70%以上，而氢动力电动车的效率仅 25%~35%



资料来源：大众官网，五矿证券研究所

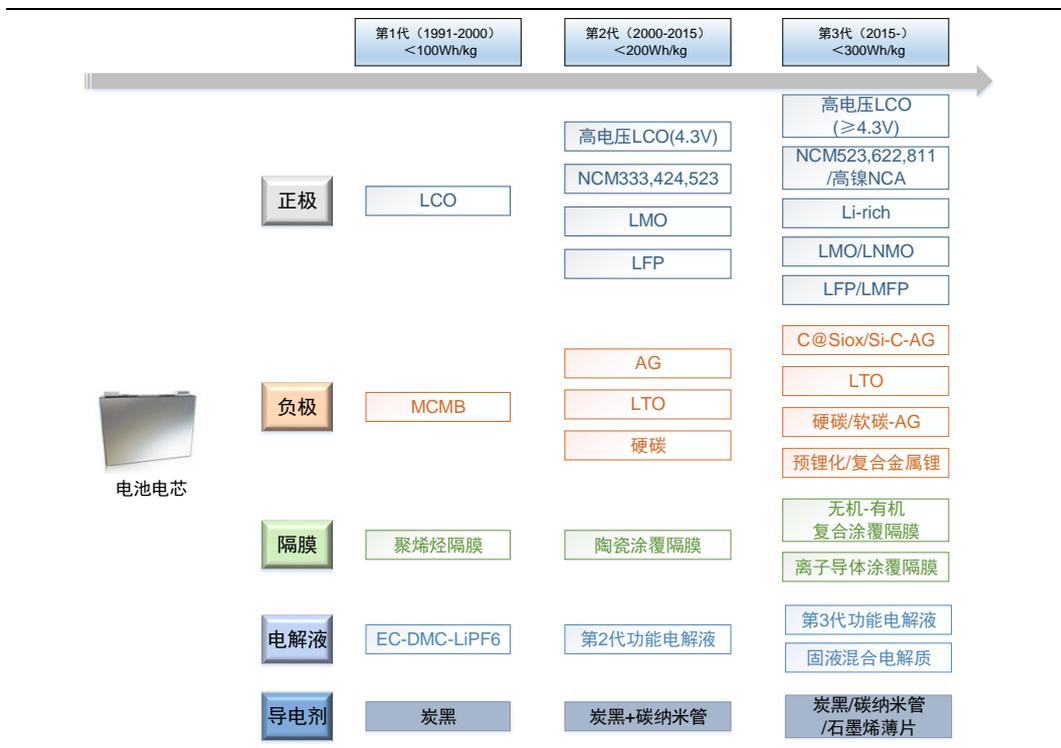
## 材料到电芯：细节精益求精，体系紧扣实际

基于成熟且复杂的电芯设计及制造工艺，我们认为考虑技术适配程度下每一工序的价值优化

是未来的主要理念。渐进式的材料体系演进下改动预计较小，而革命式的材料体系导入则可能因某组分的较大变动而影响工艺流程。如固态电池体系中因无需使用液态电解质，其外壳与组装工艺将得到简化，进而降低成本。但需注意，快速颠覆传统工艺的可能性较小，渐进的优化依然是主旋律。各工序的价值优化是主要策略，重点关注两个方面：

- 先进材料的产业化“最后一公里”是与其他组分的匹配性。正负极材料性能的改善固然重要，但仍不能忽略其他组分对体系的影响。电解质、隔膜、导电剂等的选择基于与正负极材料的界面兼容程度及材料本身性能优劣。如传统碳酸酯类电解液在超过 4.5V 后产生分解，降低电池性能，无法匹配高电压正极，需通过提升溶剂和锂盐的抗氧化能力等方式提高电解液高压特性。因此，这也正呼应上文提及的正负极演进体系，性能潜力较大的材料如尖晶石镍锰酸锂，高电压特性同时要求开发合适的电解质，因此一定程度拉长开发周期，增加产业化难度；
- 电芯的制造环节优化旨在高效产出高质产品，但技术的改进要考虑系统适配性。材料的开发匹配之后，进入电芯制造环节，这是动力电池系统工艺的核心，涉及的每道工序均需严格管控，以提升产品合格率、提高产品质量。通过对每一个细节的改善，目的不仅在于提效，还在于降本，更在于材料体系更替进程中的兼容性，如特斯拉干电极技术导入锂电芯制备工艺的尝试便有相关理念体现。工艺技术的开发尤为重要的是需考虑与现有产线的匹配性，更快的导入不仅能够更好的反映为产品价值的提升，而且有利形成先发优势获得溢价。例如，在电芯封装工序中根据外壳类型有卷绕与叠片两种路径，卷绕工艺因生产控制相对简单而被广泛应用，叠片使电芯性能的提升程度较高，但受制于操作难度、设备先进性不足等，导入进展相对缓慢。

图表 128：材料到电芯的关键在于，组合后材料之间能够较好匹配，保持良好性能



资料来源：《Practical evaluation of energy densities for sulfide solid-state batteries》，五矿证券研究所

## 每一生产环节是“与”门的构成，乘数放大基于严格标准

对工艺的高标准要求是生产高质量电池产品的必要条件。在生产过程中涉及繁冗的工序，各

个环节采用更先进的设备、更严格的参数把控，有利于提升产品良率，增加经济效益，甚至形成产品溢价。但如果放松要求，任一环节的管理出现问题，都将显著影响产品质量。因此，各个环节的联系与电路中的“与”门相当，需要同时管控，在严格的标准之下方能体现乘数放大效应，各环节积累的品控最终将形成电池的产品力。

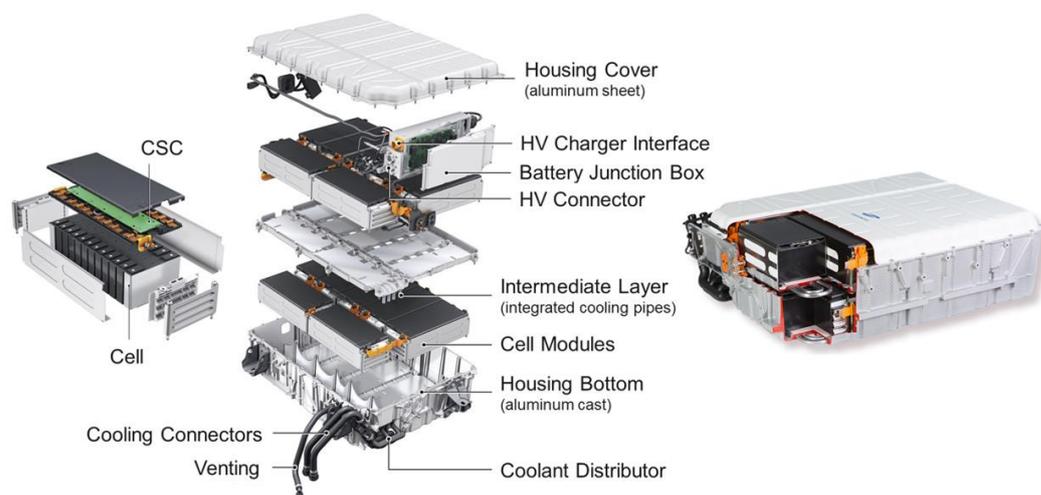
### 工艺精进是非活性材料体系外，渐进集约化的性能提升抓手

电池工艺的改进是提升能量密度、降低成本的重要方式。材料更新、改性使电芯能量密度逐渐接近理论上限，而性能改善更加困难，因此针对电池的整体工艺上的改进显得愈加重要。通过改善电池制造环节来提升性能的理念更加清晰，即减少用料及辅件、提高空间利用率等，能够降低成本并增加动力电池系统能量密度。

动力电池 Pack 由多系统构成，其中核心的动力电池包成组效率低、硬件成本占比大。汽车用动力电池 Pack 总成主要由动力电池包、结构系统、电气系统、热管理系统及电池管理系统组成。因容量功率要求，需要开展电池组装，一般为多电芯形成模组、多模组形成电池包的模式。当下传统的动力电池电芯到模组的成组效率在 80% 左右，从模组到电池包的成组效率为 50% 左右，因此电芯到电池包的成组效率仅有 40%。根据成本测算，电池包中的硬件成本占比仅次于电芯材料，如三元 523 电池包的模组及 Pack 硬件成本占比约 23%。

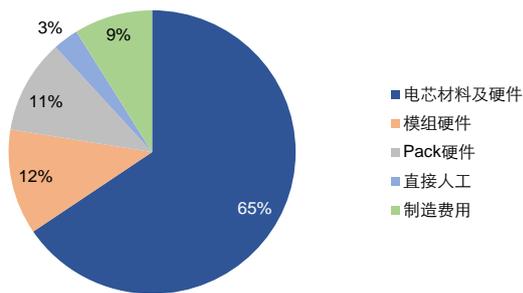
严格管控电池制造的每一环节，持续优化，以形成优质的电池产品。1) 每一环节都应严格管控：CATL 展示的从电芯、模组到电池包的制作及组装流程体现了产品复杂的制造工艺以及繁杂的工序，任一环节出现问题都将影响性能或带来安全问题；2) 对制造环节应精益求精：从选材到制作，再到测试，最终完成组装，各个环节相互衔接，均有优化的空间。目的是提升生产效率与产品性能，可以通过简化环节、设备改进等方式实现。

图表 129：奥迪 Q7 e-tron 动力电池系统结构拆分



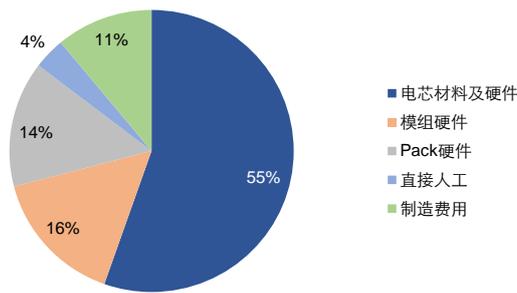
资料来源：Hannovermesse, 五矿证券研究所

图表 130: NCM523 电池包成本构成



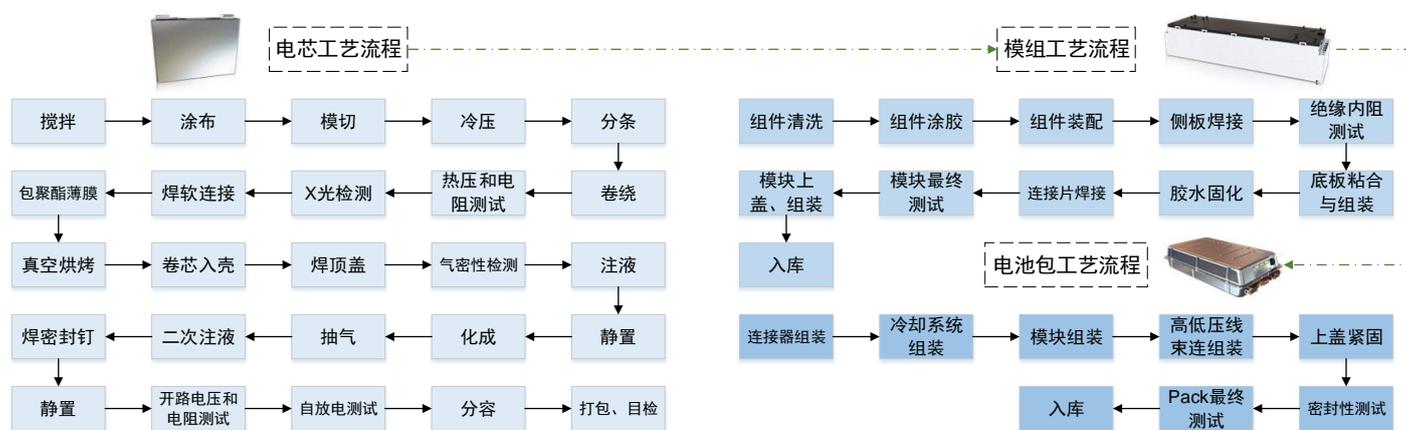
资料来源: 鑫椏资讯, 五矿证券研究所测算

图表 131: LFP 电池包成本构成



资料来源: 鑫椏资讯, 五矿证券研究所测算

图表 132: CATL 展示的动力电池产品工艺流程



资料来源: CATL 招股说明书, 五矿证券研究所

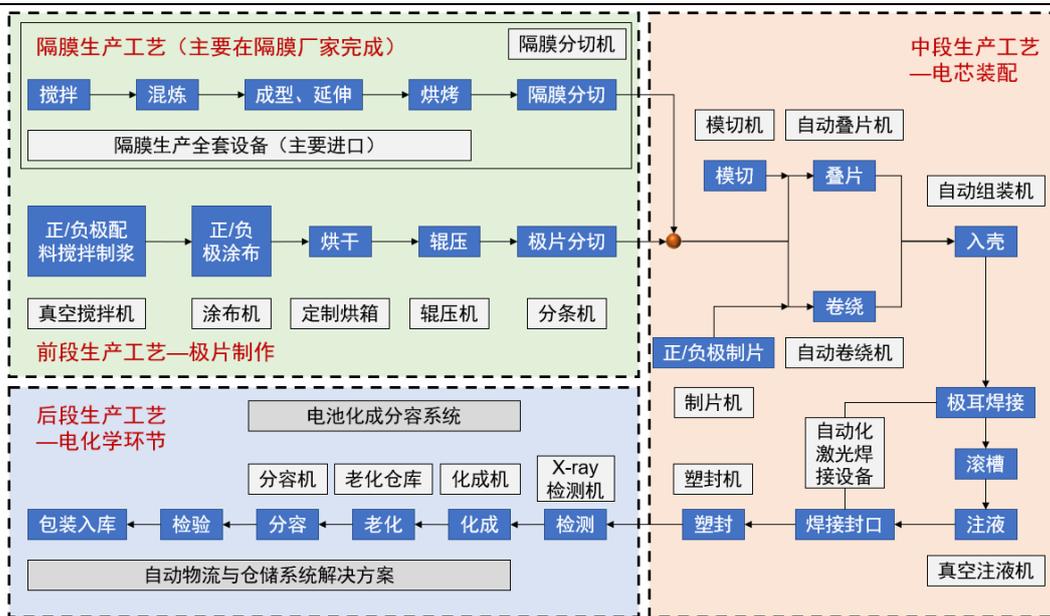
### 电芯生产全环节有着高环境要求, 追求精密优质高效

电芯制造是动力电池工艺的核心, 目标在于生产高一致性高质量的产品。从材料到电芯的生产环节是动力电池工艺的重中之重, 所需要的制造装备是动力电池工艺的核心, 每道工序均需严格管控, 目的在于高效生产更高质量、一致性强的电芯产品。电芯制造工艺主要分为前中后三段:

