

再探“门口的野蛮人”

——特斯拉电池日前瞻专题报告

行业深度

◆技术迭代驱动电池发展，特斯拉引领行业

回顾 200 多年的发展历史，总体来看，电池向更高的能量密度（体积 & 重量）发展，此外，安全性、循环性及成本等因素也影响电池的商业化应用。就汽车领域来看，车用动力电池发展主要经历了镍氢/锰酸锂-磷酸铁锂-三元锂电三个阶段，电池性能持续优化，成本不断下降。电池环节的技术更新会带来风险但也伴随着机遇，因此关注技术路线十分重要；特斯拉搭载的动力电池始终引领行业，有必要对其电池战略加以重视。

◆材料层面：无钴化、硅碳负极、电解液添加剂、碳纳米管

对于三元电池，镍含量的增加有助于提升能量密度，钴的成本较高，因此高镍低钴电池成为重要的发展趋势，特斯拉已申报单晶 NCA 材料的制备专利；高镍三元电池的循环性较差，因此可以通过掺杂元素形成四元电池或者改性包覆来改善电池寿命，Jeff Dahn 团队在 2019 年提出了 Al_2O_3 涂层如何提升正极材料性能的新见解；磷酸铁锂电池具有低成本、长寿命等优势，宁德时代将为特斯拉供应磷酸铁锂电池。电解液添加剂具有抑制阻抗等作用，过去几年，Jeff Dahn 对 DMI、ODTO 等电解液添加剂进行了研究，特斯拉于 2018 年提交了名称为《二恶唑酮与亚硫酸酯作为锂电池电解液添加剂》的专利文件。碳纳米管可以使锂电池循环过程中保持良好的电子和离子传导，从而大幅提升锂电池的循环寿命。

◆结构层面：CTP、刀片电池方案

整合精简电芯、模组硬件成为动力电池降本的重要路径之一。2019 年 9 月，宁德时代推出了全新的 CTP 方案，可以使空间利用率提升 15%-20%，零件数量减少 40%，能量密度提升 10%-15%。比亚迪开发的“刀片电池”将于 2020 年量产，体积比能量密度提升 50%，比亚迪“汉”将搭载该电池，计划于 2020 年 6 月上市。

◆工艺层面：干电极、预补锂

干电极是一种极片制作工艺，与湿法电极相比，（1）会节省一部分设备投资，同时生产效率提升；（2）节省溶剂成本，但降本效果较小，粘结剂存在变化的可能性；（3）可降低阻抗，提升极片材料厚度，进而提升电池性能。预补锂技术可以通过预锂化对电极材料进行补锂，抵消形成 SEI 膜造成的不可逆锂损耗，从而提升锂电池的首次充放电效率。

◆其他体系：超级电容、固态电池

超级电容是物理式储能装置，优点包括快速充电、循环性极好、安全性好等，缺点主要是能量密度很低，不到锂电池的 10%。未来超级电容+锂电池结合的技术路线值得关注。向全固态电池过渡是锂电技术进步的重要趋势，目前全球都在加快固态电池的研发，但距离商业化应用尚需时日。

◆投资建议：

电池的技术更新会出现新的投资机会。特斯拉于 2019 年收购了 Maxwell 和 Hibar，并且与著名的锂电池专家 Jeff Dahn 合作多年，也正在与宁德时代进行联合研究。我们通过公开信息整理了一些主流的技术创新方向，涉及企业包括宁德时代、德方纳米、贝特瑞、璞泰来、新宙邦、赣锋锂业、巨化股份等，建议投资者积极关注相关企业。

◆风险分析：政策风险、技术路线变更风险、竞争加剧风险、原材料价格波动风险、疫情持续时间过长的风险。

新能源汽车行业

买入（维持）

分析师

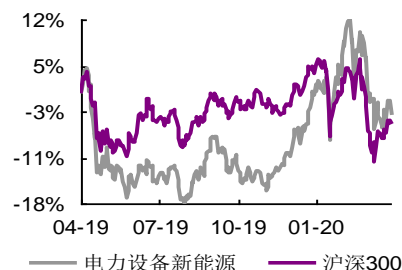
李伟峰（执业证书编号：S0930514050002）
021-52523820
liweifeng@ebsecn.com

赵启超（执业证书编号：S0930518050002）
010-58452072
zhaogc@ebsecn.com

倪昱婧（执业证书编号：S0930515090002）
021-52503876
niyj@ebsecn.com

马瑞山（执业证书编号：S0930518080001）
021-52523850
mars@ebsecn.com

行业与上证指数对比图



资料来源：Wind

投资聚焦

研究背景

过去 200 多年以来，技术进步始终推动电池向能量密度更高、成本更低的方向演进。车用动力电池总体经历了镍氢/锰酸锂/钴酸锂-磷酸铁锂-三元锂电三个阶段，电池性能持续优化，成本不断下降。特斯拉是全球电动车龙头，致力于改变世界能源结构，推动世界向可再生能源转变，其电池技术始终引领行业。

近两年，特斯拉相继收购了超级电容龙头 Maxwell 和电池制造企业 Hibar，这两家公司可能助力特斯拉生产电池；研发方面，加拿大 Dalhousie 大学的 Jeff Dahn 团队为特斯拉的电池开发提供了支持，也正在与宁德时代合作开发新型电池。

电池的技术更新会催生新的投资机会，而特斯拉的动力电池始终引领行业，我们通过本篇报告全面梳理了未来的技术方向，对特斯拉“电池日”进行展望。

创新之处

结合 Jeff Dahn 团队的学术文章、特斯拉的专利以及 Maxwell 和 Hibar 的公开资料，我们从材料层面、结构层面、工艺层面全面梳理了特斯拉在锂电池方面的技术研究方向，此外也展望了固态电池、超级电容等其他的电池体系，最终梳理出相关上市公司供投资者参考。

投资观点

继续提升能量密度、改善循环寿命以及降低成本是特斯拉在锂电池研发方面的主要目标。我们认为，材料层面和工艺层面的创新是特斯拉的重点布局方向，其中材料层面的具体方向包括无钴化（高镍+包覆改性等）和电解液添加剂等，工艺层面的具体方向包括预补锂和干电极技术等。建议投资者积极关注相关企业。

表 1：技术方向及涉及的上市公司

技术方向	具体方案	涉及企业
材料层面	无钴化	三元/四元/改性：当升科技、容百科技等；磷酸铁锂：德方纳米、湘潭电化、贝特瑞等
	硅碳负极	贝特瑞、璞泰来、杉杉股份、中科电气等
	电解液添加剂	新宙邦、天赐材料等
	碳纳米管	天奈科技、德方纳米等
结构层面	CTP 方案	宁德时代、回天新材等
	刀片电池方案	比亚迪等
工艺层面	干电极	巨化股份、昊华科技等
	预补锂	赣锋锂业等
其他体系	超级电容	江海股份、新筑股份等
	固态电池	宁德时代、比亚迪、赣锋锂业、珈伟股份等

资料来源：光大证券研究所整理

目 录

1、 技术迭代驱动电池发展，特斯拉引领行业	6
1.1、 历史回顾：技术进步推动电池产业发展	6
1.2、 特斯拉：引领电池技术迭代方向	7
2、 材料层面	11
2.1、 无钴化：中短期重要的降本增效手段	11
2.2、 硅碳负极：提升能量密度的重要手段	17
2.3、 电解液添加剂：降低阻抗，提升循环性	18
2.4、 碳纳米管：性能优异的新型导电剂材料	19
3、 结构层面	22
3.1、 CTP 方案：降本效果显著	22
3.2、 刀片电池方案：磷酸铁锂电池体积能量密度大幅提升	23
4、 工艺层面	27
4.1、 干电极：可拓展至锂电池，实现降本增效	27
4.2、 预补锂：提升首效，改善性能	31
5、 其他体系	33
5.1、 超级电容：探索与锂电结合的可能性	33
5.2、 固态电池：下一代锂电技术	35
6、 投资建议	39
7、 风险分析	40

图 目 录

图 1：电池发展历史.....	6
图 2：不同技术路径的电池对比.....	6
图 3：Maxwell 业务领域.....	9
图 4：Maxwell 储能设备应用领域.....	9
图 5：Maxwell 2015-2018 年营业收入及净利润（百万美元）.....	10
图 6：Maxwell 2018 年分地区收入.....	10
图 7：不同组分三元材料热稳定性、放电比容量及容量保持率的比较.....	11
图 8：动力电池技术路线对比.....	12
图 9：单晶 NCA 的 SEM 图.....	13
图 10：高镍 NCM/NCA/NCMA 差示扫描量热曲线.....	14
图 11：添加 LiPO_2F_2 对 NCM523-石墨软包电池循环性能的影响.....	15
图 12：结构精简后 Pack 成本与原值对比.....	15
图 13：2016-2019 年国内不同技术路线动力电池装机量（单位：Gwh）.....	16
图 14：2019 年国内不同技术路线动力电池装机量份额.....	16
图 15：2016-2022 年磷酸铁锂电池装机量.....	16
图 16：充电和放电期间硅体积膨胀示意图.....	17
图 17：不同添加剂体系的电池循环特征.....	19
图 18：不同添加剂体系的电池循环特征.....	19
图 19：导电剂在锂电池中的应用.....	20
图 20：国产锂电池导电剂占比持续提升.....	21
图 21：中国动力锂电碳纳米管导电剂市场持续增长.....	22
图 22：碳纳米管导电剂市场渗透率持续提升.....	22
图 23：磷酸铁锂电池 Pack 成本构成.....	22
图 24：NCM523 电池 Pack 成本构成.....	22
图 25：宁德时代 CTP 方案.....	23
图 26：结构精简后 Pack 成本与原值对比.....	23
图 27：比亚迪“汉”2020 款 EV 基本型.....	24
图 28：单体刀片电池结构示意图.....	24
图 29：动力电池包的电池模组的排布方式示意图 1.....	24
图 30：动力电池包的电池模组的排布方式示意图 2.....	25
图 31：动力电池包的电池模组的排布方式示意图 3.....	25
图 32：对比例 1、2、3.....	25
图 33：实施例 1.....	25
图 34：实施例 2.....	26
图 35：实施例 3.....	26
图 36：实施例 4.....	26

图 37：Maxwell 干电极制备流程	27
图 38：干电极工艺制备的 NCM811 电池的放电电压曲线	27
图 39：干电极工艺制备的硅碳负极半电池曲线	27
图 40：Maxwell 的干电极技术介绍	28
图 41：动力电池生产流程（干电极与湿电极流程对比）	29
图 42：NCM523 动力电池系统成本拆分	30
图 43：NCM111 电池的放电倍率表现对比	30
图 44：干电极工艺制备的 NMC 电池的循环性表现	30
图 45：SEI 膜成分组成	31
图 46：SLMP 预锂化 SiO 电极	32
图 47：SLMP 预锂化硅碳纳米管	32
图 48：超级电容示意图	33
图 49：超级电容结构组成	33
图 50：超级电容和锂电池相结合的应用模式	34
图 51：超级电容产业链	35
图 52：液态锂离子电池与固态电池性能对比	36
图 53：液态锂离子电池与固态电池制备工艺对比	37
图 54：固态电池发展策略	37
图 55：不同固态电解质性能雷达图	38
图 56：不同企业选择的电解质技术路线	39

表 目 录

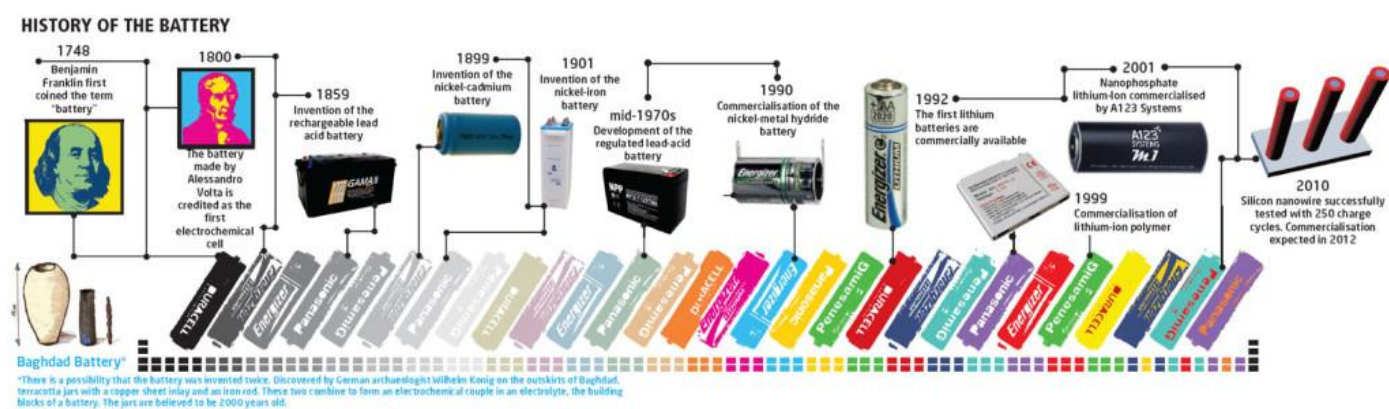
表 1：技术方向及涉及的上市公司	2
表 2：特斯拉已交付车型的动力电池演变过程	8
表 3：特斯拉前五次收购情况	10
表 4：不同导电剂的优势对比	20
表 5：比亚迪“刀片电池”效果对比	26
表 6：正极材料基础参数及假设	29
表 7：预锂化工艺比较	31
表 8：超级电容与传统电池的比较	34
表 9：超级电容相关企业	35
表 10：技术方向及涉及的上市公司	40

1、技术迭代驱动电池发展，特斯拉引领行业

1.1、历史回顾：技术进步推动电池产业发展

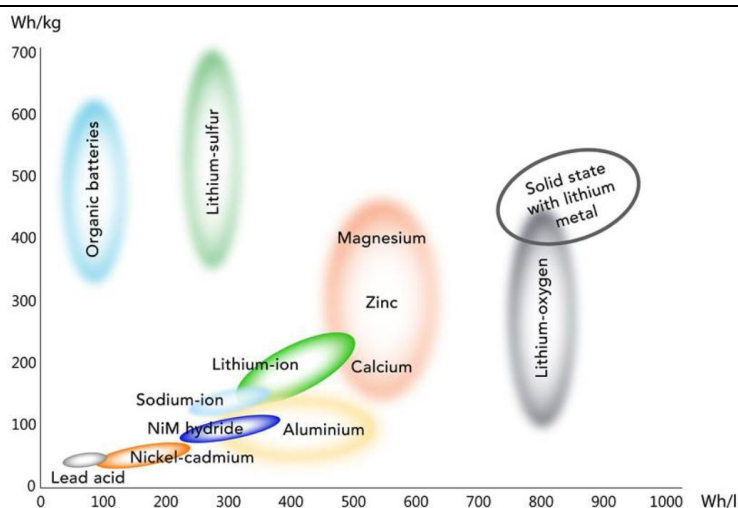
“电池”这一概念由富兰克林提出。1800 年意大利物理学家伏特发明了伏特电堆，这是人类历史上第一款电池；19 世纪中期，可以循环使用的铅酸电池开始出现；19 世纪末期，瑞典人琰格纳发明了镍镉电池，这款电池后来推动了现代电子科技的发展；20 世纪 90 年代初，镍氢电池开始商业化；1992 年，索尼公司推出第一款商业化的锂离子电池，由于具备更好的性能被广泛使用。回顾电池 200 多年的发展历史，总体来看，电池向更高的能量密度（体积&重量）发展，此外，安全性、循环性及成本等因素也影响电池的商业化应用。

图 1：电池发展历史



资料来源：EasyAcc

图 2：不同技术路径的电池对比



资料来源：《battery 2030》，执行出版人为 Kristina Edström，发布时间为 2020 年 3 月
注：横轴为体积能量密度，纵轴为质量能量密度

就汽车领域来看，车用动力电池发展主要经历了镍氢/锰酸锂-磷酸铁锂-三元锂电三个阶段，电池性能持续优化，成本不断下降。锰酸锂电池作为初

代投产应用的锂电池，具有成本低、安全性好的特点，但其能量密度仅能够满足基本的续航要求。磷酸铁锂电池成本相对低廉，安全性佳、循环寿命长，在电动大巴车等安全性和寿命要求较高的领域优势明显，但磷酸铁锂电池的能量密度仍然不够理想，特别是体积能量密度较低。三元材料是由镍、钴、锰三种材料按照一定的配比共同组成电池正极，其能量密度较高并且仍有提升空间，低温放电性相对较好。

