

固态电池测评体系的构建与挑战

王芳¹, 韩策², 王炜娜², 刘仕强¹, 李鹏²

(1. 中国汽车技术研究中心有限公司, 天津, 300300; 2. 中汽研新能源汽车检验中心(天津)有限公司, 天津, 300300)

摘要: 本文聚焦于全固态电池测试评价技术的现状与挑战, 系统梳理全固态电池在离子传输、界面稳定性、热安全性及环境适应性等方面的新特性, 分析既有测试评价体系的局限性, 阐述适用于全固态电池从材料、界面、电池单体到系统、整车全层级测试评价技术的发展架构, 提出测试评价技术发展新挑战。面向测试技术发展, 提出测试评价技术原位化、智能化、数据化发展方向, 实现先进技术在全固态电池测试评价中的应用, 助力全固态电池从研究到产业化进程。

关键词: 全固态电池; 测试评价技术; 固体电解质; 固固界面

中图分类号: O64 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2025)06-1478-14

网络出版时间: 2025-05-19



全固态电池通过引入固体电解质, 取消了传统液态锂离子电池中的易燃有机组分, 有望扩大电池安全窗口, 通过结合高能正负极体系, 有望进一步提升电池能量密度^[1-5]。因此, 全固态电池被认为是新一代动力电池的主要技术路线之一。

液态锂离子电池经过多年的发展, 已形成了成熟的覆盖多个层级的测试评价体系^[6-8]。从电极材料性能的基础测试^[9-10], 到界面行为分析^[11]、单体电池性能评估^[12-13], 再到电池系统的集成与管理^[14-15], 覆盖性能、寿命和安全的多维度测评^[16-17], 关注电池失效机理, 并结合管理系统优化进行应用。然而, 全固态电池的技术特点与液态电池存在显著差异, 其在离子传输机制^[18-20]、界面特性^[18, 21-22]、热稳定性^[23-24]、环境适应性^[25-27]等方面均表现出独特的特性。同时, 全固态电池的引入涉及新材料、新工艺及新结构, 这些变化对现有测试评价体系提出了全新的挑战^[28-29]。为适应全固态电池的技术特点, 需发展包括关键材料分析、原位表征、电池综合性能评估、失效与危害分析以及仿真技术在内的新测试方法, 建立全面适配全固态电池特性的测试评价体系。

本文以全固态电池与液态锂离子电池的核心技术差异为切入点, 系统讨论构建面向全固态电池的测试评价体系的关键思路, 并将从材料、电池单体

及系统层级出发, 详细分析全固态电池测试的关键问题与技术挑战, 结合现有测试技术的发展现状, 提出适用于全固态电池的测试评价体系构建框架, 旨在为全固态电池的技术研究与产业化应用提供理论依据和实践指导。

1 全固态电池的新特征及测试评价新焦点

将对比分析全固态电池与液态锂离子电池的诸多性质差异, 并深入探讨这些差异对测试评价技术提出的新挑战。

离子传输方面, 液态锂离子电池通过流动性电解质完成离子传输, 即使电极体积发生变化, 电极-电解质界面仍能保持良好的浸润性, 为离子传输提供稳定条件。而在全固态电池中, 离子传输依赖于固体材料间的物理接触, 由于颗粒间多为“点接触”模式, 离子传输效率受限^[30-32]。需要使用柔性材料模拟液体流动性, 或施加大压力来迫使颗粒间增大接触面积。因此, 测试关注全固态电池中离子运输能力, 以满足其倍率性能要求。

界面特性方面, 全固态电池面临界面接触和副反应问题。在液态锂离子电池中, 由于电极与电解质的充分接触, 活性材料利用率较高; 而全固态电池仅有效接触的材料部分能参与反应, 需要关注电

收稿日期: 2024-12-31。 修订日期: 2025-01-17。

第一作者: 王芳(1977—), 女, 博士, 教授级高工。

Received date: 2024-12-31. Revised date: 2025-01-17.

First author: WANG Fang (1977—), female, Ph.D, Professorate Senior Engineer.

E-mail: wangfang2011@catarc.ac.cn

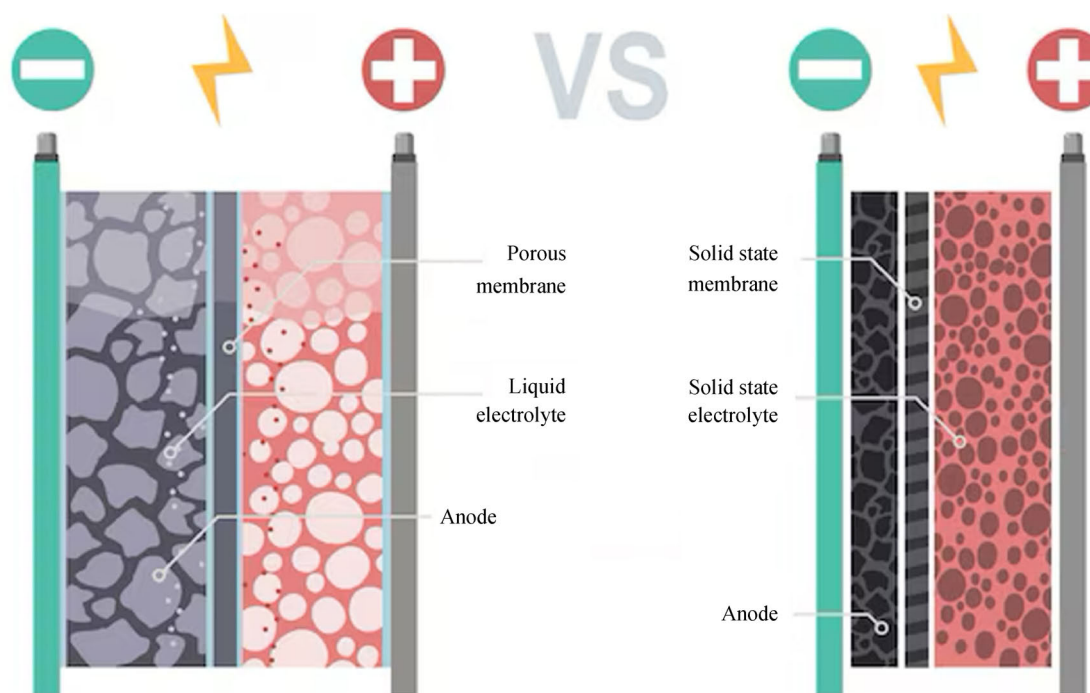


图 1 固体电池和传统液态锂离子电池对比

Fig. 1 Comparison between solid-state batteries and traditional liquid lithium-ion batteries

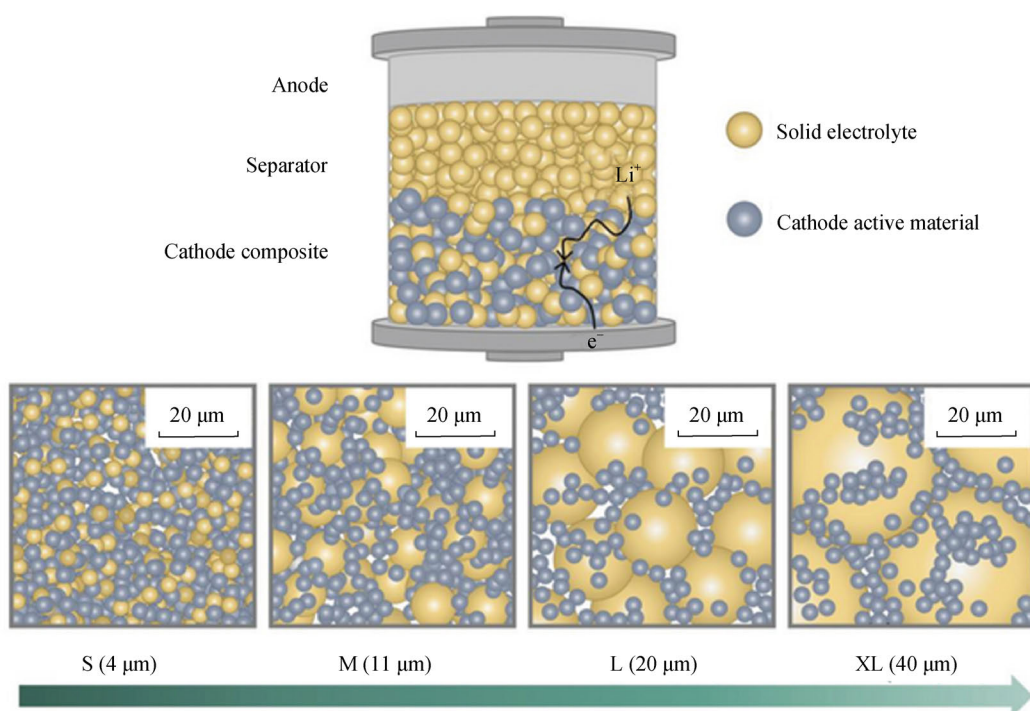
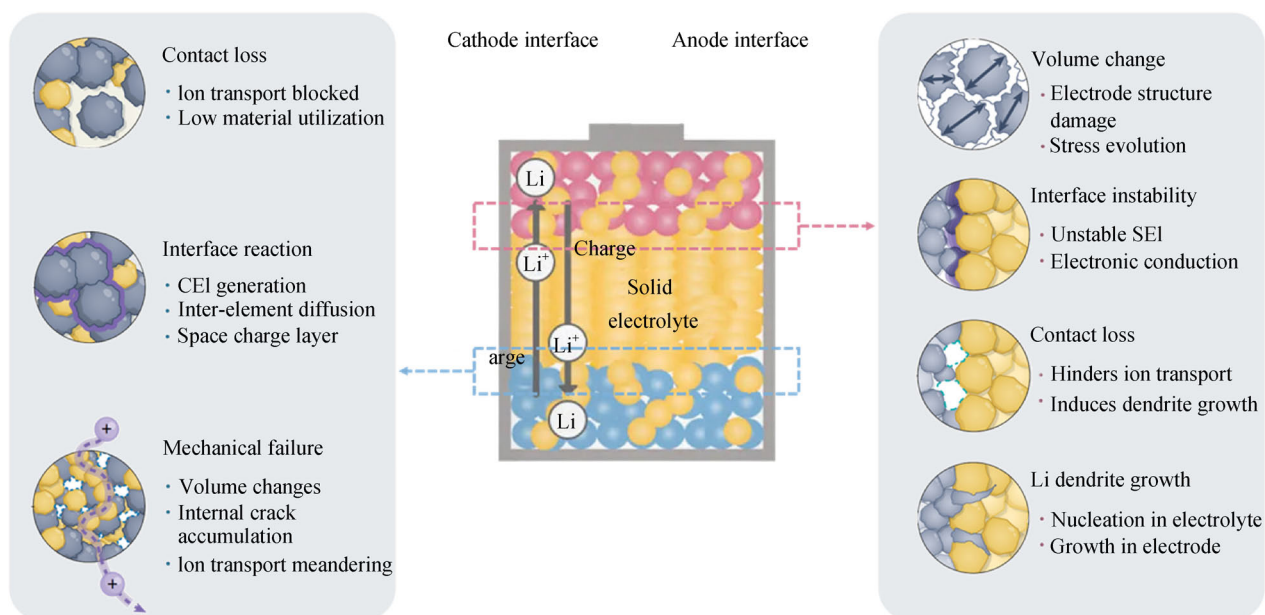
图 2 锂离子在固态电解质中的传输过程(与颗粒粒径相关)^[33]

