
更安全的水系锌电池来了！可实现万次稳定循环

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/40553.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

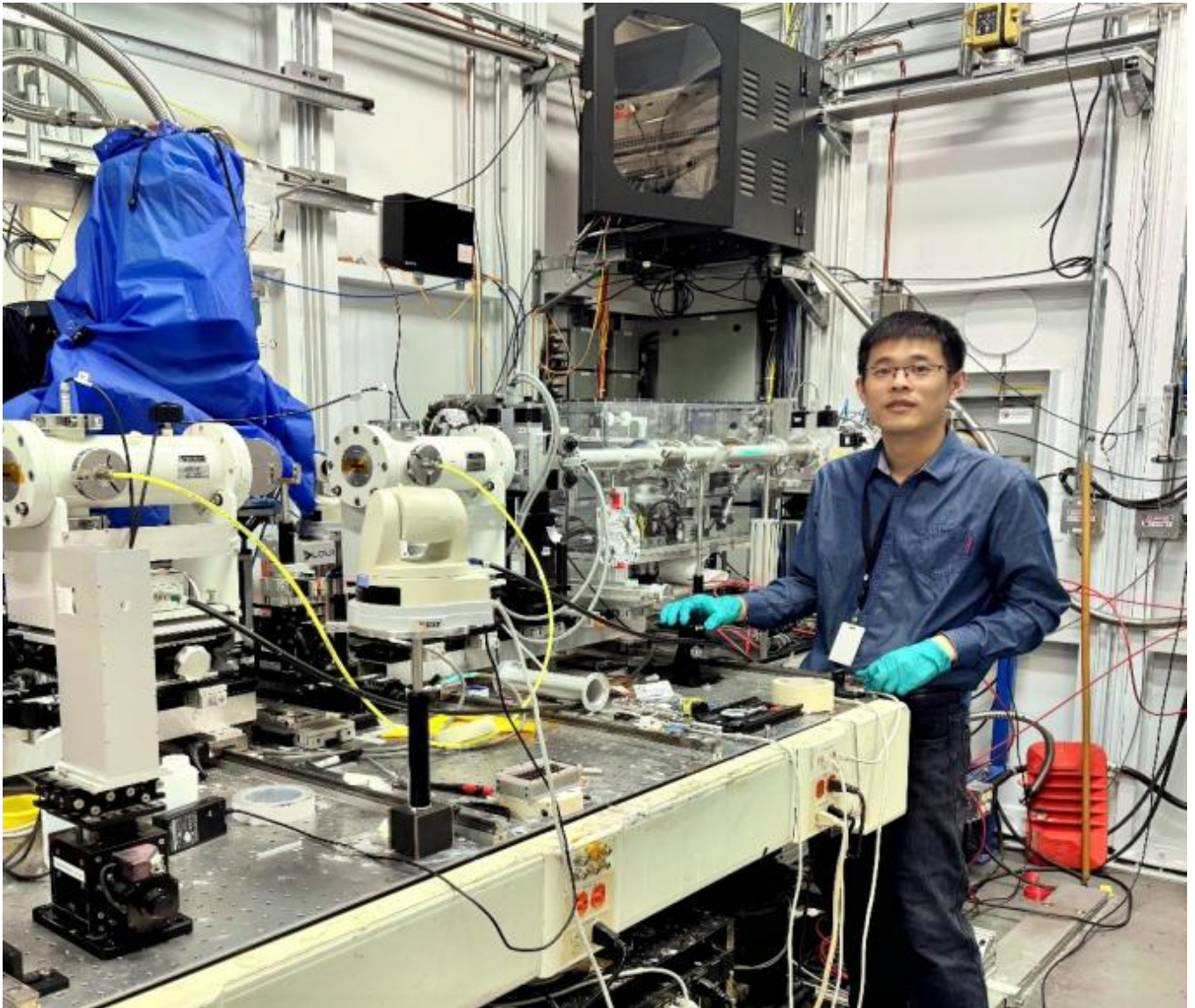
更安全的水系锌电池来了！可实现万次稳定循环。手机使用一段时间后，系统显示的电池健康数值往往会逐步下降，续航变短，最终不得不更换电池。这一日常体验背后，指向的是二次电池长期面临的共性难题——循环寿命有限。如何让电池在反复充放电中保持稳定，也一直是材料科学和能源存储领域的重要攻关方向。