技术更替是汽车电动化浪潮的核心驱动力，风险和机遇并存。新能源汽车当前的痛点包括续航能力、充电效率、成本、安全性等，电池成为新能源汽车渗透率提升的关键。目前市场上主流的车用电池是锂电池，主要以三元锂电池、磷酸铁锂电池、锰酸锂电池为主。电池环节的技术更新会带来风险但也伴随着机遇，因此关注技术路线十分重要；特斯拉搭载的动力电池始终引领行业，有必要对其电池战略加以重视。

1.2、特斯拉：引领电池技术迭代方向

自 2004 年成立以来，特斯拉共有 5 款电动车上市。松下是其动力电池领域的战略合作伙伴。Model S/3 的电池都体现出明显的技术进步，从迭代方案来看，主要包括材料层面、结构层面等。

- Roadster 于 2006 年正式亮相，2008 年开始交付，采用钴酸锂+石墨方案，电芯为圆柱 18650 方案，系统能量密度约 120Wh/kg。
- Model S 于 2009 年推出，2012 年开始交付，采用 NCA+石墨方案，电芯沿用圆柱 18650，系统能量密度超过 150Wh/kg。
- Model X 是一款 SUV，于 2012 年首次亮相，2015 年开始交付，采用 NCA+石墨方案，电芯沿用圆柱 18650，系统能量密度超过 150Wh/kg。
- Model 3 于 2014 年亮相，2017 年开始交付，这款车是特斯拉真正向大众市场进军的里程碑产品，采用了新型的 21700 圆柱电芯，采用 NCA+硅碳方案，并且模组和 Pack 系统也做了调整，系统能量密度也有提升。同时，国产 Model 3 于 2019 年末开始交付，电池供应商增加了 LG 化学，并且后续 CATL 也参与供货。
- Model Y 于 2019 年发布，2020 年开始交付。这是一款 SUV 车型，与 Model 3 共享 75%的零部件，电池仍然采用 21700 圆柱电芯，其他参数可能与 Model 3 接近。

表 2：特斯拉已交付车型的动力电池演变过程

车型	上市年份	续航里程 (km)	正极类型	负极类型	单体型号	供应商	单体能量密 度 (Wh/kg)	系统能量密 度 (Wh/kg)	电量 (kWh)
Roadster	2008	393	早期为 LCO	石墨	18650	LG (Roadster R80) 等		120	53
Model S	2012	400	NCA	石墨	18650	松下	243		60
		450	NCA	石墨	18650	松下	243		70
		490	NCA	石墨	18650	松下	243		75
		500	NCA	石墨	18650	松下	243		85
		557	NCA	石墨	18650	松下	258	152	90
		650	NCA	石墨	18650	松下	258		100
Model X	2015	355	NCA	石墨	18650	松下	243		60
		400	NCA	石墨	18650	松下	243		75
		470	NCA	石墨	18650	松下	258	152	90
		500/550	NCA	石墨	18650	松下	258		100
Model 3	2017	460	NCA	硅碳	21700	松下	300	159.5	60
		480	NCA	硅碳	21700	松下	300		60
		595	NCA	硅碳	21700	松下	300		75
		590	NCA	硅碳	21700	松下	300		75
		664	NCA	硅碳	21700	松下	300		75
国产 Model 3	2019	445	NCM811	石墨	21700	LG	300	145	52
		455	NCA	硅碳	21700	松下	300	153	52
		668			21700			161	
Model Y	2020	507	NCA	硅碳	21700	松下	300		
		509	NCA	硅碳	21700	松下	300		

资料来源：特斯拉官网等，光大证券研究所整理

2019 年，特斯拉相继收购了 Maxwell 和 Hibar，前者是超级电容全球龙头，后者是电池制造专家。这两家公司可能助力特斯拉生产电池。研发方面，特斯拉主要与加拿大 Dalhousie 大学的 Jeff Dahn 团队合作。

Maxwell 的前身是 1965 年成立的 Maxwell Laboratories, Inc.，总部位于美国圣地亚哥，最初主要为美国军方和其他政府机构提供研发服务，1983 年在美国纳斯达克上市，1990 年代转向技术和产品商业化应用，后更名为 Maxwell Technologies, Inc.，目前主要业务领域涉及超级电容器和干电极技术等。

图 3: Maxwell 业务领域



资料来源：《Maxwell-Needham-Conference-Deck》（发布于 21st Annual Needham Growth Conference，2019 年 1 月 16 日），光大证券研究所整理

Maxwell 主营业务是储能设备，主要是超级电容。公司于 2017 年 4 月收购韩国超级电容器厂商 Nesscap Energy，目前专注于中大型超级电容器，其产品具有高功率密度、长使用寿命和快速充放电能力，广泛应用于汽车、电网储能、风能、轨道交通、航空航天、工业及设备等领域，其中汽车领域客户包括吉利、通用和兰博基尼等。

图 4: Maxwell 储能设备应用领域



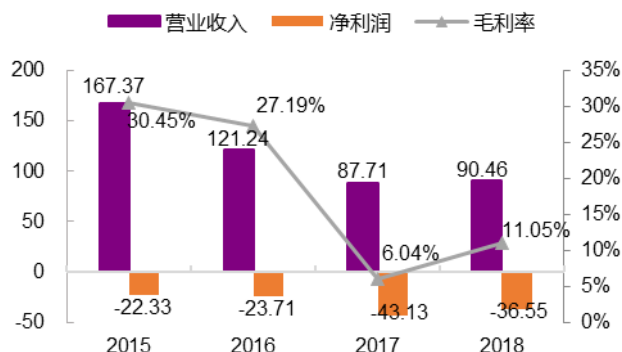
资料来源：《Maxwell-Needham-Conference-Deck》（发布于 21st Annual Needham Growth Conference，2019 年 1 月 16 日），光大证券研究所整理

干法电极是公司核心技术。干法电极技术是公司储备的核心技术，根据公开的论文及专利，公司干法电极技术可从超级电容领域拓展到锂电池等其他电池领域。

Maxwell 近几年业绩有所下降。2015-2018 年公司营业收入分别为 16737/12124/8771/9046 万美元，2016-2018 年分别同比 -27.6%/-27.7%/+3.1%；2015-2018 年净利润分别为 -2233/-2371/-4313/-3655 万美元，一直处于亏损状态；2015-2018 年公司毛利率分别为 30.45%/27.19%/6.04%/11.05%。

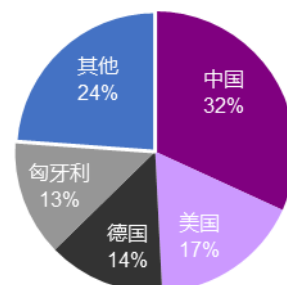
分地区来看, Maxwell 收入来源主要为中国、美国、德国和匈牙利。2018 年, 来自中国的销售收入为 2879 万美元, 占总销售收入 32%。

图 5: Maxwell 2015-2018 年营业收入及净利润 (百万美元)



资料来源: Maxwell 历年年报, 光大证券研究所整理

图 6: Maxwell 2018 年分地区收入



资料来源: Maxwell 2018 年年报, 光大证券研究所整理

2019 年 2 月 5 日, 特斯拉宣布以 2.18 亿美元溢价 55% 收购 Maxwell。同年 5 月 16 日, 特斯拉完成对 Maxwell 的收购要约。本次收购主要以换股方式进行, 每股 Maxwell 普通股可换取 0.0193 股特斯拉普通股, 截至要约期满, 共计 3676 万 Maxwell 普通股转换为特斯拉普通股, 约占要约完成后 Maxwell 投票权的 79%, 其余未被转换的 Maxwell 普通股则以同等对价由特斯拉进行现金收购。

表 3: 特斯拉前五次收购情况

宣告日期	公司	所属范畴	涉及金额	团队重组
2015 年 5 月	Riviera Tool	汽车模具冲压	未知	Tesla Tool & Die
2016 年 6 月	Solarcity	太阳能生产、储存与服务	26 亿美元	Tesla Energy
2016 年 11 月	Grohmann Engineering	机械工程及机器人自动化	1.35 亿美元	Tesla Grohmann Automation
2017 年 11 月	Perbix Machine	自动化设备制造	数千万美元	并入 Tesla Engineer Team
2019 年 2 月	Maxwell	超级电容、微电子及高压储能	2.18 亿美元	未知

资料来源: Crunchbase, 42 号车库, 光大证券研究所整理

Hibar 成立于上世纪 70 年代初, 在中国、韩国、日本等地设有海外分部, 该公司专注于精密计量泵、注液分配系统以及电池制造系统, 是一次电池及二次电池生产线的重要供应商。目前生产碱性电池生产流水线的速度可以达到 1000PPM; 二次电池行业, 也有成套的生产线。主营产品包括精密计量泵和注液分配系统、自动化电池制造和工艺设备、自定义包装设备、锂离子电池装配和自动真空灌装系统。

据外媒 Electric Autonomy Canada 报道, 特斯拉于 2019 年 7-10 月间收购了 Hibar。

Jeff Dahn 是全球著名的锂电池研发专家，其研究工作更加偏向产业化，致力于增加电池循环性、提升能量密度等。早在 2015 年，特斯拉就与 Jeff Dahn 所领导的团队签署了为期 5 年的独家合同。

2、材料层面

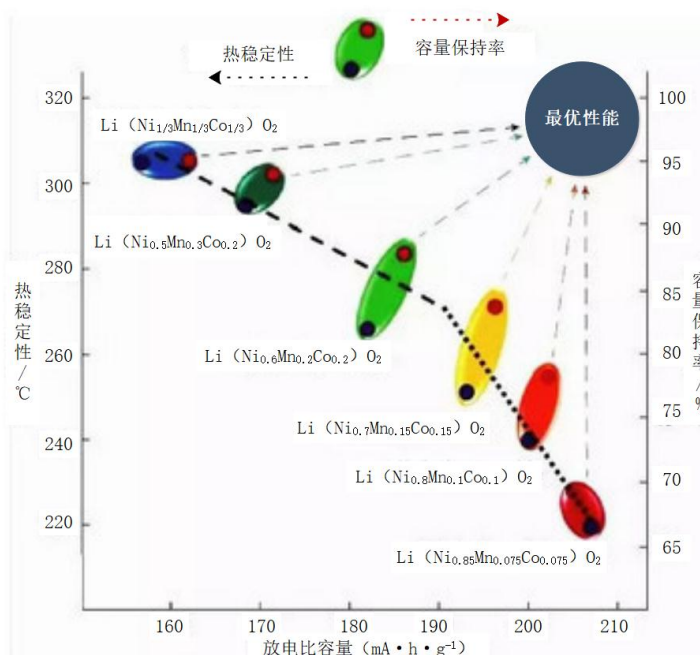
2.1、无钴化：中短期重要的降本增效手段

2.1.1、高镍三元

三元正极材料一般指 NCM 或者 NCA。对于 NCM 材料，在充放电过程中+4 价的 Mn 不变价，在材料中起到稳定材料结构的作用，而 Ni 和 Co 会发生变价反应。当充电电压低于 4.4V 时，一般是 Ni 参与电化学反应，继续充电，在较高电压下，Co 会参与反应。因此，在 4.4V 以下充放电时，Ni 含量越高，材料可逆容量越大；Co 含量显著影响材料的离子导电性，Co 含量越高，材料离子的导电性越好，充放电倍率性越好。相对于 NCM，NCA 材料是用 Al 替换了 Mn，其中 Al 的作用也是稳定结构。

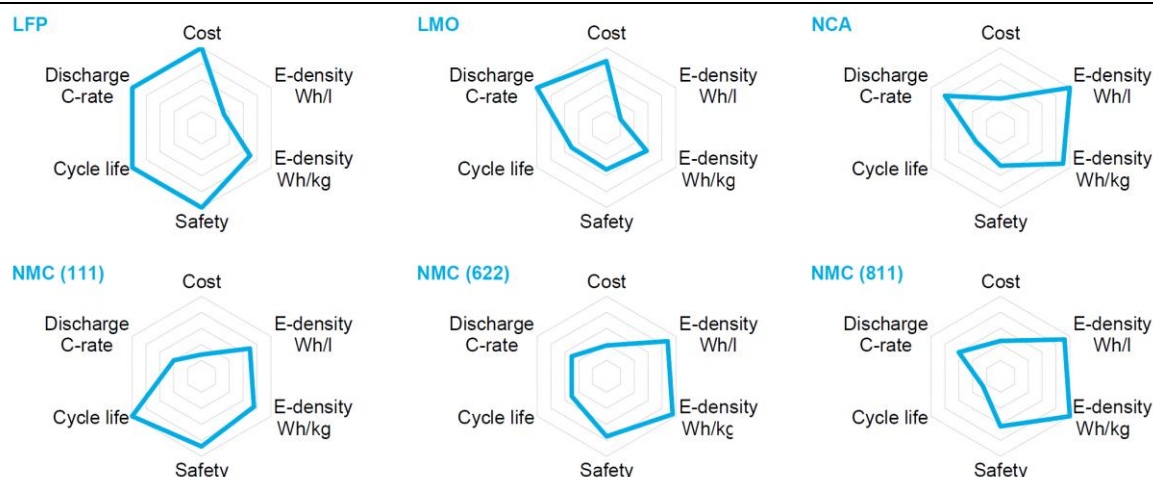
如图 7 所示，随着 Ni 含量的提升，三元材料的克容量不断增加，但热稳定性和容量保持率均有所下降。也就是说，对于三元电池，镍含量的增加有助于提升能量密度，但同时导致安全性和循环性变差。

图 7：不同组分三元材料热稳定性、放电比容量及容量保持率的比较



资料来源：《锂离子电池三元材料——工艺技术及生产应用》（作者为王伟东等），光大证券研究所整理

图 8：动力电池技术路线对比



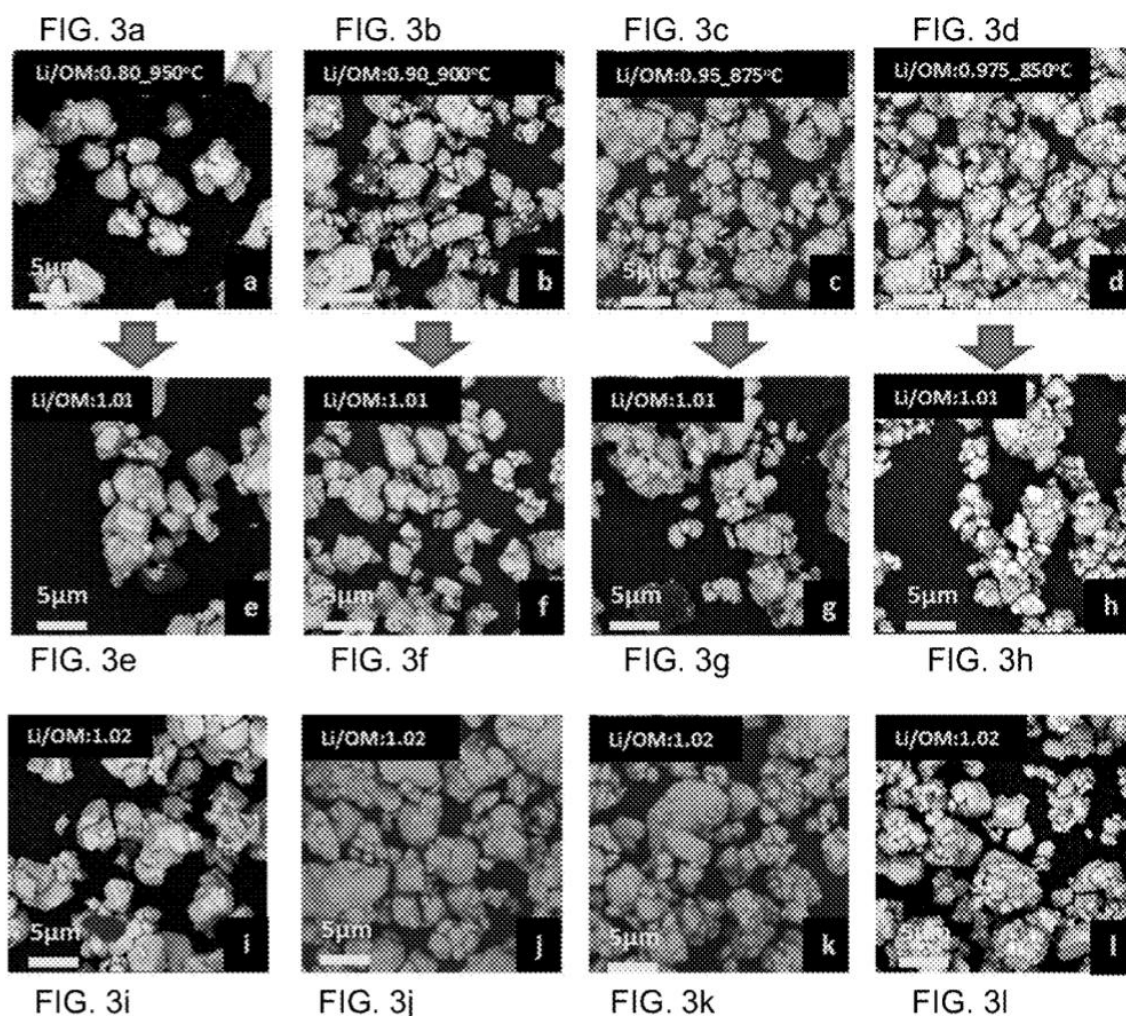
资料来源：BNEF，光大证券研究所整理

使用高能量密度的动力电池从而提升续航里程对电动车行业至关重要，高镍三元电池具有较高的能量密度，而且镍含量提高的同时钴含量降低，可以进一步降低电池成本，因此高镍低钴电池成为产业界共同努力的技术方向。但本身高镍三元材料也有一些缺陷，随着三元材料中 Ni 含量增加：