- 前段极片制作流程: 高环境要求, 涂布至关重要。包括搅拌、涂布、辊压、分切等工序, 是锂离子电池制造的基础。CATL 的生产环境控温、控湿、无尘, 可以媲美半导体微电子的制造环境, 能够满足全流程对设备性能、精度、稳定性、自动化水平和生产效能等方面的高要求。在各环节中, 涂布是关键工序, 主要是将搅拌后的浆料均匀地涂在金属箔片上并烘干成正、负极片。涂布机作为前段核心设备, 涂布速度、涂布重量与厚度的一致性、涂层与基层的粘接性都是影响电芯性能的重要指标;
- 中段电芯装配流程: 保障产品性能的关键环节, 可采用卷绕或叠片工艺。中段对精度、效率、一致性要求较高, 根据装配方式的不同, 可分为卷绕或者叠片工艺。对比来看, 卷绕工艺下电芯制作更易规模化生产, 而叠片工艺下电芯综合性能更佳。工序的严格管控, 不仅保证产品质量, 还保障安全性: 如圆柱电池卷绕过程中负极极片必须完全包覆正极极片, 否则循环过程中会产生析锂现象, 可能导致内部短路, 电池失效起火爆炸。
- 后段筛选封装流程: 保证产品一致性, 形成合格电芯。后段是电化学环节, 主要包括电芯化成、分容、检测及封装等。通过对单电芯进行充电、测试等, 进行数据筛选, 剔除

电压、内阻、容量等参数异常的电芯，易于选取合适的电芯串联或并联搭配。检测时的环境指标控制要求精准，开展严格的筛选，防止不合格电芯出厂。

图表 133：动力电池制造工艺全流程及各工序所需设备



资料来源：《2018年动力电池制造装备产业发展报告》，五矿证券研究所

### 小细节中的大价值：特斯拉干电极技术的启示

干电极技术的引入，既体现对现有体系持续降本增效的诉求，更有适应下一代体系的考量。特斯拉于2019年2月宣布拟斥资2.18亿美元收购Maxwell，该企业的核心技术之一为干电极技术。干电极工艺是对极片制作中的涂布环节所作的创新，有别于湿法涂布，采用干法涂布制作成品电极。与湿法工艺相比，可见的变化在于节省用料、提高电极压实密度，从而降低成本、提升比能。但Maxwell的技术不止于此，考量更加长远，希望赋予技术更持久的生命力。干电极的生产工艺体现出对电极材料的包容性，能够更好的与高镍正极、硅基负极匹配，并且适应固态电池体系，因此可作为下一代电池体系的技术储备。

传统湿法涂布不环保且需要昂贵设备，干电极技术去除溶剂，简化涂布工艺。涂布工序即通过涂布机，将浆料均匀涂布在导流体金属箔材正反面，使得正极浆料涂覆于铝箔，负极浆料涂覆于铜箔。涂布方式的选择和参数的控制（干燥温度、厚度、面密度、尺寸等）将影响到电芯的容量、一致性及安全性。传统湿法涂布通常采用NMP等具有粘合剂的溶剂，混合电极粉末后涂覆在集电体上。溶剂有毒不环保且提升回收难度，并且需要配备昂贵的电极涂布机。Maxwell的干电极工艺则采用PTFE粘结剂（质量占比5%-8%）与电极粉末混合，通过挤出机形成电极薄膜，随后利用压延机热压成型，省去溶剂、简化工序（涂布、烘干等）。

干电极技术因拥有以下优势而具备替代传统湿法的潜力：

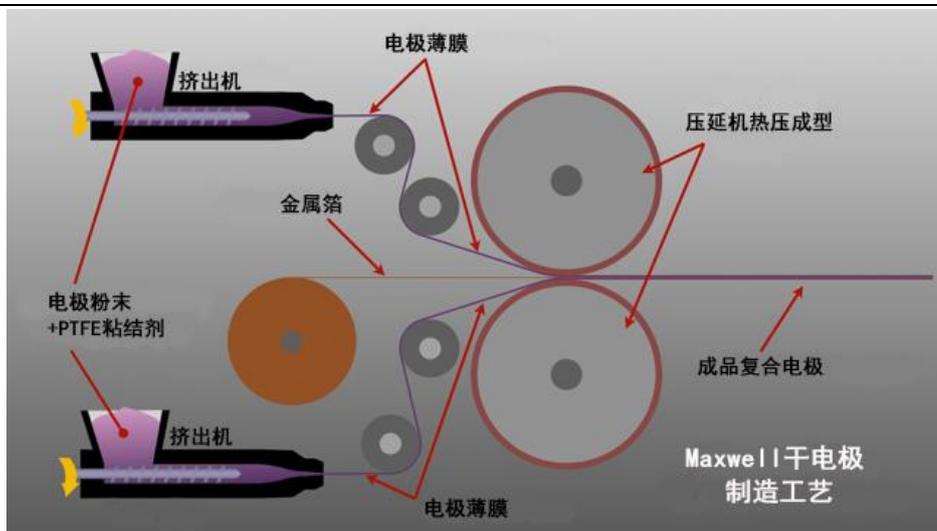
- 成本较湿法有10%-20%左右的下降空间：干电极技术省去溶剂，并且不需要涂布、极片烘干工序，因此有助于优化制造工艺，理论上成本可下降10%-20%左右。但实际产业化过程中仍需要进行成本调整；
- 能够提升电池性能：在能量密度方面，主要是具备两种优势而能够使性能提升，第一是干电极具备更高的压实密度，能够容纳更多活性物质；第二是更易于负极补锂，通过干电极法补锂可以减少首次循环容量损失，主要系有溶剂情况下负极金属锂与石墨无法较

好融合。公司已实现 300Wh/kg 的水平，目标是提升到 500Wh/kg 以上。循环寿命方面，补锂的引入同时意味着电池寿命的增加，可将 2 倍以上寿命的提高；

- 是可以匹配下一代材料体系的工艺：正极方面，传统工艺下浆料为管道运输，易团聚，而高镍正极对环境湿度及粘结剂较敏感，因此影响性能及产出，干电极能够较好解决面临的问题，适配高镍；负极方面，干电极技术对于硅基负极的体系膨胀的承受能力更强，且适宜为硅基负极实现预锂化；干电极也是固态电池制造工艺的储备之一。

干电极导入锂离子电池制造工艺尚需时日。1) 干电极首先应用在超级电容，而导入锂离子电池存在技术难度，主要系超级电容使用的活性炭比表面积大，粘性好，对粘结度要求不高，但锂离子电池正负极比表面积较小，并且嵌锂后体积膨胀造成粉体脱落，因此要求更高的粘结度，但目前制作的极片容易脱粉，倍率性能较差；2) 干法与湿法涂覆电极的工艺流程不同，干法虽简化工艺，但需要开发差异化设备，量产技术也有待提升，因此也带来导入上的阻碍。

图表 134：特斯拉公司 Maxwell 的干电极制造工艺



资料来源：Seeking Alpha，微信公众号-Astroys，五矿证券研究所

图表 135：Maxwell 的干电极技术具备较强的竞争力，能够降本增效，更加适配下一代材料体系

	<p><b>能量密度</b> 已实现 &gt;300Wh/kg，未来致力于提升至 &gt;500Wh/kg</p>
	<p><b>延长电池寿命</b> 提高耐久性；将电池寿命延长 2 倍</p>
	<p><b>成本降低</b> 产能密度提升 16 倍；与先进湿法相比，成本下降 10%-20%+</p>
	<p><b>技术支持与环境责任</b> 无需溶剂，适用下一代材料，匹配无钴，固态等技术</p>

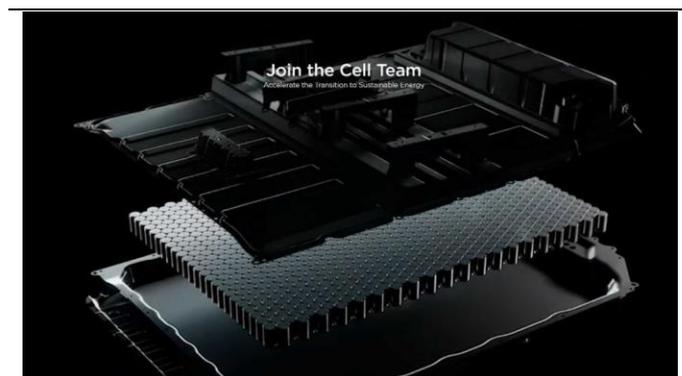
资料来源：Maxwell，五矿证券研究所

## 大体系中的充分竞争：电池封表演进下的格局之变

未来方形、圆柱及软包三种构型仍将长期共存，但创新设计将造成分化，看好方形产品的全球突围。圆柱电芯的核心优势在于标准化连续生产，能够满足特斯拉快速扩产的需求，在锂电工艺未获革命性进展的前提下，特斯拉采取适当增大圆柱电芯体积的方式提升容量，是值得借鉴的产业创新模式。我们预计特斯拉 4680 电芯的量产或将促进行业积极开发圆柱产品，中国的部分企业已经开始跟进（比克已发布 4680 电池）。但长期看，我们认为方形产品在迈向纯电驱动时代的过程中将更受青睐，主要系：

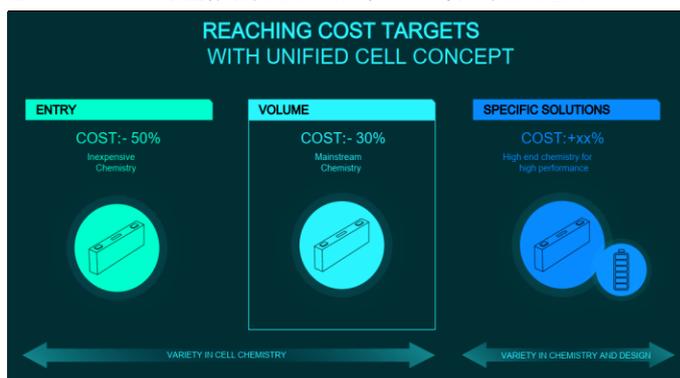
- 提升续航的主要思路是做大电芯，而方形相比圆柱和软包，极限创新空间大，适合纯电驱动迭代升级；
- 日本前期发展混动，因圆柱工艺成熟、充放电倍率优异而成为主要配套构型，但随着物理尺寸增加，循环寿命和倍率等性能不可避免将下降；
- 高度集成对软包不友好，前期 cell to module 时期软包对外壳结构件的减重优势突出，但 CTP 甚至未来 CTC 技术的演进需要坚实结构件支撑电芯，成为软包发展的掣肘，软包在高度集成时代需要开展轻量化设计的创新。

图表 136：特斯拉展示由 960 个 4680 电芯组成的电池包



资料来源：insideevs，五矿证券研究所

图表 137：大众推出标准化电芯，预计 2030 年内部占比达到 80%



资料来源：大众官网，五矿证券研究所

## 不同封装工艺存在性能和应用潜力的差异

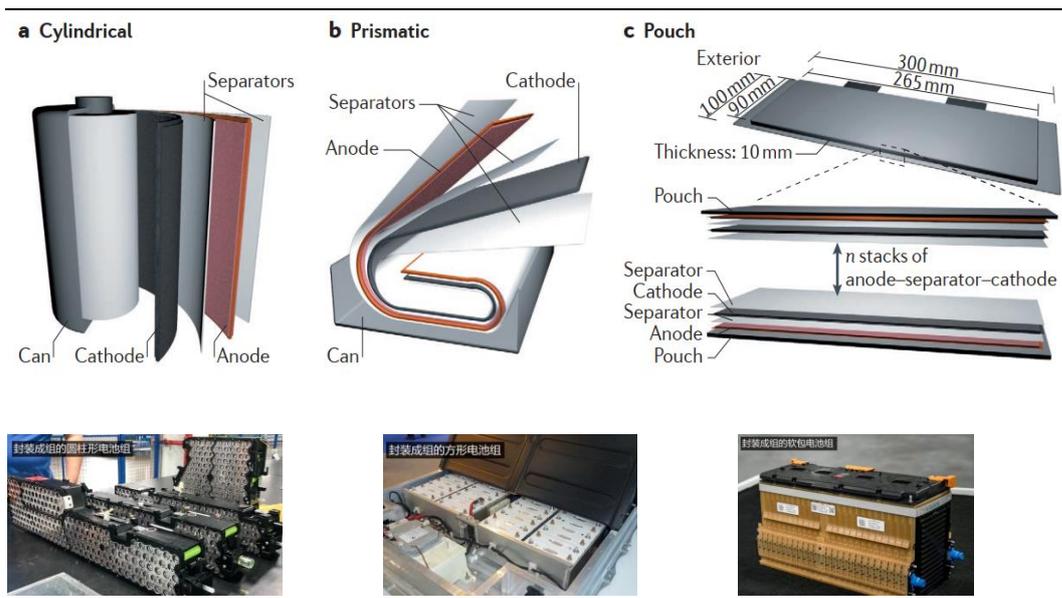
根据封装形式的不同，可将动力锂电分为圆柱、方形和软包三类。不同的封装结构将使电池的性能产生差异，三种类型各有优劣，也逐渐随动力领域的发展产生分化：

- 圆柱电池：工艺成熟，标准化程度高。圆柱电池的发展时间长，最早是由索尼公司于 1992 年发明的 18650 圆柱电池（直径：18mm，长度：65mm），诞生至今形成较强的竞争力，采用成熟的卷绕工艺，自动化程度高、产品一致性强、成本相对较低。在消费电子领域的技术验证使其在动力领域发展初期得到应用，特斯拉采用圆柱电池，并朝大型化升级（18650→21700→46800）。圆柱电池的应用也使车辆能够采用成本较低的风冷技术，主要系封包时电池之间具有较好的散热空间。圆柱电池的劣势在于，空间利用率低且径向导热差、卷绕圈数不能过多因此单体容量小，动力领域需要将上千枚单体电池进行组装，电池管理要求高；此外采用钢壳使重量较大，导致比能较低；
- 方形电池：工艺简单，中国普及率高。方形电池的结构和生产工艺相对简单，壳体为铝壳或钢壳（中国铝壳为主），因整体附件质量较轻，能量密度优于圆柱。方形电池制作主要采用卷绕或叠片工艺。中国主流的动力电池企业以生产方形为主，据高工锂电，2020 年方形电池出货量约 64.6GWh，市占率达 80.8%，是普及率最高的电池类型。但方形

电池因可以根据产品尺寸进行定制化生产，因此造成型号较多、工艺较难统一的问题。对于需要多只单体串并联的动力产品，标准化的要求也是方形电池需要改善的方面。

- **软包电池：**纤薄化带来更高比能，但也使强度较差。软包电池采用叠片工艺，与其他类型相比，最大的不同在于采用软包装材料（铝塑复合膜），是软包电池中技术难度较大的组分。软包装材料一般分为外阻层（尼龙 BOPA 或 PET 等构成）、阻透层（中间层铝箔）和内层（多功能高阻隔层）。纤薄化的设计也使其具有较高的能量密度，并且增加了布局的灵活性。此外，软包电池发生安全问题时通常会鼓气裂开，安全性能好。软包的循环性能好，100 次循环衰减较铝壳少 4%-7%；设计灵活，可根据需求定制。但软包的一致性较差、成本较高、易漏液，性能需要持续改善。

图表 138：主流的动力电池产品具有三种不同的封装形式：圆柱、方形、软包，及其相应的电池组实物图



资料来源：Nature Reviews Materials, 旺材锂电, 五矿证券研究所

图表 139：不同封装形式的电池类型各有优缺点

项目	软包电池	方形电池	圆柱电池
壳体	铝塑膜	钢壳或铝壳	钢壳或铝壳
制造工艺	方形叠片	方形卷绕	圆柱卷绕
能量密度	高	中	中
成组效率	中	高	中
安全性	好	差	中
生产效率	低	中	高
标准化程度	低	低	高
一致性	低	低	高
充放电倍率	高	中	低
代表车型	日产 Leaf	宝马 i3	特斯拉 Model 3
优势	能量密度高、安全性能好、重量轻、外形设计灵活	对电芯保护作用强、成组效率高	生产工艺成熟、电池包成本低、一致性高
劣势	成本高、一致性差、制造工艺要求高	整体重、一致性差、型号多	整体重、成组效率低

