

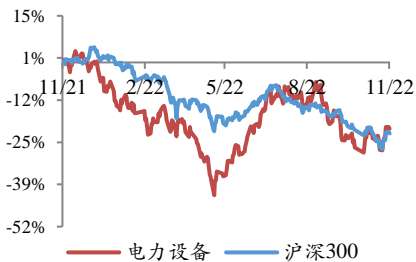
磷酸锰铁锂性能优成本低，工艺改进产业加速

—新能源锂电池系列报告之十二

行业评级：增持

报告日期：2022-11-08

行业指数与沪深 300 走势比较



分析师：陈晓

执业证书号：S0010520050001

邮箱：chenxiao@hazq.com

联系人：牛义杰

执业证书号：S0010121120038

邮箱：niuyj@hazq.com

相关报告

- 《锂行业深度报告之锂复盘展望与全球供需梳理：供需支撑高锂价利润上移，资源为王加速开发》2022-3-20
- 《三元高镍化大势所趋，四个维度考量盈利成本经济性-新能源锂电池系列报告之八》2022-5-18
- 《硅基负极，锂电材料升级的必经之路-新能源锂电池系列报告之九》2022-5-26
- 《性能成本经济性双轮驱动，单晶三元优化选择放量高增-新能源锂电池系列报告之十》2022-6-14
- 《隔膜壁垒高，涂覆一体化加速，龙头强二梯队降本增利弹性大-新能源锂电池系列报告之十一》2022-7-17

主要观点：

- **为什么磷酸锰铁锂是正极发展方向：安全性能优于三元，能量密度高于磷酸铁锂，成本优势明显**

磷酸锰铁锂晶体结构与磷酸铁锂相似，具有化学性质稳定，安全性能优异的特点，同时掺杂的锰元素可提高材料的充电电压，将充电电压由磷酸铁锂的 3.4V 提升至 4.1V，使得电池能量密度理论提升 15-20%，进一步扩大续航范围，因此 LMFP 安全性能优于三元，能量密度高于 LFP，此外 LMFP 对稀有金属依赖度低，可与 LFP 共线生产，成本优势明显。

- **产业化需要解决的问题：导电性差，倍率性能差，循环寿命短**

LMFP 自身的橄榄石晶体结构使得其导电性及倍率性能较差，同时正极的锰元素变价发生 Jahn-teller 效应，锰离子溶出，导致电池极化增大。溶解到电解液中的锰元素会沉积在负极表面，破坏 SEI 层结构，造成容量损失，循环性变差。

- **主流工艺：液相法品质更优，固相法压实高工艺简单实际生产更广泛**

固相法采用机械研磨的方式进行原材料的混合、反应，保证了材料的压实密度，再通过烧结在产物表面包覆碳源，提高材料导电性。液相法利用自发热设备将原材料全部溶解，从而实现分子级别更较均匀的结合，提高材料循环寿命。两者相较而言，液相法品质更优，但工艺难度也更大。高温固相法因其压实密度高、工艺简单、成本低廉、产量较高的特点，在实际工业制造中被广泛采用。

- **如何解决 LMFP 固有缺陷：锰铁比例是核心，改性技术是关键**

合适的锰铁比例能够有效结合锰铁两种元素的优势特点，实验表明当锰与铁含量的比例为 4:6 时，该系列材料的能量密度达到最大值，为 557 Wh·kg⁻¹。改性技术改善 LMFP 材料性能：纳米化提升材料倍率性能和低温性能，碳包覆工艺优化材料的电化学性能，提升循环寿命。

- **2025 年市场需求将达到 144.13 GWh，各企业积极布局，产业化加快**

磷酸锰铁锂应用领域丰富，未来将主要应用于动力、两轮车及储能领域，我们预计 2025 年磷酸锰铁锂电池市场需求有望达到 144.13GWh。近年来 LMFP 相关专利申请数量快速增长，正极材料及电池厂商积极推进相关测试研究，披露规模化扩产计划，产业化进程加快。未来兼备工艺专利技术以及大规模量产的公司或有先发优势。

- **投资建议**

我们看好具有先发技术优势的正极材料和下游具备优势的电池企业，推荐关注德方纳米，宁德时代，当升科技，光华科技。

- **风险提示**

新能源汽车发展不及预期；相关技术出现颠覆性突破；行业竞争激烈，产品价格下降超出预期；磷酸铁锂产能扩张不及预期。

正文目录

1 总论.....	4
2 磷酸锰铁锂是正极材料发展方向	8
2.1 正极材料快速发展，磷酸铁锂能量密度接近天花板.....	8
2.2 磷酸锰铁锂优势明显，高安全高能量密度低成本.....	9
2.3 磷酸锰铁锂电导率差寿命短限制其发展	11
3 优化路线：锰铁比例是核心，改性技术是关键	11
3.1 固相法压实密度较高，产业化进展快	11
3.2 合适的锰铁比例带来性能更全面的提升	13
3.3 改性技术是关键，占据先发技术优势	14
4 应用领域丰富，产业化进程加速	16
4.1 LMFP 市场空间测算.....	16
4.2 专利申请数增加，电池厂、材料厂加快布局.....	19
5 重点公司	20
5.1 德方纳米	20
5.2 宁德时代	20
5.3 当升科技.....	20
5.4 光华科技.....	20
风险提示	21

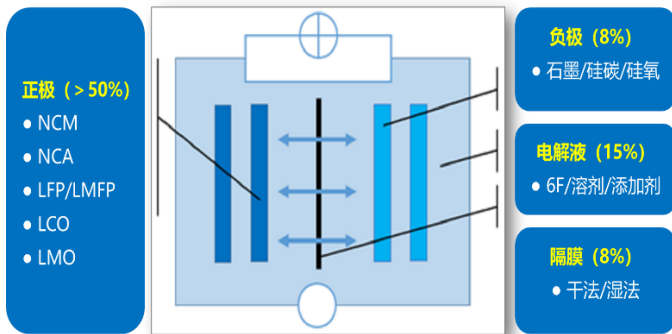
图表目录

图表 1 锂电池成本构成.....	4
图表 2 不同类型电池装机量市场占比变化.....	4
图表 3 三元 NCM、LFP、LMFP 性能对比.....	4
图表 4 磷酸锰铁锂产业化难题及解决办法.....	5
图表 5 全球车用动力电池领域 LMFP 需求测算.....	5
图表 6 LMFP 企业产业化进展.....	6
图表 7 磷酸锰铁锂重点公司.....	7
图表 8 中国锂电池正极材料产业链全景图.....	8
图表 9 锂电池成本构成.....	8
图表 10 正极材料出货量 (万吨).....	8
图表 11 不同类型电池装机量市场占比变化.....	8
图表 12 LFP 电池系统能量密度变化 (WH/KG).....	9
图表 13 橄榄石型 $\text{LiFe}_{0.5}\text{MnPO}_4$ 的结构示意图.....	9
图表 14 LMFP 与 LFP 均通过安全测试.....	9
图表 15 LMFP 较 LFP 有更高的放电平台.....	10
图表 16 LFP 与 LMFP 电化学性能对比.....	10
图表 17 钴镍价格走势 (万元/吨).....	10
图表 18 硫酸锰价格走势 (万元/吨).....	10
图表 19 NCM、LFP、LMFP 导电性能参数对比.....	11
图表 20 LMFP 充放电有两个电压平台.....	11
图表 21 传统制造工艺流程图.....	12
图表 22 引入二次包碳的高温固相法.....	12
图表 23 一次包碳和二次包碳下的 LMFP 的 SEM 图.....	13
图表 24 不同锰铁比例的 LMFP 放电曲线.....	13
图表 25 不同锰铁比例的 LMFP 克容量和能量密度变化.....	13
图表 26 不同锰铁比例的 LMFP 倍率性能.....	14
图表 27 锰掺杂比例对磷酸锰铁锂材料性能的影响.....	14
图表 28 磷酸锰铁锂产业化难题及解决办法.....	15
图表 29 磷酸锰铁锂-碳复合材料制备流程.....	15
图表 30 德方纳米 NCM 表面包覆 LMFP 示意图.....	15
图表 31 德方纳米 NCM 表面包覆 LMFP 示意图.....	16
图表 32 $\text{LiFe}_{0.48}\text{Mn}_{0.48}\text{Mg}_{0.04}\text{PO}_4$ 材料结构.....	16
图表 33 正极材料粒度分布 (MM).....	17
图表 34 全球车用动力电池领域 LMFP 需求测算.....	17
图表 35 全球电动自行车领域 LMFP 需求测算.....	18
图表 36 全球储能电池领域 LMFP 需求测算.....	18
图表 37 2015-2021 年磷酸锰铁锂相关专利申请数.....	19
图表 38 LMFP 产业化进展.....	19

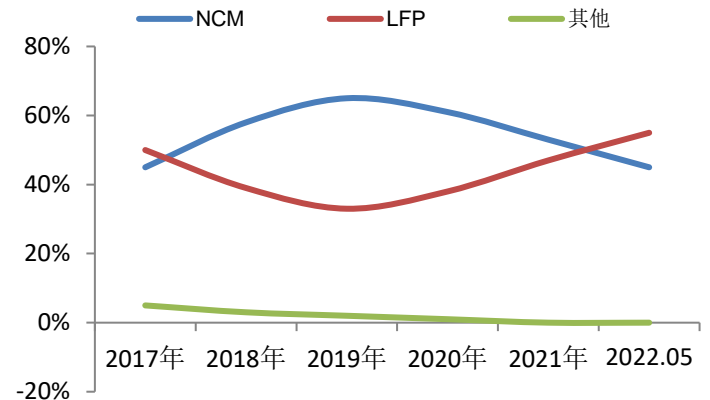
1 总论

正极材料是决定锂电池性能的关键材料之一，占整个锂电池制造成本超过 50%。三元和磷酸铁锂是目前的主流正极材料，受益于 CTP 技术的发展，磷酸铁锂凭借循环寿命长，安全性能高以及成本低等优势不断提高市占比例，国内磷酸铁锂装机量占比从 2019 年的 33% 提升到 2022 年的 55%，进一步抢占三元中镍市场空间。

