

柔性材料“下一站”：更多功能 更强智能

——“聚焦前沿科学问题”系列报道之二

◎本报记者 付锐涵

在日前举行的第二十六届中国科协年会上，由东华大学研究员门永军、副研究员周哲、副研究员朱丽萍等专家提出，中国化学会推荐的“通过耦合与杂化实现柔性材料的功能涌现”入选中国科协发布的2024十大前沿科学问题。

“柔性材料正以其卓越的特性和广泛的应用前景，迅速成为研究焦点。”门永军说，“耦合与杂化不仅是实现材料功能化与智能化的关键技术，还是一个深刻的基础科学问题。我们需要从系统科学的视角出发，探索更具普适性的材料制备策略。”

柔性材料有独特优势

“我们说的柔性材料是一类具有高柔韧性和可伸缩性的功能材料，它们能够承受弯曲、扭曲、折叠或拉伸等形变而不产生破裂或性能下降等问题，还具有导电、催化或抗菌等功能。”门永军说。

对于“通过耦合与杂化实现柔性材料的功能涌现”这一科学问题，门永军介绍：“‘柔’说明材料能够改变其形态；‘功能’则是我们设计和制造材料的目标；‘功能涌现’是材料内部各组分间相互作用的结果。这些功能往往不是单个组分所具有的，而是各组分在相互作用的过程中表现出来的。”

近年来，功能化、智能化成为柔性材料研究的重点方向。“比如以传统纤维为基础，通过表面改性、杂化等方式赋予纤维抗菌或催化功能，进而应用在服装或新能源领域。”门永军说。

在生物医学领域，柔性材料可应用于生物传感器和可穿戴设备的制造。在电子信息领域，柔性材料可助力超薄、可弯曲显示屏的研发，从而进一步缩小电子设备的体积，提高设备的便携性。在储能领域，柔性材料为高效、轻型、薄型储能电池

的研究提供了新的可能。

总体上，柔性材料弥补了传统刚性材料难以与褶皱衣物、人体皮肤等形状不规则物体贴合的局限，在人形机器人、智慧医疗等应用场景中显现出优势，也为未来电子技术的发展开辟了崭新视野。

耦合杂化是设计关键

“要想实现柔性材料在诸多场景的应用，就要解决材料设计的关键共性问题——柔性材料的多功能耦合与杂化。”门永军说。

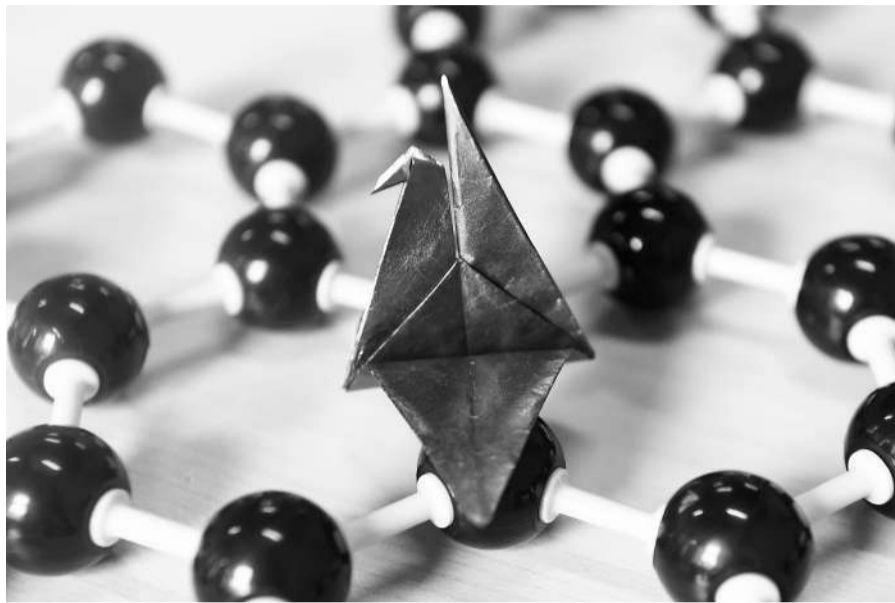
把多种具有不同性质或结构的物质通过技术手段结合在一起，并在其内部构筑催化基元、吸波单元、计算元胞等功能性单元，有望获得原材料不具备的新性能，让柔性材料实现功能化与智能化。例如，采用聚合物纤维作为柔性基材，将具有催化作用的纳米材料引入纤维中，最终可以得到具有催化功能的柔性纤维材料。

然而，简单地将不同物质混合往往会在界面问题，进而导致材料性能与功能下降。

“如何确保材料的各组成部分不是孤立存在，而是互相配合、协同合作？”门永军认为，柔性材料的制备难点在于让内部形成一个高效的耦合系统。在这个系统中，物质和能量能在组分间高效传递与转换。整个系统作为协调一致的整体，能对外部信号作出快速且精准的响应。