近日，西安电子科技大学机电工程学院系统控制与自动化（SCA）团队与加拿大阿尔伯塔大学相关团队合作，提出了一种数据驱动的多尺度分析方法，并据此筛选和设计出钠—镁—锌三阳离子电解质体系。实验结果显示，该体系可使钒氧化物基水系锌电池实现万次级稳定循环，刷新了同类电池的循环寿命记录。相关成果发表在《先进材料》上。

电池循环寿命不足

当前，消费电子、交通出行和储能产业高度依赖锂离子电池。锂电池能量密度高、产业链成熟，长期占据市场主流地位，但其短板同样不容忽视。一方面，锂资源全球分布不均，开采和提纯成本较高；另一方面，商用锂电池通常采用有机电解液，在外力撞击、异常升温、内部短路等极端情况下，可能引发热失控，带来起火甚至爆炸等安全风险。

相比之下，水系锌电池被认为是极具潜力的下一代储能技术路线之一。其电解液以水为溶剂，不使用易燃有机电解液，安全性更具优势；金属锌资源丰富、成本较低，且锌负极理论比容量较高。本次研究主要负责电池材料制备与电化学验证工作的阿尔伯塔大学化学与材料工程系研究员解雪松介绍，受水分解电压限制，水系锌电池的典型工作电压通常低于锂电池，因此其能量密度目前仍难以与锂电池全面竞争。但凭借成本和安全性优势，水系锌电池在用户侧配套储能、大型电网储能电站等规模化场景中具有广阔应用前景，在对安全性要求较高的特种供电场景中也具备推广潜力。



解雪松在加拿大同步辐射光源CLS线站。受访者供图

不过，前景可观的水系锌电池，长期受制于循环寿命不足等问题。在反复充放电过程中，钒氧化物类正极材料容易发生结构衰退和活性钒组分溶解流失，导致电池容量快速下降，难以满足长期稳定运行需求。通俗地说，这类电池具有安全、低成本等先天优势，却存在反复充放电后容易内伤的问题。如何缓解正极材料衰败、延长电池循环寿命，成为水系锌电池走向实际应用必须破解的关键难题。

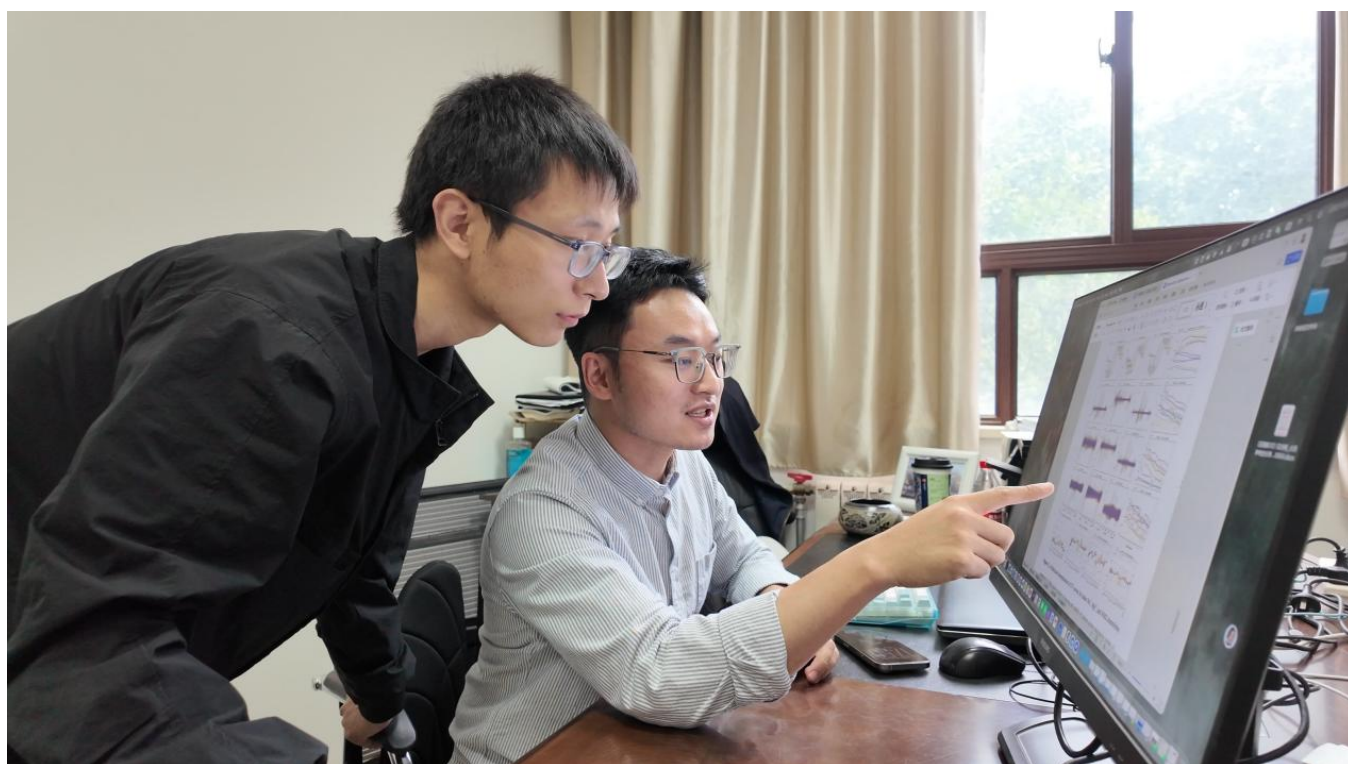
解雪松解释，从宏观结果看，水系锌电池与锂电池的容量衰减具有一定共性：二者在长期反复充放电过程中，都可能伴随电极微观结构受损、活性材料逐渐失效或流失，最终表现为容量下降和寿命缩短。

