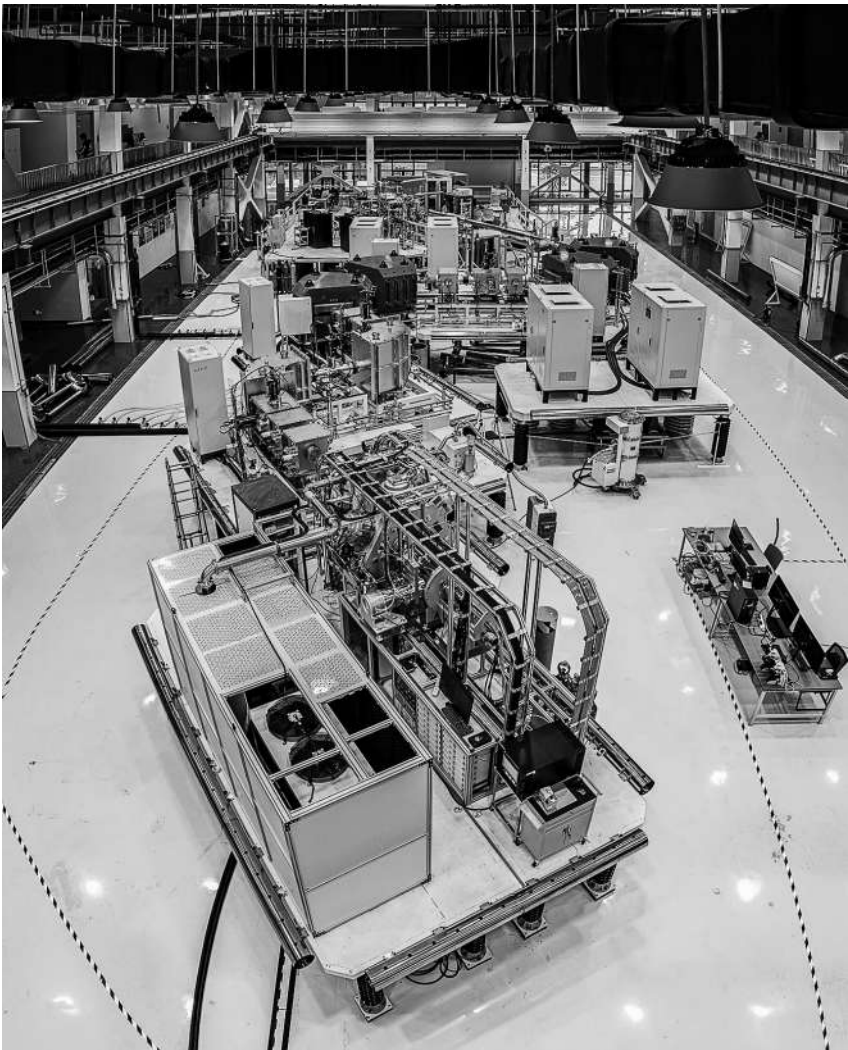


- 原子级制造是“制造领域的终极变革”，或将引发“一场触及极限的制造革命”
- 作为引领新一轮科技革命和产业变革的关键性“根技术”，原子级制造正在加速从实验室走向产业化
- 这场原子尺度的革命，将大幅提升装备性能，推动装备制造的竞争从工艺优劣转向“原子级对决”

原子级制造：制造业的“终极赛道”

■赵旺



能效，并降低生命周期能耗。

原子级制造突破了传统制造范式，推动制造技术从“工艺决定性能”到“结构决定性能”的根本跃迁。专家预测，原子级制造将成为“制造领域的终极变革”，引发“一场触及极限的制造革命”。

有望迎来产业化发展浪潮

原子级制造是先进制造技术向极微观深入发展的必然趋势，也是当前全球原始创新和科技与产业竞争的战略制高点。

原子级制造并非某项单一技术，而是一个庞大的技术群。其核心技术包括原子层沉积、原子层刻蚀、分子束外延、原子团簇束流技术、扫描探针操纵以及原位表征与检测技术，等等。

原子层沉积与原子层刻蚀产业化进展最为迅速，是先进芯片制造不可或缺的“左右手”。

原子层沉积是一种先进的薄膜制备技术，可理解为给材料表面“穿衣服”。不过，这件“衣服”精细到极致，并非整块“布料”一次性覆盖，而是逐层“编织”。原子层沉积厚度控制极其精准且覆盖均匀，在芯片制造等领域得到广泛应用。例如，在晶体管上沉积几纳米厚的氧化铅绝缘层，可以让芯片跑得更快、耗电更少。