- 电池循环性能趋于变差，影响电池使用寿命。
- 和二氧化碳、水反应导致材料表面的氢氧化锂、碳酸锂含量增高，影响电池的加工和电化学性能。
- 材料热稳定性变差，从而影响电池安全性。
- 与电解液的匹配难度加大，活性材料的腐蚀和电解液的分解会影响电荷的传输。

特斯拉正在布局低钴高镍锂电池，根据 2020 年 4 月 23 日披露的专利《Method for Synthesizing Nickel-Cobalt-Aluminum Electrodes》，特斯拉发明了一种单晶 NCA 材料制备方法。首先按照 Li/其他金属的摩尔比小于 1 的比例混合 NCA 前驱体和氢氧化锂，然后加热混合物到生长单晶的温度，这样可以避免杂质 Li_5AlO_4 的形成，但由于该比例小于 1，这种材料的电化学性能较差。因此，在第二次加热的过程中，需要添加过量的 Li，最终生成的材料中 Li/其他金属的比例接近 1，这样就可以制备出无杂质的单晶 NCA 材料，杂质减少可能有助于延长电池的使用寿命。

图 9：单晶 NCA 的 SEM 图



资料来源：专利《METHOD FOR SYNTHESIZING NICKEL-COBALT-ALUMINUM ELECTRODES》

2.1.2、四元及改性包覆

针对高镍三元材料的固有缺陷，学术界和产业界尝试通过离子掺杂、表面包覆以及采用电解液添加剂等方式来改善三元材料的电化学性能。

掺杂元素是改进高镍三元材料性能的重要方式，在三元材料晶格中掺杂一些金属离子和非金属离子不仅可以提高电子电导率和离子电导率，提高电池的输出功率密度，而且可以同时提高三元材料结构的稳定性。常见的掺杂元素有 Al、Mg、Ti、Zr、F，不同元素的掺杂，作用有所不同。

➤ Mg 掺杂， $\text{Li}(\text{Ni}_a\text{Co}_b\text{Mn}_c)_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$

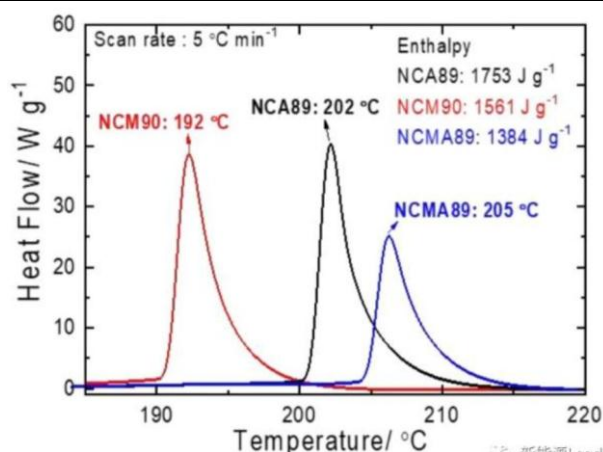
其中，a:b:c 可以是 6:2:2 或者 8:1:1 等。例如，有科研人员合成了 Mg^{2+} 掺杂的 $\text{Li}(\text{Ni}_{0.6}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.2})_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ，利用 Mg^{2+} 取代 Co^{3+} ，当 $x=0.03$ 时，电子电导率较未掺杂材料提高了 100 倍，电化学性能达到最优。同时，适量掺杂 Mg 能够显著提高材料的循环稳定性。

➤ Al 掺杂，NCMA

Al 掺杂可以改进三元材料的结构稳定性和热稳定性。对于四元材料 $\text{LiNi}_a\text{Mn}_b\text{Co}_{(c-x)}\text{Al}_x\text{O}_2$ ，当 Al 含量 $x=0.1$ 时，有很好的安全性，当 $x>0.06$ 时，材料与电解液的反应要小于锰酸锂。

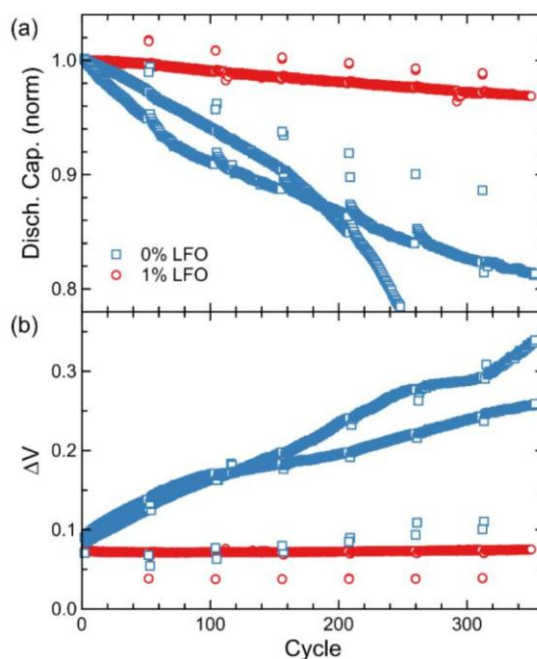
LG 化学和通用计划于 2022 年量产 NCMA 四元电池，可以使得锂电池成本降低至 100 美元/kWh 以下。NCMA 锂电池最初由韩国汉阳大学等机构在 2016 年开始研究，该技术路线的思路即掺杂 Al 替代部分 Co，从而提升锂电池性能并且降低成本。此外，国内蜂巢能源也于 2019 年 7 月发布 NCMA 四元材料电池，并且计划在 2020Q2 实现量产。

图 10：高镍 NCM/NCA/NCMA 差示扫描量热曲线



资料来源：新能源 Leader，光大证券研究所整理

锂电池的电化学反应主要发生于电极和电解液界面，因此可以通过表面涂层的方式改变三元材料的电化学性能。常见的涂层包括金属氧化物 (Al_2O_3 、 ZrO_2 、 CeO_2 、 ZnO 等)、氟化物 (LiF 、 AlF_3)、磷酸盐 (SnPO_4 、 Li_3PO_4)。其原理主要是 NCM 表面包覆可以消耗电池使用过程中产生的 HF、抑制过渡金属的溶出、改善正极材料/电解液界面等。例如，Jeff Dahn 团队在 2019 年提出了 Al_2O_3 涂层如何提升正极材料性能的新见解，他们认为，电解液中的 LiPF_6 可以和 Al_2O_3 或者其他氧化物反应生成一种公认的电解液添加剂二氟磷酸锂 (LiPO_2F_2)，该产物可以有效抑制电池阻抗的增长，提升锂电池的循环稳定性和使用寿命。

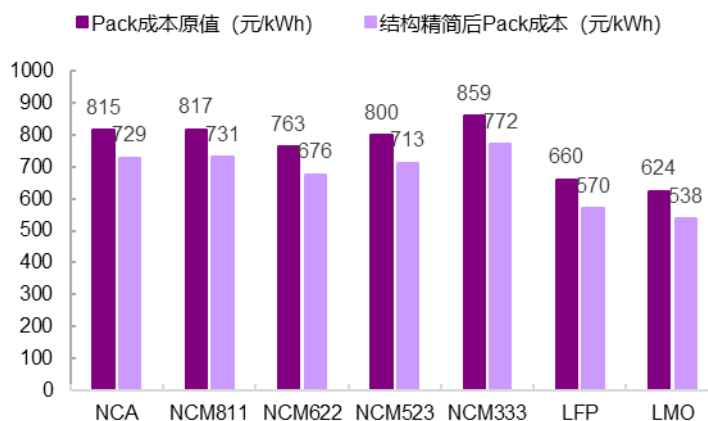
图 11：添加 LiPO_2F_2 对 NCM523-石墨软包电池循环性能的影响

资料来源：《New Chemical Insights into the Beneficial Role of Al_2O_3 Cathode Coatings in Lithium-ion Cells》

2.1.3、磷酸铁锂

按照技术路线不同，动力电池主要分为三元电池、磷酸铁锂电池、锰酸锂电池等。对于动力电池的性能评价，一般包括成本（元/Wh）、体积能量密度（Wh/L）、质量能量密度（Wh/kg）、安全性、循环性、放电倍率、低温性能等。相对于三元电池，磷酸铁锂电池的缺点主要是：1）能量密度较低，特别是体积能量密度过低，从而影响乘用车的续航里程；2）低温性能较差，不适合在北方冬季环境下使用。但除了以上两点之外，成本、安全性、循环性及放电倍率都是磷酸铁锂电池的优势所在。

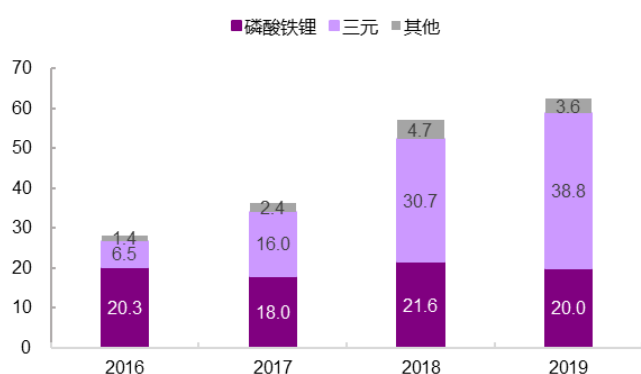
图 12：结构精简后 Pack 成本与原值对比



资料来源：光大证券研究所测算 注：参见《如何优雅地拆解动力电池成本？——动力电池成本系列报告之一》

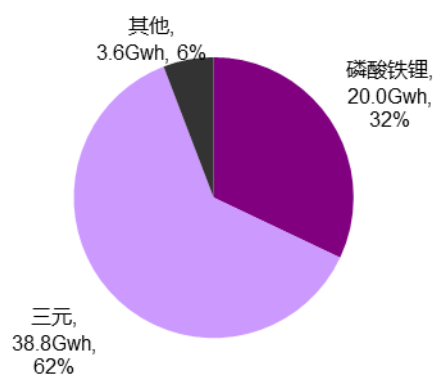
从过去几年动力电池装机数据来看，三元电池的份额越来越高，由 2016 年的 23% 增长至 2019 年的 62%，而磷酸铁锂电池的装机量占比由 72% 降至 32%。主要原因在于：（1）政策层面，补贴直接挂钩续航里程、能量密度等指标，推动了乘用车三元化的趋势；（2）技术层面，三元电池能量密度的提升空间更大，从而使得整车续航里程能够持续提升；（3）成本层面，三元电池技术进步推动成本下降，降本路径更多，降本空间更大。因此，三元电池的装机量占比提升，而磷酸铁锂电池的装机量占比下降。

图 13：2016-2019 年国内不同技术路线动力电池装机量（单位：Gwh）



资料来源：GGII，光大证券研究所整理

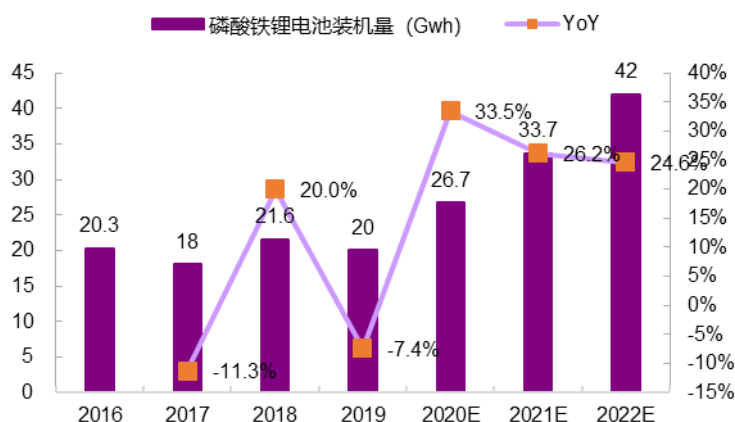
图 14：2019 年国内不同技术路线动力电池装机量份额



资料来源：GGII，光大证券研究所整理

从近期情况来看，我们认为，有必要重新审视以上三个因素，磷酸铁锂电池的行业逻辑出现变化。变化之一：政策层面，推动乘用车三元化的政策因素逐步弱化，技术路线可能分化；变化之二：技术层面，2019 年以来宁德时代、比亚迪出现明显技术进步，特别是比亚迪“刀片电池”方案更加适用于磷酸铁锂电池，这使得磷酸铁锂电池与三元电池体积能量密度的差距缩小；变化之三：成本层面，精简结构可以从电池包层面实现降本，磷酸铁锂电池的降本空间超过预期，磷酸铁锂电池包的成本有望率先达到 0.5X 元/Wh 的水平。

图 15：2016-2022 年磷酸铁锂电池装机量



资料来源：GGII，光大证券研究所预测

宁德时代已与特斯拉签订了供货协议，电池类型为磷酸铁锂电池，供货有效期将从 2020 年 7 月 1 日开始，到 2022 年 6 月 30 号截止。近期工信部新车目录显示，采用磷酸铁锂的 Model 3 正在进行申报。

2.2、硅碳负极：提升能量密度的重要手段

动力锂电池在高能量密度的发展路径上持续技术迭代，正极方面 NCM811 和 NCA 等高镍三元材料将成为未来的主流路线，而负极方面在传统的石墨负极的克容量已经充分挖掘潜力的情况下，未来随着整个高镍体系的逐步成熟，硅基负极技术有望成为提高电池容量和能量密度的重要手段。

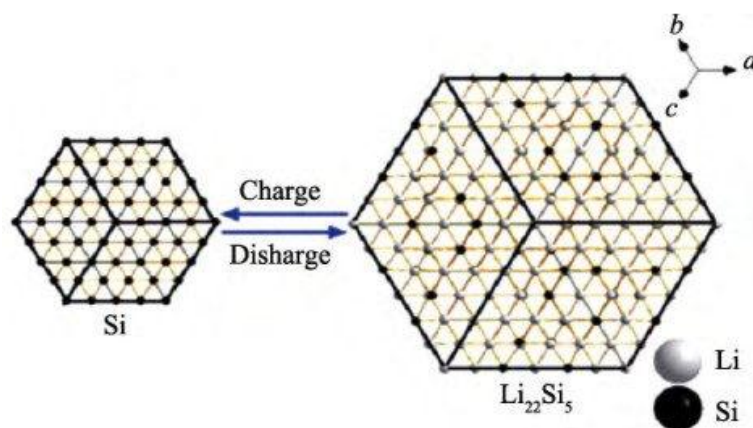
现有的负极材料分为碳材料和非碳材料，碳系负极材料主要包括人造石墨、天然石墨和中间相炭微球等；非碳材料负极主要包括钛基材料和硅基材料。其中具备成本低、工艺成熟、高导电率和较好稳定性的石墨负极材料占据了目前约 90% 的负极材料市场，但在能量密度方面石墨负极材料有其理论最大值(372mAh/g)的局限。而硅具有很高的理论比容量(4200 mAh/g)，是已商用化的石墨负极的 10 倍，同时具有较低的放电电位，有利于锂离子电池输出较高的电压。但低导电率的硅材料在充放电的过程中存在以下限制：

(1) 锂离子的嵌入与脱出会使硅体积发生巨大的膨胀与收缩，体积变化过程中产生的应力会使硅颗粒相互挤压、粉化、结构坍塌，进而失去电接触导致容量迅速衰减；

(2) 对于硅材料来说，传统的粘结剂（如 PVDF）无法承受硅材料巨大的体积变化，使得活性材料从集流体上脱落，导致电极结构被破坏，电池循环稳定性很差。

(3) 体积效应还会使 SEI 膜不稳定。体积效应使得硅表面 SEI 膜在充放电过程中不断的破裂、再生长，导致库伦效率降低，电极的电子导电性变差，电池内阻增加等。

