

3D 打印,让“制造”拥有更多可能

卢秉恒 李涤尘



近期,英国《自然》杂志刊发文章,介绍3D打印在科学实验领域的创新应用:植物学样品前处理工具、声学头骨模型、化学流动反应器、催化搅拌珠、神经科学动物悬吊系统等科研器具均可快速定制制备。文章将3D打印比作科研人员攀登科学高峰的“登山杖”——它能够快速把创新构想转化为实体物件,在时间和成本上明显优于传统制造。

从实验室工具走向产业关键工艺,从地面制造延伸到太空“原位生产”,从打印零件迈向“打印生命”,3D打印正不断改写人们对“制造”的理解。伴随这项技术向着简易化、智能化迭代,大量传统制造工艺难以实现的复杂结构和形态正被制造出来。它既是科技创新的有力工具,也为人类生产和生活方式的深层变革打开新的可能。

效率更高、成本更低地制造复杂内部构造,催生更加灵巧、分布式的新型生产方式

3D打印的“学名”是增材制造。与传统“减材制造”——从实体材料中切削去除多余部分——不同,增材制造把金属、聚合物、陶瓷、玻璃或复合材料等原料,从液体、粉体、线材等离散形式逐层累加,制造出三维实体。其突出的优势在于,它可以效率更高、成本更低地制造蜂窝结构、点阵结构等复杂内部构造。在保证强度的同时减轻重量,提升零部件的比强度和比刚度。

自上世纪80年代诞生以来,增材制造从单一工艺,发展出光固化成型、黏结剂喷射成型、金属熔覆成型等多条技术路线,形成交叉融合的技术领域。2012年,英国《经济学家》将其视作“第三次工业革命”标志性技术,提出计算机与3D打印的结合,或将催生更灵巧、分布式的新型生产方式。

从玩具、首饰到食品、房屋,再到汽车、飞机、火箭,如今3D打印已从实验室走向工业生产和日常生活,成果更加丰富。相关数据显示,2025年全球3D打印市场规模约为242亿美元。工业级市场中,航空航天、医疗、汽车、建筑等应用持续拓展;消费级市场中,AI建模、智能切片、自动校准等技术显著降低使用门槛,家庭个性化定制、潮玩文创、教育数字化等场景不断涌现。

同时,增材制造也在不断革新传统的生产组织方式。波音公司通过全球3D打印中心就近生产飞机零件,减少运输成本。德国EOS等企业探索“零件按使用量计费”模式,企业无需购买设备即可调用全球打印网络。同时,推动创客模式蓬勃发展,创作者可通过云平台实现“设计即生产”,形成“线上协同设计、线下本地制造”的柔性供应链。

在航空航天、海洋工程、核工程、电子信息、生物医学等领域加快应用发展

近些年,增材制造在航空航天、海洋工程、核工程、电子信息、生物医学等前沿领域,展现出广阔应用前景。

在航空航天领域,3D打印已成为无人机、火箭发动机、卫星支架等关键部件的重要工艺。中航迈特公司采用自研钛合金粉末,借鉴鸟类骨骼、昆虫翅膀的结构对零件进行拓补优化,一体成型高性能机翼支撑构件,重量减轻40%,续航能力提升26%。美国SpaceX猛禽系列发动机依托3D打印技术将数百个零部件精

减为少数几个,制造成本显著降低。

在海洋工程领域,3D打印可用于制造船舶螺旋桨、船体结构等复杂部件,缩短造船周期。北京理工大学重庆创新中心利用电弧3D打印技术制造船舶螺旋桨,将交货周期从传统铸造方式的约3个月缩短至10天。2025年,阿联酋推出全球首艘全3D打印双体游艇,使用回收海洋塑料垃圾打印,建造周期仅6天多,造价为传统游艇的1/3。

在核工程领域,3D打印能够制造出具有复杂内部结构的核反应堆核心部件、燃料元件和热交换器,增强核反应堆的安全性。美国核能初创公司Ampera已采用3D打印技术制造出全球首个全尺寸核反应堆模块,包括碳化硅反应器核心和压力容器,无需中途更换燃料和频繁维护,有望连续运行30年。

在电子信息领域,3D打印正推动智能可穿戴设备向小型化、多功能化发展。今年4月,美国莱斯大学开发出一种微波3D打印新工艺,可在常温环境下对导电墨水进行局部“按需加热”固化成型,为柔性电子和生物医学器件制造提供了新路径。

