

小小家蚕，原来有这么多神奇应用

向仲怀

院士讲科普

网友：最近看到新闻报道，蚕丝不仅能做衣服，还能用来修复伤口，甚至制造“人工角膜”。一只小小的蚕，原来有这么多神奇应用。这背后有什么科学原理？

编辑：修复创伤时，使用蚕丝蛋白制成的温和敷料，能加速愈合且不致敏；眼角膜严重受损，一种蚕丝蛋白基的“人工角膜”能被快速移植，助患者重见光明……这些应用场景其实并不遥远。本期“院士讲科普”，我们邀请中国工程院院士、著名蚕学专家向仲怀，带大家了解现代科学视野中的家蚕。

蚕丝蛋白：极具想象力的“智慧材料”

蚕丝，质地轻盈、柔软、光滑，具有良好的透气性和保暖性，被广泛应用于纺织、美容等多个领域，具有极高的经济价值。

鲜为人知的是，因其独特的生物相容性、可降解性，蚕丝在生物医学领域也展现出广阔的应用前景。

蚕丝为什么能用于医疗？这得从蚕丝蛋白说起。

蚕丝蛋白与人体的皮肤、组织有非常好的生物相容性。简单来说，把蚕丝贴在身上或者植入体内，身体不太会把它当成“异物”来排斥，不容易过敏。这一点，是很多合成材料无法比拟的。早在几个世纪之前，蚕丝手术缝线已在临幊上得到广泛应用。

想象这样的场景：修复创伤时，用蚕丝蛋白制成的温和敷料，能加速愈合且不致敏；手术缝合线在体内自然降解，无需拆线；甚至当眼角膜严重受损，一种蚕丝蛋白基的“人工角膜”能被快速移植，助患者重见光明……这不是遥不可及的幻想，而是可以期待的未来。

作为自然材料，蚕丝蛋白能被人体安全地降解和吸收。因此，它在再生医学领域展现出很大的应用潜力，并已被用于软骨、皮肤、角膜等损伤组织修复的研究。

基于同样原理，还有研究团队通过基因改造技术，拓展其在未来生物材料中的应用。例如，蚕丝蛋白可制成神经导管、血管支架等植入性医疗器械，在体内逐步降解吸收，避免二次手术；在药物递送系统中作为载体，实现精准释放，提高疗效；甚至凭借其柔性和生物相容性，用于可穿戴设备及人体植入式传感器。

家蚕繁殖快、成本低，结合基因编辑技术，能低成本、高效率地生产蚕丝蛋白。或许，我们很快就能迎来家蚕“工厂”，实现特殊功能蚕丝蛋白生产的商业化。

家蚕基因图谱：类型全面的“遗传字典”

蚕丝蛋白为何那么多特长？如何能让这些特点继续“扬长”？这个话题涉及家蚕基因研究。

家蚕这种昆虫很特别，它是迄今为止唯一被人类完全驯化的昆虫。古有伏羲“化蚕”、嫘祖“教民育蚕”的传说，“蚕”是中华文明的重要符号，蚕的应用早就与人类生产生活紧紧联系在一起。

20世纪初，随着杂交蚕种技术的推广，许多地方蚕种因产量低、效益差而面临被淘汰的命运。从经济效益来讲，杂交蚕种无疑最具优势；但从生物基因的角度来说，优良基因分散在各个地方蚕种里，一旦地方蚕种消失，这些基因就再也无处可寻。

为了保护好、研究好这种宝贵的生物资源，西南大学资源昆虫高效养殖与利用全国重点实验室经过几十年努力，建立了一个“家蚕基因库”。这座基因库已活体保存1200余种家蚕遗传资源，包含了超1.9万个家蚕基因，覆盖世界已知家蚕遗传变异的90%以上，其中包括天然彩色蚕、高抗病性品种、特殊突变系等珍贵资源，是国际历史最久、创新发现最多、世界上保存量最大和类型最全的家蚕基因库。

