

## 瞰前沿

浩瀚宇宙中蕴藏的丰富资源，一直吸引着科学家去探寻。前不久，中国矿业大学研制出我国首台太空采矿机器人，这一科技突破，再次引起人们对太空资源的关注。为了追逐太空采矿梦想，科学家在太空资源勘查、钻孔技术及原位利用等方面开展了一系列探索研究。“星际矿工”如何采矿？本期“瞰前沿”，我们就来看看太空采矿离现实还有多远。

——编者

### 为什么去？

既能获取地外资源，也能牵引深空探测技术发展

人们向往太空采矿，最直接的需求是获取太空资源，以应对未来地球矿产资源可能枯竭的难题。

太空有哪些资源？远的不说，月球、太阳系中的小行星等就蕴藏着丰富的资源，其中一些还是地球缺乏的。科学家发现，月壤含有丰富的太阳风气体，其中有可控核聚变的重要原料——氦—3；月球上广泛分布的克里普岩，富含钍元素和稀土元素，且储量很可观。

在木星和火星轨道之间有一个小行星带，主要由岩石和金属构成的小天体组成。这些小天体富含铁、镍、钴、铂族金属等，以及水冰和氢氧化物，可用于太空基建、能源供应和生命支持等。

太空采矿的意义不止于此。“太空采矿与空间技术、采矿学、空间信息科技以及天文学、行星科学等密切相关，能够牵引科技与太空探索的发展。”中国矿业大学机电工程学院教授刘新华说。

近地小行星因其资源集中、开发潜力大且技术门槛较低，成为科学界关注的热点。刘新华介绍，小行星带中的铂族金属储量惊人，一颗直径1公里的小行星可能蕴含1亿吨铂，潜在开采价值很高。

哪些太空资源值得开采？在广东深圳科学技术馆馆长、深圳理工大学教授郑永春看来，太空资源主要包括两方面，即地球上稀缺的、值得花巨大代价去开采的一些高价值资源，以及长期太空生活所需的资源(比如有机物、水)。“有的资源从地球上带过去，成本非常高，必须原位利用。”郑永春说。

哈勃望远镜曾对小行星带内的灵神星进行光谱分析，发现它的金属含量高达82.5%，且这些金属大多暴露在表面。

郑永春解释，小行星是太阳系形成之后的残留物，有的以岩石为主，有的以金属为主。据估计，灵神星的主要成分是硅酸盐岩石和铁、镍等金属。

### 难在哪儿？

深空通信、能源供应、运输物流等环节都面临巨大挑战

太空采矿是一个长期的、极其复杂的系统工程。首先是微重力环境作业的挑战。小行星质量相对较小，引力极低，有的甚至接近零重力。传统采矿设备在这样的环境里难以稳定作业，可能因反作用力而失控，矿石采集运输效率极低。

“我们团队开发的太空采矿机器人，其基本形态为6足模式，有3个轮足和3个爪足，主要是为了适应太空中的微重力环境。”刘新华说，为解决失重带来的漂移，科研团队模拟昆虫的爪刺结构，设计了特殊的爪刺足。

除微重力的问题外，太空采矿工作还要面对原位资源利用的技术限制、极端辐射等情况，以及深空通信、能源供应、运输物流等困难，每一个都是巨大的挑战。

以能源供应为例，传统的深空探测依赖太阳能，深空或小行星带光照弱，太阳能电池效率大幅下降。小型核反应堆仍处于试验阶段，稳定性和安全性有待验证。“长期任务依赖可持续能源，现有技术难以满足高能耗需求。”刘新华说。

“将矿石从深空运回需克服巨大引力场，燃料消耗成本极高；若资源用于建设月球和火星基地，需建立轨道中转站和可重复运输系统，目前技术成熟度低。”刘新华说。

为解决一系列难题，刘新华教授团队在实验室模拟近地小行星环境，在地面对太空采矿机器人工作进行验证。结果显示，该机器人结合轮足与爪足设计，能够适应月球和小行星的复杂地形，集移动、锚固、钻探和采样功能于一体，可同时处理多种资源。另外，通过模拟微重力的悬挂机构，测试了该机器人运动特性的可行性。