在生物医学领域,3D打印正从“替代加工”走向“重塑治疗”。体外诊疗模型和手术导航板提升了手术精准度;康复辅具延伸了患者身体功能;骨植入物、气管支架、血管支架等已进入临床试验阶段。西安交通大学研发的个体化3D打印可降解乳房支架,通过微结构仿生制造使支架力学性能更接近乳腺组织,可在人体内引导自体组织生长和愈合,推动乳腺疾病治疗向精准化、个体化发展。

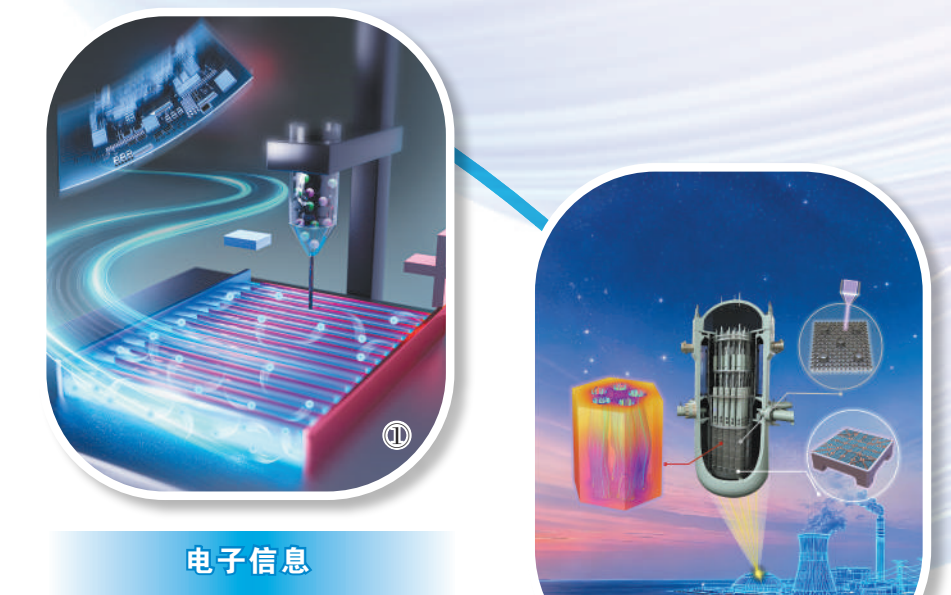
太空3D打印、细胞3D打印、4D打印等前沿技术不断拓展“制造”边界

增材制造正不断拓展“制造”的边界:它从地面走向太空,从工业部件迈向生命体构建,从静态结构升级为可随环境变化的智能形态,呈现出跨空间、跨学科、跨维度的发展态势。

太空3D打印,推动制造从“地造天用”迈向“天造天用”。它不再依赖从地球运送完整部件,而是将原材料送入太空,或利用太空资源直接制造。西安交通大学团队围绕月基制造开展研究,已推进适合太空环境的金属丝直写工艺、非金属材料验证及模拟月壤砖打印。今年以来,我国在亚轨道微重力环境下首次成功制备完整金属构件,随后又在600公里轨道完成太空金属增材制造演示验证,初步具备相关关键技术验证能力。国际空间站也开展了太空金属3D打印实验,该技术有望服务于在轨制造与维修、空间设施备件制造和深空任务自主保障,为长期太空驻留和深空探索提供支撑。

细胞3D打印,致力于再造“人体组织与器官”。它使用包裹活细胞、生物材料和生长因子的“生物墨水”,按人体组织三维模型逐层沉积,并在体外培养或植入体内后继续生长、融合。其最大挑战不仅在于精确成型,更在于处理活细胞、生物材料与微环境之间复杂的相互作用,目标不止于“形似”,更关键的是“神似”,即让打印组织在体内发挥相应生理功能。目前,皮肤、角膜、软骨等简单组织已进入临床应用探索阶段,血管、心脏瓣膜等结构也在推进中,但全尺寸功能性器官移植仍面临血管化、细胞存活、免疫相容性等难题,尚需持续攻关。

4D打印,则赋予物体“动态功能”。传统3D打印制造的是静态结构,而当它与智能材料结合,结构便能在温度、光照、电磁、湿度等外界刺激下发生形变或功能响应,实现自适应、可变化的智能特性。这种具备时间维度的制造方式,正逐步发展为4D打印技术。其技术核心是,让打印结构在外界激励下自主改变形状、性能与功能,满足“变形—变性能—变功能”的应用需求。4D打印在生命医学等领域的应用正快速发展。比如,可展开血管支架可



