

固态锂电池技术发展现状与趋势¹

■文 / 王薛超 曹耀光 金茂菁

(中国汽车技术研究中心; 北京航空航天大学交通科学与工程学院; 科学技术部高技术研究发展中心)

固态锂电池是目前既能满足可充放电的能量密度要求, 同时又兼顾安全性、循环寿命、服役寿命等性能的新型电池技术。本文在对固态锂电池国内外发展现状和趋势分析的基础上, 针对我国固态锂电池技术的进一步发展提出了对策建议。

一、关于固态锂电池

1. 定义与特点

固态锂电池是一种高能量密度、高安全性的电池。与目前商业化应用的锂离子电池所采用的容易燃烧液态电解质不同, 固态锂电池采用的固体电解质不易燃烧。

固态锂电池中包括正极、固体电解质、负极、集流体、极柱等材料。固体电解质主要有三类: 氧化物、硫化物及聚合物。固态锂电池可有以下两大类型: 一是全固态锂电池, 完全采用固体电解质替换液态锂电池中的电解液, 不含任何液体, 所有材料都以固态形式存在; 二是固液混合电解质锂电池, 电池中同时含有固体电解质与液态电解液。当液体含量较少时, 例如少于电芯质量的 5% 时, 有些学者也称之为固态锂电池。

根据正极材料的不同, 固态锂电

池又可以分为固态锂离子电池²、固态金属锂电池³、固态锂硫电池⁴和固态锂空气电池⁵四大类。

2. 作用与意义

固态锂电池采用固态电解质取代有机电解液, 其安全性可大幅提高。在理想状态下, 固态时锂的扩散速度(离子传导率)较液体电解液时高, 理论上可实现更高的输出, 从而提高电池的功率密度。当固态电池电极材料与电解质间的界面发生反应时, 比有机电解液难分解, 电位窗高使高电压正极成为了可能, 从而大幅提升电池的能量密度。另一方面, 固态电池不必封装液体电解质, 其形态和制造方式也会发生变化, 能够突破现有电池的概念特性。

面向新能源汽车、化学储能和智能电网的大规模应用需求, 具有高安全性、长寿命和高比能量等特点的固态锂电池技术一旦取得突破, 将会对

相关领域带来革命性的变化, 并能够更好地满足未来新的多种应用需求。

二、国际发展现状与趋势

固态锂电池是目前公认的, 可提升现有锂电池体系能量密度、安全性和循环性的技术路线。美国、日本、韩国、欧洲等地的科研机构很早就开展了固态锂电池相关技术的研发。

日本在固态锂电池方面走在世界的前列, 东京工业大学 Prof. Kanno 小组一直致力于全固态锂电池, 尤其是全固态电解质的研发。该实验室于 2011 年发现固态电解质 $\text{Li}_{10}\text{GeP}_2\text{S}_{12}$ (LGPS), 该电解质的电导率达到 10mS/cm , 与现有液态电解液电导率相当。2016 年, 该小组又进一步发现离子电导率达到 25mS/cm 的电解质。

法国 Prof. Aramand 从上世纪 70 年代开始研究聚合物电解质, 目

前采用聚环氧乙烷 (PEO) 电解质的固态金属锂电池已成功在电动汽车上应用。法国博洛雷 (Bolloré) 公司已经将其子公司 BatScap 生产的 PEO 基固态锂离子电池用于电动汽车 (EV “Bluecar”)，该电芯采用了 PEO 基固体电解质，磷酸铁锂正极，金属锂负极，是国际上第一个采用固态锂电池的电动汽车案例。

美国 SEE0 公司在此方向也开发了多年，目前已被德国博世全资收购。除了科研单位，领先的电池企业如索尼、松下、LG 化学、三星、CATL 也已经开始布局固态锂电池的研发。汽车企业如丰田、博世、大众等，都将固态锂电池作为下一代车用电池展开布局。此外，近几年成立的一批初创公司，如 SEE0, Sakit3, Solidenergy, QuantumScape 等也正在开发固态锂电池，为占据未来的应用市场做准备。

目前固态锂电池主要的技术路线包括聚合物固体电解质、陶瓷固体电解质（氧化物居多）与凝胶电解质组合、硫化物电解质等。图 1 展示了目前世界范围正在开发固态锂电池的公司及其主要技术路线。

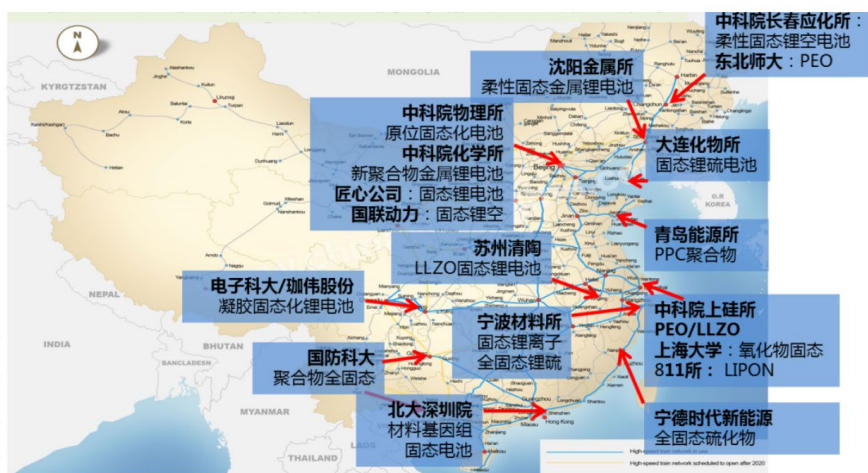


图 2 国内正在从事固态锂电池相关研究的研发单位及团队

三、我国发展现状与水平

国内固态锂电池仍处于基础研发阶段，清华大学、北大深圳研究院、电子科大、国防科大、中科院物理所、化学所、宁波材料所、青岛能源所、上海硅酸盐所等单位已开始固态锂电池关键材料、固态锂电池制造装备及电芯制造技术的研发。