“耦合可以被视为一种关联机制，它确保了材料系统中各个组分间的有效连接和相互作用。杂化则是一种技术方法，能够让不同性质的组分融合在一起，从而创造出新的特性。”门永军介绍，从多组分材料的加工技术上来说，耦合与杂化极其重要。

“我们期望制造出的柔性材料能够展现出远超其各组成部分简单累加的性能，达到‘1+1>2’的效果。柔性材料还要与外界系统进行有效的交互与协作，实现在



图为浙江大学研究人员用新型柔性石墨烯膜折叠的千纸鹤和柔性石墨烯膜分子结构模型。
龙巍/视觉中国

不同层级上的功能涌现。”门永军说，这种性能提升，是材料自适应环境变化、执行智能任务的基础。对于人形机器人、可穿戴设备、健康医疗、航空飞行器设计等领域的发展具有重要的意义。

当前耦合与杂化技术的策略方法还存在一定的局限。“不同材料间软硬匹配、不同材料耦合的信号传导、多组分材料界面结合、材料整体设计缺乏对应理论……科学家已经关注到了这些问题，并正在寻找解决方案。”门永军说，解决这些问题需要从多个尺度系统思考，包括分子尺度柔性基元的设计、纳米尺度功能基元的精确构筑、微米尺度的相分离等。

“功能涌现”需系统谋划

“功能涌现是一个系统科学问题。”门永军认为，为实现功能涌现，可以从系统视角出发，提出通用策略，并形成新的研

究范式。

就如同一架飞机由各种零部件按照特定方式组装在一起才具有各零部件所不具备的飞行功能一样。由不同性质的材料按特定方式集成而来的柔性材料作为一个整体，也具有各组成部分所不具备的新特性。要探索新特性从何而来，就要从更高层次理解结构和功能的问题。

“发展柔性材料设计的新方法，揭示材料耦合、杂化的新原理，扩展柔性材料的应用领域，都需要研究者以系统的视角来思考问题，提出面向全局的解决方案，并充分利用材料科学、化学、物理、系统科学等多学科的知识制定策略。”门永军说，跨学科的融合和创新，不仅推动了科学理论的发展，也为解决实际问题提供了新的视角和方法。基于此，研究人员可以更好理解和设计柔性材料，使其实现功能化和智能化，从而推动材料科学与技术的进步。

纳米孔可提升金属强度

科技日报讯（记者郝晓明）记者8月12日从中国科学院金属研究所沈阳材料科学国家研究中心获悉，该中心研究员金海军团队提出，如果细化至百纳米以下并弥散分布于材料中，孔洞将从有害的材料缺陷转变为有益的“强化相”。该团队以金为模型材料，在研究中发现，添加弥散纳米孔，可在不损失甚至提高塑性的同时，有效降低材料密度并大幅提升其强度。相关研究论文近日发表于国际期刊《科学》。

发展新型轻质高强度材料是航空航天、汽车、消费电子等领域的迫切需求。当前，一般通过添加更轻的合金元素实现材料轻量化。与之相比，引入孔洞是更为直观有效且更具普适性的材料减重途径。但通常情况下，少量孔洞的存在即可导致材料的强度、塑性、疲劳性能等力学性能急剧降低。因此在铸造、粉末冶金、3D打印等材料制备加工过程中，孔洞一般被视为严重的材料缺陷，需严格控制

并极力消除。

研究团队通过脱合金腐蚀法制备出结构均匀的纳米多孔金，将其适当压缩并加热退火，可形成一种含有大量弥散分布纳米孔的新材料。研究团队通过微拉伸实验发现，添加体积分数高达5%—10%的纳米孔后，材料屈服强度提升50%—100%，且可保持良好的塑性。部分样品塑性甚至优于同等晶粒尺寸的完全致密材料。弥散分布纳米孔有助于减轻孔洞

周围应力和应变集中，抑制裂纹的萌生。该材料巨大的比表面积也促进了表面一位错间交互作用，在提高强度的同时提高了应变硬化率，有助于提高塑性。

该研究表明，特征尺寸低于百纳米的孔洞具有类似于纳米颗粒或纳米析出相的强化效应。这一强化方式不仅有助于材料轻量化和回收再利用，而且可最大限度保留本体材料导热导电等优异物理性能，有望在多个领域获得应用。

珠峰地区首次水热碳通量航空观测试验启动

揭开青藏高原地气相互作用的“面纱”

◎本报记者 陆成宽

8月1日，青藏高原珠峰地区高寒环境复杂地表地气相互作用天一空地立体协同观测试验正式启动。这是青藏高原珠峰地区首次利用航空平台开展水热碳通量观测试验，将填补青藏高原珠峰地区面尺度地气相互作用观测的空白。