电子信息

在植入后按预设形态展开,降低了手术复杂度;自适应药物释放系统可根据体内环境精准控制释药节奏,优化患者治疗过程。

未来,4D打印还有望在组织工程支架、自适应机翼、磁控软体机器人等方向逐步落地。在此基础上,还可进一步展望5D打印:打印后的结构在生化环境中逐步转化为生物组织,甚至“生长”为生物器官。目前,再生骨血管化等研究正在推进,有望为人工器官制造开辟新路径。

当前,3D打印正成为影响产业竞争力、供应链韧性和科技创新能力的重要力量。美国推出“增材制造推进”计划,德国将增材制造纳入“工业4.0”关键支柱。我国把增材制造作为智能制造和制造强国建设的重要方向,已建立国家增材制造创新中心,为航空航天、高端装备及新质生产力提供关键共性技术,目前正围绕空天海重大装备轻量化开展攻关研究。

与数千年历史的铸锻焊等成型制造技术、数百年历史的车铣刨磨等减材制造技术相比,3D打印只有40余年历史,是一项年轻的制造技术。其未来的一大重要发展方向是多材料功能结构一体化制造,这需要进一步研究材料、工艺和装备对件精度与性能的作用规律。随着人工智能、新材料、生物制造和太空制造等技术不断拓展,3D打印将进一步融入生产与生活,持续推动先进制造业向智能化、绿色化、个性化方向发展。

(作者分别为中国工程院院士、西安交通大学教授、国家增材制造创新中心主任,西安交通大学精密微纳制造技术全国重点实验室教授、中国机械工程学会增材制造分会副主任委员)

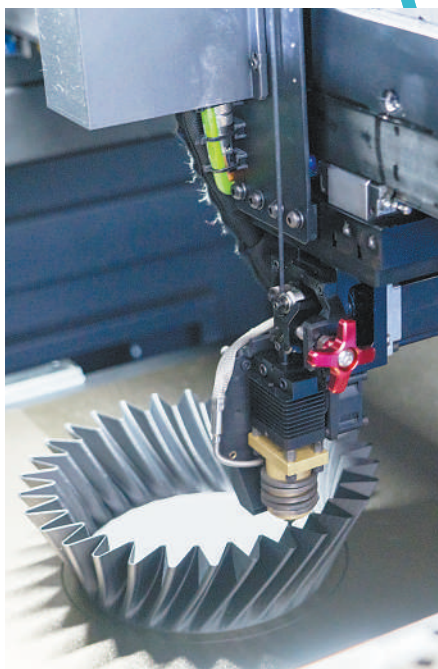
图①至图④:增材制造前沿应用方向示意图。中国机械工程学会供图



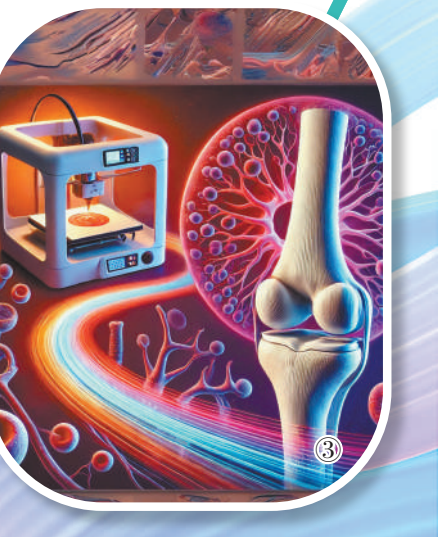
太空制造



核能动力



▲2026深圳国际3D打印、增材制造及精密成型展览会上展示的大尺寸3D打印设备。毛雨东摄(影像中国)



组织器官

落地续能。该工作以扭转储能替代弯折、拉伸储能,以几何约束将复位“编码”进结构本身,为软体连续跳跃提供了一条极简路径。

这种结构并不局限于陆地跳跃。研究团队进一步改造材料和尾部设计,使软环能够漂浮、划水并重返岸边,实现“跳跃—游泳—再次跳跃”的两栖运动。在水面上,尾部由“拍地起跳”转为“拍水推进”;当抵达倾斜岸边时,尾部弹跳产生的推力还能帮助它克服水面张力回到陆地。

在应用前景方面,尹杰认为,这类毫米级软体机器人体积小、重量轻、结构柔顺,适合进入草地、碎石、泥沙、浅水及水陆交界等复杂环境,开展环境感知、目标搜索和局部监测。未来如果实现多机协同,还可能拓展到集群化环境探索和大范围分布式监测。