但二者的衰退诱因和反应路径并不相同。锂电池通常采用有机电解液，性能衰退往往与电极界面膜持续生长、活性锂离子损耗、电极结构退化等因素有关；而水系锌电池以水为电解液介质，虽然安全性更高，却也会引入析氢、副产物生成、质子或水合锌离子异常插入等副反应。对于钒氧化物正极而言，这些过程还可能诱发钒组分溶解和晶体结构失稳，进而加速容量衰减。

我们的思路是在保留水系电解液安全优势的同时，优化其中的阳离子组成和反应路径，尽可能抑制质子、水合锌离子等引发的副反应，从而延缓正极材料衰退。解雪松说。通过调控不同阳离子在充放电过程中的作用顺序，研究团队希望尽可能减少破坏性副反应，延缓电极材料衰败，从而提升水系锌电池的循环寿命。

从凭经验到有依据

在过去很长一段时间里，电解液配方优化主要依赖传统试错模式。科研人员通常根据经验选择不同盐类、添加剂和配比，组装电池后进行性能测试；若效果不理想，再调整组分反复验证。这种研发方式像是在庞大的组合空间中摸索前进，不仅周期长、效率低，而且容易受到经验判断的影响。更重要的是，即便某一配方表现优异，研究人员也未必能够准确判断究竟是哪种离子、哪类相互作用发挥了关键作用。



吕银飞（右一）与团队成员围绕统计指标及其电化学意义开展讨论。受访者供图

为摆脱传统经验试错的局限，研究团队搭建了一套数据驱动的多尺度分析框架，试图将电解液研发从凭经验筛配方推进到有依据地做设计。西安电子科技大学博士生吕银飞主要负责本次研究的数据驱动多尺度分析框架构建，他对这套研究思路作了通俗解释：团队先用密度泛函理论模拟分析不同阳离子与钒氧化物正极的相互作用，再用小波变换对循环伏安测试信号进行多尺度分解，提取稳定性和可逆性特征，最后结合统计指标对不同阳离子及其组合进行量化比较，从而为电解液筛选提供更客观、可解释的依据。

这套方法的意义在于，它在微观离子相互作用和宏观电池性能之间建立了一条可追溯的分析路径。过去，研究人员往往只能从容量保持率、循环曲线等结果判断电池好不好，却难以进一步回答为什么好或为什么衰退。而多尺度分析框架则像一套诊断工具，帮助研究人员从复杂信号中识别稳定性变化的细节，进一步追踪性能提升或衰减背后的可能诱因。

依托这一框架，团队对多种阳离子及其组合进行了筛选和验证，最终确定钠—镁—锌三阳离子共存的电解液体系。在该体系中，钠、镁和锌离子能够在不同电位区间协同参与电化学反应，形成较为有序的梯度离子嵌入过程。

