



# 中国材料大会 2025

## 暨新材料科研仪器与设备展

7月5-8日, 2025

福建 厦门

**A011-固态电池及关键材料**  
**A11-Solid-state batteries and their key materials**

主办单位

中国材料研究学会

会议网址: <https://cmc2025.scimeeting.cn>



## A11. 固态电池及关键材料

分会主席：张桥保、贺艳兵、周伟东、周光敏、庞全全、万佳雨

### 报告

#### A11-01

##### 锂键化学与人工智能赋能固态电池材料开发

张强\*

清华大学

#### A11-02

##### 氧化物聚合物复合固态电解质体系固态锂电池研发进展

郭向欣\*

青岛大学

近年来，采用固体电解质取代液体电解液的高能量密度高安全固态锂电池得到越来越多的关注。报告将基于研究团队以往多年对氧化物固体电解质和固态电池方面的研究，讨论氧化物聚合物复合固态电解质体系在实用化进程中，对于超薄高离子电导及稳定电解质膜、致密高面容量复合正极/负极、以及固态电芯所面临的关键问题与解决方案。对氧化物固体电解质在固态锂电池中存在的关键问题进行探讨，包括氧化物固体电解质材料表面碳酸锂、与聚合物复合固态电解质膜及电极内部界面、正极/电解质层界面、以及电芯界面的设计与构筑。并进一步讨论针对高能量密度高安全的目标要求，对关键材料及体系的选择及设计与制备思路。指出在固态电池研究中出现的新现象和新问题，需要开展系统深入的科学研究。

#### A11-03

##### 聚合物电解质与固态电池性能研究

李峰\*

中国科学院金属研究所

聚合物固态电解质作为固态电池最为重要的组分，应用的关键在于提高体相的离子电导及与正负极形成紧密界面。本报告介绍了聚合物固态电解质中形成聚有机多硫化物、双交联成键及使用有机小分子构造锂离子快速输运通道来提高离子输运能力，原位电化学聚合方式形成离子电子双导电反应界面，冷冻干燥过程形成局部高浓度盐的聚合物电解质，从而提高锂离子迁移数和离子电导率，低界面电阻、高稳定接触界面，改善电解质与锂负极界面的相容性，形成稳定负极界面，实现长循环稳定性的固态锂电池。

#### A11-04

##### 二维储锂材料

杨树斌\*

北京航空航天大学

近年来，二维材料如石墨烯、MXene 等表现出许多独特的物理化学性质，在能量储存与转化甚至电子等领域具有广阔的应用前景。超薄二维材料通常可以通过自上而下（Top-down）和自下而上（Bottom-up）法制备，但其单层率（<1 wt.%）/产率（微克级）低，严重限制超薄二维材料在新能源材料中的应用。近期，杨树斌课题组提出拓扑转化新方法，通过将非范德华固体如 MAX 相等逐步转化为二维范德华材料，突破了上述方法的限制，并阐明了该方法热动力学控制的非范德华固体-范德华二维拓扑转化机制，宏量制备出一系列具有超高单层率（91%）和高稳定结构的范德华二维材料，为超薄二维材料在柔性电子、能源储存与转化领域的实际应用奠定了基础。同时，杨树斌课题组基于超薄二维材料的不同特性如二维特性、柔软、可调官能团等，设计制备出系列超薄二维复合材料，并应用于电化学储能器件如金属锂电池等。

## A11-05

## 固态锂硫电池的设计制备

周光敏\*

清华大学深圳国际研究生院

固态锂硫电池由于其高能量密度和良好的安全性,被认为是满足未来电动飞行器等高能量需求的理想电池体系。然而,传统固态锂硫电池面临导电性差、体积膨胀和固固转化动力学缓慢等技术挑战,导致其循环寿命和能量密度受限。为解决这些问题,我们通过引入准嵌入机制 1,显著提升了硫化聚丙烯腈正极的循环稳定性,减小了体积变化并加快其反应动力学。同时,通过欠配位化学策略 2,增强了导锂填料与聚合物之间的化学稳定性,实现了锂离子的高效传输。此外,开发了霍夫曼型二维导锂填充剂,提出了基于配体运转的导锂新模式 3,提升了离子传输效率,并形成高无机含量的 SEI 层对锂负极进行有效保护,延长了电池的循环寿命。结合机器学习筛选导锂剂填料,并通过分子动力学模拟,成功开发出具有高离子电导率 ( $9 \times 10^{-4} \text{ S cm}^{-1}$ ) 的霍夫曼型导锂填料/聚合物复合电解质 4。针对高能量密度固态电解质厚度的要求,开发了新型超薄复合固态电解质 5,最薄厚度可达  $3.4 \mu\text{m}$ ,成功解决了超薄电解质膜在高机械强度和超薄厚度之间的平衡问题。

## A11-06

## 非晶氮化物固态电解质的结构与低温性能研究

韩松柏\*

南方科技大学

非晶氮化物固态电解质因其在全固态电池中的潜在应用而受到广泛关注,尤其是在低温环境下的优异性能表现。本报告系统探讨了非晶氮化物-卤化物固态电解质 ( $\text{Li}_x\text{MCl}_y\text{N}_x$ ,  $\text{M} = \text{Ta}$  或  $\text{La}$ ) 的结构特性及其在极端低温条件下的性能表现。通过机械化学法制备的非晶  $\text{Li}_3\text{xTaCl}_5\text{N}_x$  (LTCN) 在  $30^\circ\text{C}$  下实现了高达  $7.34 \text{ mS cm}^{-1}$  的离子电导率,并在  $-20^\circ\text{C}$  下展现出良好的循环稳定性。进一步研究表明,非晶  $x\text{Li}_3\text{N-TaCl}_5$  (L1.25NTCl) 在  $-30^\circ\text{C}$  下表现出  $164.8 \text{ mAh g}^{-1}$  的初始放电容量,并在 100 个循环后保持  $137.6 \text{ mAh g}^{-1}$  的容量,容量保持率为 83.5%。通过粉末 X 射线衍射 (PXRD)、低温透射电子显微镜 (cryo-TEM)、原子对分布函数 (PDF) 分析和从头算分子动力学 (AIMD) 模拟等手段,揭示了非晶结构的形成机制及其对锂离子传输的影响。研究发现,氮的引入显著改变了阳离子与阴离子之间的配位模式,促进了非晶结构的形成,并通过拉长 Ta-Cl 键增强了锂离子的传输能力。此外,非晶 L1.25NTCl 的高致密性和各向同性传导路径使其在极端低温环境下 (如  $-60^\circ\text{C}$ ) 仍能保持稳定的充放电性能。实验结果表明,非晶氮化物固态电解质不仅具有优异的离子传导性能,还能有效解决传统液态电解质在低温下的界面阻抗和离子传导问题,为全固态电池在极端环境下的应用提供了新的思路。本研究为未来非晶固态电解质的设计与优化提供了重要的理论依据和实验支持。【1,2】

[1] Hong, B.; Gao, L.; Nan, P.; Li, Y.; Liu, M.; Zou, R.; Gu, J.; Xu, Q.; Zhu, J.; Han, S. Novel Amorphous Nitride-Halide Solid Electrolytes with Enhanced Performance for All-Solid-State Batteries. *Angewandte Chemie - International Edition* 2025, 64 (3).

[2] Hong, B.; Gao, L.; Li, C.; Lai, G.; Zhu, J.; Huang, D.; Zuo, Y.; Yin, W.; Sun, M.; Zhao, S.; Zheng, J.; Han, S.; Zou, R. All-Solid-State Batteries Designed for Operation under Extreme Cold Conditions. *Nature Communications* 2025, 16 (1).

## A11-07

## 高性能薄膜电极及其全固态薄膜锂电池

林杰\*

厦门大学

全固态锂电池硅基负极具有极高的体积比容量 ( $\sim 834 \mu\text{Ah cm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$ ),但是充放电时剧烈的体积变化导致其循环性能不佳,亟需通过结构设计、材料复合和界面改性等方法来开发高性能的硅基负极材料,

而且以薄膜形态的硅基材料（无导电剂和粘结剂）为研究对象，能够准确、直观地研究纯活性材料的电化性能学和反应机理。通过系统的理论计算和实验制备，研究了不同结构、组分硅基薄膜负极的电化学性能差异，探究其表界面反应过程和性能衰减机制，旨在通过结构、组分等多重因素的协同调控，制备出适用于薄膜锂电池的高性能硅基薄膜负极，同时为粉末型硅基负极的设计和开发提供理论指导和实验依据。

## A11-08

### 复合固态电解质的微纳结构与界面

徐林\*

武汉理工大学

高性能储能电池是我国新能源电动汽车、智能电网等战略性新兴产业发展的迫切与重大需求。采用固态电解质替代传统电解液是实现储能电池高能量密度和高安全性的重要途径与发展方向。电池材料中电子/离子在电池内部界面的高效传输是高性能电池的关键，微纳尺度界面的研究有利于从微观角度深入理解界面的物理、化学性质及其演变规律。因此，我们围绕纳米线固态电池材料与界面，重点开展了固态电池离子输运调控、固态电池界面设计、界面电子/离子输运机理等相关工作。具体包括以下内容：（1）通过分级自组装策略构筑 MOF 基离子导体，实现固态电解质连续离子传输和高机械性能。（2）通过超细纳米线构筑连续的离子传输网络，对固态电解质中界面离子输运进行调控，发现无机纳米线/有机聚合物界面为锂离子提供快速高效的传输路径。（3）界面化学设计实现对固态电池的界面调控，稳定的界面层抑制副反应、锂枝晶穿透，同时引导锂离子均匀沉积。

## A11-09

### 功能型固态电解质设计及固-固界面调控构筑高性能全固态电池

余创\*

华中科技大学

随着交通电气化和分布式储能市场的快速增长，基于液态电解液的传统锂离子电池体系已经不能满足对高安全性、高能量密度、低成本及更长循环寿命的迫切要求。采用液态电解液的锂离子电池存在易泄漏、易腐蚀、易燃烧等安全隐患，而高能量密度要求必然造成安全问题更加突出，因此提高锂电池本征安全性对其在规模化储能中的应用至关重要。将液态电解液替换为不可燃性固态电解质构建而成的全固态电池具有高安全、高能量/功率密度、长寿命、低成本、环境适应性及更容易回收，被视为解决目前锂离子电池安全性问题的终极方案。锂硫银锗矿基电解质  $\text{Li}_6\text{PS}_5\text{X}$  ( $\text{X}=\text{Cl}, \text{Br}$ ) 因其高室温锂离子导电率 ( $10^{-3}\sim 10^{-2} \text{ S/cm}$ ) 和低成本在众多电解质中最具产业化前景。[1-2] 除了高导电率和低成本的电解质，要实现实用化的硫化物基全固态锂电池仍面临许多挑战，如化学/电化学稳定性、与电极材料和锂金属的兼容性、热稳定性、成本等。本研究研究了基于锂硫银锗矿固态电解质的全固态电池的界面离子传导，为设计高性能和环境适应性好的全固态锂硫电池奠定基础。

## A11-10

### 硫化物固态电池关键材料及界面研究

李德平\*

哈尔滨工业大学（深圳）

目前，全固态电池已成为高能量密度电化学储能器件最具前景的选择之一。然而，全固态电池中的固-固界面接触差、界面副反应严重以及动力学迟滞等问题严重阻碍其进一步发展。本报告将介绍硫化物全固态电池的界面问题来源及改性思路，重点关注高比容量硅基负极材料和高电位富锂锰/高镍正极材料，具体内容包括：1) 硫化物电解质结构调制及表面改性增强界面稳定性；2) 通过在硅基负极材料表面构筑 Li-Al-O 快离子导体，提升其在硫化物全固态电池中的界面稳定性及离子输运动力学；3) 通过在高镍/富锂锰正极材料表面进行“快离子导体表面包覆+近表面体相掺杂”协同优化改性，有效解决高电压正极在全固态体系中的动力学迟缓问题和界面副反应问题。上述研究成果为阐明全固态电池失效机制和探索优化改性策略提

