

# 当口腔大夫遇到材料科学家，伤口愈合加快了

■本报见习记者 江庆龄

诊室里，复旦大学附属口腔医院主任医师韦晓玲正对着患者资料沉思。

“口腔环境潮湿，还经常从外界‘带来’细菌，伤口很容易就会感染发炎。发炎的时候，就像手机没信号，修复伤口的细胞都找不到该去哪儿。”她想到，“如果能开发一种既满足口腔环境苛刻需求，又能为伤口添加‘信号标记’的材料，是否就能消除传统治疗的弊端？”

同一时间，复旦大学生物医学工程与技术学院副院长张荣君正在椭圆偏振光谱仪前开展光电薄膜实验。他正在寻找光电材料更多的应用场景，让实验室多年积累的成果服务于国民生活。

不久后，两人在复旦大学医工交叉平台相遇，并分享了各自寻找的材料，当即一拍即合，展开合作。

4年后，一种基于双步光诱导构建的“内源性电场治疗”口腔黏膜伤口水凝胶敷料在实验室诞生。这款特殊材料不仅简化了水凝胶敷料制备流程，还可以通过日常咀嚼在伤口界面产生“微电场”，有效消除炎症，促进细胞的增殖和迁移，显著加快伤口的愈合。近日，这项医工交叉研究成果发表于《光：科学与应用》。

## “粘得住”和“治得好”

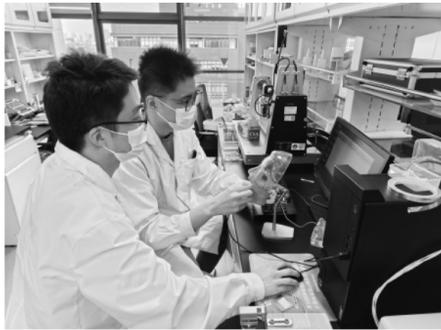
已有研究表明，人体伤口周围会自然产生微弱电流，像GPS（全球定位系统）信号般引导细胞迁移，促进伤口修复。

在口腔中也不例外。口腔黏膜伤口的愈合过程受到界面微电场调控，依赖于其引导下的细胞迁移和增殖。但伤口的炎症等并发症就像一块绝缘体，硬生生切断了这关键的“导航系统”，导致伤口久治不愈。

“内源性电场治疗”策略应运而生——通过引入具备光电、压电或热电特性的纳米发电材料，与伤口敷料复合，在伤口局部自发产生微电场，从而纠正因炎症等导致的电场紊乱，同时避免药物引发的不良反应，加速组织修复。

双方团队经过大量调研，发现基于压电材料构建复合水凝胶是在口腔中实现“粘得住”和“治得好”的最佳途径。

“顾名思义，压电材料就是通过施加压力产生电场的材料。在口腔中，不断的咀嚼运动给压电材料提供了绝佳的施展空间。”张荣君



研究人员利用口腔模型测试复合水凝胶的压电性能。受访者供图

解释，“水凝胶则具有良好的生物相容性与可调控性能。”

然而，压电材料和水凝胶分别属于无机纳米发电材料和有机聚合物，两者界面不兼容、不同成分合成条件不一致，须分别改性后再组装，增加了工艺复杂度与能耗。

“要构建这样的复合水凝胶，就像是盖一座摩天大楼，打钢筋、配混凝土、垒砖等步骤要逐步进行，否则会互相影响，导致整个时间线因为某一步流程而延长。”张荣君解释。

结合在多年科研工作中形成的直觉，张荣君很快找到了一个突破口——通过材料结构设计实现复合水凝胶敷料的“集成构建”。

说干就干。张荣君和论文第一作者、复旦大学电子信息专业博士研究生方绍钧对大量压电材料构建复合水凝胶的研究进行了调研分析。

有一天，师徒二人正像往常一样讨论通往“集成构建”的可能通道时，不经意间望向实验室一隅，墙上贴满了课题组过去的工作成果。突然，他们想到，如果对光电和压电双特性的材料进行改性处理，充分调动材料的多维性能，既通过“光电”催化功能组分的合成，又凭借“压电”促进口腔伤口的愈合，岂不是同时实现了简便的材料制备和高效的疾病治疗？

## “用光当3D打印机”

“传统水凝胶敷料合成如同组乐高，先

造好各个零件再拼接，有的‘零件’还需要紫外催化、烘干等一系列烦琐的操作。我们要挑战的是‘用光当3D打印机’，让材料在水凝胶中自动成型。”张荣君说道。

团队首先锁定了多功能无机材料氧化锌，由其承担“治病大夫”和“组装”水凝胶功能组分的双重功能。方绍钧介绍，氧化锌属于宽带隙半导体，既是极为经典的压电材料之一，也是紫外光电探测领域的“常客”，同时被广泛应用于化妆品、牙科治疗中。