图表 1 锂电池成本构成



图表 2 不同类型电池装机量市场占比变化



资料来源：GGII，华安证券研究所

资料来源：GGII，华安证券研究所

LMFP 安全性能优于三元材料，能量密度高于 LFP，成本优势明显。 LMFP 被认为是磷酸铁锂的升级版，是在磷酸铁锂基础上掺杂大量锰元素得到的新型正极材料。晶体结构与 LFP 相似，具有化学性质稳定，安全性能优异的优点。掺杂的锰元素提高了材料的充电电压，将磷酸锰铁锂正极材料的充电电压由磷酸铁锂的 3.4V 提升至 4.1V，使得电池能量密度理论提升 15-20%，进一步扩大续航里程。因此 LMFP 相比三元材料安全性更高，相比 LFP 能量密度更高。另外由于对稀有金属依赖度低，能与 LFP 共线生产，成本优势明显。

图表 3 三元 NCM、LFP、LMFP 性能对比

类型	三元 NCM	LFP	LMFP
晶体结构	层状	橄榄石	橄榄石
导电性能	良好	优秀	一般
比容量 (mAh/g)	150-220	140-150	140-150
压实密度 (g/cm ³)	3.7-3.9	2.2-2.3	2.3-2.6
电压平台 (V)	3.4-3.8	3.4	4.1
循环次数	800-2000	2000-6000	2000
安全性	良好	优秀	优秀

资料来源：高工锂电，华安证券研究所

LMFP 倍率性能差，循环寿命短。 由于橄榄石晶体结构的电子电导率较差，材料反应活性不高，低温性能不佳。另外，磷酸锰铁锂存在独特的锰析出问题，正极的锰元素变价发生 Jahn-teller 效应，锰离子溶出，导致电池极化增大；溶解到电解液中的锰元素会沉积在负极表面，破坏 SEI 层结构，造成容量损失，循环性变差。

固相法和液相法是制备 LMFP 两大类方法，固相法为主流。 固相法采用机械研磨的方式进行原材料的混合、反应，保证了材料的压实密度，再通过烧结在产物表面包覆碳源，提高材料导电性。液相法利用自发热设备将原材料全部溶解，从而实现分子级别更

较均匀的结合，提高材料循环寿命。其中，高温固相法因其压实密度高、工艺简单、成本低廉、产量较高的特点，在实际工业制造中被广泛采用。液相法生产出的材料质量高，但工艺难度和成本也较高，目前德方纳米是液相法量产的龙头企业。

具有一定的技术壁垒，掌握核心技术以及量产能力的企业具有先发优势。解决 LMFP 材料固有缺陷主要从两方面入手：一是合适的锰铁比例能够全面提升 LMFP 电化学性能。选择合适的掺杂比例，能够有效结合锰铁两种元素的优势特点，实验表明当锰与铁含量的比例为 4:6 时，该系列材料的能量密度达到最大值，为 $557 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。二是纳米化、掺杂、包覆等改性技术改善 LMFP 材料电化学性能。在传统制造工艺过程中添加改性技术，提高材料的电化学性质。

图表 4 磷酸锰铁锂产业化难题及解决办法

产业化难题	原因	解决路径	备注
导电性能较差	锰电导电率低，接近绝缘体	小粒径化	小粒径降低压实密度
		碳包覆	锰与碳亲和性较低，锰铁需要充分混合
		碳纳米管	成本增加
压实密度低	粒径较小	烧结工艺改善	成本增加
循环性能差	锰电导率低，接近绝缘体	加锂/富锂材料/锂箔补锂	成本增加
	与常规电解液发生副反应	寻找合适电解液	

资料来源：《锂离子电池正极材料原理、性能与生产工艺》，华安证券研究所

未来 LMFP 应用领域丰富，我们预计到 2025 年磷酸锰铁锂电池市场需求有望达到 144.13GWh。

1、车用动力电池领域，LMFP 纯用复合皆有优势，发展前景广阔。一方面 LMFP 可替代 LFP 在动力电池中的使用，另一方面 LMFP 可作为“稳定剂”，与三元材料复合使用。根据测算，我们预计到 2025 年，LMFP 在车用动力电池领域总需求会达到 80.7GWh。

2、两轮电动车领域，高性价比 LMFP 市场份额快速推进。据测算，2025 年全球两轮电动车中 LFP 占比或达 35%，三元或锰酸锂占比达 65%，LMFP 凭借其更明显的性能和成本优势，逐步替代 LFP 或与三元复合使用，预计 2025 年在两轮车领域中需求将达到 18.43GWh。

3、储能领域，LMFP 比 LFP 更具能量密度优势。成熟的电力市场、相继出台的利好政策、日益凸显的经济空间都说明储能领域巨大的发展潜力。我们预计在储能领域，到 2025 年 LMFP 对 LFP 替代率为 10%，需求将达到 45GWh。

图表 5 全球车用动力电池领域 LMFP 需求测算

	2022E	2023E	2024E	2025E	
全球动力电池装机量 (GWh)	460.04	676.26	946.76	1306.53	
动力领域	LFP 占比	30%	33%	36%	40%
	三元占比	69%	66%	63%	59%
	LMFP 替代 LFP	0%	5%	10%	15%
	LMFP 与三元复合	0%	5%	10%	15%
	复合材料掺杂比例	20%	20%	20%	20%

	动力 LMFP 需求	0	11.67	35.37	80.70
两轮车领域	两轮车电池需求量 (GWh)	50	67	83	96
	LFP 占比	25%	28%	30%	35%
	三元或锰酸锂占比	75%	72%	70%	65%
	LMFP 替代 LFP	5%	10%	20%	40%
	LMFP 与三元或锰酸锂 复合	5%	10%	20%	40%
	复合材料掺杂比例	20%	20%	20%	20%
	两轮车 LMFP 需求	1	2.84	7.30	18.43
储能领域	全球储能电池需求量 (GWh)	80	200	350	500
	LFP 占比	60%	70%	80%	90%
	LMFP 替代 LFP	0%	2%	5%	10%
	储能 LMFP 需求	0	2.8	14	45
LMFP 总需求 (GWh)		1	17.31	56.67	144.13

资料来源: TrendForce, EV Tank, Marklines, 中汽协, Wind, 华安证券研究所测算

兼备工艺专利技术以及大规模量产的公司或有先发优势。近年来 LMFP 相关专利申请数量快速增长, 企业纷纷开展相关技术研发, 部分正极材料厂商(德方纳米、百川股份、光华科技、当升科技等)、电池厂商(宁德时代、国轩高科、天能股份等)积极推进 LMFP 相关测试研究, 披露规模化扩产计划, 产业化进程加快。未来兼备工艺专利技术以及大规模量产的公司或有先发优势。

图表 6 LMFP 企业产业化进展

企业	LMFP 产业化进程
德方纳米	2021 年 9 月, 公司建设“年产 10 万吨新型磷酸盐系正极材料生产基地项目”, 项目投资额不低于人民币 20 亿元。2022 年 7 月, 公司表示该产品已开始送样, 预计一两年后可实现产业化。
当升科技	2021 年半年报中披露, 公式正在针对电动车和高端储能市场专项开发高性能的磷酸铁锂、磷酸锰铁锂材料。
宁德时代	2015 年申请专利——锂离子蓄电池复合正极材料及其制备方法, 公开了一种磷酸锰铁锂和石墨烯复合正极材料及其制备方法。 2022 年 7 月, 宁德时代、欣旺达、亿纬锂能的磷酸锰铁锂电池已在今年上半年通过电池中试环节, 正在送样品给车企测试, 积极推荐量产规划。
天能股份	2020 年研发 18650 磷酸锰铁锂电芯。
百川股份	2020 年, 企业相关项目整体产品规模为年产 10 万吨磷酸铁、1.5 万吨磷酸铁锂、1.5 万吨磷酸锰铁锂, 项目分期实施。
力泰锂能	公司现有 2000 吨磷酸锰铁锂生产线。公司计划 2021 年 9 月至 2022 年 3 月期间, 新增建设年产 3000 吨磷酸锰铁锂设备, 新建年产 2000 吨磷酸锰铁锂前驱体装置。

资料来源: 公司公告, 华安证券研究所

磷酸锰铁锂未来市场空间广阔，我们看好具有先发技术优势的正极材料和下游具备优势的电池企业，推荐关注**德方纳米**，**宁德时代**，**当升科技**，**光华科技**。

图表 7 磷酸锰铁锂重点公司

公司	评级	归母净利润（亿元）			利润增速		PE		
		2021	2022E	2023E	2022E	2023E	2021	2022E	2023E
德方纳米	买入	8.0	17.6	20.1	120%	14%	55	23	18
宁德时代	买入	159.3	287.0	449.0	80%	56%	86	34	22
当升科技	买入	10.9	25.7	33.7	136%	31%	40	16	13
光华科技	买入	0.6	2.0	4.0	233%	100%	116	38	19