这只是第一步。

2004年，我们团队绘制完成了世界上第一张家蚕基因组框架图，也是我国科学家继完成人类基因组1%计划、水稻基因组计划之后，为人类贡献的第三大基因

组成果。2022年，我们又前进了一大步，完成了“千蚕基因组”计划，绘制出家蚕超级泛基因组图谱。

这个成果，就像为家蚕编写了一部全面的“遗传字典”。过去，育种多依赖经验与运气。如今借助这部“字典”，我们能精准查找控制蚕丝产量、强度、韧性乃至降解特性等性状的关键基因，可以实现“按需设计”。这也标志着从传统育种迈向基因设计育种的转变。

目前，通过基因编辑技术，我们已培育出能吐天然彩色丝的家蚕，以及利用黑白颜色标记性的新品种。以往培育稳定遗传特定性状的品种，往往需要数年时间，如今依据“遗传字典”可快速实现。

蜕变机制：循环不息的“生命启示”

当我们的祖先凝视着家蚕，他们看到的也不只是丝线。

蚕的一生经历了卵、幼虫（蚕宝宝）、蛹和成虫（蚕蛾）四个阶段，从“作茧自缚”到“破茧成蛾”，充满戏剧性的过程，给予古人关于生命的无尽哲思。

古人从蚕的生命循环中领悟生命哲学，今天我们从家蚕基因中探寻长寿的奥秘。

大家可能想不到，家蚕的基因组中，有大约5500个基因与人类的基因是同源的，占了人类基因总数的30%以上。这意味着，我们在蚕身上做的许多研究发现，很可能对人类有直接的启示。

2024年，我们团队的代方银教授有一个重要发现：在家蚕体内找到了一个与寿命相关的关键基因——

OSER1。长寿基因FOXO负责叉头框蛋白O的生成，OSER1则是FOXO的靶基因，叉头框蛋白O能够通过调节与衰老相关的基因，影响寿命。

通过实验，提高这个基因的活性，能显著延长家蚕的寿命。更令人振奋的是，这个机制在果蝇、线虫等其他生物身上也得到了验证。

研究发现，90岁以上的长寿老人与年轻对照相比，检测到OSER1基因中存在49个常见单核苷酸多态性（SNP），其中7个与长寿显著相关。未来，家蚕可能成为研究人类疾病与衰老的“候选模型”之一。这为我们研究抗衰老、开发相关药物，提供了一个全新的靶点和思路。同时，家蚕的“蜕变重生”机制，可能为再生医学带来启示。

从幼虫到蛹再到蛾，家蚕的一生，体内细胞会经历程序性重塑与再生。未来，我们或许能从家蚕身上获取破解器官再生的密码，为治疗退行性疾病或损伤修复提供思路和方案。

（作者为中国工程院院士、西南大学教授，本报记者王欣悦采访整理）

本报南宁电（记者张云河）国际学术期刊《自然》近期刊发了由中国科学院大学牵头，联合广西大学、华中师范大学等多个单位完成的重大科研成果，宣布首次在实验中直接证实中性粒子碰撞场景下的米格达尔效应，意味着轻暗物质探测迈出了坚实一步。

米格达尔效应由苏联物理学家阿尔卡季·米格达尔于1939年首次提出：一个原子的原子核突然获得能量加速运动时，原子核在反冲过程中的内部电场变化将部分能量转移给原子核外电子，使电子有概率获得足够能量脱离原子束缚，形成“共顶点”的两条带电径迹。通过这一效应，可以将原本“不可探测”的低能核反冲信号，转化为“可探测”的电子信号。80余年来，由于探测设备难以精准捕捉这一过程中极其微弱的电子信号与独特轨迹，中性粒子碰撞场景下的米格达尔效应始终未被实验直接证实。

本次科研成果得益于探测器性能突破。该探测器由广西大学牵头的CXPD合作组历经10余年研发，2023年研制完成。

中国科学院大学教授刘倩介绍，实验团队以广西大学自主研制的气体像素探测器为核心部件，搭建了一组超灵敏探测装置，相当于可拍摄“单原子运动中释放电子过程”的“照相机”，在实验中利用中子源轰击“照相机”内的气体分子，同时产生原子核反冲与米格达尔电子，探测装置成功“抓拍”到二者形成的“共顶点”独特轨迹，验证了米格达尔效应，同时还首次测量了该效应截面与原子核反冲截面的比值，为国际暗物质实验提供关键的校准依据。

