

固态电池关键材料体系发展研究

李泓^{1,2}, 陈立泉^{1,2*}

(1. 中国科学院物理研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 101400)

摘要: 固态电池技术是发展兼具高能量密度、高安全性、长寿命和低成本的下一代电池的重要保证, 当前全球主要国家及地区均在加快布局固态电池研发和产业化。本文从固态电池关键材料的技术体系、产业体系和支撑体系 3 个方面着手, 综述了国际固态电池关键材料体系的发展现状, 分析了美国、欧洲、日本、韩国等国家和地区的固态电池技术发展路径、产业规模和支撑体系建设情况, 梳理了我国固态电池关键材料体系的发展现状并提出了发展目标。研究发现, 我国固态电池正处于推广发展期, 在关键原材料、关键科学技术瓶颈突破、规模化量产及产业化应用等方面面临挑战。研究建议, 坚持分步发展固态电池的总策略, 设立国家级固态电池发展规划和重大科技专项, 推动固态电池技术研发机构建设, 促进固态电池市场化应用及产业转型, 优化固态电池生态环境建设, 实现我国固态电池产业领跑世界。

关键词: 固态电池; 锂电池; 原位固态化技术; 关键材料体系

中图分类号: TM911 **文献标识码:** A

Development of Key Material System for Solid-State Batteries

Li Hong^{1,2}, Chen Liquan^{1,2*}

(1. Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. College of Materials Science and Opto-Electronics Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The solid-state battery is crucial for achieving the next-generation batteries that possess high energy density, high safety, long service life, and low cost. Major countries and regions are rapidly advancing the research and industrial application of solid-state batteries. This study reviews the development status of key material systems for solid-state batteries worldwide from the aspects of technological, industrial, and supporting systems. It analyzes the technical development paths, industrial scales, and supporting systems of solid-state batteries in countries and regions including the United States, Europe, Japan, and Republic of Korea, and summarizes the development status and goals of the key material system for solid-state batteries in China. Our study reveals that the solid-state batteries are currently in a promotion stage in China, facing challenges in terms of key raw materials, breakthroughs in critical scientific and technological bottlenecks, mass production, and industrial application. To promote the development of solid-state batteries in China, we propose the following suggestions: (1) adhering to an overall staged-development strategy for solid-state batteries, (2) establishing national-level development programs and major scientific and technological projects for solid-state batteries, (3) promoting the construction of technology research and development institutions for solid-state batteries, (4) encouraging the market application and industrial transformation of solid-state batteries, and (5) optimizing the solid-state battery ecosystem.

收稿日期: 2024-04-23; 修回日期: 2024-05-27

通讯作者: *陈立泉, 中国科学院物理研究所研究员, 中国工程院院士, 研究方向为纳米离子学、新能源材料和固态电池;

E-mail: lqchen@iphy.ac.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“关键材料体系自立自强战略研究”(2022-PP-02)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

Keywords: solid-state battery; lithium battery; *in-situ* solidification; key material system

一、前言

先进电池技术是推动设备智能化、能源清洁化、交通电动化的重要基础，也是实现我国“双碳”战略目标的关键支撑^[1,2]。目前，我国依托液态锂离子电池，已构建了全球领先的新能源汽车产业体系，但现有的锂离子电池采用了易燃的液态电解质，难以同时满足电动汽车、储能、电动航空、智能终端等行业对高能量密度、高安全性、长寿命和低成本锂电池的迫切需求^[3]。高比能、高安全性和长寿命的固态电池被全球公认为是取代现有锂离子电池的颠覆性技术之一^[4,5]。近年来，固态电池材料研究热潮已在学术界和产业界兴起，被视为先进电池材料的未来发展趋势，是实现高性能下一代电池的重要途径。

目前，全球主要国家均在加快布局固态电池的研发和产业化。美国、欧洲、日本、韩国均提出了与固态电池相关的发展规划和战略布局，将其作为强化自身电池技术、抢占未来国际电池市场的重要突破点^[6]。全球各大电池和汽车企业相继发布了固态电池产品启用时间，以固态电池为代表的新型电池正在重构国际电池及能源市场竞争格局。我国对固态电池的基础研究在世界范围内起步较早，但在关键科学技术、关键原材料、工艺装备等方面的瓶颈和短板较为突出^[2,7]。

为加快适应国际电池材料体系发展的新趋势和日益激烈的国际电池市场竞争新格局，本文对国内外固态电池关键材料领域的技术研究和产业发展状况进行综合调研，厘清国内外固态电池关键材料技术体系、产业体系和支撑体系的发展现状，总结我国固态电池发展面临的主要问题及挑战，并针对性提出我国固态电池材料体系自立自强发展战略及相关措施建议，以期为推动我国固态电池关键材料体系构建和实现固态电池技术不断发展提供参考。

二、国内外固态电池关键材料技术体系

(一) 国际固态电池关键材料技术体系发展历程

锂电池根据电解质的不同，可以分成液态锂离子电池、混合固液电池（半固态或准固态）、全固

态电池3类。其中，混合固液电池使用固态电解质部分取代液态电解液；而全固态电池使用固态电解质取代电解液，电池中完全不含液体^[6]。通常意义上，固态电池泛指混合固液电池和全固态电池，此二类电池均涵盖在本研究所探讨的固态电池关键材料技术体系之中。固态电池关键材料主要包括固态电解质材料、正极材料、负极材料及相关辅材。

1. 固态电解质材料

固体电解质特指具有良好离子传输性能的锂离子导体。固态电解质不挥发、一般不可燃、具有较宽的工作温区和电化学窗口，因此具备更优异的安全特性，可适配更高能量密度的正负极材料体系。固态电解质材料是固态电池的核心部件，其进展直接影响全固态电池的发展进程。依照材料类型，固态电解质主要包括氧化物、硫化物、卤化物、聚合物和复合固态电解质（聚合物+无机物）等。

聚合物固态电解质于20世纪70年代发现，具有良好的柔顺性、成膜性、粘弹性和较轻的质量。1973年，研究人员首次揭示了聚环氧乙烷在掺杂碱金属盐后可以形成络合物^[8]，随后，发现了这种络合物具有高离子电导率^[9]。1979年，此类材料开始应用于金属锂固态电池，自此开启了固态聚合物锂电池研究的热潮^[10]。之后，Bolloré公司成功将聚合物固态电池商业化，其工作温度为80℃，成为电动交通工具中第一个商业化的固态电池类型。目前，聚合物电解质常用的基体材料包括聚氧化乙烯、聚丙烯腈、聚甲基丙烯酸甲酯、聚偏氟乙烯等。开发高电压复合型多层聚合物固体电解质、室温聚合物电解质是当前的研究热点和重要目标。

无机固态电解质具有较高的离子电导率和机械强度。目前，按照化学成分划分，无机固态电解质主要包括氧化物、硫化物、卤化物等。按晶体形态划分，又可分为晶态电解质和非晶态电解质。其中，晶态电解质主要包括钙钛矿型、反钙钛矿型、钠快离子导体（NASICON）型、榴石型等；非晶态电解质主要包括非晶氧化物和非晶态硫化物等。Li₃N是最早研究的无机固态电解质，但由于电导率存在各向异性，分解电压较低，限制了其在固态电池中的应用。1976年，研究人员发现了NASICON型电解质^[11]，随后发现了对应的锂快离子导体

(LISICON) 型电解质, 两者均具有较高的离子电导率。目前, 磷酸钛铝锂 (LATP) 和磷酸锆铝锂 (LAGP) $[(Li_{1-x}Al_xM_{2-x}(PO_4)_3)(M=Ti, Ge)]$ 两种固态电解质材料已获得广泛研究, 具有较好的应用前景。1993 年, 通过磁控溅射制备了 LiPON ($Li_xPO_yN_z$) 薄膜, 与金属锂和氧化物正极有良好的兼容性^[12]; 同年, $Li_{0.34}La_{0.5}TiO_3$ 钙钛矿型电解质被发现^[13], 其室温体离子电导率高达 $1.5 \times 10^{-3} S/cm$ 。2004 年, 研究人员发现了 Gernet 结构固态电解质 $Li_7La_3Zr_2O_{12}$, 其具有较高的离子电导率和较宽的电化学窗口^[14]。

