

“电”死癌细胞？医工“双向奔赴”

■本报记者 赵宇彤

“你这个方法有风险，万一在临床出了岔子怎么办？我们宁可求稳。”安静、有序的会场热闹起来，前一个人话音刚落，反驳声就立刻响起。交锋双方，分别是临床医生和工科领域的科研人员。争论越激烈，坐在前排的吕毅越兴奋。他是本次香山科学会议第 792 次学术讨论会的申请人，西安交通大学第一附属医院院长。

“别打断，听听大家的真实想法。”这一场面他期待已久，“脉冲电场消融是典型的医工交叉技术，只有医学、工科研究者充分探讨，才能实现突破。”

脉冲电场消融是一项基于不可逆电穿孔效应的非热消融技术。其基本原理为通过施加一定强度的高压电脉冲于生物组织，使细胞发生不可逆电穿孔，破坏细胞内环境稳态，从而诱导细胞死亡，最终达到组织消融的目的。

“脉冲电场消融技术已从肿瘤消融的单点突破，迈向多种疾病全面拓展新阶段。”中国科学院院士王秋良表示，亟须探索基础研究和疾病诊断的新方式。

医学技术新赛道

声、光、磁、电，物理世界的自然现象为医学提供了新思路。

“脉冲电场技术的医学应用就是从偶然生理现象发展为跨学科协同创新的过程。”吕毅介绍道，早在 1754 年，法国物理学家 Nollet 就发现，用电火花触碰人类皮肤，就出现红色斑点，猜测电场对人体组织会造成细胞死亡等不可逆损伤。

“幕后黑手”是电场的热效应吗？科学家们各执一词。直到 1967 年，英国科学家 Sale 和 Hamilton 首次发现，原本无法穿过细胞膜的分子，被施加强电脉冲后，能在细胞膜上形成不可逆的纳米级穿孔，造成细胞凋亡和坏死，且全过程不产生显著热效应，最大程度保留细胞外基质结构。这一现象被称为不可逆电穿孔。

在临床研究中，基于不可逆电穿孔原理的脉冲电场消融技术也得到了广泛验证和应用。2010 年以来，已有数百篇研究论文证实，脉冲电场消融技术在前列腺癌、胰腺癌、肝癌、肾癌的临床治疗中安全有效，在心脏疾病方面也展现出巨大潜



脉冲电场肿瘤消融设备。 赵宇彤 / 摄

力。此外，在糖尿病、慢性阻塞性肺病等良性疾病领域，脉冲电场消融技术同样被寄予厚望。

“脉冲电场消融技术具有细胞选择性、电场依赖性、非热损伤性和物理靶向性等特点。”吕毅表示，消融效果与脉冲能量强度直接相关，能针对特定细胞实现精准可控的消融，且不会产生不可逆性热损伤。

2016 年，吕毅团队提出了利用人体自然腔道实施脉冲电场消融的新理念，在消化道等自然腔道内经内镜置入消融电极，精准地将脉冲能量传递到肿瘤病灶部位进行消融，进一步提高治疗的安全性和有效性。2023 年 2 月，该团队成功实施了世界首例内镜下脉冲电场胰腺癌消融手术。手术过程安全可控，术后患者生命体征平稳，患者生存期显著延长。

然而，随着脉冲电场消融在临床应用的深入，新的科学问题陆续涌现。

“脉冲电场消融的生物学效应对于疾病诊疗具有重要意义。随着电子信息、传感和材料技术的发展，脉冲电场的瞬态生物物理效应研究、脉冲电场消融高端医疗设备研制，以及产业与临床的良性互动值得进一步关注。”中国科学院院士郑海荣

总结道。

面对面沟通的平台

除医学科学外，工学是脉冲电场消融技术发展的另一重要支柱。

“生物电磁信号传递着生物体内的多种生理与病理信息，监测分析这些内部电磁过程与生命活动之间的关联，对生命科学研究具有重要意义。”河北工业大学电气工程学院教授徐桂芝介绍，生物电工技术正是基于电工学、生物学、信息学等多学科交叉融合而形成的学科领域，致力于探究生命活动产生的电磁现象与规律，并基于此开发先进的医学诊断和治疗技术。