盐酸多巴胺则成为被“组装”的功能单元，聚合后形成的聚多巴胺是出色的涂层和生物黏附材料。“盐酸多巴胺是传统合成中的‘X因素’。”方绍钧补充道，“而传统合成

中的碱性、紫外辐照以及对应的离心、干燥过程都是实现‘集成构建’的关键阻力。”

找准了“元件”，下一步就是“组装”了。通过“光”构建的设想非常新颖，但如何“对症下药”，真正实现既满足口腔使用环境的实际需求，又有效提升构建的简便性呢？

研究团队以材料内部的氧空位缺陷为切入点。张荣君解释说，这些微米乃至亚微米级别的空位，就像一个台阶，让内部的电子能够更轻易“往上爬”，从而获得活性。氧空位同时能够吸附水和氧气，使氧气与活性电子反应形成活性氧。“活性氧像一只无形的大手，把周围的盐酸多巴胺‘抓住’，再‘糕合’成氧化锌表面一层薄薄的聚多巴胺。”张荣君说道。

值得一提的是，氧化锌和聚多巴胺界面之间能够形成一条电子“通道”，让光产生的电子源源不断地继续催化水凝胶中盐酸多巴胺的聚合。由此，仅需在室温下简单静置，水凝胶内部的聚多巴胺即可自发均匀形成，实现了复合水凝胶的“集成构建”，解决了传统合成“分步构建-混合”带来的冗长实验流程和能源消耗问题。

张荣君打了个比方：“就像晒日光浴会让皮肤变黑，光照则让材料自动完成了内部3D打印一般的魔法变身。”

团队将这一特殊的水凝胶命名为PP-PZ。实验测试结果证实，制备得到的水凝胶

体现了出色的湿黏附性、柔韧性以及自修复性，能够满足口腔内复杂使用环境带来的严苛要求。

## 找到“愈合的秘密”

在参与这项研究的过程中，方绍钧经历了研究方向的转变。从信息技术到医工交叉，不仅是知识库的更新，更是科研习惯的转变，方绍钧坦言：“经历了无数次尝试和失败。”“让他坚持下去的，除了“这是一项有趣的研究”，还在于团队之间的通力合作。

依托复旦大学医工交叉的科研平台，张荣君团队和韦晓玲团队将光学工程、材料科学、电子信息与生物医学工程有机融合。

“不同研究方向之间会有千丝万缕的联系，我在思考问题时也会有多维度的思考方式和解决思路。”方绍钧说道。

当张荣君和方绍钧在实验室中顺利制备得到水凝胶，验证了“用光”构建的可行性后，验证“电”带来的治疗效果是否符合预期的体内实验很快进行。

团队以大鼠颊黏膜全层缺损模型为研究对象，设置了不同氧化锌浓度的组别进行实验。团队每天都去实验室检查大鼠口腔中的伤口，并发现用1%PPPZ处理的伤口组织重塑良好，PPPZ是当之无愧的“好大夫”。

“愈合的秘密自然藏在分子层面。”韦晓玲介绍，PPPZ通过激活PI3K/AKT（磷脂酰肌醇-3-激酶/蛋白激酶B）通路促进细胞增殖与血管生成，即敷料产生的微电场激活了细胞内的PI3K/AKT信号通路，并上调了CD31等血管生成因子的表达。

“我们把PPPZ提高修复效率的机制形容为细胞对讲机，就像给细胞群发了加班费，大家干活特别卖力。”张荣君笑道。

张荣君同时指出，此项研究融合了材料合成与生物医学应用，以简洁策略实现高性能水凝胶构建，为后续相关研究与临床转化提供了全新思路。

“未来，我们将进一步立足临床需求，深化多学科融合，提出原创性解决方案，推动医工协同的高质量发展，力求实现成果的产业化落地与临床广泛应用。”张荣君说。

相关论文信息：  
<https://doi.org/10.1038/s41377-025-01837-7>

## 按图索技

# 国内最高！微波通信码速率提升75%

本报讯(记者高雅丽)5月26日，记者从中国科学院空天信息创新研究院(以下简称空天院)获悉，空天院科研团队开展了面向新一代高阶高通量星地数传系统的高阶体制高码率星地通信地面技术实验。通过在地面模拟卫星数传发射，该实验成功实现了X频段单通道最高每秒2100兆比特的高通量数据通信，将微波通信码速率提升了75%，为当前国内最高的X频段单通道星地通信码速率。