从实验室走向实际应用仍有距离。下一步,研究团队希望探索利用自然光,使其摆脱对固定人工光源的依赖。尹杰表示,这项工作的意义不在于形成成熟的户外机器人产品,而在于证明一种非常简单的毫米级软体机器人,也能依靠材料与结构本身的物理智能获得持续、自适应的自主运动能力,为未来微型机器人进入真实非结构化环境提供新的设计思路。

科技大观

大脑如何清理自身废物?作为人体代谢最活跃的器官之一,大脑中近千亿个神经元在持续高强度传递和加工信息的同时,也不断产生受损蛋白、多肽等代谢产物。如果这些“代谢残渣”不能及时清除,就可能像城市排水系统淤塞一样,影响认知功能,甚至与阿尔茨海默病、帕金森病等神经退行性疾病的发生发展密切相关。

长期以来,科学界对脑内蛋白质清除路径的认识并不完整。近期,美国格拉德斯通研究所团队在《细胞》期刊发表一项最新研究,系统绘制了脑源性蛋白(大脑自身产生的蛋白质)在生理状态(身体在健康、正常运作时的自然状态,没有生病、受伤或受到外界干扰)下的全脑清除路径图谱,这一发现颠覆了以往认知,为理解大脑这一“隐形清洁系统”的运行方式提供了重要依据。

以往的研究大多依赖向脑脊液(包裹大脑与脊髓的无色透明液体)中注入外源性荧光示踪剂,通过观察蛋白扩散轨迹推测脑内蛋白的流出方向。这种方式有点像在平静的河流中倒入染料,再观察水流变化,虽然能看到“颜色去向”,却未必能真实反映河流本身的流动路径。此次研究团队另辟蹊径:他们在转基因小鼠的大脑中注射嗜神经病毒,使神经元表达一种发出绿色荧光的蛋白,这种蛋白像给神经元装上了“定位灯”,在荧光显微镜下会发出绿光,帮助研究者看清神经元的分布和连接。研究人员可以借此追踪蛋白质从产生、释放到最终清除的完整路径,从而在更接近生理状态的条件下描绘脑内蛋白清除网络。

研究结果显示,脑源性蛋白并非主要依赖传统认知中的由单一脑膜淋巴管系统汇入颈深淋巴结排出,而是广泛流向多个脑边界结构,包括硬脑膜、颅骨骨髓以及鼻腔相关通路等。更重要的是,不同脑区的蛋白清除还遵循“最近出口”原则:前脑区域产生的蛋白倾向于从鼻根和前方脑膜排出,深部脑区则更多选择颅底和背部硬脑膜路径。这说明,大脑清除系统并非只有一根“排污管道”,而更像一张分区管理的“排水网络”,各区域就近排出,以减少运输距离、提高清除效率。此外,脑膜边界的免疫细胞还会“监控”蛋白清除过程,并促成免疫耐受反应,避免免疫系统误伤大脑自身组织。

在正常生理状态下,这一多通路清除系统与蛋白生成之间保持动态平衡。然而在疾病状态下,这一平衡可能被打破。在急性神经炎症中,血脑屏障(保护大脑、限制有害物质进入脑组织的屏障)通透性升高,清除路径发生异常转移,使脑源性蛋白更容易“溢出”至血液循环,如同主排水管受损后污水从裂缝外泄;而在阿尔茨海默病模型中,清除能力整体下降,蛋白在脑内逐渐堆积,更接近“排水系统整体淤塞导致排流减慢”的状态。这些结果提示,在不同疾病中,蛋白质清除系统发生异常的机制存在差异。

这一研究首次以近乎生理的方式绘制了大脑自我清洁的路径,为理解脑稳态维持和神经退行性疾病的发病机制提供了新思路。过去,相关治疗多聚焦于减少异常蛋白生成或促进其降解;但如果清除通路本身存在结构或功能障碍,仅从减少“产生端”入手,可能难以从根本上改善疾病进程——这就像只减少垃圾产生,却不疏通已经堵塞的管道,系统依旧难以恢复正常运行。

在此背景下,恢复或增强脑内蛋白清除通路的功能成为值得关注的方向。未来,或可通过进一步阐明蛋白清除受阻的分子和细胞机制,开发针对脑膜淋巴系统与脑边界功能调控的干预策略,通过“优化清除”达到疾病防治效果。当然,这项研究目前主要基于小鼠模型,人类大脑是否具有完全相同的清除组织原则,仍需进一步验证。从基础研究发现到临床治疗转化,道路或许漫长,但认清方向往往是最关键的一步。