供了可借鉴思路。

参考文献：

1. D. Li\* et al, Chemical Society Reviews 2024, DOI: 10.1039/D3CS00741C
2. D. Li\* et al, Advanced Energy Materials 2023, DOI: 10.1002/aenm.202300466
3. D. Li\* et al, Advanced Functional Materials 2023, DOI: 10.1002/adfm.202214775
4. D. Li\* et al, Energy Storage Materials 2022, DOI: 10.1016/j.ensm.2022.11.054
5. D. Li\* et al, ACS Energy Letters 2025, DOI: 10.1021/acseenergylett.5c00071

## A11-11

### 高性能硫化物电解质开发及规模化制备

王硕\*

武汉理工大学

全固态电池采用固态电解质取代液态电解液，可解决传统锂电池安全性问题，同时有望使用锂金属作为负极材料来提高电池的能量密度。其中富卤硫化物电解质因其较高的室温离子电导率和容易冷压成型，因而备受青睐。然而目前由于采用复杂的制备工艺导致产量较少，同时由于电极/电解质界面副反应导致的电极失效，阻碍了其在固态电池领域大规模应用，并且关于其离子传输机制尚不清楚。我们通过氯溴共掺成功制备出具有超高室温离子电导率（冷压状态下  $13 \text{ mS cm}^{-1}$ ，热压状态下  $25 \text{ mS cm}^{-1}$ ）、低活化能（ $0.24 \text{ eV}$ ）的 LPSCB 电解质。并采用快速干混及随后热处理方法首次实现了高性能硫化物电解质百克级以上的稳定制备。结合中子衍射和  $6\text{Li}-7\text{Li}$  示踪交换核磁共振测试，揭示了氯溴共掺富卤化物电解质中，在间隙  $16e$  位点上具有更高  $\text{Li}^+$  占有率，这将促进锂离子在笼间传输，降低了锂离子迁移的活化能垒。将上述电解质与包覆后的三元正极材料配合，组装全固态电池，在  $0.5\text{C}$  下循环 2500 次， $2\text{C}$  下循环 1800 次，容量均没有明显衰减，在高载下稳定循环 440 圈实现了  $2.83 \text{ mAh cm}^{-2}$  高的面容量。以上结果表明 LPSCB 是一款很有前景的电解质材料有望助力高比能全固态电池的商业化应用。

## A11-12

### 固态锂电池中的正极材料表界面失效机制

王春阳\*

中国科学院金属研究所

锂电正极材料的表界面是其结构和性能退化的起源。深入认识正极材料的表界面失效机理和构效关系对于指导下一代锂电正极材料的优化设计至关重要。在这一报告中，我将介绍我们最近在利用原位透射电镜、三维透射电镜和人工智能透射电镜技术揭示高镍层状氧化物正极材料结构退化和力学失稳机制研究方面取得的最新进展，重点包括界面结构、界面结构退化和电化学应力诱导的相变机制等。该系列研究不仅拓展了层状氧化物正极材料的失效理论，也凸显了先进透射电镜技术在电池能源材料研究中的重要作用。

## A11-13

### 卤化物固态电解质材料设计及其产业化应用研究

梁剑文\*

有研（广东）新材料技术研究院

卤化物固态电解质材料因其宽电化学窗口，对正极稳定以及高安全特性而受到关注。报告人近年来围绕全固态电池卤化物固态电解质材料体系及其产业化方向展开研究 1-4，提出了固相离子传导的迁移熵效应 2，构建了卤化物体系结构相图 3 等。本次报告主要围绕卤化物固态电解质材料及其全固态电池的发展以及报告人近几年来对该体系的理解进行展开，从产业化角度探讨卤化物固态电解质材料的设计方案及其在全固态电池方面的应用潜力。

## A11-14

### 基于旋转动力学的新型固态电解质设计

官朝红\*

上海交通大学

The design of superionic conductors has been largely focused on static structural features, with the dynamic ion transport mechanism less explored. Here, we demonstrate a paradigm that harnesses the polyanion rotations to trigger the dynamically disordered Li sublattice as well as the liquid-like cation diffusion for superior ionic conductivity in crystals. A novel descriptor called rotation tolerance factor (RTF) was proposed as a predictive metric for identifying the potential fast-rotating anion clusters with the low mass and reduced valence charge for given structural frameworks. Guided by RTF, halides with rotational polyanions, namely  $\text{Li}_2\text{Y}(\text{SH})_6$ ,  $\text{Li}_3\text{Y}(\text{NH}_2)_6$ ,  $\text{Li}_2\text{Zr}(\text{NH}_2)_6$  and an oxide ( $\text{Li}_{6.5}\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{11.5}(\text{NH}_2)_{0.5}$ ) have been designed with synergistic anion rotation and  $\text{Li}^+$  sublattice disorder, which lead to great enhancement of Li ionic conductivities at room temperature compared to the counterparts without polyanions. The experimentally synthesized  $\text{NH}_2$ -incorporated  $\text{Li}_2\text{ZrCl}_{15.5}(\text{NH}_2)_{0.5}$  demonstrates a four fold higher conductivity over  $\text{Li}_2\text{ZrCl}_6$ , enabling all-solid-state Li-In|LCO and Li-In|NCM cells with 96.5% and 97.4% capacity retention after 190 cycles at 1C, respectively. This work provides a new insight that anion rotation could promote the dynamically disordered lithium sublattice distribution as well as the ionic conductivity.

#### A11-15

### 调控碳化聚合物点表面有效官能团含量以提升离子传输动力学

杨国夺、孙海珠\*

东北师范大学

固态聚合物电解质 (SPE) 作为液体电解质的替代品, 因其独立成膜、加工工艺简单、抗振动和机械变形能力强等优点而受到广泛关注, 但 SPE 低的离子电导率限制了其实际应用。因此, 该工作通过可控合成策略制备了不同官能团含量的 CPDs, 并将其作为聚环氧乙烷 (PEO)-SPE 的添加剂以提升离子传输动力学。为了更加明晰 CPDs 在促进离子传输、调节 SPE 结晶度中的作用, 定义了有效官能团 (EFG) 的概念, 并深入探究了 CPDs 中 EFG 含量对  $\text{Li}^+$  传输动力学的调控机制及其对 SPE 结晶行为的影响。研究表明: 随着合成温度的升高, EFG 含量先增加后减少, 在  $180\text{ }^\circ\text{C}$  时 (180CPDs) 达到峰值 (48.7%)。CPDs 通过促进锂盐的分解, 降低 PEO 的结晶度, 为  $\text{Li}^+$  传输提供驱动力, 从而提升了离子传输性能, 且 EFG 含量越高, 对  $\text{Li}^+$  传输动力学的促进作用越显著。将 EFG 含量最高的 180CPDs 添加到 PEO-SPE 中, SPE 室温下的离子电导率从  $7.35 \times 10^{-6}\text{ S cm}^{-1}$  提升到  $4.88 \times 10^{-5}\text{ S cm}^{-1}$ ; 在  $60\text{ }^\circ\text{C}$  下, 添加 180CPDs 的 SPE 离子电导率为  $4.48 \times 10^{-4}\text{ S cm}^{-1}$ 。采用含 180CPDs 的 SPE 组装的对称电池和全电池的电化学性能获得显著提升。

致谢: 感谢国家自然科学基金 (批准号: 22275030, 22035001)、吉林省教育厅和东北师范大学科技成果转化基金项目 (CGZH202203) 资助。

#### 参考文献:

- [1] R. Wang, W. Wang, Y. Zhang, et al. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2025, 64, 202417605.
- [2] W. Zhang, V. Koverga, S. Liu, et al. *Nat. Energy*, 2024, 9, 386-400.
- [3] C. Xia, J. Zhong, X. Han, et al. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2024, 63, 202410519.
- [4] J. Shen, W. Tian, S. Liu, et al. *ACS Nano*, 2024, 18, 30716.
- [5] W. Wang, Y. Yang, J. Yang, et al. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2024, 63, 202400091.
- [6] T. Li, Q. Zheng, J. Li, et al. *ACS Energy Lett.* 2025, 10, 2228.

#### A11-16

## 水系锌离子电池准固态电解质的研究

朱前程\*

河北大学

目前,商业化锂离子电池占据了主要市场,但锂和钴等资源稀缺、制造成本昂贵、有机电解液有毒、易燃等问题阻碍了其在大规模储能系统中的应用。近年来,本征安全的水系锌离子电池具有安全环保、成本低、容量高等优点,被认为是极具前景的储能体系。但水溶液电解质由于其过多的反应活性水而会产生严重的树枝状晶体和副产物,这严重阻碍了锌电池的发展。课题组针对水系锌离子电池存在的挑战性难题,围绕准固态电解质,相继开展了以下研究工作:

1) 内/表面双加速策略增强固态锌电池中锌离子输运动力学:提出了一种新型的双层固态电解质来实现电解质内部和电极界面的离子传输双加速策略。一方面,填充金属有机框架 CALF-20 的 PEO 杂化凝胶与 CF<sub>3</sub>SO<sub>3</sub><sup>-</sup>阴离子表现出强烈的相互作用,从而促进了 Zn<sup>2+</sup>的解离和传输。另一方面,外层单独的 CALF-20 能够富集 Zn<sup>2+</sup>离子,具有丰富的传输路径和较低的 Zn<sup>2+</sup>迁移能量势垒,这在电解质和电极界面进一步加速了锌离子的迁移。这种内部/表面双加速策略使得 BSSE 提供高离子电导率和 Zn<sup>2+</sup>转移数。Zn//Zn 对称电池和 Zn//MnO<sub>2</sub> 全电池均表现出明显的循环寿命延长。

2) 高性能水凝胶准固态锌离子全电池的设计:兼顾正负极挑战问题,研发了系列凝胶电解质,实现了长寿命、低成本的水系锌离子电池。如在水凝胶电解质基础上提出了多层凝胶电解质的设计,该多层凝胶电解质在靠近正极材料和锌负极侧具有离子和电子双通道快速传导功能,基于此机制,该一体化水系准固态电池实现了超过 4000 次的循环寿命,为商业化应用奠定了基础。

参考文献:

[1] Zhu, Q., Sun, G., Qiao, S., Wang, D., Cui, Z., Zhang, W., & Liu, J.\* *Adv. Mater.* 2024, 36, 2308577.

[2] Zhu, Q., Zhao D., Cheng M., Zhou J., Owusu K., Mai L.\* and Yu Y.\* *Adv. Energy Mater.*, 2019, 9, 1901081.

[3] Wang, D., Zhang, N.\*, Zhang, Y., Chang, L., Tang, H., Zhang, W.\*, and Zhu, Q.\* *Adv. Energy Mater.* 2025, 2404090.

[4] Sun, G., Cui, Z., Zhao, D., Jiao, Z., Li, L., Zhang, Z. Zhang, W.\*, Zhu, Q.\* *Nano Lett.* 2025, DOI: 10.1021/acs.nanolett.5c01076.

[5] Zhao D., Wang X., Zhang W.\*, Zhang Y., Lei Y., Huang X.\*, Zhu, Q.\*, and Liu J.\* *Adv. Funct. Mater.* 2023, 33, 2211412.

[6] Wang, D., Zhao, D., Chang, L., Zhang, Y., Wang, W., Zhang, W.\*, and Zhu, Q.\* *Energy Storage Materials*, 2025, 74, 103903.

