

在天上造家当！我国实现太空金属3D打印

■本报记者 倪思洁

近日，微重力金属增材制造返回式科学实验载荷在中国科学院力学研究所(以下简称力学所)举行交付仪式。

该载荷由力学所自主研制，于1月12日搭载中科院宇航“力鸿一号”遥一飞行器，成功在太空完成金属3D打印实验，制备出金属零部件，整体技术达到世界一流水平。

“这是我国首次基于火箭平台，实施太空金属3D打印实验，第一次在微重力环境下成功打印出完整的金属构件，有力推动了我国太空制造技术的发展，为未来太空基础设施建设提供关键支撑。”载荷总设计师、力学所研究员姜恒说。

为了在太空“过日子”

当前，太空制造已成为全球空间技术竞争的战略高地，太空金属3D打印也是航天经济领域关注的技术热点之一。

“在太空打印金属的核心目的，是要解决未来人类在太空‘过日子’的现实问题。在空间站扩建、深空探测及地外基地建设等长远任务中，原位制造能力将发挥不可替代的作用。”姜恒说。

这一技术可以在太空中建一个“应急修理铺”。“现在空间站所有的東西都得从地面运上去，未来如果去月球、火星，距离远、运费贵，哪怕坏个螺丝，都要耗几个月时间等着地球的补给。太空金属3D打印就是要让航天员缺什么就能直接造，从‘带家当上天’变成‘在天上造家当’。”姜恒说。

不过，与地面3D打印相比，太空金属3D打印的技术难度要大得多。

姜恒介绍，太空金属3D打印的关键技

术难度在于，微重力环境下的金属熔凝过程存在失控风险。失重状态使液态金属不受重力与浮力影响，完全由表面张力、毛细力等控制，极易出现熔滴球化、断丝、气泡滞留等问题，对金属成形的精度构成挑战。

“金属丝一熔化，它不是往下流，而是熔成一个小球，还会沿着丝往回爬，非常难以控制。这里面有微重力环境下的流体控制、热传导机制及冶金物理等基础科学难题。”姜恒说。

从“地面研究”到“太空工程验证”

20世纪90年代，国外就布局了从空间站迈向小行星、月球及火星的一系列太空制造任务。近年来，国内逐渐开始加速布局地面验证、火箭实验、在轨太空制造等任务，进入了与国外技术并跑竞争阶段。

2025年《国家航天局推进商业航天高质量安全发展行动计划(2025—2027年)》明确提出，支持商业航天主体围绕太空资源开发利用、太空制造、在轨维护与服务、太空环境监测探测、空间碎片监测预警与减缓清除、太空旅游、太空生物医药等新领域，加强原始创新和关键核心技术攻关、系统开发和应用服务，创新商业模式，发展新兴业态。

姜恒介绍，过去国内实验都是地面实验，主要依靠落塔或失重飞机，通过自由落体创造微重力环境，模拟太空状态的地面实验装置。

“落塔实验可以验证很多技术原理，但它最大的问题是实验时间很短，只有3.6秒。”姜恒说。

此次，实验团队自主研制出微重力金属



载荷舱返回时的画面。中科院航供图

增材制造返回式科学实验载荷，搭载着“力鸿一号”遥一飞行器，升至距地面120公里的亚轨道，获得了数分钟的实验时间，并在这一时间内成功制备出完整金属零部件。

载荷副总设计师、力学所副研究员徐文帅介绍，任务过程中，团队突破了微重力条件下金属增材制造的物料稳定运输与成形、全流程闭环控制、载荷与火箭高可靠协同等一系列关键技术。

实验结束后，载荷舱经伞降系统平稳着陆回收。科研团队成功获取了太空微重力环境中金属3D打印的熔池动态特征、物料输送、凝固行为等过程的数据，以及太空增材制造金属件的成形精度与力学性能等参数，为我国太空金属增材制造技术的快速迭代积累了宝贵的实验资料。

“该任务标志着我国太空金属增材制造从‘地面研究’阶段迈入‘太空工程验证’的新阶段。”姜恒说。

科研院所与企业的协同创新

在姜恒看来，此次实验的成功，离不开力学所团队与中科院航团队的合作。

“力鸿一号”总设计师、总指挥史晓宁表示，本次微重力增材制造载荷是“力鸿一号”首飞任务的关键科学载荷。首飞任务不仅完成了从发射、在轨实验到安全返回的全流程闭环验证，更首次在太空环境中实现金属构件的“地外制造”，刻下了我国太空制造技术发展史上的一个关键印记。

