

韩章阔：刚柔互锁结构的双黏土复合电解质助力高安全锂金属电池【CEJ, 2026】

固态锂金属电池因兼具高能量密度与高安全性的潜力,被认为是下一代储能体系的重要发展方向。然而,现有固态电解质仍难以同时满足高离子电导率、强机械稳定性和快速界面动力学等要求。传统陶瓷电解质虽然模量高、稳定窗口宽,但通常存在脆性大、界面接触差和加工困难等问题;聚合物电解质具有较好的柔性和界面润湿性,却受限于离子电导率低、锂离子迁移数不足以及抑制枝晶能力有限等瓶颈。如何在同一电解质体系中实现“高传导—强支撑—稳界面”的协同统一,是安全锂金属电池发展的关键问题。

黏土矿物具有储量丰富、成本低、热稳定性好以及表面/层间结构可调等优势,为构筑低成本、高安全固态电解质提供了新的材料基础。其中,蒙脱石(Mnt)具有优异的阳离子交换能力和可调层间通道,坡缕石(ATP)具有刚性纤维骨架和高长径比,二者分别适合作为离子传输相和机械增强相。据此,课题组博士研究生韩章阔在刘昊教授和廖立兵教授的指导下,设计了一种具有刚柔互锁结构的双黏土复合固态电解质(DCCSE)。该体系以蒙脱石作为连续 Li^+ 传输通道,以凹凸棒石作为刚性增强骨架,并引入少量 PEO 作为柔性粘结相,构筑了“层状传输相—纤维增强相—柔性粘结相”协同耦合的矿物主导型复合电解质。

本工作采用一步有机—无机协同改性策略,在蒙脱石层间同步实现 Na^+/Li^+ 交换和 DMSO 插层,构建 LiTFSI-DMSO 改性蒙脱石传输通道。DMSO 插层使蒙脱石层间距由 13 Å 增大至 18.5 Å,并在最终电解质中稳定保留;热重结果表明,该电解质无机矿物含量超过 50%,是一种矿物主导型固态电解质体系。研究发现,蒙脱石带负电的层间环境与受限 DMSO 共同作用,不仅能够扩大层间距、降低 Li^+ 迁移势垒,还能限制 TFSI 深度参与 Li^+ 局域配位,从而诱导形成有利于离子传输和界面反应的“类弱溶剂化”传输状态。分子动力学模拟显示,DMSO 改性蒙脱石中 Li^+ 扩散系数较天然水合蒙脱石提升约 5.2 倍,揭示了矿物限域溶剂化调控对离子迁移动力学的促进作用。本研究工作亮点如下:

- 1、提出了一种矿物主导的双黏土复合固态电解质设计策略。区别于传统“聚合物主体+无机填料”的复合电解质思路,该工作充分发挥蒙脱石和凹凸棒石的结构优势,实现离子传输与机械增强的明确功能分工。

2、构筑了刚柔互锁的复合电解质结构。蒙脱石提供连续 Li^+ 传输通道，凹凸棒石形成刚性支撑网络，少量 PEO 实现柔性粘结和成膜，使高矿物含量体系仍能保持良好的力学稳定性和加工性。

3、揭示了矿物限域弱溶剂化调控机制。蒙脱石层间限域环境和 DMSO 协同重构 Li^+ 局域配位结构，降低离子迁移势垒，为高矿物含量固态电解质的快速离子传输提供了新的理论认识。

4、实现了优异的电化学性能和安全性能。DCCSE 在 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 下表现出 $2.1 \times 10^{-4}\text{ S cm}^{-1}$ 的离子电导率、0.64 的 Li^+ 迁移数和 4.5 V 的电化学稳定窗口；Li|Li 对称电池在 0.1 mA cm^{-2} 下稳定循环超过 1700 h，LFP|DCCSE|Li 全电池在 0.5 C 下循环 500 圈后容量保持率达到 94.1%。

这项研究为利用天然黏土矿物构筑低成本、高安全、机制可调控的固态电解质提供了新的设计范式，也为发展高安全锂金属电池提供了有益的材料设计思路。

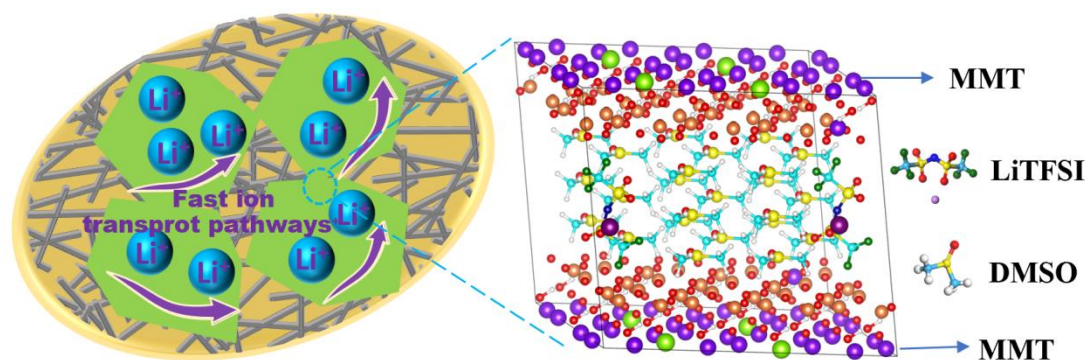


图 1. 图文摘要

上述研究成果发表于材料领域国际权威期刊《Chemical Engineering Journal》上：Zhangkuo Han, Shusen Zhou, Di Jiang, Jiahao Zheng, Huiying Hao, Jie Xing, Jingjing Dong, Hao Liu, Libing Liao. Dual-clay composite electrolyte with rigid-flexible interlocked architecture for safe lithium metal batteries, Chemical Engineering Journal, 2026, DOI: 10.1016/j.cej.2026.178628. [IF2026=12.5]

全文链接：

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894726060894?dgcid=author>