A11-17

## 宽温域聚合物基固体电解质及固态电池

李卓\*

武汉科技大学

针对现有动力电池续航里程短、充电速度慢、安全性和环境适应性差等问题,我们创制高性能聚丙烯酸酯基固体电解质,通过高通量计算筛选、聚合物分子结构设计和离子输运机理研究,构建了低势垒的锂离子输运高速通道,创制了高离子电导率的固体电解质和固态锂电池新架构;通过多尺度理论计算、核磁共振同步辐射技术,解析多物理场耦合下电池体系中物质与能量输运规律,发展了聚合物电解质多点协同锂离子传输的新模型;通过原位光谱-电化学检测一体化联用表征技术揭示了材料、电极、界面、电芯不同尺度下的结构演变规律,以及电池中带电界面调控和性能提升规律,实现高比能(400Wh/kg)、宽温域(-40至70°C)、高安全的固态锂电池性能突破。本项工作的实施将为宽温域聚合物基固体电解质和固态电池的创制提供新的理论依据和方法,为电动交通提供先进、高效、安全和环保的能源解决方案。

参考文献:

1. Li Zhuo, et al., *Nature Communications*, 2023, 14, 482

2. Li Zhuo, et al., ACS Nano, 2024, 18, 33418–33429

3. Li Zhuo, et al., Journal of Energy Chemistry, 2024, 96: 456–463

## A11-18

### 固态电池复合固态电解质

贺艳兵\*

清华大学深圳国际研究生院

锂电池电极与液体电解液之间存在严重的热/电化学界面副反应,容易发生热失控导致其安全性显著降低。固态电解质的应用能够显著降低电极/电解质副反应,从而提高锂电池的安全性能,然而高固/固界面阻抗和低离子输运通量阻碍了固态电池的产业化发展。针对上述难题,课题组致力于解决制约固态电池体系反应动力学的“跨界面、跨物相、跨间隙”离子输运科学问题:提出并阐明了原位界面反应固态化机制,构建了离子导电复合界面,实现了固-固原子级界面耦合和跨界面兼容;发明了介电陶瓷材料耦合新方法,揭示了锂盐解离和离子跨物相自发迁移机制,研制出高离子电导率复合固态电解质;提出了正极材料高稳定界面层的低氧化电位构建策略,创制了弹性固-聚-固离子高效跨间隙传递网络,大幅提升了全固态电池的室温长循环性能。籍上述成果提出了可量化的离子输运通量概念,为固态电池研究提供了重要判据。研究成果推动了固态电池产业发展。

## A11-19

### 低杨氏模量氧化物固态电解质及其固态电池

汤卫平\*

上海交通大学

通过热溶剂离子交换法,以  $\text{Na}_3\text{La}(\text{PO}_4)_3$  (NLPO) 为前驱体合成了固态电解质材料  $\text{Li}_3\text{La}(\text{PO}_4)_3$  (LLPO)。LLPO 显示了  $1 \times 10^{-4} \text{ S/cm}$  的高离子电导率。除此以外,LLPO 还显示了 219.1GPa 的低杨氏模量,这个杨氏模量值同硫系固态电解质相当。原位析锂实验显示了在 LLPO 片表面不长锂枝晶,显示了高的对锂稳定性。基于 LLPO 的全固态电池显示了良好的充放电性能。

## A11-20

### 新结构高容量氧化物正极材料

禹习谦\*

中国科学院物理研究所

基于 O3 结构的层状氧化物材料 ( $\text{LiTMO}_2$ ),如钴酸锂和镍钴锰三元正极,由于具有高体积比能量和质量比能量密度的优势,是消费电子和动力锂电池的重要正极材料。然而,这类材料在高脱锂状态下由于缺乏锂离子的电荷屏蔽效应,氧离子之间的相互静电排斥容易引起钴-氧八面体层发生层间滑移,从而使得材料晶粒内发生裂纹产生等机械失效,导致相变不可逆程度增加,显著影响材料的电化学循环稳定性。以上因素是限制 O3 结构层状氧化物正极材料容量提升的瓶颈。本报告将讨论 O2 等非传统 O3 结构层状氧化物正极材料的相变机制以及提升高脱锂态下结构稳定性和可逆性的设计思路,并介绍其高比能电池体系中的应用。

## A11-21

### 聚合物电解质微结构调控与性能优化

尉海军\*

北京工业大学

略

## A11-22

## 硫化物全固态电池

姚霞银\*

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

全固态二次电池是变革性储能技术，引起了工业界和学术界的广泛关注，并进行了持续地投入与开发，预测在 2027 年实现全固态电池小批量生产、2030 年实现全固态电池产品化技术突破，有望引领新一轮的技术变革与产业新生态。然而，实现综合性能全面提升的全固态电池目前仍有许多难题亟待突破，主要包括研制兼具高锂离子电导率、高化学/电化学稳定性的硫化物固体电解质以及高强度、高离子导硫化物固体电解质超薄膜材料，优化硫化物固体电解质与电极之间的界面特性，探索新型正负极材料及其应力/应变与体积效应抑制，发展大容量全固态电池单体技术等等。鉴于此，将从关键材料、界面构筑、电池器件等方面系统介绍基于硫化物固体电解质全固态二次电池的进展，为发展大容量、高安全的全固态二次电池提供思路。

## A11-23

## 本质安全超薄固态电解质膜及固态电池

袁洪\*

北京理工大学

使用固态电解质替换有机液态电解液的固态电池被认为是同时实现高能量密度和高安全性电池的终极解决方案。然而，当前固态电解质膜普遍较厚，难以规模化制备，严重限制了固态电池的能量密度。而且，固态电池的安全性问题仍然存在。因此，实现固态电解质膜的超薄化制备，理解固态电池安全失效的内在本质，对于实现本质安全高比能固态电池至关重要。基于此，我们从电池的安全失效出发，通过对比研究不同电池体系热失控机制，揭示高比能电池体系热安全失效本质，通过优化超薄固态电解质规模化制备技术，探索固态电解质多尺度离子输运过程，并通过进一步固态电解质分子结构设计，探究功能固态电解质阻燃机制，实现了本质安全的固态金属锂电池的构筑。

## A11-24

## 非金属卤化物基固体电解质

殷逸臣<sup>1</sup>、姚宏斌\*<sup>2</sup>

1. 中国矿业大学

2. 中国科学技术大学

卤化物因其易变形、抗氧化能力强以及负一价阴离子静电作用弱的固有属性，非常适合于开发易形变、电化学窗口宽、高离子电导率的新型固体电解质材料<sup>[1]</sup>。作为区别于传统无机氧/硫化物的新型锂离子导体，卤化物基固体电解质在构建高比能、长循环、高安全的全固态锂电池方面具有独特优势。然而，受限于“金属-卤素”基元中易受还原的中心金属元素、以及六配位八面体基元所构筑的密堆积型传导框架，**金属卤化物电解质的电极稳定性和室温离子电导率仍有待提升**。此外，目前金属卤化物电解质的结构基元多采用原子序数大的稀有金属（如 Ta、In 等）作为中心离子，导致**电解质密度大、成本高**，严重制约了卤化物电解质所构建全固态电池的能量密度和经济适用性<sup>[2]</sup>。同时，由“金属-卤素”离子键构建的金属卤化物作为离子晶体仍具有一定硬度，**难以确保低外压下（<5 MPa）全固态电池中良好的固-固接触**。因此，为解决金属元素作为基元中心给现有卤化物电解质带来的上述弊端，需要重新考虑卤化物电解质的组分，探索不同于传统金属卤化物电解质的**新基元中心：非金属元素，构建新型非金属卤化物基固体电解质**。

参考文献：

[1] **Yi-Chen Yin**<sup>†</sup>, Jing-Tian Yang<sup>†</sup>, Jin-Da Luo<sup>†</sup>, Gong-Xun Lu<sup>†</sup>, Zhenyu Li\*, Xinyong Tao\*, Hong-Bin Yao\* et al., *Nature* **2023**, 616, 77-83.

[2] 杨张弛, 姚宏斌, 殷逸臣\*, 罗锦达, *硅酸盐学报* 2025, doi:10.14062/j.issn.0454-5648.20250783.

## A11-25

### 卤化物全固态电池关键材料和技术

王长虹\*

宁波东方理工大学(暂名)

全固态电池因其固有的安全性和高能量密度受到广泛关注。然而,它的发展也面临一些关键挑战,如固态电解质离子电导率不足、界面化学-电化学-机械力学耦合失效、电极及电芯工程化工艺不成熟等。近年来我们专注于全固态电池“材料-界面-器件”多层级离子输运性质研究,取得了系统性研究成果。在材料层级,发展了“氨基辅助”通用水相合成策略,提出了“离子与空位浓度平衡”设计准则,开发出一系列低成本、低模量、高离子电导率的卤化物固态电解质,并实现公斤级合成及销售;在界面层级,利用界面自限制化学,提出界面元素互扩散等精准化界面设计策略,有效解决化学-电化学-力学耦合失效问题。通过“达姆科勒数”界定固-固界面的传质与传荷决速反应,为优化界面动力学提供理论依据,并揭示了固态电池“软短路”失效机制;在器件层面,开发了干法、湿法、转印等固态电极技术,制备出不同规格的固态电极,成功构筑单层及双层固态电解质膜,制备出高比能、长循环、安时级的全固态电芯,达到行业领先水平。这些为卤化物全固态电池技术的发展提供了理论依据和技术支撑。

## A11-26

### 无机新材料的高温高通量筛选及在能源器件中的应用

王成威\*

中国科学技术大学

全固态锂金属电池因其高安全性和高能量密度,被认为是未来最具潜力的储能器件之一。然而,在固态电池中,高性能固态电解质材料的开发和制备,以及电极材料和固态电解质之间的界面等问题是目前制约其走向实用的关键。本报告以超快速高温合成技术为基础,结合理论计算和高级表征技术,研究高性能电解质材料和全固态电池的开发。

陶瓷基固态电解质材料筛选率受到传统陶瓷合成和烧结技术处理时间长的限制,由于挥发性元素的损失,容易导致成分控制不佳。这些问题也给固态电池的制造带来了巨大的挑战。为此,我们开发了一种超快高温烧结(UHS)工艺,该工艺可以在几秒钟内将氧化物前体直接烧结成致密的陶瓷。与传统烧结方法相比,UHS工艺快了100-1000倍以上。因此,我们能够对含有挥发性成分(例如固态电解质中的锂)的陶瓷进行有效的成分控制,并抑制不受控制的晶粒生长,从而实现出色的材料性能。此外,该工艺还可用于制造具有高导电性的SSE膜,并限制材料界面处相互扩散。该技术还可与3D打印兼容,可生产其他快速烧结方法无法实现的新型陶瓷结构和器件。该技术对陶瓷、金属等材料的研发以及固态电池等能源材料的快速筛选和制造起到促进作用。

## A11-27

### 薄膜沉积技术在固态电池中的应用研究

许絮\*

武汉理工大学

固态电池由于其出色的安全性和出色的高能量密度而被广泛认为是发展高性能锂电池的重要途径。然而,固态电池的商业化发展面临着界面不稳定性、枝晶生长等一系列挑战。这些关键问题导致了高界面电阻、显著的极化和潜在的安全风险,进而阻碍其实际应用。目前,引入界面修饰层已被广泛认为是缓解固态电池界面问题的一种有效策略。磁控溅射、原子层沉积、真空热蒸发等薄膜沉积技术可实现薄膜物理化学性质的精准调控,在固态电池表界面工程中极具应用潜力。首先,在固态电池表界面工程方面,利用薄膜沉积技术构筑了一系列锂负极/电解质界面修饰层[1-3],提供快速连续的离子传输路径,从而抑制非均质锂沉积引起的枝晶生长问题,显著提升电池性能。此外,还利用薄膜沉积技术直接制备全固态薄膜电池,

该电池具有优异的界面接触，可在无外界压力下实现长循环性能，在物联网、微电子集成等领域展现了巨大的应用潜力[4]。

- [1] Shen. C, Meng. J, Yan. M, et al., *Adv Funct Materials*. 2024, 34, 2406445.
- [2] Shen. C, Yan. M, Liao. X, et al., *ACS Nano*. 2024, 18, 5068.
- [3] Gong. M, Yu. R, Zhou. C, et al., *ACS Nano*. 2024, 18, 20648.
- [4] Yu. Y, Cao. S, Dong. C, et al., *Adv. Funct. Mater.* 2025. 2423990.