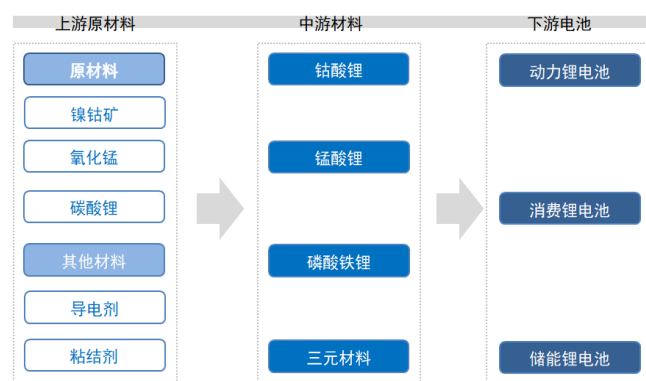
资料来源：wind，华安证券研究所

2 磷酸铁锂是正极材料发展方向

2.1 正极材料快速发展，磷酸铁锂能量密度接近天花板

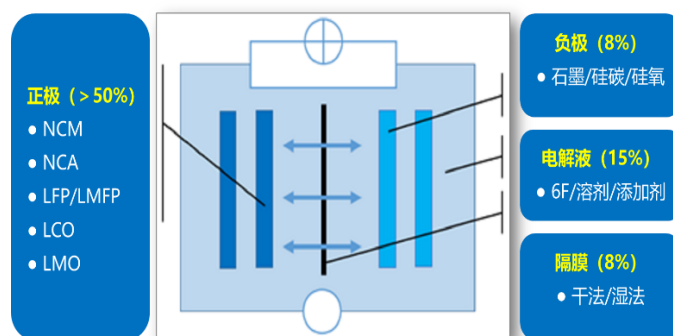
正极材料是决定锂电池性能的关键材料之一，占整个锂电池制造成本超过 50%。锂电池的本质是利用锂离子参与的氧化还原反应实现电能和化学能的相互转换，在电池中，参与反应的活性材料为正极、负极以及电解液或电解质。正极材料是决定锂电池性能的关键材料之一，直接影响电池的能量密度、循环寿命及安全性能。目前成功商业化应用的正极材料主要有三元材料镍钴锰酸锂（NCM）、磷酸铁锂（LFP）、锰酸锂（LMO）和钴酸锂（LCO）。

图表 8 中国锂电池正极材料产业链全景图



资料来源：GGII，华安证券研究所

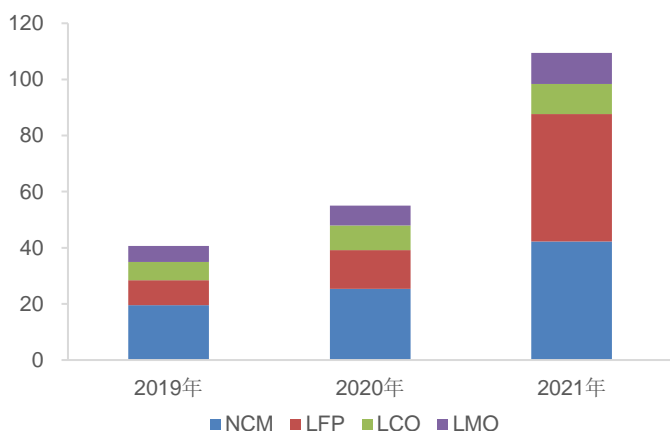
图表 9 锂电池成本构成



资料来源：GGII，华安证券研究所

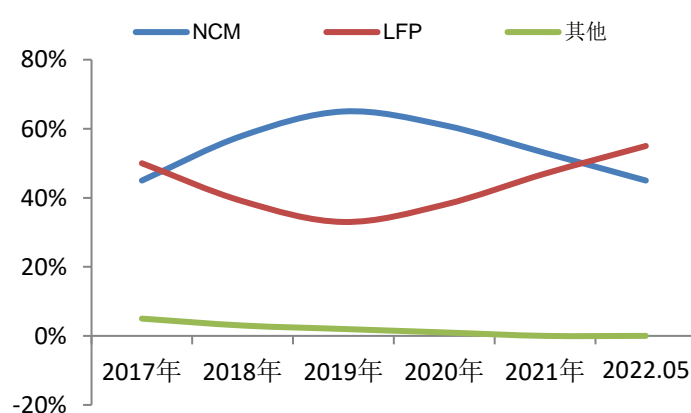
正极材料高速增长，铁锂凭借优势占比提升。受下游新能源车快速增长，锂电中游材料迎来爆发性增长，三元和磷酸铁锂是目前的主流正极材料，2021 年正极材料出货量为 113 万吨，同比增长 116%，其中磷酸铁锂正极材料出货量 48 万吨，同比增长 258%；三元正极材料出货量 43 万吨，同比增长 80%。近年来，受益于 CTP 技术的发展，磷酸铁锂凭借循环寿命长，安全性能高以及成本低等优势不断提高市占比例，国内磷酸铁锂装机量占比从 2019 年的 33% 提升到 2022 年的 55%，进一步抢占三元中镍市场空间。

图表 10 正极材料出货量（万吨）



资料来源：EV Tank，GGII，华安证券研究所

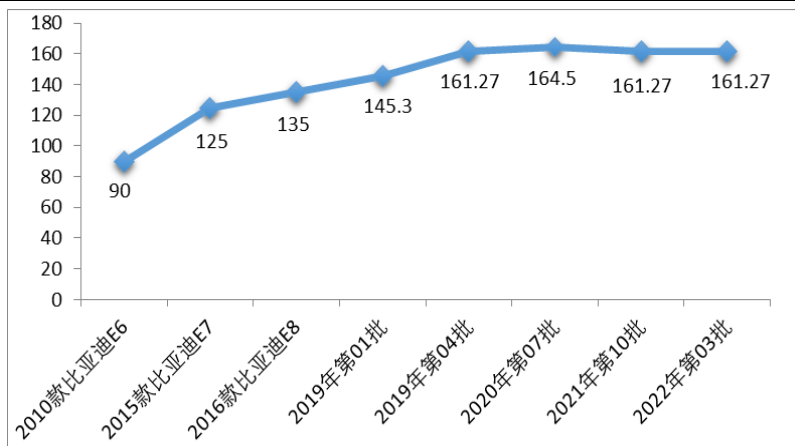
图表 11 不同类型电池装机量市场占比变化



资料来源：GGII，华安证券研究所

LFP 能量密度接近天花板，LMFP 或是下一个技术突破口。根据新能源汽车推荐目录信息，2022 年给整车企业配套的磷酸铁锂电池系统能量密度的最大值为 161.27Wh/kg，该数据区间自 2019 年就没有过太大变化。这表明依靠现有的技术水平，磷酸铁锂电池的能量密度在电化学性能上已经接近天花板，代表着技术变革、材料创新的磷酸锰铁锂或是下一个技术突破口。

图表 12 LFP 电池系统能量密度变化 (Wh/kg)

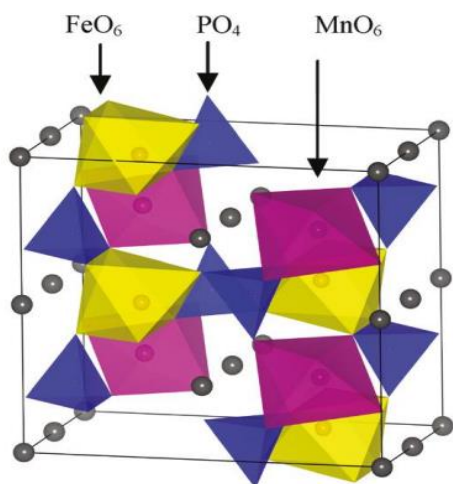


资料来源：电车汇、华安证券研究所

2.2 磷酸锰铁锂优势明显，高安全高能量密度低成本

磷酸锰铁锂具备较高的安全性。LMFP 被认为是磷酸铁锂的升级版，是在磷酸铁锂基础上掺杂大量锰元素得到的新型正极材料，其晶体结构和磷酸铁锂类似，都是有序的橄榄石结构，因此同样具有安全性能优异，化学性质稳定的特点。宁德新能源科技有限公司用 LMFP 软包电芯进行了穿钉、撞击、热箱及过充等多项安全测试均无明显明火无爆炸，实际验证了材料的高安全性。

图表 13 橄榄石型 $\text{LiFe}_{0.5}\text{MnPO}_4$ 的结构示意图



资料来源：《磷酸锰铁锂基正极材料的组成调控、制备优化与电化学性能研究》，华安证券研究所

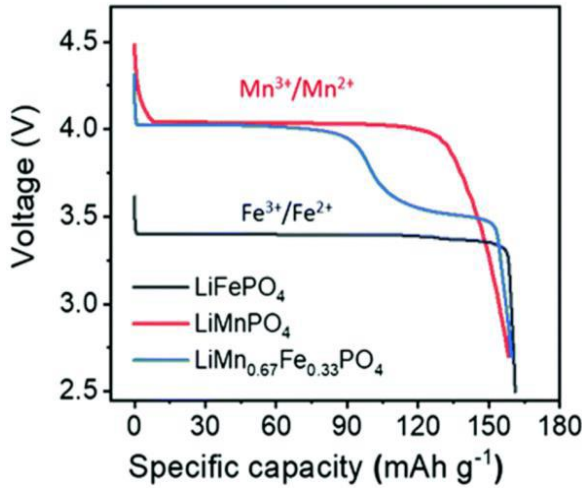
图表 14 LMFP 与 LFP 均通过安全测试

Test	LFP	LMFP
Vibration	3/3 Pass	3/3 Pass
Crush	3/3 Pass	3/3 Pass
Forced Discharge	3/3 Pass	3/3 Pass
Drop	3/3 Pass	3/3 Pass
Nail	3/3 Pass	3/3 Pass
Shock	3/3 Pass	3/3 Pass