资料来源：孚能科技招股说明书, GGII, 五矿证券研究所

### 封装的核心工序：卷绕更贴合实际，叠片代表高性能的未来

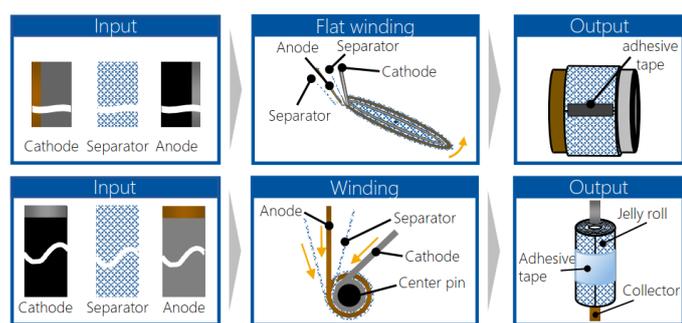
不同的封装形式意味着核心制造工艺的差异化，形成卷绕和叠片两种技术。圆柱电池通常采用卷绕工艺制作而成，软包电池则需应用叠片工艺，方形电池两种工艺皆可（当下主要为卷绕）。1) 卷绕是将制片工序或收卷式模切机制作的极片卷绕成电芯，原材料按照负极、隔膜、正极、隔膜的顺序进行卷绕；2) 叠片是将模切工序中制作的单体极片叠成电芯，例如典型的“Z”字形叠片，正负极分别叠在隔膜两面，隔膜以“Z”字形穿行其间而隔开两极。

卷绕和叠片的工艺环节存在差异，使工艺更换将涉及产线的更新与再投资。电芯在卷绕或叠片前都需要经历搅拌、涂布、辊压等环节，核心差异在于：1) 卷绕工艺需要应用制片机和卷绕机，制片是卷绕前一道工序，包括对分切后的极片焊接极耳、贴保护胶纸、极耳包胶等；2) 叠片工艺主要需采用模切机与叠片机，叠片之前先进行模切，将分切后的涂布的极片冲切成型。工序的差异带来设备不同，工艺的更换意味着进行产线的更新和再投资。

工艺更换需要对工艺进行严格论证，当下卷绕更符合产业化需求。理论上，叠片工艺制得的电芯产品在综合性能上优于卷绕工艺，包括能量密度、循环性能及安全性能等方面，主要系卷绕电芯存在多处弯折区域和集流体焊接区域，内部空间利用率低，并且会有卷绕张力的不均匀和形变等现象，而叠片电芯界面反应更均匀，活性物质容量能够得到充分发挥。但在实际应用中，卷绕的生产效率更高，叠片则会面临虚焊、极片毛刺、粉尘等问题，控制和操作难度更大，需要进一步开展相关设备改进、提升工艺效率。

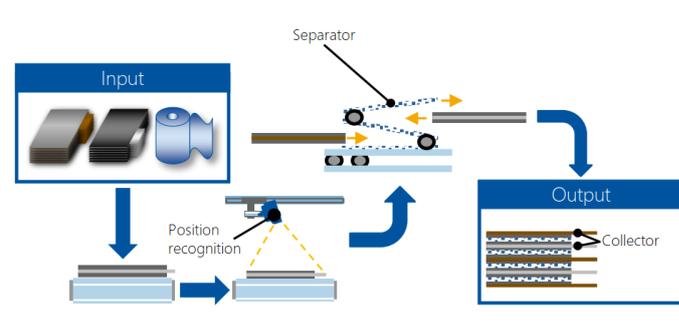
品质升级的诉求之下，持续优化的叠片工艺逐渐导入。新能源汽车的发展逐渐从政策驱动切换为消费驱动，对于产品的质量要求提升，体现在动力电池领域，对工艺品质提出了全面升级的要求。传统的卷绕工艺切合规模量产要求，但叠片对于电芯性能的提升更为明显。随企业对工艺的精进，叠片工艺开始逐渐导入。蜂巢能源已于 2019 年 4 月率先发布首款车规级方形叠片电池，其一期工厂应用的高速叠片工艺效率已达到 0.6 秒/片（传统为 1 秒/片），二期有望提升至 0.45 秒，三期将达到 0.25 秒以超越卷绕工艺效率。蜂巢能源之外，比亚迪的刀片电池也采取叠片工艺，宁德时代、松下等优质电池企业也有在 2022 年之后导入叠片的计划。我们认为，对电池品质的高要求将推动叠片技术继续精进。

图表 140：方形电池和圆柱电池分别的卷绕工艺



资料来源：ResearchGate，五矿证券研究所

图表 141：方形或软包电池可以通过叠片工艺制作而成



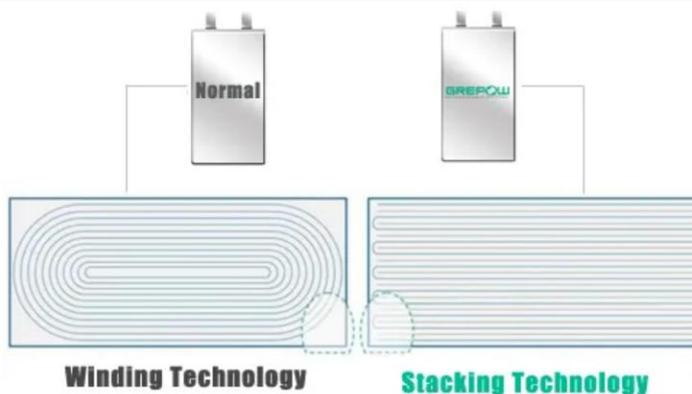
资料来源：ResearchGate，五矿证券研究所

图表 142: 不同封装形式的电芯制造在核心工艺上有差别, 对应的制造设备也不同



资料来源: 赢合科技招股说明书, 五矿证券研究所

图表 143: 卷绕电芯存在弯折区域, 是影响产品综合性能的重要因素之一



资料来源: Uenergy hub, 五矿证券研究所

图表 144: 卷绕工艺更贴合实际, 生产效率高, 叠片工艺生产的电芯性能更优

项目	卷绕工艺	叠片工艺	说明
内阻	内阻高, 主要系正负极只有单一极耳	内阻低, 相当于多个极片并联	内阻一定程度影响倍率性能及放电平台等
倍率性能	单一极耳难以大电流充分完成放电	多极片并联更容易在短时间内完成大电流放电	动力领域要求较高的高倍率性能
放电平台	内阻高极化大, 放电平台较低	内阻低极化小, 放电平台高于卷绕	叠片可适用放电截止电压较高的用电设备
容量密度	内部空间未被完全利用导致较低的容量密度	内部空间利用充分使体积比比较高	容量差异在常规尺寸电池上较不明显
能量密度	比能略低	高于卷绕	因放电平台和容量密度造成差异
变形情况	内部结构不均一, 容易变形	内部结构相对统一, 不易变形	叠片的安全性优于卷绕
极片弹性	极片需要一定弹性	极片可以没有弹性	工艺上一般可满足要求
电池形状	形状相对单一	尺寸灵活	—
涂布环节	需严格控制涂布膜密度	正负极分成诸多小片可降低涂布要求	叠片中小片的称重分档相对繁琐
分切环节	分切方便, 合格率高	分切繁琐, 合格率低	叠片产生极片断面、毛刺的概率大
点焊环节	点焊容易	容易虚焊	大批量生产下虚焊问题较难监控
操作要求	操作方便, 对操作工要求低	操作复杂, 对操作工要求高	—
生产控制	生产控制相对简单	生产控制较繁琐	叠片中极片的检测、转运等是难点

资料来源：格瑞普官网，五矿证券研究所

### 工艺格局演化之思：先进技术与产业实践的契合是发展关键

全球范围内，不同封装形式电池均有一席之地，但市场竞争力已有差异。2020年全球动力电池装机142.8GWh，同比增长21%，CATL、LG化学、松下分列装机前三。从封装类型看，装机TOP3的主营类型不同，CATL为方形、LG化学为软包、松下是圆柱。从市场竞争力看，TOP10主要是软包和方形电池企业，其中韩系企业聚焦软包，中国企业主营方形居多。短期部分企业为满足下游整车要求，推出其他封装类型产品，如LG化学为特斯拉供应圆柱形电池，并且取得较好的装机量；但长期看，为提升企业竞争力，向更好封装类型切换的动力提升，如松下已开发出方形产品，避免单一的圆柱业务阻碍发展。

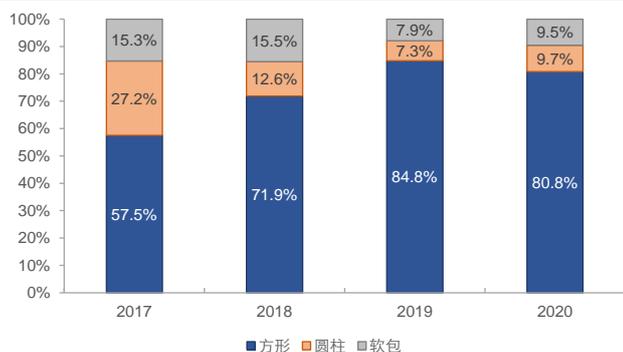
中国区域方形电池为主流，2020年以来圆柱电池份额有所提升。2020年中国动力电池出货量约80GWh，同比增长12.7%，其中方形电池占比达到81%，是主流的封装形式。另一方面，受益特斯拉国产Model 3销量高增，因其搭载LG化学三元811圆柱电池，因此圆柱类型出货量占比有所提升，我们预计未来特斯拉4680大圆柱带动下有望保持一定份额。分企业看，中国2020年装机TOP10中，有6家企业主营方形电池，支撑方形装机。

图表 145：2020 年全球动力电池装机 142.8GWh，CATL 装机 34.3GWh 排名第一

排名	企业	主营类型	2020 年	2019 年	同比%	2020 市占率%	2019 市占率%
1	CATL	方形	34.3	32.5	5.4%	24.0%	27.6%
2	LG 化学	软包	33.5	12.4	171.5%	23.5%	10.5%
3	松下	圆柱	26.5	28.8	-8.2%	18.5%	24.4%
4	比亚迪	方形	9.6	11.1	-13.5%	6.7%	9.4%
5	三星 SDI	方形	8.2	4.4	85.3%	5.8%	3.8%
6	SKI	软包	7.7	2.1	274.2%	5.4%	1.7%
7	AESC	软包	3.8	3.9	-3.1%	2.7%	3.3%
8	中航锂电	方形	3.4	1.5	127.6%	2.4%	1.3%
9	国轩高科	方形	2.5	3.2	-22.8%	1.7%	2.7%
10	PEVE	方形	2.0	2.2	-8.1%	1.4%	1.9%
	其他		11.2	15.8	-29.0%	7.9%	13.4%
	总计		142.8	118.0	21.0%	100.0%	100.0%

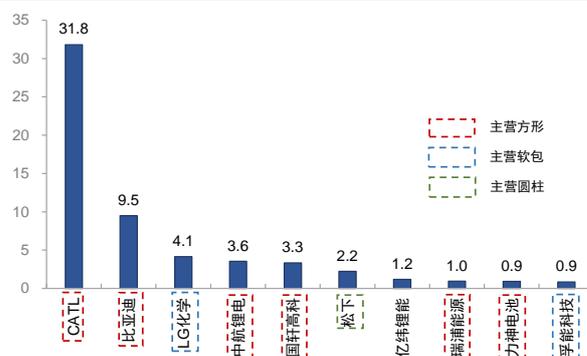
资料来源：SNE Research，五矿证券研究所

图表 146：2020 年中国方形动力电池出货量占比达到 80.8%



资料来源：GGII，五矿证券研究所

图表 147：中国 2020 年装机 TOP10 大部分主营方形电池 (GWh)



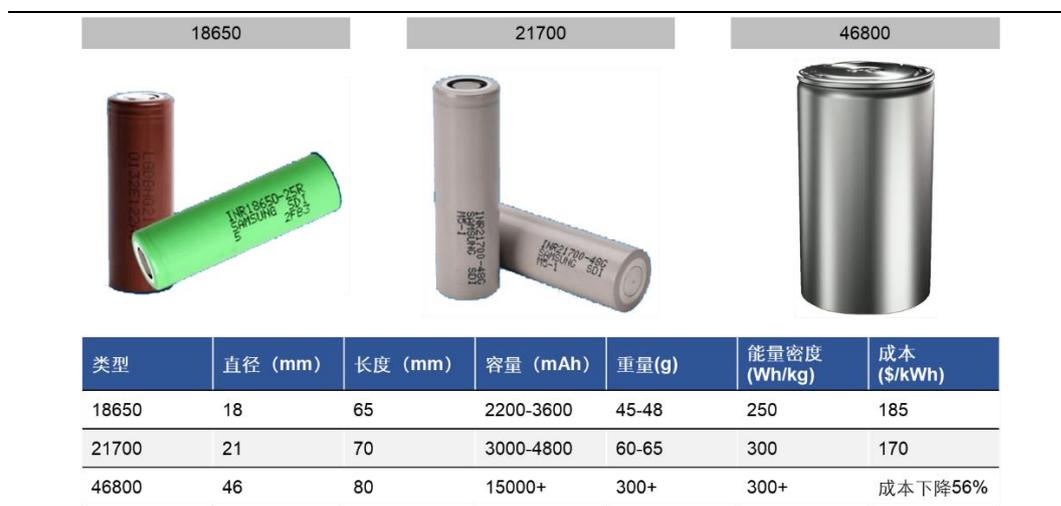
资料来源：中国汽车动力电池产业创新联盟，五矿证券研究所

特斯拉与松下的合作使圆柱封装盛极一时。1992年日本索尼发明锂离子电池，随后选择稳妥可行的18650圆柱电池技术满足消费电子需求。索尼之后，日本松下在1994年开始锂电研发，2008年收购三洋电机成为全球最大锂电供应商。当镍氢电池因涉及专利侵权而使得丰田无法在纯电动车上使用该类型后，丰田及松下分别在2010年向特斯拉投资5000万及3000万美元，致力于锂电池系统在动力领域的应用。松下与特斯拉自2008年起合作逐渐深入，并成功将圆柱电池推广到电动汽车：2008年Roaster采用18650 LCO电芯，2012年Model S及2015年Model X使用18650NCA电芯，直至2017年Model 3搭载21700电芯。独家供应特斯拉圆柱电芯，松下动力业务跟随特斯拉发展壮大。2017年松下全球装机约9.9GWh，份额为16.7%排名全球第一。圆柱电芯受到青睐，主要系工艺成熟、一致性强。但圆柱电芯的劣势在于单体电芯容量小，因此在动力领域需要大量电芯组成电池包，增加管理的复杂程度。特斯拉匹配圆柱电池包的电池管理系统技术世界领先，未来将推出4680大圆柱电芯。