由于国内民用卫星的星地数据传输主要采用X频段，现有的单通道码速率并不能满足海量空间探测数据下传需求，严重影响卫星利用效能。

针对上述问题，中国遥感卫星地面站西南丽江卫星数据接收站联合北京融为科技

有限公司提出了微波技术下的高阶体制高码率数据传输方案，能够在最大限度复用现有地面资源设备，不过多增加系统硬件复杂度的情况下，通过调制解调器等地面系统关键设备的技术能力升级，实现星地数据传输码速率的大幅提升。

本次实验先后完成了桌面联调、有线联调和无线对接共三个阶段的实验内容。实验项目负责人、空天院高级工程师张雨濛介绍，三个阶段的实验结果表明，利用地面系统现有信道设备配合新研制的高阶体制调制解调器，在128QAM(正交振幅调制)高阶体制下，可实现X频段2100兆比特单通道码速率通信，星座图无明显畸变，误码率可归零，充分验证了高阶体制高码率数据传输的技术可行性。



高阶体制调制解调器。空天院供图

本次实验突破了相位噪声补偿、非线性校正、信道均衡等一系列关键技术，首次将深度神经网络模型引入卫星数据接收调制解调器

核心算法，利用人工智能技术为星地数据传输赋能，为解决我国星地通信问题提供了新的高性价比的技术解决方案。

## 第784次香山科学会议在北京召开，专家热议——

# 人工智能加持，低空经济往何处“飞”？

■本报见习记者 赵宇彤 实习生 赵婉婷

“低空”是国家领土、领海、领空资源的重要组成部分，也是一个典型的复杂巨系统，由飞行器基础设施、人类参与者、环境因素多种组件动态、低空空域环境组成。人工智能技术的引入，为解决低空复杂巨系统问题、进一步开发利用低空资源、发展低空经济提供了全新的思路与方法。

近日，以“低空人工智能核心技术及其应用”为主题的第784次香山科学会议在北京召开。相关专家围绕低空资源开发利用、低空经济风险与挑战、低空人工智能核心技术，以及应用场景与飞行器的人工智能技术等前沿话题展开研讨。

## 一道亮丽风景

低空系统同时具有三维立体性与区域性，是主权国家和地区拥有的自然资源。将低空人工智能产业作为新质生产力发展，将更好地服务经济和民生，带来巨大的经济和社会效益。

“我国低空经济与人工智能技术相结合，可服务于物流运输、智慧城市与基础设施管理、农业与生态环境保护、公共安全与应急救援、城市空中交通管理和优化、国家安全能力建设等重大需求。”原国务院应急管理专家组组长闪淳昌介绍。

谈及发展低空经济的重要性，闪淳昌将低空经济比作灾难现场应急救援的“天兵天将”、安全巡检的“千里眼”、极端场景的“顺风耳”。无人驾驶航空器(无人机)作为低空经济

的重要组成部分，也是低空“千里眼”和“顺风耳”的核心载体之一。

发展低空产业对飞行器提出了更高要求。“一定要摒弃传统思维，把低空智能飞行器作为航空工业的‘新引擎’类大力发展。”本次会议申请人、中关村大成智慧创新联盟研究员白一帆表示。

根据国务院发展研究中心预测，到2035年，低空经济对国内生产总值(GDP)的贡献度将达到3%至5%。在未来经济形态中，低空经济将是一道亮丽风景。

多位与会专家认为，除了技术突破与场景创新，低空经济的健康、有序发展也需要以更明确和统一的标准为前提，更完善的政策体系为保障。此外，低空产业发展在高等教育中的人才储备工作也急需关注和规划。

## 如何“除害兴利”

低空经济与百姓民生直接相关。具体而言，发展低空经济的着眼点有哪些？白一帆表示：“我国人口基数大、分布广，风险防范要求高。低空产业发展中，低空安全飞行和防灾减灾航空应急救援是优先级最高的。”

然而，这些应用场景面临着一些挑战。安全是低空经济的生命线。中国科学院、清华大学公共安全学院院长范维澄在报告中指出：“低空经济面临一系列公共安全挑战，无人机黑飞、扰航、坠机等安全事故时有发生，低空安全风险已成为我国发展低空经济面临的核心挑战。”他提到，低空安全作为新兴的公