资料来源：《以磷酸锰铁锂为正极的软包电池失效分析》，华安证券研究所

磷酸锰铁锂能量密度提升 15-20%。正极材料的选择会影响电池的容量性能，即能量密度，能量密度主要由克容量、压实密度、电压平台三个因素决定。由于磷酸锰铁锂的理论克容量与磷酸铁锂相同，均为 170mAh/g，目前主要采用和磷酸铁锂相同的固相法工艺流程，压实密度和磷酸铁锂类似，因此提升电压平台成为了提高磷酸锰铁锂能量密度，增加其竞争优势最可能的方向。而掺杂的锰元素具有高充电电压的特性，因此能够直接将磷酸锰铁锂正极材料的充电电压由磷酸铁锂的 3.4V 提升至 4.1V，使得电池能量密度理论提升 15-20%，体积能量密度在 460-480Wh/L 之间，能够进一步扩大续航范围。

图表 15 LMFP 较 LFP 有更高的放电平台



图表 16 LFP 与 LMFP 电化学性能对比

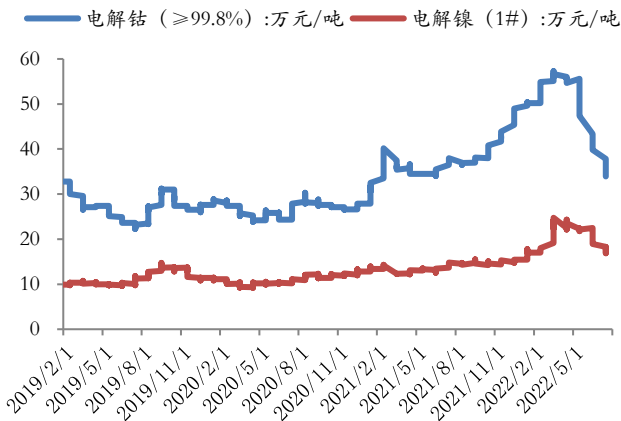
	LFP	LMFP
材料结构	橄榄石	橄榄石
导电性能	优秀	一般
压实密度 (g/cm ³)	2.3-2.6	2.3-2.6
电压平台 (V)	3.4	4.1
理论比容量 (mAh/g)	170	170
实际比容量 (mAh/g)	140-150	140-150
循环次数	2000-6000	2000

资料来源：《Reducing cobalt from lithium-ion batteries for the electric vehicle era》，华安证券研究所

资料来源：厦钨新能招股说明书，华安证券研究所

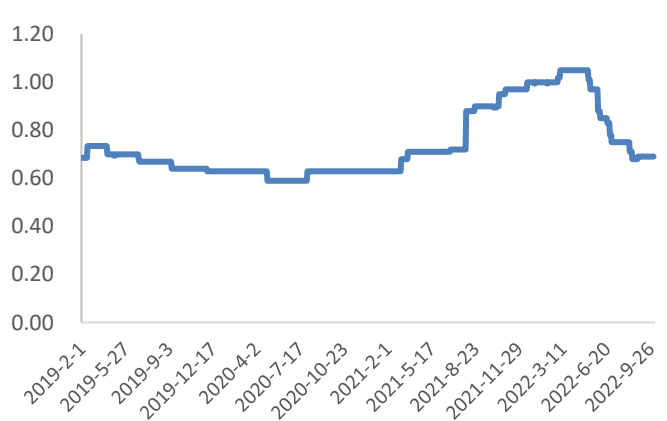
磷酸锰铁锂具备成本优势。原材料成本方面，2021 年以来，主流三元正极材料所需要的镍、钴等贵金属供应紧缺，价格大幅上涨，电池企业成本端压力增加，产能释放受限。而磷酸锰铁锂的稀缺资源依赖度低，锰、铁等金属易于获得且价格较低，能够满足锂电池行业未来大规模的放量。此外，制造磷酸锰铁锂只需要在原来磷酸铁锂生产线的基础上进行改造，不用新建产线，变动成本低，更具备经济性。

图表 17 钴镍价格走势 (万元/吨)



资料来源：鑫椏数据，华安证券研究所

图表 18 硫酸锰价格走势 (万元/吨)



资料来源：鑫椏数据，华安证券研究所

2.3 磷酸锰铁锂电导率差寿命短限制其发展

晶体结构导致倍率性能差。由于橄榄石晶体结构的电子电导率较差，而且结构内部只存在一维的传输通道，离子电子运输不畅，导致材料反应活性不高，低温性能不佳。

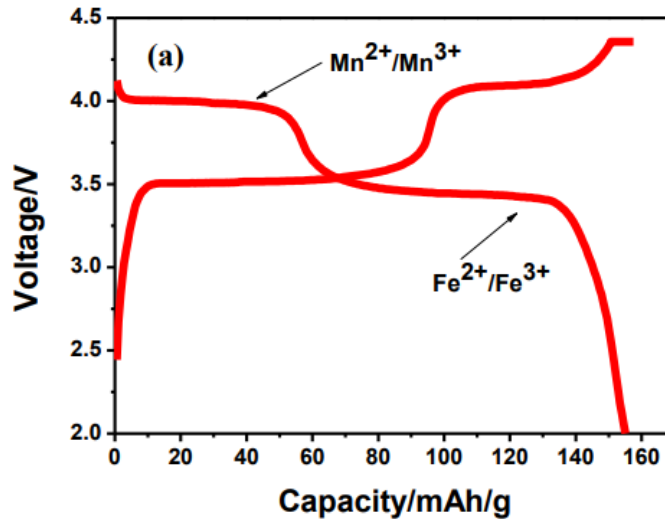
图表 19 NCM、LFP、LMFP 导电性能参数对比

	NCM	LFP	LMFP
锂离子扩散速率 (cm ² /s)	10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁴	10 ⁻¹⁵
电导率 (S/cm)	10 ⁻³	10 ⁻⁹	10 ⁻¹³

资料来源：《磷酸锰铁锂复合三元体系及对复合方式的研究》，华安证券研究所

锰析出导致循环寿命衰减。磷酸锰铁锂存在独特的锰析出问题，在充放电过程中，正极的锰元素会变价发生 Jahn-teller 效应，导致锰离子溶出，这样正极就会形成缺锰相，结构坍塌，带来锂离子脱嵌受阻，最终导致电池极化增大。同时溶解到电解液中的锰元素会沉积在负极表面，破坏 SEI 层结构，使得膜要不断再生修复，消耗大量活性锂，造成容量损失，循环性变差。

图表 20 LMFP 充放电有两个电压平台



资料来源：真锂研究、华安证券研究所

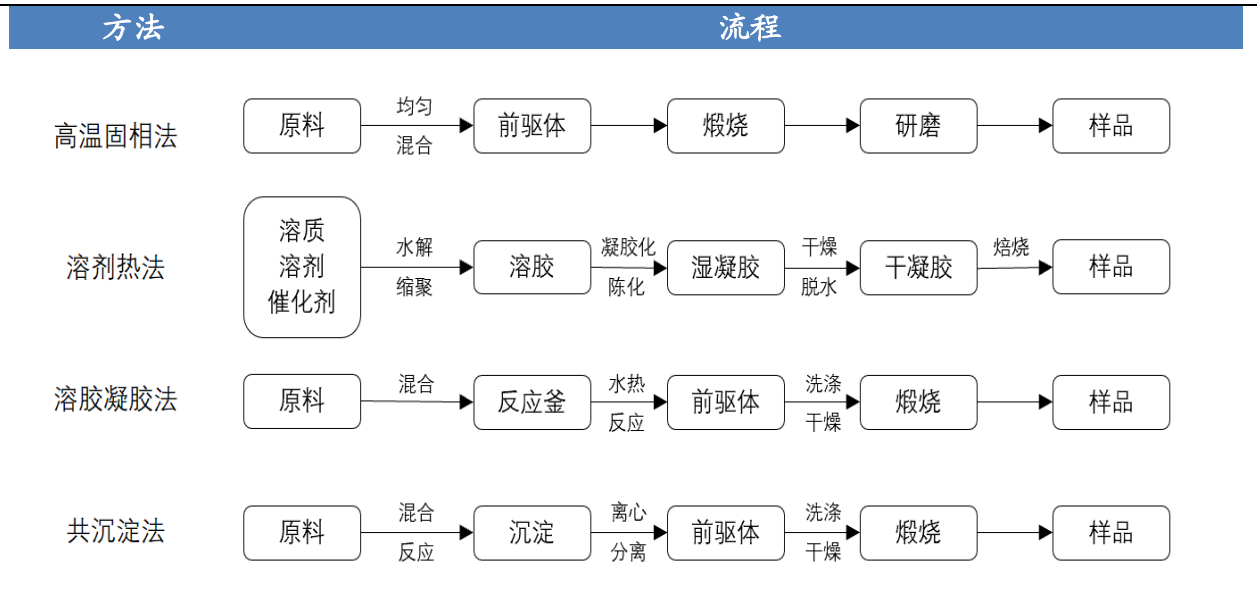
3 优化路线：锰铁比例是核心，改性技术是关键

3.1 固相法压实密度较高，产业化进展快

LMFP 制备方法主要有固相法和液相法两大类，其中固相法为主流。固相法包括高温固相法、碳热还原法等，液相法包括溶剂热法、溶胶凝胶法、半沉淀法等。固相法采用机械研磨的方式进行原材料的混合、反应，保证了材料的压实密度，再通过烧结在产物表面包覆碳源，提高材料导电性。液相法利用自发热设备将原材料全部溶解，从而实现分子级别更较均匀的结合，提高材料循环寿命。其中，高温固相法因其压实密度高、工艺简单、成本低廉、产量较高的特点，在实际工业制造中被广泛采用。液相法生产出的材料质量高，同时成本高，目前只有少数企业掌握液相法生产技术，德方纳米是液相法量产的龙头企业。此外，固相法在制备过程中还可以结合碳包覆、纳米化、掺杂等材

