

## 锂硫电池技术实现突破——

# 巧搭“分子积木”，提升低空装备续航能力

### 热点透视 redian toushi

无人机如何飞得更远、续航更久，一直是低空经济发展路上绕不开的难题。飞行器续航能力与动力电池的能量密度紧密相关。如今，传统锂离子电池的能量密度已经接近材料体系本身的极限，要实现进一步突破，存在较大困难。

清华大学深圳国际研究生院副教授周光敏团队提出硫电化学反应分子介体概念，用量子化学结合机器学习的方式研发新型锂硫电池，大幅提升电池续航能力，为破解低空装备续航难题找到了新路径。相关成果近日发表于国际学术期刊《自然》。

#### 充放电流程复杂

锂硫电池自带先天优势，是业内公认最适合长续航飞行器的新一代电池体系之一。

目前市面上主流的锂离子电池，能量密度普遍低于每千克300瓦时，经过多年技术打磨，各项性能已经十分接近材料本身的极限，想要再实现大幅度提升难度极大。而锂硫电池是以金属锂为负极、单质硫为正极的二次电池，依靠独特的反应原理，拥有超高的理论能量密度。此外，锂硫电池的核心原料硫，在自然界储量庞大、价格低廉，既能满足高端无人机、低空飞行设备的轻量化需求，又能有效控制生产成本，发展潜力大。

然而，即便颇有优势，锂硫电池落地也面临巨大挑战。

论文共同第一作者、清华大学深圳国际研究生院博士生高润华介绍，传统锂离子电池的运行原理十分简单，充放电过程只是锂离子在正负极之间来回移动，过程平稳单一。但锂硫电池完全不一样，它的充放电流程十分复杂。

高润华说，锂硫电池放电时，负极金属锂发生氧化反应产生锂离子，正极的单质硫则会一步步发生还原反应，接连生成多种不同的多硫化锂中间体，最后才形成固态硫化锂。这个过程要经历从固态到液态再到固态的多次状态转变。

复杂的反应流程直接催生两大棘手问题。长链结构的多硫化锂极易溶解在电解液当中，在电池内部四处流动，造成电池内部有效原料不断流失，久而久之电池储能能力直线下滑；同时，整套反应流程环节繁多，就像一条站点密集的路线，不少反应步骤进展缓慢，极易出现“卡顿停滞”的情况，这不仅使反应效率大打折扣，还会造成大量电量白白损耗。

在日常实际使用的严苛条件下，电池内部出现的各类问题还会进一步加剧。高润华介绍，锂硫电池的最大弊端不在材料本身，而是整套反应体系都需要统筹调整优化，这也是长久以来行业难以攻克的核心难题。



未来，新型高性能锂硫电池有望应用于无人机、新能源汽车等诸多领域  
视觉中国供图

#### 新方法提升反应效率

面对锂硫电池的落地难题，科研团队从分子层面入手大胆创新，走出了一条智能化研发的新道路。

以往，科研人员大多只是想设法阻挡多硫化物随意流动，但这种做法治标不治本，很难从根源上提升电池反应效率。“这项研究的核心思路，不是简单地‘堵住’多硫化物，也不是只加快某一个反应步骤的速度，而是希望从分子层面主动介入并重塑锂硫电池内部复杂的硫转化路径。”周光敏说。

研究人员首次提出硫电化学反应分子介体理念。可以把分子介体理解为一种在电解液中“待命”的功能分子。它在普通状态下相对稳定，进入硫反应前线后，会被多硫化物原位“唤醒”，转化为真正参与硫转化调控的活性介体。

被激活后，这一活性介体可以发挥双重关键作用：一方面，通过动态分子间配位作用与多硫化物结合形成低溶解度团簇，相当于在正极附近“筑坝修堤”，将多硫化物牢牢束缚在正极一侧，避免其随意流动流失；另一方面，激活更快速的电荷转移通道，相当于为硫转化反应修建“高速公路”，让繁琐的转化流程变得顺畅高效。

那么，如何设计出最合适的分子介体？周光敏打了个比方：“研发合适的功能分子，其实就跟小孩子搭积木是同一个道理。分子骨架就相当于搭建积木用的基础底板，各式各样的官能团就是不同样式的小积木。”以往，科研人员研发新分子，大多依靠自