中国新能源商用车的推广使方形成为主流，德系车企对方形的推崇则壮大三星SDI。中国新能源汽车的快速发展首先得益于新能源商用车的增长，主要系初期给予较多政策倾斜。商用车尤其是客车对于动力电池容量要求高，需要数百Ah，圆柱电池应用难度大，此外软包则在内部胀气和外部穿刺时容易漏液，而方形封装形状规整、空间利用率高，与软包相比成组难度小，因此成为首选。2014年全球份额最大封装形式为方形，且中国动力装机排名前五均为方形企业。在欧洲，德系车企偏爱方形，主要系车企注重安全，认为方形更符合车规级设计，三星SDI通过与博世合资成立动力电池企业SB Limotive，成功进入德系车企供应链。三星SDI与宝马的合作深度逐渐提升，2013年成为宝马核心供应商。三星SDI在深厚的技术积淀基础上（1999年进入电池领域）成长为方形动力电池龙头。

LG化学技术深厚，新能源车性能提升进入一定的瓶颈期，软包封装的高比能优势将凸显。LG化学具备化学品和材料基础，在消费类软包电池领域已有多年积淀，研发出世界第一款阶梯式和六角形软包电池。2009年现代起亚混动汽车搭载LG化学软包电池，2010年则应用到通用雪佛兰Volt，LG化学合作的车企逐渐增加，至今仍是拥有最多全球优质客户的动力电池企业，配套的车型数量多。另一边，销量快速增长的日产Leaf搭载AESC的软包电池，2014年AESC全球市占率达16.2%。但此后因特斯拉崛起叠加中国新能源车市高景气，软包份额开始下降。值得注意的是，应用软包的车企仍然较多，但还需等待相关车型的高景气到来。随着电池材料体系性能瓶颈期的出现，软包封装的高比能优势开始凸显。工艺的精进也在改善软包成组效率低、一致性差等问题，软包的导入逻辑持续强化。

图表 148：松下为特斯拉供应圆柱电芯，由18650逐渐过渡至21700，未来特斯拉主导下将推出4680大圆柱



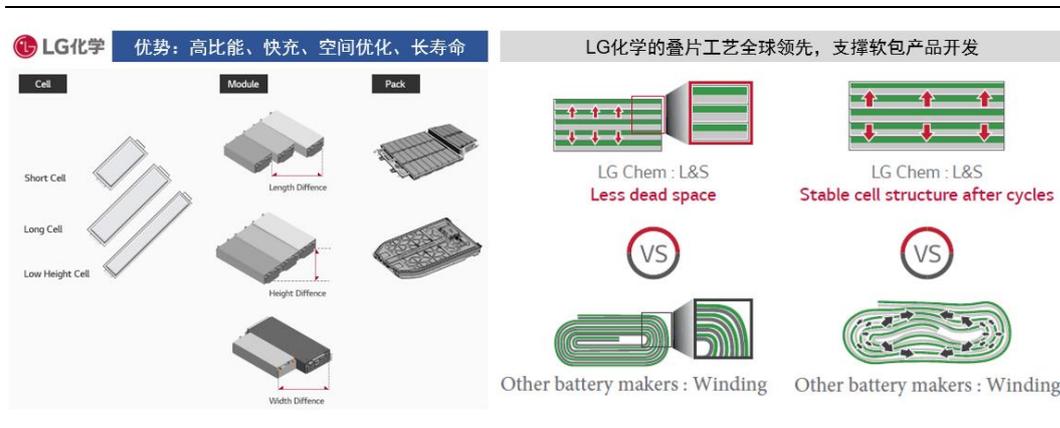
资料来源：Dnkpower，特斯拉电池日，五矿证券研究所

图表 149: 宁德时代与三星 SDI 主要以方形产品为主, 覆盖多元动力场景 (因企业持续开发新产品, 图中性能参数仅供参考)



资料来源: CATL 官网, 三星 SDI 官网, 中国汽车技术研究中心, 五矿证券研究所

图表 150: LG 化学具有深厚的软包电池开发工艺技术积淀, 供应的产品包括电芯、模组及电池包



资料来源: LG 化学官网, Bvim 官网, 五矿证券研究所

## 电芯到整车: 演进理念是优化中间环节, 提升集成效率

制造工艺的优化体现电池与整车的集成趋势。传统的动力电池系统构建通常要经历电芯到模组再到电池包的过程, 电池包即动力电池模块, 与结构系统、电气系统、热管理系统及电池管理系统等形成动力电池 Pack 总成, 安装至整车底盘。降本增效的诉求下, 电芯到整车各环节上的优化是重要手段, 主要思路是在系统集成过程中去掉冗余功能、多余零件、繁杂工艺、高昂材料等。我们认为, 工艺的优化体现电池作为动力源, 逐渐与整车进行整合集成的趋势。在集成的发展之中, 重点关注两个方面具有较强实力的龙头企业: 1) 具备先发的技术创新能力, 即通过系统改进切实降低成本、提升性能, 并且技术能够较好的贴合实际; 2) 具备产业链的整合能力, 因为集成效率的提升意味着产业链的联动需要加强, 涉及产业链上下游主导权的博弈, 若具有较强的整合能力, 则能够更好的提升话语权及议价能力。

### Cell to pack: 淡化模组概念, 提高成组效率

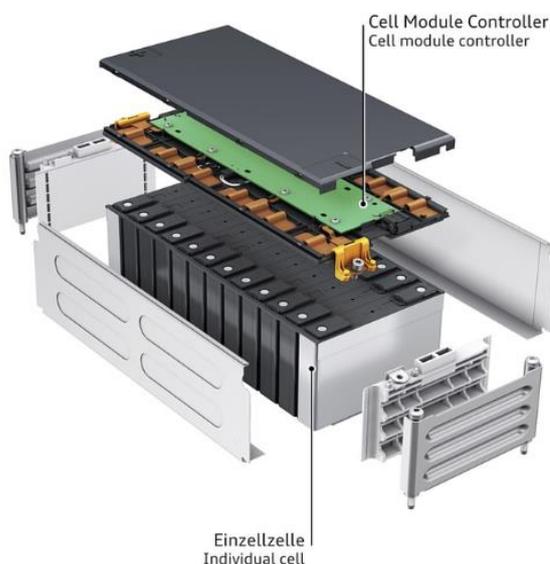
Cell to pack (CTP) 技术是重要的系统优化工艺。模组作为连接电芯与系统的中间产品, 在新能源车发展过程中由非标转向标准, 并向大型化、无模组化演进, 实质是满足系统轻量化诉求。作为重要的优化路径, CTP 无模组技术能够提升系统能量密度、减少辅件数量, 并且在电芯层面安全细节的强化也保证 CTP 技术的安全性不会下降。因此技术逐渐成为企业致力开发的重点, 以及市场关注的热点。

### 模组在动力电池系统中起到提升稳定性的关键作用

动力电池系统构建历经电芯-模组-电池包的过程，每一道工序质量控制的好坏都将直接影响电池的质量和成品合格率。1) 电芯层面所用物料含正负极材料、隔膜、电解液、铜箔、铝箔、壳体及正负极端子等，通过极片制造、组装、注液等完成电芯制作；2) 将一致性好的电芯按照精密设计组装成为模块化的电池模组，并加装单体电池监控与管理装置，下线前对模组开展全性能检查；3) 电池包包含若干模组，与连接器、控制器和冷却系统集成到一起，外覆包装并用螺栓紧固。经过测试后产品入库。

模组起到提升动力电池系统稳定性，构筑安全体系的重要作用。在动力电池系统当中，模组属于中间产品，是动力电池初始发展阶段因电池生产特性而开发的工艺：动力领域要求大容量高功率，因此需要多个电芯串并联，但因技术发展问题，初期单体电芯一致性与稳定性较差，因此需要采用模组将一致性好的电芯组合起来作为过渡，从而确保电池包的安全性。模组发挥安全作用的方式在于对其中的电芯进行管控，例如监测故障快速响应，此外模组还能对电芯起到支撑固定的作用。

图表 151：奥迪 Q7 e-tron 的模组结构图



资料来源：Caricos，五矿证券研究所

### 无模组技术的演进：目标在于降本提效

模组的采用降低系统能量密度、增加系统成本。1) 模组辅件使重量增加，影响了成组效率，从而使整体能量密度下降。当下传统的动力电池组装路径空间利用率低，其电芯到模组的成组效率在 80%左右，从模组到电池包的成组效率为 50%左右，因此电芯到电池包的成组效率仅有 40%；2) 模组中增加连接件、压板等辅件使成本增加，据我们的模型测算，目前主流的 NCM523 电池包和 LFP 电池包的成本构成中，模组硬件占比分别达到 14%和 16%。

动力电池系统工艺的发展过程也在不断权衡模组所承担的稳定和安全作用和存在的短板，单体电芯性能的改善和降本的诉求双向推动电池模组向标准化以及无模组化方向发展：

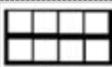
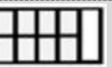
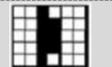
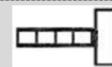
非标化阶段：初期“油改电”等形式使模组产品趋向多样化，企业规模效应差。早期电池电芯尺寸千差万别，并且由于存在“油改电”模式带来的底盘电池装载空间的不同，从电芯到模组再到电池包，其形态多种多样，模组的尺寸、模组在电池包内的布置多种多样。

标准化阶段：新能源汽车规模不断扩大，德国汽车工业联合会（VDA）基于众多尺寸的电芯

推出电池标准，具体规定了不同类型电池的尺寸范围。1) 大众早期在 e-golf、Audi Q7 e-tron 等车型应用了具备标准规格的 355 模组，利于增加规模优势、管控产品质量、方便升级换代。因中国区域特点相近，对标跟进应用 355 模组技术平台，这是模组标准化初期。2) 355 模组在车型电量增加的趋势下，小尺寸的成组效率低问题逐步凸显，因此 390 模组、590 模组陆续推出，更大尺寸的模组可以进一步减少系统内模组数量，减少零部件数量。此外，大众 PPE 平台推出的双排大模组进一步利用了电池包宽度上的空间。在纵向的演变上，特斯拉则是将 Model S 的横向布置改进为利用长条状的大模组，充分利用电池包纵向可用空间。

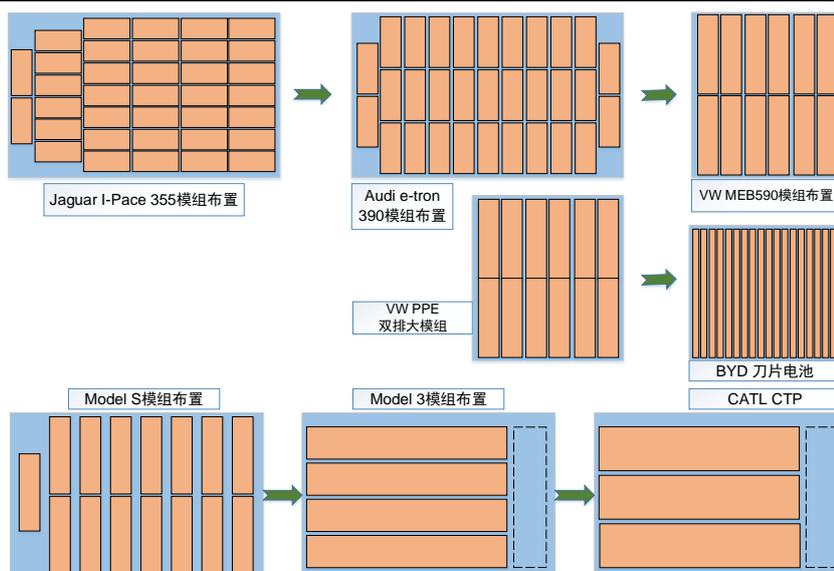
无模组阶段：经历标准化和大型化后，中国企业率先提出无模组方案，主要包括 CATL 的 CTP 技术和比亚迪的刀片电池技术。CATL 的 CTP 技术可使体积利用率提高 15%-20%，电池包零件数减少 40%；比亚迪的刀片电池技术则能够使空间利用率提升至 60%左右。两家企业的无模组技术都进一步降低了成本，提高了能量密度。

图表 152：早期空间的多样带来模组的多样化

OEM	BMW i3	VW e-up	Nissan Leaf	Mitsubishi iMiev	Tesla Model S	GM VOLT
电池位置						
类型	BEV	BEV	BEV	BEV	BEV	PHEV
电芯企业	三星SDI	松下/三洋	AESC	GS Yuasa	松下	LG化学
电芯类别	方形	方形	软包	方形	圆柱	软包
电芯数量	96	204	192	88	7104	288
模组布置						

资料来源：各公司网站，微信公众号-知化汽车，五矿证券研究所

图表 153：标准化到无模组化布置的演进史



资料来源：各公司网站，微信公众号-知化汽车，五矿证券研究所

### CTP 与刀片电池出世：精巧的设计用以满足轻量紧凑诉求

无模组化是动力电池系统设计趋势，无模组技术能够成为企业产品竞争力，增强议价权，影响产业格局。模组大型化、去模组化能够减少零部件，从而降低成本，尤其是随着电芯层面安全性提升，模组所起的稳定与管控作用逐渐弱化，去模组诉求提升。技术层面看，工艺专利的提前积累，先发优势的确立，更有利增强产品溢价，尤其是能够推动动力电池企业向下游整车渗透，提高议价权，主要系大尺寸设计对安全等方面要求更为严格，获取电池端支持的诉求增加。因此，具备无模组技术的企业能够进一步加强与整车企业合作，影响产业格局。

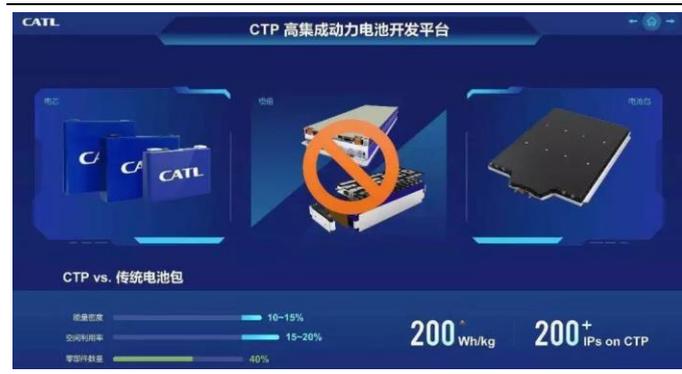
宁德时代 CTP 技术：无标准模组限制，轻量化和大型化下实用性较强。公司于 2019 年法兰克福车展披露无模组动力电池包 Cell to Pack (CTP) 技术。CTP 电池包较传统电池包而言，体积利用率提高 15%-20%，零部件数量减少 40%，生产效率提升 50%，投入应用后将大幅降低动力电池的制造成本。在能量密度上，传统的电池包能量密度平均为 140-150Wh/kg，CTP 电池包能量密度则可达到 200Wh/kg 以上。公司在设计上充分体现 CTP 的优势：

- 电池包结构设计：简化结构的同时能满足电池包的连接强度要求，实现轻量化设计；
- 电芯装配与冷却方式：箱体注塑成型，收容多电芯；独特内部散热结构提升安全性；
- 电芯与 BMS 的连接：利用保护壳体密封组件，且壳体内部均填充导热胶，易于散热；电芯和 BMS 单独加强防护等级，可降低电池包外壳的防护等级。