料改性过程，从而改善材料的化学性能。

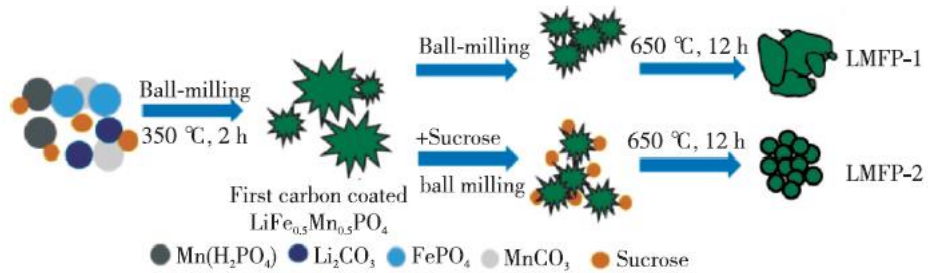
图表 21 传统制造工艺流程图



资料来源：《磷酸锰铁锂基正极材料的组成调控、制备优化与电化学性能研究》，华安证券研究所

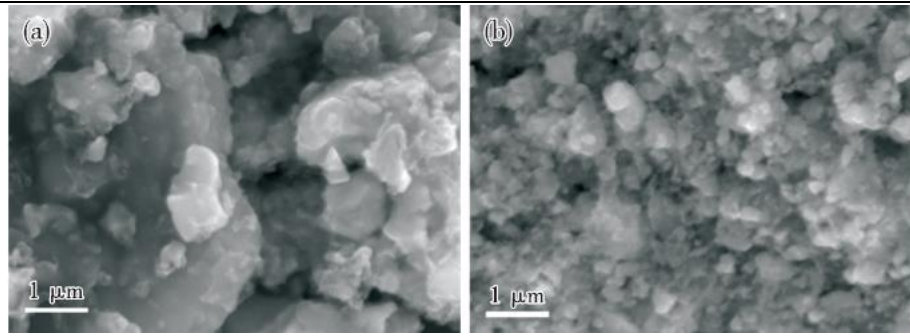
固相法工艺不断改善，二次包碳下的颗粒尺寸更加均匀。为解决固相法下材料混合不均匀问题，可按照物质的量比 0.5 0.5 1 :1 称取 $Mn(H_2PO_4)_2$ 、 $MnCO_3$ 、 $FePO_4$ 、 Li_2CO_3 ，再加入 25% (质量分数) 的蔗糖，将它们在水乙醇介质中以 400 r/min 的速度球磨 4 h (玛瑙球与原料的质量比为 10:1)，80 °C 烘干得到前驱体。将前驱体放入管式炉中，在 350 °C 的氩气氛围中预烧 2 h。在预烧的产物中加入 10% (质量分数) 的蔗糖，将所得样品在水乙醇介质中以 400 r/min 的速度球磨 2 h 进行二次包碳，再在 650 °C 下烧结 12 h，得到 $LiMn_{0.5}Fe_{0.5}PO_4/C$ 。

图表 22 引入二次包碳的高温固相法



资料来源：《改进高温固相法制备磷酸锰铁锂正极材料》，华安证券研究所

图表 23 一次包碳和二次包碳下的 LMFP 的 SEM 图

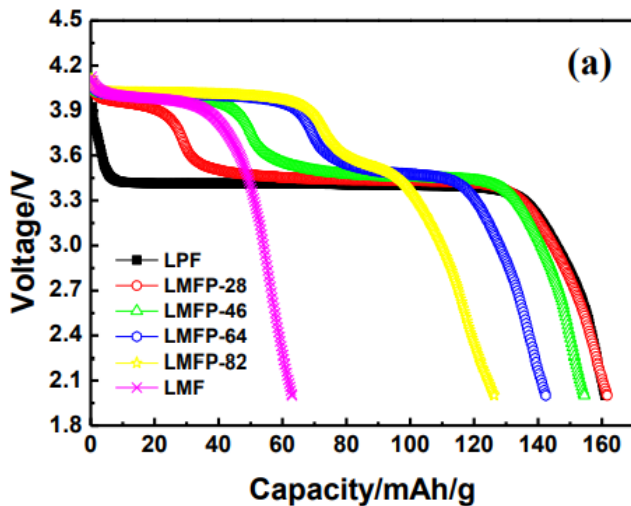


资料来源:《改进高温固相法制备磷酸锰铁锂正极材料》, 华安证券研究所

3.2 合适的锰铁比例带来性能更全面的提升

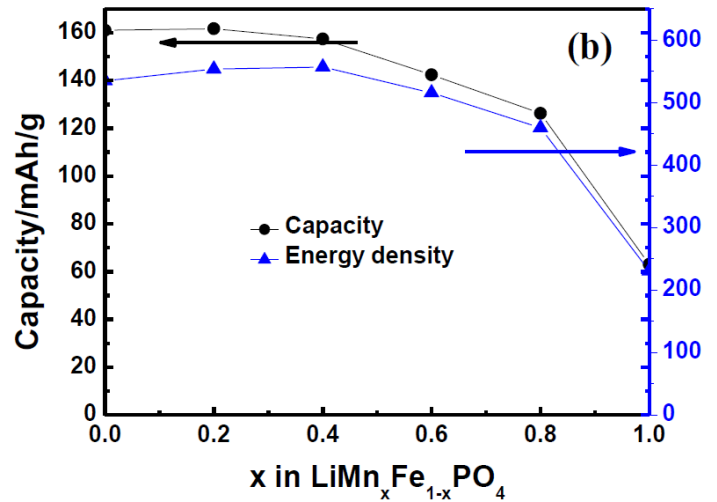
解决 LMFP 的固有缺陷, 需要抓住核心因素: 锰铁比例。锰、铁元素代表着材料的不同性能, 铁含量决定着锂电池导电性和倍率性能, 但过高的铁含量会使得 LMFP 性能接近 LFP, 而锰含量变化时, 材料中 Mn^{3+}/Mn^{2+} 和 Fe^{3+}/Fe^{2+} 氧化还原电势对应的平台所占的比容量也随之变化, 具体表现为锰含量的增加能够提高材料的能量密度, 并使电压从 3.5V 提高到 4.1V, 但过多的锰元素会使得锰析出比例过高, 发生 John-Teller 效应, 破坏固溶体结构, 使得材料的比容量降低, 而且衰减快速, 容量维持率很低、循环性差, 进而不适合用作锂离子电池正极原料。

图表 24 不同锰铁比例的 LMFP 放电曲线



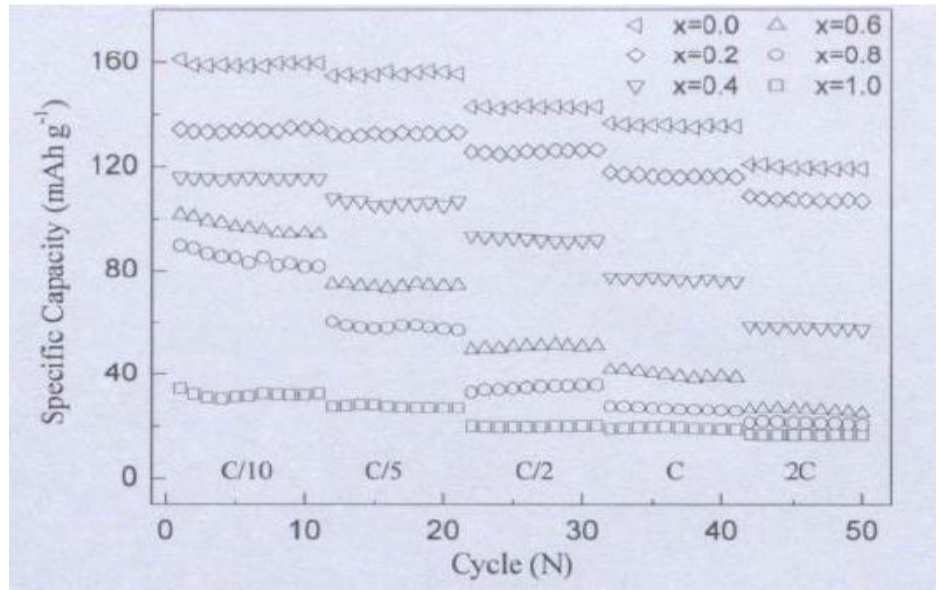
资料来源:《橄榄石型锂离子电池正极材料的制备技术及电池特性研究》, 华安证券研究所

图表 25 不同锰铁比例的 LMFP 克容量和能量密度变化



资料来源:《橄榄石型锂离子电池正极材料的制备技术及电池特性研究》, 华安证券研究所

图表 26 不同锰铁比例的 LMFP 倍率性能



资料来源：《高性能磷酸锰铁锂正极材料的制备及其性能研究》、华安证券研究所

不同的锰铁比例会对材料性质产生截然不同的影响，选择合适的掺杂比例，既能够有效结合锰铁两种元素的优势特点，还能避免某一元素过量带来的材料电化学性能出现偏差甚至恶化。实验表明当锰与铁含量的比例为 4:6 时，该系列材料的能量密度达到最大值，为 $557 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$ ；而当锰含量继续提高后，由于比容量的大幅下降会造成能量密度的逐步降低。目前在实际工业制备中，锰铁比例并没有一个普遍共识，但一般都在 1:1 以上。

图表 27 锰掺杂比例对磷酸锰铁锂材料性能的影响

$\text{LiMn}_x \text{Fe}_{1-x} \text{PO}_4$	放电克容量 (mAh/g)	放电电压 (V)	实际能量密度 (Wh/K)
X=0	161.0	3.41	534.9
X=0.2	161.7	3.44	553.5
X=0.4	157.4	3.48	557.0
X=0.6	142.4	3.65	515.8
X=0.8	126.3	3.96	459.9
X=1.0	63.0	3.95	230.6