为什么要在珠峰地区开展水热碳通量观测试验？本次试验将用到哪些科技手段？对此，科技日报记者采访了本次试验牵头人——中国科学院空天信息创新研究院遥感与数字地球重点实验室研究员贾立。



搭载水热碳通量观测系统的无人机正在获取通量数据。
中国科学院空天信息创新研究院供图

采用地基和空基协同观测

青藏高原被誉为“世界屋脊”“亚洲水塔”，是我国重要的生态安全屏障。同时，青藏高原对大气具有强烈的加热效应，会影响北半球中纬度地区的大气环流，其地表物质和能量交换不仅影响当地及周边气候，还可通过复杂的气候反馈机制和大气环流影响全球气候。

“处于青藏高原核心区域的珠峰地区地形复杂，多高山、深谷、冰川和冰碛地貌，太阳辐射强烈，生态环境脆弱、敏感，是全球变暖背景下地球系统地气相互作用过程及生态系统格局演变研究的重要区域。”贾立说。

因此，科研人员将试验区选在了珠穆朗玛峰北侧，该区域平均海拔约4200米。贾立介绍，此次试验利用无人机航空平台开展观测试验，同时结合地面站点和卫星遥感观测形成多时空尺度、天一空地立体综合观测，以深入探究处于亚洲季风影响区的青藏高原珠峰北坡地区高寒环境和复杂地表条件下的水分循环、物质和能量交换过程机理。

试验采用地基和空基协同观测方式，从不同时空尺度开展珠峰地区典型地表地气相互作用的观测和分析研究。“在地基试验部分，团队在核心试验区荒漠地表和高寒农田地分别建设两处典型地表点尺度局地微气象环境和水热碳通量观测，并为核心区典型地表地气相互作用特征及机理研究提供基础时序观测数据。

“空基试验部分，研究团队首次在珠峰地区复杂地表条件下开展航空机载观测，获取区域面尺度地表与大气之间的水分通量、潜热通量、感热通量、碳通量和辐射通量的空间分布数据。

“地基和空基通量观测试验相结合，能够获取兼顾时间变化和空间变化的水热碳通量观测数据，为在珠峰地区复杂地表开展区域尺度地气相互作用研究、地面观测与卫星观测之间尺度转换研究提供关键数据。”贾立说。

第二次青藏科考的重要部分

研究人员还将同步开展机载热红外观测、大气边界层风温湿廓线探空观测等试验，以实现对影响地气相互作用的关键地表特征和大气边界层结构的立体协同观测。

贾立说：“卫星观测范围大，是大区域尺度；地面观测站覆盖范围较小，相当于一个点的观测，是点尺度；无人机观测范围介于两者之间，是面尺度。”

谈到本次试验和第二次青藏高原综合科学考察的关系，贾立介绍，此次试验属于第二次青藏高原综合科学考察“西风—季风作用区非均匀下垫面地气相互作用机载通量观测试验研究”子专题的主要内容之一，是第二次青藏科考“西风—季风作用区非均匀下垫面地气相互作用综合立体观测试验的重要组成部分。

同时，本次试验还是继甘肃敦煌、云南大理和青海格尔木等地之后，贾立团队第四次在青藏高原及周边地区采用无人机航空平台开展水热碳通量观测试验。

“下一步，我们将整合青藏高原地区地面已有站点、航空平台、卫星遥感等的观测资料，综合分析高原地区水热碳通量变化过程特征和机理，结合多尺度观测和模拟两大手段，探究青藏高原复杂地表地气相互作用特征，揭示青藏高原环境变化及其气候反馈的关键机制。”贾立说。

新知

两极冰盖不对称演化对全球气候影响重大

科技日报讯（记者史俊斌）记者8月12日从中国科学院地球环境研究所获悉，国际期刊《科学》近日以《南极冰盖生长触发中更新世气候转型》为题，在线发表了由中国科学院院士、中国科学院地球环境研究所研究员安芷生团队与国内外专家合作的最新科研成果，深刻揭示了两极冰盖不对称演化对全球气候的重大影响。这一研究成果挑战了科学界已有的多种假说，为回答《科学》杂志提出的125个前沿科学问题之一的“大冰期发生原因”提供了新视角。

研究人员联合中国科学院青藏高原研究所、香港大学、英国南极调查局、中国海洋大学崂山实验室、西安交通大学、南京大学等科研院所的科学家，对促成这一气候转型的多种假说提出挑战。研究人员将观测记录与数值模拟相结合，揭示了南北半球冰盖不对称演化的历史及地球气候系统响应的过程，发现200万—125万年前南极冰盖和相关的海冰持续扩张，通过改变跨赤道气压梯度和大洋经向环流，触发北半球温度降低、水汽含量增加，为125万年前北半球冰盖的增长提供有利条件，最终全球气候从此前的冰期—间冰期4万年冷暖旋回转变为10万年冷暖旋回。