比亚迪刀片电池技术：注重电芯层面改进，结合磷酸铁锂充分发挥优势。2020 年 7 月 12 日，比亚迪汉正式上市，补贴后售价在 21.98-27.95 万元之间。搭载比亚迪自主开发的高性能磷酸铁锂刀片电池，最高续航可达 605km，可与搭载三元的乘用车相媲美。刀片电池相比传统块状电池包，空间利用率提升 50%，体积能量密度提升 32%，因此比亚迪汉 EV 的电池包能量密度达到 140Wh/kg，容量可达 77kWh。设计上的关键理念包括：

- 电芯设计与装配：电芯扁长化设计，改进电池包集成效率，与磷酸铁锂配合增强安全性；
- 热管理方式：液冷与风冷两种冷却方式，置于电池包上方，增强散热，缓解热失控；
- CTP 方案配置：方案多样，对应于不同尺寸电芯和不同布置，体积比能最高可增加 32%。

图表 154：CATL 推出的 CTP 电池技术将是降本的重要手段



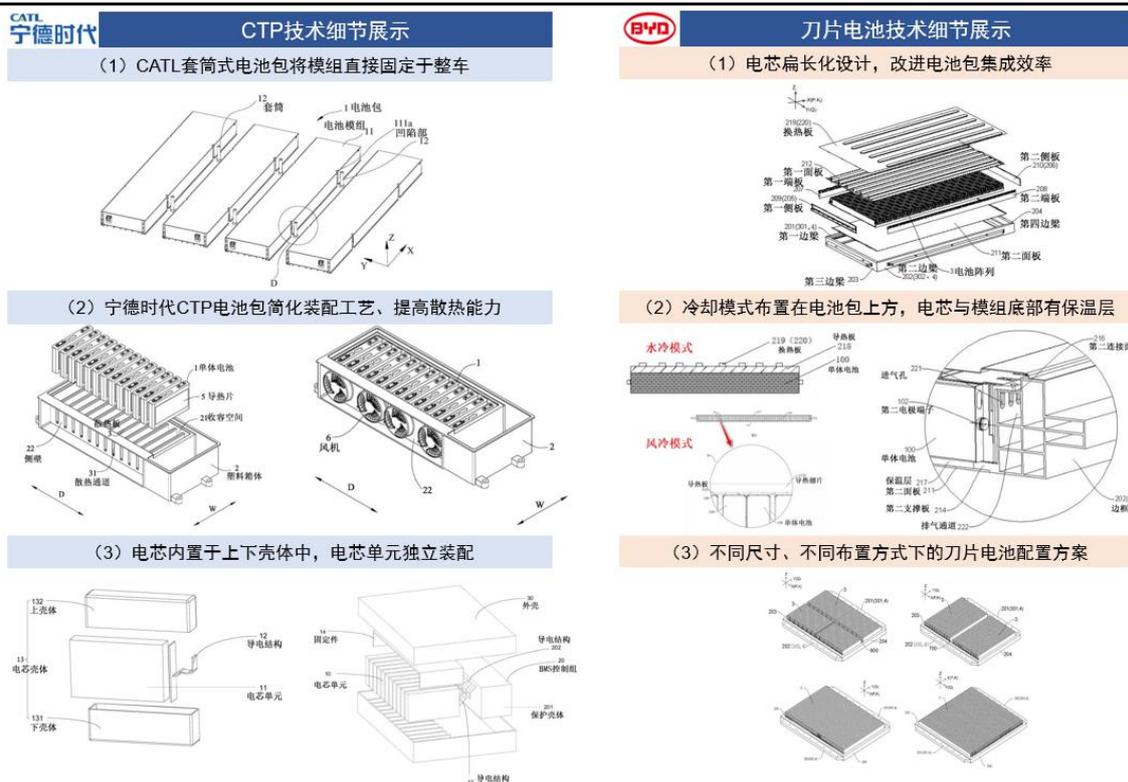
资料来源：CATL 官微，五矿证券研究所

图表 155：搭载刀片电池的比亚迪汉最高续航达 600km 以上，安全性高



资料来源：比亚迪官网，五矿证券研究所

图表 156：宁德时代与比亚迪各自无模组技术的细节展示



资料来源：国家知识产权局，五矿证券研究所

对比技术细节和实现效果，我们认为两种 CTP 方案目标相对一致，但设计理念有所差异，主要为电芯层面的变动程度。宁德时代 CTP 技术保持电芯规格不变，商业供应成熟度高，而比亚迪刀片电池拉长电芯，在电芯良率、质量把控方面还需改善，也将在短期内造成供应的紧张。1) 宁德时代以自上而下的设计理念，着重从电池包和模组结构方面进行改进，采用箱体注塑成型、套筒结构等方式实现需求；比亚迪则是自下而上，注重单体电芯尺寸的设计，采用扁长化电芯提升空间利用率、增强散热，安全性进一步提高。2) 因在电芯层面保持传统设计，宁德时代 CTP 技术的兼容性更强，可适用不同电池类型，在三元和磷酸铁锂体系中均有车型应用。比亚迪的长电芯方案使得同样的电池组尺寸内可以装入更多电芯，续航里程可与传统三元相当，预计铁锂刀片可满足 600km 续航以下的需求，实现车型范围的拓展，尤其是乘用车领域的导入更给予铁锂较大的增量空间。

图表 157：宁德时代 CTP 技术与比亚迪刀片电池的全面对比

项目	宁德时代 CTP 技术	比亚迪刀片电池	
追求目标	提升能量密度，降低整体成本，增强议价权	提高体积利用率，降低成本，增强系统安全性	
设计理念	不改变电芯尺寸，对模组和电池包进行结构优化	改变电芯尺寸，长度范围 0.6-2.5m；电芯直接充当结构件	
零部件数量	减少 40%	降低	
生产效率	提升 50%	提升	
能量密度 (电池包)	体积能量密度	体积利用率提高 15%-20%	体积利用率提高 50%
	质量能量密度	可达 200Wh/kg，提升 10%-15%	提升程度优于 CTP
电池体系兼容性	材料体系	三元和磷酸铁锂均适用	当下仅适用磷酸铁锂体系
	封装类型	方形适用；圆柱和软包相对困难	主要选用方形
生产设备兼容性	配合卷绕工艺	采用方形叠片	

车型兼容性	可根据车型结构设计电池包尺寸，兼容性高 需改变电芯尺寸以兼容其他车型	
应用车型	三元：北汽、威马等；LFP：客车等	比亚迪汉、客车等
缺陷	后期维修难度大，注重电芯稳定和一致性 兼容性差，方形叠片尚不成熟	

资料来源：各公司官网，比亚迪刀片电池发布会，公司专利，五矿证券研究所

### CTP 方案的开发热度提升，车企的电池子公司入局

市面上差异化的 CTP 方案正在增加，主要是由具有整车企业控股背景的电池企业推出。长城汽车旗下的电池企业蜂巢能源在 2019 年 4 月展示了代号为“L6”的长叠片电芯，能够匹配无模组技术；宝能旗下的电池企业宝创新能源也申请了多项的 CTP 专利，积累技术实力。

蜂巢能源的长电芯方案在兼容性上较强，能满足大部分车型需求。蜂巢能源“L6”长电芯的长度在 600mm 左右，该长度是研究后选择的最佳尺寸，蜂巢能源认为结合不同排布方式，可以覆盖市场上主销的从 A0 到 D 级的 80% 车型。此外长电芯与传统的 590 模组平台具有较好的兼容切换性，主机厂可以不做额外的修改和变更，因此达到节省成本、快速响应的目的。在材料体系方面，蜂巢能源不限于采用磷酸铁锂，正在探索更高比能材料体系的应用，产品包括 L6-三元、L6-无钴等。

图表 158：据蜂巢能源，其开发的长电芯方案具有较强的兼容性，并且正在探索不同材料体系的应用

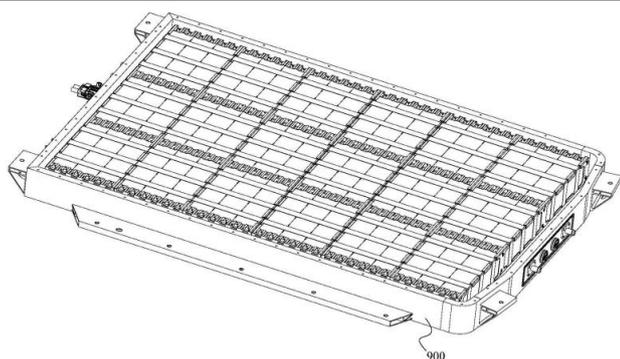
型号	电芯长度mm	模组形式	整车平台	适用车型	体系	适配里程km		
VDA L1.5		355标准模组 /CTP	老平台 油改电	EV: A00	LFP	200-300		
					NCM/NMX	200-400		
				EV: A0/A	LFP	200-400		
					NCM/NMX	200-500		
MEB L2.2		590标准模组 /CTP	专用平台	EV: A0/A/B	LFP	250-400		
					NCM/NMX	300-600		
L4		LCTP	专用平台	EV: A00	LFP	300-400		
					NCM/NMX	350-450		
L6/L6*2				LCTP	专用平台	EV: A0/A	LFP	450-600
							NCM/NMX	550-800
L6/L6*2		LCTP	专用平台	EV: B/C	LFP	550-700		
					NCM/NMX	650-850		

资料来源：高工锂电，五矿证券研究所

宝能开发软包 CTP 方案，可解决现有技术难以适配软包的问题。宝能旗下电池企业宝创新能源已有软包 CTP 技术的专利储备。宝创新能源的 CTP 技术通过差异化的设计，提升空间利用率，降低电池包成本，保证安全可靠：

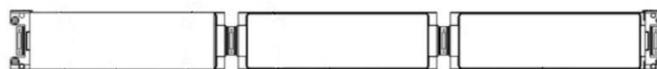
- 整体看，采用横向大模组方案，沿车身宽度方向放置多个模组形成电池包，此种放置方式有别于特斯拉 Model 3 的纵向大模组方案；
- 长电芯是由多个电芯串联形成。串联时小电芯采用极耳焊接方式连接，做长之后能够减少端板和部分模组附件，从而提升空间利用率、降低重量，并且减少成本；
- 设计上提升热安全性。结构上，每个电芯堆叠体外都放置液冷板和导热胶，电池顶部还安装有防爆泄压系统，从而降低热失控发生的概率。

图表 159: 沿车身宽度放置模组形成电池包的宝能 CTP 方案



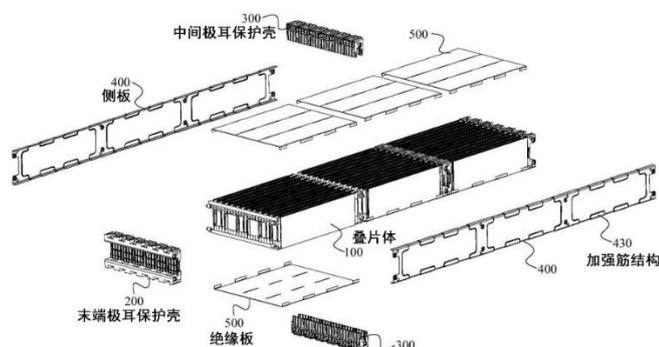
资料来源: 国家知识产权局, 五矿证券研究所

图表 160: 宝能 CTP 方案中, 采用多个电芯串联形成长电芯



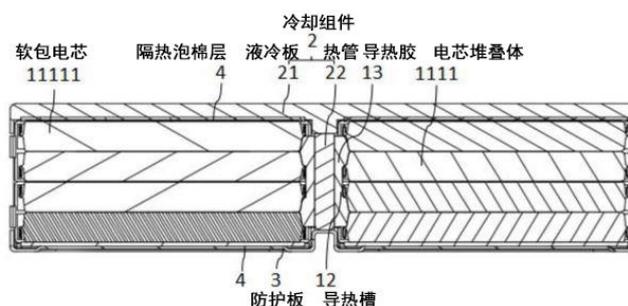
资料来源: 国家知识产权局, 五矿证券研究所

图表 161: 多个电芯水平叠放后一步焊接形成叠片体, 再构成大模组



资料来源: 国家知识产权局, 五矿证券研究所

图表 162: 冷却组件及导热元件的加入提升软包 CTP 的安全性



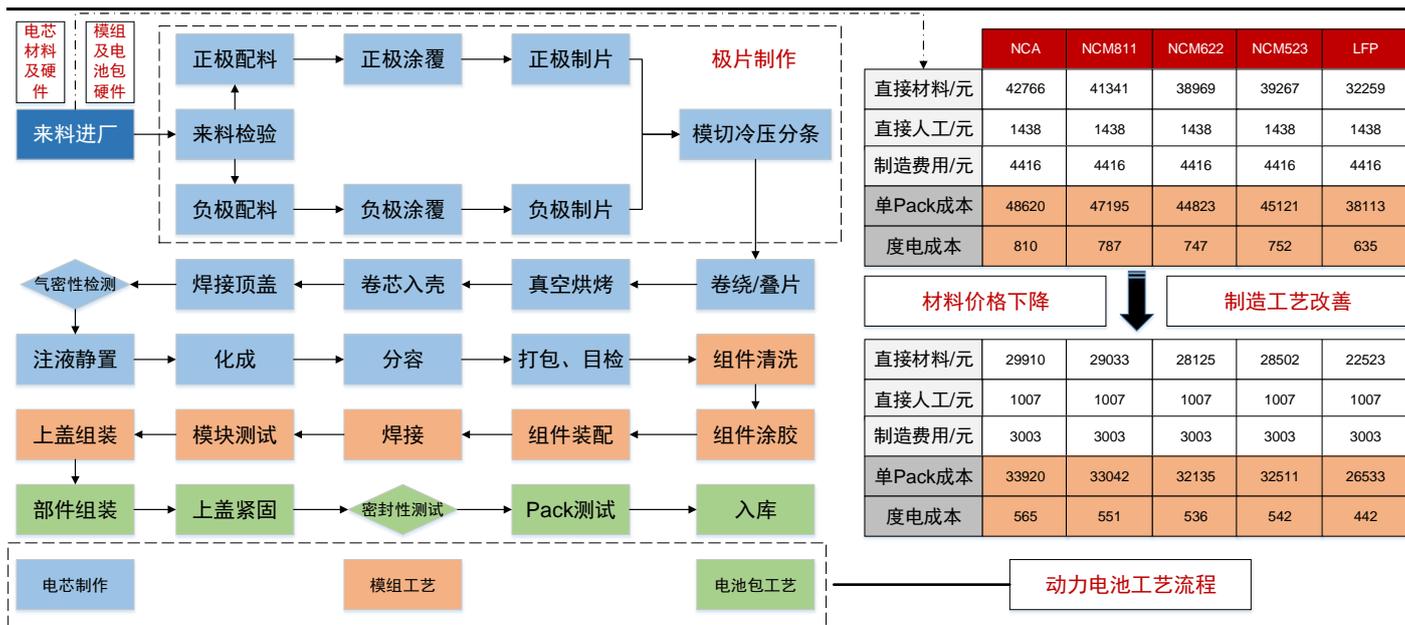
资料来源: 国家知识产权局, 五矿证券研究所

### 无模组技术的推出将增强电池环节的议价, 将改变产业格局

龙头企业推出 CTP 以来, 正在影响产业生态的变化。对于模组概念的淡化, 意味着动力电池企业向电池包层面的深入渗透, 而此前的产业模式主要是整车企业向电池企业购买电芯或模组, 电池包的设计主导权在整车企业手中。因此 CTP 技术的理念也体现电池企业对提升产业话语权的诉求; 同时 CTP 技术本身的降本增效较为显著, 能够较好的弥补铁锂等较低比能电池的短板, 发挥其成本优势, 从而增强铁锂电池的竞争优势, 影响产业格局。