资料来源：《橄榄石型锂离子电池正极材料的制备技术及电池特性研究》，华安证券研究所

3.3 改性技术是关键，占据先发技术优势

改性技术可改善材料电化学性能。在解决 LMFP 电子电导率低、锂离子扩散速率慢等问题时，除了改善锰铁比例，还可以在传统制造工艺过程中添加改性技术，提高材料的电化学性质，达到“1+1>2”的效果。常用的改性技术有纳米化、掺杂以及包覆，随着改性技术的进步，LMFP 产业化进程也开始加速。

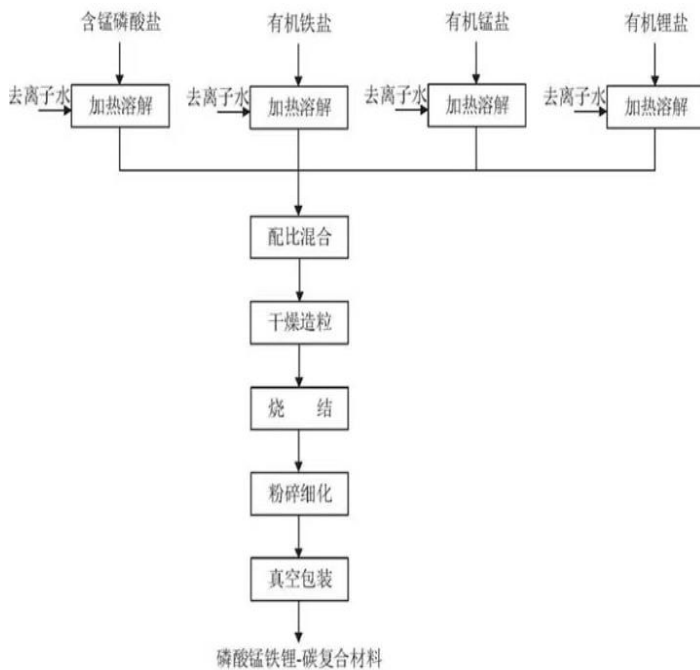
图表 28 磷酸锰铁锂产业化难题及解决办法

产业化难题	原因	解决路径	备注
导电性能较差	锰电导电率低，接近绝缘体	小粒径化	小粒径降低压实密度
		碳包覆	锰与碳亲和性较低，锰铁需要充分混合
		碳纳米管	成本增加
压实密度低	粒径较小	烧结工艺改善	成本增加
循环性能差	锰电导率低，接近绝缘体 与常规电解液发生副反应	加锂/富锂材料/锂箔补锂	成本增加
		寻找合适电解液	

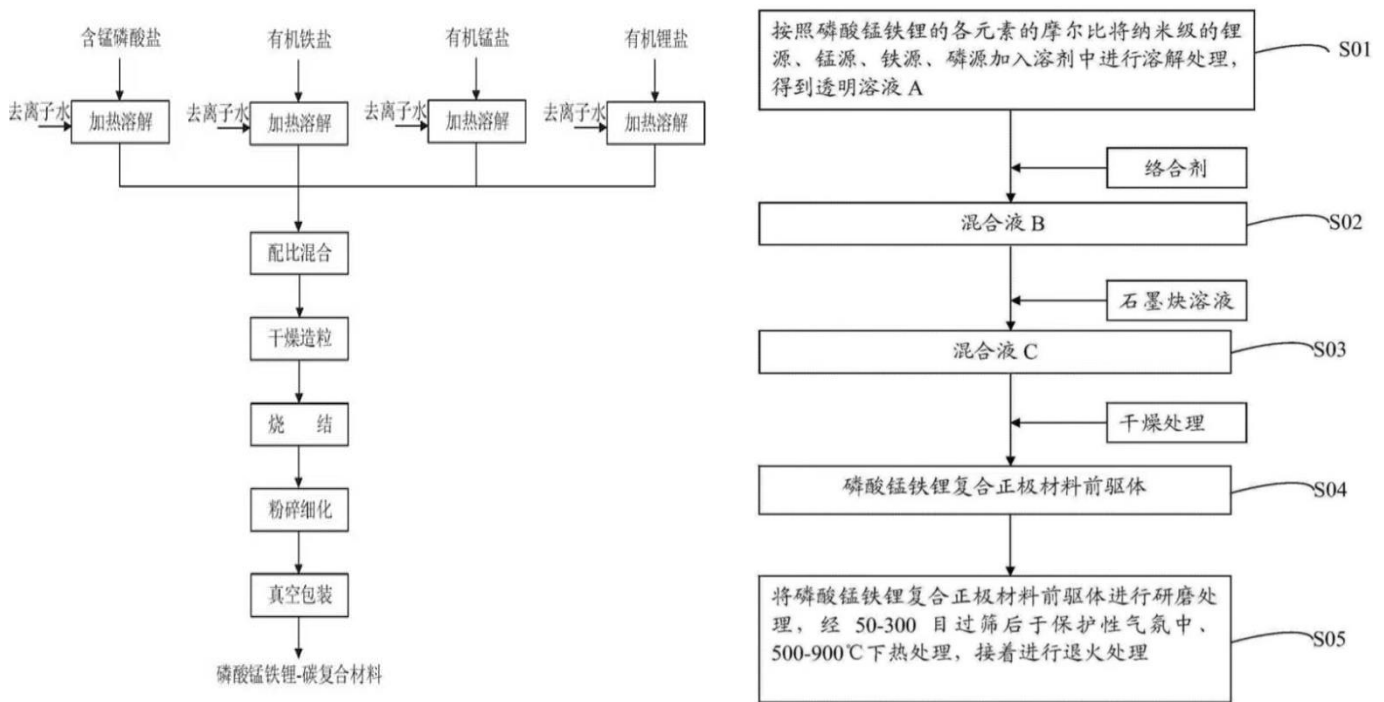
资料来源：《锂离子电池正极材料原理、性能与生产工艺》，华安证券研究所

纳米化提升材料倍率性能和低温性能。纳米化是指通过机械球磨、控制煅烧温度、采用超导粒子作为核促进剂等多种方式将晶粒细化至纳米量级。纳米化颗粒可以缩短锂离子扩散路径，提高离子传输速率、从而改善倍率性能和低温性能。同时还能提升材料比表面积，使得电解液浸润程度更高，降低电极界面阻抗，提升电子导电性。

图表 29 磷酸锰铁锂-碳复合材料制备流程



图表 30 德方纳米 NCM 表面包覆 LMFP 示意图

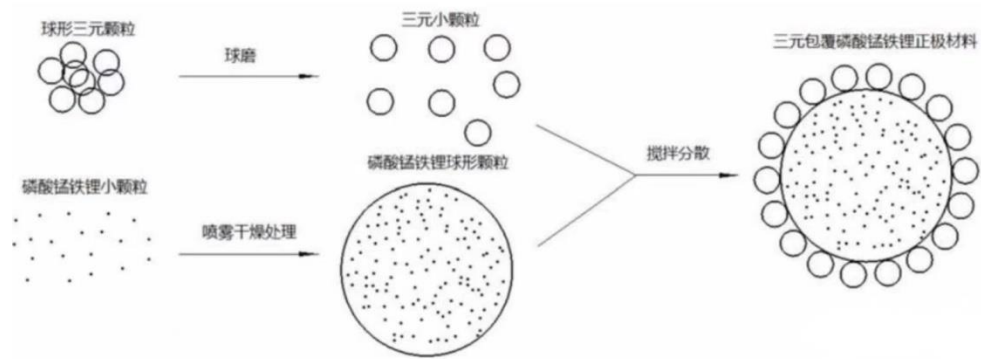


资料来源：力泰锂能专利《制备磷酸锰铁锂-碳复合材料的方法》和磷酸锰铁锂-碳复合材料》，华安证券研究所

资料来源：德方纳米专利《磷酸锰铁锂复合正极材料及制备方法、正极和锂电池》，华安证券研究所

均匀、连续、厚度适中的材料包覆能明显优化材料的电化学性能。由于 LMFP 的电子导电率较低，将导电材料包覆在颗粒表面，可以在一定程度上能减小导电阻力，提供有效的锂离子扩散通道，同时防止颗粒团聚、提升均一性，从而提高材料的电导率、稳定性，控制颗粒尺寸。同时，表面包覆能够抑制一部分锰离子的析出，提高电池循环寿命。在实际应用中，碳材料是进行包覆时的首选材料。