共安全组成部分，目前还缺少系统性研究。

北京师范大学地理学教授史培军从中国自然灾害的背景出发，介绍了自然灾害风险评估与低空经济相融合的应用场景，具体的产业包括利用救援无人机运送救援物资；利用抢险无人机在极端环境下打通道路、恢复电网，实现水上搜救等；利用探测无人机获取并传回灾区影像，支持应急指挥决策。此外，他指出，在灾害应对与风险评估的过程中，要做到空防与地防结合，实现“天地协同”，才能“除害兴利”。

“利用低空人工智能技术研究灾害规律，对灾害进行监测、分析、建模，深入了解灾害的发生和发展规律，建立‘灾害-技术-经济’协同演化框架，是发展韧性经济和灾害风险转化经济的重要途径。”白一帆说。

除了面向国家重大需求，低空飞行器也可助力旅游观光，如提供低空游览服务和物资运输。

## 人工智能赋能

从技术层面来说，低空经济发展面临的难题包括环境感知能力不足、空域冲突与调度复杂、多机协同与自主控制、数据处理与决策实时性要求更高等。

在北京航空航天大学教授韩力群看来，通过人工智能赋能低空经济，这些问题有望解决。韩力群介绍：“无人交通管理系统通过算法可实时监测空域容量的突变，从而迅速引导流量，避免拥堵。”她举例，杭州亚运会期间，边

缘计算驱动的实时决策技术成功避免了17起潜在拥堵事件。

低空航空器坠毁、颠簸、偏航等典型事例频发，安全飞行亟待低空气象保障。中国气象科学研究院研究员郭建平提出，可以利用星地协同观测、人工智能赋能预警技术、飞行姿态数据纳入、共建和共享监测网，来应对航空天气。

人工智能在促进低空经济发展方面有巨大影响。除了提升数据处理与分析能力、优化低空任务设计与执行方式、实现实时化数据处理等，清华大学人工智能研究院常务副院长孙茂松表示，在AIGC(生成式人工智能)加持下，低空系统将具备更强大的环境理解和自主决策能力。

孙茂松举例，航天气感知和自主决策“蝗虫”避障算法的应用，可以使低空飞行器具备更高级的智能化决策能力。

此外，人工智能在低空经济的应用中也存在待突破的瓶颈。韩力群指出，首先，需创新算法以确保多元数据的精准融合；其次，边缘计算节点面临功耗超标的挑战，需优化能耗控制策略以降低成本；最后，人机混合智能系统中，应考虑明确伦理边界，特别是在反无人机应用中需防范误拦截风险。

为进一步将低空经济与智能制造深度融合，多位与会专家表示，应设立中央低空经济领导小组，下设国家级研究机构。白一帆在主题报告报告中建议：“未来需组建国家低空系统工程院，以‘总院-分院-实验室’三级体系构建完整和可持续发展的低空人工智能技术体系与产业生态。”

## 集装箱

### 星载实时操作系统标准获审查通过

本报讯(记者孙丹丹)近日，宇航团体标准项目《基于开源鸿蒙轻量系统的星载实时操作系统通用要求》《基于开源鸿蒙轻量系统的星载实时操作系统开发实践》获中国宇航学会标准化分会审查通过。该标准由大连理工大学教授于晓洲领衔的微小卫星与深空探测团队牵头起草，中国科学院微小卫星技术创新研究院等单位的团队参与撰写。

该标准提出了适用于微小卫星的开源鸿蒙(OpenHarmony)轻量系统星载实时操作系统，解释了各类术语定义，明确了其源码获取、移植和裁剪的全流程操作规范，为星载实时操作系统开发提供了实践引导，为微小卫星操作系统确立了统一标准。

微小卫星的星载计算机系统复杂，但受平台规模限制，无法使用常规的操作系统。于晓洲团队在“大连1号-连理卫星”上首次成功应用基于国产芯片的高可靠性开源鸿蒙实时操作系统。该卫星在释放入轨后成功验证了实时操作系统、绿色无毒硝酸羟胺推进系统等创新技术，并按计划拍摄了大量分辨率优于1米的遥感图像。

目前，已经有多项微小卫星任务采用了基于开源鸿蒙轻量系统的星载实时操作系统，包括星空间卫星、“金紫荆”系列卫星、爱太空科学号、航升卫星、中国科学院微小卫星技术创新研究院“电磁双星”等。该操作系统在航天器上的应用丰富了其使用场景，促进了开源鸿蒙社区的繁荣，实现了开源鸿蒙的“上天入地”。