Fig. 2 Transport process of lithium ions in solid-state electrolytes (related to particle size)

极和电解质的利用率。因此,既需要评价新鲜电池的界面接触性能,也需要关注电池在全生命周期内的界面接触演化,关注颗粒破碎、结构断裂等问题对电池的影响^[32, 34-35]。此外,液态电解质中通常伴随 SEI 膜生长、锂沉积和枝晶形成等副反应,

而全固态电池中具有良好电化学匹配性的电极与电解质可减少副反应的持续发生。然而,锂枝晶的生长和穿透电解质的风险依然存在,需利用原位测试技术探究其机制,并优化界面设计以抑制枝晶形成^[34, 36-38]。

图3 全固态电池电极-电解质界面问题概述^[39]Fig. 3 Overview of electrode-electrolyte interface issues in all-solid-state batteries^[39]

热稳定性及环境适应性方面，需要分析电池材料体系的本征特性及材料间相互作用。液态锂离子电池在高温下，会经历 SEI 膜分解、隔膜熔化、电解质和电极材料分解等链式反应^[40–41]，副反应在 70 °C 即开始发生，热失控 T_1 温度点在 130 ~ 150 °C (LFP) 或 180 ~ 200 °C (NCM)。相应地，全固态

电池由于不含易燃有机组分，其 T_1 温度点普遍高于 200 °C^[42–44]，总体优于既有液态锂离子电池水平，如图 4 所示。在环境适应性方面，液态锂离子电池对外力变化敏感性较低，但全固态电池对温度^[45–47]、压力^[48–49]变化敏感，如图 5 所示，这对单体测评的环境控制和管理系统的调控能力提出了更高要求。

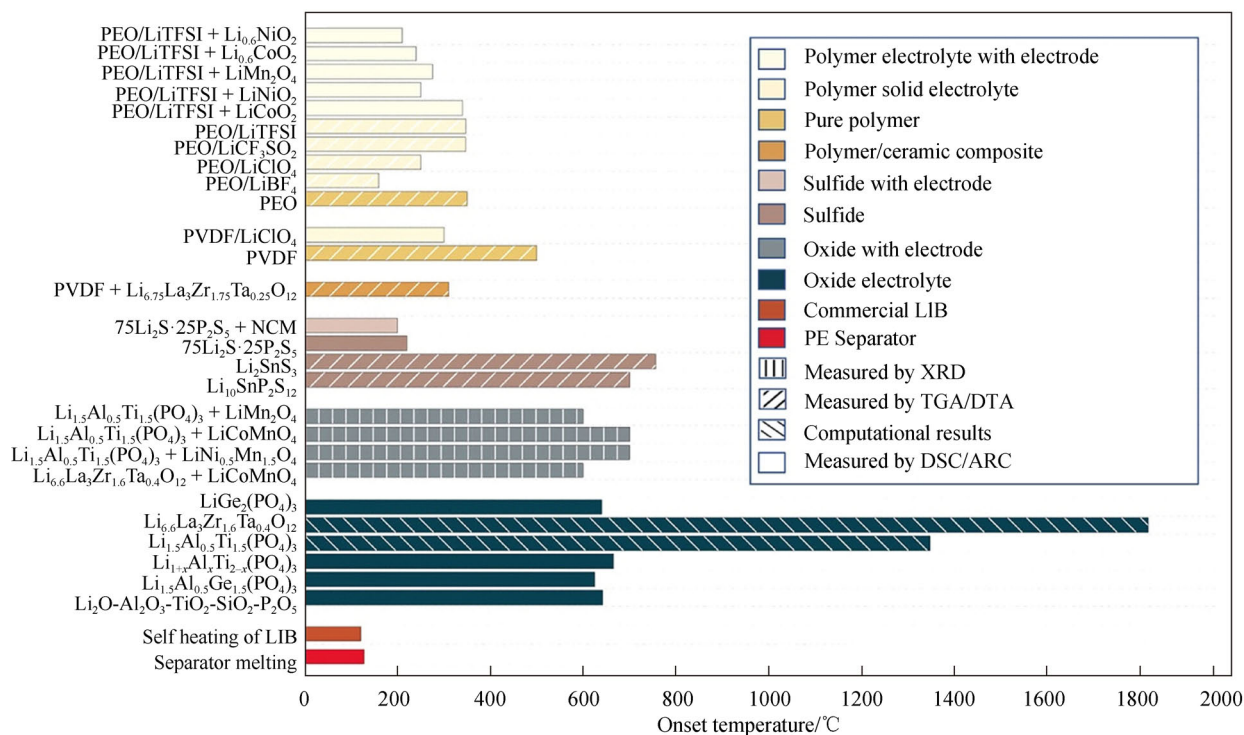
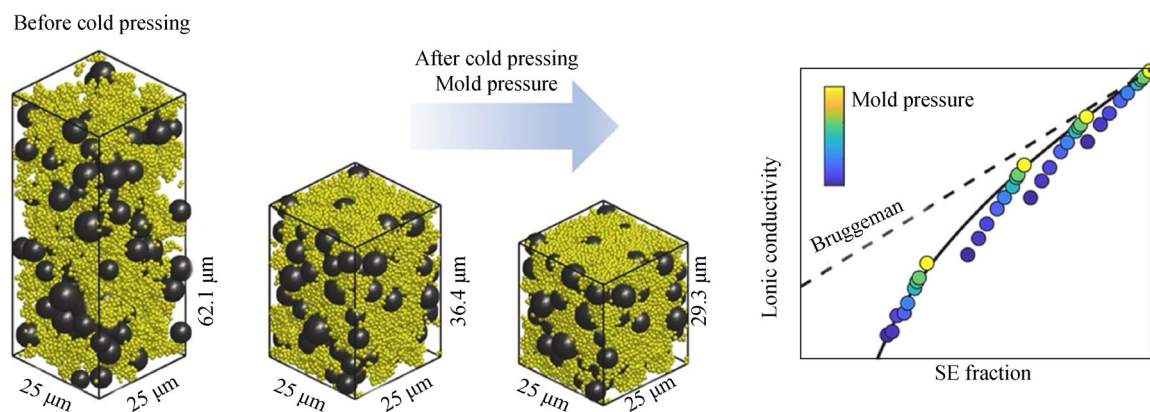
图4 部分硫化物、聚合物、氧化物电解质及其与电极组合的热失控温度图^[50]

Fig. 4 Thermal runaway temperature chart of selected sulfide, polymer, and oxide electrolytes and their combinations with electrodes

图 5 压力对电池结构及电解质电导率的影响^[51]Fig. 5 Impact of pressure on battery structure and electrolyte conductivity^[51]

失效模式方面, 液态锂离子电池的失效模式已相对明晰, 包括电解质干涸等性能失效模式及热失控等安全失效模式, 且已存在大量研究工作分析其安全失效过程^[52-55]。全固态电池的失效模式需要进一步考虑界面接触失效及新型热失控触发机制, 并需评估失效后的物质与能量释放过程, 为灾害危害评估和处置技术提供支持。

综上所述, 全固态电池与液态锂离子电池在上述诸多方面的显著差异, 为面向电池各层级的测试评价技术引入新课题与新挑战, 这些差异对系统设计及系统测试评价提出了新的要求。例如, 需优化热管理系统以提升加热速率和热一致性, 并设计力管理系统以满足硫化物体系的压力需求。针对上述差异点, 需在现有体系基础上补充新的测评维度, 构建面向全固态电池的全层级测试体系。

2 全固态电池全层级测试评价体系

基于全固态电池与液态锂离子电池在结构特性和性能表现上的显著差异, 面向固态电池全层级的测试评价体系需要发展和完善。以下将面向固态电池各层级详细阐述测试评价体系的构建重点及其挑战。

2.1 材料层级的测试评价

固体电解质是固态电池的关键材料, 其在电化学性能、机械性能和热稳定性等方面的特性直接决定了固态电池的整体性能和安全性^[56-58]。因此, 通过系统的测评, 能够全面掌握其离子电导率等电特性、化学稳定性和加工适应性等关键参数, 为优化材料设计提供指导。面向固体电解质的测试聚焦于其离子电导率等关键参数, 为评估材料在电池中的实际应用潜力提供支撑。