“这使得‘力鸿一号’任务超越了火箭技术验证本身，迈入了太空制造能力建设的实证阶段。未来，‘力鸿一号’将继续作为灵活、可靠、低成本的太空实验平台，为更多前沿空间科学实验提供在轨验证能力，为我国深空探测与太空前沿技术自主发展注入创新动力。”史晓宁说。

姜恒表示，力学所与中科院航联合完成的国内首次太空金属增材制造全流程技术验证，为我国商业航天与科研院所的协同创新提供了典范，标志着我国在该领域已跻身国际前沿，相关技术突破为太空制造从实验走向应用奠定了基石。

不久前，南京航空航天大学航空航天学院教授台国安在朋友圈发了一则消息，并在配文中写道“吉祥中国结，迎接吉祥中国年”。

临近新春佳节，这样喜庆的文字十分应景，但他展示的内容却与春节没有半点联系，反倒是一项十分“硬核”的科技成果。

中国科学院院士、南京航空航天大学教授郭万林与台国安团队联合日本东京大学团队，成功地“织”出了一种名为“磷-锂双螺旋纳米带”的全新材料。该成果能从根本上解决低维磷材料“娇弱易坏”难题，并有望为高端光电、生物医用等领域的材料创新开辟新路径。

近日，这项研究成果发表于《科学进展》。但它与传统的“中国结”有怎样的关系？

“娇气”的磷基材料

当下，半导体技术的发展已经逼近物理极限，新一代光电设备也呼唤着核心材料的突破。

“在科学领域，超细、超薄的‘低维材料’，被视作突破现有信息器件性能极限的关键。”台国安在接受《中国科学报》采访时说，这类材料中，磷基材料凭借优异的导电、发光性能，成为制造高端光电设备的“潜力股”。

然而，磷基材料有一个致命的缺点——太“娇气”。

“在一维或二维的纳米尺度下，磷基材料只要在空气、水甚至普通环境中暴露几个小时，就会被氧化降解，根本无法投入实际使用。”台国安说，这种“娇弱”的特性，让低维磷材料的实验室研究与实际应用之间，长期隔着一道难以逾越的鸿沟。

为了破解这一难题，全球科研团队尝试过很多补救策略。

“之前的解决办法都是给材料‘穿保护衣’，比如在外部包覆一层膜或者隔绝环境，但这些都治标不治本。”郭万林介绍，这种外部防护会牺牲材料本身优异性能，相当于“为了保命放弃了特长”。更关键的是，这些外部防护手段在复杂工况下极易失效，无法满足实际应用的长期稳定性需求。

因此，如何跳出“外部防护”的思维定式，从材料本身的原子结构与空间构型入手，通过精准的结构设计，让低维磷材料“自愈”抗腐蚀、抗降解能力？这成为了困扰全球材料学界的一大难题。

“中西合璧”的结构

“以结构促稳定”是郭万林团队坚持多年的方向，在具体的策略上，他们采用了“原子级结构设计”。

具体而言，该团队基于理论预测，首次在实验中成功构建出一种由磷原子与锂原子构成的“双螺旋”纳米带。这种纳米带的内部结构由两种原子交替排列而成，呈现出高度有序的左右手螺旋交替形态。

从某些角度观察，这一结构酷似生命科学领域的DNA双螺旋结构；而如果将纳米带从中间断开，其横截面的结构酷似我国传统的“中国结”。

“‘双螺旋’代表了国际潮流，‘中国结’代表‘传统文化’，在这样一个纳米级结构中，我们实现了‘中西合璧’。”台国安笑着说。

相较于结构的特色，该材料所表现出的特性更令人惊喜。

通过电子显微镜等精密设备观测，这种纳米带的“身材”纤细而规整——厚度仅3.11纳米，相当于5层原子叠加，宽度能达到百纳米级别，长度更是突破10微米，而且结晶度高、形态均一。