“目前，脉冲电场消融技术仍缺乏直接、有效的可视化评估手段。”中国科学院深圳先进技术研究院研究员马腾指出，如何实现实时监控能量分布和消融后效果，降低消融操作的不确定性，成为该技术进一步推广应用的关键挑战。

针对该问题，马腾团队提出“多模成像引导腔内脉冲电场消融”的技术方案，研发了集成超声、相干断层造影术（OCT）及荧光内窥的多模态成像—治疗一体化导管系统，为脉冲电场消融技术在更多临床应用场景中的应用奠定基础。

北京航空航天大学大学生物与医学工程学院教授常凌乾针对传统电穿孔技术递送效率低、细胞存活率差的问题，研发了系列基于纳米电穿孔技术的生物芯片，利用纳米孔结构实现电场聚焦，在低电压下将分子递送的跨膜速度提升了近万倍，细胞存活率高于 95%，且能实现器官靶向和高通量筛选。目前，该技术已在国内 10 余家三甲医院完成 300 多例临床试验。

看着一项项科研成果从实验室走进临床，台下的临床医生们频频点头。

“学医的不懂工程，学工的不懂医学，如何推动这项技术真正落地应用呢？”听着双方热火朝天的讨论，吕毅满脸笑容，“这正是我们所需要的让各学科专家面对面沟通的平台。”

共同面对“头号敌人”

复发、转移，是每一个临床医生的“头号敌人”。

“当前脉冲电场消融技术虽然微创、便捷，但仍存在高复发、转移的难题。”中山大学附属第一医院超声医学科副主任医师陈淑玲指出，短期内，不可逆电穿孔诱导的免疫反应能有效抑制肿瘤的再生和转移，但 14 天后，效应逐渐减弱，2 至 18 个月内的复发率能达到 24.14%。

华中科技大学基础医学院教授赵俊也提出了类似问题。“不可逆电穿孔的消融效果与脉冲电场强度相关，而肿瘤内部，脉冲电场分布并不均匀。”赵俊发现，当脉冲电场强度低于杀伤阈值时，肿瘤细胞可能“潜逃”，这也是术后肿瘤复发的重要因素。

他们共同提到脉冲电场消融联合免疫治疗的重要性。“脉冲电场消融与抗 PD-1 免疫疗法结合，能促进 CD8⁺T 细胞浸润和长期免疫记忆的形成，有效抑制肿瘤消融后的复发和转移。”

在心电生理领域，基于多年一线临床经验，华中科技大学同济医学院附属同济医院心血管内科副主任王炎指出，脉冲电场消融技术的应用目前存在突出问题：一是缺乏统一的标准化参数，导致不同消融设备之间的效果难以评估；二是在临床应用中心，医生为追求更高效的治疗效果，擅自调高参数，导致实际临床应用中的并发症发生率显著高于临床试验阶段。

对此，上海市医疗器械检验研究院副所长洪伟回应称，以心脏脉冲电场消融设备为例，由于其能量机制和临床应用特征的独特性，不同厂商的设备及配套导管电极之间存在差异，因此各项能量参数需经过严格验证和效果评估。

“根据国家药监局医疗器械评审中心要求，此类产品需经过四类实验，全面评估其对人体安全性与有效性。”洪伟希望，基于以上研究，为医疗设备制造商提供几种“处方式”设定，尽可能保障标准化、安全应用。

“从科研到临床再到监管，脉冲电场消融技术的发展需要全链条协同推动。”吕毅在接受《中国科学报》采访时表示，目前我国在该领域整体上处于“并跑”阶段，并在若干方向上加速突破。他指出：“唯有各领域、各学科敞开心怀，深化合作，才能推动我国脉冲电场消融技术实现全面进步。”

集装箱

面向低轨卫星的多天线数字波束合成技术完成可行性验证

本报讯（记者朱汉斌）近日，鹏城实验室联合哈尔滨工业大学（深圳）卫星通信研究团队在面向低轨卫星的多天线数字波束合成技术关键外场实验中取得突破性进展。经过数十轨次的反复测试，研究人员验证了多天线数字波束收发合成技术在高动态低轨卫星星地通信场景下的技术可行性。

当前，我国正大力推进低轨卫星通信星座的部署，迫切需要新理论和新技术，突破传统低轨卫星通信系统能力瓶颈——既要满足未来大规模低轨卫星星座场景下同时跟踪多星的需求，又要在保证通信质量的同时尽可能降低成本。