图 16：充电和放电期间硅体积膨胀示意图



资料来源：中国粉体网

目前，通常采用硅负极材料纳米化、复合化和合金化等方法来提高其结构稳定性，改善硅负极循环性能。

➤ **硅负极材料的纳米化：**为了改善硅基负极材料的循环稳定性，通常将硅材料纳米化，包括硅纳米颗粒、硅纳米线、硅薄膜和 3D 多孔硅等。纳

米硅材料作为嵌锂材料可以增加比表面积,减少锂离子电池脱/嵌深度和移动距离,改善了电极可逆嵌锂容量小、循环能力差以及极化程度高等缺点,负极体积在高压环境下变化较小,起到延长电池的循环寿命的作用。

- **硅负极材料的复合化和合金化:** 将具有较好机械性能和导电性能的金属或者碳材料,同硅材料制备复合材料也可以有效改善硅基材料性能,吸收硅材料的内部应力,改善硅负极的导电性,并增强电极的倍率性能。
- 1) 硅/金属复合材料: 硅/金属复合材料即 M-Si 体系,其中 M 包括无法与锂反应的惰性金属,也包括能与锂参与脱嵌反应的金属。2) 硅/碳复合材料: 硅与非金属复合会形成一种核壳结构,该材料可以减缓内核硅颗粒的体积变化,可以有效解决循环过程中材料体积膨胀的问题,改善循环性能。

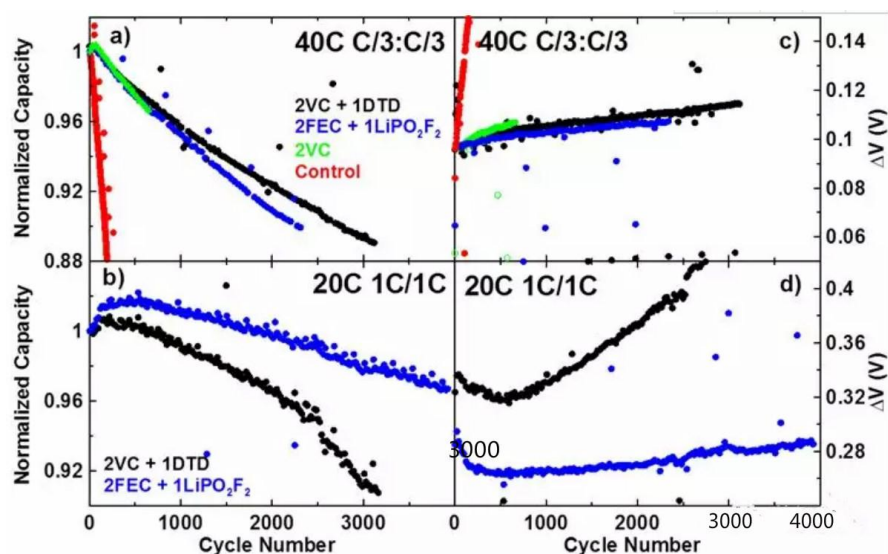
在硅碳复合材料中,目前石墨、碳纳米管、石墨烯等已被广泛应用。2012 年日本松下将硅碳负极材料应用于 NCA18650C 型号电池实现量产;2015 年 Maxwell 公司将其以“SiO-C”为负极材料的新式锂电池成功地应用于智能手机产品中;2017 年特斯拉 Model 3 搭载的动力电池使用了硅碳负极;国内企业中 CATL 等也在开发自己的高镍正极/硅碳材料体系。

受配套特斯拉的松下动力锂电池需求快速增长带动,2018 年全球硅基负极材料出货量同比增长 52.2%至 1.75 万吨。预计未来硅基负极材料市场仍将维持快速增长。

2.3、电解液添加剂:降低阻抗,提升循环性

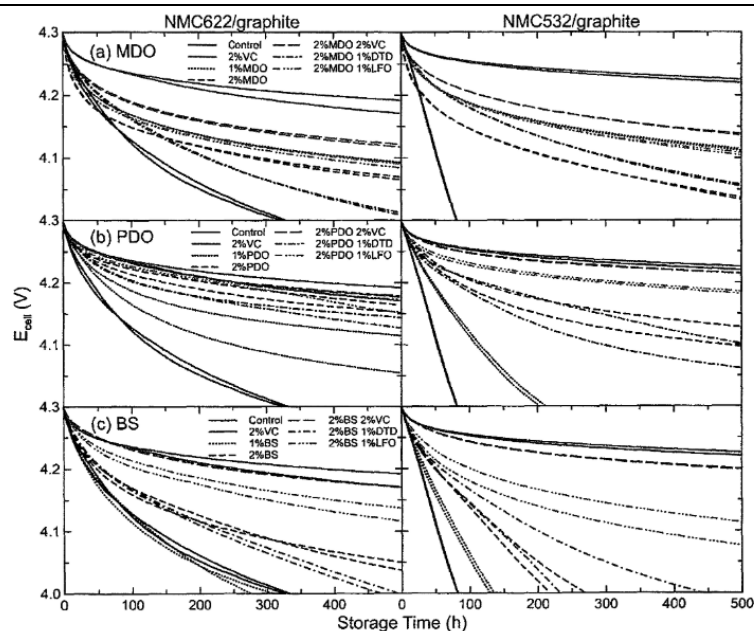
电解液添加剂是锂电池设计的重要组成部分,它会影响电池的性能、安全性和寿命。电解液添加剂可以抑制电化学阻抗的增长,降低存储过程中的自放电率,延长循环和日历寿命并抑制气体的产生。过去几年,Jeff Dahn 对 DMI (1,3-二甲基-2-咪唑啉酮)、ODTO (1,2,6-Oxadithiane 2,2,6,6-tetraoxide) 等电解液添加剂进行了研究。此外,特斯拉于 2018 年提交了名称为《二恶唑酮与亚硫酸酯作为锂电池电解液添加剂》的专利文件。

图 17: 不同添加剂体系的电池循环特征



资料来源：论文《Electrolyte Development for High-Performance Li-Ion Cells: Additives, Solvents, and Agreement with a Generalized Molecular Model》（作者为 Jeff Dahn 等）

图 18: 不同添加剂体系的电池循环特征



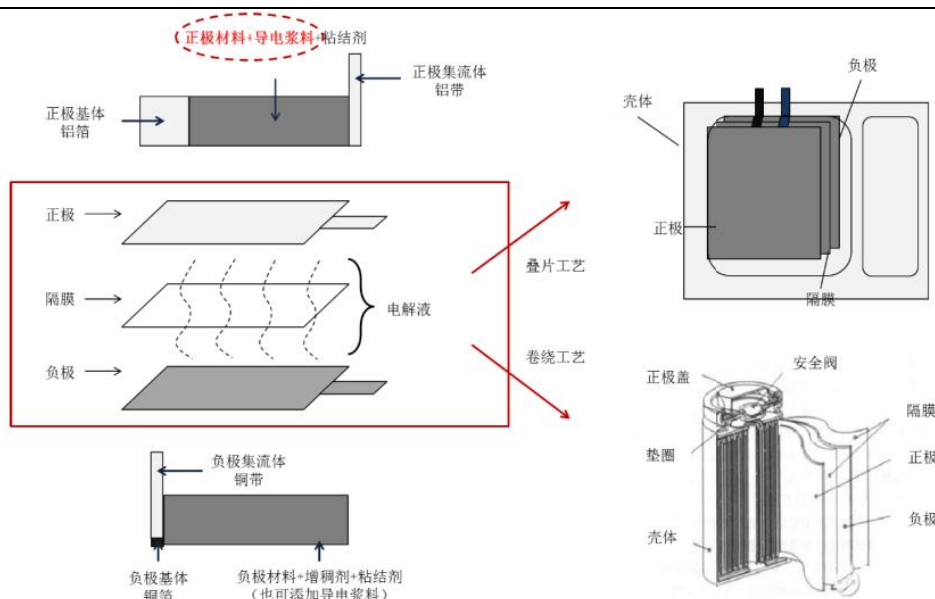
资料来源：专利《Dioxazolones and nitrile sulfites as electrolyte additives for lithium-ion batteries》

2.4、碳纳米管：性能优异的新型导电剂材料

锂电池的主要材料包括正极材料、负极材料、电解液和隔膜。锂电池正极常采用层状钴酸锂、锰酸锂、镍钴锰酸锂等作为活性材料，这些活性材料导电性存在一定限制，导致电极的内阻较大、放电深度不够，结果会导致活性材料的利用率低、电极的残余容量大。而导电剂作为一种关键辅材，可以

增加活性物质之间的导电接触，提升锂电池中电子在电极中的传输速率，从而提升锂电池的倍率性能和改善循环寿命。

图 19：导电剂在锂电池中的应用



资料来源：德方纳米招股说明书

目前常用导电剂包括炭黑类、导电石墨类、VGCF（气相生长碳纤维）、碳纳米管以及石墨烯等。其中，炭黑类、导电石墨类和 VGCF 属于传统的导电剂，其在活性物质之间各形成点、面或线接触式的导电网络；碳纳米管和石墨烯属于新型导电剂材料，其中碳纳米管在活性物质之间形成线接触式导电网络，石墨烯在活性物质间形成面接触式导电网络。不同类型导电剂由于空间结构、产品形貌、接触面积不同，其导电性能和对锂电池能量密度、倍率性能、寿命性能和高温性能影响不同。

表 4：不同导电剂的优势对比

导电剂种类		优点	缺点	2018 年粉体价格 (万元/吨)
碳纳米管导电剂		导电性能优异，添加量小，提升电池能量密度，提升电池循环寿命性能	需要预分散，价格较高	45-55
炭黑类导电剂	SP	价格便宜，经济性高	导电性能相对较差，添加量大，降低正极活性物质占比，全依赖进口	5.0-6.5
	科琴黑	添加量较小，适用于高倍率、高容量型锂电池	价格贵，分散难、全依赖进口	/
	乙炔黑	吸液性较好，有助提升循环寿命	价格较贵，影响极片压实性能，主要依赖进口	/
导电石墨类导电剂		颗粒度较大，有利于提升极片压实性能	添加量较大，主要依赖进口	14-16
VGCF（气相生长碳纤维）		导电性优异	分散困难、价格高、全依赖进口	/
石墨烯导电剂		导电性优异，比表面积大，可提升极片压实性能	分散性能较差，需要复合使用，使用相对局限（主要用于磷酸铁锂电池）	40-50

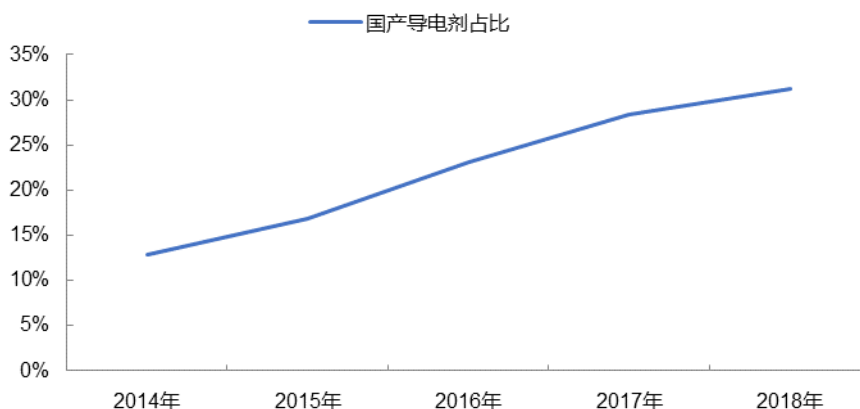
资料来源：天奈科技招股说明书

炭黑类、导电石墨类和 VGCF 等作为传统的导电剂在锂电池中已经应用多年，目前主流的传统导电剂如 SP、乙炔黑、科琴黑、KS 和 VGCF 等主要来自于美国卡博特（Cabot）、瑞士特密高（TIMCAL）、日本狮王（Lion）、日本电气化学和日本昭和电工等企业。而相对于传统导电剂而言，同样的导电效果下，碳纳米管的用量仅为传统导电剂的 1/6~1/2，此外碳纳米管可以

使锂电池循环过程中保持良好的电子和离子传导，从而大幅提升锂电池的循环寿命。根据国轩高科李婷婷等对 NCM111 体系下不同导电剂（炭黑 SP/Ks-6、碳纳米管、碳纳米管与石墨烯、纯石墨烯）电化学性能的研究，发现在 2.0% 的低导电剂含量时，碳纳米管具有最优电化学性能，1C 放电比容量 165.8 mAh/g，且 50 周循环后容量保持率达到 82.9%，此外低管径（5 nm）的碳纳米管具有更好的倍率性能，能分散均匀形成良好的导电网络，且 3C 倍率下容量保持率为 85.6%。

国内锂电企业在传统导电剂领域长期依赖进口，中国作为全球最大的电动车市场，锂电池材料行业快速成长，随着碳纳米管生产技术的进步以及规模化，碳纳米管作为新型导电剂的优势开始逐步体现，逐渐开始导入下游电池厂家。随着碳纳米管导电剂在锂电应用的推广，我国锂电池导电剂市场的国产化率逐年提高，从 2014 年的 12.9% 提升 2018 年的 31.2%。

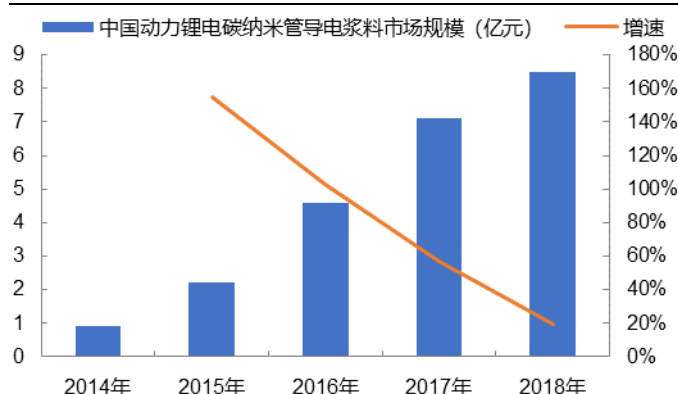
图 20：国产锂电池导电剂占比持续提升



资料来源：高工锂电，光大证券研究所整理

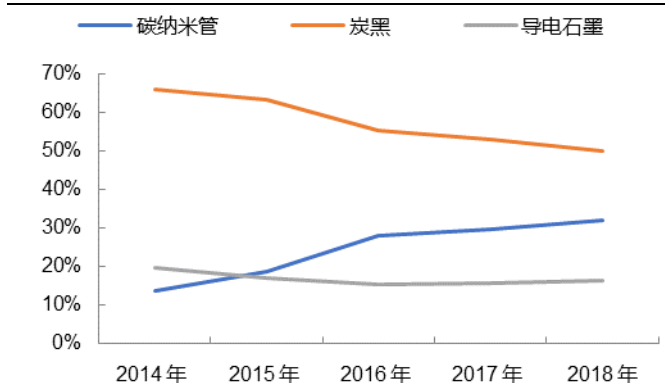
为提高动力锂电池的能量密度和循环寿命，各锂电池企业在研发正负极新材料体系的同时，致力研究通过其他材料提升锂电池能量密度。碳纳米管凭借其较高长径比的特性，相较于炭黑能够进一步提高锂电池的倍率性能，并可以通过更少的添加量来提升正极活性物质含量，从而提升锂电池能量密度。尽管在市场应用的早期阶段，较高的价格是碳纳米管替代炭黑成为动力锂电池主流导电剂的主要障碍，但碳纳米管作为一种新型材料，随着市场接受度的提升、大规模的产业化以及价格的持续下降，相比于炭黑等传统导电剂在性价比上的差距持续缩小。2018 年国内三元动力锂电池产量同比增长 118% 至 41.6GWh，而三元动力锂电池所采用的新型导电剂主要以碳纳米管导电浆料为主，受动力锂电池市场增长和三元正极材料占比持续提升驱动，国内碳纳米管导电剂市场规模迅速大幅增长，市渗透率快速提高。在嵌入型的硅碳复合材料中，硅颗粒被嵌入到持续致密的碳基体中，因此锂离子在复合材料中的扩散会受到阻碍，但通过调整碳基体的结构和形态可以显著提高硅基负极的性能。不同类型的碳基体可以为离子和电子提供不同的运输路线，并有利于电解液的润湿。而碳纳米管以其优良的机械强度、良好的导电性、高纵横比和灵活的结构可以作为良好的柔性硅复合材料基体，在静电纺丝的 Si/C 复合材料过程中加入碳纳米管可以增强高倍率性能。

