

以上海中心大厦为设计灵感，科学家首次合成具有内外双层螺旋结构的动态高分子——

“造小”的艺术，用分子构筑新材料

张 琦 伯纳德·费林加

它既能适应体内复杂力学环境，又可在完成使命后安全代谢，避免传统高分子材料长期滞留引发的炎症或毒性风险。

从纳米技术到分子工厂

化学研究的核心使命之一，是在物理规律与生命现象之间架设桥梁。从宇宙大爆炸后的无机小分子，到今天能够思考、创造的人类，大自然仅用20种氨基酸和4种碱基作为“序列密码”，就书写了一部从“小”到“大”，从无序到有序的演化史诗。

在自然万物中，“小”并不等于“简单”。以水为例：单个水分子仅由一个氧原子和两个氢原子构成，但当大量水分子在低温下通过氢键有序排列时，可形成蜂窝状六边形网络，进而凝结为冰晶。据估算，雪花可能的形态组合高达 10^{18} 种——这一数字远超可观测宇宙中的原子总数（约 10^{80} 个）。这种从简单基本单元涌现出的极致复杂性，或许正是水能成为“生命摇篮”的关键所在。

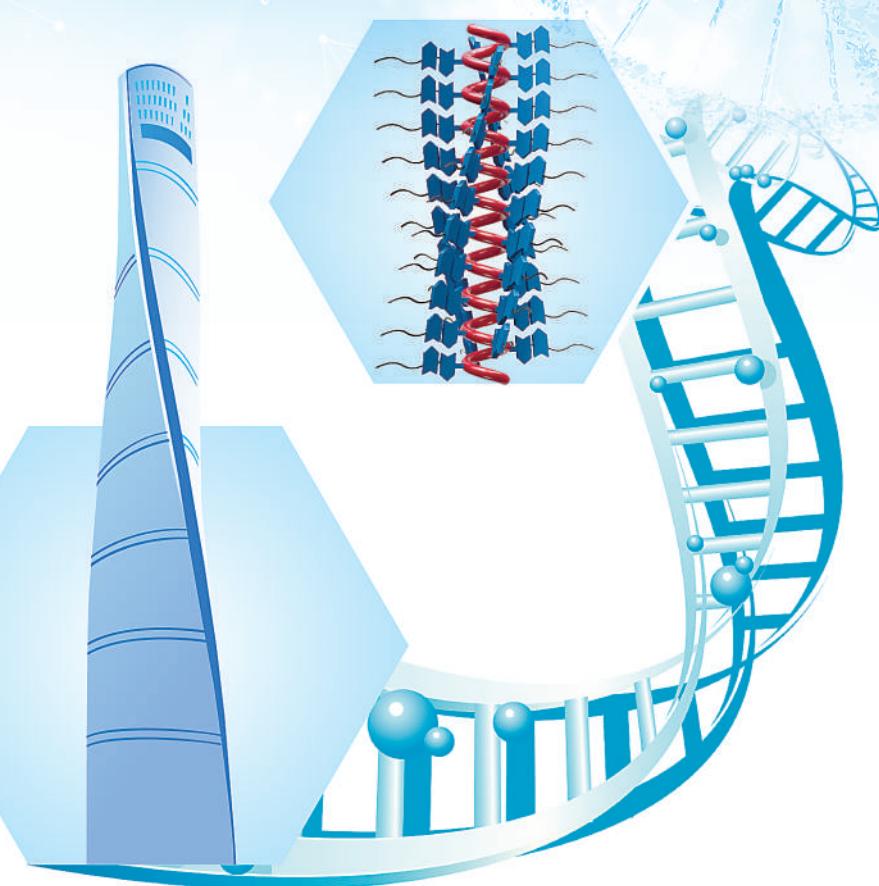
这种“小”的奥妙，启发了一代代科学家。他们通过一次次精妙的分子设计，完成了很多重要的发现和发明。1959年，物理学家理查德·费曼在《底部还有很大空间》的演讲中预言：人类能够从单个原子或分子出发进行组装，并构建具有特定功能的物质，并在一个极小的尺度操作和控制物体，将会产生应用前景极其广阔的技术——这被广泛认为是纳米技术的理论起源。