2.1.1 离子电导率与电子电导率 离子电导率是

衡量固体电解质传输离子能力的核心参数, 直接影响电池的充放电速率、能量密度和倍率性能^[58-60]。电子电导率则是固体电解质中电子传导能力的表征, 其值需要尽可能低, 高电子电导率会导致电池自放电现象, 并可能引发副反应, 降低电池的循环稳定性和安全性^[61-62]。目前, 测量固体电解质离子电导率常用电化学阻抗(EIS)方法, 将固体电解质片或膜置于阻塞电极内, 形成“三明治”结构, 利用 EIS 测量其阻抗, 并根据特定点阻抗值及电解质几何参数信息计算离子电导率^[60]。电子电导率常用直流极化法测量, 利用计时电流法测定上述“三明治”结构, 利用测得的稳态电流计算电子电导率。测试准确度及精度为电导率测试的一大挑战, 需要关注样品的前处理和制备工艺。

图 6 为压力对电池结构及电解质电导率的影响。由图 6a 可见, 测试压力、阻值选取等因素显著影响测试结果, 此外, 待测固体电解质片的粒度、致密度、电解质表面的粗糙度、阻塞电极与电解质的接触程度等均会直接影响测试的准确性和重现性。由图 6b 可以看出, 除上述因素外, 极化时间也显著影响测试结果。因此, 在测试过程中, 必须严格控制材料制备和操作条件, 例如对电解质层进行充分打磨, 降低界面粗糙度并减少表面与空气的副反应产物, 以确保测量结果的可靠性和可重复性。

此外, 利用极限电流密度(CCD)测试可评价电解质材料在电池中的表观离子传导能力。在线性扫描测试中, 通过逐级增大电流密度, 利用测试过程中电压响应突变点可分析该体系的极限电流密度。在真实电池体系中, 电解质本身及电极-电解质界面处均对离子传输速率产生影响, 通过 CCD 测试可分析影响电池倍率性能的“瓶颈”, 为优化固态电解质、

电极材料及界面工程提供指导。在此基础上, 通过对称电池循环及倍率测试, 可验证电解质材料对大

电流密度的耐受能力, 可用于验证材料在长期循环中的稳定性。

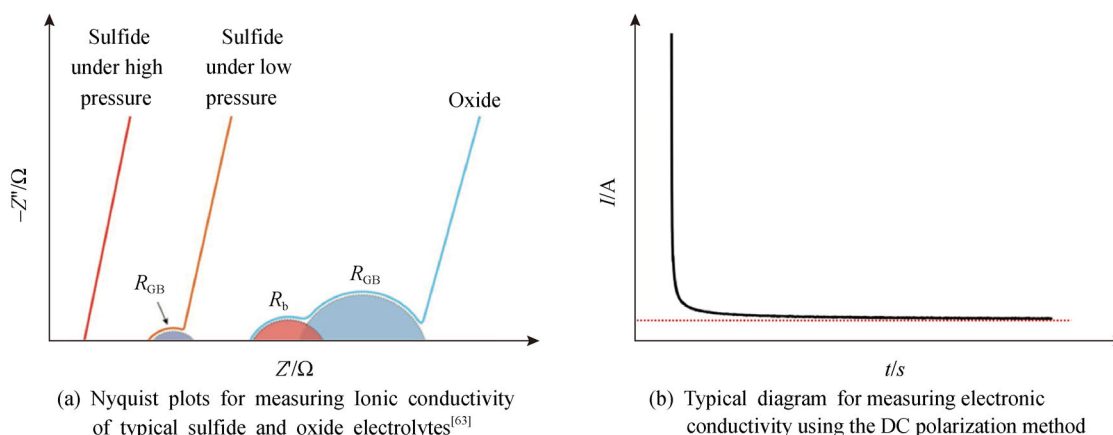


图6 测定固体电解质离子电导率与电子电导率的典型图

Fig. 6 Typical Illustration for measuring ionic conductivity and electronic conductivity of solid electrolytes

2.1.2 电化学窗口 电解质电化学窗口在全固态电池中依然是重要指标, 直接决定全固态电池的应用电压区间^[62, 64–65]。目前, 常用线性扫描伏安法(LSV)测量电解质的电化学窗口, 将电流显著增加时对应的电压视为电解质分解电压。需要注意, 部分电解质体系在高电压或低电压条件下, 尽管通过LSV测试会观察到电流增加的现象, 但在实际电池体系中, 这些电解质依然可以在对应电压下实现稳定运行。这是因为在真实电池环境中, 电解质在极端电压下可能发生分解反应, 从而在电极–电解质界面生成稳定的界面层(如SEI或CEI)。这一界面层能够有效抑制进一步的副反应, 使电池在后续循环中突破表观电化学窗口后仍可稳定工作。因此, 该特性为材料真实电化学窗口的测试引入挑战, 需结合多次扫描结果, 并辅以循环伏安法(CV)或电化学阻抗谱(EIS)等方法, 从动态界面变化及阻抗特性中综合判断电解质的稳定性和实际工作窗口。

2.1.3 力学性能 固体电解质材料的力学性能在全固态电池的应用中起着至关重要的作用, 主要体现在以下几个方面: 电解质的加工特性、电池内对锂枝晶的耐穿刺能力, 以及长期循环中的抗内短路能力^[66–67]。首先, 在加工过程中, 固体电解质需具备足够的机械强度和韧性, 以满足压片、涂覆或层压等工艺的要求, 同时避免因过于脆弱而在加工中发生开裂或破碎^[65, 68]。其次, 力学性能对固态电池工作时抑制枝晶生长的能力具有决定性影响。在高电流密度条件下, 锂枝晶可能形成并穿透电解质层, 造成短路或热失控事故。高抗压强度和断裂韧性能

够有效提升电解质的抗枝晶穿刺能力, 从而显著增强电池的循环寿命和安全性。此外, 电解质层的机械强度对耐内短路能力尤为关键。在充放电循环或外力冲击中, 电池内部结构可能因体积变化或机械应力而受损, 高强度电解质可抑制内部损伤扩展, 有助于降低电池内短路发生几率, 进一步保障其运行稳定性和安全性。

2.1.4 热学特性 固态电池材料的热学特性需关注热膨胀特性和其产热、导热能力。固态电池内部无固–液浸润作用, 需要各材料层紧密接触完成离子传输。然而固体电解质与电池中其他材料化学体系不同, 热膨胀系数存在差异^[69], 由于电池在实际工作中会经历一定的温度变化, 而较大的热膨胀不匹配可能导致界面应力增加, 进而引发界面分离或开裂, 导致电池性能下降甚至失效, 因此了解固体电解质的热膨胀特性有助于选择与其匹配的电极材料^[70], 优化电池结构设计。全固态电池内阻一般大于液态锂离子电池, 在实际应用中更易出现热量积累导致温升的问题。因此, 需要综合考虑电池材料的产热功率、导热系数和比热容等关键参数, 为热管理系统的优化设计提供数据支持。同时, 应充分关注电池的热安全特性, 重点评估材料的分解温度或相变温度, 以协助热管理系统设定合理的安全阈值, 保障电池安全运行。

2.1.5 材料间匹配性 在固态电池设计中, 不但需要关注电极、电解质的关键参数, 也需要同时关注材料之间的适配性问题^[71], 包括电化学窗口、界面匹配性、机械强度匹配性、热膨胀匹配性等。因

此, 在开发固态电解质关键参数的测试技术时, 需要同步构建全面的材料参数数据库, 系统评估电极与电解质在多个匹配维度上的适配关系, 以指导电池材料的筛选与优化开发。这一需求为测试评价技术提出了新的挑战, 从传统的单一参数测试转向多

参数的综合性评估, 要求测试结果能够支持跨材料、跨层级的数据关联与分析。通过引入大数据分析和人工智能技术, 可以实现测试数据的深度挖掘与高效利用, 为固态电池材料的研发和优化提供更加精准的技术支撑, 推动固态电池技术的快速发展。

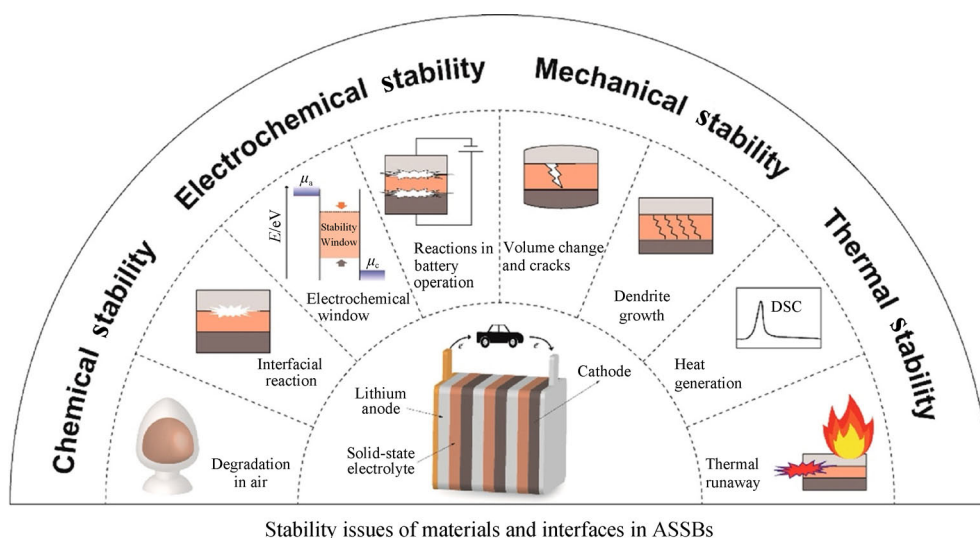


图 7 材料层级测试评价的关注点^[50]