综合而言, 氧化物电解质的化学稳定性和热稳定性较好, 但兼具高离子电导率、宽电化学窗口、低成本特性的材料仍在开发之中。硫化物电解质具有极高的离子电导率, 如 2011 年发现的硫化物 $Li_{10}GeP_2S_{12}$ 具备与液态电解质同等水平的室温离子电导率^[15]; 然而, 硫化物电解质的化学稳定性和空气稳定性较差, 较难规模化生产且与电极材料间存在较大的界面阻抗, 限制了广泛应用。卤化物电解质的室温离子电导率较高, 与氧化物正极界面稳定性好, 但存在与金属锂负极界面稳定性差或电化学窗口较窄等短板。目前, 固态电解质材料普遍面临的挑战是内阻和与电极界面接触的电阻都较高, 因此, 开发具有高电导率、低界面电阻的固态电解质材料, 推动电极/电解质界面修饰和改性研究是提高固态电池整体性能的关键。

2. 正极材料

正极材料是制约电池能量密度提升的重要因素。目前开发的锂电池主要以正极材料作为锂源, 成本约占电池材料总成本的 30% 以上。普遍用于固态电池研究正极材料除 $LiCoO_2$ 、三元材料、 $LiFePO_4$ 等以外, 高镍层状氧化物、富锂锰基、高电压镍锰尖晶石等材料也在不断研发之中。

1981 年, 层状 $LiCoO_2$ 被发现可以用作锂电池正极材料^[16], 成为第一代商业化的锂电池正极材料。随后, 研究人员通过掺杂、包覆等改性方法, 推动耐高电压的 $LiCoO_2$ 材料取得长足发展。目前, 基于 $LiCoO_2$ 正极材料的锂电池已广泛应用在电子产品中。

1983 年, $LiMn_2O_4$ 正极材料^[17]被发现, 具有导电和导锂性能稳定优良、倍率性能良好、锰元素无毒无害、价格低廉等特点, 但该类正极材料的理论容量较低, 目前主要应用于电动自行车等小型电动

设备领域。

1997 年, $LiFePO_4$ 正极材料被发现^[18], 具有结构稳定、安全性好、高温性能好、循环寿命长和原材料来源广泛等优势, 是目前动力电池和储能电池领域应用最为广泛的正极材料。

2001 年, $Li-Ni-Co-Mn-O$ 三元正极材料首次引入到锂电池中^[19]。相较于 $LiCoO_2$, 三元材料成本更低, 常见的三元材料中 Ni-Co-Mn 三者比例为 4:2:3、3:3:3、5:2:3、6:2:2、8:1:1 等。随着新能源电动汽车的快速发展, 三元材料逐渐成为动力电池的重要正极材料。

3. 负极材料

负极材料是决定锂电池性能的关键因素之一, 不同的负极材料可以通过嵌入、合金化或转换反应实现储锂。目前已广泛应用的负极材料包括石墨类、 $Li_4Ti_5O_{12}$ 、无定形碳 (硬碳、软碳)、硅基材料、锂合金等。固态电池的负极材料主要有碳族负极、硅基负极和金属锂负极 3 类。

1970 年, 研究人员采用金属锂成功制造了首个锂电池, 并于 1976 年提出了最早的可充电锂电池的雏形^[20]。然而, 金属锂在充放电过程中因体积变化较大, 导致电池循环性能显著降低; 金属锂作为高活性物质, 存在明显的安全隐患, 使得此类电池未能实现商业化。尽管如此, 由于金属锂负极具有高比容量、低电位、低密度等优点, 固态锂金属电池开发仍是当前电池领域的研究热点。

1983 年, 法国格勒诺布尔实验室第一次在电池中实现了 Li^+ 在石墨中的可逆嵌入/脱嵌^[21]。1989 年, 日本索尼公司成功将石油焦用作负极材料, 实现了锂离子电池的商业化。目前, 性能稳定的人造石墨是锂离子电池最重要的负极材料, 其综合性能优异, 占据了超过 95% 的负极材料市场份额。

总体而言, 依托先发优势和早期锂离子电池方面的技术积累, 美国、欧洲、日本等国家和地区主导了绝大多数商业化的电解质材料、正极材料、负极材料的原始创新和技术体系。未来, 固态电池技术的发展将重塑全球电池技术体系新格局, 因此, 各国都在加紧研发和布局下一代固态电池关键材料体系。

(二) 我国固态电池关键材料技术体系研究进展

我国关于固态电池的基础研究在世界范围内起步较早, 在 20 世纪 70 年代就开始了固体电解质和

固态电池的研究。1978年，首次报道了固态离子学研究工作^[22]；1979年，我国第一个以固态离子学命名的物理所固态离子学实验室创立，且于1980年在《物理学报》发表第一篇 LISICON 文章^[23]，并成功制备出锗酸锌锂等快离子导体材料。1980年，我国第一届固体离子学讨论会召开。

1987年，科学技术部将固态电池列为首批“国家高技术研究发展计划”（863计划）重大专题之一，项目汇聚了国内11家优势单位进行集体攻关，为我国锂电池产业提供了关键的知识、技术、设备和人才储备。在863计划项目的支持下，1988年率先研制出我国第一块由 LiV_3O_8 正极和金属锂负极构成的全固态锂电池。然而，由于当时的电池材料和技术体系尚不成熟，实现固态电池的商业化存在较大挑战。1990年之后，锂离子电池产业进入快速发展阶段，而固态电池的研究进展则较为缓慢。2014年，通过持续研发积累，我国研究人员在国际上率先提出原位固态化技术，通过在电池中构筑多级、多层、多位点连续的固体电解质相，综合解决了固态电池中的固固界面问题^[24,25]。2022年，基于原位固态化技术的高能量密度固态电池在全球率先实现规模化量产。

在固态电池关键材料和基础研究方面，我国先后取得了一系列突破。中国科学院物理研究所早在1997年就首次采用“纳米硅”作为锂电池负极材料^[26]，并率先实现了产业化应用，这是我国为数不多具有完全自主知识产权的电池关键材料；并于2014—2023年相继开发了纳米固态电解质包覆正极材料、界面预锂化技术、低膨胀纳米硅碳负极材料、界面热复合等材料和技术，并通过创新材料体系和先进工艺技术，创造了能量密度高达 $711\text{ W}\cdot\text{h}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的电芯世界纪录^[27]。在固态电解质材料方面，我国相关研究取得了一系列显著进展，开发了用于有机固态电池的PMA/PEG- LiClO_4 - SiO_2 复合聚合物电解质^[28]，开发了可液相合成的 Li_2ZrCl_6 电解质^[29]，具有高离子电导率、宽化学窗口的 $\text{Li}_3\text{Zr}_2\text{Si}_2\text{PO}_{12}$ 氧化物电解质^[30]，可用于固态锂空气电池的锂离子交换沸石膜电解质^[31]，可通过光聚合制备得出的聚醚-丙烯酸酯互穿网络电解质^[32]以及利用聚碳酸丙酯基固态聚合物电解质制备的可高温下应用的 $\text{LiFePO}_4/\text{Li}$ 电池^[33]。

总体而言，我国在固态电池关键材料及技术研

究方面保持着良好发展态势，但仍需要不断研发固态电池的关键材料以满足性能需求。如图1所示，正极材料将由目前的三元材料向高镍三元材料、富锂正极材料过渡，直至满足固态电池需求的高比容量新型正极材料；负极材料将从石墨负极过渡到硅碳负极，最后到金属锂负极；固态电解质将由固液混合电解质、准固态电解质向全固态电解质逐步发展，其中兼具聚合物电解质和无机物电解质优势及综合性能的复合固态电解质可能是未来最能满足实际应用需求的固态电解质材料^[34,35]。