图 21：中国动力锂电碳纳米管导电剂市场持续增长



资料来源：高工锂电，光大证券研究所整理

图 22：碳纳米管导电剂市场渗透率持续提升



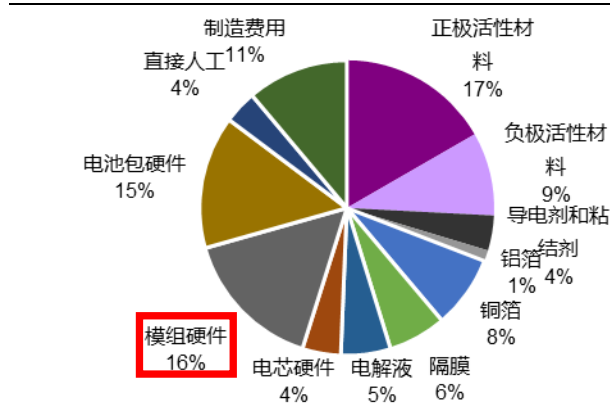
资料来源：高工锂电，光大证券研究所整理

3、结构层面

3.1、CTP 方案：降本效果显著

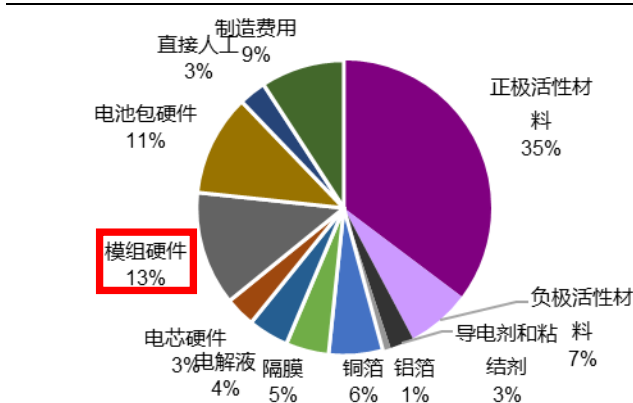
动力电池 Pack 主要由电芯、模组硬件、电池包硬件构成。根据我们的动力电池成本模型，电芯硬件在 Pack 中成本占比不到 5%，模组硬件占比约 15%。因此，整合精简电芯、模组硬件成为动力电池降本的重要路径之一。

图 23：磷酸铁锂电池 Pack 成本构成



资料来源：光大证券研究所测算

图 24：NCM523 电池 Pack 成本构成



资料来源：光大证券研究所测算

2019 年 9 月，在德国法兰克福国际车展上，宁德时代推出了全新的 CTP 方案 (Cell To Pack)，改变了原有的电芯-模组-电池包结构，电芯直接集成到电池包。随后，在北汽新能源总部，宁德时代和北汽新能源举行了全球首款 CTP 揭幕仪式，北汽 EU5 将成为首款搭载该电池的车型。根据宁德时代公布的资料，相比于传统电池包，CTP 可以使空间利用率提升 15%-20%，零件数量减少 40%，能量密度提升 10%-15%。

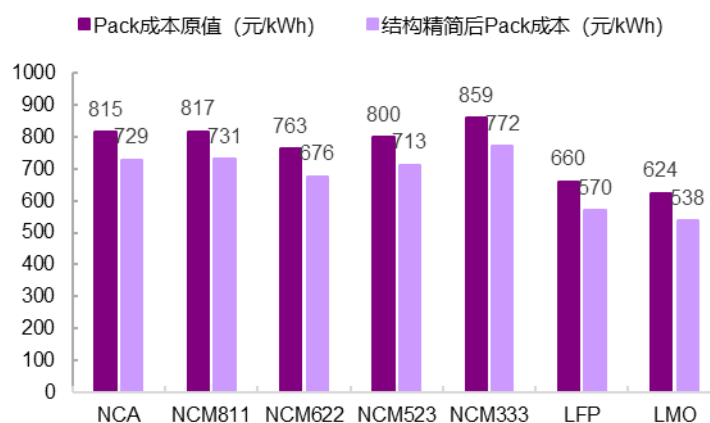
图 25：宁德时代 CTP 方案



资料来源：电动邦

根据我们的动力电池成本模型，参考 CATL 提出的 CTP 技术（Cell To Pack），假设模组硬件物料成本降低 80%，减掉相应的模组组装设备和人员，那么与 Pack 成本原值相比，结构精简后的 Pack 成本下降约 10%-15%。

图 26：结构精简后 Pack 成本与原值对比



资料来源：光大证券研究所测算 注：参见《如何优雅地拆解动力电池成本？——动力电池成本系列报告之一》

3.2、刀片电池方案：磷酸铁锂电池体积能量密度大幅提升

2020 年 1 月 11 日，比亚迪董事长兼总裁王传福在中国电动汽车百人会论坛（2020）上发言，比亚迪开发的“刀片电池”属于新一代磷酸铁锂电池（超级磷酸铁锂电池），将于 2020 年量产，体积能量密度比传统磷酸铁锂电池提升 50%，具有高安全、长寿命等特点，比亚迪“汉”将是全球首款搭载“刀片电池”的车型，计划于 2020 年 6 月上市。该车型定位为中型轿车，其中纯电版的 NEDC 工况续航超过 600km。

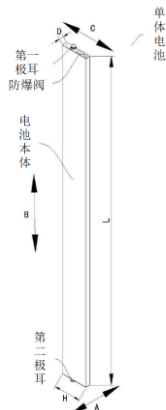
图 27：比亚迪“汉”2020 款 EV 基本型



资料来源：汽车之家

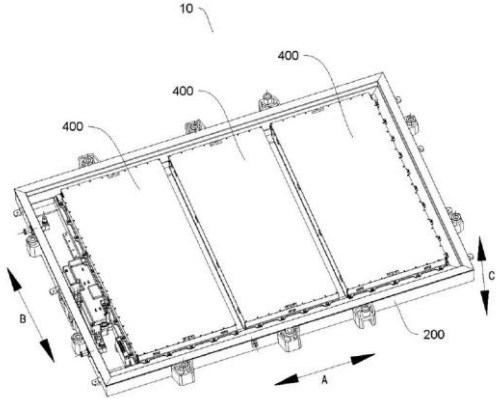
图 28 是比亚迪“刀片电池”专利中电池结构示意图，通常情况下，电芯长度：电池宽度=4~21，即将电芯设计成扁片长条形状。通过设计电池的长度和宽度，可在一定体积下使电芯合理的扁长化，一方面利于在动力电池包内的整体排布，从而提高动力电池包的空间利用率、扩大动力电池包的能量密度；另一方面能够保证电芯具有足够大的散热面积，能够及时将内部的热量传导至外部，防止热量在内聚集，从而匹配较高的能量密度。

图 28：单体刀片电池结构示意图



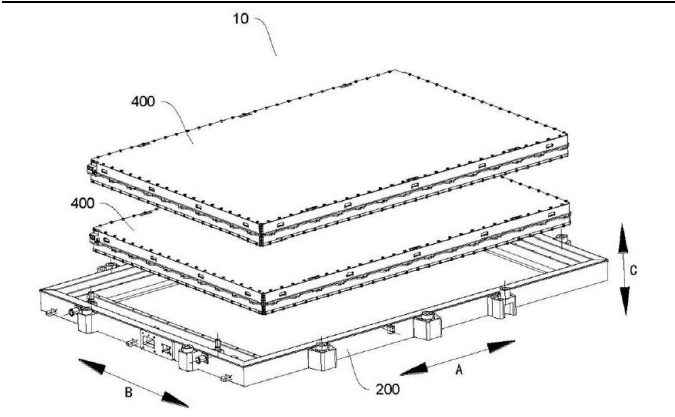
资料来源：国家知识产权局，光大证券研究所整理

图 29：动力电池包的电池模组的排布方式示意图 1



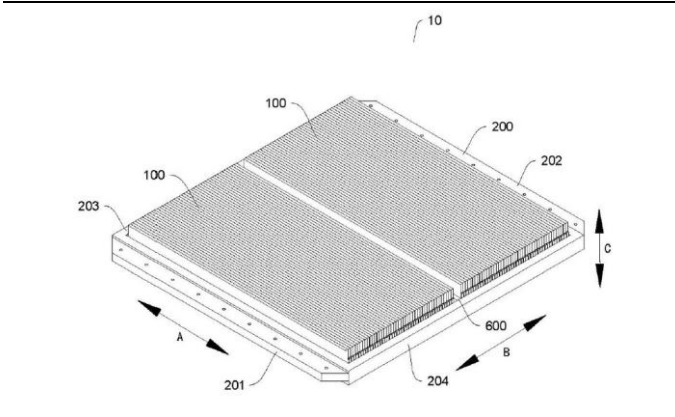
资料来源：国家知识产权局，光大证券研究所整理
注：400 为模组，由多个电芯组成，模组沿电池包长度方向排列

图 30：动力电池包的电池模块的排布方式示意图 2



资料来源：国家知识产权局，光大证券研究所整理
注：400 为模组，模组沿电池包厚度方向排列，形成层状结构

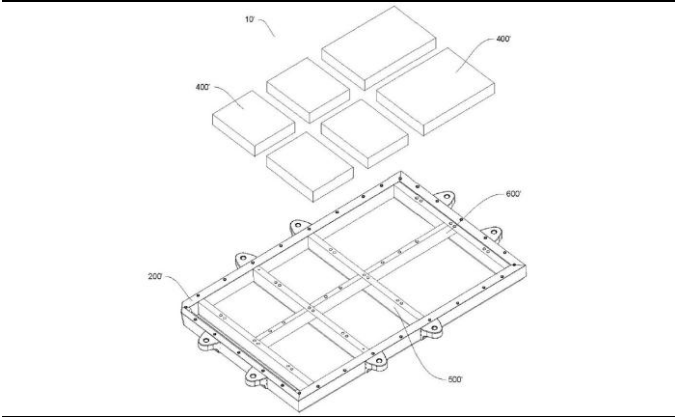
图 31：动力电池包的电池模块的排布方式示意图 3



资料来源：国家知识产权局，光大证券研究所整理
注：图中模组沿电池包宽度方向排列

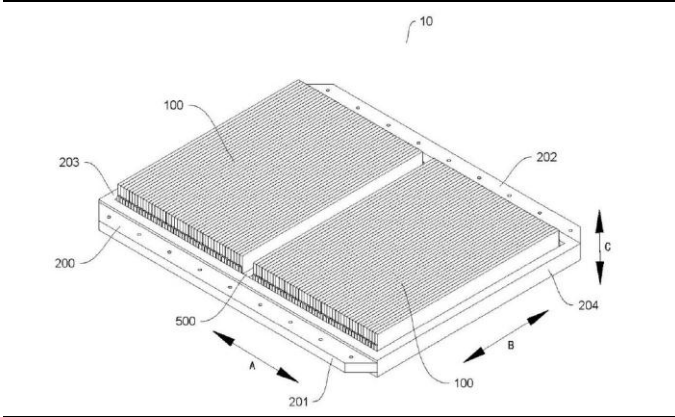
表 5 中，以磷酸铁锂电池为例，对“刀片电池”的效果进行了比较。总体来看，通过改变电芯的排布、尺寸参数以及其它因素的设计（单体电池的**长度与车身的单体电池长度延伸方向上的尺寸之比**），空间利用率能够突破现有动力电池包的限制，从而实现更高的能量密度；而且**这种体积能量密度提升的效果与电池包体积正相关**，即电池包体积越大，可以充分利用车身空间，同样的设计带来的能量密度提升更多。

图 32：对比例 1、2、3



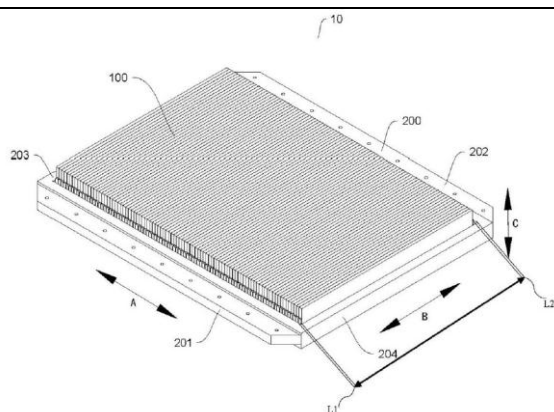
资料来源：国家知识产权局，光大证券研究所整理
注：对比例 1 的车身宽度为 1880mm，对比例 2 的车身宽度为 1880mm

图 33：实施例 1



资料来源：国家知识产权局，光大证券研究所整理
注：实施例 1 的车身宽度为 1880mm，包体内部设置了一个横梁，无纵梁

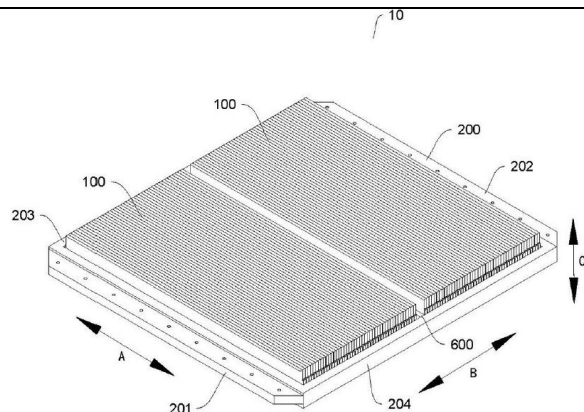
图 34：实施例 2



资料来源：国家知识产权局，光大证券研究所整理

注：实施例 2 的车身宽度为 1880mm，包体内部无横梁和纵梁

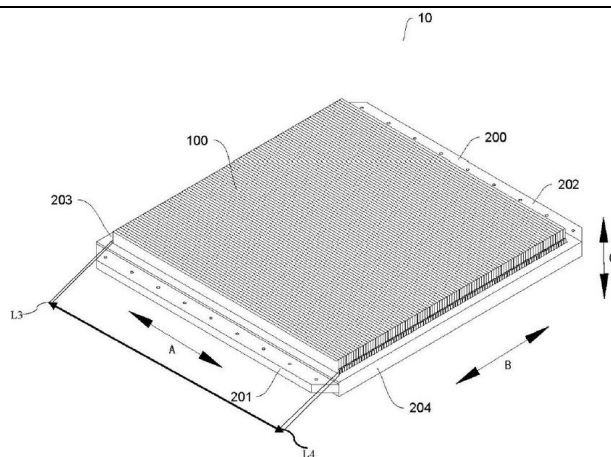
图 35：实施例 3



资料来源：国家知识产权局，光大证券研究所整理

注：实施例 3 的车身宽度为 1880mm，包体内部设置了一个纵梁，无横梁

图 36：实施例 4



资料来源：国家知识产权局，光大证券研究所整理

注：实施例 4 的车身宽度为 1950mm，包体内部无横梁和纵梁

表 5：比亚迪“刀片电池”效果对比

	对比例 1	实施例 1	实施例 2	实施例 3	对比例 2	实施例 4	实施例 5	对比例 3	实施例 6	实施例 7
单体尺寸：长、宽、高 (mm)	208*118*13.5	435*118*13.5	905*118*13.5	905*118*13.5	208*118*13.5	1280*118*13.5	1280*118*13.5	208*118*13.5	2000*118*13.5	2500*118*13.5
电芯数量	352	176	88	92	500	90	93	752	94	94
电芯容量 (Ah)	47.5	95	202	202	47.5	286	286	47.5	448	561
电芯电量 (Wh)	152	304	646.4	646.4	152	915.2	915.2	152	1434	1795
电芯体积 (L)	0.331	0.693	1.442	1.442	0.331	2.039	2.039	0.331	3.186	3.983
电芯 VED (Wh/L)	459	439	448	448	459	449	449	459	450	451
车身在电芯延伸方向的尺寸 (mm)	1880	1880	1880	1880	1950	1950	1950	4700	4700	5200
电池包电量 (Wh)	53504	53504	56883.2	59468.8	76000	82368	85113.6	114304	134796	168730
电池包体积 (L)	213	213	213	213	310	310	310	414	414	508
电池包能量密度 (Wh/L)	251	252	267	280	245	266	275	276	326	332
电芯体积/电池包体积	54.8%	57.3%	59.6%	62.3%	53.50%	59.2%	61.2%	60.2%	72.3%	73.7%
电芯长度/电芯延伸方向的车身尺寸	44.3%	46.3%	48.1%	48.1%	42.70%	65.6%	65.6%	35.4%	42.6%	48.1%

资料来源：国家知识产权局，光大证券研究所整理

4、工艺层面

4.1、干电极：可拓展至锂电池，实现降本增效

干电极是一种极片制作工艺，与湿电极工艺的核心区别在于是否使用溶剂。极片制作是生产电池的核心工序，目前应用广泛的工艺是湿电极工艺，首先将活性材料、粘结剂和溶剂进行搅拌，然后进行浆料涂布，后续步骤还包括烘干、溶剂回收等。根据 Maxwell 披露的资料来看，其干电极技术的主要步骤是：（1）干粉（活性材料、导电剂、粘结剂）混合，（2）将干粉制成薄膜，（3）将膜与集流体层压，整个过程始终保持无溶剂干燥状态。