Fig. 7 Key focus for material-level testing and evaluation^[50]

2.2 界面层级的测试评价

在固态电池中, 固-液界面被固-固界面所取代, 这一变化对电池内部离子运输及整体性能提出了新的挑战。由于固态电池内部固相组分复杂, 界面性质直接影响离子传输和电化学反应, 且其在电池全生命周期内的演变规律直接影响电池的长循环稳定性和安全性。因此, 深入研究固-固界面的特性及其动态演变规律具有重要意义。传统锂离子电池中, 电极与电解液之间通过电解液的浸润作用实现充分接触, 活性材料的利用率较高。在这种体系中, 界面研究聚焦于首次循环中形成的固体电解质界面层 (SEI), 其结构与稳定性直接决定了电池的循环性能和安全性^[72-74]。然而, 在固态电池中, 由于固相之间缺乏浸润作用, 电极与电解质颗粒之间的接触往往呈现“点接触”特性。该特性会导致离子传输路径受阻, 进而降低活性材料的利用率和电池的能量密度。此外, 固-固界面处可能发生电化学副反应, 进一步恶化界面稳定性。因此, 对固态电池的界面问题需要从 2 个层面进行重点关注: 一是界面接触性质, 包括颗粒间原始接触性质和随循环的演变特性; 二是界面副反应的种类、生成机理及其对界面离子电导率和化学稳定性的影响。为此, 需要发展面向固-固界面的先进表征技术, 实现对界面的微观结

构、化学成分及离子迁移行为进行多尺度、全生命周期的动态分析。

2.2.1 界面接触 由于固-固界面具有“点接触”的特性, 界面接触问题成为全固态电池相较传统液态锂离子电池面临的新挑战。为确保全固态电池内部界面的良好接触, 在制造过程中通常需要施加较大的压力, 以实现电极与电解质层的紧密贴合。此外, 通过在正极材料表面包覆固体电解质, 可以进一步提升界面接触性能, 从而提高电极活性材料的利用效率^[75-76]。然而, 在电池的充放电过程中, 电极层会因体积膨胀和收缩而发生形变。随着循环次数的增加, 体积变化愈发剧烈, 导致部分电极-电解质界面区域接触失效^[77-78]。更为严重的是, 剧烈的体积变化会引发电极内部应力分布不均, 进而导致材料破裂, 进一步加剧界面接触问题。因此, 研究界面接触行为的动态演变对于全固态电池的优化设计和性能提升至关重要。

原位及无损检测技术是研究界面接触问题的有效手段。例如, 断层扫描 (CT) 技术能够实现电池的无损检测, 通过衬度信息差异可清晰区分集流体、正负极材料及电解质层, 利用切片成像可以有效表征电极破裂、局部鼓胀及分层等接触问题^[79-80], 而纳米级 CT 技术则能进一步观察材料颗粒的破碎及

形貌演变。此外, 超声技术可用于新鲜全固态电池的无损扫描, 分析电池内部超声信号透过率的差异, 以反映各层间的紧密贴合程度, 从而评估宏观接触信息。进一步地, 扫描探针声学显微(AFAM)技术能

够分析界面力学行为的演变, 揭示内部损伤的累积情况。同时, 通过离子束切割与显微探测手段, 可对界面接触失效区域进行深入分析, 指导全固态电池界面优化。

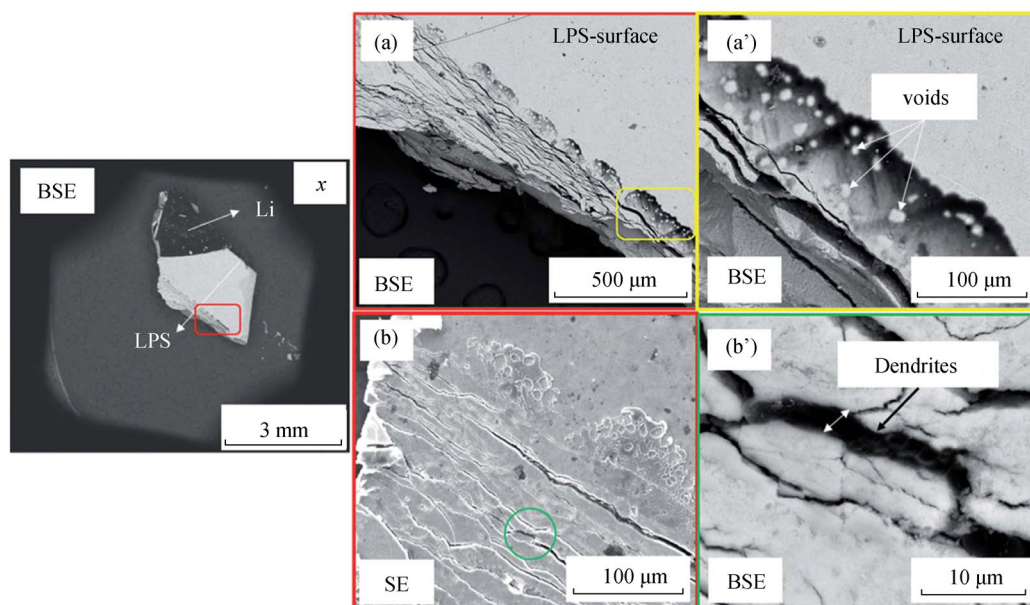


图8 利用显微成像技术对界面接触问题及锂枝晶问题的表征^[81]

Fig. 8 Characterization of interface contact issues and lithium dendrite problems using microscopic imaging techniques^[81]

2.2.2 界面副反应 全固态电池取消传统的有机液态电解质体系, 电解液中溶剂分解生成 SEI 膜的机理不再适用于全固态电池。然而在全固态电池的前期循环中, 依然会生成电极-电解质界面层, 这对电池的长期循环性能具有重要影响, 因此, 要构筑稳定界面层, 减少后续循环中界面副反应的发生, 提高界面稳定性^[82–83]。因此, 在电池设计上, 需要优化电极与电解质的匹配关系, 并在电极颗粒表面包覆适配性高的固体电解质, 从而有效抑制界面副反应。全固态电池中常见的界面副反应包括锂枝晶生长、界面层分解、元素间扩散以及空间电荷层效应^[39, 63]。

电化学阻抗谱(EIS)是表征界面反应的有效手段, 通过合理的等效电路拟合分析可反应界面劣化的途径与机制, 但实际应用中仍面临 2 大挑战: 一是对于全电池, EIS 测量得到的是多个界面反应的耦合信息, 因此, 需要结合 Bode 图分析或弛豫时间分布(DRT)技术辅助设计等效电路模型, 并赋予等效电路各组分明确的物理意义; 二是需要开发在线 EIS 检测技术, 实现阻抗谱的快速测量, 从而推动其在实际电池中的应用, 并为界面问题提供预警分析。此外, 可利用 X 射线光电子能谱(XPS)和

Raman 光谱等技术深入表征界面元素的反应行为, 揭示界面副反应机理。这些表征手段与电化学测试技术的结合, 为解决全固态电池的界面稳定性问题提供了重要的研究工具和方向。

2.3 电池单体层级的测试评价

在本文第一章“全固态电池的新特征及测试评价新焦点”中, 详细分析了全固态电池与液态锂离子电池在特性上的诸多差异, 并提出在现有电池测试评价体系基础上引入新测试技术, 以构建适应全固态电池特性的测试评价体系。以硫化物体系为例, 其运行中需持续施加数 10 MPa 的外力, 这一特性对测试工装夹具的设计提出了独特要求。此外, 围绕电池的性能、寿命及安全测试, 基于全固态电池的体系特性也形成了多方面的差异化需求。

2.3.1 测试用工装 目前, 以硫化物体系为代表的全固态电池(包括部分复合电解质体系)在运行中需要持续施加数 10 MPa 压力。面对持续高压测试需求, 需要引入专用于施加和维持压力的工装夹具, 确保其性能和安全性测试的有效性。在工装夹具设计中, 需重点考虑以下 2 个关键因素: 一是需要确保压力施加的均匀性, 避免由于内部应力分布不均而导致电池结构损伤; 二是夹具应具备足够的压力