- 技术升级正在增强对下游议价。宁德时代意在提升下游议价权, CTP 将有利于工艺渗透、稳定合作, 但对较多应用软包的海外车企推广有难度。CATL 所开发的 CTP 技术在电芯成本不增加的情况下实现一定的系统成本降幅, 提升与整车企业的议价能力。在此过程中, 议价权能够提高的原因在于, 技术渗透到电池包的设计、制造和售后维修方面。因此, 从商业合作角度看, 将有利于和下游整车企业保持长期稳定的合作。但对部分海外车企的推广较难, 主要系车企较多采用软包三元, 而软包在 CTP 技术中的固定有难度。然而 CTP 的竞争力或将吸引部分整车企业采纳方形产品。
- 技术变化影响铁锂与三元的竞争格局。凭借性能优化与成本优势, 磷酸铁锂电池的需求结构开始转变, 向新能源乘用车型渗透。2021 年 1-8 批推荐目录中新能源乘用车的铁锂车型占比持续提升, 达到 39%。从具体车型看, 比亚迪高端车型-汉、特斯拉国产磷酸铁锂版 Model 3 以及小鹏铁锂版 G3/P7 等都是推动磷酸铁锂电池装机进一步提升的重点车型。补贴弱化与产品力驱动下, 我们预计 2021 年铁锂装机份额达到 52%。

图表 163：动力电池制造工艺及相应的不同电池类型的成本拆分测算，磷酸铁锂电池 Pack 极限度电成本预计可达 442 元/kWh



资料来源：鑫椏资讯，CATL 招股说明书，五矿证券研究所测算

图表 164：2021 年 1-8 批推荐目录中，新能源乘用车领域配套铁锂车型的占比提升至 39%

类型		2018	2019	2020	2021	2021 年							
						第 1 批	第 2 批	第 3 批	第 4 批	第 5 批	第 6 批	第 7 批	第 8 批
数量													
新能源乘用车	三元	691	828	956	221	18	22	25	28	17	47	30	34
	LFP	33	67	198	157	18	1	26	23	9	26	30	24
	其他	99	57	35	20	1	3	4	0	3	3	5	1
新能源整体	三元	1395	1145	1361	254	22	29	26	38	20	49	32	38
	LFP	2247	2137	3766	1131	90	88	156	173	124	166	169	165
	其他	787	419	443	161	3	19	24	14	18	16	26	41
占比%													
新能源乘用车	三元	84%	87%	80%	56%	49%	85%	45%	55%	59%	62%	46%	58%
	LFP	4%	7%	17%	39%	49%	4%	47%	45%	31%	34%	46%	41%
	其他	12%	6%	3%	5%	3%	12%	7%	0%	10%	4%	8%	2%
新能源整体	三元	31%	31%	24%	16%	19%	21%	13%	17%	12%	21%	14%	16%
	LFP	51%	58%	68%	73%	78%	65%	76%	77%	77%	72%	74%	68%
	其他	18%	11%	8%	10%	3%	14%	12%	6%	11%	7%	11%	17%

资料来源：GGII，起点锂电，真锂研究，工信部，五矿证券研究所

### 集成大势所趋，是做减法，更是做加法

演进之中，简化环节减少用料是做减法，但本质是为了开发更加高效高性能的系统。在 CTP 的设计理念中，更高的成组效率是目标，因此开展去模组化，减少辅件；降本诉求下，冗余功能、材料的去除也是重要的手段，特斯拉是具备竞争力的代表企业。在做减法的过程中，能够发现产品的性能也在持续改善，更加集成化的系统代表着更先进的管控方式，是集成大势之下做加法的体现。

### 高集成的下一步：CTC 技术

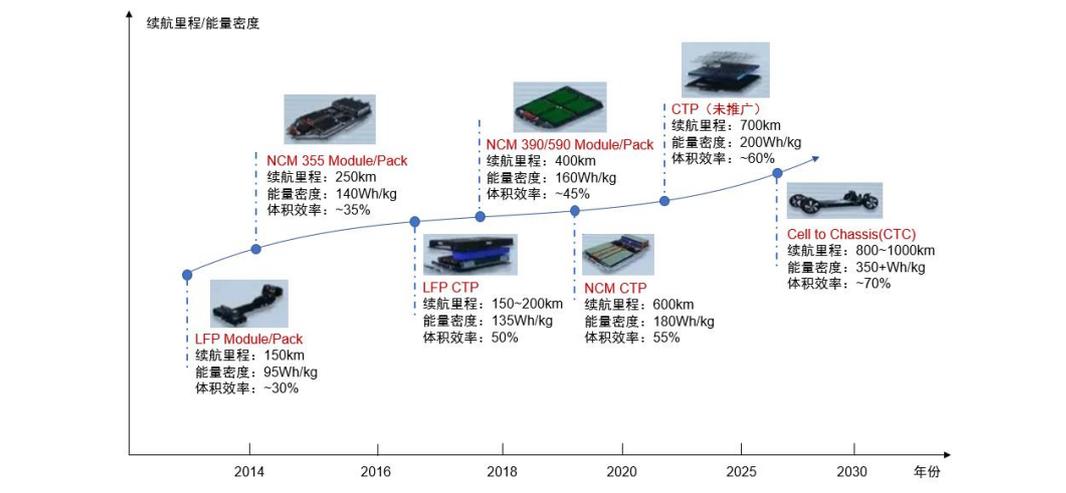
无模组技术仍然存在待改善的缺陷。1) 模组做大，在制造层面的吊装、固定、维修方面难度提高；2) 单电芯的问题需要返回整个电池包，因此需考验电池稳定性和一致性；3) 刀片电池的制造环节到最终的成品率仍然需要观察和改进，商业成熟度较差。

渐进集约化，无模组后 CTC 技术已在酝酿。通过工艺的持续精进，使新能源汽车成本逐渐接近燃油车，提升竞争力。在此过程中动力电池系统的设计至关重要。从电芯到模组，再到电池包，在电池的结构设计上行业不断取得进步。CATL 基于整合理念，又推出 CTC 设计理念，即 Cell to Chassis（电芯到整车底盘）。CTC 技术不仅会进行电池的重新布置，还会将三电系统纳入，并通过智能化动力域控制器优化动力分配和降低能耗。通过系统集成，使得成本下降，重量减轻而提升续航（800-1000km），乘坐空间更大。CATL 项延火预计 2025 年前后推出高度集成化 CTC 技术，2028 年前后有望升级为智能化 CTC 电动底盘系统。

电池与整车的集成，在应用层面挑战仍存。CTC 技术并非新概念，如电动车初创企业 Canoo 已开发滑板式独立底盘（仍有模组概念），而特斯拉的 S-平台、3-平台及大众的 MEB 平台也有集成化的理念（仍保留电池系统 Pack）。但 CTC 在应用层面仍面临技术和商业难点：

- 技术上，电芯与底盘的集成过程中需要解决的关键问题之一是安全。电池包在底盘碰撞中的承力演变至少历经 3 代，从不受力到纵向受力，再到纵向+横向受力。在 CTC 中，碰撞中电芯与底盘均直接参与受力并发生形变，因此在保证安全的前提下实现集成的难度进一步提升；
- 商业上，设计主导权存在博弈，而底盘行业望迎新模式。集约化的理念意味着产业链的合作需要加强，在底盘之前，Pack 的设计主导便经历主导权的博弈，主动权逐渐回到整车企业。在底盘设计上，整车企业历来是主导地位，电池企业的优势更小。因此电池企业更好的方式是收购或控股底盘公司，而集成之下“电底盘”的出现有望重塑底盘行业，通过底盘的独立开发，集成整车所需的大部分硬件，底盘的价值将进一步凸显。

图表 165：系统结构创新时间线，CATL 预计 2028 年前后推出智能化 CTC 电动底盘系统



资料来源：宁德时代公开演讲 PPT，五矿证券研究所

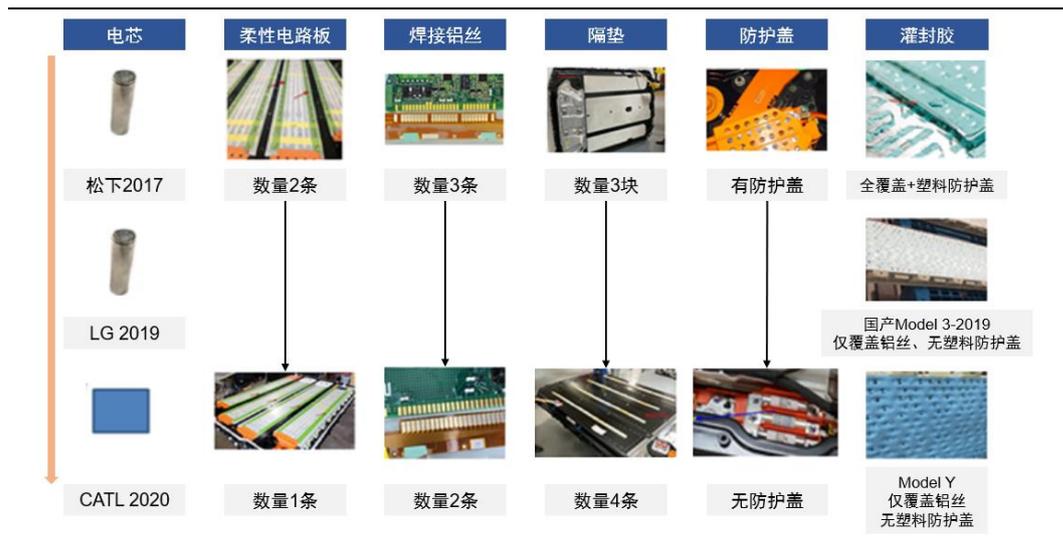
### 集约化的代表：特斯拉优秀的垂直整合理念与实力

从特斯拉的电池系统升级窥探其优秀的产品竞争力，处处体现集约化理念。在新能源车与燃油车的 PK 中，新能源车成本较高是一大劣势，因此特斯拉在推进产业发展的过程中注重降本，而电池系统成本占整车比例高，所以是聚焦改善的部分。特斯拉主要的降本思想是不断

做减法，以集成化的理念去除多余的零件，简化工艺，减少中间商环节：

- 技术升级时的大减法：持续的集成使得系统能够得到升级，并在升级过程中去掉冗余的功能，例如 Model Y 的后车身铸造件、热泵系统等组件；
- 同一技术框架内的小减法：细小的创新持续积累，也能够发挥价值。电芯层面，切换到具备成本竞争力的供应商，未来可能从外购转为自制；系统辅助器件层面，论证后进行设计的变更，减少器件数量或重量，例如单模组配备两个柔性电路板（FPC）的原有方案经改进后减少为一个 FPC。

图表 166：特斯拉已经通过多种技术创新进行电池系统的升级，降低系统成本

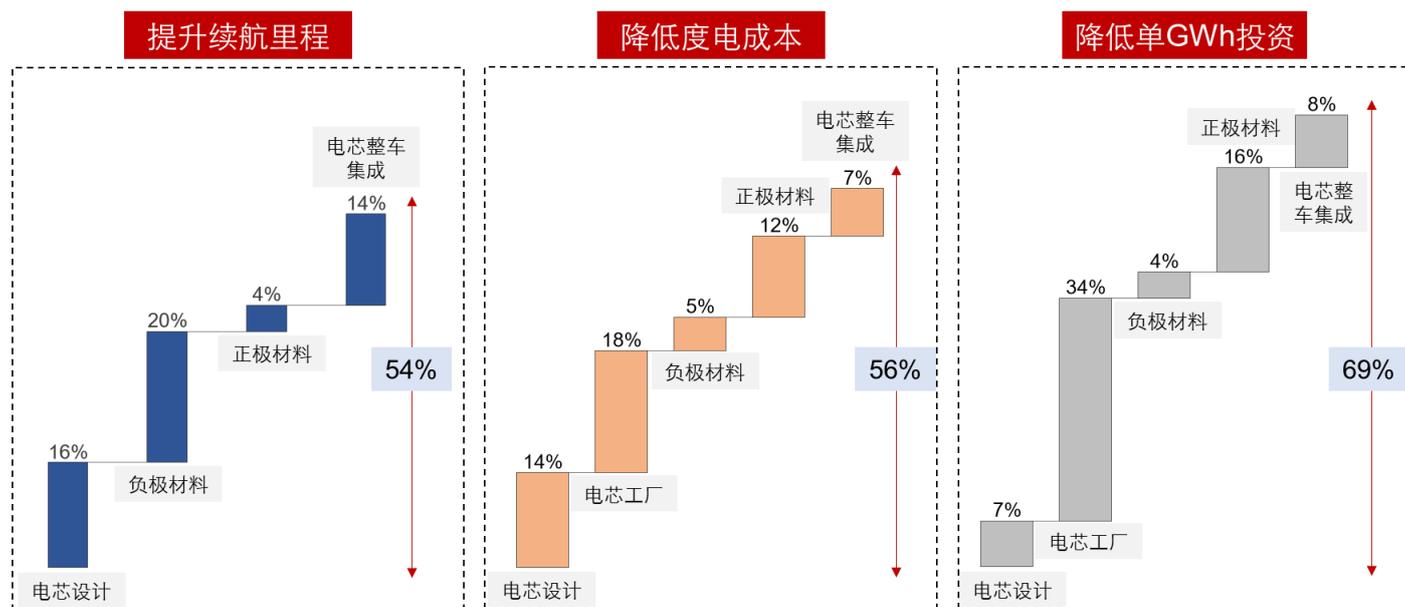


资料来源：微信公众号-知化汽车，五矿证券研究所

特斯拉“电池日”展现其正向降本、垂直整合的决心与实力。在 2020 年 9 月 23 日召开的“电池日”上，特斯拉充分展示了其在动力电池系统开发整合方面的技艺，公司预计 3 年内使每 kWh 电池成本下降 56%，续航里程提升 54%，单 GWh 产能投资成本减少 69%。公司的正向降本垂直整合理念贯穿于材料改性与工艺精进之中：

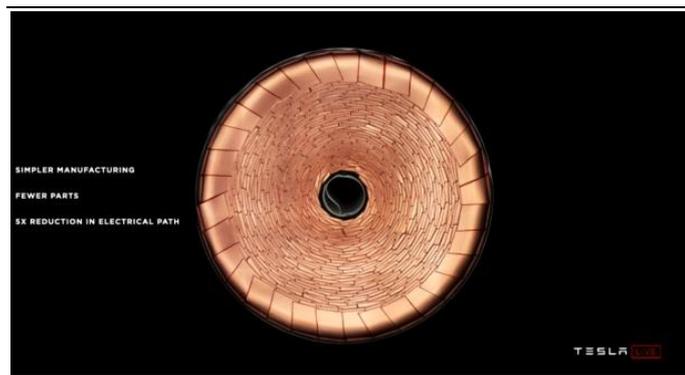
- 电芯设计：开发无极耳技术，与常规的设计相比，能够减少电阻，降低整个电极长度上的电流偏差，减少焦耳热，并提高散热能力。在此基础上能够缓解大圆柱带来的产热增加问题，进而推出 4680 大圆柱电芯，能量增加 5 倍，续航可提升 16%；
- 电芯制造：优化各个工序，包括干电极技术、高速连续组装工艺、电子系统管理等，改造后的单 GWh 投资将减少 75%，并且单 GWh 的产线占地面积将为原有的 1/10；
- 负极材料：采用冶金硅原料，表面使用弹性离子导电聚合物涂覆，并以高弹性粘结剂+电极设计方式形成高强度网络，降低硅负极体积膨胀带来的循环性能下降等影响；
- 正极材料：高镍正极为趋势，2/3 的镍与 1/3 的锰认为是较合适的配比，同时根据不同出行场景开发不同的正极产品。材料改性之外，以优化传统正极材料处理流程（无硫酸、0 废水产出）+北美锂资源开发+正极金属回收循环利用模式进一步降本；
- 系统集成：在电芯集成到整车环节，应用大模组形式使结构更加紧凑，减重减零提升续航；高度集成的电池+车身工厂将使单 GWh 投资成本下降 55%。