为此，研究人员提出通过部署多个小口径天线并在数字域进行波束合成，从而实现等效大口径天线的方案。该方案在提高通信可靠性的同时，兼具成本低、部署灵活等优势。在技术攻关过程中，他们通过反复的理论计算和

模拟测试，成功解决了星地高动态、远距离通信过程中高精度通道一致性问题，并提出了多波束相差和幅度差动态补偿方法。

该方法通过对多天线波束信号的时间、相位与幅度的精确控制，确保了基带收发多通道数字信号的方向一致性，并有效消除了由系统引入的相位偏差及其他误差对波束方向造成的影响。此外，针对低轨卫星高速运动的特性，研究人员提出一种融合卫星星历和高精度角度估计算法的卫星跟踪算法，利用卫星运动方程及实时测角信息，实现了对低轨卫星优于 0.1 度高精度跟踪。

鹏城实验室相关负责人表示，多天线数字波束合成技术的成功应用，能够为未来大规模卫星组网和高可靠卫星通信提供关键技术支撑，同时也为当前中国算力网的建设、运营、服务提供稳定、可靠的网络连接，助力未来 6G 空天地一体化泛在连接愿景的实现。

“五官健康 C909 飞机医院”在新疆开诊

本报讯（见习记者江庆龄）9 月 5 日，由复旦大学附属耳鼻喉科医院联合中国商用飞机有限责任公司精心打造的特殊飞机——“五官健康 C909 飞机医院”稳稳降落在新疆石河子花园机场。这架飞机搭载了由我国自主研发的具有国际先进水平的诊疗设备，是一个集移动诊室、综合检查、培训实操、5G 远程会诊等功能于一体的空中移动医疗平台。

医疗飞机的舱体被划分为登记咨询区、眼科诊室、耳鼻喉科诊室、患者候诊区、眼耳鼻喉科检查区、5G 远程会诊区、实操培训区七大功能区，实现机上“筛查—诊疗—康复—会诊—培训”全链条一站式服务。同时，飞机舱内配备光学相干断层扫描仪（OCT）、眼前节分析仪、电脑验光及眼轴

测量仪等 10 余类眼科和耳鼻喉科诊疗设备。这些设备均由复旦大学附属眼耳鼻喉科医院自主或合作研发。

9 月 5 日到 7 日，有 49 名当地患者通过“五官健康 C909 飞机医院”体验了一站式诊疗。值得一提的是，其中一位眼内镜术后患者，由复旦大学附属眼耳鼻喉科医院院长周行涛通过国产 5G 裂隙灯，远程连线 4000 多公里外上海的主刀医生进行复查，首次实现飞机医院沪疆两地跨区域会诊及实时术后监测复查。

其间，复旦大学附属眼耳鼻喉科医院还首次通过飞机医院的形式开展防盲及眼健康专科能力培训、防聋及耳与听力健康专科能力培训。此外，医院 20 余位专家联动当地医院和学校开展眼健康、耳与听力健康公益服务。

多维攻坚，为固态电池产业化按下“加速键”

■本报记者 廖洋 通讯员 夏雪

新能源汽车产业一路风驰电掣，以锐不可当之势重塑出版版图。然而，电池热失控事故却似高悬的“达摩克利斯之剑”。2024 年的行业数据敲响警钟——我国新能源汽车起火案例中，80%是电池热失控“兴风作浪”。

与此同时，消费者深陷续航焦虑与充电困境的泥沼。而“高能量密度与安全性难以兼得”这一技术魔咒，更是将行业技术迭代困于瓶颈。将于 2026 年 7 月 1 日正式实施的《电动汽车用动力蓄电池安全要求》提出，热失控后 2 小时不起火、不爆炸。这恰似一场倒计时的安全大考，让技术升级迫在眉睫。

凭借高能量密度与安全性的卓越优势，固态电池脱颖而出，行业巨头纷纷将其定为下一代核心技术，计划 2027 年前后量产。但全固态电池界面稳定性差、电解质薄层化难等，成为阻碍量产的“拦路虎”。