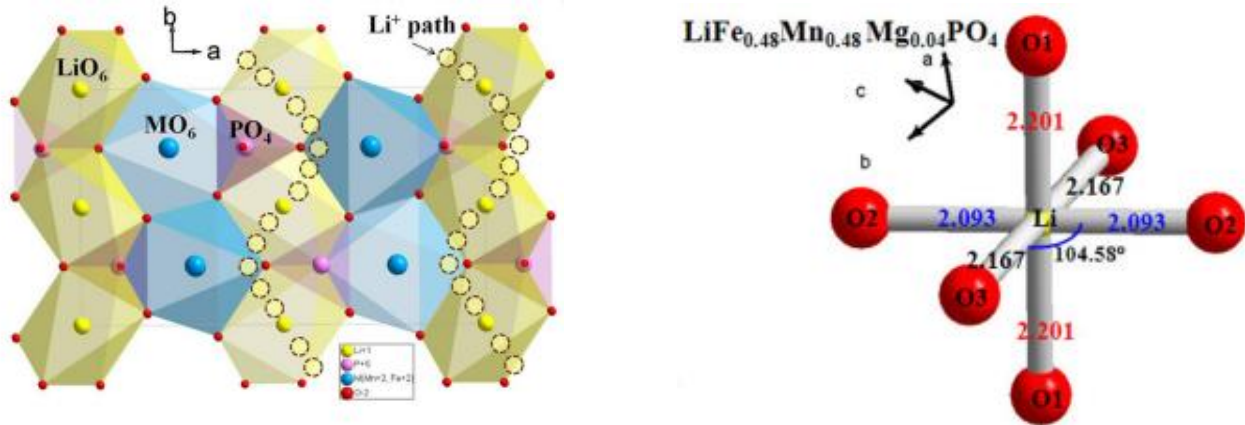
图表 31 德方纳米 NCM 表面包覆 LMFP 示意图



资料来源：德方纳米专利《磷酸锰铁锂复合正极材料及制备技术》，华安证券研究所

离子掺杂能够提升材料内部电化学性能。导电物质的包覆仅能提高正极材料表层的导电性，材料尺寸的缩小也是有限的，此时若想要进一步提升材料在大倍率条件下的电化学性能，提高材料内部的本体导电性是一个可发展方向。其工作原理是加入碳材料或者金属离子，通过离子占位，增大晶格参数，提高电导率，或者减少晶格参数形成空穴，提高离子电导率以及材料电容量，但过量的金属离子掺杂会使得结构异化。因此合理地 LMFP 进行体相离子掺杂，能够有效提高材料本身内部的导电性。

图表 32 $\text{LiFe}_{0.48}\text{Mn}_{0.48}\text{Mg}_{0.04}\text{PO}_4$ 材料结构



资料来源：《磷酸锰铁锂基正极材料的组成调控、制备优化与电化学性能研究》，华安证券研究所

4 应用领域丰富，产业化进程加速

4.1 LMFP 市场空间测算

LMFP 复合性强，应用范围广，发展潜力大。按材料应用方式划分，LMFP 的未来主要发展方向有两个：一是纯 LMFP 锂电池的产业化应用。LMFP 锂电池相对于三元电池，安全性更高、成本优势更明显，相对于 LFP，能量密度更高，因此会逐步或部分替代铁锂和中低镍三元材料，主要应用于储能市场和中低端动力市场。二是与其他材料复合使用，取长补短，提升材料整体性能。由于 LMFP 粒径小，可以嵌入到 NCM、LCO 等材料结构中构成新型材料，综合各自优势，全面提升材料性能。

图表 33 正极材料粒度分布 (μm)

材料名称	D _{min}	D ₁₀	D ₅₀	D ₉₀	D _{max}
三元	3.55	6.69	11.64	19.46	31.62
磷酸锰铁锂	0.36	2.34	6.58	12.66	22.91
复合材料	0.36	4.34	9.89	18	30.2

资料来源:《磷酸锰铁锂复合三元体系及对复合方式的研究研究》,华安证券研究所

车用动力电池领域,LMFP 纯用复合均有优势,前景广阔。随着全球电动汽车进程加速,电动汽车电池的产量也在持续创新高,2021 年全球动力四轮车销量为 650 万台,同比增长 100%。2022 年 3 月,比亚迪正式宣布停止燃油汽车的整车生产,也意味着燃油车在国内市场进入淘汰阶段,后续也会有更多整车企业效仿比亚迪,从燃油车市场慢慢的退出,转型专注于新能源汽车整车的生产,全球电动化进程加速。

受新能源汽车销量提振,动力电池需求上升。2021 年全球动力电池装机量为 296.8GWh,同比增长 104%。我们预计到 2025 年全球动力电池装机量将达到 1306GWh,其中 LFP 占比 40%,三元电池占比下降至 59%。LMFP 作为 LFP 的重要升级方向,将会逐步替代 LFP 在锂电池中的应用,我们预计到 2025 年 LMFP 对 LFP 渗透率为 15%。另一方面 LMFP 可作为“稳定剂”,与三元材料复合使用。目前,德方纳米已提出的 NCM 表面包覆 LMFP 方案,LMFP 的加入能够有效提高混合正极的稳定性、降低成本,该复合材料具有高能量密度、高安全性、良好低温性能等多方面优势,能够促进 LMFP 与三元 5 系更进一步的复合,随着相关技术及复合材料的发展,LMFP 将逐步渗透三元复合材料中,我们预计 2025 年复合材料的全球市场占比达到 15%。由此我们测算 2025 年,LMFP 在动力电池领域需求将会达到 80.70GWh。

图表 34 全球车用动力电池领域 LMFP 需求测算

		2022E	2023E	2024E	2025E
全球电动车	总计	1040.00	1508.00	2035.80	2646.54
销量(万台)	yoy	60%	45%	35%	30%
全球动力电池装机量(GWh)	总计	460.04	676.26	946.76	1306.53
	yoy	55%	47%	40%	38%
	LFP%	30%	33%	36%	40%
	NCM%	69%	66%	63%	59%
	5系 NCM%	12%	12%	11%	10%
	LMFP 替代 LFP	0%	5%	10%	15%
LMFP 渗透率假设(%)	NCM+LMFP 复合材料	0%	5%	10%	15%
	复合材料中 LMFP%	20%	20%	20%	20%
LMFP 需求(GWh)		0	11.67	35.37	80.70

资料来源: TrendForce, EV Tank, Marklines, 中汽协, Wind, 华安证券研究所测算

两轮电动车领域,高性价比 LMFP 市场份额快速推进。随着新国标的推行以及锂电池成本的快速下降,锂电池的渗透率快速提升,锂电两轮电动车销量占比也逐年提升。考虑到小动力对性能要求不高,安全性高、成本低的 LFP 更多被应用在两轮电动车领域。据测算,2025 年全球两轮电动车中 LFP 占比或达 35%,三元或锰酸锂占比达 65%。

此外，LMFP+LMO 在两轮电动车领域被认为是性价比最高的锂电系统之一，复合锰酸锂凭借高安全性和长循环寿命等优势，在中国已进入产业化生产阶段。具体地，天能股份已经推出相应的超能锰铁锂电池应用在小牛电动二轮车中；常州锂源与星恒电源也就磷酸锰铁锂达成战略合作。海外市场中，日本是最早开始推广电踏车的地区，因为其老龄化问题日渐突出，电踏车需求较大；欧洲具有良好的骑行文化，电踏车率不断上升，提升空间较大；美国电踏车起步最晚，在 2020 年疫情催化下，电踏车销量大幅上升，未来有望持续增长。据此我们测算出 2025 年全球电动自行车锂电池需求为 96GWh，LMFP 凭借其更明显的性能和成本优势，需求可达 18.43GWh。

图表 35 全球电动自行车领域 LMFP 需求测算

		2022E	2023E	2024E	2025E
全球电动自行车锂电池需求量 (GWh)	总计	50	67	83	96
	LFP 占比	25%	28%	30%	35%
LMFP 渗透率假设 (%)	三元或锰酸锂占比	75%	72%	70%	65%
	LMFP 替代 LFP	5%	10%	20%	40%
LMFP 渗透率假设 (%)	LMFP 与三元或锰酸锂复合	5%	10%	20%	40%
	复合材料中 LMFP%	20%	20%	20%	20%
LMFP 需求 (GWh)		1	2.84	7.30	18.43

资料来源：中国自行车协会，SNE Research，华安证券研究所测算

储能领域，LMFP 比 LFP 更具能量密度优势。近年来，随着双碳政策的推进、补贴的增加，全球电化学储能项目规模不断扩大，并且新增电化学储能中超过 90% 的项目都是锂离子电池储能，截至 2021 年，我国在储能领域使用 LFP 电池占比已超过 94%。

根据政府制定的《新型储能指导意见》，我国以锂离子电池为主的新型储能市场规模要从 2020 年的 3.3GW 增加到 2025 年的 30GW，5 年增长 8 倍左右，年复合增长率超过 55%。同时海外各大储能主力市场如欧洲、日本、美国等也相继出台各种政策补贴，储能电池需求暴增。相继出台的利好政策以及日益凸显的经济空间都表明储能领域巨大的发展潜力。我们估计全球储能电池需求量到 2025 年为 500GWh，作为 LFP 重要技术改革方向，我们预测在储能领域，到 2025 年 LMFP 对 LFP 替代率为 10%，需求或达到 45GWh。

图表 36 全球储能电池领域 LMFP 需求测算

		2022E	2023E	2024E	2025E
全球储能电池需求量 (GWh)	总计	80	200	350	500
	磷酸铁锂占比	60%	70%	80%	90%
LMFP 渗透率假设 (%)	LMFP 替代 LFP	0%	2%	5%	10%
LMFP 需求 (GWh)		0	2.8	14	45