“太空采矿成本主要与运载能力相关。”郑永春说，大幅度降低从地球到太空之间的运输成本，是“星际采矿”的前提，因此实现火箭重复利用非常关键。

# 太空采矿，离现实还有多远

本报记者 喻思南



### 前景如何？

相关研究处于初级阶段，科学家从资源勘查、钻孔技术等多方面开展探索

有关太空采矿的研究目前仍处于初级阶段。经过半个多世纪的深空探测，人类积累了较为丰富的资料及前期技术，其中部分技术经过改造、深化，未来可用于太空采矿，例如资源勘查、钻孔技术及原位资源利用等。

在太空采矿装备的研发方面，刘新华说，国际科学界推进的研发主要集中在自主机器人、原位资源利用、微重力环境作业、高效能源系统和材料技术等领域。例如，日本和美国成功验证了小行星采样技术；美国国家航空航天局专为月球采矿设计了机器人，配备旋转挖掘臂，可在低重力环境下高效采集月壤。

“短期内，试验性开采将以月球和小行星为目标，推动技术验证和商业化探索；中长期来看，太空采矿有望实现规模化，支持月球和火星基地建设，并催生太空经济。”刘新华说。

郑永春认为，太空采矿的主要目的是满足未来人类在太空中长期生活的需求，比如建立月球基地、火星城市等。“很大程度上，太空探索的进展程度取决于人类的决心。太空探索的投入似乎看不到产出，但会对科学发现和技术进步产生巨大的带动作用，从而产生巨大的经济和社会价值。”

太空采矿机器人的未来形态是什么样？

在刘新华的设想中，它是全自主的“太空工厂”，即具备自修复能力与跨天体适应性，可以远程操控，或通过脑机接口实现人机深度融合。要实现这些，有赖于人工智能、材料科学和能源技术等方面的突破，以及全球太空资源开发上的深度合作。

太空采矿机器人目前仍处于持续完善中。“团队将围绕模块化、智能化和资源高效利用等方面持续优化。”刘新华说。

图①：华中科技大学提出的月球玄武基地方案模拟图。华中科技大学供图

图②：太空采矿机器人试验机。中国矿业大学供图

## 唠『科』

金属也有“慢性病”？

打个比方，如果把金属看成长期处于高压状态的上班族，它也会患上疲劳损伤等“慢性病”——专业名称为循环端变或棘轮效应。就像生锈的齿轮卡住后，只能单向转动，金属在反复承受循环应力后，内部结构也会“卡”住，积累损伤直到突然断裂。

金属由无数微小的晶粒堆叠而成，就像“垒积木”，其内部变形通常借助“错位的接缝”(即“位错”)来协调。当金属被反复拉扯或挤压时，这些接缝会像被推倒的多米诺骨牌一样滑动，导致变形。如果受力方向总偏向一边，位错就会朝着一个方向越滑越远，金属的“骨骼”就会慢慢被压垮。

金属“慢性病”的危害有多大？

一方面，金属“慢性病”会带来极大的安全风险。一些金属表面看似完好，内部却已布满“裂纹”，可能毫无预兆地断裂。历史上的多起空难、桥梁坍塌都与此有关。传统高强度金属像“肌肉男”，虽然能扛重物，但反复弯曲时容易“抽筋”(即“循环软化”)，局部区域“肌肉溶解”(即“应变局域化”)，直至突然崩溃。