近日，中国科学院青岛生物能源与过程研究所（以下简称青岛能源所）研究员、固态能源系统技术中心主任崔光磊团队传来好消息，研究团队在固态电池正极、负极、电解质三大核心材料领域接连取得突破性进展，不仅为深空、深海等极端场景提供可靠解决方案，更为民用动力电池打通安全与续航的“任督二脉”。

团队提出的“刚柔并济”“均质化正极”等设计理念，正精准破解这些瓶颈。从为深潜器提供保障的聚合物固态电池到反哺民用市场的技术方案，团队用“极端场景技术反推民用创新”的路径，为固态电池产业化按下“加速键”。

正极“均质化”革命：零应变、“零添加剂”

长期以来，商用正极活性材料电导率低的问题，一直是制约电池性能的“卡脖子”问题。传统方案不得不添加非活性导电离子剂，但这种“补丁式”设计却陷入两难：添加剂虽提升了导电性，却与充放电时体积变化显著的层状氧化物正极“水火不容”，加剧了“电—化—力”耦合副反应，最终导致电池能量



密度与循环寿命都打折扣。这种异质复合结构，成了全固态锂电池性能跃升的“阿喀琉斯之踵”。

“如果能研制出兼具优异离子、电子混合导电性的正极材料，彻底摆脱对导电添加剂的依赖，就能一举攻克这个行业痛点。”在青岛能源所的内部研讨会上，崔光磊提出的这一构想迅速点燃团队的攻关热情。

经过团队充分论证，“均质化正极”被确定为核心技术突破口。团队对数十种候选材料展开系统性筛选与改良，最终成功合成零应变正极材料锂钛磷锆硫。该材料在保持 250 毫安时 / 克高比容量的同时，体积变化率仅 1.2%；采用它制成的均质化正极使全固态锂电池在室温下实现超万次稳定循环，能量密度达 390 瓦时 / 千克，成为固态电池发展的重要里程碑。

团队骨干、青岛能源所鞠江伟博士介绍：“这种新设计彻底颠覆了传统设计逻辑，实现能量密度与循环寿命的‘双赢’，其稳定性已完全满足电动汽车、大规模储能的严苛要求。”



① 崔光磊在做实验。

② 崔光磊（中）和团队成员在实验室。

③ 正在进行干房涂布的科研人员和超薄硫化物固态电解质膜。 受访者供图

实验还证实，这种新型正极在长期循环中未出现性能衰减，更重要的是，该技术路线对固态钠电池等其他储能体系同样具有普适性。

目前，团队正加速推进材料放大制备。崔光磊信心十足：“这项技术有望冲破储能领域多年的‘能量—功率—寿命’的不可能三角。”

相关成果已发表于《自然—能源》，不仅为下一代电池技术开辟新路径，更彰显了中国科研团队在关键材料领域的原始创新能力。

电解质膜攻坚：从“散沙难聚”到“刚柔并济”

全固态电池要实现“充电一次跑千里”，还有一个关键是要让电解质膜“瘦身”——膜越薄，电池储能越多。但核心材料硫化物敏感难用：颗粒极散沙难粘成膜，怕水怕氧，尤其对极性溶剂和部分粘结剂敏感，制备 30 微米以下超薄膜难度极高。湿法涂布时，硫化物的敏感性让材料选择处处受限；无溶剂干法虽环保省钱，却使

用聚四氟乙烯作粘结剂——既要精准控制剪切力使其成纤维，又要经过精密的多级连辊减薄，成膜强度差，还容易被还原。

“要是能结合聚合物的柔性和硫化物的高导电性，做出又柔又韧、离子跑得还快的薄膜，问题不就解决了？”崔光磊的这一想法，再次为团队指明了方向。

经过数百次实验，团队确定“刚柔并济—三相渗流”的解决方案，分别突破干法与湿法的材料、技术瓶颈。

干法上，团队摒弃传统聚四氟乙烯，改用热塑性聚酰胺作“柔性胶水”，将其与硫化物颗粒提前混合，在 140℃ 下轻轻压制，聚酰胺便像溶化的糖一样，渗透硫化物颗粒的缝隙中，冷却后结成“弹性网”。最终制成的膜厚度控制在 25 微米以内，既柔又韧不易破，室温下离子电导率还高。用同步辐射 X 光“透视”电池内部，即便充放电时电极像“呼吸”般膨胀收缩，电解质膜也能牢牢贴合。团队将这种正极与超薄膜组装成一体化电池，高负载场景下甚至能稳定工