身多年积累的经验反复尝试更换结构，不仅耗费大量时间和精力，还很难总结出通用的研发规律，研发效率十分低下。为了改变这一状况，团队构建出包含196种不同分子骨架结构的候选分子样库。

“我们借助量子化学技术，精准摸清每一种分子结构本身的特性，再利用机器学习技术，从海量的搭配方案当中梳理总结经验规律，摸索出最优组合方式。”高润华说。

经过层层筛选对比，团队最终锁定4-三氟甲基-2-氯啉啉为最优分子介体。实测数据显示，搭载全新分子介体的锂硫电池，电荷转移阻抗下降75%，内部反应速度实现质的飞跃。在常规快充模式下，电池反复充放电800次之后，依旧能够保留81.7%的储电量。团队研制出的锂硫软包电池，能量密度更是达到每千克549瓦时，远超传统锂离子电池。

#### 规模化量产仍需时日

此次锂硫电池技术的突破，挖掘出高能量密度电池的发展潜力。

当前，低空经济迎来飞速发展期，航拍测绘无人机、城乡物流配送无人机、野外电力巡检飞行器等各类低空设备层出不穷，而这些设备全都依赖轻量化、长续航的动力电池。新型锂硫电池凭借超高能量密度，能够在不增加设备负重的前提下，有效拉长飞行器飞行时长、拓宽飞行范围，还能提升设备承载能力，全方位提升各类低空作业的工作效率。

放眼未来，随着技术不断打磨完善，这款高性能锂硫电池有望逐步推广应用到新能源汽车、户外特种供电设备、大型储能电站等诸

## 81.7%

实测数据显示，在常规快充模式下，搭载全新分子介体的锂硫电池，反复充放电800次之后，依旧能够保留81.7%的储电量。

多领域，全方位助力新能源产业升级。

不过，高润华也表示，目前这项前沿技术依旧处在实验室成果验证阶段，要走进工厂实现规模化量产，正式投入大众市场使用，还有不少亟待攻克的实际难题。

一是生产工艺难以兼容适配。如今锂电池生产行业已经拥有成熟完整的制作流程，而新型锂硫电池的内部结构、制作工序和传统锂电池差异较大，很难直接沿用现有生产线进行批量生产，需要重新研发适配的制作工艺，调整生产流程。

二是电池材料配比上依旧需要持续优化。当前锂硫电池为保障导电性能，会添加大量导电材料，在无形中增加了电池耗材用量，如何精简配料、平衡各项性能，也是后续研发需要重点攻关的方向。

三是电池各项性能仍需全面验证。电池在长期使用过程中的安全稳定、极端高低温环境下的使用性能，都还须经过大量反复测试验证。只有把各项细节问题全部完善到位，才能让新型锂硫电池安全稳定地走向市场。

华凌

### 创新杂谈 chuangxin zatan

半年时间涨价40%、冶炼端产销两旺，近段时间，有色金属火了。锡是半导体先进封装工艺中的关键基础材料，算力越强，芯片堆叠越密集，锡消耗量就越大。人工智能技术奔涌向前，锡也成为抢手的“算力金属”。

再看有色行业，在新兴需求拉动下，镍钴锂等电池材料、铜铝箔、高端铜材及稀有稀土金属材料产量攀升。今年前4月，有色行业利润同比增长117.8%。

曾经被贴上“周期行业”“传统产业”标签的有色金属产业，依托算力等新兴产业浪潮实现产量与效益双增长，智能化、绿色化升级提速。这一产业新业态并非个例，而是新质生产力赋能实体经济的生动缩影。

机器人量产落地拉高特种钢材、基础轴承、通用橡胶部件等传统工业品需求；新能源储能产业蓬勃发展激活了纯碱、电解液溶剂、隔膜基材等传统化工原料市场；低空经济兴起带动铝合金、碳纤维原材、普通线缆等传统材料需求持续走高……当下，随着新技术、新场景、新需求持续渗透，众多看似成熟饱和的传统产业纷纷突破发展瓶颈、摆脱路径依赖，迎来转型升级的全新机遇，为实体经济高质量发展注入源源不断的新动能。

以新需求重构产业价值，激活存量发展潜力。一些传统产业长期面临需求固化、市场单一的困境，容易陷入“周期性波动、同质化内卷”的循环中。算力“飙升”带动有色金属，本质上是新兴赛道开辟出了新的刚需，让传统金属从工业基础原料，变身为数字经济、智能产业的核心材料，实现了自身价值重估。