更重要的是，这种结构具有超强的稳定性，相较于传统的黑磷纳米带在空气中数小时内就会被氧化，这种材料在225℃的高温空气中仍能保持结构稳定，泡在水里30天毫无退化，甚至在强酸中浸泡1小时，其晶格依然完整。

“这种稳定性源于材料内部织就的一张稳定的‘防护网’。”台国安解释道，这一防护网能产生三重协同作用——原子间的电子转移、螺旋链之间的相互“拉扯”固定，以及双螺旋结构本身形成的物理屏蔽层，从而在根源上挡住了氧气、水分的侵蚀，彻底摆脱了“外部保护衣”的依赖。

可供借鉴的研究范式

除了稳定性外，这种纳米带还具备出色的光学特性。

“它的带隙能在一定范围内可以灵活调控，而材料的发光亮度与带隙的大小直接相关，这就使调节纳米带亮度像调节灯泡亮度一样方便。”台国安说，同时该材料具有的优越光学响应特性使其在偏振敏感光电探测、非线性光学转换等领域大有可为。

值得一提的是，团队利用该材料优异的水稳定性，成功将其与水凝胶结合，研发出集高导电、自修复、高效光热转换于一体的复合水凝胶。性能测试显示，在可见光照射下，这种复合水凝胶的光热转换效率可达40.4%，而且经过多次升降温循环后性能几乎无衰减。

“这意味着它未来可应用于光热成像、精准温控、光热治疗以及柔性生物电子设备等领域，为新型智能医用材料的开发提供新平台。”郭万林说。

此外，该研究在未来也可能对人工智能设备的芯片研发带来影响。台国安告诉《中国科学报》，芯片的核心是晶体管，晶体管数量越多、尺寸越小，芯片运算速度就越快。过去几十年，晶体管尺寸已经从微米级缩小至纳米级，这一过程中就是在纳米尺度上操控材料。

“从这个角度说，现阶段谈论双螺旋纳米带材料在芯片领域的应用还为时太早，但不可否认的是，相关技术在这方面有一定应用前景。”台国安说。

在郭万林看来，这项成果的核心意义在于，将生命体系的“双螺旋”结构范式引入了无机低维材料领域，并使其具有了一定的普遍应用性。

他解释说，很多材料在宏观尺度下有很好的稳定性，但在纳米尺度或二维状态，其稳定性会出现断崖式的下跌，比如某些金属、硅材料等，而团队提出的“以结构促稳定”设计思路，不仅解决了低维磷材料的稳定性瓶颈，也为其他易退化低维材料的研发提供了可借鉴的范式。

“目前，我们只是针对低维磷材料的稳定性进行了研究，但事实上，很多低维材料都可以通过类似的方式提升稳定性。从这个角度说，我们目前的工作只是一个开头。”郭万林说。

按图索技

救援机器人有了“路线规划师”

本报讯(记者刁斐斐)哈尔滨工业大学深圳校区智能学部智能科学与工程学院教授陈浩耀团队在救援机器人导航领域取得重要突破，他们提出了一种充分利用地形信息的关节式履带机器人导航框架，框架中的层级化全局规划器能够快速生成可行的机器人行动路径，在保证可达性的前提下显著提升救援环境中的规划效率。近日，相关研究成果发表于《国际机器人研究杂志》。

关节式履带机器人非常适用于救援任务，但在包含多层楼结构、大幅高差以及崎岖地形的大规模三维救援场景中，其导航面临显著挑战。例如，通行区域之间通常呈现稀疏且复杂的拓扑连通性，传统二维平面导航方法难以有效应对如此高维、复杂的导航问题。此外，陡坡、楼梯等特殊地形对机器人的机动策略提出更高要求，导航必须充分利用地形信息对地形的可通过性进行细致评估，以确保安全。

现有的控制手段在关节式履带机器人这类复杂系统上的表现存在明显缺陷，也很难在满足机器人约束的情况下实现安全导航。

为此，团队提出了一种充分利用地形信息的关节式履带机器人导航框架，同时提出了基于流形优化的局部路径规划器，



研究团队在交叠楼梯、建筑物废墟、废弃建筑工地和建筑物集群等各类区域进行实物实验。受访者供图

使优化出的路径可以针对场景中特殊的可通行区域进行安全且适应的调整。基于流形模型预测控制器的全身协调控制策略依赖形心路径与地形感知信息，保证了机器人在崎岖地形上的稳定机动能力。