作 1 万小时，能量密度显著提升。

湿法工艺的瓶颈也被团队突破。过去因硫化物怕极性溶剂，湿法只能用非极性粘结剂，既粘不牢又限制性能。团队通过调控浆料中的分子相互作用，让原本“水火不容”的极性粘结剂与较低极性溶剂“和平共处”，最薄可制成 12 微米的薄膜。更关键的是，锂盐还能与极性聚合物结合，进一步提升离子传导效率，面电阻低至 0.69 欧姆·平方厘米，性能优于所有文献报道。

“三相渗流”不是单条路发力，而是让硫化物、聚合物、界面相协同帮离子传输，提高了传输的速度和通量。”团队骨干、青岛能源所胡磊博士解释道。

为适配量产，团队还开发了热转印工艺，将电解质膜快速贴合到电极上，大幅降低工业化难度。

“我们一直干法、湿法两条路并行，干法是未来趋势，湿法目前更成熟。”团队骨干、青岛能源所研究员董杉木补充道。

如今，这些成果已发表于《先进材料》《德国应用化学》等国际期刊。值得一提的是，更切实的进展在产业化端：青岛市城阳区的硫化物全固态电池洁净车间正在建设，预计 2027 年实现年产 200 万平方米的 30 微米级硫化物薄膜生产。这意味着，消费者用上长续航、高安全固态电池的日子已不再遥远。

负极“以柔克刚”：蠕变局域化

提升固态电池能量密度，高容量负极是重要方向。但科研界长期面临一个棘手问题：已知的高容量负极材料，循环时体积会像气球充气般剧烈变化，充入的锂越多，体积膨胀越明显。而固态电解质硬度高，无法像电解液那样“随形贴合”，一旦正负极与电解质分离，锂离子便“无路可走”，电池随之快速衰减，性能迟落后于预期。固态电池一般需施加几十甚至上百兆帕的压力，这相当于给书包大小的电池施加几辆 10 吨级卡车的重量，显然无法满足实际应用需求。

围绕这一方向，团队结合理论计算与实验验证，发现部分电学性能

优异的合金材料虽“刚性强、难屈服”，却能通过“蠕变”与固态电解质紧密贴合。其中，铜锡钨合金表现突出，在室温下有超高蠕变能力。团队成员、青岛能源所刘涛博士发现该易蠕变的合金会随循环从负极表面沿封装边缘缓慢“爬行”，最终触及正极，导致电池短路。

“蠕变是把双刃剑：既能‘以柔克刚’贴合电解质，也可能‘越界’引发短路。我们要做的，就是给它套上‘剑鞘’，让蠕变可控。”关键时刻，崔光磊给出了判断。

攻关组借鉴此前聚合物电解质的“刚柔并济”理念，提出将高蠕变性的合金负载在高刚性矩的钛网上，利用钛网的弯曲刚度分散并均匀化负极内部应力，把合金的蠕变行为“锁定”在与固态电解质接触的界面处。

这一设计成效显著，使用该负极，低电压下固态电池可稳定循环超 3000 次；即便容量提升至商业化标准 5 倍的 20 毫安时 / 平方厘米，电池仍能稳定充放电。相关成果已发表于《先进材料》，为高能量密度固态电池提供了全新技术路径。

多维度突破 夯实产业化根基

从电解质膜“瘦身”突破硫化物成膜难题，到正极材料摆脱导电添加剂依赖，实现“零应变”超万次循环，再到负极“蠕变局域化”破解界面接触困境，崔光磊团队以“全链条创新”思路，系统性解决了硫化物固态电池商业化的核心痛点。

当前，这些突破不仅停留在实验室原始创新层次，更通过青岛城阳硫化物全固态产线的建设，更好支撑全固态电池的产业化进程。

对于新能源产业而言，这一系列技术不仅意味着更安全、更长续航的动力电池将加速落地，更将为大规模储能、特种装备等领域提供“中国方案”。

“我们希望将‘刚柔并济’‘均质化’‘蠕变局域化’等创新理念持续转化为生产力，进一步提升中国在全球固态电池技术竞争中的话语权，为‘双碳’目标下的能源转型注入更强劲能。”崔光磊说。