## 校企携手联合成立 “AI+ 高等教育研究院”

本报讯(记者王敏 通讯员田超)近日，安徽师范大学、科大讯飞股份有限公司、安徽信息工程学院签署战略合作协议，围绕人工智能(AI)与教育教学深度融合、AI+ 科研创新、未来人才培养、高校数字化转型等核心议题达成重要共识，并宣布联合成立“AI+ 高等教育研究院”。

根据合作协议，三方将以产业需求为导向，通过资源整合、场景共建和协同创新，将教育资源、技术平台与真实行业场景有机结合，构建“产学研用”一体化生态，促进“人才链、创新链、学科链、产业链”深度融合，构建教育服务产业、产业反哺教育的良性循环生态，完成人才培养、技术创新与产业升级协同发展，真正实现产教融合。

此次三方合作的另一大亮点在于以资源互补打造产学研深度融合新模式。安徽师范大学牵头教育理论研究与课程设计，提供教学资源与师范人才储备，重点在“AI+ 科学研究”“AI+ 教育教学”方面打造示范标杆，培养服务区域经济社会发展的高质量人才。安徽信息工程学院聚焦应用型定位，提供AI算力基础设施和智慧教育应用场景，建设智慧教育示范基地，探索可复制的产教融合路径。科大讯飞股份有限公司以技术和数据资源赋能全链条，推动AI教育产品标准化应用，为全国高校提供技术与事例参考。

## 高温辐射制冷涂层技术在100兆瓦塔式熔盐光伏电站获应用

本报讯(记者叶满山)日前，由中国科学院兰州化学物理研究所(以下简称兰州化物所)与东方电气集团东方锅炉股份有限公司联合研发的高温辐射制冷涂层技术在三峡能源青豫直二期100兆瓦塔式熔盐光伏电站获应用。

近年来，兰州化物所资源化学与能源材料研究中心研究员高祥虎团队致力于塔式光热发电光学材料与关键技术研发。前期研发的纳米高焓太阳能吸收涂层和辐射制冷反射涂层材料与关键技术已在敦煌100兆瓦、阿克塞110兆瓦、瓜州全球首座2x50兆瓦双塔一机等国内10余座光热电站成功应用，使用业绩约1吉瓦。

然而，在塔式光热发电系统中，数万面定日镜将太阳光聚焦到吸热器，不可避免地导致吸热器上下方温度超过700℃，对吸热器安全构成严峻挑战。目前，常规的隔热涂层效率低，耐高温和耐沙尘能力弱，难以满足高能流密度工况下的特殊热防护需求。

因此，开发具有高效反射太阳光、被动制冷降温并能适应戈壁、荒漠及强风沙等极端环境的新型热防护技术至关重要。高祥虎团队基于无源制冷的理念，研发了新型高温辐射制冷涂层技术。该研究成果为我国塔式太阳能光热发电技术增添了一种新型高温反射和无源辐射制冷降温防护材料。

## “糖葫芦”让海水淡化降本增效

本报讯(记者沈春蕾 通讯员张若娟)近日，在浙江省第十九届“挑战杯”大学生课外学术科技作品竞赛决赛中，浙江理工大学参赛项目“蒸蒸日上——海水淡化用自适应光驱动球形海水蒸发器”获金奖。

该项目带队老师、浙江理工大学教授余厚咏告诉《中国科学报》，海水淡化一般是利用光热界面太阳能蒸发的热法淡化。然而，相关研究者发现上述传统的提取方式存在提取效率低、不稳定、成本高等问题，因此无法做到可持续和大规模实际应用。为解决这一问题，余厚咏团队联合上海交通大学副教授刘彦勇团队研发了一种核-壳结构自浮式3D球形海水蒸发器。

余厚咏介绍，这款球形海水蒸发器的研发受到糖葫芦外观的启发，拥有3层结构——整个小球以超轻球形膨胀聚苯乙烯泡沫为核心材料，像糖葫芦的山楂核，确保球形海水蒸发器可以漂浮起来；在泡沫周围均匀包裹着纤维水凝胶外壳，像糖葫芦的山楂肉，用来导热；而最外层为聚吡咯，像糖葫芦的糖衣，作为太阳能吸收层，进一步增强蒸发性能。

余厚咏表示，将3D球形蒸发器放入需要净化的海水中，通过太阳照射，球形蒸发器的顶部会蒸馏出海水的盐分，盐分重量达到一定程度，球形蒸发器会进行自旋，带有盐分的球体会转向下方，从而实现球形蒸发器不间断提取作业。