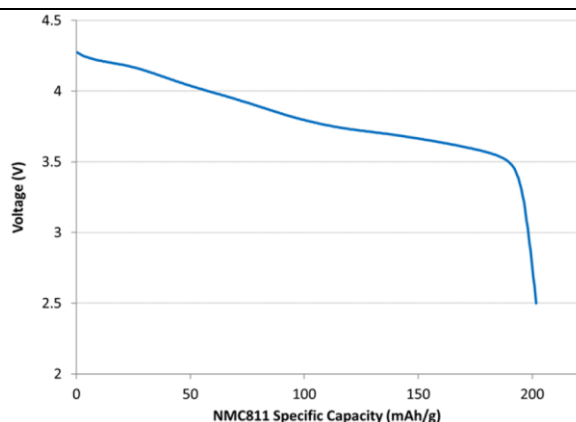
图 37：Maxwell 干电极制备流程



资料来源：论文《Dry Electrode Coating Technology》（作者为 Hieu Duong, Joon Shin & Yudi Yudi，来自 Maxwell），光大证券研究所整理

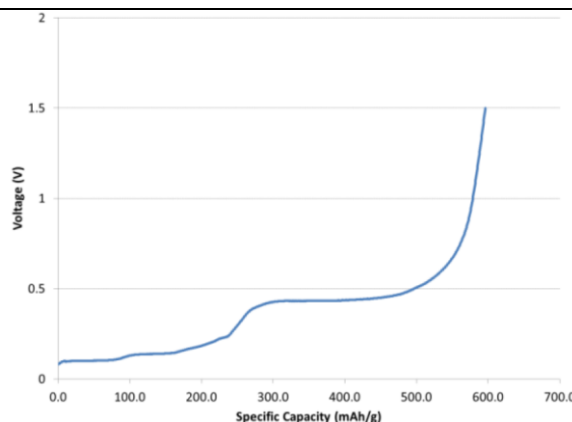
Maxwell 的研发人员曾发表论文《Dry Electrode Coating Technology》，论证了其干电极技术应用于锂电池领域的可行性，从结果来看，干电极工艺制备的 NCM811 电池表现出典型的放电曲线，硅碳负极的曲线也表现正常。因此，干法电极技术理论上可以应用于锂电池。

图 38：干电极工艺制备的 NCM811 电池的放电电压曲线



资料来源：论文《Dry Electrode Coating Technology》（作者为 Hieu Duong, Joon Shin & Yudi Yudi，来自 Maxwell），光大证券研究所整理

图 39：干电极工艺制备的硅碳负极半电池曲线



资料来源：论文《Dry Electrode Coating Technology》（作者为 Hieu Duong, Joon Shin & Yudi Yudi，来自 Maxwell），光大证券研究所整理

根据 Maxwell 在“21st Annual Needham Growth Conference”的公开资料，其干法极片技术表现包括：

- 1) 能量密度：目前可以突破 300Wh/kg，并且可能有突破 500Wh/kg 的潜力；
- 2) 循环寿命：可以改善电池的耐久性，寿命有望翻倍；
- 3) 成本方面：生产速度大幅提升，比现有的湿法电极工艺降本约 10%-20%+；
- 4) 技术特色及环保方面：无溶剂生产，可应用于下一代材料、无钴电池、固态电池等。

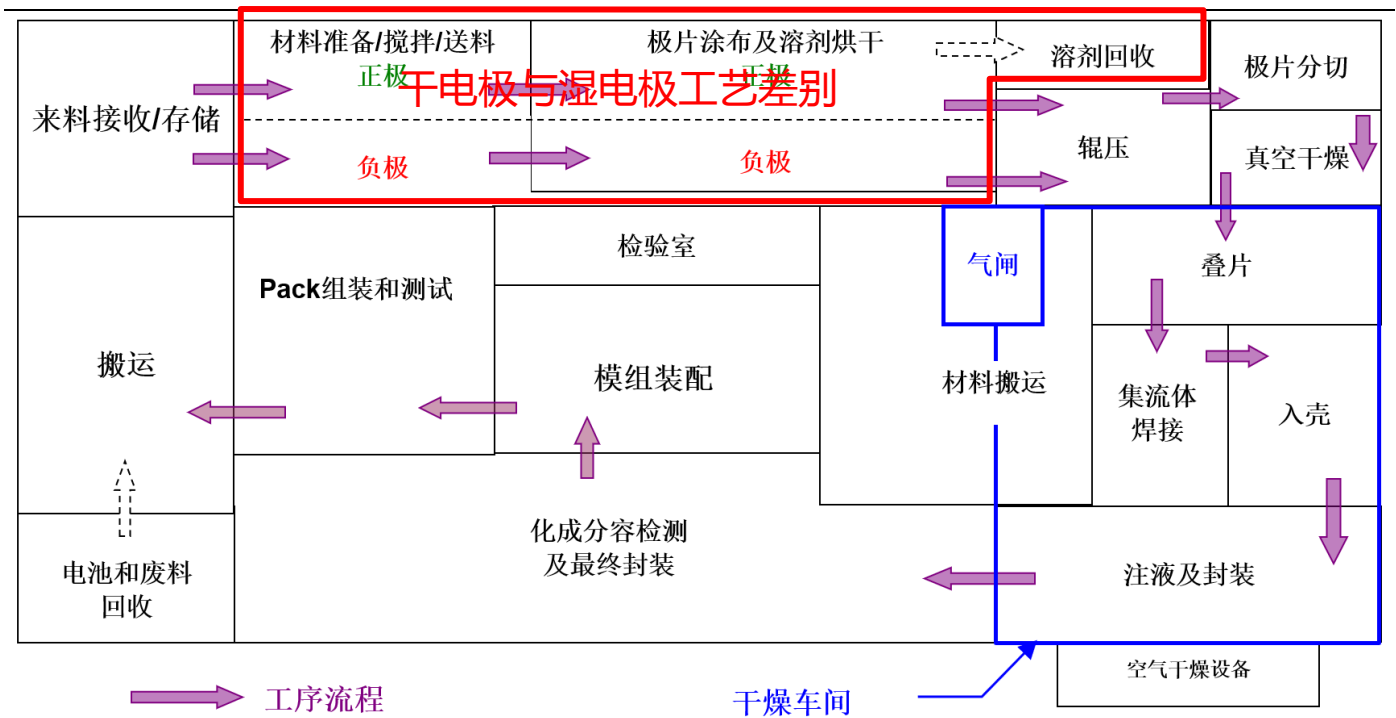
图 40: Maxwell 的干电极技术介绍



资料来源：《Maxwell-Needham-Conference-Deck》（发布于 21st Annual Needham Growth Conference，2019 年 1 月 16 日）

干电极技术可节省设备投资，提升生产效率。从制备流程来看，与湿法电极技术相比，干法电极可省去溶剂烘干设备+回收设备，湿浆料搅拌机需要改为相应的粉末混合设备，需要增加粉末到膜的挤压设备，涂布机+辊压机需要合并改为相应的层压设备。从 Maxwell 在“21st Annual Needham Growth Conference”的公开资料来看，干电极技术可能会节省一部分设备投资，同时生产效率也会提升。

图 41：动力电池生产流程（干电极与湿电极流程对比）



资料来源：ANL，《如何优雅地拆解动力电池成本？——动力电池成本系列报告之一》，光大证券研究所 注：干电极与湿电极工艺差别用红框标出

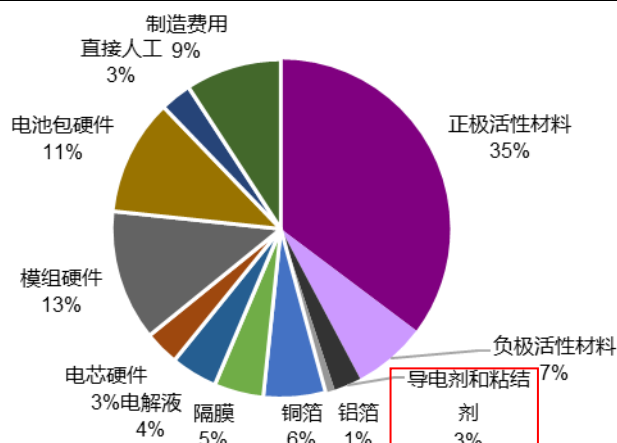
干电极节省溶剂成本，但降本效果较小。以目前动力电池正积极片的制备为例，我们一般是设定活性材料、导电剂和粘结剂的配比，再与溶剂进行搅拌，通常正极材料的粘结剂为 PVDF，所用溶剂为 NMP；采用干电极技术后，不再使用 NMP，PVDF 可能也需要更换。粘结剂和溶剂占动力电池的成本比例很低，而且传统湿法工艺下，溶剂回收效率很高，我们认为，干电极节省的材料成本较小。

表 6：正极材料基础参数及假设

正极材料	NCA	NCM811	NCM622	NCM523	NCM333	LFP	LMO
活性材料分子量	96.1	97.3	94.4	94.0	93.9	157.8	180.8
活性材料克容量, mAh/g	198	197	176	159	150	145	100
质量占比, %							
活性材料	89	89	89	89	89	89	89
导电剂	6	6	6	6	6	6	6
粘结剂	5	5	5	5	5	5	5
溶剂	NMP	NMP	NMP	NMP	NMP	NMP	NMP
孔隙率, %	32	32	32	32	32	32	32
真密度, g/cm ³							
活性材料	4.78	4.65	4.65	4.65	4.65	3.45	4.23
导电剂	1.825	1.825	1.825	1.825	1.825	1.825	1.825
粘结剂	1.77	1.77	1.77	1.77	1.77	1.77	1.77

资料来源：《如何优雅地拆解动力电池成本？——动力电池成本系列报告之一》，光大证券研究所假设

图 42: NCM523 动力电池系统成本拆分

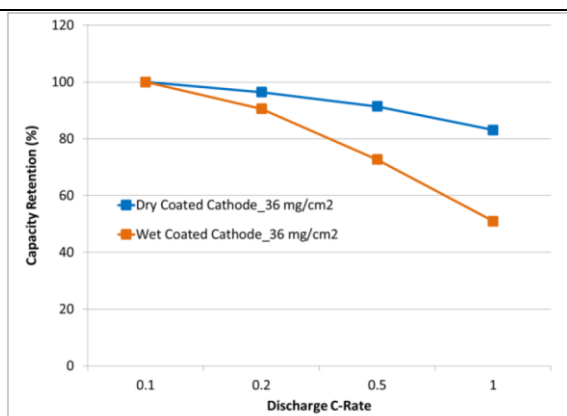


资料来源:《如何优雅地拆解动力电池成本?——动力电池成本系列报告之一》,光大证券研究所

Maxwell 研发人员发表的论文《Dry Electrode Coating Technology》中,为了验证干电极技术的可拓展性,将干电极技术运用于锂电池的负极极片(包括硅基材料、LTO)、正极极片(包括 NCM、NCA、LFP 等)。论文的结论是:Maxwell 的干电极技术可应用于锂电池,该技术可以降低阻抗,从而增加极片上活性材料的厚度。

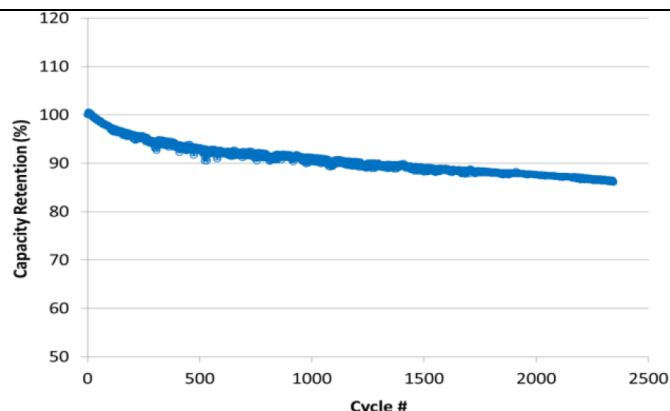
我们在《如何优雅地拆解动力电池成本?——动力电池成本系列报告之一》一文中分析过:材料涂层厚度越厚,电池的空间利用率越高,但离子迁移的路径也就越长,导致内阻增加;而且从工艺角度来看,涂层越厚,脱粉的几率也会增加。因此,考虑化学性能和工艺,选择合适的涂层厚度都是非常重要的。

图 43: NCM111 电池的放电倍率表现对比



资料来源:论文《Dry Electrode Coating Technology》(作者为 Hieu Duong, Joon Shin & Yudi Yudi, 来自 Maxwell),光大证券研究所整理

图 44: 干电极工艺制备的 NMC 电池的循环性表现

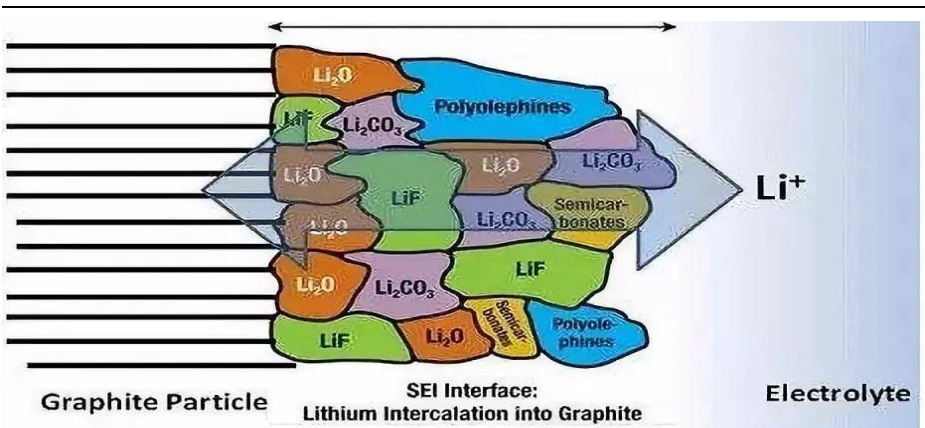


资料来源:论文《Dry Electrode Coating Technology》(作者为 Hieu Duong, Joon Shin & Yudi Yudi, 来自 Maxwell),光大证券研究所整理

4.2、预补锂：提升首效，改善性能

在锂离子电池首次充电过程中，有机电解液会在负极表面还原分解，形成固体电解质相界面(SEI)膜，永久地消耗大量来自正极的锂离子，造成首次循环的库仑效率(ICE)偏低，降低了锂离子电池的容量和能量密度。与现有的石墨材料有 5%~10%的首次不可逆锂损耗，硅负极的首次不可逆容量损失达 15%~35%，较大的首次不可逆容量损失消耗大量的电解液和正极材料中脱出的锂离子，导致较低的充放电效率、放电比容量及较差的稳定性，降低了电池的能量密度。

图 45：SEI 膜成分组成



资料来源：高工锂电，光大证券研究所整理

为了解决碳负极材料 SEI 膜造成的容量损失，目前通行的方法是通过负极材料的预锂化，通过预锂化对电极材料进行补锂，抵消形成 SEI 膜所造成的不可逆锂损耗，以提高电池的总容量和能量密度。目前常见的预锂化方式有锂箔补锂、锂粉补锂、电化学补锂、化学补锂等。

表 7：预锂化工艺比较

预锂化种类	锂化程度	循环性	安全性	设备要求	环境要求	速度
锂粉预锂	高，锂粉密度相关	优	低，易粉尘爆炸	一般，分干法、湿法	对水分、氧气要求苛刻	最快，注液形成 SEI 膜
锂带预锂	较高，锂箔厚薄	优	一般，易燃烧	复杂，需调整卷绕工艺	对水分、氧气要求严格	较快，注液形成 SEI 膜
电化学预锂	中等，电位有关	一般	一般，易燃烧	一般	对水分、氧气要求严格	较快
化学预锂	底，补锂量有限	一般	较高	简单	对水分、氧气要求较严格	慢，效率低

资料来源：《预锂化技术在能源存储中的应用》（作者为明海等），光大证券研究所整理

4.2.1、铜箔补锂

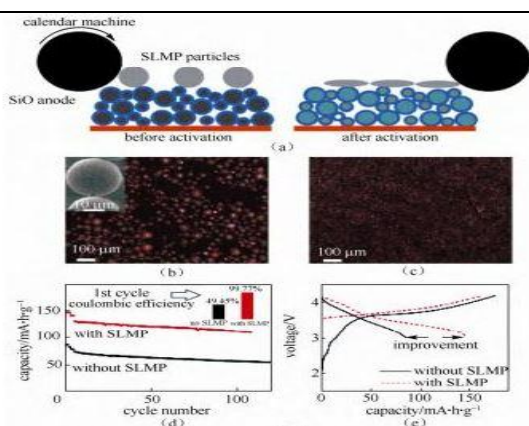
锂箔补锂是利用自放电机理进行补锂的技术。金属锂的电位为 -3.05V(vs.SHE，标准氢电极)，在所有电极材料中最低。由于电势差的存在，当负极材料与金属锂箔接触时，电子自发地向负极移动，伴随着 Li^+ 在负极的嵌入。