为保障我国在电池领域的国际持续领先优势，当前诸多科研团队正积极开展固态电池基础科学问题和关键技术攻关，包括固态电池电极和电解质关键材料体系，固态电池中的热力学、动力学、界面构筑和稳定性，固态电池电芯设计和工程化制备技术，固态电池失效机制、安全性评测方法和标准等研究。

三、国内外固态电池关键材料产业体系

（一）国际固态电池关键材料产业体系

全球固态电池产业主要分布在中国、日本、韩国、欧洲、美国等国家和地区。据不完全统计，截至2023年，全球约有53家规模以上企业布局 and 研发固态电池。表1和表2列举了国内外部分主要企业的固态电池技术路线。

日本的固态电池产业发展起步最早，如日本东芝公司于1983年就成功开发出了可实用的 Li/TiS_2 薄膜固态电池。目前，日本电池企业采取的固态电池主流技术路线是硫化物固态电解质。日本拥有多家电池关键材料龙头企业，如正极材料领域的日亚化学工业股份有限公司和住友金属工业股份有限公司，负极材料领域的三菱化学集团和 Resonac 集团，隔膜领域的旭化成集团和东丽集团，以及电芯制造领域的松下电器公司等。在产业链下游应用领域，丰田汽车公司、本田技研工业股份有限公司、日产汽车公司等企业也积极参与固态电池的生产研发。2021年，日本成立了电池供应链协会，涉及的企业可以覆盖整个电池产业链，其目标是实现日本电池供应链的可持续发展和提升其电池产业竞争力。未来，松下电器公司将于2025年将固态电池进行市场化应用，丰田汽车公司、本田技研工业股份有限公



图 1 固态电池关键材料体系发展进程
注: NCM 表示镍钴锰正极。

表 1 国外典型企业的固态电池技术路线

国家	企业名称	技术路线	国家	企业名称	技术路线
日本	丰田汽车公司	硫化物	韩国	LG 新能源公司	硫化物
	本田技研工业股份有限公司	硫化物		现代汽车集团	聚合物 / 硫化物
	三菱化学集团 / 日产汽车公司联盟	硫化物		SK On 公司	硫化物 / 氧化物
	松下电器公司	卤化物		三星 SDI 公司	聚合物 / 硫化物
	富士电气化学有限公司	氧化物	法国	博洛雷集团	聚合物
	小原股份有限公司	氧化物	英国	Ilika 公司	氧化物
	日立造船公司	硫化物		LiNa Energy 公司	氧化物
	三洋化成工业股份有限公司	聚合物	美国	Quantum Scape 公司	氧化物
	日本出光兴产股份有限公司	硫化物		Ionic Materials 公司	聚合物
德国	宝马集团	硫化物		Solid Power 公司	硫化物
	大众集团	氧化物		Factorial Energy 公司	聚合物

司等汽车企业计划 2028—2030 年实现固态电池的规模化和商业化应用。

韩国固态电池产业的发展思路是研发重量轻的

硫化物全固态电池以及高安全性的氧化物全固态电池, 其产业体系建设的企业主要是三星 SDI 公司、SK On 公司以及 LG 新能源公司。这些企业也是目前

表2 我国典型企业的固态电池技术路线

企业名称	技术路线	企业名称	技术路线
北京卫蓝新能源科技股份有限公司	氧化物/聚合物	国轩高科股份有限公司	硫化物
清陶新能源材料研究院有限公司	氧化物/复合物	中科深蓝汇泽新能源有限公司	聚合物
赣锋锂业集团股份有限公司	氧化物	重庆太蓝新能源有限公司	氧化物
辉能科技股份有限公司	氧化物	上海恩力动力技术有限公司	硫化物
蜂巢能源科技股份有限公司	硫化物	上海屹锂新能源科技有限公司	硫化物
宁德时代新能源科技股份有限公司	硫化物	北京高能时代环境技术股份有限公司	硫化物
比亚迪股份有限公司	氧化物/硫化物	孚能科技股份有限公司	氧化物/硫化物

位于全球前列的液态锂离子电池生产企业。近年来，韩国发布“2030 二次电池产业发展战略”（2021 年）、“充电电池产业革新战略”（2022 年），引导企业合力研发固态电池，并着力建设本土电池产业链体系。韩国电池企业初步规划在 2027 年前实现全固态电池的商业化应用；韩国的主要汽车企业还通过投资欧洲、美国等国家和地区的固态电池初创公司以推动固态电池产业发展。

欧洲、美国的固态电池产业较多选择聚合物和氧化物固态电解质的技术路线，重视固态金属锂电池体系的研发。其中，美国的电池企业在早期以自主研发为主，但关键材料大多依赖进口。2021 年，美国能源部发布《2021—2030 年国家锂电池蓝图》，首次由政府主导制定了未来的锂电池发展路线，并构建本土锂电池完整产业链，建设满足其国内需求的电池生产基地。美国 Quantum Scape 公司、Solid Power 公司等固态电池主要企业均计划在 2025 年前后实现固态电池的装车示范应用。目前，美国固态电池在航空领域的应用处于世界前列。

2011 年，法国博洛雷集团研发的金属锂聚合物电池是全球首个实现商业化应用的固态电池，已成功搭载于 BlueCar 电动汽车，但欧洲后续的固态电池产业化进展较为缓慢。2017—2019 年，欧洲各国陆续建立了欧洲电池产业联盟、“电池欧洲”、欧洲能源研究联盟以及发布“电池 2030+”等联合研究计划，推动包括固态电池在内的先进电池技术及产业的发展，但尚未建立完善的电池产业体系。目前，宝马集团、大众集团等大型汽车企业通过技术投资方式来推动欧洲固态电池产业的发展。

总体而言，全球主要国家和地区尚未形成完整的固态电池产业链，固态电池的关键材料体系尚未完全明确，且依然存在固固界面接触不良、成本较

高等问题；在电池回收和关键材料循环利用环节仍存在较大缺口，尚未形成完整的产业链闭环。

（二）我国固态电池关键材料产业体系

目前，我国是全球最大的锂电池生产国和使用国。我国锂电池产业于 20 世纪 90 年代末开始发展，并在 1998 年建立了国内第一条锂离子电池中试生产线，解决了锂离子电池生产中的关键技术和材料制备问题。之后，我国逐步建立起锂离子电池上下游产业体系，经过多年的快速发展，涌现了诸如星恒电源股份有限公司、宁德新能源科技有限公司、宁德时代新能源科技股份有限公司等一批电池龙头企业。

依托锂离子电池发展优势，我国已建成了全球规模最大、最齐全的锂电池产业体系。在关键材料方面，我国锂电池的正极、负极、电解液和隔膜四大类原材料基本摆脱进口依赖，形成了上下游完整的供应链；在生产制造方面，锂电池相关设备的国产化率达 90% 以上，龙头企业的产品性能基本达到国际领先水平，并在智能制造、自动化和无人化生产等方面取得了迅速发展；在电池回收方面，我国锂电池梯次利用和材料再生等技术逐步完善。当前全球的锂电池生产高度依赖我国的电池产业体系。

我国原位固态化电池产业体系建立在现有锂离子电池产业基础之上，循序渐进地推动固态电池产业领先式发展。我国固态电池的产业发展从液态锂离子电池开始，经过混合固液电池，预计在 2030 年左右实现全固态电池的商业化应用。目前，我国已经实现介于锂离子电池与全固态锂电池之间的原位固态化电池规模化生产。随着循环性、安全性以及其他综合技术指标的逐渐提升，此类电池的能量密度已经达到 $300\sim 400 \text{ W}\cdot\text{h}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。在原位固态化电池基