图表 167: 特斯拉计划 3 年内通过垂直整合, 使每 kWh 的电池成本下降 56%, 推动续航提升 54%



资料来源: 特斯拉电池日, 五矿证券研究所

图表 168: 电芯的无极耳设计能够降低电阻, 提高散热能力



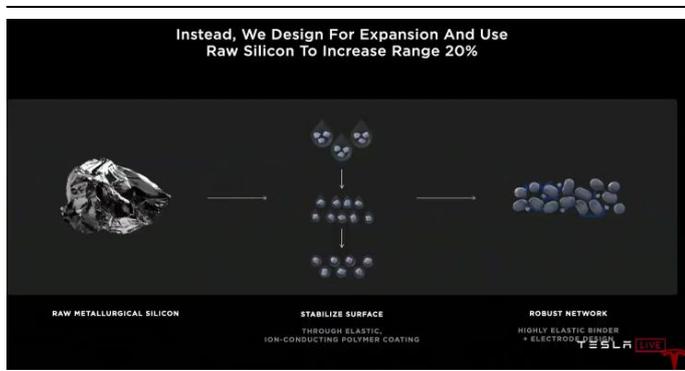
资料来源: 特斯拉电池日, 五矿证券研究所

图表 169: 开发 4680 大圆柱电芯, 续航能够提升 16%



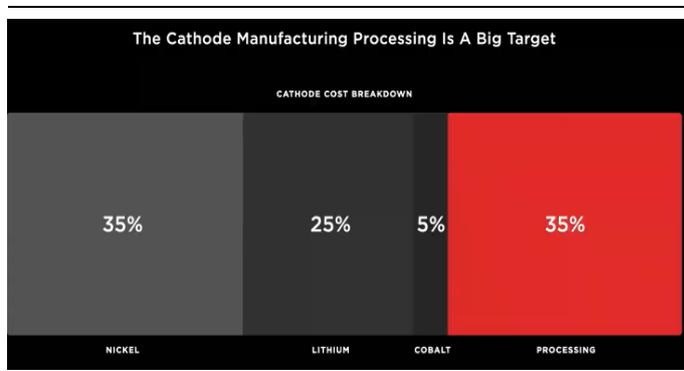
资料来源: 特斯拉电池日, 五矿证券研究所

图表 170: 采用表面覆膜稳定结构的方式减少硅负极的应变



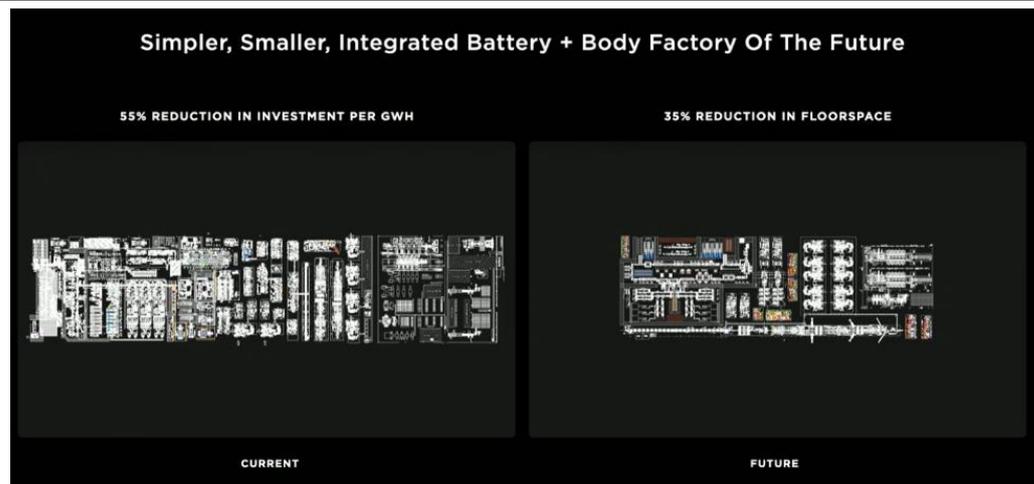
资料来源: 特斯拉电池日, 五矿证券研究所

图表 171: 高镍正极+生产工艺优化+上游延伸+金属回收方式实现降本



资料来源: 特斯拉电池日, 五矿证券研究所

图表 172：高度集成的电池+车身工厂将降低投资成本，减少占地面积



资料来源：特斯拉电池日，五矿证券研究所

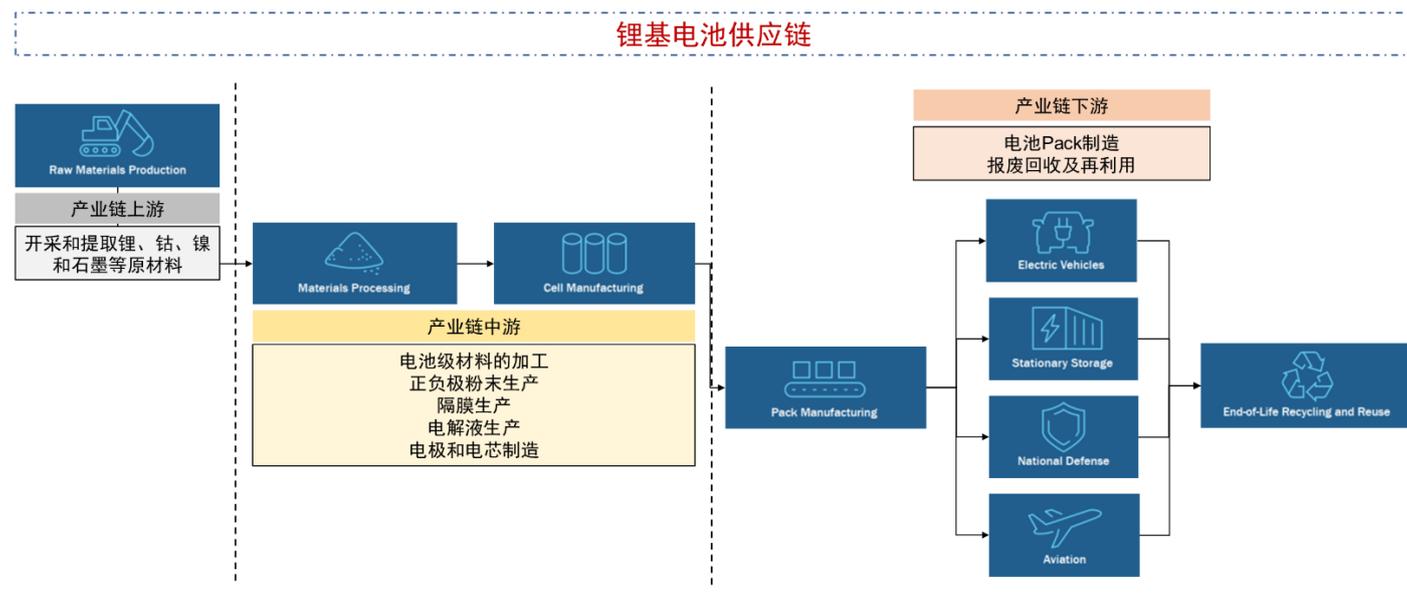
## 投资建议：紧跟具备核心竞争力的技术型龙头企业

新能源汽车已成为全球共识的战略新兴产业，带动锂离子动力电池产业高速发展。以锂为基础的电池供应链涵盖上游资源、中游材料及电芯制造、下游电池系统，面向动力储能等丰富终端，极具纵深和广度。我们认为，未来产业链中将出现全球领军的电池企业，业务渗透丰富能源场景，并且大概率是强者恒强，在龙头中再度脱颖而出：

- 持续创新，维持高研发投入。中国、韩国、日本动力电池龙头的技术积淀深厚，均具备较长的电池研发历史，展望未来，技术依然呈现渐进式迭代的趋势，龙头企业仍将保持对先进技术的持续投入，不断创新，夯实技术壁垒；
- 严格把控工艺流程，增强产品力。电池生产环节复杂、流程繁多，且对每一环节要求均极为严格，以保证产品的高质量与一致性。未来电池单体安全失效率向 ppb 级别迈进；
- 积极开展高质量扩产，形成规模效应。2025 年全球储能有望迈入 TWh 时代，面对未来 TWh 级别的需求规模，扩产需要充裕资金保障，同时需要大型产能建设的成熟经验护航。形成高效稳定运行的产能、推进全球布局，是龙头进阶的关键；
- 供应链优质且极具韧性。电池产业链极具纵深和广度，对于企业整合能力要求极高。龙头企业已逐渐形成全球化的优质低成本的供应链，在行业周期中保障盈利的稳健性；
- 拥有全球化视野，具备判断长期方向的能力。空间的广度上，龙头企业全球布局将遭遇不同区域政治文化的差异，需具备因地制宜的管理能力；时间的长度上，既要清楚产业发展的历史脉络，又能把握技术演进的方向，能够作出符合长期趋势的战略决策。

基于多维进阶的核心发展要素，我们看好能够推动产业革新的中国新能源汽车产业链龙头。我们认为，既有产业技术积淀，同时积极开展体系创新与推进产品多元场景渗透，并且具备全球顶尖的差异化优势的龙头将持续成长。建议关注宁德时代、比亚迪。

图表 173: 锂离子电池供应链全貌, 涵盖上游资源、中游材料及电芯制造、下游电池系统以及丰富终端, 极具纵深和广度



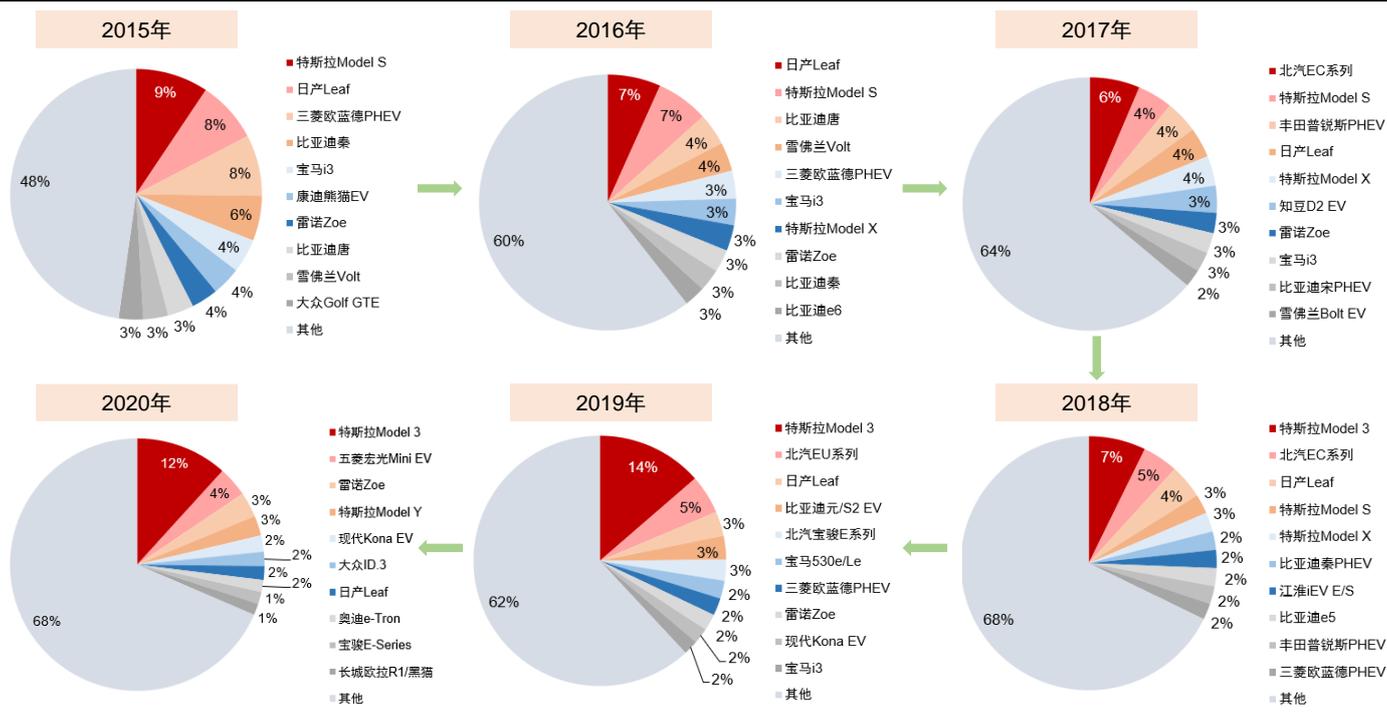
资料来源: 《美国锂电池国家蓝图 (2021-2030) 》, 五矿证券研究所

### 回溯行业格局: 把握市场主流技术变化, 是企业关键生存之道

热销车型发生更替, 影响动力电池竞争格局。从历年的全球热销车型排行榜看, 有较为显著的变动: 日本 OEMs 电动发力较早, 日产 Leaf、三菱欧蓝德 PHEV、丰田普锐斯是热销代表, 而后随中国新能源汽车需求增长, 比亚迪、北汽新能源等份额提升明显。2020 年以来, 欧洲严苛碳排政策促进电动汽车需求快速提升, 欧洲老牌整车企业份额增加。此外, 值得注意, 2015 年至今, 特斯拉的持续景气也是一大亮点。车企的电池供应商有差异, 2015 年以来主要的对应关系为: 松下主供特斯拉, 比亚迪自产电池, LG 化学等韩系企业面向韩系整车与欧洲整车, 宁德时代供应北汽、吉利等。因此动力电池装机的主导份额也大致历经从日本电池厂到中国电池厂, 再到 2020 年以来韩国电池厂逆势增长的变化。