之后，随着现代显微成像技术的发展和成熟，人类逐步获得“看见”并操纵单个原子的能力。上世纪80—90年代，法国科学家索瓦日、英国科学家司徒塔特相继合成出机械互锁型分子结构，这些分子能够在纳米尺度下像机器一样发生线性穿梭运动，因此被称为“分子机器”。1999年，费林加研制出首个光驱动“分子马达”（即可以绕轴定向旋转运动的分子机器，尺寸不足2纳米），随后又开发出能在金属表面定向移动的“分子车”，该分子车由4个分子马达作为“车轮”，能够像汽车一样直行、转弯和刹车。三人因在分子机器设计与合成方面的开创性贡献，共同获得2016年诺贝尔化学奖。

近年来，费林加团队进一步将“分子马达”嵌入金属有机框架中，实现对气体分子的光控捕获与释放，相当于在固态材料内部构建了微型“分子工厂”。未来，此类系统有望用于精准药物递送或环境污染清除。

从研发设计到更多应用

“造小”的艺术，因应着人类社会的多种需求。2023年诺贝尔化学奖授予了“量子点的发现与合成”，也是“造小”的典范。科学家通过将无机半导体颗粒尺寸缩小至1—20纳米范围，使其电子运动受限于极小空间，从而产生显著的量子限域效应——此时，材料的光、电、磁等物理性质不



螺旋聚合物和上海中心大厦结构示意图。

资料图片

再由化学成分决定，而是强烈依赖于颗粒尺寸。这类极小的量子点可以精准调控其光电性质，在器件、催化、传感、信息等方面展现重要应用前景。目前基于量子点技术的显示技术(OLED)已进入量产阶段，相比传统有机发光二极管，展示出高亮度、广色域等优势。

2025年，诺贝尔化学奖授予金属有机框架材料领域，也可以认为是“造小”的艺术。研究人员通过金属离子与刚性棒状分子的框架组装，制造出具有特定几何尺寸的三维孔道结构，而这些孔道的孔径只有几纳米，因此可以对特定尺寸的气体分子展现选择性的吸附特征，实现工业气体的富集、储存和分离等功能应用。目前，基于金属有机框架材料的空气取水装置已在非洲干旱地区试点应用，每公斤材料每日可从低湿度空气中捕获数升淡水，为解决水资源危机提供新方案。

在信息科技领域，分子机器也拥有巨大的应用潜力。司徒塔特团队曾于2007年演示了一种基于分子穿梭运动的存储器件，可利用分子机械互锁结构实现分子级别的单向运动，并通过外部刺激(如光、热或电场)控制分子状态的切换，从而实现数据读写。理论上，这一分子机器芯片每平方厘米可存储100GB数据。尽管尚处概念阶段，但其突破现有硅基芯片存储能力极限的前景令人期待。

在医学领域，费林加团队正致力于开发可在体内靶向清除病变细胞的纳米机器人。理想状态下，这类2纳米大小的分子转子(结构可旋转的分子机器)可通过高速旋转在癌细胞膜上打孔，实现精准杀伤。目前该技术的应用还存在一些

技术瓶颈，比如如何使用穿透性更强的近红外光驱动转子，如何提升对病变细胞的识别特异性等。一旦实现突破，对分子医学研发也具有重要意义。

尽管“造小”技术日新月异，目前在研发和运用上仍面临多重挑战：原子级成像与操控设备成本高昂、适用场景有限；微观世界的动态复杂性使得精准控制极为困难；从单一功能分子到集成系统的跨越需要长期积累。但我们相信，随着人工智能辅助分子设计、自动化合成平台和新型表征技术等发展，“造小”的艺术必将加速向规模化、工程化技术转化。未来，这类材料有望在可持续能源、智能穿戴、精准医疗和环境治理等领域深度融入人类日常生活。