基础上，我国将逐步过渡到全固态电池。

据不完全统计，目前我国有超过 19 家从事固态电池研发和生产的企業，相关企业通过与高校、科研院所联合研发，不断升级和改进材料体系以积累相关技术，持续推进固态电池发展。例如，由中国科学院物理研究所技术孵化的北京卫蓝新能源科技股份有限公司已在全球率先实现了原位固态化电池的规模量产，建设了累计产能达 5.6 GW·h 的固态电池生产线，产品已成功应用于新能源汽车、规模储能、安全设备等领域。在固态电池关键材料产业化方面，中国科学院物理研究所依托纳米硅碳负极材料技术孵化成立了溧阳天目先导电池材料科技有限公司；该材料是由中国学者原创提出并研发的电池核心材料，并形成了完整的知识产权群。目前，宁德时代新能源科技股份有限公司、比亚迪股份有限公司、华为技术有限公司等龙头企业均开始布局固态电池研发，蔚来汽车科技有限公司于 2023 年实现了续航里程超过 1000 km 的固态电池装车及路试，东风汽车股份有限公司将于 2024 年实现新一代高比能固态电池的整车搭载。我国已初步形成了较为完整的固态电池产业链。

我国固态电池产业的发展目标总体可以分为 3 个阶段。近期目标（2027 年）是发展原位固态化电池，提高能量密度和循环次数，全面实现其在新能源汽车动力系统、储能、智能装备等领域的应用，推进固态电池产业链布局；中期目标（2035 年）

是进一步提高原位固态化电池的综合性能，实现规模化生产和工业化成熟应用，形成较为完善的固态电池产业化布局；远期目标（2050 年）是研制高比能和超高比能全固态电池，大幅提高电池能量密度和循环寿命，除在新能源汽车和储能领域实现大规模应用以外，还要在电动航空、电动船舶及其他特殊领域得到应用。图 2 展示了下一代固态电池关键材料及产业体系的发展布局。依照从原位固态化到全固态电池的发展路线，构建从前躯体、核心材料、辅助材料、单一装备、整体装备、电芯、模组、系统产线、系统集成、传感、消防、标准化测试，到梯次利用及回收的全产业链；同时，固态电池产业体系发展还将结合数字研发、数字制造、数字检测、数字运维等先进手段，向极致制造、极简制造、极致性能、更大规模方向发展。

四、国内外固态电池关键材料支撑体系

（一）国际固态电池关键材料政策支撑体系

1. 美国电池政策支撑体系

美国固态电池关键材料的研发支撑主要由美国能源部主导。为协调政府资源并加速电池技术的发展，美国能源部、国防部、商务部等共同组建了联邦先进电池联盟，指导在电池技术方面的公共投入，推动电池技术的发展。美国能源部还依托西北太平洋国家实验室成立了国家级储能技术研发中



图 2 下一代固态电池关键材料及产业体系发展布局

心。基于2021年发布的《基础设施投资和就业法案》，美国能源部发布了“电池材料加工和电池制造”“电动汽车电池回收和再利用”两项计划，以推动先进电池的制造，建立美国本土电池供应链。2022年，美国多部门联合发布了《国家创新路径》，要求所有通过《通胀削减法案》资助的电动汽车充电设备必须在美国本土生产，并发布新能源汽车电池税收抵免激励法，鼓励商业化基础研究；开发替代材料以减少对钴、镍等关键材料的外部依赖，推动新型锂电池电极和电解质关键材料研发，推动固态电池技术、新型制造工艺以及电池回收技术的发展。

2. 欧洲电池政策支撑体系

欧洲地区的关键电池材料和先进电池技术发展主要受两方面驱动：一是由欧盟颁布相关政策，推动其加盟国相关技术的开发和市场推广，二是由各国政府根据自身发展情况，推动电池技术研发及推广。欧盟重视先进电池技术的研发，自2017年以来，陆续建立了欧洲电池产业联盟、欧洲技术与创新平台以及欧洲能源研究联盟，发布了《欧洲储能技术发展路线图》《电池战略行动计划》《地平线2021—2027计划》《欧洲共同利益重要计划》《欧洲电池研发创新路线图》以及第三版《电池2030+路线图》等多项联合研究计划，引导欧洲电池研究的优先发展领域，规划战略研究议程与发展方向，促进欧洲电池制造产量增长和持续创新发展。

2023年，欧盟通过《欧洲关键原材料法案》，要求到2030年在欧洲本土生产至少10%的锂、钴、镍、硅等电池关键原材料，加工至少40%的关键原材料以及回收至少15%的关键原材料，确保欧盟获得安全和可持续的关键原材料供应。同年，欧洲议会颁布了《欧盟电池与废电池法规》，提出建立对电池全生命周期碳排放的管控措施，加强废弃电池的收集和回收效率，明确了电池废弃物的管理要求。

3. 日本电池政策支撑体系

自20世纪80年代开始，日本新能源产业技术综合开发机构（NEDO）就对固态电池研发给予了长期稳定的支持。2018年，NEDO启动了全固态锂电池项目第二阶段，目标是突破固态电解质和固态锂电池生产的技术瓶颈，制造高能量密度固态电池。日本政府在2022年发布《电池产业战略》，计

划于2030年前建成年产能达150 GW·h的国内电池制造基地和年产能达600 GW·h的全球电池制造基地。2023年，NEDO宣布下一代全固态电池材料基础技术评估和开发计划，拟在2023—2027年全面提高全固态锂电池性能，促进电池及材料开发，加快商业化进程。

为了强化资源保障能力，日本政府已将锂、钴等关键矿产纳入高风险范畴，并推出了一系列政策以扩大对相关企业的支持；将增强与澳大利亚、南美等锂资源丰富国家和地区间的合作关系，确保供应链上游稳定。为提高电池领域的人才保障能力，日本在高校和科研院所中广泛开设了电池类相关专业课程，并成立了由政府、产业界和学术界组成的“关西电池人才培养联盟”，计划于2030年前培养30 000名电池产业链供应链专业人才，包括电池制造人才、电池产品开发和评价人才等。

4. 韩国电池政策支撑体系

目前，韩国的锂离子电池产业规模居全球第二位。韩国政府明确将电池技术作为推动其经济发展的核心动力，制定了“2030二次电池产业发展战略”“二次电池产业创新战略”等一系列战略措施，规划了先进电池技术研发路线和全固态电池商业化方向，明确了产业投资、税收优惠以及人才培养目标，期望通过建立技术领先优势在2030年成为全球电池领军国家。

近年来，韩国持续加大固态电池技术产业的投入。韩国政府与龙头电池企业计划于2030年前共同投资20万亿韩元，开发包括固态电池在内的先进电池技术，设立研发创新基金以培育中小型初创企业发展原始创新技术，并提供高额减税政策以支持相关材料研发，巩固提升其全球电池市场份额。为保障电池产业链和供应链稳定，韩国政府与电池制造商、材料供应商、精炼企业等主要企业成立了“电池联盟”，推动电池生态系统的本土化发展。在人才培养方面，韩国政府牵头成立了“电池学院”，计划到2030年培养16 000名电池领域相关人才。

（二）我国固态电池关键材料政策支撑体系

我国高度重视先进电池技术创新及产业发展。早在“六五”时期，就开展了锂离子导体研究重大项目；1987年，科学技术部将全固态聚合物锂二次电池纳入863计划重点项目；20世纪90年代初，又

将锂离子电池关键材料与技术列为863计划重点支持课题，并在后续的多个“五年”规划和高技术发展计划中持续支持锂电池技术发展。2002年，我国将“绿色二次电池的基础研究”列入国家973计划项目，鼓励电化学储能技术的原理性创新，后续又将“新型二次电池及相关能源材料的基础研究”列入第二期973计划项目。

“十四五”时期，我国启动了新能源汽车重点专项、储能与智能电网重点专项等重大项目，支持固态电池技术开发，其中，前者重点支持全固态金属锂电池技术开发，后者将兆瓦时级本质安全固态锂离子储能电池技术列为共性关键技术。近年来，为推动电池技术的发展，我国注重顶层规划的引导作用，发布了一系列与固态电池相关的规划和方案。《“十四五”可再生能源发展规划》（2022年）明确提出，加强可再生能源前沿技术和核心技术装备攻关，加强前瞻性研究，加快研发固态锂离子电池等高能量密度储能技术。《“十四五”新型储能发展实施方案》（2022年）指出，加大关键技术装备研发力度，推动多元化技术开发，研发储备固态锂离子电池等新一代高能量密度储能技术。《新能源汽车产业发展规划（2021—2035年）》（2020年）在新能源汽车核心技术攻关工程专栏中明确提出，加快固态动力电池技术研发及产业化。《关于推动

