

方磊:架“梯”破局有机材料性能瓶颈

► 本报记者 李洋

如何让有机材料发挥“软”的优势,同时补齐“硬”的性能短板,成为业界亟待突破的关键难题。

甬江实验室有机功能材料研究中心主任、首席研究员方磊科研团队长期深耕这一方向,以梯状聚合物为核心研究对象,推进其在柔性电子、智能穿戴等领域的应用探索,试图破解有机材料的性能瓶颈。

双链之智: 自然启迪与结构革新

何为聚合物?方磊用一个生动的比喻开启话题:“我们日常接触的塑料,99%以上都是单链聚合物,这种物质的分子就像一根长长的绳子,自然状态下会缠绕成一团‘乱麻’。这种结构虽赋予材料弹性,但也限制了其导电性和稳定性。”

1920年,德国化学家赫尔曼·施陶丁格提出聚合物概念,揭示了其由小分子通过共价键连接形成长链的本质。很快,科学家们便大胆构想:大分子不应只有“孤零零的线”(单链)一种形态,两条主链通过化学键横向连接,可形成类似梯子的双链结构。这一“双链聚合物”构想,为梯状聚合物的诞生埋下了伏笔。

1960年代,美国科学家成功合成聚苯并咪唑苯并菲罗啉(BBL)梯状聚合物,宣告其从概念走向现实。

“梯状聚合物就像在两根平行的‘绳子’之间,用短绳横向连接,形成类似‘梯子’的双链结构。”方磊解释说,这种结构让材料告别了“乱麻”的混乱,不仅刚性和稳定性大幅度提升,还能为电子搭建“高速公路”——若链本身导电,电子在有序的“梯子”上移动,其速度远快于在“乱麻”中穿梭。

然而,BBL梯状聚合物这一突破性成果,因缺乏明确应用场景,曾沉寂了半个世纪。直到21世纪,现代科研人员把这个“老概念”重新挖掘出来。“原来它刚好能搭起‘分子高速公路’。”方磊说,简单说,电子、能量这些微观世界里的“小货车”,在单链材料里容易走歪、绕路、堵车,而梯状聚合物的双链结构就像双向车道,能让路更直更顺畅,让“小货车”快速、顺畅地通行,不跑偏、不卡顿。同时,双链结构的高分子材料更稳定更不容易被破坏。

这一结构优势的灵感,源于自然界与材料科学的双重启示。DNA的双链

并行形态通过碱基配对维系,成就了生命遗传的稳定性,梯状聚合物借鉴其双链设计,获得了媲美无机材料的稳定性;“明星材料”石墨烯以二维平面结构实现电子传输的“自由溜冰场”效应,梯状聚合物则介于石墨烯与单链聚合物之间,既非“整片平面”也非“孤立线团”,可以巧妙糅合石墨烯的高导电性与单链高分子的加工性、可塑性,这种“取长补短”的特性,是传统材料单独无法实现的。

“人们日常接触的高分子材料,比如塑料、橡胶、纤维,99%以上都是传统的单链结构。我们的创新,就是让双链、多链的大分子发挥特长,它的性能比单链材料更稳定、更高效,把它们用到显示器、传感器、新型能源器件、脑机接口这些产品里,可以真正帮到大家。”方磊说。

方磊表示,这种创新不是推翻过去,而是换了设计思路:以前人们都盯着传统的单链做文章,现在我们发现,如果能摸清双链、多链大分子的独特脾气(结构和性质),克服制造它们的难点,就能精准设计出更实用的新材料。这就像基建的时候从“单车道”转向“多车道”,不仅拓展了材料的功能边界,更给有机材料领域开辟了新的设计范式。

合成攻坚: “100%关环”的精准造物艺术

想要合成出这种高度有序的结构,谈何容易!方磊坦言,核心要做到“100%关环”,即两条主链通过横向化学键精准连接,形成无缺陷的“梯子”形态。这一过程如同搭积木不能错一步,必须遵循“慢工出细活”的原则:反应过程既要缓慢,给分子足够时间“校对”结构,又要具备可逆性,如同搭积木可拆可改,及时修正“无序”错误。

这就像纯净金刚石需在极高温度和压力下才能缓慢形成一样——只有足够“不断纠错的耐心”,才能攒出毫无瑕疵的有序结构。“而我们要合成规整的梯状聚合物双链,也得遵循这个道理:必须让反应过程可逆,靠热力学自然‘纠错’,最终才能得到‘100%关环’的完美产物。”方磊坦言,团队曾迟迟得不到关环前的“半成品”(前驱体),每次合成出来的都是一堆不溶于溶剂的“废料”。