维持能力,防止反复补压过程中对电池结构的破坏。为满足这些要求,在全固态电池的测试中,应选用适当的压力施加方式、不易形变且厚度适宜的夹具,

以及具有高压保持能力的固定结构,从而保证全固态电池在测试过程中能够维持所需的压力条件,确保其测试数据的可靠性和准确性。

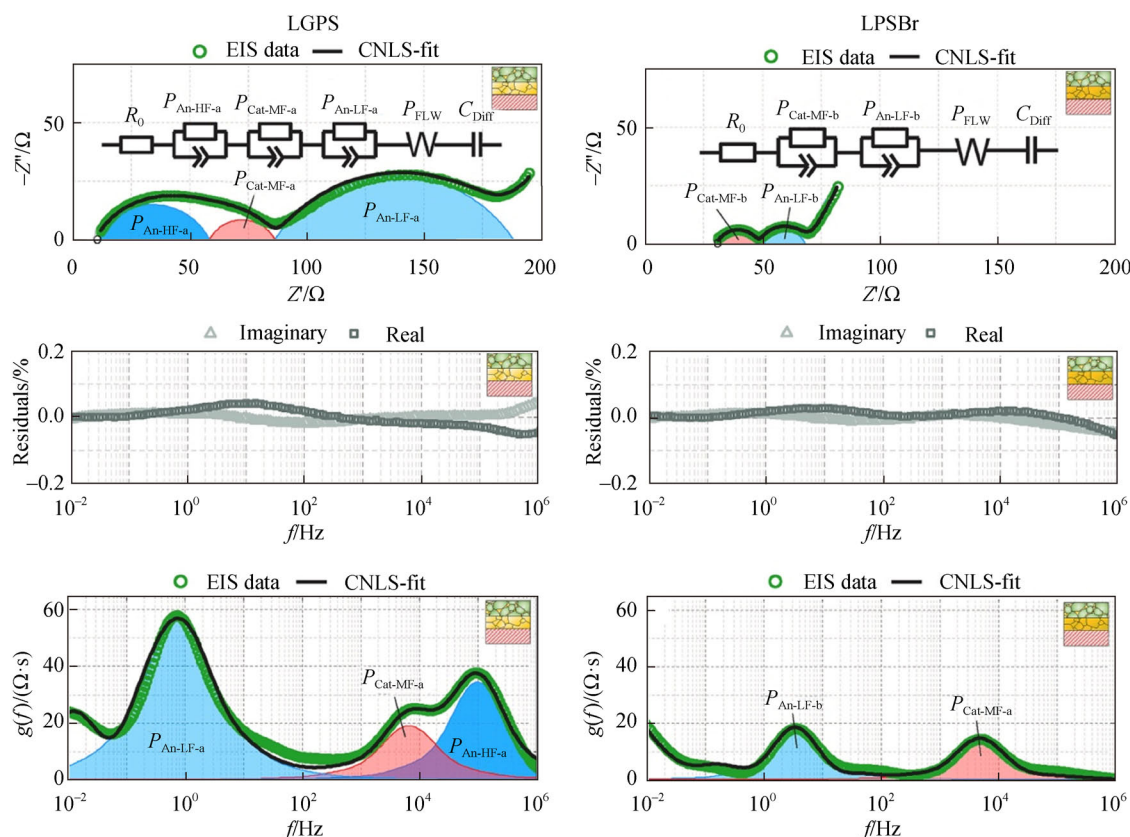


图 9 利用 DRT 法解析全固态电池 EIS 测试谱及分离不同界面对阻抗的贡献^[84]

Fig. 9 Utilizing the distribution of relaxation times (drt) method to analyze eis spectra of all-solid-state batteries and to separate the impedance contributions from different interfaces

2.3.2 性能与寿命测试 在电池性能测试方面,全固态电池的适宜工况与传统液态锂离子电池存在显著差异。对性能及寿命的测试,需要同时考虑外部条件及本征特性对其的影响。

外部条件方面,温度仍然是影响电池性能的关键参数。首先,温度直接影响固体电解质的离子电导率,进而决定电池的倍率性能;其次,固态材料热膨胀系数的差异会导致温度变化引发材料间体积变化,进而影响电池内部各膜层间的界面接触性能。当前主流的几类全固态电池体系通常在高于室温的环境下表现出更优的性能^[85-87]。在适宜的高温范围内,电池容量和倍率性能的释放明显提升,同时较传统液态锂离子电池,温度提升致使的副反应加剧问题被改善。因此,在实际应用中,需要明确固态电池的最佳工作温度区间,并通过优化热管理系统,使其满足车用工况的需求。在寿命评价中,则需结合温度外的其他加速因子,如压力和电流密度,以

实现全固态电池寿命的加速预测和可靠性评估^[88];另一方面,以硫化物体系为代表的全固态电池需要较高的压力才能维持稳定性能。测试中需综合考虑温度、压力与倍率三者的耦合作用,制定适配的应用工况。

在本征特性方面,考虑到固体电解质仍具有一定的电子电导率,需要特别关注全固态电池的荷电保持能力,并分析该问题影响的充电策略制定以及电池长期贮存规范^[89]。此外,固态电池的内阻通常较大^[90-91],这不仅影响其电性能表现,还会显著影响电池的产热功率和整体热特性。因此,在性能优化中,应结合电池的导热系数等热特性,制定高效的热管理策略,保障全固态电池的安全性和可靠性。

2.3.3 安全与可靠性测试 全固态电池的安全窗口较传统液态锂离子电池更宽,但其并非“零风险电池”。针对固态电池的安全性与可靠性,仍需从材料本征特性及材料间相互作用出发进行综合分析。研

究表明,在突破安全窗口后,全固态电池能量的集中释放通常比液态锂离子电池更剧烈^[43–44, 92]。这主要源于 2 方面原因:一是全固态电池通常采用能量密度更高的正负极材料,其失控时的能量释放更为集中;二是电极与电解质间可能发生相互作用,例如部分正极材料在高温下分解释放氧气,成为固体

电解质分解的“助燃剂”,引发电解质分解产热,同时可能触发内部短路等链式反应,最终导致剧烈失控现象。因此,需要分别评价固态电池的安全边界及突破安全边界后的失效后果。由于热安全问题是固态电池失效的最终表现形式,本文重点聚焦热安全测试评价展开。

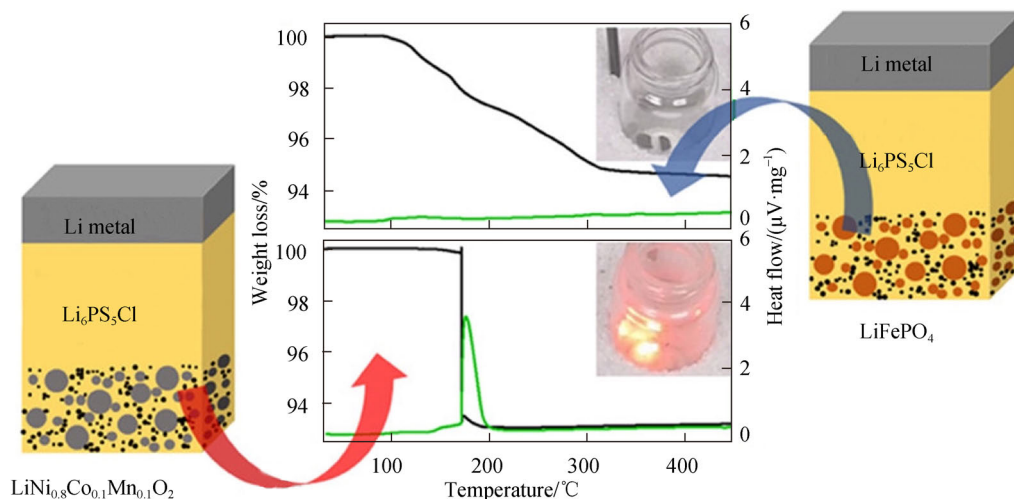


图 10 硫化物全固态电池:与正负极相互作用导致失控温度点提前^[44]

Fig. 10 Sulfide-based all-solid-state batteries: interaction with cathode and anode leads to an earlier onset temperature of thermal runaway^[44]

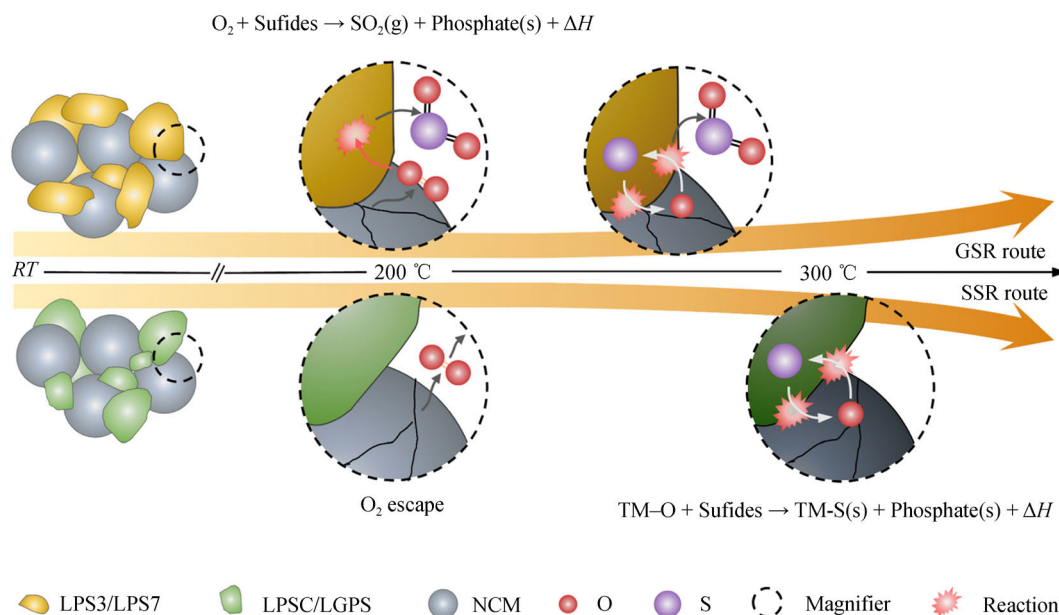


图 11 硫化物固态电池失效中气体释放过程^[43]

Fig. 11 Gas release process during failure of sulfide-based solid-state batteries^[43]

在安全边界方面,可通过差示扫描量热法(DSC)和绝热加速量热法(ARC)等技术,系统评价从关键材料到电池和系统层面的热特性,明确电池的热稳定窗口,并据此制定相应的热箱测试条件。同时,

可利用针刺或浅针刺等手段,探索电池的失效机理。

针对突破安全窗口的失效试验,应兼顾对失效后能量释放及物质释放的监测。例如,硫化物基电池在失效过程中可能释放 H_2S 或 SO_2 等有毒气

体^[93-95], 需建立有效的气体监测和废气处理系统, 并加强对试验人员的保护。针对能量释放的剧烈性, 试验场地应布置高速摄像设备、高频率数据采集系统, 以及耐高温的试验元件, 以便深入分析失效过程中的关键机制。

此外, 由于固态电池内部不存在流动相, 界面处缺乏液体的浸润作用, 其对不均匀力场和外力冲击的敏感性较液态锂离子电池更高。因此, 在可靠性测试中, 需特别关注力学因素引发的失效问题, 例如夹紧力局部失效和外力冲击对电池结构及性能的影响。通过优化测试方法和工况模拟, 可更全面地提升固态电池的可靠性与安全性评估能力。