原子层刻蚀可理解为给材料表面

“脱衣服”。不过，这件“衣服”并非整块撕下，而是逐层剥离。其核心机制是先通过化学手段让最表层的原子松动，再用低能粒子精准地将这一层原子摘走，一个周期去掉掉一个原子层。这种“剥洋葱”式的逐层去除方式，让原子层刻蚀具备极高的控制精度和极低的刻蚀损伤，成为下一代高性能芯片制造中不可或缺的关键技术。

原子团簇束流技术等许多技术还处于从实验室探索向规模化应用迈进的阶段。

原子团簇束流技术是将原子聚集成团簇后，形成沿同一方向运动的高速粒子流——它既能充当原子级精度的“刨刀”，又能作为原子重组的“分子合成器”，创制出常规条件下无法获得的新材料与新分子。前段时间，南京大学联合国内相关单位搭建的原子极限微制造实验设施，利用原子团簇束流技术，5分钟内可生成上千种全新人工分子物种，开辟了原子创制人工分子的全新路径。

总体来看，原子级制造技术群正多点突破、加速落地，但距离大规模应用还有一段距离。不少专业人士对原子级制造未来的发展持乐观态度。有专家认为，随着单原子、团簇、逐原子层等操控技术不断突破规模化瓶颈，加之算力提升让原子精准设计成为现实，多重因素叠加，推动原子级制造从实验室概念走向产业化应用，在未来10年内或将迎来产业化发展浪潮。

从原子尺度重塑未来战场

2025年12月，美国国防高级研究计划局启动“水晶宫计划”项目，探索运用原子级制造革新下一代军用微系统的单晶无机材料生长方式，以支撑先进雷达、自主空中平台等国防装备发展。

可见，原子级制造技术正加速从前沿突破走向工程化应用，其在军事领域的多维度价值也逐渐显现。

首先，原子级制造有望使军用材料突破性能“天花板”，实现高强度、超轻量化、极端环境耐受性等跨越性提升。

以二氧化钒为例。二氧化钒是自适应红外伪装的典型材料，然而它有个致命弱点，那就是在空气中加热到一定温度时就会氧化失效。科研人员利用原子层沉积技术，在二氧化钒颗粒表面包裹一层三氧化二铝保护壳，使得二氧化钒在保持显著红外发射率调节能力的同时，大幅提升了抗氧化能力，有望解决二氧化钒“有用但不耐用”的军事应用难题。

其次，原子级制造在军用电子领域具备巨大的应用潜力。

原子级制造的红外探测器具备更高的响应率、更低的噪声和更低的成本，已成为红外探测装备重要发展方向。德国弗劳恩霍夫应用固体物理研究所研制的欧洲首台长波段红外超晶格相机，可在长波红外波段完全无光照条件下穿透烟尘探测目标；波兰基于Ⅱ类超晶格技术开发的制冷型红外探测器阵列，将集成于波兰军队及欧洲国防工业的新一代作战平台和防空系统中。

此外，原子级制造有望实现军用电

池高比能、高安全的跨越式突破。

例如，基于原子级制造技术制备的高比能锂电池，能量密度较传统锂电池明显提升，可以更好地满足无人机、自主车辆、无人潜航器等高耗电装备对电池轻质、长航时、大功率等方面的需求。目前，美国、欧盟、英国的许多科研团队均在积极探索原子级制造技术在锂电池领域的应用路径。

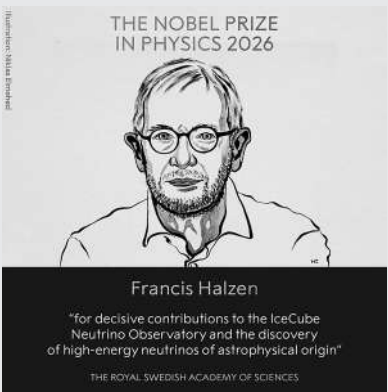
原子级防护的军用高能电池则是另一重要突破口。美国纳米锻造公司利用原子层沉积纳米涂层技术，可在电池材料表面形成超薄防护层，显著提升电池的耐久性、安全性和循环寿命，相关产品已于2025年交付美国战争部进行测试。