能源电子产业发展的指导意见》（2023年）在新型储能方面提出，加快研发固态电池等新型电池。《科技支撑碳达峰碳中和实施方案（2022—2030年）》（2022年）中再次明确指出，研究固态锂离子、钠离子电池等更低成本、更安全、更长寿命、更高能量效率、不受资源约束的前沿储能技术。此外，国家自然科学基金委员会、中国科学院、中国工程院等长期以来非常重视电池关键材料及固态电池技术的发展，持续设立若干重点项目资助并支持相关科学研究和人才培养。

（三）国际固态电池专利支撑体系

本文在 IncoPat 商业数据库中以“固态电池”为关键词，运用“专利名称”“说明书摘要”“权利要求书”3个字段进行专利检索，查询到全球范围内的相关专利申请数量共计39 805项。由于1990年之前的固态电池专利申请数量相对较少，年申请量在200项以下，故检索时间范围设定为1990年至2024年4月。

全球固态电池专利申请数量情况如图3所示。1990—1996年，全球固态电池的专利申请量相对稳定，年申请量在200~400项，专利申请量虽出现增长，但增长幅度不大。自1997年开始，全球固态电池的专利申请量首次超过500项，随后申请量缓慢

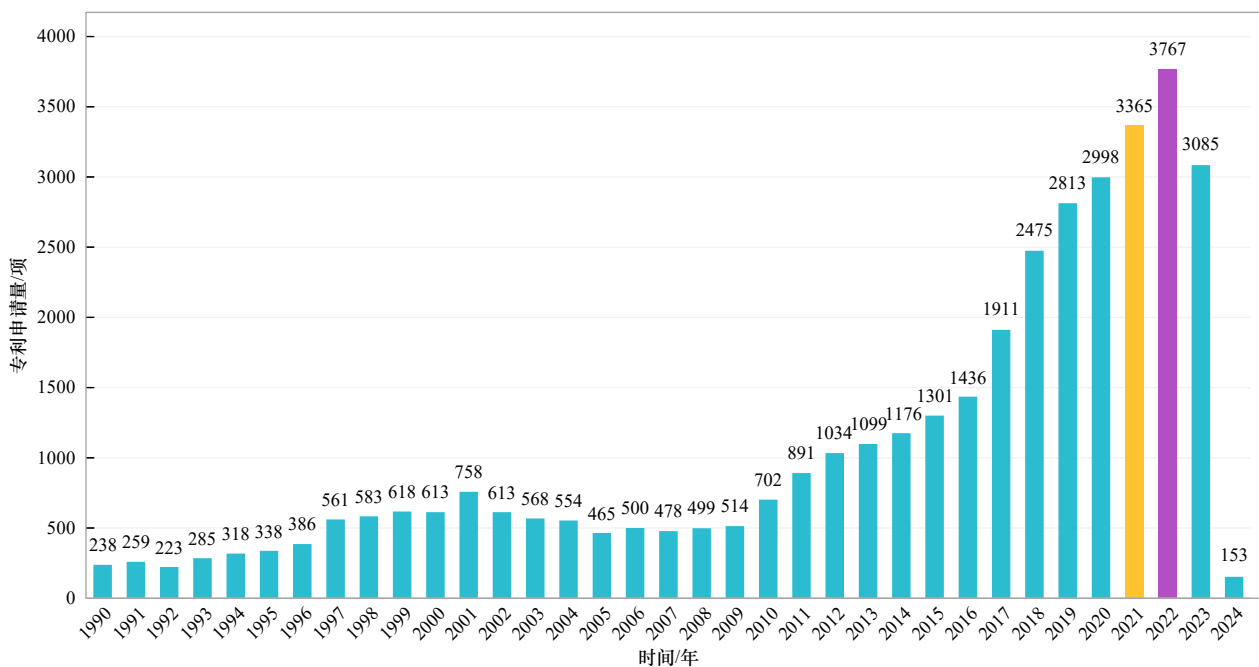


图3 全球固态电池专利申请量的历年分布情况

上升；但在2002年之后出现缓慢下降，直至2010年，全球固态电池的专利申请量逐渐进入快速增长的阶段；2016年之后，专利申请量更是呈现阶梯式上升，如2017年的专利申请量与2016年相比增加了接近500项；2021年，全球固态电池专利申请量超过3000项且仍在持续增长。现阶段，全球固态电池的专利申请量迅速增长，固态电池已成为电池领域的热点研究方向。由于液态锂离子电池的安全问题以及电池容量提升遇到瓶颈，高能量密度和本质安全的固态电池成为电池领域的重要突破口，受到众多创新主体的青睐，研发热情不断高涨。

全球固态电池专利申请量排名前5的国家和地区依次为：日本、中国、美国、韩国、欧洲。①日本的专利申请量排名世界第一。这是由于日本在电池领域的研究起步早、积累丰富，其本土具有众多较强研发实力的企业，在电池研发和生产领域占据优势，同时日本政府也大力支持固态电池研发投入。②我国的专利申请量排名世界第二。为实现“双碳”战略目标，我国大力推动清洁能源技术的研发创新，新能源汽车行业快速发展，已经处于世界前列。未来，为满足航空、航天、高端消费电子、安全装备等对更高能量密度、更高安全性电池技术的需求以及基于我国在锂离子电池方面绝对领先的发展现状，进一步在固态电池关键材料和技术上保持优势是国内创新主体关注的重点。目前，我国的固态电池专利申请量逐年上升且近年来保持高速增长态势。自2016年以来，我国年专利申请量跃居世界首位，成为固态电池领域专利布局的重点国家。按照目前的发展趋势，我国在固态电池领域累积的专利申请量有望超过日本。③美国的固态电池专利申请量排名世界第三。除美国创新主体对固态电池的应用前景乐观外，美国政府对关键电池材料和先进电池技术等方面的研发给予了大力支持。虽然固态电池在美国的技术活跃度低于中国，但仍需重点关注美国相关专利的申请情况，关注固态电池的关键和核心技术发展动态。总体而言，近年来，来自中国、美国、日本和韩国的固态电池专利申请量较多，属于固态电池技术研发和创新最为密集的国家，但各国的固态电池技术路线侧重点不同，如我国是以氧化物电解质和聚合物电解质复合为主，日本和韩国是以硫化物电解质为主。虽然固态电池技术路线不同，但各国都非常重视固态电池关键技

术及产业的发展，推动固态电池的大规模应用。

全球固态电池专利申请量排名前10位的企业依次为：丰田汽车公司、三星集团、松下电器公司、日立公司、LG集团、三菱化学集团、汤浅股份有限公司、索尼集团公司、日本碍子公司和日产汽车公司。丰田汽车公司具有雄厚的资金实力以及丰富的研发经验，其提出2030年前投资2万亿日元用于锂电池及固态电池研发和生产，2025年实现小批量生产并率先用于混合动力车型，2030年实现批量生产和全面商业化。目前，丰田汽车公司宣布，已克服固体电解质随着电池充放电反复膨胀和收缩引发的龟裂问题，有利于推动固态电池商业化进程。我国在新能源汽车行业处于世界前列，且自2016年至今固态电池的专利申请量全球排名第一，但专利申请量排名总累计前10的申请企业中却没有我国企业。这也从侧面反映出我国需进一步对固态电池展开技术创新和难题攻关，在专利技术内容上全方位铺展开来，逐步掌握固态电池的核心技术，对专利进行合理布局，使专利申请数量和质量均得到提升。此外，我国高校、科研院所所在固态电池关键材料和技术上具有更强的研发实力和创新能力，国内企业可考虑与其进行合作研发，充分发挥各自优势，力争在固态电池领域取得更大的突破。