金属的“健康”也关系着科技的发展。在航天发动机叶片、核电站管道等“高压岗位”，传统金属很难承受极端考验。

科学界曾经广泛采用两种方案治疗金属“慢性病”：一种是给金属“增肌”，即通过把金属晶粒打碎成“纳米肌肉纤维”来提高金属强度，但这类材料易脆，一弯就断；另一种就是给金属“减脂”，即引入位错等柔术结构来增加塑性，但这些结构在循环应力下会“抱团偷懒”或结构粗化，反而让损伤容易集中在局部。

更棘手的是，传统理论认为，高强度和抗疲劳如同“鱼与熊掌”，就像要求一个人同时拥有举重冠军的力量和马拉松选手的耐力，一度被认为不可兼得。

前不久，由中国科学院金属研究所领衔的国际科研团队提出了一种全新的结构设计思路，通过自主开发的往复扭转技术改变金属材料的内部结构，使其在保持高强度、高塑性的同时，平均棘轮变形速率大幅降低，有望大幅提升极端环境下关键部件的使用寿命。

这样一套“治疗方案”，重点是两味“药”。一是梯度位错结构，就像给金属穿上特制盔甲——外层是“高密度钢丝网”(表面高密度位错区)，中层是“缓冲海绵”(过渡层)，内层是“韧性弹簧”(内部低密度区)。有序的结构让应力被层层分散，外力像“拳头打在棉花上”。二是共格马氏体相变，这可以理解为“纳米修理工”。当金属在循环应力下“受伤”时，内部会触发神奇的自愈机制：原子们集体“变身”，从面心立方结构转换为密排六方结构，同时生成无数亚10纳米的共格层片。这些层片相当于用“钉子阵”阻挡位错前进，把滑动的位错“抓”住存好，防止金属继续受损。“变身”释放的能量还能让位错结构像细胞分裂一样持续细化，达到“增肌”效果。

这项技术打破了科学界的传统认知——新材料在强度提升2.6倍的同时，抗循环端变能力比同类材料增强百倍甚至万倍，相当于造出既能举起卡车又能跑马拉松的机器人。未来，这项技术有望延长工业装备使用年限，如延长火箭发动机叶片寿命、延长核反应堆压力容器服役年限等。

(作者为中国科学院金属研究所研究员，本报记者刘佳华整理)

## 治好金属『慢性病』，有妙招

潘庆松

## 叶巴滩水电站取出逾38米混凝土芯样创国内纪录

**本报拉萨电** (记者鲜敏)金沙江上游川藏段装机规模最大的水电站——叶巴滩水电站大坝近日成功取出一根长度38.10米的混凝土芯样，相当于12层楼高，打破国内同类坝型大坝取芯纪录。

叶巴滩水电站地处四川甘孜藏族自治州白玉县与西藏自治区贡觉县交界处的金沙江上游，总装机容量224万千瓦，由中国华电集团有限公司投资、建设和运营。水电站最大坝高217米，是我国在建海拔最高双曲拱坝。

据了解，此次取芯为建设期大坝浇筑过程中的随机取芯。芯样总长38.10米，直径245毫米，一共贯穿了13个浇筑单元、12层水平施工缝面和80个浇筑层。经现场观测，取出的芯样表面完整光滑、质地密实，骨料分布均匀，层间结合优良。

混凝土的浇筑质量决定大坝“寿命”，芯样的完整性直接反映出层间结合混凝土的浇筑质量。项目团队联合院士专家通过开发智能浇筑、智能温控、智能灌浆等数字管理平台，应用“全坝中热水泥混凝土施工温控技术”“特高拱坝大体积混凝土质量控制技术”等，成功取出混凝土芯样。

## 玉米秸秆等废料可被转化成低成本糖

**据新华社北京电** 美国科学家近期研发了一种利用玉米秸秆等生物质废弃物生产低成本糖的新方法，有望推动可持续生物燃料的发展。

物质是指通过光合作用形成的各种有机体，包括所有的动植物和微生物；生物质能则是太阳能以化学能形式储存在生物质中的能量形式，是发展前景广阔的一种绿色能源。

生物质资源丰富且价格低廉，但由于纤维素和木质素等复杂结构分子的分解难度较大，其加工成本高一直是主要障碍。

美国华盛顿州立大学领衔的研究团队近期在英国《生物资源技术》杂志上发表论文称，他们利用亚硫酸铵碱性盐对玉米秸秆进行加工处理，将其转化为低成本的糖，用于生物燃料和生物产品的生产，从而提高了经济可行性。