超临界二氧化碳发电技术成功商运

本报记者 谷业凯

■探一线

2025年底，全球首台商用超临界二氧化碳发电机组在贵州六盘水首钢水钢集团成功商运。该项目也是超临界二氧化碳余热发电技术“超碳一号”示范工程，由中核集团中国核动力研究设计院与济钢国际工程技术有限公司、首钢水城钢铁（集团）有限责任公司共同推进，成功发电后，相比现役烧结余热蒸汽发电技术，将在发电效率方面提升85%以上，净发电量提升50%以上。

传统的蒸汽发电技术将水通过加热转化为蒸汽，再推动汽轮机带动发电机产生电能。但实践中，水这一介质在系统复杂度、效率、紧凑性、响应速度等方面存在不足。

能否找到一种新的替代介质？中核集团首席专家、“超碳一号”总设计师黄彦平一直在思考：“二氧化碳被加压至7.38兆帕、加热至31摄氏度时，会进入超越气态和液态物质特性的‘超临界态’，兼具高密度和低黏度的双重优势，非常适合做功。”

然而，找到超临界二氧化碳这个“超

介质”只是第一步，关键在于如何让它来发电。2009年，黄彦平带领团队启动了超临界二氧化碳发电技术研发。“我们当时设想，通过‘两机三器’构建闭式布雷顿循环（以气体为介质的热力循环）来实现高效发电。”黄彦平介绍，“两机”指的是透平机、压气机，“三器”则是热源换热器、回热器、冷却器。

研发超临界二氧化碳发电技术是个“从0到1”的过程。团队成员、换热设备研发骨干刘睿龙回忆，2017年，团队连续奋战了100多个日夜，攻克了数十项技术难题，

最终从印刷电路板制造工艺中找到灵感，在不锈钢板上蚀刻出高精度的毫米级微流道，并自主研制2.4米（长度）真空扩散焊机，将6000片薄板焊接成超紧凑微通道换热器。当全球单芯体长度最大的换热样机通过性能测试时，整个实验室沸腾了。

经过10余年的攻关，我国的超临界二氧化碳发电技术产学研体系基本形成，具备全面工程应用条件。2023年，中核集团中国核动力研究设计院联合济钢国际建设2套15兆瓦超临界二氧化碳余热发电机组，利用环冷机尾部高温烧结烟气余热高效发电，与传统技术相比，场地需求降低50%，发电效率提升85%以上，净发电量提高50%以上。2024年，中核集团启动熔盐储能超临界二氧化碳发电示范工程项目，预计2026年开工建设。



图为“超碳一号”的压气机。

中核集团中国核动力研究设计院供图

■唠『科』·科幻里的科学

科幻作品中，出现过太空电梯的身影——不需要火箭，只要坐上电梯，人们就可以直达太空。

太空电梯的原理是这样的：将一根极长的缆绳，一端固定在赤道地面，另一端连接位于地球同步轨道的空间站，再在更远处设置配重。地球自转时，缆绳受向上的离心力与向下的重力共同作用而绷紧，电梯便能沿缆绳往返天地间。

早在1895年，就有科学家提出建造直达太空的“天梯”。这一设想提出已逾百年，似乎仍停留在想象阶段，原因何在？问题的关键，在于找到足够强韧的缆绳材料。

太空电梯缆绳必须同时承受巨大的重力和离心力作用，对材料的抗拉强度要求极高。有没有既轻又强的“超级材料”呢？1991年，科学家发现了碳纳米管，这给太空电梯研究带来了曙光。

碳纳米管是由碳原子按六边形蜂窝状结构排列而成的中空管状材料，直径只有几纳米到几十纳米。别看身形纤细，它是人类发现的力学性能最优的材料之一：理论上，单壁碳纳米管的抗拉强度可超过100吉帕，是最好钢材的数百倍；其杨氏模量（衡量材料刚性的指标）高达1太帕，极难被拉伸变形。更难得的是，其密度仅为钢的1/4左右，单位质量的强度很高。