（四）我国固态电池专利支撑体系

与国际固态电池专利申请情况相比，我国固态电池专利申请起步较晚。如图4所示，1996年之前我国固态电池的专利申请量很少，1996—2000年的固态电池专利申请量开始逐渐增多，但年申请量在50项以下。这表明固态电池技术仅受到部分研究人员的关注。2000—2009年，固态电池领域每年的专利申请量均在100项左右，2010年后专利申请量明显稳步增长，2016年开始专利申请量快速增长，2021年的专利申请量是2016年的3倍多。固态电池专利申请量的迅猛增加表明，众多创新主体将固态电池作为电池领域未来的重要发展方向。我国固态电池专利申请的快速发展态势与实现“双碳”战略目标紧密相关，但更多的是为了满足对本质安全和高能量密度电池体系的需求。未来，我国固态电池关键材料和技术突破有望推动固态电池成功应用于电动航空、安全装备等领域。

我国固态电池专利申请量排名前3位的省份是

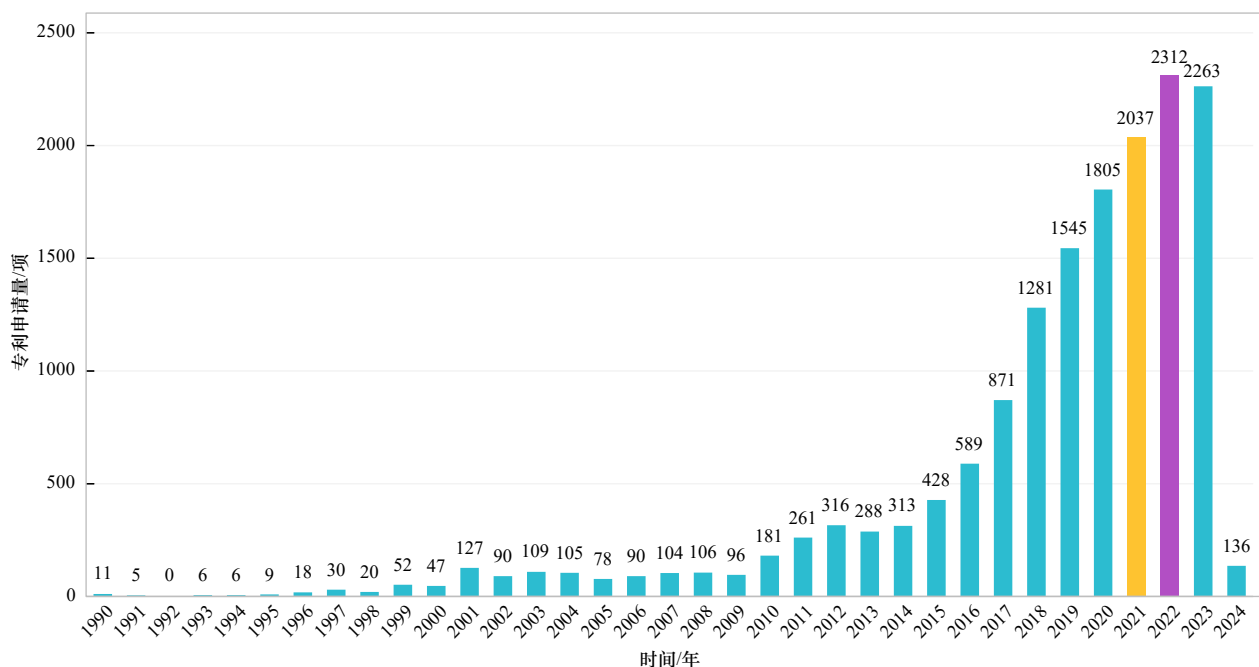


图4 我国固态电池历年专利申请情况

广东省、江苏省和北京市，远超其他省份，位于专利申请量第一梯队。专利申请量与各省份的创新主体数量是密切相关的，也与创新主体的研发方向、研发实力、技术储备和地方政策存在相关性。我国拥有完整的锂离子电池产业链，这也有助于固态电池全产业链的形成。

固态电池已成为各个国家重点突破的重点方向，积极抢占未来固态电池发展的制高点，对引领新一轮新能源汽车市场的变革至关重要。因此，国内相关创新主体需要引起足够的重视，加大研发投入力度、攻克技术难题和提升技术创新高度，同时也需要对固态电池专利进行全方位布局，规避风险以突破专利技术壁垒。此外，需要加强高校、科研院所、企业之间的合作研发，充分利用各自研究优势，力争在固态电池格局尚未完全形成的情况下占据有利位置。

国内创新主体应当及时开展固态电池关键技术的研发和制造，提前进行专利布局。要对国内外重要创新主体的专利进行分析，合理规避专利侵权风险，而对于国内外创新主体的失效专利可以合理使用、挖掘。同时，相关专利布局要以市场为导向，结合自身优势，稳固推进。因此，建议国内企业力争在若干技术点中拥有自身的核心技术，从初期的核心技术和重点专利布局，逐渐转向构建完整的技

术架构，形成全面的专利“保护网”。

五、我国固态电池发展存在的主要问题

我国高校和科研院所对固态电池的基础研究起步较早，经过多年发展已在固态电池研发技术储备方面取得积极进展。然而，固态电池发展仍然受到关键材料、装备制造、产业应用等方面的制约，系列重大基础科学问题尚未完全解决，关键材料和工艺装备等核心技术未实现突破，产业化制备技术成熟度较低、形成规模产能的企业有限，相关行业/团体标准暂时缺失，生产成本较高等问题突出。综合来看，我国固态电池发展面临的问题与挑战主要有以下几个方面。

（一）固态电池发展关键基础科学问题和核心技术瓶颈亟待突破

不同于传统液态电池体系，固态电池体系面临的科学、技术问题挑战更大，需要重点研究全寿命周期电芯中固固界面、热电耦合、离子输运、材料稳定性、电池失效机制等问题，并形成有效的创新解决方案。其中，电极/电解质材料之间的固固界面问题是世界级科学难题，多相界面间离子输运路径拓扑结构复杂，空间电荷层结构与效应不明，缺

乏定量描述，微观机制不清晰，需进行深入系统研究。

（二）固态电池关键材料和工艺装备亟需突破

目前，我国虽然在固态电池领域采用的原位固态化技术路线率先实现了全球最高能量密度电芯的小规模量产和应用，但核心关键材料和辅助材料尚未全面开发，固态电池产能、性能稳定性等仍待考验。其中，高离子电导率、高稳定性、低成本的无机固态电解质材料和聚合物电解质材料，以及适用于全固态电池的高能量密度正负极材料等有待进一步开发和规模化量产。全固态电池工艺装备和成套工艺技术研究基本处于空白状态，如电解质批量生产制备、大面积固态电解质薄膜连续制备、全固态电池一体化制备等技术，若要满足我国乃至全球对固态电池的大规模应用还面临很大挑战。

我国固态电池发展缺少国家级“产学研”协同创新合作平台。固态电池的开发是一项系统工程，需要高校、科研院所和上下游企业密切合作与高效联动。目前，我国尚未有国家级固态电池重点实验室、技术创新中心或工程中心，导致固态电池领域的集群研究较少，资源分散；同时，我国大部分企业的整体技术集成度较低，实验室科研成果的产业化推进过程不畅，需要进一步加速推动“产学研”融合。

（三）固态电池产业发展面临一定的市场阻力

我国目前电池产业的发展现状可以归纳为：中低端产能亟需升级，高端产能不足，产品良莠不齐，总体平均价格较低。尽管我国锂电池总体产能位居世界第一，但面向高端市场、特殊应用场景，如超长续航电动汽车、电动飞机等，现有中低端产能无法满足未来日益增长的高比能、高安全的电池需求。此外，冗余的中低端产能占有大量固定资产，利润率偏低，存在去产能和去库存的压力，延缓了从液态电池到固态电池的过渡；同时，大部分企业不愿意承担决策风险，国内电池产业转型缺乏动力。