众所周知，地球两极覆盖着冰盖。在全球变暖背景下，北半球冰盖和北极海冰加速消融，而南极冰盖消融幅度相对较小，仅在近年出现较大幅度消融。目前，南极冰盖体量是北极的10倍，如果南极冰盖融化速度和北极的不一样，它们形成的中间热力差就非常巨大，会对全球气候造成重大影响，这种不对称的冰盖演化对包括全球温度和海平面变化在内的全球气候的影响被严重低估。

安芷生表示：“这一成果不仅让我们意识到在全球变暖的背景下，定量评估两半球冰盖的不对称融化与全球气候变化之间联系的紧迫性，还为中国科学家在解决全球前沿科学问题中发挥主导作用，提供了范例。”



图为南极冰山。李院生摄

科研人员发现

一脉冲星处于罕见双中子星系统

科技日报讯（记者梁乐）记者8月12日从中国科学院新疆天文台（以下简称“新疆天文台”）获悉，科研人员在使用中国天眼（FAST）进行为期2.4年共计32次的测时观测后发现，脉冲星PSRJ1846-0513处于罕见的双中子星系统中。这一发现在进一步揭示脉冲星形成过程、验证爱因斯坦广义相对论的正确性等方面具有极高价值。研究论文日前发表于《天体物理学杂志快报》。

脉冲星是一种快速旋转的中子星，由恒星演化和超新星爆发产生，可用于引力波探测、黑洞等相关研究。

据了解，目前全世界已发现约4000颗脉冲星，其中10%属于双星系统，伴星类型有中子星、白矮星、恒星和行星等。伴星是中子星的双中子星系统非常罕见，所占比例不到脉冲星家族的1%。这样的系统其前身是两颗质量在8倍太阳质量到30倍太阳质量之间的大质量恒星，经历两次超新星爆发，才形成双中子星系统。

新疆天文台与新疆大学联合培养的博士研究生赵德在其导师——新疆天文台研究员王娜、袁建平指导下，对漂移扫描多科学目标同时巡天（CRAFTS）项目发现的脉冲星PSRJ1846-0513进行了测时研究。赵德通过分析测时数据，测得该星所在系统的近星点进动速率，并估算出系统的总质量。运用质量函数，给出脉冲星及其伴星质量范围，从而判断出它是一个双中子星系统。

处于双星系统的这颗脉冲星，运行轨道为椭圆轨道，轨道半长轴投影为4.756光秒，轨道周期为0.61天，偏心率0.208。该脉冲星的伴星质量大于或等于太阳质量的1.28倍，是一颗中子星，系统总质量为太阳质量的2.63倍。科研人员探测到该双中子星系统因相对论效应所产生的近星点进动速率是水星近日点进动速率的57倍。

未来，科研人员将继续观测，进一步提高近星点进动速率测量精度，结合可能探测到的其他相对论效应，减小脉冲星及其伴星的质量测量误差。模拟数据显示，在接下来的4年的测时观测中将有可能在这颗脉冲星上探测到引力红移和时间变慢的共同效应。

新型催化剂使葡萄糖高效产果糖

科技日报讯（记者马爱平）记者8月13日从农业农村部环境保护科研监测所获悉，该所乡村环境建设创新团队开发了铝负载功能木质素生物聚合物催化剂（Alx-Lbp），实现了葡萄糖向果糖的高效催化异构化。相关研究论文日前发表于国际期刊《应用催化B：环境与能源》。

果糖作为甜度最高的天然单糖，被广泛应用于食品、日用化学产品和生物制药等领域。目前，工业上主要通过生物酶异构葡萄糖制备果糖，而利用化学催化法异构葡萄糖制备果糖仍处于研发阶段。

论文通讯作者、农业农村部环境保护科研监测所研究员郭海心告诉科技日报记者，科研人员利用机械化学法制备了Alx-Lbp，并将其用于化学催化法异构葡萄糖制备果糖。无须煅烧处理即可制备这一新型催化剂，大幅降低了制备成本。同时，该催化剂在葡萄糖异构过程中表现出优异的活性和良好的稳定性，果糖产率高达58.8%。

“具体来说，本研究采用了一种特殊的机械化学方法，利用过氧化氢和乙酸铝对碱金属进行处理，成功合成了无须后续煅烧处理的Alx-Lbp。这种新型催化剂具有更强的亲水性和更低的表面能，在140摄氏度的乙醇环境中反应30分钟，能将葡萄糖高效地转化为果糖。值得一提的是，该催化剂还具有良好的回收性，即使重复使用8次后，它仍能保持最初的催化活性。”郭海心说，该研究为破解工业上“非酶异构葡萄糖产果糖不可”的现状提供了新思路。