为了让碳纳米管早日从实验室走向太空，中国科学家一直在探索。清华大学化学工程系反应工程团队长期从事碳纳米管材料的可控制备与应用研究，努力攻坚材料难题。

首先是突破长度极限。实际制备中，碳纳米管长度通常只有几十微米，且内部存在大量结构缺陷，实际强度远低于理论值。2013年，研究团队通过提高催化剂活性概率，成功制备出单根长度超过半米的碳纳米管，为超长碳纳米管的规模化制备奠定了基础。

研究团队还探索组装“超强”纤维。单根碳纳米管再强，也无法直接用作缆绳，需要把千千万万根碳纳米管“拧”成一股宏观纤维。2018年，清华大学化工系与航院团队在《自然·纳米技术》发表论文称，采用气流聚焦法，制备出厘米级超长碳纳米管束，拉伸强度达到80吉帕以上。

太空电梯缆绳需承受反复拉伸，需要“百折不断”。2020年，研究团队在《科学》杂志发表论文，首次通过实验测试了单根碳纳米管的抗疲劳性能，发现碳纳米管可被连续拉伸上亿次而不发生断裂，去掉载荷后仍能保持初始的超高强度。

尽管碳纳米管研究取得了长足进展，但距离真正建造太空电梯仍有相当距离。

规模化制备是挑战，实验室目前能制备的超长碳纳米管长度在半米至米级，而太空电梯缆绳需要达到数万公里；太空环境是考验，缆绳需要穿越地球大气层，要经受风雨雷电，还要在太空中抵御高能宇宙射线和原子氧腐蚀。

除了缆绳，太空电梯还涉及基座建设、电梯厢动力系统等复杂工程问题。这些都需要跨学科协作解决。

太空电梯这只是停留在科幻电影里，但碳纳米管的发现和研究进展，让这个设想具备了坚实的材料基础。从实验室到应用的道路漫长而艰辛，但科学探索的魅力正在于此——每一次突破都是对未知的叩问，每一步前进都在拓展人类能力的边界。也许在不远的将来，太空电梯将成为人类迈向星辰大海的真正天梯。

（作者为清华大学化学工程系教授，本报记者吴月整理）

新型半导体材料领域取得重要进展

本报合肥电（记者李俊杰）记者从中国科学技术大学获悉：该校张树辰特任教授团队联合中外学者，在新型半导体材料领域取得重要进展。团队首次在二维离子型软晶格材料中，实现了面内可编程、原子级平整的“马赛克”式异质结的可控构筑，为未来高性能发光和集成器件的研发开辟了新路径。相关成果近日在线发表于国际学术期刊《自然》。

在半导体领域，能够在材料平面内横向精准构建异质结，是探索新奇物性、研发新型器件及推动器件微型化的关键。然而，以二维卤化物钙钛矿为代表的离子型软晶格半导体，其晶体结构柔软且不稳定，传统光刻加工等技术往往因反应过于剧烈而破坏材料结构，难以实现高质量的横向异质结。如何在此类材料中实现高质量、可控外延的横向异质结精密加工，是该领域面临的难题。

面对这一挑战，中国科大研究团队创新性地提出并发展了一种引导晶体内应力“自刻蚀”方法，将不同种类的半导体材料精准回填，最终在单一晶片内部构筑出晶格连续、界面原子级平整的高质量“马赛克”异质结。

新研究发现调控细胞生长的“分子刹车”

据新华社墨尔本电（记者熊文苑）澳大利亚莫纳什大学一个团队最新研究发现，一种复合体蛋白质会像“分子刹车”一样，根据营养物质的供应情况来调控细胞的生长。这为治疗癌症、癫痫等与细胞异常生长相关的疾病提供了新思路。

相关研究论文近期发表在美国《细胞》杂志上。研究团队利用冷冻电镜技术，以接近原子级的细节，解析了名为KICSTOR-GATOR1复合体的蛋白质根据营养物质供应情况协同调控细胞生长的机制。这一复合体是细胞营养感知通路中的关键调控因子。

研究显示，当营养物质不足时，KICSTOR可将GATOR1定位至关键位置，“叫停”细胞生长，从而帮助细胞节省资源。这一机制相当于细胞内部的“分子刹车”，可防止细胞无序生长或陷入功能衰竭。

太空电梯离我们还有多远

魏飞