(作者分别为华东理工大学化学与分子工程学院教授，2016年诺贝尔化学奖得主、荷兰格罗宁根大学教授、中国科学院外籍院士，本报记者崔寅采访整理)

链接

张琦教授团队在《自然·化学》报告的这种合成聚合物之所以引人关注，是因为它能以两种“可逆”的方式进行变化：一是能在无序结构和螺旋状结构之间来回切换；二是能分解成最初用来合成它的那些小分子。这种特性类似于生物聚合物——它们也会进行这样的切换，并分解成组成它们的小分子。其他科学家之前也报告过类似的聚合物。而这次报告的机制更复杂，因为两种变化都源于内部共价键和非共价键的相互作用。

——《自然·化学》高级编辑凯瑟琳·艾什

从建筑奇观到功能材料

该研究由华东理工大学费林加诺贝尔奖科学家联合研究中心完成。2019年，研究团队在参观上海中心大厦时受到启发。该大厦于2016年建成，是目前中国第一高楼、世界第三高楼，以多项创新技术在超高层建筑史上具有里程碑意义。研究团队特别注意到，其独特的内外双层螺旋外观不仅赋予建筑独特的空气动力学稳定性，也令人联想到生命体系中的螺旋结构，如DNA和某些蛋白质。由此，研究团队提出一个科学设想：能否在非生物体系中，通过化学合成手段构建具有类似几何特征和动态功能的人工高分子？

生物体内的螺旋高分子承担着信息存储、结构支撑或催化等关键功能，其精密构型被认为是“生命密码”的物理载体。然而，数十年来，化学家虽然能合成出螺旋结构高分子，但往往基于难降解、难回收的刚性骨架，不具备天然螺旋高分子一样的动态功能。

此次研究团队从最基础的小分子出发，尝试将氨基酸、二硫键等天然的、与生物相容的“分子积木”，通过动态可逆的化学键连接起来，构筑出稳定的螺旋构象。不过，早期设计的分子仅靠氢键等弱相互作用维持螺旋，一旦受热或环境变化，结构便迅速“坍塌”。

经过反复试验，研究团队终于找到了关键突破口：将动态共价键(特别是可逆的二硫键)与刚性氨基酸骨架巧妙结合，使螺旋结构既具备柔韧性，又能稳定存在。研究发现，该高分子像弹簧一样，在加热时可伸展，冷却后恢复螺旋；在碱性环境下，二硫键断裂，整个结构在可控范围内可解聚为原始小分子，成为人体代谢通路中的常见组分——氨基酸和二硫小分子。

这一成果在生物功能材料方面展现出应用潜力。由于具备优异的力学柔韧性、生物相容性及完全可降解性，该材料有望成为下一代可穿戴或可植入医疗器械的理想基底。例如，在柔性神经接口、靶向药物递送系统或组织工程支架中，

创新汇

机器人有了“皮肤”触觉

本报记者 褚君

然而这类方案制造工艺复杂、软硬材料易分层、结构脆弱，且传感器之间常存在信号干扰，难以实现大面积部署，功能也远未达到人类皮肤的综合感知水平。

此次英国研究团队的重要突破，是让机器人用一种传感器就识别出多种不同的刺激。这种名为“电阻抗断层扫描”的检测方法，通过在单层水凝胶膜周围设置32个电极，每4个电极组合成1个测量单元，可生成超过86万种不同的电流路径组合，形成高密度、全覆盖的传感网络。

此次研究的另一重要创新体现在其选用的柔性材料上。该材料为水凝胶，是一种极为亲水的三维网络结构凝胶，导电性能好、柔软可塑，对机械力、温度和湿度均敏感。它可以直接受到外在条件变化时，如温度升高、湿度改变、接触物体等，水凝胶的电学特性随之改变，进而使此前施加的电流发生变化。另一对电极则实时监测这一变化。通过分析电流模式的差异，系统即可判断出这块“皮肤”受到了什么刺激。