## A11-28

### 固态锂电池电极过程的原位可视化研究

文锐\*

中国科学院化学研究所

电极-电解质界面是充放电反应发生的主要场所，界面反应过程直接影响电池库伦效率、循环寿命等宏观特性。因此深入理解微观尺度复杂电化学界面动态演化过程对于进一步提高电池性能至关重要。本工作利用原位电化学原子力显微术（EC-AFM）、光学显微成像结合原位拉曼光谱，实现了对固态锂电池（SSLBs）电化学反应过程的多尺度、多谱图在线监测和原位分析，解析了电极界面动态演变过程和力学/化学/电化学性质，揭示了复杂体系中电化学界面反应微观机制。利用原位 EC-AFM 结合薄层锂负极设计，在纳米尺度原位监测到锂负极-固态电解质界面金属锂沉积/剥离/再沉积的动态演化过程，解析了沉积锂球表面原位形成的 SEI 网络嵌入式的微观形态和刚柔并济的力学特性。结合原位 XPS 阐明了 SEI 中 Li<sub>2</sub>S/Li<sub>2</sub>O/Li<sub>3</sub>-xP 刚性膜先生成，富 Li<sub>3</sub>P 柔性网络后形成的逐步演化机制。基于此，提出改善锂负极-固态电解质界面反应可逆性的脉冲策略，电池过电位有效降低，循环寿命明显提高。研究成果为理解与优化 SSLBs 界面过程提供了可靠依据，为全固态器件中固-固界面反应机制的研究提供了新思路。

## A11-29

### High-Loading CuS-Based Composite Cathodes for All-Solid-State Batteries

liangliang li<sup>\*1</sup>, Dengfeng Yu<sup>2</sup>

1. Lingnan University

2. Tsinghua University

All-solid-state batteries with sulfide-based electrolytes have recently attracted significant research attention due to the high ionic conductivity and good processibility of sulfide electrolytes. To enhance the electrochemical properties of all-solid-state batteries, such as areal capacity and cycle performance, it is essential to achieve intimate contact between the active materials and the sulfide electrolytes in the cathode while reducing the content of non-active materials, including electronically conductive carbon and the sulfide electrolyte itself. In this work, we prepared a carbon-free composite cathode using copper sulfide (CuS) as the active material and lithium argyrodite as the sulfide electrolyte via ball milling. Owing to the intimate contact between lithium argyrodite and CuS induced by ball milling and the high theoretical specific capacity and relatively large electronic conductivity of CuS, the all-solid-state batteries with a composite cathode containing a CuS loading of 10.2 mg/cm<sup>2</sup> delivered a high initial discharge capacity of 434.3 mAh/g (based on the cathode mass) and a high areal capacity of 5.5 mAh/cm<sup>2</sup> at room temperature. Furthermore, at a higher CuS loading of 20.4 mg/cm<sup>2</sup>, an ultrahigh areal capacity of 12.7 mAh/cm<sup>2</sup> and a calculated specific energy of 955 Wh/kg (based on the cathode mass) were achieved at 60 degrees Celsius. Therefore, the carbon-free, CuS-based composite cathode demonstrates great promise for application in high-energy-density all-solid-state batteries.

#### References:

- D. Yu, L. Li\*, et al., *Nano Energy* 127 (2024) 109767.

## A11-30

## 固态电池界面的电化学-力学失效

熊仕昭\*

昆明理工大学

以固态电解质和锂 (Li) 金属负极为核心组件的固态电池具有高能量密度和高安全性的特点, 具有广阔的应用前景。然而, 固态锂金属电池目前在实际条件下的最大电流密度通常低于  $0.5 \text{ mA cm}^{-2}$ , 远低于交通运输行业动力电池的要求 (高于  $4 \text{ mA cm}^{-2}$ ), 严重阻碍其在高功率场景的应用。固态锂金属电池一旦在高于临界电流密度(CCD)的条件下运行, 将不可避免得引发内部短路和电池失效。研究认为, 这种内部短路是由锂枝晶在固态电解质中的生长和扩展造成的, 这种生长会导致固态电解质力学失效直至连通正负极。理解这一失效机理是开发设计新型材料和界面, 实现固态电池产业化的关键, 然而采用常规实验方法难以获取固态电解质内部的应力、位移和电场。

针对这一问题, 作者研究了固态电解质内部锂细丝生长、界面缺陷和内部缺陷/界面缺陷协同作用对固态电解质电化学-力学失效的影响机制, 取得系列进展。(i) 采用多物理场模拟方法建立了电化学-力学耦合模型, 对固态电解质内部锂细丝生长引起的失效过程进行了系统研究, 通过应力场动态演变、局部位移和相对损伤的可视化, 揭示了裂纹形成及其在固态电解质内扩展过程[1]。(ii) 揭示了金属锂在界面缺陷处沉积引发固态电解质失效的机理。纵横比作为缺陷研究的关键几何参数对电解质失效过程具有显著影响, 在低纵横比为 0.2~0.5 三棱锥界面缺陷附近显示出损伤的分支区域, 可能导致固态电解质的表面粉化, 而当界面缺陷的纵横比超过 3.0 时, 将引发体电解质本体中的损伤累积[2]。(iii) 对比研究了界面缺陷和内部缺陷协同效应对固态电解质的力学失效和金属锂电化学沉积过程的影响, 重点阐述了缺陷尺寸和几何构型对形成协同效应的作用机制[3, 4]。

## 参考文献

[1] Adv. Mater. 2022, 34, 2207232

[2] Adv. Mater. 2023, 2301152

[3] Adv. Energy Mater. 2023, 13, 2203614

[4] ACS Energy Lett. 2025, 10, 195–204

## A11-31

## 锂离子氧化物固态电解质的研究及应用开发进展

周龙捷\*

蓝固(常州)新能源有限公司

近年来, 固态电池的研发和商业化越来越受到各大电芯厂和车企的重视。锂离子氧化物固态电解质成为锂离子固态电池, 包括半固态和全固态电池的核心材料之一。本报告重点介绍蓝固新能源在锂离子氧化物固态电解质方面的研究及应用开发进展。应用方面着重介绍氧化物固态电解质在 NCM, LCO 和 LFP 半固态锂离子电池中的正负极掺混和隔膜涂覆对电芯的低温性能, 倍率性能, 循环性能和安全性能的影响。

## A11-32

## 因果解耦+迁移学习助力高氧化稳定性聚合物电解质的高效筛选

周倩\*

中科院青岛能源所

聚合物电解质的氧化稳定性是限制其在高电压、高比能固态锂电池中应用的关键瓶颈。传统基于实验试错法和经验指导的聚合物电解质设计方法, 存在研发周期长、效率低、难以突破认知局限等问题。近年来, 机器学习技术在材料科学中的成功应用为加速新型功能材料的设计与筛选提供了全新路径。

申请人通过系统的控制变量法与多参数相关性分析发现, 聚合物基体的第一电离能与其氧化稳定性之间存在显著正相关性, 可作为聚合物电解质抗氧化性能评估的有效描述符。然而, 现有数据库中聚合物的

电离能等关键物理参数极为稀缺，且第一性原理计算成本高昂，严重制约了该方向的进一步发展。

为此，申请人构建了一种融合因果解耦建模与迁移学习策略的深度学习预测框架，成功实现了对超过 13,000 种聚合物分子结构的电离能等电子性质的高效、精准预测。基于该模型的预测结果，筛选出多种在氧化稳定性方面显著优于传统聚环氧乙烷（PEO）和聚碳酸丙烯酯（PPC）的新型聚合物电解质体系。

进一步地，选取三种预测性能优异的候选材料开展实验验证。漏电流测试结果显示，含氟聚氨酯类聚合物电解质展现出出色的抗氧化能力，在 4.5 V 高压下，NCM9055 正极/Li 金属电池实现了 200 圈稳定循环，容量保持率良好，表现出良好的实际应用潜力。

本工作首次提出并验证了聚合物电解质氧化稳定性相关的有效描述符，并结合数据驱动的机器学习方法，构建了从分子结构到电化学性能的映射关系，实现了对聚合物电解质材料的大范围快速筛选。该研究不仅为高电压固态锂电池的发展提供了新的材料解决方案，也为聚合物功能材料的智能化设计建立了可推广的研究范式。

鉴于该成果在材料智能设计与能源电化学领域的前沿性和广泛适用性，特此申请在本次中国材料大会中做口头报告，以期与广大同仁深入交流，共同推动 AI+材料的融合发展。

### A11-33

#### PEO 基聚合物固态电解质的性能优化及同步辐射谱学研究

吴淑芬\*

中国科学技术大学国家同步辐射实验室

中国科学院上海高等研究院上海同步辐射光源

新能源汽车和储能市场的发展对锂二次电池的能量密度和安全性提出了更高的要求。固态电池将易燃电解液替换为不挥发的固态电解质，既解决安全性问题，又能匹配高能量密度的金属锂负极。聚环氧乙烷（PEO）基聚合物固态电解质具有低成本、易加工和环境友好等优点，但其仍存在室温离子电导率低、对金属锂负极侧不稳定等问题。

本报告介绍了一种利用香豆素的多功能分子调控策略，可同时提高 PEO 电解质的离子电导率和界面稳定性。香豆素具有较高的  $\text{Li}^+$  吸附能和较强的偶极矩，可作为新型的  $\text{Li}^+$  载体，它与 PEO 的协同传输优化了  $\text{Li}^+$  传输路径，实现了  $1.1 \text{ mS cm}^{-1}$  的高离子电导率。同时，香豆素作为牺牲剂，利用其羰基优先与金属锂发生反应，防止 PEO 和锂盐的分解。此外，香豆素作为原位  $\text{Li}_2\text{O}$  诱导剂，使界面产生丰富的  $\text{Li}_2\text{O}$ ，提高了界面处的离子扩散动力学。多功能分子工程设计使得锂锂对称电池循环超过 5000 h， $\text{LiFePO}_4$  全电池在 0.5 C 下循环 550 次并提供  $161.9 \text{ mAh g}^{-1}$  的高初始放电容量。本工作依托于上海同步辐射光源 BL02B 实验站开展了一系列的谱学研究，揭示了香豆素的独特  $\text{Li}^+$  传导机理并阐明其稳定界面的作用机制。本报告将介绍实验线站的基本情况、在电池催化领域的实验功能、以及原位测试方法学的相关进展。

### A11-34

#### 高性能硫化物基全固态电池进展——固-固界面调控强化固态电池快充性能

崔广磊\*

中国科学院青岛生物能源与过程研究所

### A11-35

#### 金属锂电池材料

陶新永\*

浙江工业大学

### A11-36

#### 固态金属空气电池

徐吉静\*

吉林大学

金属-空气电池拥有 2-10 倍于锂离子电池的能量密度，并可同时拥有可再充电和燃料电池的优点，是应对当前日益严峻的能源和环境问题的优选方案。但目前该电池体系还面临正极反应动力学缓慢、电解液分解、负极锂枝晶等诸多挑战，制约了其实际性能发挥和产业化应用。针对这些问题，本课题组重点开展了以下工作：（1）以提高固态电解质稳定性为导向，研发了基于多孔材料的新型固态电解质，提出“多孔材料基固态电解质”新概念，揭示了锂离子“分子孔道传输”机制，解决了液态金属-空气电池中电解液挥发/分解和固态电池中电解质稳定性差的难题，构筑了高安全、高稳定固态金属-空气电池器件；（2）在国际上率先提出了“外场辅助”提升金属-空气电池反应动力学的新策略，开发了多种“外场辅助”空气正极材料，揭示了外场增强正极反应动力学机制，构筑了高性能外场辅助金属-空气电池器件。