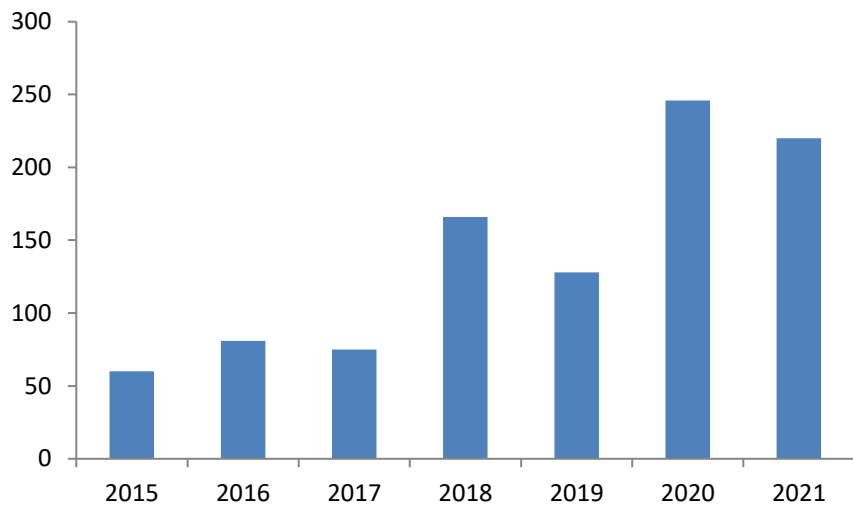
资料来源：Marklines，高工锂电，真锂研究，华安证券研究所测算

综合以上，我们预计到 2025 年磷酸锰铁锂电池市场需求有望达到 144.13GWh。

4.2 专利申请数增加，电池厂、材料厂加快布局

LMFP 作为 LFP 重要升级方向，众多锂电企业均已开始进行相关专利的研发及产线布局。目前磷酸锰铁锂相关专利数量逐年攀升，由于铁锂是半导体，而锰铁锂是绝缘体，锰铁锂的颗粒很小导致加工技术路线很难，且目前行业没有一家统一技术路线，具备很高的技术壁垒，优先掌握关键技术，拥有核心专利的企业具有优势。产线方面，企业纷纷开展相关技术研发，同时部分正极材料厂商（德方纳米、百川股份、光华科技、当升科技等）、电池厂商（宁德时代、国轩高科、天能股份等）积极推进 LMFP 产业化的相关测试研究，披露规模化扩产计划，产业化进程加快。因此未来兼备工艺专利技术以及大规模量产的公司或有先发优势。

图表 37 2015-2021 年磷酸锰铁锂相关专利申请数



资料来源：企知道专利数据库，华安证券研究所

图表 38 LMFP 产业化进展

企业	LMFP 产业化进展
德方纳米	2021 年 9 月，公司建设“年产 10 万吨新型磷酸盐系正极材料生产基地项目”，项目投资额不低于人民币 20 亿元。2022 年 7 月，公司表示该产品已开始送样，预计一两年后可实现产业化。
当升科技	2021 年半年报中披露，公式正在针对电动车和高端储能市场专项开发高性能的磷酸铁锂、磷酸锰铁锂材料。
宁德时代	2015 年申请专利——锂离子蓄电池复合正极材料及其制备方法，公开了一种磷酸锰铁锂和石墨烯复合正极材料及其制备方法。 2022 年 7 月，宁德时代、欣旺达、亿纬锂能的磷酸锰铁锂电池已在今年上半年通过电池中试环节，正在送样品给车企测试，积极推荐量产规划。
天能股份	2020 年研发 18650 磷酸锰铁锂电芯。
百川股份	2020 年，企业相关项目整体产品规模为年产 10 万吨磷酸铁、1.5 万吨磷酸铁锂、1.5 万吨磷酸锰铁锂，项目分期实施。
力泰锂能	公司现有 2000 吨磷酸锰铁锂生产线。公司计划 2021 年 9 月至 2022 年 3 月期间，新增建设年产 3000 吨磷酸锰铁锂设备，新建年产 2000 吨磷酸锰铁锂前躯体装置。

资料来源：公司公告，华安证券研究所

5 重点公司

5.1 德方纳米

企业研发实力雄厚，具有技术优势。企业掌握了可制备高质量 LMFP 的液相法，是行业内少有的用液相法进行 LMFP 量产的企业，技术优势明显。截至 2022 年 3 月，公司拥有 9 项与 LMFP 有关的专利授权，2021 年投资研发投入 1.6 亿元。

积极扩张磷酸锰铁锂产能。2021 年 9 月和 2022 年 1 月分别签订年产 10 万吨、33 万吨新型磷酸盐系正极材料生产基地项目，规划产能合计 43 万吨，预计 10 万吨新型正极产能 2022 年底投产，23 年贡献出货量。新型磷酸盐系电压平台较高，具备较高能量密度，竞争优势明显。

5.2 宁德时代

M3P 量产在即。宁德时代、欣旺达、亿纬锂能合作生产的 M3P 电池掺杂了 30%~70% 的磷酸锰铁锂，且已在今年上半年通过电池中试环节，送样品给车企测试，量产在即。

公司研发体系完善，科研实力雄厚，硕士及以上占比达 20%；在磷酸锰铁锂的研发方面具备前瞻性，2015 年申请专利——锂离子蓄电池复合正极材料及其制备方法，公开了一种磷酸锰铁锂和石墨烯复合正极材料及其制备方法。

5.3 当升科技

专业化研发布局，布局电动车和储能领域，蓄势待发。公司有成熟的技术储备、工艺制备流程，自 2021 年开始研发针对电动车和储能领域的高性能磷酸锰铁锂材料；今年 7 月当升科技在新品发布会上说明已在磷酸锰铁锂生产的前驱体阶段解决了 Mn/Fe 的原子级融合问题，且产线可以和 LFP 共用。未来规划在贵州基地建设年产 30 万吨产能。

5.4 光华科技

PCB 化学品龙头，布局磷酸锰铁锂优势明显。公司作为国内的 PCB 化学品龙头，加速布局新能源材料和退役动力电池梯次利用及再生利用等领域。公司拟在汕头投资 2.47 亿元建设年产 3.6 万吨磷酸锰铁锂及磷酸铁正极材料项目。公司制备的磷酸锰铁锂的设备及工艺简单，易于进行工业化生产，通过控制终产物的粒径，提高了磷酸锰铁锂作为电池正极材料的放电比容量，且同时具备安全性高，耐低温性能较好，电压平台较高，能量密度高等优势，竞争优势明显。

风险提示

新能源汽车、储能发展不及预期。若新能源汽车、储能发展增速放缓不及预期，产业政策临时性变化，补贴退坡幅度和执行时间预期若发生变化，对新能源汽车产销量、储能造成冲击，直接影响行业发展。

相关技术出现颠覆性突破。若其他电池技术出现颠覆性突破，造成锂电池产业链出现风险，相关政策执行力度减弱，锂电池销售不及预期。

行业竞争激烈，产品价格下降超出预期。可能存在产品市占率下降、产品价格下降超出预期等情况。

磷酸锰铁锂产能扩张不及预期、产品开发不及预期。若建立新产能进度落后，新产品开发落后，造成供应链风险与产品量产上市风险。

分析师与研究助理简介

华安证券新能源与汽车研究组：覆盖电新与汽车行业

陈晓：华安证券新能源与汽车首席分析师，十年汽车行业从业经验，经历整车厂及零部件供应商，德国大众、大众中国、泰科电子。

宋伟健：五年汽车行业研究经验，上海财经大学硕士，研究领域覆盖乘用车、商用车、汽车零部件，涵盖新能源车及传统车。

牛义杰：新南威尔士大学经济与金融硕士，曾任职于银行总行授信审批部，一年行业研究经验，覆盖锂电产业链。

重要声明

分析师声明

本报告署名分析师具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格，以勤勉的执业态度、专业审慎的研究方法，使用合法合规的信息，独立、客观地出具本报告，本报告所采用的数据和信息均来自市场公开信息，本人对这些信息的准确性或完整性不做任何保证，也不保证所包含的信息和建议不会发生任何变更。报告中的信息和意见仅供参考。本人过去不曾与、现在不与、未来也将不会因本报告中的具体推荐意见或观点而直接或间接接收任何形式的补偿，分析结论不受任何第三方的授意或影响，特此声明。

免责声明

华安证券股份有限公司经中国证券监督管理委员会批准，已具备证券投资咨询业务资格。本报告由华安证券股份有限公司在中华人民共和国（不包括香港、澳门、台湾）提供。本报告中的信息均来源于合规渠道，华安证券研究所力求准确、可靠，但对这些信息的准确性及完整性均不做任何保证。在任何情况下，本报告中的信息或表述的意见均不构成对任何人的投资建议。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。投资者务必注意，其据此做出的任何投资决策与本公司、本公司员工或者关联机构无关。华安证券及其所属关联机构可能会持有报告中提到的公司所发行的证券并进行交易，还可能为这些公司提供投资银行服务或其他服务。

本报告仅向特定客户传送，未经华安证券研究所书面授权，本研究报告的任何部分均不得以任何方式制作任何形式的拷贝、复印件或复制品，或再次分发给任何其他人，或以任何侵犯本公司版权的其他方式使用。如欲引用或转载本文内容，务必联络华安证券研究所并获得许可，并需注明出处为华安证券研究所，且不得对本文进行有悖原意的引用和删改。如未经本公司授权，私自转载或者转发本报告，所引起的一切后果及法律责任由私自转载或转发者承担。本公司并保留追究其法律责任的权利。

投资评级说明

以本报告发布之日起 6 个月内，证券（或行业指数）相对于同期相关证券市场代表性指数的涨跌幅作为基准，A 股以沪深 300 指数为基准；新三板市场以三板成指（针对协议转让标的）或三板做市指数（针对做市转让标的）为基准；香港市场以恒生指数为基准；美国市场以纳斯达克指数或标普 500 指数为基准。定义如下：

行业评级体系

- 增持—未来 6 个月的投资收益率领先市场基准指数 5%以上；
- 中性—未来 6 个月的投资收益率与市场基准指数的变动幅度相差-5%至 5%；
- 减持—未来 6 个月的投资收益率落后市场基准指数 5%以上；

公司评级体系

- 买入—未来 6-12 个月的投资收益率领先市场基准指数 15%以上；
- 增持—未来 6-12 个月的投资收益率领先市场基准指数 5%至 15%；
- 中性—未来 6-12 个月的投资收益率与市场基准指数的变动幅度相差-5%至 5%；
- 减持—未来 6-12 个月的投资收益率落后市场基准指数 5%至；
- 卖出—未来 6-12 个月的投资收益率落后市场基准指数 15%以上；
- 无评级—因无法获取必要的资料，或者公司面临无法预见结果的重大不确定性事件，或者其他原因，致使无法给出明确的投资评级。