同时，国内锂电池材料及电芯优势企业，如宁德时代新能源、中航锂电、贝特瑞、力神、赣锋锂业等，也已开始布局固态锂电池技术开发。图 2 展示了国内正在从事固态锂电池研

发的团队及技术路线信息。

中国科学院宁波材料所许晓雄研发团队一直致力于固体电解质及固态锂电池的研发，承担了国家 863 计划及中国科学院纳米先导专项相关课题，并且掌握了固体电解质宏量制备技术。该团队开发的固态锂离子电池能量密度达到 240Wh/kg，循环 500 次容量保持 88.7%，通过了第三方安全检测。目前已成立以该团队固态锂电池技术为基础的创业公司，旨在推动固态锂电池产业化。

青岛能源所崔光磊团队基于聚合物固体电解质，提出“刚柔并济”的思路，开发了 PEO/LLZO 复合固体电解质体系，其固态锂电池能量密度接近 300Wh/kg，正在进行第三方测试。该团队研发的固态锂电池通过了国家深海基地管理中心的 8000 米和 11000 米压力舱第三方检测，为发展“蛟龙号”下一代高能量密度电源系统提供了技术支撑。

中国科学院物理研究所研究小组创新性地提出了“原位固态化”技术，旨在发展固液混合锂电池技术，目前已研制的电池能量密度达到 300 ~ 390Wh/kg，并获得第三方测试

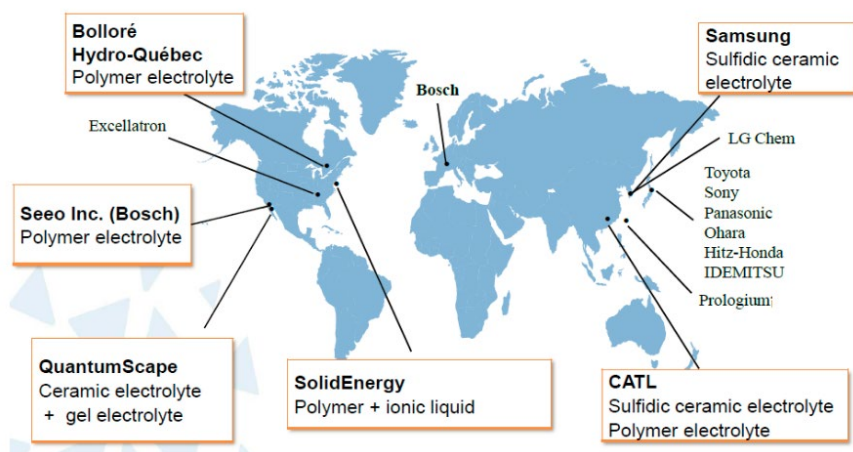


图 1 世界范围正在开发固态锂电池的公司及其主要技术路线

报告。该团队还致力于开发全固态锂电池，目前已在原型器件上验证，正在进行放大与性能优化。

四、我国进一步发展重点及对策

我国应进一步发展固态锂电池，争取在未来5年内研发出高能量密度、高安全，且综合性能优异的固态锂电池，并推向产业化应用。

在车用动力电池领域，力争开发出能量密度在350~500Wh/kg的固态锂电池，争取能在2019年，实现电动

汽车装车演示，2020年进入批量生产。

在规模储能领域，开发的固态锂离子电池，或复合固态金属锂电池，将有望最终实现服役寿命（15—25年）、高安全性、低成本的目标，从而为智能电网、能源互联网、智慧城市、大规模可再生能源接入提供重要的技术支持。

在国家安全领域，固态锂电池耐受极端条件的性能会更为突出，包括耐受高真空、高压强、高加速度、高温等特性。这些特质使得固态锂电池

在国家安全领域具有重要的应用前景。

为了实现以上目标，提出以下对策建议：

一是，在技术研发方面，应进一步加强对固态锂电池在工作过程中的固-固界面结构特征、离子传输、空间电荷层机制等机理研究；

加强对高离子电导率的聚合物、氧化物、硫化物，以及其它类型固态电解质材料的研发；突破电极与固体电解质膜的大面积、高速度制造等电芯技术。

二是，在产业化方面，为了加快开发固态锂电池，应在关键原材料、电芯制造、装备制造、电源管理、电池模块、系统应用、诊断测试等产业链各个环节进行布局，对其中的关键工程技术问题进行集中攻关。

三是，在政策引导方面，可通过国家重点研发计划、地方政府重点科技项目、产学研合作项目、颠覆性创新类项目，分别针对电动汽车、智能电网、国家安全等领域应用需求，针对不同类型的正负极材料、不同性能的固态锂电池，布局有关基础研究、关键技术攻关，以及产业化培育项目。

四是，通过建设高水平的国家级研发诊断测试平台，提升我国固态锂电池的技术开发能力，通过对优势团队的集中支持，迅速提升核心团队在世界范围的影响力。**科技**



【注】

- 1 本报告为科技创新战略研究专项项目“重点科技领域发展热点跟踪研究”（编号：ZLY2015072）研究成果之一。
- 2 采用现有液态锂离子电池的正负极材料，但电解质更换为固态电解质。
- 3 采用金属锂作为负极，正极为现有液态锂离子电池的正极，或者不含锂的嵌入化合物类正极。
- 4 正极材料采用硫或硫化物，金属锂作为负极材料。
- 5 正极储能物质为O₂，CO₂，H₂O或空气，负极为金属锂。

本文特约编辑：姜念云