### A11-37

#### 全固态锂电池电化学-力学效应研究

龚正良\*

厦门大学

全固态锂离子电池有望实现更好安全性和更高的能量密度而成为下一代高比能二次电池发展的重要方向。近年来，固体电解质材料的研究取得了重要进展，如硫化物基固体电解质材料的离子电导率可达  $10^{-2} \text{ S cm}^{-1}$ 。高比容量电极材料的应用是提高电池能量密度的关键，然而，高比容量活性材料在电化学循环过程会引发显著体积变化，进而产生电化学-机械力学耦合效应。全固态中电化学反应-体积形变-机械应力的耦合作用对其性能，尤其是循环稳定性，有着非常重要的影响。有效调控电极内部及电极/电解质界面应力/应变，抑制电化学-机械力学效应导致界面应力集中积累并引发多重失效，对于提升电池性能有着非常重要的意义。

本文针对高比容量氧化物正极、硅基负极、以及转换型硫正极在全固态电池中的电化学-机械力学效应问题，开展了材料结构设计及界面应力调控等方面研究工作。制备了单晶富锂锰基层状氧化物（SC-LRMO,  $\text{Li}_{1.2}\text{Ni}_{0.13}\text{Mn}_{0.54}\text{Co}_{0.13}\text{O}_2$ ）作为硫化物基全固态锂电池的正极材料，缓解电池循环过程中电化学-机械力学效应导致材料结构劣化。制备了预锂化硅基复合负极（c-Li<sub>1</sub>Si），补偿电池在循环过程中活性锂的不可逆损失并有效缓解硅基负极由于脱嵌锂导致的严重的体积变化，提升了硅基复合负极电化学性能，实现了电池在低 N/P 比下的稳定循环。在硫正极中复合连续且具有弹性的导电网络调控电极侧的电化学-机械力学效应，通过在氮掺杂碳纳米管（NCNT）上液相包覆改性聚吡咯（PPy），制备出了与硫化物固态电解质化学相容的导电通道 PPy@NCNT，其作为导电添加剂降低了电子传输的曲折度，并有效缓解电池循环过程中产生的局部应力变化。

参考文献

- [1] Yuqi Wu, Cheng Li, Xuefan Zheng, et al., ACS Energy Lett., 2024, 9, 5156-5165.
- [2] Cheng Li, Yuqi Wu, Fucheng Ren, et al., Small, 21(10), 2025, 2411451.
- [3] Li, C.; Lin, Y.; Liu, J.; et al. Advanced Energy Materials 2024, 2400985.

### A11-38

#### 新型铁基卤化物正极材料的研究进展

杨晓飞\*

中国科学院大连化学物理研究所

全固态锂离子电池（ASSLBs）因其高能量密度和增强的安全性，正成为解决能源和环保挑战的有力解决方案。针对氧化物阴极材料中容量低和离子传输缓慢的挑战，我们开发了新型卤化物基正极材料，并引入脱插入-转换耦合机制，实现了多电子转移，使电池容量显著提升至 446mAh/g。我们还将其阴极材料与电解液进行整合，形成了统一的电极结构，从而更清晰地阐明了卤化物基阴极在全固态电池中的电化学反应过程。这项研究阐明了电压和容量调节的机制，并提出了设计、合成和结构性能优化的策略。这些进

展为基于新型卤化物正极材料的全固态电池提供了创新突破，并为高能量密度全固态电池的发展提供了技术支撑。

### A11-39

#### 基于聚合物固态电解质的高安全锂金属电池

赵婕\*

复旦大学

随着全球电动航空、深海潜水器、空间站等高科技领域的快速发展，对高安全性、高能量密度固态电池的迫切需求与日俱增。作为固态电池的核心部件，发展“抑枝晶、稳界面”的固态电解质成为关键。针对现有的固态电解质难以同时满足高机械模量、与电极界面相容性好的要求，对其进行结构设计有利于提升固态电解质的综合性能，具体的讲，开发基于阵列衍生的高强高阻尼仿生固态电解质，可以解决锂枝晶生长和界面相容性差的问题，实现锂金属固态电池安全和电化学性能的提升；进一步设计电解质结构，开发出原位聚合异质电解质，不仅改善了复合固态电解质的室温离子效率，同时稳定了电解质与正负极的界面，拓宽了电压窗口，实现了高电压锂金属固态电池的研发。

### A11-40

#### 基于单离子导电聚合物的固态锂电池

林欣蓉\*

昆山杜克大学

锂金属电池（LMB）因其高能量密度被认为是未来储能领域的重要技术，但其在实际应用中面临固态电解质室温离子电导严重不足的问题。全固态聚合物电解质凭借其轻质、稳定、易加工的特性是实现下一代锂电池性能突破的关键材料，其中，单离子导电聚合物固定阴离子，让离子电导主要由锂离子载流子产生，是突破锂电池中极化现象严重、有效离子电导率低的最重要方向之一。然而，发现单离子导电聚合物面临巨大挑战，由于过强的静电相互作用离子电导反而低于传统双离子导电聚合物。

针对这一挑战，我们发现了交替序列的单离子聚合物电解质（alter-SIPE），通过精确设计聚合物链的序列，调控锂离子在电解质中的分布，使锂离子能够在电解质中均匀分布，避免了锂离子与阴离子的聚集，从而促进了锂离子的迁移和解离。该电解质在 30 °C 下的锂离子电导率达到了  $4.0 \times 10^{-5}$  S/cm，其锂离子迁移数接近 1 ( $t_{Li^+} = 0.93$ )，为室温下 LMB 的稳定循环提供了良好支持。结合分子动力学模拟和密度泛函理论（DFT）计算，发现交替序列的聚合物电解质能够显著提高锂离子的均匀分布性，并通过 PEO 基团的协同作用，促进锂离子的解离和迁移，在 30 °C 下实现了室温固态电池充放电循环。相关的近期研究继续拓展了该体系，揭示了均匀分布的“接触离子”溶剂化结构在聚合物中对离子电导的重要调控作用，从分子设计角度推动固态电池的原始创新，为设计高效固态电解质材料提供了一条新途径。

### A11-41

#### 全固态锂电池力-化学失效机理及调控机制

许荣\*

西安交通大学

使用高比容量电极是提高锂电池能量密度的一个有效途径，然而高比容量电极材料在循环中常伴随较大的体积变化，易引起全固态电池的力-化学失效，影响其稳定性与安全性。为解决这一问题，我们开发了一系列原位表征方法和力-化学耦合模型，揭示了高比容量电极内部电化学响应（扩散、反应等）与力学响应（变形、受力、破坏等）的关联关系，为全固态锂电池力-化学失效的起源及其对电池性能的影响提供了机理解释。进而，针对全固态锂电池电极与电解质变形失配引起的界面失效问题，我们基于力学指导下的材料/结构设计，构筑了新型全固态锂电池，通过调控电极与电解质界面处的蠕变和电化学变形以稳定其界面形貌，使其循环性能得到显著提升。

## A11-42

## 固态电池离子传输的直观表征

柳明\*

清华大学深圳国际研究生院

发展下一代高能量密度及高安全固态电池对新能源存储和电动汽车等国家战略新兴产业的发展具有重要意义。深入理解固态电池内部锂离子传输机制对提升其性能至关重要，然而由于锂属于质轻元素，通过传统成像及光谱表征技术无法直接有效地观测和研究离子运动路径及其输运壁垒，难以建立准确的离子运动模型，严重制约了高性能固态电池及关键材料开发。因此，发展多维度、多尺度离子运动行为的直接观测方法和手段，对揭示固态电池反应机制并设计高性能固态电极、电解质材料具有重要科学意义和实际应用价值。报告将对固态电池离子运动的直观表征和精确定量测量技术进行介绍，首先基于固体核磁共振技术，发展了正极/固态电解质跨界面离子传输的可视化表征方法，定量揭示了大晶粒尺寸及强空间电荷层效应带来的高额外阻抗，通过构筑界面强极性离子掺杂位点，实现了微米级全固态正极/电解质的稳定离子输运；随后提出了有机/无机复合电解质亚纳米尺度界面成分精确测量方法，率先发现了痕量副产物堆积导致的高相界面阻抗，通过增强界面离子解离实现多相离子同步输运，获得了高离子电导率有机/无机复合电解质；最后基于中子剖析等原位表征技术揭示了金属锂区域堆积行为导致的固态电池界面“剥离失效”机制，精确测定了锂离子本征沉积剥离效率，通过构筑高介电涂层实现了锂金属/固态电解质界面均匀的电场分布，集成了稳定的固态锂金属电池。

## A11-43

## 聚合物固态电解质的分子设计

许恒辉\*

华中科技大学

固体聚合物电解质近年来在固态锂金属电池中得到广泛研究，这主要是因为它们具有出色的柔韧性、卓越的加工性能和出色的安全性。然而，要实现固态聚合物电解质优异的离子导电性和机械强度平衡仍然是一个重大挑战。将填料引入聚合物基体可以克服上述障碍，但填料的大比表面积使它们容易团聚，导致在 SPEs 中分散不均匀，中断锂离子迁移的连续性并引起不稳定的填料/聚合物界面。在分子水平直接调控聚合物电解质将有效避免上述问题，同时获得性能优越的固态电池性能。本次报告将介绍调控聚合物电解质的分子设计方法，包括聚合物基体的设计、可溶性添加剂对聚合物基体的分子调控以及电解质系统内的分子相互作用。

## A11-44

## Decoding Chemo-mechanical Failure Mechanisms of Solid-State Lithium Metal Battery via Optical Fiber Sensor

Zheng-Long Xu\*

The Hong Kong Polytechnic University

All solid-state lithium (Li) metal batteries (ASSLBs) using ceramic-polymer hybrid solid electrolytes holds the promise for high-performance energy storage application, but they still suffer from the interfacial deterioration and dendritic Li penetration issues, particularly under low stack pressures. Therefore, understanding and mastering the underlying chemo-mechanical failure mechanisms become essential. Herein, we reveal the chemo-mechanical evolutions by operando monitoring the amplitude and heterogeneity of interfacial stress through an embedded optical fiber sensor. We find that the uneven stripping/deposition of Li metal induces rapid and non-uniform stress growth at the interface, deteriorating interfacial contact with the Li-filament growth. Based on these insights, we replace Li metal with an architectural lithium-tin anode, which we find shows uniform stress and thus improved performance even under low stack pressure. This work not only offers a quantitative way to operando track the uniformity of interfacial stress but also provides critical insights into mastering the

## A11-45

## 功能聚合物在解决固态电池界面问题上的研究进展

连芳\*、杨朝霞、叶宇宁、孟楠

北京科技大学 材料科学与工程学院, 北京, 100083

固态电池发展迅速, 有望解决储能器件高安全性和高能量密度兼容的技术瓶颈。高比容量正极、负极等活性材料在固态电池设计中的应用面临体积膨胀率高、电子/离子导电性差、及其与固态电解质界面相容性差等挑战。聚合物具有高的柔韧性和可加工性, 同时通过官能团、分子间作用力、空间结构等调控可实现大分子的复合功能化设计, 因此在对固态电池的复杂固固界面调控上具有重要的应用前景。