原子级制造正在以原子尺度的精准设计与制造，重塑军事装备的性能边界和制造范式。未来，谁能在原子级制造的材料、工艺、装备和标准上率先形成体系化能力，谁就可能在下一轮军事变革中占据优势。

左上图：南京大学原子极限微制造实验设施。

程欢欣撰

热点追踪



2026年诺贝尔物理学奖获得者
弗朗西斯·哈尔岑。 资料图片

北京时间10月7日，瑞典皇家科学院宣布，将2026年诺贝尔物理学奖授予82岁的比利时裔美国物理学家弗朗西斯·哈尔岑，以表彰他“对冰立方中微子天文台的决定性贡献，以及发现具有天体物理起源的高能中微子”。他独享1200万瑞典克朗（约合802万元人民币）奖金，这是诺贝尔物理学奖自1992年以来首次由一位科学家独享。

中微子是构成物质世界的基本粒子之一，不带电、质量极轻，几乎不与物质作用，被称为“幽灵粒子”。在黑洞喷流、伽马射线暴等极端宇宙事件发生的现场，可见光被尘埃遮挡，伽马射线“走不远”，宇宙线被磁场偏转，引力波难以定位，唯有中微子不被吸收、不偏转，能从天体核心笔直冲出，跨越数十亿光年直达地球。因此，中微子也成为继电磁波、引力波之后又一种宇宙“信使”。

如此难觅的粒子，只能靠超大“靶子”来捕获。1988年，哈尔岑提出在冰层中埋设传感器，把冰川变成望远镜的大胆构想。高能中微子撞上冰中原子核会产生蓝色“光爆”（切伦科夫辐射），传感器据此反推其方向和能量。

20世纪90年代初，哈尔岑团队在南极部署了第一批传感器阵列，却发现冰下800至1000米存在大量气泡，传感器无法重建粒子轨迹。哈尔岑坚持向1500米以下的纯净冰层进发，最终证明了南极冰作为中微子探测介质的可行性。2004年，冰立方开始建设，在一立方千米的冰中，布设光传感器。到2011年冰立方建成时，已有86根电缆串起5160个传感器，全天候“倾听”宇宙的微弱蓝光。

多年的坚守，换来了宇宙“来信”。2013年，冰立方首次探测到太阳系外高能中微子，证实宇宙存在强大的天然粒子加速器；2017年，冰立方捕获一个超高能中微子，首次锁定高能宇宙中微子的源头；2023年，冰立方首次捕捉到来自银河系内部的高能中微子弥漫信号，以4.5个标准差的显著性首次看到银河系盘面的中微子辉光，印证了中微子天文学的观测能力……

算上本届，中微子研究已先后五

南极冰下，捕获宇宙深处『幽灵粒子』

——二〇二六年诺贝尔物理学奖成果解读

■隋坤硕 张庭瑜

次登上诺贝尔物理学奖领奖台——

1988年，莱德曼、施瓦茨和斯坦伯格因“中微子束流方法及通过发现μ中微子验证轻子的二重态结构”获奖；1995年，莱因斯因对中微子探测的开创性实验贡献获奖；2002年，戴维斯和小柴昌俊因探测宇宙中微子获奖；2015年，梶田隆章和麦克唐纳因发现中微子振荡获奖……五次诺贝尔奖，串联起人类探索和发现中微子的艰难旅途。而这条探索之路，还远远没有走到尽头。关于中微子，依然存在许多未解之谜。这些秘密像南极冰层深处偶尔闪过的蓝光，微弱、幽远，却足以指引下一代科学家继续追问。

霍尔推力器：在轨航天器的“动力心脏”

■王星懿 薛勇

我们的太空·新知课堂

提到航天动力，人们往往首先想到直冲云霄的火箭。它依靠燃料剧烈燃烧产生巨大推力，帮助航天器克服地球引力进入预定轨道。这种方式爆发力强、瞬时推力充足，但这种短时冲刺的动力模式并不适配长期、高精度的在轨作业场景。