2.4 系统与整车层级的测试评价

在电池系统层级, 需更多考虑实际车用工况的需求, 以确保电池系统整体的性能、安全性及可靠性达到车用要求。因此, 在测试评价上, 需要评价全固态电池系统对不同速度、温度、机械环境等实车场景的适应能力, 并考虑系统多维监控与管理的策略调度, 使全固态电池系统在长期使用及多变工况中保持相对稳定的工作状态。

首先, 全固态电池系统需要在内部解决加压问题。由于全固态电池对压力环境的需求显著高于传统液态锂离子电池, 系统设计需配备精确的压力施加和维持机构, 同时考虑壳体的强度、密封性及长期可靠性, 确保在各种工况下压力能够均匀施加并持续保持。壳体材料的选择和结构设计需满足抗形变、高强度及抗疲劳性能, 以适应复杂的车用环境。

其次, 温度管理是全固态电池系统设计的核心环节之一。全固态电池通常需要在高于室温的条件下才能实现最佳性能。为此, 系统内部需布置高效的加热系统, 以确保电池在寒冷环境下快速升温至适宜工作温度。此外, 热管理系统应具备高效散热和均匀温度分布的能力, 避免因局部过热或冷却不足而导致性能衰减或安全隐患。系统设计需充分考虑热膨胀和热传导特性, 采用适当的材料和结构布局, 保障温度管理的稳定性。

进一步为实现全固态电池系统的高度集成化, 需综合优化电池模块、压力调控装置、加热装置以及热管理系统的空间布局, 同时尽量降低系统重量和体积, 以符合车辆对轻量化的需求。此外, 电池管理系统(BMS)需升级以适配固态电池的特性, 包括更精确的状态监测和故障诊断功能。例如, 针对全固态电池独有的压力和温度参数, BMS 需实现实时监控, 并与热管理和压力控制系统联动, 以确保

电池在各种工况下的安全运行。

3 结论与展望

目前, 固态电池技术仍处于高速发展阶段, 在此过程中仍将涌现新技术问题及对测试评价技术的新挑战。因此, 在传统测试评价体系建立的基础上, 需要同步发展原位检测、智能仿真以及数据驱动的新测试技术, 以期实现对固态电池产品设计、全生命周期应用及退役后处理的全流程高效率测试评价。在原位检测方面, 发展高时间分辨率和空间分辨率的实时观测手段, 捕获电池运行过程中的界面演变、锂枝晶生长和副反应等关键动态过程, 提供多尺度、多维度的动态数据; 智能仿真方面, 通过将多物理场耦合模型(如电化学-力学-热学模型)与高性能计算结合, 实现对电池在复杂工况下性能表现和失效机理的分析和预测; 数据驱动技术为测试评价体系提供革新方向, 利用大数据分析和机器学习算法, 建立虚拟测试平台, 实现对未知参数的精准预测, 提升测试技术的灵活性与适应性。在新兴测试技术的加持下, 将为全固态电池技术突破提供新质驱动力。

参考文献:

- [1] RANDAU S, WEBER D A, KÖTZ O, et al. Benchmarking the performance of all-solid-state lithium batteries[J]. *Nat Energy*, 2020, 5: 259-270.
- [2] WANG C H, LIANG J W, KIM J T, et al. Prospects of halide-based all-solid-state batteries: From material design to practical application[J]. *Sci Adv*, 2022, 8(36): eadc9516.
- [3] ALBERTUS P, ANANDAN V, BAN C M, et al. Challenges for and pathways toward Li-metal-based all-solid-state batteries[J]. *ACS Energy Lett*, 2021: 1399-1404.
- [4] 李泓, 陈立泉. 固态电池关键材料体系发展研究[J]. *中国工程科学*, 2024, 26(3): 19-33.
LI Hong, CHEN Liqun. *Strateg Study CAE*, 2024, 26(3): 19-33.
- [5] 吴敬华, 杨菁, 刘高瞻, 等. 固态锂电池十年(2011—2021)回顾与展望[J]. *储能科学与技术*, 2022, 11(9): 2713-2745.
WU Jinghua, YANG Jing, LIU Gaozhan, et al. *Energy Storage Sci Technol*, 2022, 11(9): 2713-2745.
- [6] 王芳, 林春景, 刘磊, 等. 动力电池安全性的测试与评价[J]. *储能科学与技术*, 2018, 7(6): 967-971.
WANG Fang, LIN Chunjing, LIU Lei, et al. *Energy Storage Sci Technol*, 2018, 7(6): 967-971.
- [7] 杨世春, 卢宇, 周思达, 等. 车用动力电池标准体系研究与分析[J]. *机械工程学报*, 2023, 59(22): 3-19.
YANG Shichun, LU Yu, ZHOU Sida, et al. *J Mech Eng*, 2023, 59(22): 3-19.
- [8] CHEN Y Q, KANG Y Q, ZHAO Y, et al. A review of lithium-ion battery safety concerns: The issues, strategies, and testing standards[J]. *J Energy Chem*, 2021, 59: 83-99.

- [9] XU C J, DAI Q, GAINES L, et al. Future material demand for automotive lithium-based batteries[J]. *Commun Mater*, 2020, 1: 99.
- [10] 王其钰, 王朔, 周格, 等. 锂电池失效分析与研究进展[J]. *物理学报*, 2018, 67(12): 279–290.
- WANG Qiyu, WANG Shuo, ZHOU Ge, et al. *Acta Phys Sin*, 2018, 67(12): 279–290.
- [11] TRIPATHI A M, SU W N, HWANG B J. *In situ* analytical techniques for battery interface analysis[J]. *Chem Soc Rev*, 2018, 47(3): 736–851.
- [12] HAN W J, ZOU C F, ZHOU C, et al. Estimation of cell SOC evolution and system performance in module-based battery charge equalization systems[J]. *IEEE Trans Smart Grid*, 2019, 10(5): 4717–4728.
- [13] CANNARELLA J, ARNOLD C B. Stress evolution and capacity fade in constrained lithium-ion pouch cells[J]. *J Power Sources*, 2014, 245: 745–751.
- [14] ZHANG C P, JIANG Y, JIANG J C, et al. Study on battery pack consistency evolutions and equilibrium diagnosis for serial- connected lithium-ion batteries[J]. *Appl Energy*, 2017, 207: 510–519.
- [15] ZHENG Y J, OUYANG M G, LU L G, et al. Understanding aging mechanisms in lithium-ion battery packs: From cell capacity loss to pack capacity evolution[J]. *J Power Sources*, 2015, 278: 287–295.
- [16] MA T Y, MA X L, WANG F, et al. Investigating the cell result multiplication method for emission test of battery module[J]. *Batteries*, 2023, 9(9): 450.
- [17] LIU S Q, MA T Y, WEI Z, et al. Study about thermal runaway behavior of high specific energy density Li-ion batteries in a low state of charge[J]. *J Energy Chem*, 2021, 52: 20–27.
- [18] 拱越, 谷林. 全固态电池中界面的结构演化和物质运输[J]. *物理学报*, 2020, 69(22): 63–70.
- GONG Yue, GU Lin. *Acta Phys Sin*, 2020, 69(22): 63–70.
- [19] YU C, GANAPATHY S, ECK E R H V, et al. Accessing the bottleneck in all-solid state batteries, lithium-ion transport over the solid-electrolyte-electrode interface[J]. *Nat Commun*, 2017, 8(1): 1086.
- [20] ZHANG B K, TAN R, YANG L Y, et al. Mechanisms and properties of ion-transport in inorganic solid electrolytes[J]. *Energy Storage Mater*, 2018, 10: 139–159.
- [21] 吴敬华, 姚霞银. 基于硫化物固体电解质全固态锂电池界面特性研究进展[J]. *储能科学与技术*, 2020, 9(2): 501–514.
- WU Jinghua, YAO Xiayin. *Energy Storage Sci Technol*, 2020, 9(2): 501–514.
- [22] LOU S F, ZHANG F, FU C K, et al. Interface issues and challenges in all-solid-state batteries: Lithium, sodium, and beyond[J]. *Adv Mater*, 2021, 33(6): e2000721.
- [23] WU Y J, WANG S, LI H, et al. Progress in thermal stability of all-solid-state-Li-ion-batteries[J]. *InfoMat*, 2021, 3(8): 827–853.
- [24] YU X Q, CHEN R S, GAN L Y, et al. Battery safety: From lithium-ion to solid-state batteries[J]. *Engineering*, 2023, 21: 9–14.
- [25] XU H, YANG S, LI B. Pressure Effects and Countermeasures in Solid-State Batteries: A Comprehensive Review [J]. *Adv Energy Mater*, 2024, 14(16).
- [26] ZHANG W B, SCHRÖDER D, ARLT T, et al. (Electro)chemical expansion during cycling: Monitoring the pressure changes in operating solid-state lithium batteries[J]. *J Mater Chem A*, 2017, 5(20): 9929–9936.
- [27] KIM J G, SON B, MUKHERJEE S, et al. A review of lithium and non-lithium based solid state batteries[J]. *J Power Sources*, 2015, 282: 299–322.
- [28] LEWIS J A, TIPPENS J, CORTES F J Q, et al. Chemo-mechanical challenges in solid-state batteries[J]. *Trends Chem*, 2019, 1(9): 845–857.
- [29] LUNTZ A C, VOSS J, REUTER K. Interfacial challenges in solid-state Li ion batteries[J]. *J Phys Chem Lett*, 2015, 6(22): 4599–4604.
- [30] TIAN H K, QI Y. Simulation of the effect of contact area loss in all-solid-state Li-ion batteries[J]. *J Electrochem Soc*, 2017, 164(11): E3512–E3521.
- [31] CHEN X Z, HE W J, DING L X, et al. Enhancing interfacial contact in all solid state batteries with a cathode-supported solid electrolyte membrane framework[J]. *Energy Environ Sci*, 2019, 12(3): 938–944.
- [32] 郑碧珠, 王红春, 马嘉林, 等. 固态电池无机固态电解质/电极界面的研究进展[J]. *中国科学: 化学*, 2017, 47(5): 579–593.
- ZHENG Bizhu, WANG Hongchun, MA Jialin, et al. *Sci Sin Chim*, 2017, 47(5): 579–593.
- [33] SCHLAUTMANN E, WEIß A, MAUS O, et al. Impact of the solid electrolyte particle size distribution in sulfide-based solid-state battery composites[J]. *Adv Energy Mater*, 2023, 13(41): 2302309.
- [34] 张强, 姚霞银, 张洪周, 等. 全固态锂电池界面的研究进展[J]. *储能科学与技术*, 2016, 5(5): 659–667.
- ZHANG Qiang, YAO Xiayin, ZHANG Hongzhou, et al. *Energy Storage Sci Technol*, 2016, 5(5): 659–667.
- [35] 孙兴伟, 王龙龙, 姜丰, 等. 固态聚合物锂电池失效机制及其表征技术[J]. *储能科学与技术*, 2019, 8(6): 1024–1032.
- SUN Xingwei, WANG Longlong, JIANG Feng, et al. *Energy Storage Sci Technol*, 2019, 8(6): 1024–1032.
- [36] 许卓, 郑莉莉, 陈兵, 等. 固态电池复合电解质研究综述[J]. *储能科学与技术*, 2021, 10(6): 2117–2126.
- XU Zhuo, ZHENG Lili, CHEN Bing, et al. *Energy Storage Sci Technol*, 2021, 10(6): 2117–2126.
- [37] CAO D X, SUN X, LI Q, et al. Lithium dendrite in all-solid-state batteries: Growth mechanisms, suppression strategies, and characterizations[J]. *Matter*, 2020, 3(1): 57–94.
- [38] WU B B, WANG S Y, LOCHALA J, et al. The role of the solid electrolyte interphase layer in preventing Li dendrite growth in solid-state batteries[J]. *Energy Environ Sci*, 2018, 11(7): 1803–1810.
- [39] JANEK J, ZEIER W G. Challenges in speeding up solid-state battery development[J]. *Nat Energy*, 2023, 8: 230–240.
- [40] FENG X N, ZHENG S Q, REN D S, et al. Investigating the thermal runaway mechanisms of lithium-ion batteries based on thermal analysis database[J]. *Appl Energy*, 2019, 246: 53–64.
- [41] LIU X, REN D S, HSU H, et al. Thermal runaway of lithium-ion batteries without internal short circuit[J]. *Joule*, 2018, 2(10): 2047–2064.
- [42] WU Y J, XU J, LU P S, et al. Thermal stability of sulfide solid electrolyte with lithium metal[J]. *Adv Energy Mater*, 2023, 13(36): 2301336.
- [43] RUI X Y, REN D S, LIU X, et al. Distinct thermal runaway mechanisms of sulfide-based all-solid-state batteries[J]. *Energy Environ Sci*, 2023, 16(8): 3552–3563.
- [44] KIM T, KIM K, LEE S, et al. Thermal runaway behavior of $\text{Li}_6\text{PS}_4\text{Cl}$ solid electrolytes for $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ and LiFePO_4 in all-solid-state batteries[J]. *Chem Mater*, 2022, 34(20): 9159–9171.
- [45] LV F, WANG Z Y, SHI L Y, et al. Challenges and development of composite solid-state electrolytes for high-performance lithium ion batteries[J]. *J Power Sources*, 2019, 441: 227175.
- [46] SPENCER JOLLY D, NING Z Y, HARTLEY G O, et al. Temperature dependence of lithium anode voiding in argyrodite solid-state