电化学测试进一步验证了这一设计思路。搭载钠—镁—锌三阳离子电解液的锌/钒氧化物电池表现出良好的电化学可逆性和循环稳定性：在0.2安每克电流密度下，电池可稳定循环500圈，累计运行约1400小时；在5安每克高电流密度下，仍可完成10000次充放电循环。这一结果说明，通过合理调控电解液中的离子环境，可以在保持水系电池安全优势的同时，显著改善其长周期运行稳定性，为水系锌电池后续面向规模化储能场景的进一步验证提供实验依据。

团队国内负责人、西安电子科技大学机电工程学院副教授任获荣介绍，研究团队搭建的数据驱动多尺度分析框架，并不只服务于钠—镁—锌这一款电解液，也为水系锌电池乃至更广泛的电池材料研发提供了一种可复用思路。面对数量庞大的潜在电解液组分组合，该框架可先通过计算模拟、信号分解和统计分析完成初步筛选，锁定少数更具潜力的候选体系，再开展有针对性的实验验证，从而减少无效试验，提高材料筛选和配方迭代效率。任获荣表示，相比单一电池材料性能提升，本项研究更重要的意义在于提供了一种方法论参考。

实现研究范式突破

吕银飞坦言，整个研究攻关过程中，最大的难点并不只在某一项技术细节，而在于跨学科方法的真正融合落地。该研究需要同时打通材料化学、计算建模、信号处理和统计分析等不同学科的研究逻辑。

不同学科研究者的语言体系和分析习惯并不相同：材料研究人员通常习惯根据电化学曲线判断电池性能变化；信号处理研究者则需要将循环伏安曲线拆解为不同尺度的小波分量，从中识别趋势项、波动项和异常特征；密度泛函理论计算能够预判离子嵌入的热力学可能性，但电池实际运行还会受到溶剂化结构、界面副反应、材料结构演化等多重因素影响。

项目推进过程中，团队成员不断在讨论中完成相互翻译：既要让数学统计特征对应到具体电化学反应过程，也要让实验现象反过来校准理论模型和数据分析结果。研究团队还结合原位晶体结构表征、X射线吸收谱等手段，对关键机制判断进行验证。跨学科协作不是简单分工，而是不断校准各自的研究逻辑、术语定义和判断标准，最终形成一套可以相互印证的分析体系。吕银飞说。

比技术调试更难的，是研究范式的转变。长期以来，水系锌电池电解液研究很大程度上依赖化学直觉：选择阳离子、调配电解液、组装电池，再通过循环测试判断效果。当团队首次将离散小波变换、稳健统计指标引入电化学曲线分析时，也曾面临质疑：用信号处理方法解析电化学曲线，是否是在把问题复杂化？团队内部也围绕中位数、四分位距、异常波动次数等统计指标是否具有明确电化学意义展开过反复讨论。

面对争议，研究团队选择用实验结果回答问题。依托这套分析框架，团队在约60小时内完成了14种单一或组合阳离子体系的多尺度特征分析和量化比较，随后开展针对性实验验证。结果显示，前期数据分析筛选出的钠—镁—锌三阳离子体系，在实际电池测试中确实表现出更优的循环稳定性和电化学可逆性。可重复、可验证的实验事实，最终成为推动研究范式更新的关键依据。



西安电子科技大学机电工程学院系统控制与自动化（SCA）团队。受访者供图

水系锌电池距离大规模应用还有多远？解雪松表示，这项研究针对钒氧化物正极水系锌电池的循环稳定性瓶颈提出了新的解决思路，并完成了材料体系层面的实验验证。但从实验室成果走向实际产品，仍需跨过多道关口，包括电芯工艺优化、批量制备一致性验证、第三方安全与可靠性测试，以及贴近实际工况的长周期运行评估等。

放眼中长期发展，长寿命、高安全水系锌电池有望在家庭光伏储能、基站备用电源、应急供电、户外便携储能等对安全性和成本较为敏感的场景中发挥作用。若后续工程化和产业链配套逐步成熟，这类电池有望在民用储能和备用供电领域形成差异化竞争优势，并为可再生能源高效利用、安全储能体系建设以及绿色低碳转型提供新的技术选择。（来源：中国科学报 李媛）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1002/adma.202522059>

作者：解雪松等 来源：《先进材料》

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](http://iikx.com)转发