本研究设计开发了具有优异的机械-电化学性能耦合性能的固态聚合物, 保持了多重氢键键合模式, 丰富的醚氧基团为锂离子传输提供了大量活性位点, 通过提升聚合物的机械性能与导电性、构建了机械-电学耦合稳定的固固界面。而且, 针对高镍三元正极材料在高能量密度固态电池设计中的应用问题, 设计聚合物单体浸润 NCM 一次颗粒和团聚体表面, 原位聚合, 分别与 NCM 表面欠配位的 Ni 和晶格氧发生化学键合, 实现了正极材料表面电子态调控。稳定的表面电子态切断了 NCM 发生自发的热/氧释放反应的主要驱动力, 提升了高镍层状氧化物正极材料的本征安全, 促进了高安全性和高能量密度固态电池的开发应用。

## A11-46

## 硫化物固态电解质中局部离子结构的优化

贾政刚、张学习\*

哈尔滨工业大学

针对现有硫化物固态电解质锂离子输运性能较差, 且与商用氧化物正极的相容性差的问题。本文提出了高性能  $80\text{Li}_2\text{S} \cdot 20\text{P}_2\text{S}_5$  固态电解质低温球磨-热压成形-空冷-玻璃化处理合成工艺。通过降低球磨温度抑制球磨过程电解质粉末的晶化和结块, 避免了  $\text{Li}_4\text{P}_2\text{S}_6$  等慢离子导体相的出现, 实现锂离子迁移激活能的下降。之后在退火过程中, 使用热压退火替换退火后冷压的方式, 减少电解质内部的体积缺陷, 改善晶相间的连接; 通过空冷在电解质内部构建适量的点缺陷, 降低  $\text{Li}_3\text{PS}_4$  向  $\text{Li}_7\text{P}_3\text{S}_{11}$  转变的吉布斯自由能; 通过玻璃化处理实现电解质内微裂纹的自愈合, 显著改善离子结构, 最终实现离子输运能力的提高。玻璃化处理中硫化物固态电解质的结构演变研究表明, 玻璃化处理前期, 电解质致密度提高、结晶度增大、主反应为含缺陷的  $\text{PS}_4^{3-}$  离子向  $\text{P}_2\text{S}_7^{4-}$  离子转变; 到 1.5 h 时, 结晶度和  $\text{P}_2\text{S}_7^{4-}$  离子含量达到最大值 (20.3 mol%); 之后主反应变为  $\text{P}_2\text{S}_7^{4-}$  离子的分解, 结晶度和  $\text{P}_2\text{S}_7^{4-}$  离子含量均下降。最终获得的  $80\text{Li}_2\text{S} \cdot 20\text{P}_2\text{S}_5$  电解质在  $30^\circ\text{C}$  下锂离子电导率达  $5.25 \text{ mS cm}^{-1}$ , 临界电流密度超过  $1 \text{ mA cm}^{-2}$ 。

## A11-47

LiCoO<sub>2</sub> 正极的超分辨电子叠层成像孙康<sup>1,2,3</sup>、沙浩治<sup>1,2,3</sup>、崔吉哲<sup>1,2,3</sup>、张景熙<sup>1,2</sup>、刘泽辉<sup>1,2</sup>、董岩皓<sup>1,2</sup>、于荣\*<sup>1,2,3</sup>

1. 清华大学材料学院

2. 清华大学新型陶瓷和精细工艺国家重点实验室

3. 清华大学先进材料教育部重点实验室

锂离子电池正极的未来发展依赖于对结构、缺陷及输运特性的深入理解<sup>[1-3]</sup>, 其中原子尺度显微技术发挥着关键作用。学界公认两大核心要点: (1) 需获得高质量的原子尺度成像并确保数据解读的准确性; (2) 电子束效应会引入分析假象。然而, 氧化物正极中锂原子对电子束辐射的敏感程度仍是悬而未决的问题。

近年来, 超分辨叠层成像作为一种基于扫描透射电镜中像素化探测器数据 (也称 4D-STEM) 的计算成像方法, 不仅具备准三维成像能力, 更在空间分辨率、位置精度和剂量效率等关键性能指标上超越了像

差校正电镜的 HAADF、ABF、iDPC 等传统技术，成为原子分辨结构分析领域的前沿技术<sup>[4-7]</sup>。

本研究选取化学计量比的未脱锂钴酸锂(LiCoO<sub>2</sub>)作为模型体系，通过超分辨叠层成像研究锂原子成像这一关键问题。研究发现，过量电子束辐射会诱发多种阳离子缺陷，包括钴空位及锂钴反位缺陷。在扫描透射电子显微镜表征中，很难同时满足低剂量和轻元素分辨的成像要求。为此，我们采用高剂量效率的叠层衍射成像技术，结合新开发的多 GPU 协同重构算法对样品进行极高空间精度(4 pm)表征分析，成功解决了束敏感材料 LiCoO<sub>2</sub> 的锂原子精确成像的难题。鉴于富镍层状正极与富锂正极（尤其在深度脱锂态）对电子束具有更强的敏感性，本研究呼吁学界重视此类材料的表征挑战。

#### 参考文献

1. K. Kang, Y. S. Meng, J. Br ger, C. P. Grey, G. Ceder. Electrodes with High Power and High Capacity for Rechargeable Lithium Batteries. *Science*, 311, 977 (2006).
2. C. Xu et al. Bulk fatigue induced by surface reconstruction in layered Ni-rich cathodes for Li-ion batteries. *Nature Materials*, 20, 1 (2021).
3. M. Yoon et al. Eutectic salt-assisted planetary centrifugal deagglomeration for single-crystalline cathode synthesis. *Nature Energy*, 8, 5 (2023).
4. J.M. Rodenburg, Ptychography and related diffractive imaging methods. *Advances in imaging and electron physics*, 150, 87 (2008).
5. W.F. Yang, H.Z. Sha, J.Z. Cui, L.Z. Mao, R. Yu. Local-orbital ptychography for ultrahigh-resolution imaging. *Nature Nanotechnology*, 19, 612 (2024).
6. R. Yu, H.Z. Sha, J.Z. Cui, W.F. Yang, Introduction to electron ptychography for materials scientists. *Microstructures*, 4, 2024056 (2024).
7. J. Miao, Computational microscopy with coherent diffractive imaging and ptychography. *Nature*, 637, 281 (2025).

## A11-48

### 富镍 NCM 正极材料电化学-力学耦合失效分析

杨辉\*

华中科技大学

富镍过渡金属层状氧化物（NCM）因其高可逆容量被认为是极具前景的锂离子电池正极材料。然而，在电化学循环过程中，NCM 正极材料面临结构持续快速退化问题，导致电池性能不可避免的衰减，严重制约其大规模实际应用。理解结构退化的内在机理对于成功设计具有显著循环稳定性的 NCM 电极材料至关重要。本研究基于电化学-力学耦合模拟，系统探究了液态与固态电池中 NCM 正极材料在锂化/去锂化循环过程中的相变行为、形貌演变、应力集中及损伤演化等，揭示了其在不同电解质环境下的失效机理。基于对相关失效机理的认识，进一步通过表面改性及结构设计，优化 NCM 正极材料，有效提升了其循环性能。

## A11-49

### All-Solid-State Proton Batteries Capable of Operating Over a Wide Temperature Range

Lifen Long, Shengyang Dong, Huaiyu Shao\*

University of Macau

All-solid-state proton batteries are promising energy storage technologies where a solid-state proton electrolyte plays a crucial role. However, achieving fast proton conduction over a wide temperature range is challenging. Here, a zirconium-based electrolyte, zirconium hydrogen phosphate (ZHP), shows potential. It shows ultra-high ionic conductivity in the range of -40 to 120 °C (with values from 0.15 to 66.76 mS cm<sup>-1</sup>), a wide stability window (~5.5 V), and excellent long-term stability. Batteries with ZHP as electrolyte have a wide operating temperature range of -40 to 120 °C (a total span of 160 °C), excellent 12,000-cycle stability at room

temperature with 92% capacity retention. At -30 °C and 40 °C after 1000 cycles, the retention is 100% and 84.5%, respectively. Moreover, because of its low corrosiveness, low-cost aluminum foils can be used as current collectors instead of titanium foils. This work provides new insights into the design and application of all-solid-state proton batteries over a wide operating temperature range.

### A11-50

#### 烧结与压制工艺对 $\text{Li}_{1.5}\text{Al}_{0.5}\text{Ti}_{1.5}(\text{PO}_4)_3$ 的相形成、微观结构及离子导电性的影响

孙森\*

绵阳师范学院

固态电池是商业电池未来的发展方向，其中具有优异机械、化学及高温稳定性的陶瓷材料备受关注，由于出色的空气稳定性及高离子电导率，NASICON 结构的  $\text{Li}_{1.3}\text{Al}_{0.3}\text{Ti}_{1.7}(\text{PO}_4)_3$  (LATP) 成为研究最为深入的固态电解质类型之一。本文采用预压+冷等静压+高温烧结相结合的固相合成工艺来制备 LATP 固态电解质片，通过 X 射线衍射、拉曼光谱、X 射线光电子能谱、扫描电子显微镜和电化学阻抗谱等表征技术详细探讨致密工艺（预压压力、静压压力、烧结温度、烧结时间等）对 LATP 电解质片的微观结构和离子电导率等的影响。最终，获得了离子电导率值接近  $10^{-3} \text{ S cm}^{-1}$  的 LATP 片。

### A11-51

#### 全固态电池新型锂盐材料

刘凯\*

清华大学

### A11-52

#### 固态电池枝晶和界面研究

黄建宇\*

燕山大学

固态电池的高界面阻抗和枝晶生长是导致其性能衰减和失效的根源。但高界面阻抗和枝晶生长的原因至今不明。本课题组致力于发展先进的电镜表征技术，包括原位电镜和冷冻电镜技术，解析了 Li/PEO 界面结构，发现新型三层 SEI/Li/SEI 结构，Li 在 PEO 电解质里呈团簇状而非液态锂电池的枝晶状。用冷冻电镜成功表征了 Si/LPSC 界面，建立了界面结构与电化学性能的构效关系。解析了 NMC/LPSC 界面，发现界面反应层有大量气孔，过度金属元素脱溶和析氧；揭示了岩盐相具有电化学活性。表征了 Li/LPSC、Li/LGPS 以及 Li/LATP 高温界面结构，揭示其热失效本质。

### A11-53

#### 硫化物基全固态电池关键材料设计与界面研究

吴忠帅\*

中国科学院大连化学物理研究所

全固态锂电池采用无机固态电解质，具有更高的安全性，是下一代储能技术的理想候选者。硫化物固态电解质，由于具有高的室温离子电导率且拥有良好的加工性能，被认为是最具前景的固态电解质体系之一。然而，硫化物固态电解质电化学窗口较窄，特别是氧化电位低 ( $< 2.5 \text{ V}$ )，使得其无法直接匹配传统的层状氧化物正极材料，如  $\text{LiCoO}_2$  和  $\text{LiNi}_{1-x-y}\text{Co}_x\text{Mn}_y\text{O}_2$  等。同时锂枝晶等问题也阻碍了硫化物固态电解质与金属锂负极的直接匹配使用。本报告主要针对电解质/电极界面存在的问题，分别设计了一种氟掺杂硫银锗矿型硫化物固态电解质和三维石墨烯复合的富锂锂锡合金负极材料，并应用于全固态锂电池。本次报告主要包括：1. 发展了一种氟掺杂硫银锗矿型硫化物固态电解质，其具有低成本、高温离子电导率 ( $3.3 \text{ mS cm}^{-1}$ )、较宽的电化学氧化稳定电位 ( $3.5 \text{ V}$ ) 及电极/电解质界面稳定的优点，可应用于商用无包覆

钴酸锂 4.6 V 高压全固态电池；2. 发展了一种由三维石墨烯框架支撑的富锂 Li-Sn 合金负极材料，其具有高比容量（3282 mAh g<sup>-1</sup>）、低工作电位且能明显抑制锂枝晶等优点，可实现全固态锂硫电池的稳定循环。