(作者为中国科学技术大学合肥微尺度物质科学国家研究中心副研究员)

大脑如何实现「自清洁」

时美玉

研究人员绘制火星土壤分类图

据新华社悉尼电 (记者薛艳雯、李惠子)澳大利亚悉尼大学研究人员近日宣布建立了一个全面的火星土壤分类体系并绘制全球分布图,为研究火星不同区域的土壤特征、探索植物种植条件提供了新框架。

悉尼大学日前发布的新闻公报说,这项研究由该校博士生丹尼尔·欧文主导,利用轨道观测数据和模型,根据土壤质地、矿物组成、酸碱度和剖面厚度等特征,将火星土壤划分为10个主要类别、100个组合类别和2000个详细类别,并绘制了全球分布图。研究团队还初步评估了不同土壤类别对植物生长的适宜程度,考察指标包括持水能力、酸碱度和砾石含量等。

研究人员强调,这并不意味着植物能够直接在火星土壤中生长。未来若要在火星种植作物,仍需建设受控环境,并提供水分和养分,同时处理土壤中可能存在的有害物质。

研究人员表示,下一步可在地球上利用模拟火星土壤开展种植实验,比较不同土壤条件下的植物生长情况。未来火星探测器采集的数据和样本也有助于验证相关模型。

本版责编:王 慧 黄发红
版式设计:张芳曼

创新汇

让“小个子”机器人跳得高、走得远

本报记者 李 墨

移动、起跳、翻转、落地、再次起跳……在恒定红外光照下,一个毫米级的软体机器人正自主完成连续跳跃。近期,美国北卡罗来纳州立大学研究团队在《美国国家科学院院刊》上发表成果,提出一种新型自复位软环跳跃机器人。这个形似泪滴的“小个子”机器人运动员无需人工复位,也无需复杂控制系统,仅靠材料与结构本身的“物理智能”,就能在恒定光照下连续跳跃超过1000次,垂直跳跃高度最高可达自身高度的80倍,水平跳跃距离超过自身长度的3倍。“这项工作的关键,并不是依靠复杂的机械机构或电子控制来实现连续跳跃,而是通过液晶弹性体智能材料与环形结构相结合,把储能、释能、起跳和复位的整个运动循环‘写进’机器人本身。”该研究通讯作者、北卡罗来纳州立大学机械与航空航天工程系教授尹杰在接受本报记者采访时表示。

连续跳跃是穿越复杂、非结构化环境的有效运动方式。但对软体机器人来说,实现

自主连续跳跃并不容易:它需要可循环的能量储存与释放,需要落地后的自动复位,还要在空中保持稳定姿态,并适应不同地形。以往许多软体跳跃机器人只能完成单次跳跃;若要连续跳跃,往往需要人工复位,或不断切换外部刺激。由于结构复杂,它们在起跳和落地时也容易受到扰动,难以稳定恢复适合下一次起跳的姿态。

对此,研究团队从结构设计入手,给出了一种简洁方案。软环主体由液晶弹性体材料制成,弯曲成环形后,两端通过铝管连接,形成带有V形刚性尾部的闭环结构。液晶弹性体是一种能将光或热刺激转化为形状变化的智能材料。在恒定红外光照下,材料受热收缩;由于受光面与背光面存在温差,软环会自发扭转,像给弹簧“上发条”一样储存弹性能量。

随着扭转不断积累,V形刚性尾部逐渐弯曲翘起。当达到临界状态后,结构突然失稳,

储存的弹性能量快速释放,尾部高速拍击地面,将软环弹射到空中。离地后,扭曲的软环会在空中自动解扭,恢复原状,落地后即可再次储能、再次起跳。整个过程不需要机载传感器、电子控制器,也不需要人工反复干预。

“环形结构解决了‘能不能连续跳’的问题,质心调节则帮助解决‘能不能朝目标方向稳定跳’的问题。”尹杰说。所谓质心调节,是指通过在环体头部增加少量配重,使机器人的质量分布前移,从而抑制大幅翻转,提高连续跳跃的方向稳定性。通过调节尾部夹角、配重比例和光照强度,机器人可在爬行、定向跳跃和垂直跳跃之间切换。

中国科学院宁波材料技术与工程研究所、海洋关键材料全国重点实验室研究员陈涛对本报记者表示,以往软体机器人每次跳跃需人工复位或外部调制,这是因为在恒定外界激励下,实现可循环的“储能—释能—复位”闭环极难,需要同时实现能量回收、空中姿态稳定与