尽管与锂箔直接接触，可以实现负极预锂化，但预锂化的程度不易精确控制。不充分的锂化，不能充分提高 ICE；而补锂过度，可能会在负极表面形成金属锂镀层。尽管利用锂箔进行补锂有较好的效果，但补锂过程需要在临时的电池或电化学装置中完成，难以扩大规模。

4.2.2、稳定化锂金属粉末(SLMP)

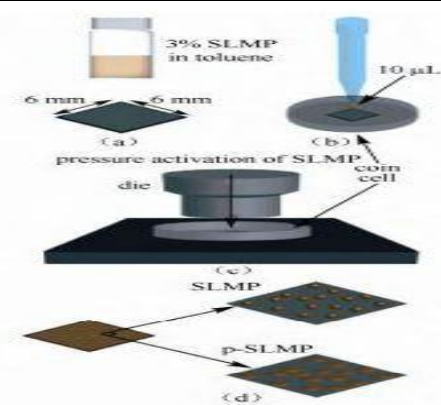
稳定的金属锂粉 (stabilized lithium metal powder - SLMP®) 是目前唯一一种可以工业化的预锂化方法，是美国 FMC Lithium (www.fmclithium.com) 公司开发的产品，由约 97% 金属锂和约 3% Li_2CO_3 组成，尺寸为 $5 \sim 50 \mu\text{m}$ ，其比容量约为 $3600 \text{ mA}\cdot\text{h/g}$ ， Li_2CO_3 均匀地包覆在金属锂的表面阻止了副反应的发生，在干燥空气、NMP 溶剂以及不同温度 (25°C 、 55°C) 下具有优异的稳定性能，因此可用于高容量合金负极、转换反应材料、碳材料以及非锂正极的首次不可逆容量损失。

图 46：SLMP 预锂化 SiO 电极



资料来源：《预锂化技术及其在高比能硅负极中的应用》（作者为聂平等）

图 47：SLMP 预锂化硅碳纳米管



资料来源：《预锂化技术及其在高比能硅负极中的应用》（作者为聂平等）

SLMP 可以采用标准的浆料涂布技术加入负极。相比于其它预锂化方式，具有如下优点：

- ① 预锂化程度可以通过控制锂粉的添加量调节；
- ② 锂粉可以较均匀分布在电极表面；
- ③ SLMP 空气中较稳定，与现有的电池生产工艺具有高的兼容性；
- ④ 与电解液接触后，即与负极反应，最终形成 SEI 膜；
- ⑤ 预锂化后，没有剩余的金属锂存在，不会造成锂的沉积。SLMP 使用时，需要使用压力将表面的 Li_2CO_3 包覆层压碎，使金属锂暴露出来。

实践表明，向硅电极中引入 0.7mg 的 SLMP，可补偿 2068.8mAh/g 的可逆比容量损失。通过 SLMP 预锂化后，负极的首次不可逆容量减少了 $20\% \sim 40\%$ 。

目前锂电池正负极涂覆生产工艺均在湿法工艺环境下进行，湿法工艺首先将活性材料、粘结剂和溶剂进行搅拌，然后进行浆料涂布、烘干。而将

SLMP 应用于负极预锂化，主要有两种途径：在合浆过程中添加，或直接添加到负极片表面。常规的负极合浆，使用聚偏氟乙烯(PVDF)/甲基吡咯烷酮(NMP)或丁苯橡胶(SBR) + 羧甲基纤维素(CMC)/去离子水体系，但SLMP与现有的极性溶剂不兼容，只能分散于己烷、甲苯等非极性溶剂中，因此不能在常规的合浆过程中直接加入。

而根据Maxwell披露的资料来看，其干电极生产技术主要步骤：(1) 干粉（活性材料、导电剂、粘结剂）混合，(2) 将干粉支成薄膜，(3) 将膜与集流体层压。Maxwell干电极整个生产过程始终保持无溶剂干燥状态。从理论上讲，干电极生产方式非常适合SLMP预锂化，从而有望使得硅碳负极材料产业化进程提速。

从锂电池体系演进以及正负极材料研发进程看，通过超高镍三元材料应用有望降低钴的用量，最终达到Tesla追求的极致“无钴化”。而Maxwell干电极生产工艺有望促进负极预锂化，并使硅碳负极材料产业化提速。

5、其他体系

5.1、超级电容：探索与锂电结合的可能性

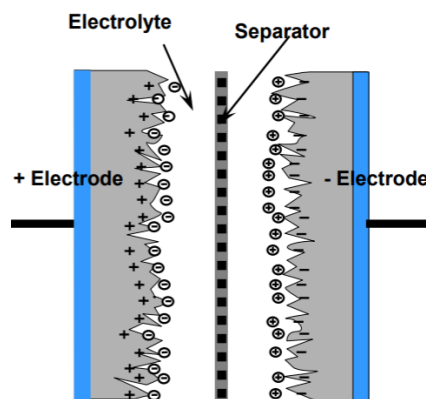
超级电容属于第三代储能装置，第一代机械式储能，如飞轮、发条等；第二代为化学式储能，如铅酸蓄电池、镍氢电池、锂电池等；而第三代就是以超级电容为代表的物理式储能装置。超级电容的优点包括快速充电、循环性极好、安全性好等。

图 48：超级电容示意图



资料来源：Maxwell 官网

图 49：超级电容结构组成



资料来源：Maxwell 官网

超级电容的缺点也比较明显，比如能量密度很低，不到锂电池的10%。因此，目前超级电容在电动汽车领域的应用并不常见。

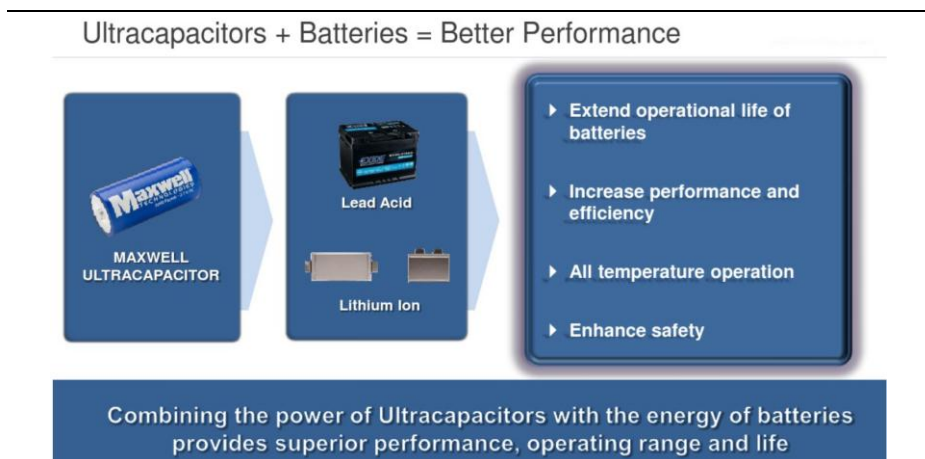
表 8：超级电容与传统电池的比较

	超级电容器	锂离子电池	铅酸蓄电池	镍镉电池	镍氢电池
充电时间 (h)	1 秒~几分钟	>0.5	4~12	4~10	12~36
重复充放电 (次)	>50 万	1000	400~600	400~500	>500
工作电流	极高	中	高	高	高
记忆效应	无	很轻微	轻微	有	有
电压	<2.5V	4.2V	6,12,24V	1.2V	1.2V
能量密度 (Wh/kg)	4~10	100-300	30	50	60~80
功率密度 (W/kg)	>1000	>1000	<1000	>1000	>1000
安全性	优	差	一般	良	良
环境	零污染	低污染	有污染	有污染	低污染

资料来源：北极星储能网，光大证券研究所整理

锂电池的缺陷主要是充电速度较慢、低温性能较差以及使用寿命不够长等方面。而超级电容器的拥有极短充放电时间、极佳使用寿命以及高可靠度。超级电容和锂电池模组相结合可以实现对新能源汽车进行快速充放电，延长电池使用寿命，提升性能和效率，改善在全天候环境下的使用和安全性能。但目前这一应用方向应该仍处于试验阶段。

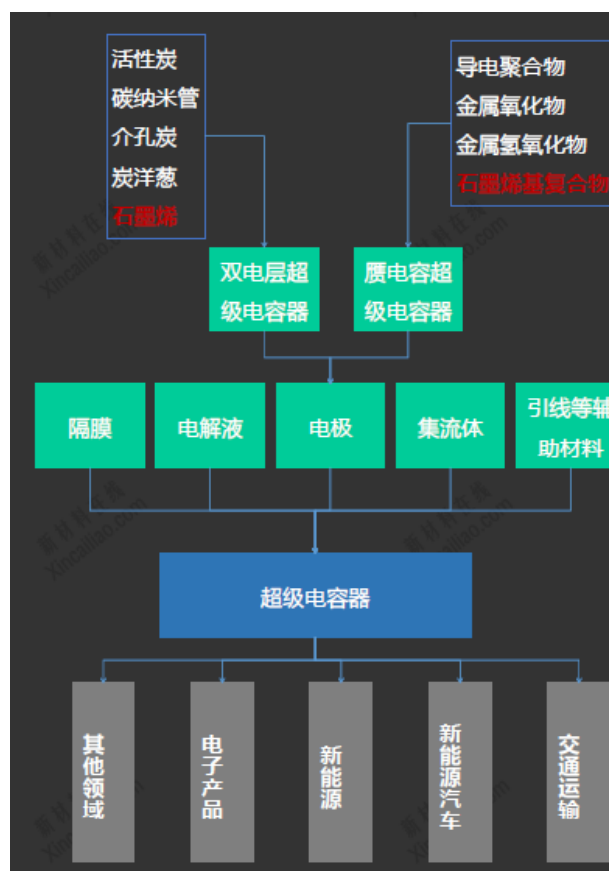
图 50：超级电容和锂电池相结合的应用模式



资料来源：《Maxwell-Needham-Conference-Deck》（发布于 21st Annual Needham Growth Conference，2019 年 1 月 16 日）

超级电容主要由极片、电解液、隔膜等构成，其中，极片由材料和集流体组成。超级电容器电极采用的电极材料是进行能量存储的关键，是决定超级电容器性能的核心影响因素。双电层超级电容器的材料主要是一些碳材，包括活性炭、碳纳米管等，赝电容超级电容器的材料包括导电聚合物、金属氧化物等。

图 51：超级电容产业链



资料来源：电池网

表 9：超级电容相关企业

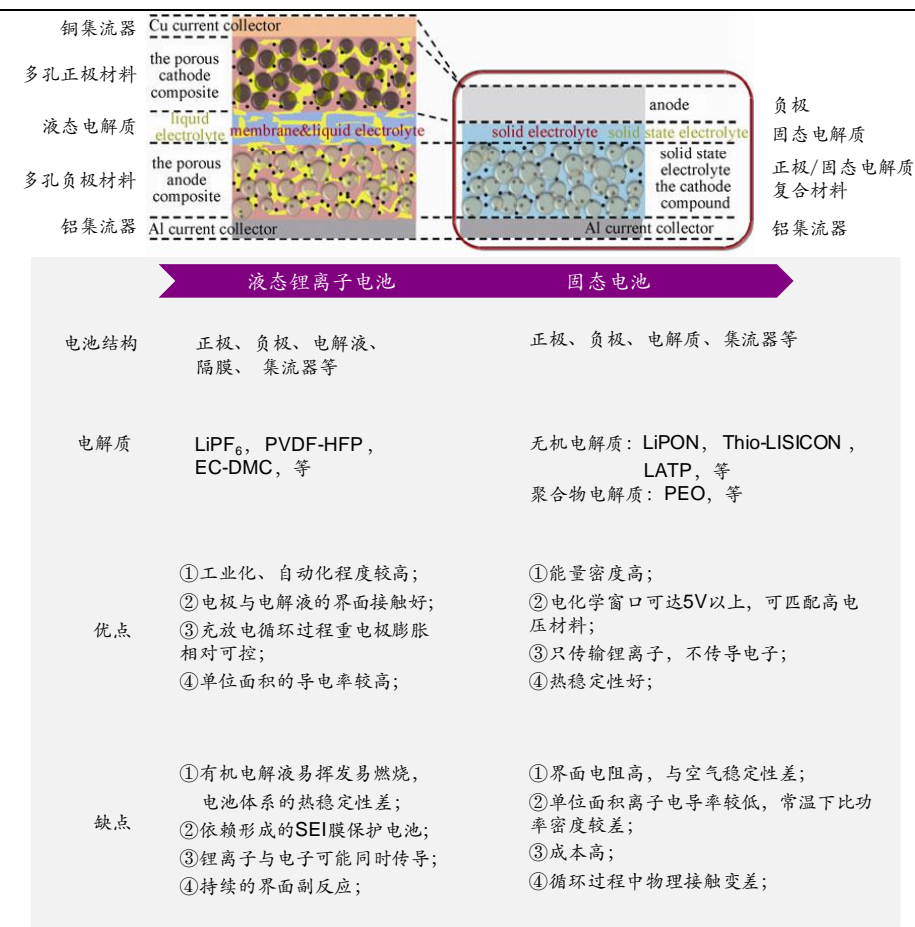
产业链环节	主要企业
超级电容器	江海股份、集星科技（宁波中车新能源）、奥威科技（新筑股份）、铜峰电子、力容新能源、巨容新能源、百纳电气、凯美能源、今朝时代等
电极材料	南京先丰、上海卡吉特、青岛硕丰等
电解液	新宙邦、江苏国泰、山东海容、苏州佛赛等
隔膜纸	深圳惠程、中科来方、金力新能源等

资料来源：超级电容产业网、智研咨询等，光大证券研究所整理

5.2、固态电池：下一代锂电技术

与液态锂离子电池不同，固态电池中的固态电解质替代了液态锂离子电池的液态电解质、隔膜。固态电池潜力巨大，有望获得安全性更高、单体能量密度更高（>350 Wh/kg）和寿命更长（>5000 次）的动力电池。

图 52：液态锂离子电池与固态电池性能对比



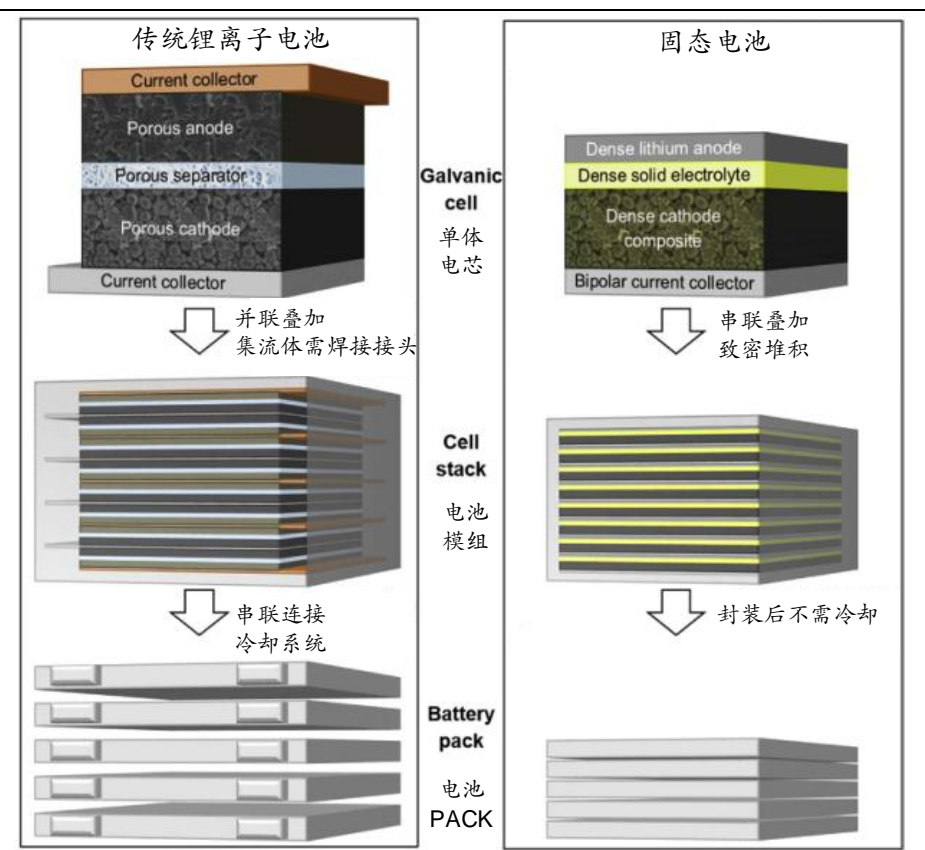
资料来源：《全固态锂电池技术的研究现状与展望》（作者为许晓雄）

(1) 安全性高，降低电池自燃、爆炸风险。固态电池将液态电解质替换为固态电解质，大大降低了电池热失控的风险。半固态、准固态电池仍存在一定的可燃风险，但安全性优于液态锂电池。