（四）固态电池发展亟需摆脱原材料掣肘

锂资源作为电池生产的最重要原材料，其供应稳定性直接影响着整个电池产业链的安全和可持续

发展。当前，我国锂资源的对外依存度较高，使得全球锂矿供给的不稳定性给我国电池行业的发展带来了一定挑战。虽然我国锂资源总储量较为丰富，且锂矿床分布相对集中，尤其是盐湖锂资源丰富，但大多数锂矿的品位不高，提炼和加工难度较大，实际开发和利用效率较低。尽管我国一些企业已经在南美洲、澳大利亚等锂资源储量丰富地区进行了矿产资源的布局，试图通过全球化战略减少对单一市场的依赖，但锂、钴等关键电池材料的供应依然面临“卡脖子”的隐患。相关风险不仅源自于资源本身的稀缺性，还受到国际市场变化、地缘政治因素以及技术壁垒的影响，特别是在当前国际贸易环境复杂多变的背景下，确保关键原材料的稳定供应是实现我国固态电池自立发展的重要前提。

六、我国固态电池发展的对策建议

（一）坚持分步发展固态电池的总体规划

我国固态电池发展需政府、高校、科研院所以及电池企业积极协同合作，依托液态锂离子电池现有优势和原位固态化技术，逐步实现全固态电池开发，率先建立固态电池设计原理和关键材料体系，形成固态电池自主技术体系。我国固态电池技术发展路线如图5所示。固态电池关键材料和制造技术的革新是实现从传统液态电池经原位固态化电池直至实现全固态电池的基础。

我国固态电池近中期（2025—2030年）发展规划建议：以目前国内已有的固态电池研发和量产能力基础，通过原位固态化技术，采用新材料，改造现有产线，优化现有技术体系，实现产品升级，提升电池的能量密度、安全性、一致性和寿命等关键指标，保证5~10年在技术引领和应用方面处于全球领先地位，形成中国标准体系；同步开展全固态电池及新电池体系的前瞻性研发，为全固态电池的规模化应用奠定科学和技术基础，满足新能源汽车、电动船舶、电动航空、规模储能、国家安全等战略需求。

我国固态电池远期（2030—2035年）发展规划建议：在原位固态化电池技术基础之上，加速全固态电池产业化，进一步提升全固态电池技术成熟度和应用领域，提升技术水平，降低电池全生命周期成本等要素，扩大产业规模和市场占有率，形成自

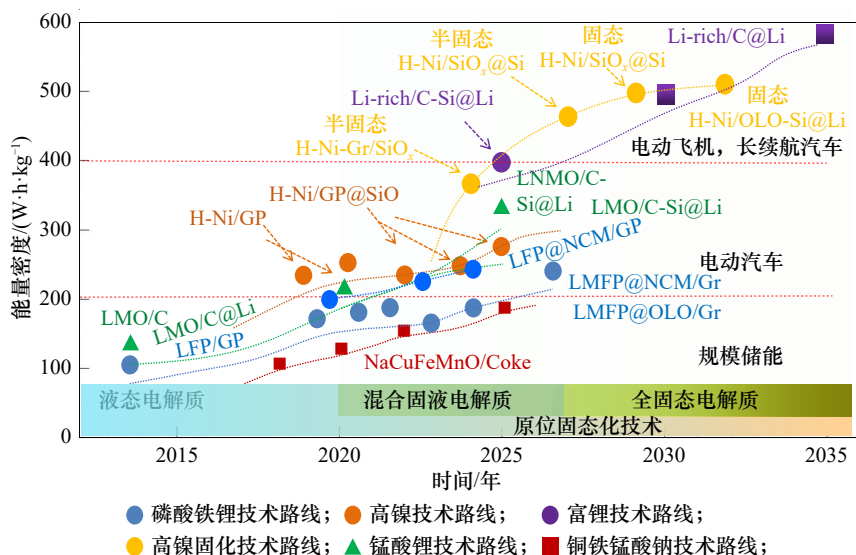


图5 从液态到全固态电池的技术发展路线

注: LMO表示锰酸锂正极; LFP表示磷酸铁锂正极; LMFP表示磷酸锰铁锂正极; H-Ni表示高镍正极; Li-rich表示富锂正极; NaCuFeMnO表示铜铁锰酸钠正极; LMNO表示镍锰酸锂正极; OLO表示富锂锰正极; GP表示石墨负极; GP表示石墨烯负极; SiO表示硅氧负极; Li表示金属锂负极。
另, 时间轴仅代表技术和商业化预期时间, 不代表市场占有率时间表。

主可控、可持续发展、绿色零碳的产业生态, 拓展更广泛的应用领域, 并扩展到极地、高寒地带、平流层、深空等国家战略特殊应用场景, 建立由我国主导的国际标准体系。

(二) 设立国家级固态电池发展规划和重大科技专项

将固态电池持续纳入国家重点科技发展规划, 设立固态电池研发专项, 用于支撑固态电池研发机构的技术攻关及全国科研力量的科研方向引导; 以发展满足长续航电动汽车、电动航空、电动船舶、航空、航天、国家安全等重大战略需求的先进固态电池为目标, 研究制定固态电池技术发展路线图; 加强基础科研布局, 促进前沿技术攻关, 凝聚全国优势科研力量加快固态电池关键材料体系、界面构筑、电芯设计、系统集成以及工程化装备制造等共性关键技术和重大科学问题的突破, 提高我国固态电池核心竞争力。

(三) 推动固态电池技术研发机构建设

发挥我国现有的固态电池研发硬件和人才基础, 由具备优势研发能力的科研院所、高校牵头, 联合企业成立固态电池全国重点实验室、国家工程中心、创新联合体等, 建设集电池技术开发、技术验证、工程放大等于一体的研发平台, 并选择具有

丰富固态电池技术研发经验、对我国固态电池领域有深刻理解的科学家来统筹规划相关技术发展, 力争实现快速突破。同时, 鼓励引进海内外高层次人才和研发团队, 在关键材料、工艺攻关、装备制造等环节协同联动, 打通从基础研究到技术放大之间的壁垒。设立重大攻坚专项用于支持联合开发机构的技术开发和应用攻关, 及时评估并提升科研成果的先进性及实用性, 加速先进固态电池技术的研发和应用, 完善固态电池知识产权体系建设。

(四) 促进固态电池市场化应用及产业转型

建议行业管理部门积极制定从半固态电池到全固态锂电池的分阶段产业化发展战略, 加强对现有电池产业的引导, 建设更加有序、规范的产业环境, 在有限资源和人才的前提下, 促进固态电池快速发展, 抢占发展先机。通过财政补贴政策, 鼓励固态电池产业化能力建设及产品推广应用, 组织固态电池在交通电气化、设备智能化、能源低碳化等领域的应用示范; 加速建立固态电池全链条产品标准化体系, 并在国际标准体系中形成一定的影响力, 及时完善有关产品的目录, 提高行业准入条件, 推动行业高质量发展; 对初期进入市场的固态电池产品或企业给予认定和扶持, 加快固态电池科技成果的产业化和市场化。

支持重点地区打造特色固态电池产业链, 建立

大、中、小型企业密切合作的生态系统，降低固态电池生产成本，推进企业早日实现规模化生产。鼓励和引导社会资本积极参与电池产业改革，通过税收、信贷等手段支持推动电池企业实现转型升级，有效解决当前中低端产能问题，去除现有锂离子电池库存；重点扶持“专精特新”固态电池企业发展，培育固态电池龙头企业。

(五) 优化固态电池生态环境建设

针对关键资源丰度不足的问题，建议注重国内锂矿开发、盐湖提锂技术、退役电池关键材料处理和回收技术等方面的发展，形成产业链闭环，提高锂资源的自我供给能力。同时，在锂资源丰富的国家和地区开展针对性的资源开发与布局，确保我国未来电池市场的平稳发展。

加快固态电池领域相关标准体系建设，为产品质量和市场监管提供依据。加强固态电池领域知识产权建设和保护，鼓励原创性研究和技术创新。相关创新主体要加大研发投入，对核心技术进行深入挖掘，逐渐形成基础专利和多项外围专利；进一步提高专利保护的意识和能力，对核心专利及时进行国内外布局。此外，支持和鼓励高校、科研院所开设固态电池相关高等教育课程及教学项目，建立产业学术合作项目，加强基础化、实用化教育以及专业人才培养储备。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: April 23, 2024; **Revised date:** May 27, 2024