这启示我们，没有落后的产业，只有未开发的场景；没有过时的产能，只有待激活的价值。传统产业最大的机遇，不在存量博弈，而在增量开拓。要积极对接数字经济、绿色经济，深挖产品跨界适配性、拓宽产业应用边界，让传统产业适配新兴需求，把存量资源转化为发展优势，实现产品价值与市场需求的共振提升。

以新技术筑牢发展底座，增强核心竞争力。科技创新是传统产业转型升级的最大变量，也是提质增效的最优增量。近年来，锡粉、锡膏、锡球领域的中下游企业突破技术壁垒，不断向超微化、高纯化、高精度方向发展，产品附加值不断提升，走出从“论吨卖”到“按颗售”的发展路子。传统产业升级不能仅靠规模扩张或工艺微调的浅层改造，要坚持“向高攀升”，以智能化提效率、以绿色化优结构、以高端化提品质，用技术赋能破除发展桎梏，才能实现“老树发新枝”的蝶变。

以新业态培育增长动能，拓宽产业发展空间。新能源汽车产业突破传统制造业的边界限制，从“造好一辆车”迈向“链就一个生态”；纺织服装产业跳出低端加工的内卷，迭代出功能性面料、智慧纺织、高端定制等新业态；工程机械产业搭建远程运维、智能调度、设备共享服务体系，从单纯“卖产品”变为“卖服务”……诸多案例为传统产业提供了发展路径：通过要素重组、技术渗透与制度协同，促进产业交叉融合，从而形成新业态、新模式，最终推动产业结构优化升级。

顺势者兴，善变者进。新质生产力带来了广阔发展机遇，期待更多传统产业在拥抱变革中激活存量潜力、培育全新优势、焕发增量价值，为做大做强实体经济筑牢坚实基础。

## 中国空间站里，“太空水稻”发芽了

(上接 A1 版)

而在播种环节，微重力环境又带来了一道前所未有的难题。如果直接将种子撒向土壤，不仅无法落地，连土壤颗粒也会随之飞扬，根本无法实现种子与土壤的紧密贴合，从而导致种子无法正常萌发。

为解决这一难题，科研团队经过反复攻关，专门研制了一种“插牌式”固定栽种装置。“这是一个带有小牌子的固定装置，航天员在收获第一代种子后，可以把水稻的小穗用生物胶水贴在插牌上，播种时直接把插牌插进土壤里，高效、可靠地把种子固定在土壤中。”郑慧琼介绍。这些创新成果的取得，离不开中国科学院在空间科学领域前瞻性战略部署与强大的科研平台支撑。

#### “纯新手”与“太空世家”的较量

实验设计上，科研团队首先对实验材料进行了精心筛选，准备了两类特殊的水稻种子。一类是从未离开过地球表面的“纯新手”，另一类则是2022年在空间站收获并带回地面繁育了三代的“太空世家”后代。

科研团队希望通过这种巧妙的对照设置，验证一个大胆的猜想——如果植物拥有某种形式的“记忆”，那么这些祖辈曾经历过太空洗礼的后代，或许会比纯新手拥有更强的环境适应性。

郑慧琼介绍，基于这两类种子，实验设置了4个单元，将两种截然不同的繁殖模式进行了平行对比。第一组为有性繁殖。当第一代水稻成熟后，剪下稻穗，利用特制的插牌装置固定，并放入新的培养单元进行“二次播种”。这相当于让水稻在太空中通过种子繁衍下一代。

第二组则为无性繁殖。借鉴地面农业的再生稻技术，水稻成熟后只需保留根系，利用留存的根茬便可重新萌发，长出新的一茬。“这种方式不需要经历授粉结籽的过程，本质上是同一代植株生命的延续。”郑慧琼解释。

两组实验并行推进，科学家将不仅能观察不同身世背景的种子的表现，还能直观对比在空间环境下，有性繁殖和无性繁殖究竟哪种方式更具优势，从而为未来太空农业的生产模式选择提供最直接的依据。

