



“电量焦虑”有救了

西湖大学破解电池领域核心难题

通讯员 林辰辰 张弛 赵茗萱

手机、电脑、电动汽车、智能手表、无线耳机……我们身边几乎所有的便携电子设备，都离不开锂离子电池。作为目前最成熟、最高效的可充电电池技术，它从20世纪90年代走向商业化，如今已深入日常生活的方方面面。

那么，一块“好用”的电池应该具备哪些特质？充电快、容量大、轻薄便携？要想有针对性地提升电池性能，我们必须了解电池的内部构造，尤其是那层位于电极表面、至今仍充满谜团的“保护膜”。

北京时间9月10日23时，西湖大学工学院向宇轩课题组与朱一舟课题组合作，在《Nature》杂志上发表了题为 *Probing the Heterogeneous Nature of LiF in Solid-Electrolyte Interphases* 的最新研究成果。他们在二次电池电极-电解质界面研究中取得关键突破：发现电池负极保护膜中的关键物质——氟化锂（LiF），不是“纯”的。

这一发现刷新了人们对电极界面层组成的传统认知，为高性能二次电池中的离子传输机制提供了全新理论依据，也将为新一代电解质和界面材料的设计指明方向。



电池研究中的“圣杯级”难题

锂离子电池主要由三部分构成：正极、负极，以及允许锂离子移动的电解质（通常为电解液）。其中，正负极与电解质之间的界面区域，是各类电化

学反应发生的核心地带。

早在上世纪70至80年代，科学家就发现，电池在充电过程中，电解液会在负极表面发生反应，生成一层极薄

的固态电解质界面（SEI）膜。这层起初被视为“副产品”的薄膜，后来被证实能够有效传导锂离子并抑制电解液分解，因此被认为是电池稳定工作的关键。

尽管大名鼎鼎，这层膜却始终蒙着神秘面纱。

“人人都知道它重要，但它最少被人理解。大家知道它的大致组分（即成分）有什么，但到现在都没有人能说出精确的组成，更不知道微观的结构是什么……”向宇轩解释道。

究其原因，在于这层膜极薄，通常仅几十纳米，相当于头发丝直径的千万分之一，结构复杂且极不稳定。它在空气中易与水分和氧气发生反应，甚至在电子显微镜的电子束照射下就会分解，因此成为电池研究中公认的“圣杯级”难题。

向宇轩团队此次的研究对象，正是这层膜中的关键成分——LiF。

交叉学科带来的创新活力

那么，这种“不纯”的LiF是否正是提升电池性能的关键？

本次论文合作者朱一舟课题组通过第一性原理计算发现，锂离子在含氢环境中的迁移能垒显著降低，说明氢的掺入的确有助于锂离子传输，从而提升电池性能。

团队进一步在不同电解液体系的电池中展开测试，结果一致表明：在高性能电池中，往往伴随更高比例的Li-H-F相存在。尤其是在被视为下一代高能量电池的锂金属体系中，含氢LiF也表现出更优异的电化学性能。

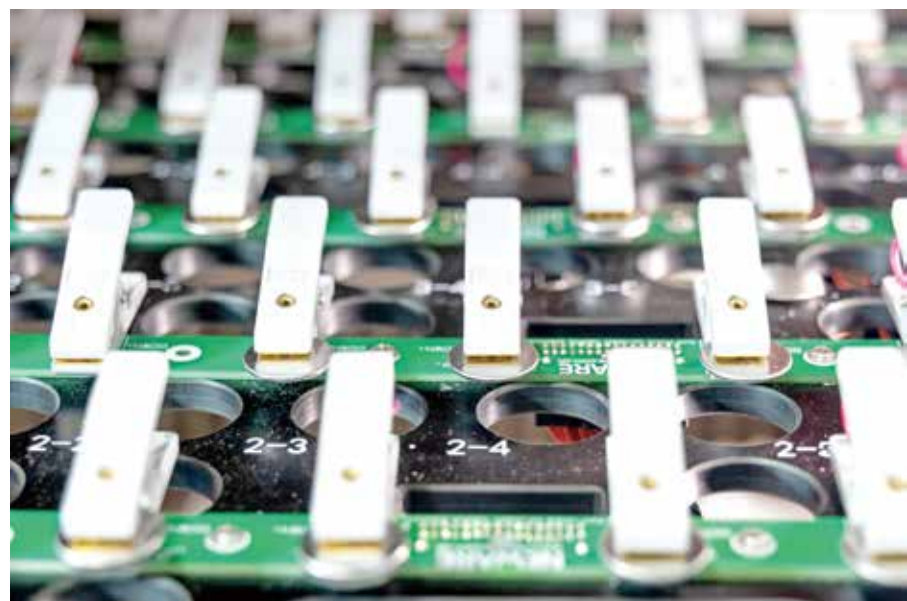
这项研究，为LiF的“导电悖

论”提供了一个全新的科学解释。

一项颠覆性发现，不仅源于科研人员的敏锐与坚持，也离不开学科交叉带来的创新活力。

向宇轩表示，课题曾一度陷入停滞，直到在学术会议上结识了做储氢研究的宋云教授，才得以合成关键样品。“隔行如隔山，她们团队也不知道电池中的LiF会有这样的信号。”在课题早期假设阶段，计算专家朱一舟教授的加入，也为假设建立与验证提供了关键支持。

如今，向宇轩正带领团队继续探索电池更深层的奥秘，有望推动更高性能、更安全的电池的研发与设计。



科学突破从卡顿起步

2022年，刚从厦门大学博士毕业不久的向宇轩，通过了西湖大学的面试，入职西湖大学工学院。他志在搭建一个“能源材料先进表征实验室”，使用包括先进的固体核磁在内的表征技术，理解电池体系里面的复杂问题。

在过去的四十年中，科学家普遍认为LiF对电池性能至关重要，因此含氟化合物被广泛用于商业锂电池，以在电极表面构筑富含LiF的保护层，从而提高电池循环寿命与安全性。然而一个未解的“悖论”始终存在：块状纯净的LiF离子电导率极低，几乎不导电，这与它在电池中所起的积极作用明显矛盾。

许多科学突破，经常从某一时刻的卡顿起步。

在一次实验中，向宇轩注意到电

池中LiF的核磁共振谱图与标准样品存在细微差异——谱线中多出了一处微小“鼓包”。这个在旁人眼中容易被忽略的细节，却引起了他的警觉。

肉眼看，这个奇怪之处近乎微小不可辨，但向宇轩像被闪电击中，他立刻决定：追！于是，团队立即调整研究方向，从原本关注“LiF有多少”，转向追问“LiF到底是什么”。

最终，团队与复旦大学宋云教授合作证实，该未知信号正来源于含氢量较高的Li-H-F相。也就是说，电池负极保护膜中的LiF并非纯净物，而是一种由锂、氟、氢共同构成的固溶体。这一结论也得到了同步辐射X射线衍射（XRD）与冷冻电镜（cryo-EM）的进一步支持。