Corresponding author: Chen Liquan is a research fellow from Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, and a member of Chinese Academy of Engineering. His major research fields include nanoionics, energy storage materials, and solid-state batteries. E-mail: lqchen@iphy.ac.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Strategic Research on the Self-Reliance and Self-Improvement of Critical Materials System” (2022-PP-02)

参考文献

[1] Li Q, Yu X Q, Li H. Batteries: From China's 13th to 14th Five-Year Plan [J]. *eTransportation*, 2022, 14: 100201.
 [2] 黄学杰, 赵文武, 邵志刚, 等. 我国新型能源材料发展战略研究 [J]. *中国工程科学*, 2020, 22(5): 60–67.
 Huang X J, Zhao W W, Shao Z G, et al. Development strategies for new energy materials in China [J]. *Strategic Study of CAE*,

2020, 22(5): 60–67.
 [3] Dunn B, Kamath H, Tarascon J M. Electrical energy storage for the grid: A battery of choices [J]. *Science*, 2011, 334(6058): 928–935.
 [4] 李泓, 许晓雄. 固态锂电池研发愿景和策略 [J]. *储能科学与技术*, 2016, 5(5): 607–614.
 Li H, Xu X X. R & D vision and strategies on solid lithium batteries [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2016, 5(5): 607–614.
 [5] Yu X Q, Chen R S, Gan L Y, et al. Battery safety: From lithium-ion to solid-state batteries [J]. *Engineering*, 2023, 21(2): 9–14.
 [6] 李泓. 中国固态电池领域发展现状和未来挑战 [J]. *科学观察*, 2023, 18(4): 5–9.
 Li H. Current development and future challenges in the field of solid-state batteries in China [J]. *Science Focus*, 2023, 18(4): 5–9.
 [7] 邢佳韵, 陈其慎, 张艳飞, 等. 我国锂及其下游动力电池产业链发展探讨 [J]. *中国工程科学*, 2022, 24(3): 10–19.
 Xing J Y, Chen Q S, Zhang Y F, et al. Development of lithium and its downstream power battery industry chain in China [J]. *Strategic Study of CAE*, 2022, 24(3): 10–19.
 [8] Fenton D E, Parker J M, Wright P V. Complexes of alkali metal ions with poly (ethylene oxide) [J]. *Polymer*, 1973, 14(11): 589.
 [9] Wright P V. Electrical conductivity in ionic complexes of poly (ethylene oxide) [J]. *British Polymer Journal*, 1975, 7(5): 319–327.
 [10] Armand M. Polymer solid electrolytes—An overview [J]. *Solid State Ionics*, 1983, 9: 745–754.
 [11] Goodenough J B, Hong H Y P, Kafalas J A. Fast Na⁺-ion transport in skeleton structures [J]. *Materials Research Bulletin*, 1976, 11(2): 203–220.
 [12] Bates J B, Dudney N J, Gruzalski G R, et al. Fabrication and characterization of amorphous lithium electrolyte thin films and rechargeable thin-film batteries [J]. *Journal of Power Sources*, 1993, 43(1/2/3): 103–110.
 [13] Inaguma Y, Chen L Q, Itoh M, et al. High ionic conductivity in lithium lanthanum titanate [J]. *Solid State Communications*, 1993, 86(10): 689–693.
 [14] Thangadurai V, Kaack H, Weppner W J F. Novel fast lithium ion conduction in garnet-type Li₃La₃M₂O₁₂ (M = Nb, Ta) [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2003, 86(3): 437–440.
 [15] Kamaya N, Homma K, Yamakawa Y, et al. A lithium superionic conductor [J]. *Nature Materials*, 2011, 10(9): 682–686.
 [16] Mizushima K, Jones P C, Wiseman P J, et al. Li_xCoO₂ (0 < x < 1): A new cathode material for batteries of high energy density [J]. *Materials Research Bulletin*, 1980, 15(6): 783–789.
 [17] Thackeray M M, David W I F, Bruce P G, et al. Lithium insertion into manganese spinels [J]. *Materials Research Bulletin*, 1983, 18(4): 461–472.
 [18] Padhi A K, Nanjundaswamy K S, Goodenough J B. Phospho-olivines as positive-electrode materials for rechargeable lithium batteries [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1997, 144(4): 1188–1194.
 [19] Ohzuku T, Makimura Y. Layered lithium insertion material of LiCo_{1/3}Ni_{1/3}Mn_{1/3}O₂ for lithium-ion batteries [J]. *Chemistry Letters*, 2001, 30(7): 642–643.

- [20] Whittingham M S. Electrical energy storage and intercalation chemistry [J]. *Science*, 1976, 192(4244): 1126–1127.
- [21] Yazami R, Touzain P. A reversible graphite-lithium negative electrode for electrochemical generators [J]. *Journal of Power Sources*, 1983, 9(3): 365–371.
- [22] Chen L C, Rabenau A, Weppner W. One-dimensional ionic conduction in solid $\text{Ag}_2\text{Ti}_6\text{I}_{10}$ [J]. *Applied Physics*, 1978, 17(3): 233–237.
- [23] Chen L Q, Wang C Q, Wang L Z, et al. Lithium ionic conductivity of liscion single crystals [J]. *Acta Physica Sinica*, 1980, 29(5): 661.
- [24] Luo F, Chu G, Xia X X, et al. Thick solid electrolyte interphases grown on silicon nanocone anodes during slow cycling and their negative effects on the performance of Li-ion batteries [J]. *Nanoscale*, 2015, 7(17): 7651–7658.
- [25] Wu J Y, Ling S G, Yang Q, et al. Forming solid electrolyte interphase *in situ* in an ionic conducting $\text{Li}_{1.5}\text{Al}_{0.5}\text{Ge}_{1.5}(\text{PO}_4)_3$ -polypropylene (PP) based separator for Li-ion batteries [J]. *Chinese Physics B*, 2016, 25(7): 078204.
- [26] Li H. A high capacity nano-Si composite anode material for lithium rechargeable batteries [J]. *Electrochemical and Solid-State Letters*, 1999, 2(11): 547.
- [27] Li Q, Yang Y, Yu X Q, et al. A $700 \text{ W}\cdot\text{h}\cdot\text{kg}^{-1}$ rechargeable pouch type lithium battery [J]. *Chinese Physics Letters*, 2023, 40(4): 048201.
- [28] Zhu Z Q, Hong M L, Guo D S, et al. All-solid-state lithium organic battery with composite polymer electrolyte and pillar[5]quinone cathode [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2014, 136(47): 16461–16464.
- [29] Wang K, Ren Q Y, Gu Z Q, et al. A cost-effective and humidity-tolerant chloride solid electrolyte for lithium batteries [J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 4410.
- [30] Gao J X, Wu J, Han S Y, et al. A novel solid electrolyte formed by NASICON-type $\text{Li}_3\text{Zr}_2\text{Si}_2\text{PO}_{12}$ and poly(vinylidene fluoride) for solid state batteries [J]. *Functional Materials Letters*, 2021, 14(3): 2140001.
- [31] Chi X W, Li M L, Di J C, et al. A highly stable and flexible zeolite electrolyte solid-state Li-air battery [J]. *Nature*, 2021, 592(7855): 551–557.
- [32] Zeng X X, Yin Y X, Li N W, et al. Reshaping lithium plating/stripping behavior via bifunctional polymer electrolyte for room-temperature solid Li metal batteries [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2016, 138(49): 15825–15828.
- [33] Zhou Q, Dong S M, Lv Z L, et al. A temperature-responsive electrolyte endowing superior safety characteristic of lithium metal batteries [J]. *Advanced Energy Materials*, 2020, 10(6): 1903441.
- [34] Hu L, Ren Y L, Wang C W, et al. Fusion bonding technique for solvent-free fabrication of all-solid-state battery with ultrathin sulfide electrolyte [J]. *Advanced Materials*, 2024: 2401909.
- [35] Wang Y T, Ju J W, Dong S M, et al. Facile design of sulfide-based all solid-state lithium metal battery: *In situ* polymerization within self-supported porous argyrodite skeleton [J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(28): 2101523.