#### A11-54

### “仿生”柔性复合固态电解质

郑云\*, 张久俊

福州大学

固态锂金属电池由于其高安全性、高能量密度等优势被认为是极具发展前景的关键储能技术。作为固态锂电的核心部件，固态电解质（SSE）的发展受到科研界和工业界的极大关注。开发具有优异锂离子电导率和长期运行稳定性的 SSE 是实现此类电池的关键。与无机固态电解质相比，有机固态电解质由于其柔性好、易加工、与电极间相容性好等优点而备受关注。然而，机械强度差，热稳定性不足，以及室温下离子电导率低等缺点严重限制了有机固态电解质的进一步商业可行性。对此，开发新型复合固态/准固态电解质被认为是有望结合多种材料优势以提高电池安全性和电化学性能的有效策略。

报告人长期致力于柔性固态电解质的构筑及界面行为研究。在本次报告中，主要聚焦于新型复合柔性固态/准固态电解质的开发及其在锂金属电池中的应用研究，具体包括新型复合固态/准固态电解质膜的设计与构建，固态电解质内部界面的精准调控，以及固态电解质与锂金属稳定界面的构建与调控。所提出的一系列柔性固态/准固态电解质为高性能固态锂金属电池的设计提供了有效解决方案，为储能和转换领域的材料和结构发展提供了新的设计思路。

#### A11-55

### 薄层纳米纤维素增韧的阻燃聚合物电解质设计及其宽温域、高比能固态电池的构筑

马越\*

西北工业大学大学

轻薄、强韧、高离子电导率、阻燃的固态电解质制备及其与正负电极界面兼容性是制约高比能全固态电池发展的瓶颈问题。课题组开展基于阻燃、导锂纤维素增韧的薄层聚合物电解质设计及其匹配的全固态锂金属电池的多尺度界面优化工艺：通过调控纳米纤维素构筑单元的物化性质（界面官能团、纠缠构型、厚度），系统研究纤维素网络、聚合物基体、亲锂性添加剂、阻燃分子在纳米纤维网络的键合方式、力学性能、锂离子传输、自熄性的构效关系；建立轻薄通韧型聚合物电解质薄膜的精准构筑策略，进一步按需设计界面功能层来精准匹配高镍正极和薄层锂金属负极；结合时间、能量分辨率可控的原位相变表征技术和多种原位/离位表征方法联用，明晰在宽温域、堆叠应力负载、高倍率循环等服役条件下电芯模型的电极相转变规律及多尺度界面离子传导机制，建立耦合物理场-多组分晶相电芯构型的劣化模型，为高比能固态锂电池走向实用化奠定理论基础。

Ref:

1. Yue Ma\* et.al, Adv. Energy. Mater., 2024, DOI: 10.1002/aenm.202303932.
2. Yue Ma\* et.al, Adv. Mater., 2024, DOI: 10.1002/adma.202408268.
3. Yue Ma\* et.al, Nat. Commun., 2025, DOI: 10.1038/s41467-024-49713-z.
4. Yue Ma\* et.al, Nat. Commun., 2024, DOI: 10.1038/s41467-025-59521-8.
5. Yue Ma\* et.al, Adv. Mater., 2024, DOI: 10.1002/adma.202420255.

#### A11-56

### 人工智能驱动的固态电池材料研究

侯廷政\*

清华大学深圳国际研究生院

发展先进的固态电解质材料有望推动高能量密度、高安全固态锂金属电池的实际应用。传统的无机和聚合物固态电解质存在界面兼容性差、电化学稳定性差和离子导电率低等难以克服的问题。因此，研究多相混合体系和材料界面的离子输运机制对于设计实用化新型固态电解质材料至关重要。通过实验手段对材料进行原位微观表征技术较为困难、成本较高。因此，我们采用先进的人工智能和数据驱动的方法开展系统性离子输运机理和材料筛选设计研究。首先，通过发展固态电解质多尺度模拟和高通量计算方法，揭示了有机无机混合相中“溶剂辅助跳跃”离子输运新机理，提出了构筑和调控局域不饱和金属位点的材料设计新策略。其次，通过发展无机晶体材料界面结构生成和优化方法，实现了任意固态界面低能量稳态结构的高效搜索，为理论研究界面离子输运行为和稳定性提供了重要基础。最近，我们建立了固态电池材料电化学稳定数据库，运用先进的人工智能方法，推动固态电池材料的准确性质预测和新材料结构生成。

## A11-57

### 多尺度界面调控策略驱动高稳定性固态电池的设计与应用

王家钧\*

哈尔滨工业大学

全固态电池因其高安全性和能量密度被视为下一代储能技术的核心方向，但固-固界面动力学失效与电解质高压氧化稳定性不足严重制约其产业化进程。本研究通过多尺度表征与理论计算相结合，系统揭示了锂/钠基固态电池的界面失效机制：针对锂电体系，通过同步辐射 X 射线断层扫描 (TXM) 与分子动力学模拟揭示其抑制富镍正极 ( $\text{LiNi}_{0.8}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.1}\text{O}_2$ ) 界面 Ni 贫乏层形成的机制，开发路易斯酸配位聚环氧乙烷 (PEO) 基固态电解质，引入  $\text{Mg}^{2+}/\text{Al}^{3+}$  与 PEO 醚氧链形成强配位，调控电子密度分布，将电解质抗氧化能力提升至 5.0V，使全固态锂电池在 4.8V 高压下实现 300 次稳定循环，软包电池能量密度突破 586 Wh/kg；针对钠电体系，通过同步加速器 X 射线纳米层析成像技术来探测三维 (3D) 形态的变化，揭示钠空位驱动的亥姆霍兹层溶剂分解是混合电解质失效的主因，通过季戊四醇四丙烯酸酯 (PETEA) 的 O-Na 配位结构抑制界面极化，使固态钠电池在 50C 倍率下循环 50,000 次后容量保持率达 86.3%，界面阻抗降低 62%。本工作为高能量密度固态电池的界面工程提供了普适性设计方案。

## A11-58

### 全固态锂电池力-化学失效机理及调控机制

许荣\*

西安交通大学

使用高比容量电极是提高锂电池能量密度的一个有效途径，然而高比容量电极材料在循环中常伴随较大的体积变化，易引起全固态电池的力-化学失效，影响其稳定性与安全性。为解决这一问题，我们开发了一系列原位表征方法和力-化学耦合模型，揭示了高比容量电极内部电化学反应 (扩散、反应等) 与力学响应 (变形、受力、破坏等) 的关联关系，为全固态锂电池力-化学失效的起源及其对电池性能的影响提供了机理性解释。进而，针对全固态锂电池电极与电解质变形失配引起的界面失效问题，我们基于力学指导下的材料/结构设计，构筑了新型全固态锂电池，通过调控电极与电解质界面处的蠕变和电化学变形以稳定其界面形貌，使其循环性能得到显著提升。

## A11-59

### 硫化物基全固态电池锂金属的体相和界面增强

王儒涛\*、张树贤、熊时健、米超林

山东大学

硫化物基固态锂金属电池被认为是实现更高能量密度和安全性的下一代电池候选者之一，但在锂金属沉积/剥离过程中锂枝晶和界面空洞的形成限制了其应用。我们设计了一种复合锂阳极，通过在锂金属中添加少量的  $\text{Ag}_2\text{O}$ ，可以极大地提高锂的体扩散能力，抑制界面空洞的形成。同时，使用熔融渗透法在硫化物固态电解质表面构建 LiTFSI 涂层，在负极界面处原位形成  $\text{LiF}/\text{Li}_3\text{N}$  的 SEI 层，降低界面极化，使锂离子

子通量均匀化,抑制锂枝晶的生长。通过两种方法的协同作用,实现了在 5C 倍率下稳定循环超过 4000 圈,容量保持率 80%。这些工作为深入认识硫化物基固态锂金属电池金属锂负极界面问题提供了一些可借鉴的思路。

## A11-60

### 硫化物基固态电解质材料制备关键技术及应用

刘芳洋\*

中南大学

全固态锂电池采用固态电解质替代传统液态锂电池中的隔膜与液态电解液组分,因而具有更高的安全性和能量密度优势,被认为是最具潜力的下一代电池体系[1]。基于硫化物固态电解质的高离子电导率和优异机械性能,硫化物全固态电池路线有望率先突破。系统性理解硫化物基固态电解质材料制备关键技术,是推动硫化物全固态电池快速发展的重要基础支撑[2]。首先,通过充分论证硫化锂(Li<sub>2</sub>S)宏量制备技术路线以实现高纯度和低成本优势[3];其次,开发适配性的硫化物固态电解质的微纳化制备技术以适配复合正极和电解质中间层要求;再者,突破可低成本连续化制备硫化物固态电解质膜技术,以加速推进硫化物全固态电池的产业化进程[4]。通过系统化地对硫化物基固态电解质材料制备关键技术进行分析和论述,推动其在固态电池产业链的应用和生产,有望大力推动全固态电池技术在储能、消费电子、交通运输以及特殊工业领域的快速发展。

参考文献:

[1] J. Lau, R. H. DeBlock, D. M. Butts, et al., *Adv. Energy Mater.* 2018, 8(27): 1800933.

[2] Q. Zhang, D. Cao, Y. Ma, et al., *Adv. Mater.* 2019, 31(44): 1901131.

[3] 何特特, 卢洋, 刘洋, 徐斌, 陈永乐, 刘芳洋. 硫化锂: 全固态电池时代的“基石”材料[J]. *储能科学与技术*, 2025, 14(3): 898-912.

[4] S. Jing, K. Wang, S. Li, et al., *Energy Storage Mater.* 2025, 76: 104131.

## A11-61

### 氧化物固态电解质研究进展

章志珍\*

中山大学

随着全球能源结构的转型与碳中和目标的推进,开发兼具高安全、高比能和环境友好特性的储能电池已成为能源技术领域的核心课题。钠离子电池凭借资源储量丰富、成本低廉等优势,日渐成为新一代储能技术的理想候选体系之一。然而,传统钠离子电池采用可燃性有机电解液,存在漏液、燃烧等安全隐患,不利于其实际应用。使用固态电解质取代有机电解液,发展全固态钠离子电池,有望从根本上解决电池安全问题,推动钠离子电池技术的进一步发展。

开发高性能固态电解质是实现固态电池技术的关键。在多种固态电解质体系中,氧化物电解质因具有优异的化学/电化学稳定性而受到研究学者的广泛关注。然而,现有氧化物电解质在室温下通常表现出较低的离子电导率,且难以与电极材料形成紧密的固-固接触,严重制约该材料体系的发展与应用。基于上述背景,本报告将围绕高性能固态电解质材料研发与界面设计展开,系统性介绍一类具有高离子电导率的新型氧化物电解质材料,深入探讨其晶体结构、微观离子输运机制与宏观离子电导率之间的构效关系,并分享电极-电解质界面改性策略最新研究进展,以为全固态钠离子电池的发展提供新见解。

## A11-62

### 锂离子电池在大规模储能中的应用及其安全预警研究

肖鹏\*

国网江苏省电力有限公司电力科学研究院

实现“碳达峰、碳中和”目标,努力构建以新能源为主体的新型电力系统,是党中央、国务院作出的重

大决策部署。当前电化学储能电站主要采用锂离子电池技术，由于其本征安全问题，近年来国内外储能火灾事故时有发生，影响行业平稳健康发展。自 2018 年起，国网江苏电力开始储能系统运行安全研究。通过一系列不同层级电池热失控实体实验，明确热失控触发及蔓延机制，提出了基于特征气体监测的安全预警新策略，研发了气体探测器、集控单元和监控软件，获得了国家输配电安全控制设备检验检测中心认证。2021 年创新结合了声—光—力—气多参量耦合监测技术，进一步提升热失控预警时效性和可靠性。相关研究成果已广泛应用于国网江苏电力在运储能电站，至今保持安全稳定运行记录。