- batteries[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2021, 13(19): 22708–22716.
- [47] WANG J N, YANG K, SUN S Y, et al. Advances in thermal-related analysis techniques for solid-state lithium batteries[J]. InfoMat, 2023, 5(4): e12401.
- [48] DOUX J M, YANG Y, TAN D H S, et al. Pressure effects on sulfide electrolytes for all solid-state batteries[J]. J Mater Chem A, 2020, 8(10): 5049–5055.
- [49] YAMAMOTO M, TERAUCHI Y, SAKUDA A, et al. Effects of volume variations under different compressive pressures on the performance and microstructure of all-solid-state batteries[J]. J Power Sources, 2020, 473: 228595.
- [50] CHEN R S, LI Q H, YU X Q, et al. Approaching practically accessible solid-state batteries: Stability issues related to solid electrolytes and interfaces[J]. Chem Rev, 2020, 120(14): 6820–6877.
- [51] SO M, INOUE G, HIRATE R, et al. Effect of mold pressure on compaction and ion conductivity of all-solid-state batteries revealed by the discrete element method[J]. J Power Sources, 2021, 508: 230344.
- [52] 王其钰, 王朔, 张杰男, 等. 锂离子电池失效分析概述[J]. 储能科学与技术, 2017, 6(5): 1008–1025.
- WANG Qiyu, WANG Shuo, ZHANG Jienan, et al. Energy Storage Sci Technol, 2017, 6(5): 1008–1025.
- [53] WANG Q S, PING P, ZHAO X J, et al. Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery[J]. J Power Sources, 2012, 208: 210–224.
- [54] MA T Y, HAN L Q, WANG F, et al. Thermal safety analysis of lithium-ion traction batteries based on electrode thermal stability[M]//Proceedings of the UNified Conference of DAMAS, IncoME and TEPEN Conferences (UNified 2023). Cham: Springer Nature Switzerland, 2024: 129–141.
- [55] MA B, LIN C, LIU L, et al. Venting characteristics and flammability limit of thermal runaway gas of lithium ion battery [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(5): 1592.
- [56] MANTHIRAM A, YU X W, WANG S F. Lithium battery chemistries enabled by solid-state electrolytes[J]. Nat Rev Mater, 2017, 2(4): 16103.
- [57] WANG C W, FU K, KAMMAMPATA S P, et al. Garnet-type solid-state electrolytes: Materials, interfaces, and batteries[J]. Chem Rev, 2020, 120(10): 4257–4300.
- [58] FAMPRIKIS T, CANEPA P, DAWSON J A, et al. Fundamentals of inorganic solid-state electrolytes for batteries[J]. Nat Mater, 2019, 18(12): 1278–1291.
- [59] XU S J, SUN Z H, SUN C G, et al. Homogeneous and fast ion conduction of PEO-based solid-state electrolyte at low temperature[J]. Adv Funct Mater, 2020, 30(51): 2007172.
- [60] 黄晓, 吴林斌, 黄祯, 等. 锂离子固体电解质研究中的电化学测试方法[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(2): 479–500.
- HUANG Xiao, WU Linbin, HUANG Zhen, et al. Energy Storage Sci Technol, 2020, 9(2): 479–500.
- [61] NAGAO M, IMADE Y, NARISAWA H, et al. All-solid-state Li–sulfur batteries with mesoporous electrode and thio-LISICON solid electrolyte[J]. J Power Sources, 2013, 222: 237–242.
- [62] GAO Z H, SUN H B, FU L, et al. Promises, challenges, and recent progress of inorganic solid-state electrolytes for all-solid-state lithium batteries[J]. Adv Mater, 2018, 30(17): e1705702.
- [63] MIAO X, GUAN S D, MA C, et al. Role of interfaces in solid-state batteries[J]. Adv Mater, 2023, 35(50): e2206402.
- [64] MARCHIORI C F N, CARVALHO R P, EBADI M, et al. Understanding the electrochemical stability window of polymer electrolytes in solid-state batteries from atomic-scale modeling: The role of Li-ion salts[J]. Chem Mater, 2020, 32(17): 7237–7246.
- [65] MÉRY A, ROUSSELOT S, LEPAGE D, et al. A critical review for an accurate electrochemical stability window measurement of solid polymer and composite electrolytes[J]. Materials, 2021, 14(14): 3840.
- [66] 杨毅, 闫崇, 黄佳琦. 锂电池中固体电解质界面研究进展[J]. 物理化学学报, 2021, 37(11): 62–74.
- YANG Yi, YAN Chong, HUANG Jiaqi. Acta Phys Chim Sin, 2021, 37(11): 62–74.
- [67] KE X Y, WANG Y, REN G F, et al. Towards rational mechanical design of inorganic solid electrolytes for all-solid-state lithium ion batteries[J]. Energy Storage Mater, 2020, 26: 313–324.
- [68] YU S, SCHMIDT R D, GARCIA-MENDEZ R, et al. Elastic properties of the solid electrolyte $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ (LLZO)[J]. Chem Mater, 2016, 28(1): 197–206.
- [69] CHEN R J, QU W J, GUO X, et al. The pursuit of solid-state electrolytes for lithium batteries: From comprehensive insight to emerging horizons[J]. Mater Horiz, 2016, 3(6): 487–516.
- [70] TIAN Y S, SHI T, RICHARDS W D, et al. Compatibility issues between electrodes and electrolytes in solid-state batteries[J]. Energy Environ Sci, 2017, 10(5): 1150–1166.
- [71] 许晓雄, 邱志军, 官亦标, 等. 全固态锂电池技术的研究现状与展望[J]. 储能科学与技术, 2013, 2(4): 331–341.
- XU Xiaoxiong, QIU Zhijun, GUAN Yibiao, et al. Energy Storage Sci Technol, 2013, 2(4): 331–341.
- [72] AN S J, LI J L, DANIEL C, et al. The state of understanding of the lithium-ion-battery graphite solid electrolyte interphase (SEI) and its relationship to formation cycling[J]. Carbon, 2016, 105: 52–76.
- [73] NIE M Y, LUCHT B L. Role of lithium salt on solid electrolyte interface (SEI) formation and structure in lithium ion batteries[J]. J Electrochem Soc, 2014, 161(6): A1001–A1006.
- [74] PELED E, MENKIN S. Review: SEI: Past, present and future[J]. J Electrochem Soc, 2017, 164(7): A1703–A1719.
- [75] XIAO Y H, MIARA L J, WANG Y, et al. Computational screening of cathode coatings for solid-state batteries[J]. Joule, 2019, 3(5): 1252–1275.
- [76] CULVER S P, KOERVER R, ZEIER W G, et al. On the functionality of coatings for cathode active materials in thiophosphate-based all-solid-state batteries[J]. Adv Energy Mater, 2019, 9(24): 1900626.
- [77] KOERVER R, ZHANG W B, DE BIASI L, et al. Chemo-mechanical expansion of lithium electrode materials-on the route to mechanically optimized all-solid-state batteries[J]. Energy Environ Sci, 2018, 11(8): 2142–2158.
- [78] LIU B Y, PU S D, DOERRER C, et al. The effect of volume change and stack pressure on solid-state battery cathodes[J]. SusMat, 2023, 3(5): 721–728.
- [79] KIMURA Y, FAKKAO M, NAKAMURA T, et al. Influence of active material loading on electrochemical reactions in composite solid-state battery electrodes revealed by *operando* 3D CT-XANES imaging[J]. ACS Appl Energy Mater, 2020, 3(8): 7782–7793.
- [80] SAKKA Y, YAMASHIGE H, WATANABE A, et al. Pressure dependence on the three-dimensional structure of a composite electrode in an all-solid-state battery[J]. J Mater Chem A, 2022, 10(31): 16602–16609.
- [81] YADAV N G, FOLASTRE N, BOLMONT M, et al. Study of failure