由于“皮肤”每时每刻都在接受外界传来的多种刺激，其产生的“电信号”复杂多元。为有效处理这些信息反馈，研究团队引入人工智能算法训练，使系统能够自主学习并识别哪些电极组合可以最有效地地区分特定刺激。简而言之，这些电极作为“神经”，人工智能作为“大脑”，特定的电信号被“大脑”识别后解读为对应的“感觉”，由此机器人也有了“触觉系统”。

此次研究的另一重要创新体现在其选用的柔性材料上。该材料为水凝胶，是一种极为亲水的三维网络结构凝胶，导电性能好、柔软可塑，对机械力、温度和湿度均敏感。它可以直接受到外在条件变化时，如温度升高、湿度改变、接触物体等，水凝胶的电学特性随之改变，进而使此前施加的电流发生变化。另一对电极则实时监测这一变化。通过分析电流模式的差异，系统即可判断出这块“皮肤”受到了什么刺激。

这项基于水凝胶和电阻抗断层扫描的多模态传感技术，不仅是机器人感

知与材料科学领域的新突破，还体现了计算智能与生物仿生融合的新趋势。”北京大学先进制造与机器人学院教授喻俊志对本报记者表示，该研究以一层水凝胶、一圈电极和一套识别系统突破了人工皮肤传统设计瓶颈，用数据驱动的方式让柔性材料“学会”辨识复杂信息。当人工皮肤能像人类皮肤一样精确感知环境，人机交互的边界正被重新定义。

尽管成果显著，但是该技术仍面临挑战。例如，水凝胶在空气中易失水干燥，且在高温环境下性能不稳定。另外，当前系统完成一次全区域扫描耗时较长，尚难满足高速交互需求。研究团队表示，下一步将聚焦于开发更稳定的新型水凝胶或替代材料，并优化算法以提升响应速度。

“无论如何，给机器人制造‘皮肤’意义重大。”喻俊志表示，“触觉”对机器人的改变不只是多了一种感官，而是能够提升机器人与外在环境的交互能力，帮助其适应更加复杂的环境。未来，此类人工皮肤有望应用于人形机器人、医疗健康监测、智能穿戴设备、智能假肢、工业制造和灾后救援等领域。同时，该技术也将推动柔性电子、智能材料和类脑感知系统等前沿科技进一步发展。

科技大观

近期，中国成都理工大学行星科学国际研究中心联合美国华盛顿卡内基研究所、麻省理工学院等，在《自然·地球科学》杂志发表突破性成果：科学家首次在地球深部地幔物质中发现了大撞击前原始地球的“化学遗迹”，表明地球内部可能保存着太阳系形成初期的“时间胶囊”。这一新发现不仅挑战了传统地球化学理论，还为破解太阳系早期形成之谜提供了关键线索。

长期以来，科学界普遍认为，诞生于45亿年前的原始地球表面布满了火山，不断喷发炽热岩浆，天空可能被浓厚的火山灰和有毒气体笼罩。如果用颜色来形容，它像是暗红色、黑色和橙黄色的混合体，是一个不断翻腾的“岩浆海洋”。这个阶段的地球非常贫瘠，由于温度极高，像水、碳、氮、钾等难以留存。而在地球形成后不到1亿年，一颗火球大小的天体与它发生巨大撞击，将地球内部熔化并混合，使其化学成分完全“重置”，原始地球的物质应不复存在。

那么，地球的“五脏六腑”真的在那场浩劫中被完全熔融融化了吗？研究团队将目光投向了代表地球深部的特殊岩石。他们对全球20多个不同地区的样本进行了分析，其中来自格陵兰、加拿大和南非等地的古老岩石，以及夏威夷海底火山和留尼汪岛火山岩的分析结果令人震惊：这些样本与地球地幔或任何陨石的成分都对不上。样本普遍存在钾-40同位素轻微缺失，这与原始地球的独有特征相符。这意味着原始地球的物质可能被保存至今，地球深部的一些区域奇迹般地未被45亿年的地质活动改变。