## 从『算力金属』看传统产业新机遇

刘温馨

## 走路稳 会说话 能绕障

# 机器导盲犬“小苏”来了

苏州市盲聋学校的盲道上，一只四足机器人稳稳地引导着视障人士前行，遇到台阶时及时发出语音提醒，碰到障碍物时迅速绕行，一系列动作流畅自然。这只名为“小苏”的智能机器导盲犬，是哈尔滨工业大学苏州高等研究院（以下简称“哈工大苏州研究院”）科研团队的成果。

近日，20台智能机器导盲犬在苏州市具身智能机器人综合创新中心接受最后调试。这些智能机器导盲犬旨在为视障人群带来全天候、全场景的无障碍出行新方案。



项目团队成员正在调试智能机器导盲犬“小苏” 受访者供图

从实验室的通宵调试到校园里的实地测试，仅用一年时间，智能机器导盲犬就完成了从关键技术攻坚到产业化落地的跨越，推动助残科技走向大众。

#### 实现“硬核”技术国产化

我国视障人群超千万人，而现役导盲犬仅有400余只，供需矛盾突出。传统导盲犬还存在培养周期长、适用场景有限等问题。

瞄准这一民生痛点，哈工大苏州研究院从2025年起启动智能机器导盲犬研发。团

队以具身智能技术为核心，融合四足仿生结构与多模态感知系统，打造出兼具自主导航、障碍规避、语音交互等功能的智能导盲解决方案。

“与传统仿生机器人不同，‘小苏’的核心优势在于能适应复杂地形，无论是台阶、坡道还是拥挤的步行街，它都能精准识别并规划最优路线。这背后是多传感器融合定位、动态障碍实时规避等4项关键技术的突破。”“小苏”智能机器导盲犬项目团队负责人郭帅说。

据笔者了解，“小苏”搭载了国产化混合固态激光测距传感器、高清视觉识别模块和多模态语音交互系统，核心传感器国产化率接近100%。

“我们突破了四足机器人的步态控制算法难题，让‘小苏’的行走稳定性媲美真实导盲犬。同时，我们通过轻量化设计，将整机重量控制在15公斤以内，方便视障人士携带使用。”哈工大苏州研究院自主无人系统及智能装备团队项目经理、小苏机器人技术（苏州）有限公司联合创始人李武浩说。

为了“小苏”更贴合视障人群的使用需求，团队邀请了多名视障人士参与功能优化，根据实际使用反馈迭代升级算法。

“它的精准定位误差小于10厘米，并能区分行人、车辆、台阶等复杂障碍。”郭帅告诉记者，“小苏”已实现智能导航、视觉识别、语音辅助等功能的全流程稳定运行，视障人士经过短期培训即可熟练操作。

#### 提供全链条无障碍出行服务

“小苏”，带我去报告厅。”在苏州市盲聋学校的走廊里，笔者向“小苏”发出语音指令。

“收到，已为您规划路线，前方5米有台阶，请小心。”“小苏”立刻启动导航，缓慢平稳地引导笔者前行，全程避障精准、提示及时。

“小苏”萌萌的语音引来几名盲童，他们围上来好奇地抚摸它。在工作人员的帮助下，孩子们体验了一回智能导盲犬的功能，脸上露出笑容：“以后有它陪着，我们也能自己出门了。”

从实验室的技术原型，到走进校园、商圈的实用产品，“小苏”的场景落地之路越走越宽。

今年1月，南京夫子庙步行街，“小苏”与十余家机器人企业的产品同台展示。在熙熙攘攘的人群中，它带着视障青年平稳穿行，成为现场最受关注的“科技明星”；2月初，苏州东吴天街的机器人年货大集上，“小苏”化身亲民“科技伙伴”，与市民互动体验，让更多人感受到科技助残的温度。

“小苏”可适配校园、商超、社区等封闭和半封闭场景，为视障人群提供“从家门口到目的地”的全链条无障碍出行服务。

“我们在‘小苏’的系统中植入了苏州多个商圈、校园的精准地图，后续还将根据用户需求，逐步完善城市公共场景的地图数据。”李武浩介绍，目前部分“小苏”智能机器导盲犬已在苏州市盲聋学校正式上岗，为在校视障学生提供出行服务。

让助残科技从“用得上”到“用得起”，是团队研发的核心目标。通过核心部件国产化和规模化生产，“小苏”的成本较同类产品大幅降低。未来量产之后，“小苏”价格将进一步下探，为更多视障人群带来便利。

张晔