研究人员使用氢氧化钾和亚硫酸铵在约80摄氏度的温度下对玉米秸秆进行预处理。这一处理方式使酶能够将纤维素聚合物分解为糖，然后这些糖可被进一步发酵转化为生物燃料和生物产品，且无需额外的化学回收步骤。

本版责编：肖 遥 曹雪盟 陈世涵  
版式设计：张丹峰

## 探一线

在上海张江科学城的实验室里，科学家正见证一场生命极限的突破——90摄氏度的密闭罐里，酶正在快速“瓦解”塑料。这款耐高温的塑料降解酶，是上海交通大学洪亮教授团队用AI设计改造的“新品”蛋白质。

当传统生物学家还在实验室用移液枪逐个测试蛋白质功能、组装“理想型”蛋白质时，洪亮团队的AI大模型“启明星”已构建出亿级蛋白质的“功能图谱”，能够精准、高效地设计出耐热、耐碱、耐酸等“超能”蛋白质，满足“定制”蛋白质的需求。

蛋白质是生命活动的物质基础，自然界中参与构成蛋白质的氨基酸有20种，一个蛋白质分子通常由几十个至上千个数量不等的氨基酸按照特定顺序排列而成。排序的细微差别，可能让蛋白质表现出截然不同的功能特性，比如稳定性、活性、亲和力等。过去数十年间，生物学家只能依靠实验方法来测定蛋白质的结构，揭示复杂的蛋白质结构会耗费生物学家大量时间。2018年，谷歌

## 用AI设计蛋白质 满足“定制”需求

本报记者 黄晓慧

DeepMind团队发布了AI大模型AlphaFold，它能精准地解析蛋白质的三维构造，为科研人员更高效、更精准地进行药物开发、疫苗设计奠定基础。

“使用AI设计蛋白质时，我们就在思考，设计的目的是满足某些功能需求，为何不训练AI模型，把满足功能需求的蛋白质直接设计出来？”洪亮团队决定训练一个与AlphaFold不同的AI大模型，挑战蛋白质功能设计的难关。

“我们利用AI技术学习不同自然环境下，各种生物体内蛋白质链条中氨基酸的排列规则。更重要的是，我们从温度、酸碱度、压强这3个维度，为5亿个蛋白质打上功能标签，然后把这海量的功能标签‘投喂’给AI大模型，使之能快速、精准地设计出耐热、耐酸、耐碱的‘皮实’蛋白产品。”洪亮说。

如果把一个蛋白质看作一块模具，那么

整个数据集就是装满90亿块模具的超级工具箱，这是迄今为止全球最大的蛋白质数据集。由36.2亿条陆地微生物蛋白质序列、26.4亿条海洋微生物蛋白质序列、24.3亿条抗体蛋白质序列、0.6亿条病毒蛋白质序列等组成的蛋白质数据集，蕴藏着从地表到极地冰川、深海沟壑的“适者生存法则”。

“比如这款耐热的塑料降解酶，我们先从‘启明星’中挑出几个具备耐热功能的蛋白质‘模具’，再使用AI技术修饰改造这些蛋白质‘模具’的氨基酸序列，提高它的耐热性，同步进行实验验证，从而避免了过去的高通量筛选，提升了蛋白质设计与改造的效率。”洪亮说。

在上海交通大学张江校区的自动化实验室里，机械臂正飞快地验证着AI设计的蛋白质。这里每天产生的实验数据，又会回流到AI系统中持续优化蛋白质模具，形成