- modes in two sulphide-based solid electrolyte all-solid-state batteries *via in situ* SEM[J]. J Mater Chem A, 2022, 10(33): 17142–17155.
- [82] RICHARDS W D, MIARA L J, WANG Y, et al. Interface stability in solid-state batteries[J]. Chem Mater, 2016, 28(1): 266–273.
- [83] XIAO Y H, WANG Y, BO S H, et al. Understanding interface stability in solid-state batteries[J]. Nat Rev Mater, 2020, 5: 105–126.
- [84] HORI S, KANNO R, SUN X Y, et al. Understanding the impedance spectra of all-solid-state lithium battery cells with sulfide superionic conductors[J]. J Power Sources, 2023, 556: 232450.
- [85] LIU B Y, FU K, GONG Y H, et al. Rapid thermal annealing of cathode-garnet interface toward high-temperature solid state batteries[J]. Nano Lett, 2017, 17(8): 4917–4923.
- [86] LI C, WANG Z Y, HE Z J, et al. An advance review of solid-state battery: Challenges, progress and prospects[J]. Sustain Mater Technol, 2021, 29: e00297.
- [87] KATO Y, HORI S, SAITO T, et al. High-power all-solid-state batteries using sulfide superionic conductors[J]. Nat Energy, 2016, 1(4): 16030.
- [88] TROY S, SCHREIBER A, REPPERT T, et al. Life cycle assessment and resource analysis of all-solid-state batteries[J]. Appl Energy, 2016, 169: 757–767.
- [89] KARTINI E, GENARDY C T. The future of all solid state battery; proceedings of the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering [C]// F, 2020. IOP Publishing.
- [90] WANG Q C, DING X Y, LI J B, et al. Minimizing the interfacial resistance for a solid-state lithium battery running at room temperature[J]. Chem Eng J, 2022, 448: 137740.
- [91] WAN Z P, LEI D N, YANG W, et al. Low resistance-integrated all-solid-state battery achieved by $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ nanowire upgrading polyethylene oxide (PEO) composite electrolyte and PEO cathode binder[J]. Adv Funct Mater, 2019, 29(1): 1805301.
- [92] DARMET N, CHARBONNEL J, REYTIER M, et al. First experimental assessment of all-solid-state battery thermal runaway propagation in a battery pack[J]. ACS Appl Energy Mater, 2024, 7(10): 4365–4375.
- [93] RANDREMA D X, MFIBAN I L, SOLER D M, et al. Towards a practical use of sulfide solid electrolytes in solid-state batteries: Impact of dry room exposure on H_2S release and material properties[J]. Batter Supercaps, 2024, 7(1): e202300380.
- [94] YERSAK T A, ZHANG Y B, HAO F, et al. Moisture stability of sulfide solid-state electrolytes[J]. Front Energy Res, 2022, 10: 882508.
- [95] SCHARMANN T, ÖZCELIKMAN C, NGUYEN D M, et al. Quantification of hydrogen sulfide development during the production of all-solid-state batteries with argyrodite sulfide-based separators[J]. ACS Appl Energy Mater, 2024, 7(3): 1261–1269.

Construction and Challenges of Testing and Evaluation Systems for Solid-State Batteries

WANG Fang¹, HAN Ce², WANG Weina², LIU Shiqiang¹, LI Peng²

(1. CATARC: China Automotive Technology and Research Center Co., Ltd., Tianjin, 300300, China;

2. CATARC New Energy Vehicle Research and Inspection Center (Tianjin) Co., Ltd., Tianjin, 300300, China)

Extended Abstract

All-solid-state batteries (ASSBs) emerge as a promising next-generation power battery technology due to their ability to eliminate flammable organic components in conventional liquid lithium-ion batteries *via* introducing solid electrolytes. This innovation significantly enhances the safety window of the battery and holds a potential to further increase the energy density of the battery when combined with high-energy electrode systems. Consequently, ASSBs are regarded as a major technological route for next-generation energy storage devices.

While liquid lithium-ion batteries are developed for years, establishing a well-developed and multi-tiered testing and evaluation system (*i.e.*, basic electrode material tests, interface behavior analysis, single-cell performance assessments, system integration/management for performance, lifespan, and safety evaluation), ASSBs differ significantly in their technological characteristics. These differences span ion transport mechanisms, interface properties, thermal stability, and environmental adaptability. Furthermore, the introduction of new materials, processes, and structures for ASSBs presents some challenges for the existing testing and evaluation systems.

The existing solid-state battery technology is still in a phase of rapid development, and some technical issues and challenges for testing and evaluation are expected to emerge throughout this process. It is thus necessary to simultaneously advance new testing technologies such as *in-situ* detection, intelligent simulation, and data-driven approaches, alongside the establishment of conventional testing and evaluation systems. These advancements enable highly efficient testing and evaluation throughout the entire lifecycle of solid-state battery products, from design to application and post-decommissioning processing.

In terms of *in-situ* detection, it is critical to develop real-time observation techniques with high temporal and spatial resolution to capture key dynamic processes such as interface evolution, lithium dendrite growth, and side reactions during battery operation. These techniques will provide multi-scale and multi-dimensional dynamic data. Intelligent simulation involves coupling multiphysics models (*i.e.*, electrochemical-mechanical-thermal models) with high-performance computing to analyze and predict the battery performance and failure mechanisms under complex operating conditions. Data-driven technologies offer an innovative direction for testing and evaluation systems by leveraging big data analytics and machine learning algorithms. These technologies will enable precise predictions of unknown parameters and enhance the flexibility and adaptability of testing methods.

With the integration of these emerging testing technologies, the development of ASSB technology will gain new momentum and drive breakthroughs in the field. To address the challenges for ASSBs, novel testing methodologies should be developed, including

key material analysis, *in-situ* characterization, comprehensive battery performance evaluation, failure and hazard analysis, and simulation techniques. This review explores the fundamental technological differences between ASSBs and liquid lithium-ion batteries and systematically discusses the key ideas for establishing a testing and evaluation system tailored to ASSBs. The review also examines some key issues and technical challenges related to testing at the material, cell, and system levels. It proposes a framework for building a comprehensive testing and evaluation system specifically suited to the characteristics of ASSBs *via* analyzing the current state of testing technology development. The aim is to provide a theoretical foundation and practical guidance for the technological research and industrial application of all-solid-state batteries.

Summary and prospects This review focuses on the status and challenges of testing and evaluation technologies for all-solid-state batteries (ASSBs). As ASSBs are considered as a promising alternative to conventional lithium-ion batteries due to their enhanced safety and potential for higher energy density, understanding and addressing the unique testing challenges they pose is critical. The review systematically represents the novel characteristics of ASSBs, particularly in terms of ion transport mechanisms, interfacial stability, thermal safety, and environmental adaptability. These characteristics significantly differ from those of liquid-based lithium-ion batteries, presenting new challenges in evaluating their performance, reliability and safety.

The review also analyzes the limitations of existing testing and evaluation systems, which are primarily designed for liquid lithium-ion batteries, and highlights a need for new approaches to meet the specific demands of ASSBs. The discussion emphasizes the necessity of developing a comprehensive testing framework that spans all levels, from materials and interfaces to battery cells, systems, and even vehicles. This comprehensive approach is essential to properly assess ASSBs in terms of their performance, lifecycle, and safety under different environmental conditions.

Furthermore, the review identifies some key challenges arising in the evolution of testing technologies, *i.e.*, the need for more accurate *in-situ* analysis techniques, the integration of intelligent simulation tools, and the incorporation of data-driven approaches. To address these challenges, the review proposes directions for advancing testing methodologies, such as developing high-resolution, real-time *in-situ* observation tools to capture dynamic processes, utilizing multi-physics simulations to predict performance under complex conditions, and leveraging machine learning for data analysis and prediction of battery behavior. These advancements can integrate cutting-edge techniques into the testing and evaluation processes, facilitating the transition of ASSBs from laboratory research to commercial applications, and ultimately enabling the broader adoption of solid-state battery technology in various industries.

Keywords all-solid-state battery, test and evaluation technology, solid-state electrolyte, solid-solid interface