此外，传统化学推进会消耗大量燃料。对于航天器来说，庞大的燃料贮箱既增加航天器自重，又挤占探测、通信、科研等其他核心设备的搭载空间，难以满足卫星、深空探测器等执行长效任务的需要。

于是，在化学推进之外，一种更加适配太空特殊环境的电推进装置——霍尔推力器应运而生。

霍尔推力器采用新型电推进技术，依托霍尔效应，通过电磁场对惰性工质进行电离与加速，依靠高速离子定向喷射，形成持续稳定、低量级的可控推力。该动力装置推力精度高、能量损耗低，适配太空微重力特殊环境，可满足精细化在轨作业需求，是现阶段支撑航天器长效在轨运行的核心动力装备。

太空在轨作业，更考验动力系统的调控精度、运行稳定性与持续续航能力。航天器在轨运行时，需要进行姿态微调、轨道修正等动作，完成对地成像、深空信号捕获等科研任务。霍尔推力器可实现微牛至毫牛级精细化推力调节，完成亚米级高精度在轨姿态与轨道控制，保障卫星稳定成像、探测器稳态飞行。

除此之外，霍尔推力器还具备平稳可控的动力输出特性，可支持航天器实施小范围、高精度的机动变轨。在空间碎片日益密集的今天，霍尔推力器大幅提升了航天器在复杂太空环境中的飞行安全性与在轨姿态稳定性。

近年来，低轨卫星规模化组网已成为航天发展主流趋势。成千上万颗卫星要实现长期在轨稳定运行，对动力系统的续航性能、运行稳定性与经济适用性提出更高要求。霍尔推力器正是为这样的时代而生。可以预见，在未来的太空舞台上，霍尔推力器将成为越来越多航天器不可或缺

的“动力心脏”，助力人类探索更遥远的太空、构建更可靠的空间基础设施。

德国“乌拉诺斯”战场智能感知系统——

从“看得见”到“看得懂”

■丁军一



随着无人机、地面无人平台与各类侦察传感器在各国陆军中大量列装，战场信息密度持续攀升，“感知过载、判断滞后”成为各国陆军共同面对的难题。

德国的军事智能化发展，立足于国防资源与实战需求，走务实推进路线。其当前大力建设的“乌拉诺斯”战场智能感知系统，正是解决这一难题的探索实践。

从作战逻辑看，该系统直击现代陆战核心痛点：传感器越来越多、信息越来越密，指挥员需要的不只是“看见”目标的手段，更是将海量信息迅速转化为可信判断的能力。“乌拉诺斯”战场智能感知系统将多型无人机、地面无人平台及雷达、声学、振动等传感器采集的数据统一汇集，由人工智能完成目标关

联、去重、校验与态势更新，再通过现有战场管理终端生成近实时统一态势图。这本质上是把战场上的“多双眼睛”连成“一张网”，让指挥员看到的不再是零散画面和孤立坐标，而是较为完整的目标位置、活动状态与变化趋势。

“乌拉诺斯”战场智能感知系统实际上重塑了“发现—判断—行动”信息链路。信息处理方式已从过去依靠人工汇总比对多源信息，转变为如今的“机器先筛、人员再判”，人工智能承担了大量重复整理和高效比对工作，将人的注意力更多地集中于研判和决策，大幅压缩了从发现情到组织行

动的信息处理周期。

当然，从试验演示走向成熟列装，“乌拉诺斯”战场智能感知系统还有许多关键门槛需要跨越。比如，强电磁干扰下通信能否稳定、异质装备数据能否兼容、网络安全与软件迭代能否跟上威胁演变，等等。现阶段，其定位仍是工程集成与部队试验，而非成熟作战系统。它不是“德国版梅文”，更不是“自动开火系统”，当前主要面向营级战术监视，重点解决传感器数据割裂问题，人工智能仅承担信息分析与决策辅助，最终行动决定权始终掌握在人手中。

“乌拉诺斯”战场智能感知系统的意义并不止于一套情报处理软件，而在于推动侦察平台、指挥系统、防空、电子战和远程火力形成更紧密的信息闭环。未来战场对抗中，谁能更快地把海量数据转化为可信态势、更早形成判断并组织行动，谁就更可能掌握战场主动权。

左上图：人工智能运用于战场。 AI制图

他山之石