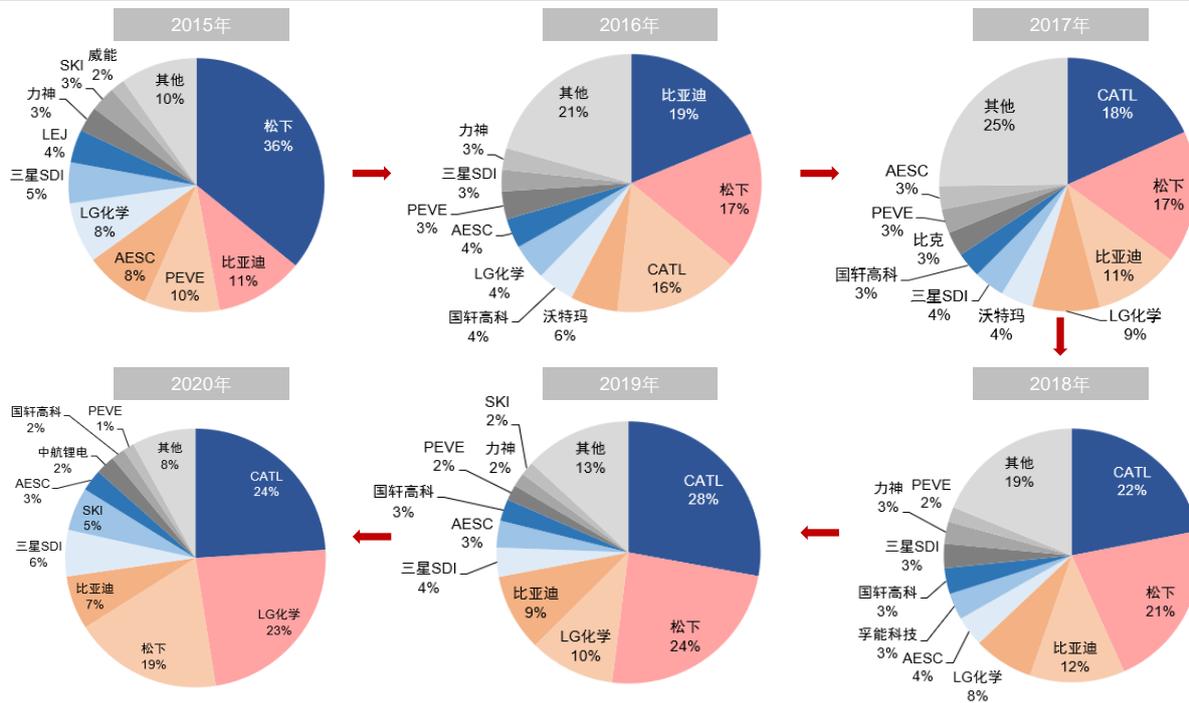
格局变化的更深层次原因之一在于, 终端整车对于技术路线的偏好有所差异。2014 年是日系电池厂的装机大年, TOP10 中有 4 家日本企业, 包括松下、AESC、PEVE 和 LEJ, 份额合计达 70.8%, 对应 Leaf、欧蓝德、Model S 等热销车型。但随后主流技术路线的切换使格局发生较大的变动, 曾经的龙头甚至面临破产清算、被收购的局面: 1) AESC 由日产和 NEC 合资成立, 主打锰酸锂路线, 受益日产 Leaf 销量高增, 2014 年份额达到 16.2%, 但电动车发展中高比能诉求不断提升, 锰酸锂电池竞争力下降。2016 年日产宣布拟出售 AESC 51% 股权, 而后 2018 年由远景能源收购, 开始转型三元软包; 2) 在中国, 政策 2017 年起开始向高比能倾斜, 补贴门槛提高, 三元路线逐渐取代磷酸铁锂路线成为市场偏好, 行业格局也发生较大变化。在此期间, 前期磷酸铁锂扩张较快的沃特玛资金链断裂, 遭遇破产清算; 部分厂商聚焦磷酸铁锂, 未能较好抓住三元需求增长的时机; 宁德时代则受益三元路线的发展, 以及磷酸铁锂产品在客车领域的开拓, 跟随中国新能源车市场持续成长, 2017-2020 年连续四年动力装机量排名全球第一。

图表 174: 历年热门车型销量份额持续变动, 直接影响供应电池的上游企业份额



资料来源: Insideevs, 五矿证券研究所

图表 175: 2015-2020 年全球动力电池装机份额的格局演变



资料来源: SNE Research, 五矿证券研究所

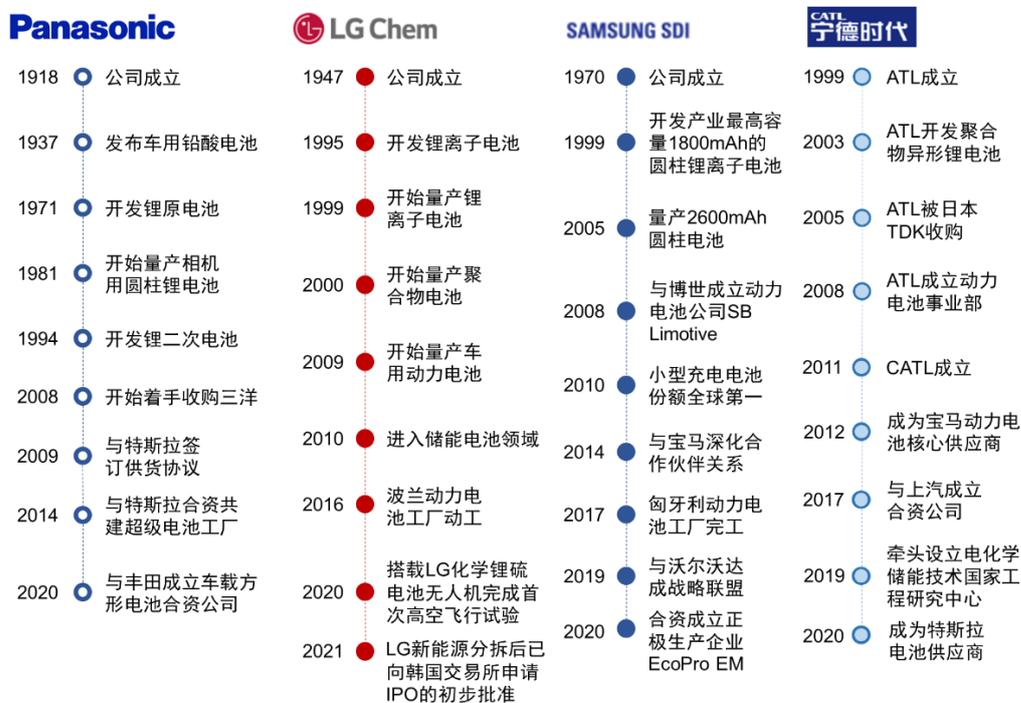
### 深厚多元的技术积淀既提升抗风险力, 又是下一代体系的基础

深厚的技术积淀在增强企业的竞争力的同时, 能够提升产业变动下的抗风险能力。电池产业涉及材料开发工艺演进, 需要较长时间积淀, 因此技术壁垒深厚。1) 当下锂离子电池成为动

力电池的主流，全球范围内形成一批动力电池龙头，包括松下、LG化学、三星SDI和宁德时代等，均有较长的电池开发历史，并且有消费锂电池的产业基础；2) 龙头企业均有多元的技术路径布局，包括对下一代电池的前瞻研究，在技术路线渐进更替时，能够具备较强的抗风险能力；3) 电池企业积极开拓应用场景，例如推动锂电池导入固定式储能领域。

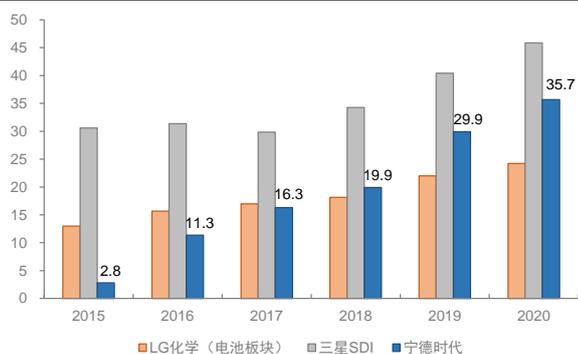
动力电池企业历年来保持高研发投入，未来仍有必要维持强研发水平，夯实竞争力。从研发投入的绝对数额看，各家企业均保持较高水平，尤其可以看到宁德时代历年显著的成长，伴随着研发费用的提升（宁德时代2020年研发投入约35.7亿元，较2015年增长近12倍）。从研发占比看，三星SDI历年来研发占营收比重较高，2020年为7.2%；宁德时代2020年研发占营收比重达到7.1%，同比增长0.6个Pct。在新能源车市场政策驱动向市场驱动的过程中，降本提效诉求增强，技术层面的改善将是企业提升溢价的关键维度。无论是基础的材料开发，还是整体工艺的完善，都需要强研发支出作为支撑。从这一角度看，龙头企业因具备持续的技术积累以及充足的现金流，有望形成正向循环，进一步增厚竞争壁垒。

图表 176：全球 4 家动力电池龙头均有长期的电池开发历史，具备深厚的技术储备，并且持续积极开展基础研究



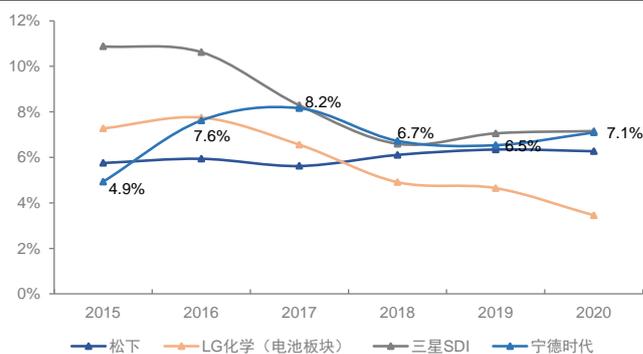
资料来源：各公司官网，CBS news, electriv e, 五矿证券研究所

图表 177：动力电池龙头历年来保持较大的研发投入（亿人民币）



资料来源：各公司公告，五矿证券研究所

图表 178：企业研发占收入比重在行业中属于高水平，体现强研发特质



资料来源：各公司公告，五矿证券研究所

## 强者更强，全球电池龙头持续拓宽能力辐射圈

技术需转化为产品力方可实现价值，全球动力电池龙头均具备丰富的产品线、差异化的产品竞争力：(1) 松下圆柱电池技术十分成熟，方形电池则初具规模；技术上 NCA 正极、硅基负极材料研发领先，其中圆柱 21700 电池单体能量密度可达 300Wh/kg，松下可根据需求提供高比能或高功率的多种类型的电池。(2) LG 能源的技术路线是软包三元，并持续向高镍推进，在三元锂电专利数量方面全球最多，此外依靠先进的叠片工艺可克服变形问题、并有效提升比能，配套在 Model 3 上的 811 电池成组能量密度可达 150Wh/kg。(3) 三星 SDI 的方形电池技术领先，单体能量密度在 220-250Wh/kg，能够为多种车型提供不同类型的电池，此外三星 SDI 的电池产品在安全性能上十分顶尖。(4) CATL 掌握从材料、电芯、模组到电池包开发的核心技术，并深知动力电池综合性能把控的重要性，已推出多款性能领先的电芯产品，此外自主研发 BMS、CTP 等技术，持续产品溢价、增强产业话语权。

我们认为，投资者需要重点跟随可以持续扩大自身能力边界的电池龙头。具备扎实的技术基础、强大的制造能力、以及持续创新的基因是形成高产品力的源泉，将塑造企业长期的能力边界。行业的技术和工艺路径还远未成熟，因循守旧在锂电行业尤其危险。

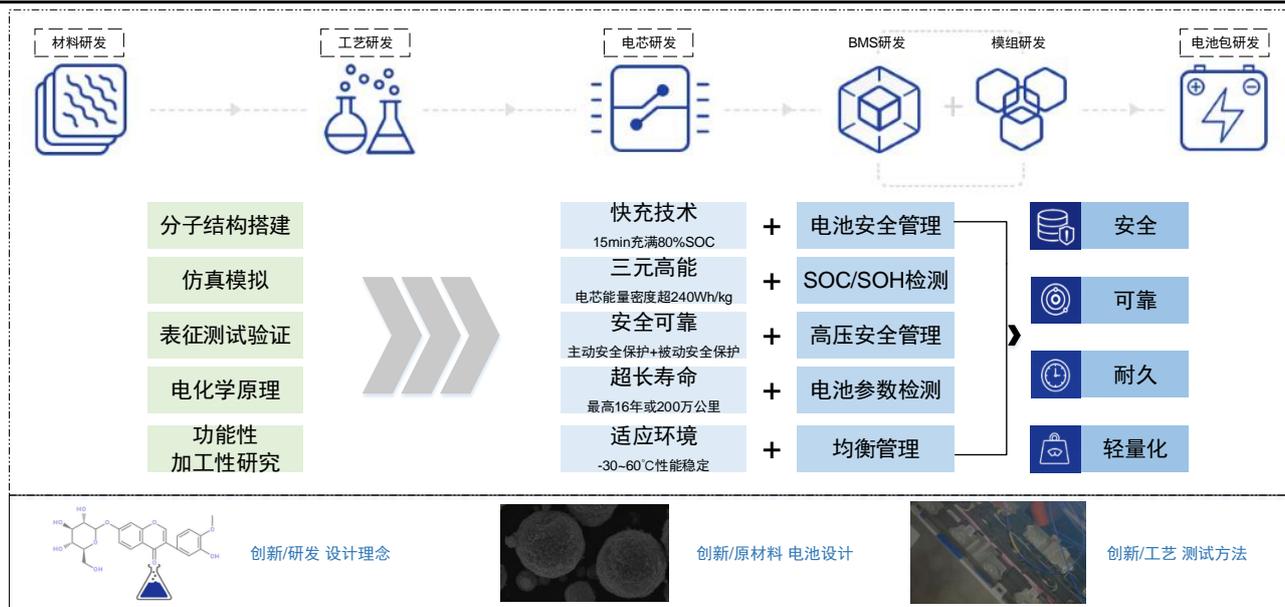
整体而言，我们认为动力电池的高壁垒主要体现在下述五个维度，因此有利于形成强者更强的行业格局，头部企业将引领锂电技术的发展主脉络：(1) 要求高强度的研发投入，深厚的技术积淀；(2) 精益生产，极限制造创新；(3) 有效、高质的产能扩张，形成和夯实规模效应；(4) 构建完备的供应链体系；(5) 与全球车企巨头深度协作，尤其未来涉及高度的电池系统集成化设计。在此基础上，中国的电池龙头还背靠强大的本土汽车消费市场，并受益中国能源结构转型的时代红利，因此我们积极预期宁德时代、比亚迪等企业的长期发展。

图表 179：拥有独特优势而产品线丰富，是海外动力电池龙头竞争力的一大体现



资料来源：中国汽车技术研究中心，松下官网，LG化学官网，三星SDI官网，五矿证券研究所

图表 180：基于创新研发理念，宁德时代形成完整动力电池研发链条，开发出综合性能优势突出的产品



资料来源：CATL 公司官网，五矿证券研究所

## 风险提示

- 1、全球新能源汽车推广低预期、市场竞争加剧、产业政策退坡或安全事件导致电池需求和产品价格下滑；
- 2、关键原材料及汽车芯片的供应风险、氢燃料技术发展或带来替代、全球宏观经济及汽车消费走软的风险。

## 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/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一参考依据。

## 联系我们

上海	深圳	北京
地址:上海市浦东新区东方路69号裕景国际商务广场A座2208室 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:北京市海淀区首体南路9号4楼603室 邮编:100037

## 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		Ratings	Definitions
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.	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: Room 2208, 22F, Block A, Eton Place, No.69 Dongfang Road, Pudong New District, Shanghai  
 Postcode: 200120

### Shenzhen

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

### Beijing

Address: Room 603, 4F, No.9 Shoutinan Road, Haidian District, Beijing  
 Postcode: 100037