通过模块间的紧密协作，该框架实现了导航流程的解耦，在完备性、最优性、鲁

棒性和总体效率之间取得良好平衡。研究团队利用仿真和真实场景的丰富地形进行大量实验，并与国际先进方法进行对比，验证了提出的方法在成功率、精度等指标上具有显著的优越性。

相关论文信息：<http://doi.org/10.1177/02783649251403077>

数学研究为国产工业软件突围筑根基

本报讯(记者韩扬眉)2月2日，由中国科学院数学与系统科学研究院(以下简称数学院)主办的“CAX软件数学基础前沿论坛”在京召开。会上发布了数学院开发的灵龙算域MSCAX 2.0及其与龙芯中科联合研发的灵龙6000CAX一体化解决方案，实现了自主CAX工业软件内核与国产硬件的一体化适配。

该方案底层集成了PHG(并行有限元开发平台)和HIPO(高性能智能预条件子)，助力国产工业软件在自主可控硬件生态上，具备高通用性、高精度工程仿真能力，并有望在集成电路、电工装备等领域进行应用场景推广。

本报讯(记者韩扬眉)近日，由中国科学院数学与系统科学研究院(以下简称数学院)主办的“CAX软件数学基础前沿论坛”在京召开。会上发布了数学院开发的灵龙算域MSCAX 2.0及其与龙芯中科联合研发的灵龙6000CAX一体化解决方案，实现了自主CAX工业软件内核与国产硬件的一体化适配。

该方案底层集成了PHG(并行有限元开发平台)和HIPO(高性能智能预条件子)，助力国产工业软件在自主可控硬件生态上，具备高通用性、高精度工程仿真能力，并有望在集成电路、电工装备等领域进行应用场景推广。

本报讯(记者陈彬 通讯员王鹤立)近日，首台套国产大型智能压力耦合装备研制成功。

本报讯(记者陈彬 通讯员王鹤立)近日，首台套国产大型智能压力耦合装备研制成功。

近年来，在中国科学院先导专项“工业软件CAX一体化的计算内核”的支持下，数学院科研团队建成了以CASGEO(几何内核造型系统)、PHG、HIPO为代表的数学内核软件体系。

科研团队在数学理论上取得诸多重要进展，成功建立“任意复杂区域”上偏微分方程的任意高阶有限元方法数学理论，提出形状正则大单元概念及曲面结构hp反估计，研发出光滑曲面“网格自动生成技术”，并攻克了国际计算几何领域“奇点稳定计算理论”公开问题，为复杂结构仿真提供了坚实的数学支撑。在数值求解算法方面，科研团队构建了代数多重网格算法的

压力交换设备，则面临投资成本高昂、供货周期长、售后服务滞后等问题。因此，自主研发大型智能压力耦合装备，已成为关乎国家深部煤矿安全生产与战略自主的重要课题。

天津大学化工学院教授王越团队依托化学工程与低碳技术全国重点实验室，同行业企业开展了紧密合作，协同攻关，最终实现了从理论研究、技术研发到成套装备设计制造的全链条突破。

该装备成功攻克了四大核心难题：团队通过巧妙的结构设计，引入压力预平衡策略，

消除了水锤现象，实现了16兆帕高压流体与4兆帕低压流体间的高效率势能转换；在冷热水直接接触势能交换过程中，团队通过创

新技术手段，将冷水温升严格控制在0.5

度到0.5摄氏度的超低水平，在保障装备高效运转的同时极大提升井下降温效果；面对装备承压等级高、温度场和压力场切换频次大等多项挑战，团队以理论研究和验证测试相结合确保了核心部件具备高可靠、长寿

命、低流阻的优异性能；装备搭载了先进的

人工智能架构，具有高通用性、高同步率、高拓

展性等特点，实现了地面集中降温系统动态感知、装备运行精准调控、系统安全实时监测等智能化功能。

据悉，该装备的成功研制不仅为煤矿下热害治理提供了高效、经济、可靠的国产化解决方案，也为提升我国能源行业的安全生产水平与科技自立自强能力奠定了坚实基础。