对钾-40同位素微小异常的高精度分析技术是这项研究的“头号功臣”。钾是地球上一种重要的挥发性元素以及地球生命必需的营养元素。钾元素存在三种同位素，其中钾-40在钾元素中的天然占比极其微小(仅有约0.01%)，其同位素相对丰度对追踪行星组成物质在太阳系中的来源非常灵敏，因此测量技术是研究的难点。成都理工大学研究员王达带领的研究团队采用了先进的热电离质谱技术，并与西安交通大学合作，在自主研发的国产质谱仪上实现了更高稳定性和灵敏度的测量，首次在地球样本中探测到钾-40的同位素差异，它非常微小但“证据确凿”。

研究团队还利用数值模拟，还原了地球在大撞击前后的钾-40同位素的变化，显示了大撞击的化学元素特征：大撞击前，原始地球与其它内太阳系类地行星一样，极度缺乏挥发性元素；而一个富集挥发性元素的天体与地球相撞，这一事件不仅形成了月球，还为现今地球带来了将近一半的挥发性元素，很可能塑造了地球宜居环境的化学元素基础。此外，该团队还在2023年另一项研究中，利用这一技术分析了大量的原始陨石样品，首次发现了这些原始陨石存在系统性的钾-40同位素差异，明确了太阳系早期存在钾同位素的空间分布梯度——越靠近太阳，钾-40相对越少，与地球的值越接近。这一发现支持“地球的挥发性元素主要来自更靠近太阳的内太阳系”的新观点。

尽管取得了突破，科学家们仍然面临许多挑战。下一步，研究团队将尝试在其他元素同位素体系中寻找同样的古老信号，以交叉验证这一发现。同时，这一发现也带来一系列新的问题：原始地球物质如何在大碰撞中幸存下来，又如何逃脱45亿年的地幔对流混合？我们需要寻找更精确的数值模拟，以还原在怎样的撞击角度和能量强度下，原始地幔物质才能得以幸存。

研究地球钾元素在太阳系中的起源，对于理解如何创建人类生命的宜居条件有重要意义。地球作为一个复杂的行星体，其内部结构具有深刻的“记忆效应”。钾-40同位素的精确测量，有望成为类地行星起源与演化研究的新钥匙。借助这把新钥匙，科学家们不仅可以深入探索行星的起源及其早期演化史，还有助于寻求地球长期宜居条件形成的驱动机制。

(作者单位：成都理工大学)



原始地球与一颗火星大小的天体大碰撞假想图。 资料图片

研究发现儿童经常使用社交媒体注意力会逐渐下降

据新华社斯德哥尔摩电 (记者朱昊晨、徐谦)瑞典卡罗琳医学院参与的一项国际研究显示：经常使用社交媒体的儿童，其注意力会随时间推移出现下降趋势，而看电视、玩电脑游戏等其他屏幕活动未发现类似关联。该研究成果已发表在美国《儿科开放科学》杂志上。

卡罗琳医学院日前发布的新闻公报介绍，过去15年间，随着电子屏幕和数字媒体使用大幅增加，在许多国家，注意缺陷与多动障碍(俗称“多动症”)诊断量也明显上升。科研团队希望探究不同屏幕使用习惯与相关症状之间是否存在关联。

这项由卡罗琳医学院和美国俄勒冈健康与科学大学合作开展的研究，纳入了8324名居住在美国、起始年龄为9至10岁的儿童，并对他们进行了为期4年的追踪随访。儿童定期报告自己使用社交媒体、看电视以及玩电脑游戏的时长；家长评估孩子的注意力水平以及多动、冲动等行为表现。

研究发现，儿童使用社交媒体的时间随年龄增长显著增加：9岁时平均每天使用约30分钟，13岁时则增至约2.5小时。分析结果显示，使用社交媒体与儿童注意力之间存在显著关联。儿童经常使用社交媒体，其注意力会随着时间推移而逐渐下降。而看电视、玩电脑游戏则未发现类似关联。研究未发现儿童多动或冲动行为随社交媒体使用增加而上升。