(2) 能量密度高，有望解决新能源汽车里程焦虑问题。固态电池电化学窗口可达 5V 以上，高于液态锂离子电池（4.2V），允许匹配高能正极，提升理论能量密度。固态电池无需电解液和隔膜，缩减电池包重量和体积，提高续航能力。电池负极可以采用金属锂，正极材料选择面更宽。

(3) 固态电池可简化封装、冷却系统，电芯内部为串联结构，在有限空间内进一步缩减电池重量，体积能量密度较液态锂离子电池（石墨负极）可提升 70%以上。液态锂离子电池以并联结构相接，封装复杂且体积庞大；固态电池无漏液风险，可简化冷却系统，电池以多电芯串联结构相接，优化电池封装，电池的体积能量密度大幅提升。

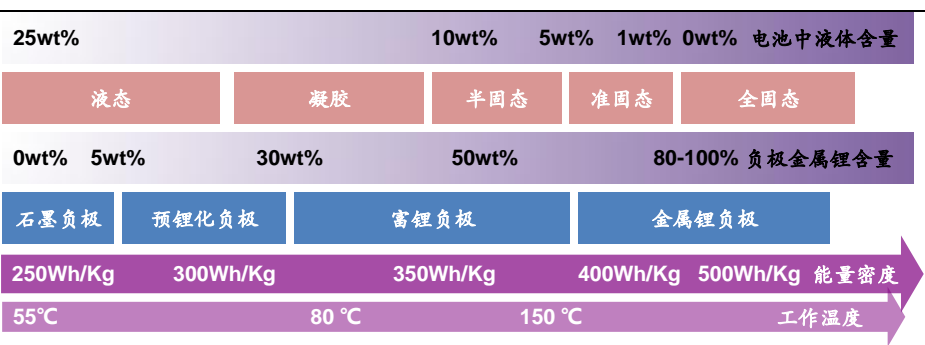
图 53：液态锂离子电池与固态电池制备工艺对比



资料来源：All-solid-state lithium-ion and lithium metal batteries – paving the way to large-scale production, Joscha Schnell

固态电池的技术发展采用逐步颠覆策略，液态电解质含量逐步下降，全固态电池是最终形态。依据电解质分类，锂电池可分为液态、半固态、准固态和全固态四大类，其中半固态、准固态和全固态三种统称为固态电池。固态电池的迭代过程中，液态电解质含量将从 20wt% 降至 0wt%，电池负极逐步替换成金属锂片，电池能量密度有望提升至 500Wh/kg，电池工作温度范围扩大三倍以上。预计在 2025 年前后，半固态电池可以实现量产，2030 年前后实现全固态电池的商业化应用。

图 54：固态电池发展策略

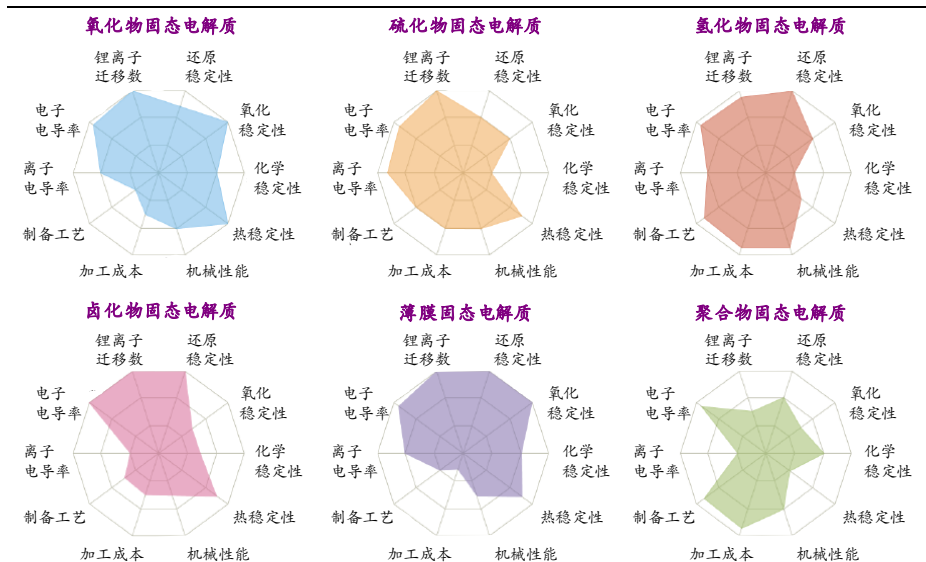


资料来源：《全固态锂电池技术的研究现状与展望》（作者为许晓雄）

氧化物固态电解质各方面性能较为均衡，其他类型固态电解质普遍存在

性能短板，尚不能达到大规模应用的要求。固态电解质是固态电池的核心部件，在很大程度上决定了固态电池的各项性能参数，如功率密度、循环稳定性、安全性能、高低温性能以及使用寿命。固态电池距离高性能锂离子电池系统仍有差距，聚合物、氧化物、硫化物三类固态电解质的性能参数各有优劣。

图 55：不同固态电解质性能雷达图



资料来源：Lithium battery chemistries enabled by solid-state electrolytes, Arumugam Manthiram

聚合物固态电解质率先实现应用，但存在高成本和低电导率两个致命问题。目前主流的聚合物固态电解质是聚环氧乙烷（PEO）电解质及其衍生材料。2011 年法国 Bolloré 公司推出固态电池为动力系统的电动车，聚合物固态电池率先实现商业化。聚合物电解质在室温下导电率低，能量上限不高，升温后离子电导率大幅提高但既消耗能量又增加成本，增大了商业化的难度。

氧化物固态电解质综合性能好，LiPON 薄膜型全固态电池已小批量生产，非薄膜型已尝试打开消费电子市场。LLZO 型富锂电电解质室温离子电导率为 10^{-4} S/cm、电化学窗口宽、锂负极兼容性好，被认为是最有吸引力的固态电解质材料之一，制约其发展的重要因素是电解质和电极之间界面阻抗较大，界面反应造成电池容量衰减。

硫化物固态电解质电导率最高，研究难度最高，开发潜力最大，如何保持高稳定性是一大难题。LGPS 电解质的离子电导率高达 1.2×10^{-2} S/cm，可与液态电解质相媲美。虽然硫化物电解质与锂电电极的界面稳定性较差，但由于离子电导率极高、电化学稳定窗口较宽（5V 以上），受到了众多企业的青睐，尤其是日韩企业投入了大量资金进行研究。

我们认为，目前氧化物体系进展最快，硫化物体系紧随其后，高能聚合物体系仍处于实验室研究阶段，硫化物和聚合物体系都已取得长足进展。

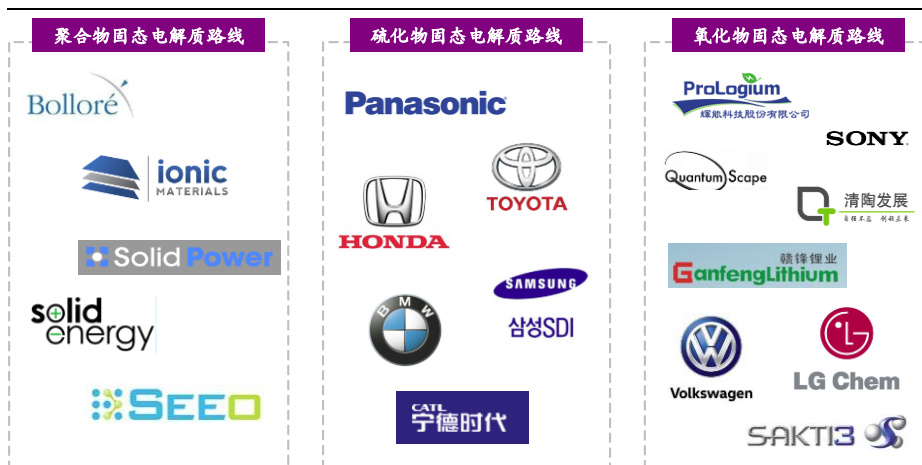
1) 近年多家中国企业建立氧化物固态电池生产线。2018 年 11 月苏州清陶固态锂电池生产线在江苏昆山建成投产，单体能量密度达 400Wh/kg 以

上，拟于 2020 年进入动力电池应用领域。江苏卫蓝新能源电池有限公司也计划于近期尝试进一步探索。2019 年 4 月辉能科技宣布与南都电源合作，计划建立国内首条 1GWh 规模的固态电池生产线，2019 年底，辉能科技宣布将于 2020 年建成固体电池生产线，2020 年 4 月辉能科技完成 D 轮融资，本轮融资将用于加速固态电池商业化落地和工厂建设。

2) 2020 年日本丰田计划推出搭载硫化物固态电池的新能源汽车，并于 2022 年实现量产。十几年前丰田已开展固态电池研发工作，不仅获得了固态电解质材料、固态电池的制造技术等方面的专利，还研发了一整套的正极材料和硫化物固态电解质材料回收的技术路线和回收工序。

3) 美国 Sakti3 宣布研发出超高能量密度聚合物固态电池。2019 年 12 月，Sakti3 号称开发出了能量密度超 1000 Wh/kg 的固态电池，但该电池至今还未在实验室之外进行过测试，绝大多数技术细节并未公开。

图 56：不同企业选择的电解质技术路线



资料来源：宁德时代、辉能科技、LG 等公司官网，光大证券研究所

6、投资建议

每次电池的技术更新都会出现新的投资机会，因此关注技术路线十分重要；特斯拉是全球领先的电动车企业，搭载的动力电池始终引领行业，有必要对其电池战略加以重视。特斯拉近两年收购了 Maxwell 和 Hibar，并且与著名的锂电池专家 Jeff Dahn 合作多年，也正在与宁德时代进行联合研究。我们通过公开信息整理了一些主流的技术创新方向，供投资者参考。

持续提升能量密度、改善循环寿命以及降低成本是特斯拉在锂电池研发方面的主要目标。我们认为，材料层面和工艺层面的创新是特斯拉的重点布局方向，其中材料层面的具体方向包括无钴化（高镍+包覆改性等）和电解液添加剂等，工艺层面的具体方向包括预补锂和干电极技术等。建议投资者积极关注相关企业。

表 10：技术方向及涉及的上市公司

技术方向	具体方案	涉及企业
材料层面	无钴化	三元/四元/改性：当升科技、容百科技等；磷酸铁锂：德方纳米、湘潭电化、贝特瑞等
	硅碳负极	贝特瑞、璞泰来、杉杉股份、中科电气等
	电解液添加剂	新宙邦、天赐材料等
	碳纳米管	天奈科技、德方纳米等
结构层面	CTP 方案	宁德时代、回天新材等
	刀片电池方案	比亚迪等
工艺层面	干电极	巨化股份、昊华科技等
	预补锂	赣锋锂业等
其他体系	超级电容	江海股份、新筑股份等
	固态电池	宁德时代、比亚迪、赣锋锂业、珈伟股份等

资料来源：光大证券研究所整理

7、风险分析

(1) 政策变化影响行业发展的风险：新能源汽车行业的发展仍属于早期阶段，政策会对行业产生较大影响，若监管部门发布相关政策，可能会影响行业发展。

(2) 技术路线变更的风险：技术进步是新能源汽车行业发展的驱动力之一，新产品的产业化可能会对上一代产品产生冲击，进而替代原有的技术路线。

(3) 市场竞争加剧的风险：新能源汽车行业拥有很大发展空间，有大量企业参与竞争，行业产能可能在短期内超过需求，从而出现产能过剩的风险。

(4) 原材料价格大幅波动的风险：钴、锂是动力电池的重要原材料，如果价格大幅波动，会影响电池材料的价格，进而导致动力电池成本发生预期之外的变动。

(5) 疫情持续蔓延影响公司经营的风险：如果疫情持续时间过长，可能影响相关公司的生产、产品运输、下游需求等。

行业及公司评级体系

评级	说明
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 15%；
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。

基准指数说明：A 股主板基准为沪深 300 指数；中小盘基准为中小板指；创业板基准为创业板指；新三板基准为新三板指数；港股基准指数为恒生指数。

分析、估值方法的局限性说明

本报告所包含的分析基于各种假设，不同假设可能导致分析结果出现重大不同。本报告采用的各种估值方法及模型均有其局限性，估值结果不保证所涉及证券能够在该价格交易。

分析师声明

本报告署名分析师具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格并注册为证券分析师，以勤勉的职业态度、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，并对本报告的内容和观点负责。负责准备以及撰写本报告的所有研究人员在此保证，本研究报告中任何关于发行商或证券所发表的观点均如实反映研究人员的个人观点。研究人员获取报酬的评判因素包括研究的质量和准确性、客户反馈、竞争性因素以及光大证券股份有限公司的整体收益。所有研究人员保证他们报酬的任何一部分不曾与、不与、也将不会与本报告中的具体的推荐意见或观点有直接或间接的联系。

特别声明

光大证券股份有限公司（以下简称“本公司”）创建于 1996 年，系由中国光大（集团）总公司投资控股的全国性综合类股份制证券公司，是中国证监会批准的首批三家创新试点公司之一。根据中国证监会核发的经营证券期货业务许可，本公司的经营范围包括证券投资咨询业务。

本公司经营范围：证券经纪；证券投资咨询；与证券交易、证券投资活动有关的财务顾问；证券承销与保荐；证券自营；为期货公司提供中间介绍业务；证券投资基金代销；融资融券业务；中国证监会批准的其他业务。此外，本公司还通过全资或控股子公司开展资产管理、直接投资、期货、基金管理以及香港证券业务。

本报告由光大证券股份有限公司研究所（以下简称“光大证券研究所”）编写，以合法获得的我们相信为可靠、准确、完整的信息为基础，但不保证我们所获得的原始信息以及报告所载信息之准确性和完整性。光大证券研究所可能将不时补充、修订或更新有关信息，但不保证及时发布该等更新。

本报告中的资料、意见、预测均反映报告初次发布时光大证券研究所的判断，可能需随时进行调整且不予通知。在任何情况下，本报告中的信息或所表述的意见并不构成对任何人的投资建议。客户应自主作出投资决策并自行承担投资风险。本报告中的信息或所表述的意见并未考虑到个别投资者的具体投资目的、财务状况以及特定需求。投资者应当充分考虑自身特定状况，并完整理解和使用本报告内容，不应视本报告为做出投资决策的唯一因素。对依据或者使用本报告所造成的一切后果，本公司及作者均不承担任何法律责任。

不同时期，本公司可能会撰写并发布与本报告所载信息、建议及预测不一致的报告。本公司的销售人员、交易人员和其他专业人员可能会向客户提供与本报告中观点不同的口头或书面评论或交易策略。本公司的资产管理子公司、自营部门以及其他投资业务板块可能会独立做出与本报告的意见或建议不相一致的投资决策。本公司提醒投资者注意并理解投资证券及投资产品存在的风险，在做出投资决策前，建议投资者务必向专业人士咨询并谨慎抉择。

在法律允许的情况下，本公司及其附属机构可能持有报告中提及的公司所发行证券的头寸并进行交易，也可能为这些公司提供或正在争取提供投资银行、财务顾问或金融产品等相关服务。投资者应当充分考虑本公司及本公司附属机构就报告内容可能存在的利益冲突，勿将本报告作为投资决策的唯一信赖依据。

本报告根据中华人民共和国法律在中华人民共和国境内分发，仅向特定客户传送。本报告的版权仅归本公司所有，未经书面许可，任何机构和个人不得以任何形式、任何目的进行翻版、复制、转载、刊登、发表、篡改或引用。如因侵权行为给本公司造成任何直接或间接的损失，本公司保留追究一切法律责任的权利。所有本报告中使用的商标、服务标记及标记均为本公司的商标、服务标记及标记。

光大证券股份有限公司版权所有。保留一切权利。

联系我们

上海	北京	深圳
静安区南京西路 1266 号恒隆广场 1 号 写字楼 48 层	西城区月坛北街 2 号月坛大厦东配楼 2 层 复兴门外大街 6 号光大大厦 17 层	福田区深南大道 6011 号 NEO 绿景纪元大厦 A 座 17 楼