## A11-63

### 原位拉曼技术用于硫化物全固态电池关键问题研究

曹大显\*

华南理工大学

全固态锂电池因其显著提升的安全性与高能量密度成为研究热点，其中硫化物固态电解质因具备媲美液态电解质的优异室温离子电导率，目前已成为该领域的重点研究对象。然而，硫化物基全固态锂电池在实际应用中面临着复杂的机械 - 化学 - 电化学协同失效问题，相关失效机制尚未形成系统性认知。原位表征技术为揭示这类失效机理提供了关键视角，有助于推动全固态锂电池的深度理解与性能优化。其中原位拉曼光谱作为一种实时、无损的动态表征手段，能够有效追踪电池循环过程中材料结构与组分的动态演变规律。团队前期在原位拉曼技术用于解析硫化物基全固态电池关键问题方面有丰富的研究经验，将对系列研究成果进行汇总汇报

## A11-64

### High-Loading CuS-Based Composite Cathodes for All-Solid-State Batteries

liangliang li<sup>\*1</sup>, Dengfeng Yu<sup>2</sup>

1. Lingnan University

2. Tsinghua University

All-solid-state batteries with sulfide-based electrolytes have recently attracted significant research attention due to the high ionic conductivity and good processibility of sulfide electrolytes. To enhance the electrochemical properties of all-solid-state batteries, such as areal capacity and cycle performance, it is essential to achieve intimate contact between the active materials and the sulfide electrolytes in the cathode while reducing the content of non-active materials, including electronically conductive carbon and the sulfide electrolyte itself. In this work, we prepared a carbon-free composite cathode using copper sulfide (CuS) as the active material and lithium argyrodite as the sulfide electrolyte via ball milling. Owing to the intimate contact between lithium argyrodite and CuS induced by ball milling and the high theoretical specific capacity and relatively large electronic conductivity of CuS, the all-solid-state batteries with a composite cathode containing a CuS loading of 10.2 mg/cm<sup>2</sup> delivered a high initial discharge capacity of 434.3 mAh/g (based on the cathode mass) and a high areal capacity of 5.5 mAh/cm<sup>2</sup> at room temperature. Furthermore, at a higher CuS loading of 20.4 mg/cm<sup>2</sup>, an ultrahigh areal capacity of 12.7 mAh/cm<sup>2</sup> and a calculated specific energy of 955 Wh/kg (based on the cathode mass) were achieved at 60 degrees Celsius. Therefore, the carbon-free, CuS-based composite cathode demonstrates great promise for application in high-energy-density all-solid-state batteries.

#### References:

D. Yu, L. Li\*, et al., Nano Energy 127 (2024) 109767.

## A11-65

### 锂钠硫化物固态电解质设计及固态电池研究

谢佳\*

中山大学

全固态电池因其在提高电池安全性和电化学性能方面的潜力而受到极大关注。开发高性能的固体电解质是发展全固态电池的关键之一。源自矿物  $\text{Ag}_8\text{GeS}_6$  的硫银锗矿，支持快速离子传导，可作为开发锂/钠离子导体的模板。本工作重点开展了基于硫银锗矿型的锂/钠快离子态导体的探索并成功合成了一系列高性能硫银锗矿型锂离子固态电解质并开展了固态电池中的应用研究。从硫银锗矿结构出发探索类似结构的钠离子固态电解质，合成虽未获成果，却发现了一类基于十四主族元素 Sn 和 Si 的电解质模板  $\text{Na}_4\text{Sn}_{0.67}\text{Si}_{0.33}\text{S}_4$ ，基于该模板，通过组成优化获得系列新型钠离子固态电解。此外，为解决固/固界面问题，开展了适合原位固态化的聚合物设计和原位固态化方法研究。这些工作都为进一步构建高性能固态电池提供良好的基础和技术支撑。

## 墙报

### A11-P01

#### Multidimensional Signal Evolution and Safety Analysis of Semi-Solid-State Batteries during Overcharging

Yongchao Yu, Lei Li\*

Beijing institute of technology

Semi-solid-state batteries (SSSBs) are considered promising next-generation alternatives to conventional liquid electrolyte lithium-ion batteries. However, their ability to meet emerging safety demands remains uncertain, as recent studies have demonstrated that lithium dendrite nucleation and penetration in solid electrolytes during slight overcharging or rapid charging can cause internal short circuits and battery failure. This study investigates the overcharge behavior and thermal runaway (TR) characteristics of a large-format commercial SSSB (32 Ah). The effects of charge rate and preload force on the evolution of multidimensional signals—including expansion force, temperature, and voltage—are comprehensively and quantitatively analyzed. Our findings reveal that the expansion force is closely associated with gas generation within the cell and exhibits significant variations earlier than temperature and voltage signals. This makes it a more reliable early warning indicator for TR, offering an extended warning period of over 500 seconds before TR onset. While increasing the preload force limits cell expansion and delays venting, it also postpones the onset of abnormal expansion force signals, thereby diminishing the effectiveness of early TR warning. To further evaluate SSSB safety under various overcharge conditions, we develop an improved Criteria Importance Through Intercriteria Correlation (CRITIC)-Entropy combined weighting model, incorporating twelve key parameters from the perspectives of TR risk and severity. The results indicate that SSSBs are more prone to risk and hazards at higher charge rates. Although increasing preload force has limited influence on TR risk, it aggravates the severity of TR events. Finally, a hierarchical early warning strategy based on multidimensional signal fusion is proposed. These findings offer valuable insights into early TR detection and safety management in SSSBs.

### A11-P02

#### Si/P 比值的调控对 $\text{Na}_3\text{Zr}_2\text{Si}_2\text{PO}_{12}$ 固态电解质性能的优化

胡佳雯、丁常胜\*

上海大学

固态钠电池因其高安全性、高能量密度以及低成本等优势，成为了储能领域的研究热点。作为固态电池的核心组成，固态电解质直接影响固态钠电池的整体性能。NASICON 型的  $\text{Na}_3\text{Zr}_2\text{Si}_2\text{PO}_{12}$  (NZSP) 具有宽的电化学稳定性窗口、优异的热稳定性和机械性能，被视为最具应用前景的固态电解质材料之一。然而，较低的室温离子电导率和较高的电极/电解质界面阻抗，严重限制了该材料的实际应用。本研究旨在通过调控硅磷比值来提高 NZSP 电解质的室温离子电导率，采用溶胶-凝胶法制备了一系列的 NASICON 型的  $\text{Na}_{1+x}\text{Zr}_2\text{Si}_x\text{P}_{1-x}\text{O}_{12}$  ( $x = 2.0, 2.1, 2.2, 2.3$ ) 固态电解质，研究了不同的  $\text{Na}^+$  浓度和 Si/P 比值对其形貌、微观结构和电化学性能的影响。研究表明，通过同时调控  $\text{Na}^+$  浓度和 Si/P 比值可以有效地降低固态电解质的

孔隙率, 提高其致密度, 进而提升其室温离子电导率和电化学性能。当  $x = 2.1$  时,  $\text{Na}_{3.1}\text{Zr}_2\text{Si}_{2.1}\text{P}_{0.9}\text{O}_{12}$  表现出最高的室温离子电导率 ( $2.71 \times 10^{-4} \text{ S cm}^{-1}$ ), 其活化能仅为  $0.32 \text{ eV}$ 。与 NZSP 相比, 室温离子电导率提高了约 4 倍。另外,  $\text{Na} \parallel \text{Na}_{3.1}\text{Zr}_2\text{Si}_{2.1}\text{P}_{0.9}\text{O}_{12} \parallel \text{Na}$  对称电池的总阻抗远小于  $\text{Na} \parallel \text{NZSP} \parallel \text{Na}$  对称电池的总阻抗, 且在  $0.05 \text{ mA cm}^{-2}$  电流密度下,  $\text{Na} \parallel \text{Na}_{3.1}\text{Zr}_2\text{Si}_{2.1}\text{P}_{0.9}\text{O}_{12} \parallel \text{Na}$  对称固态电池可以稳定循环超过 400 h, 并且保持较低过电势。该结果表明合理的  $\text{Na}^+$  浓度和 Si/P 比值的调控可以显著地改善  $\text{Na} \parallel \text{NZSP}$  的界面性能, 并且在电池循环的过程中抑制 Na 枝晶的生长, 防止电池发生过早的短路现象。此外, 采用  $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$  (NVP) 作为正极材料, 金属 Na 作为负极材料, 组装了  $\text{NVP} \parallel \text{Na}_{3.1}\text{Zr}_2\text{Si}_{2.1}\text{P}_{0.9}\text{O}_{12} \parallel \text{Na}$  固态全电池, 并研究了其电化学性能。该全固态电池在  $0.05 \text{ C}$  时首次放电容量可达  $101 \text{ mA h g}^{-1}$ , 经倍率循环后容量恢复率为 96.2%。同时, 与  $\text{NVP} \parallel \text{NZSP} \parallel \text{Na}$  全电池相比, 在第一圈的充放电过程中, 全电池的平均过电势由  $244 \text{ mV}$  降低至  $155 \text{ mV}$ 。这些测试结果表明, 微量调控  $\text{Na}^+$  浓度和 Si/P 比值能够有效地提高 NZSP 固态电解质的室温离子电导率, 降低固态电池的界面阻抗, 提高电池的电化学性能。

## 仅发表论文

### A11-PO01

#### Fabrication and Process Optimization of Aluminum-Based Solid Electrolytes with Gradient Phenanthrenequinone (PQ) Regulation

Yuanhang Hou, Huaiyu Shao\*

University of Macau, N23 Avenida da Universidade Taipa, Macau, China

This study successfully fabricated aluminum-based solid electrolyte membranes via a solution casting method, focusing on the effects of gradient additive PQ concentrations on material performance. The experiment utilized a polymer matrix, an aluminum salt source, supplemented with a standard plasticizer and an organic solvent. The preparation involved precise small-scale procedures, including dissolution, ultrasonic dispersion, solution casting, and vacuum drying. All processes were conducted under strictly controlled moisture- and oxygen-free conditions, with high-precision weighing and rigorous protocols to ensure data reliability. By optimizing additive concentrations and process parameters, this work aims to achieve homogeneous and stable solid electrolyte membranes, providing foundational materials and methodological insights for the development of high-energy-density solid-state batteries.

### A11-PO02

#### 适用于高电压长循环全固态电池的先进高熵卤化物固态电解质研究

顾值\*

上海交通大学

稳定的固态电解质对于提升锂电池在高电压应用中的安全性和能量密度至关重要。本研究设计了一种创新的高熵氯化物固态电解质 (HE-5, 化学式为  $\text{Li}_{2.2}\text{In}_{0.2}\text{Sc}_{0.2}\text{r}_{0.2}\text{Hf}_{0.2}\text{Ta}_{0.2}\text{Cl}_{16}$ ), 通过多元素掺杂同时优化离子电导率和高电压稳定性。其高熵无序晶格结构促进了锂离子的迁移, 在  $30^\circ\text{C}$  下实现了  $4.69 \text{ mS/cm}$  的离子电导率和  $0.300 \text{ eV}$  的激活能。将 HE-5 应用于采用 NCM83 正极和 Li-In 负极的全固态电池 (ASSBs) 中, 展现出卓越的电化学性能, 在  $4\text{C}$  速率下循环 1600 次后仍保持 70% 的容量。更重要的是, 高构型熵稳定了该电解质在高电压下的结构, 使其在  $5.0 \text{ V}$  条件下也能稳定运行而无明显降解。本研究展示了高熵工程在提升离子电导率和电压稳定性方面的双重优势, 为下一代高能量密度全固态电池的发展提供了广阔的研究方向。