然而,科研的关键难题往往藏在想不到的地方——一次方磊给本科生上高分子化学课,当讲到“自由基聚合”的时候,突然他灵光一闪:会不会是前驱体在

合成中意外发生了不想要的自由基聚合,才变成了一堆废料?如果是这样,解决办法或许很简单——往反应中加入能消灭自由基的试剂即可。

这个想法一冒出来,方磊立马给实验室的研究生发了条短信,让他赶紧按这个思路试试。“没想到效果立竿见影,我们很快就拿到了纯净的前驱体,之前的失败原因也彻底搞清楚了。”

方磊回忆说,自己多年的科研积淀为这场攻坚奠定了坚实基础。攻读博士学位期间,他师从诺贝尔化学奖得主詹姆斯·弗雷泽·司徒塔特教授,成功创制由分子机器聚合而成的“分子肌肉纤维”,实现协同累积式的分子收缩/伸展可控运动,为人工肌肉研发奠定了关键基础,而这一研究恰是司徒塔特教授日后斩获诺贝尔化学奖的核心贡献领域之一。

他表示,尽管技术路径不同,但设计理念一脉相承——将小分子在亚纳米尺度的特殊性质通过构建高度有序的大分子链,放大到可实际利用的尺度,让微观“小本领”变成实用功能。

产业破局: 多领域落地的未来图景

材料的价值,最终要在应用中得以彰显。

尽管梯状聚合物的应用探索仍处于“婴儿期”,但凭借高稳定性、高导电性、兼具刚性与加工性的核心优势,已在多个高端领域展现出不可替代的潜力,有望率先在部分场景实现产业化突破。

方磊表示,在新能源汽车及建筑节能领域,梯状聚合物有望成为调光玻璃的核心突破口。这类玻璃通过电压调节可实现近红外光的可控透过——通电时阻挡热量摄入降低室内温度,断电时恢复红外线传统保障阳光照射取暖,契合窗户的节能需求。梯状聚合物的超长稳定性结合其优良的刺激响应光学性能可满足长期使用需求,一旦产业化,将为节能控温领域带来革命性突破。

在生物医学领域,梯状聚合物也将有望为植入式脑机接口提供理想材料解决方案。植入式电极需在人体复杂生理环境中长期稳定工作,且不能引发炎症反应,目前使用的材料在体内仅能存活较短时间,难以满足临床需求,而导电梯状聚合物有望实现10年以上的体内稳定工作,破解脑机接口的材料瓶颈,为瘫

痪患者、渐冻症患者等带来康复希望,不过这一领域的产业化可能需要更长时间的打磨。

此外,梯状聚合物在更多领域的应用潜力正逐步释放:作为高端导热材料,可解决半导体芯片散热难题,助力电子器件性能升级;在柔性电子、智能穿戴领域,其兼具柔韧与稳定的特性,能适应人体运动监测、可穿戴设备的严苛要求;智能变色玻璃、新型能源器件等场景,有望成为其率先落地的突破口。

聚苯胺(PANI)因其优异的导电性、环境稳定性、可逆的掺杂/去掺杂特性以及易于合成等优点,作为良好柔性基底,被广泛用于制备柔性传感器。由于聚苯胺链的本征化学稳定性不佳,影响传感器的长期使用稳定性。

方磊团队通过搭建“梯状”结构,已经合成出梯状聚苯胺。实验数据印证:在苛刻条件下,传统单链聚苯胺可能1天内分解,而梯状聚苯胺可稳定工作100-1000天,稳定性提升2-3个数量级;电子在刚性双链上的传输路径更短、阻力更小,导电效率有望实现质的飞跃。

方磊团队正在做的还有突破1960年代(聚苯并咪唑苯并菲罗啉)结构随机的局限,像设计DNA序列一样,打造结构完全可控的“分子高速公路”。

方磊表示,梯状聚合物在下一代有机功能材料中占据关键地位,有望推动有机材料突破现有应用边界,开辟新的产业赛道。近年来,诺贝尔化学奖多次颁给分子机器、MOFs等科学领域,印证了分子设计与功能材料的重要性。

但他清醒地认识到,应用研究及产业化之路布满荆棘:合成与加工的平衡、基础科研到工程化的跨越,成本控制与生产线兼容等“隐藏”短板,都是必须攻克的系统工程,需要跨学科多领域的专业技能与创造性思维。

他说,从1920年代的理论构想,到1960年代的首次合成,再到如今的应用研究及产业化冲刺,梯状聚合物的百年历程,正是材料科学发展的生动缩影。未来,当梯状聚合物真正在智能建筑、生物医药、柔性电子等领域落地生根,这场始于分子结构的革命,必将重塑有机材料的产业格局,为前沿材料发展注入强劲动力,让“软材料”的“硬实力”惠及更多人。