

2021年中国重大科学、技术和工程进展

王康友, 徐丽娇, 刘志远, 祝叶华*

《科技导报》编辑部, 北京 100081

摘要 本着分门别类、本刊推荐、专家评选、宁缺毋滥、叙述事实的原则,从国内外重要科技期刊和科技新闻媒体所报道的中国科技成果中,按科学、技术和工程3个类别,由《科技导报》编辑部遴选、推荐候选条目,经《科技导报》编委、审稿人等专家通信评选,推选出2021年中国重大科学、技术、工程进展30项。(1) 2021年中国重大科学进展10项:阐明新冠病毒逃逸抗病毒药物的分子机制;揭示鸟类迁徙策略变迁的遗传基础;绘制东亚长时间尺度下古人群动态演化遗传图谱;实现基于吸收型量子存储器的量子中继架构;揭示人体正常组织体细胞突变规律;实现超顺电弛豫铁电体中的超高能量存储;利用FAST捕获迄今最大快速射电暴爆发事件样本;“嫦娥五号”月球样品研究为揭示月球演化提供新依据;研制出系列高性能铂合金催化剂;高压合成毫米级极硬的非晶碳材料。(2) 2021年中国重大技术进展10项:自供电软机器人成功挑战马里亚纳海沟;首次实现高性能的纤维聚合物锂离子电池;研发成功-271℃超流氦大型低温制冷装备;研制出应用于哺乳动物成像的自适应扫描光场显微成像仪器;世界最大的小鼠全脑神经元数据集建成;12英寸超精密晶圆减薄机正式进入集成电路大生产线;国产宫颈癌疫苗、四价流脑结合疫苗获重大突破;SWQSIM实现每秒4.4百亿亿次的持续计算性能;开发出搜寻暗物质的超灵敏量子精密测量技术;新冠病毒监测、防治取得系列重要进展。(3) 2021年中国重大工程进展10项:中国三代和四代核电工程取得新突破;中国首次火星探测任务取得圆满成功;中国强流高功率质子加速器研制再创世界纪录;“海牛II号”刷新世界深海海底钻机钻探深度;中国空间站开启有人长期驻留时代;全球在建规模最大的白鹤滩水电站首批机组投产发电;世界首套设计时速达600 km的高速磁浮交通系统成功下线;中国首个自营超深水大气田“深海一号”全面投产;“海斗一号”跨入万米科考新阶段;世界最大推力整体式固体火箭发动机试车成功。

关键词 中国科技成就;重大科学进展;重大技术进展;重大工程进展

收稿日期:2022-01-27;修回日期:2022-02-10

作者简介:王康友,研究员,研究方向为科技传播,电子信箱:wangkangyou@cast.org.cn;祝叶华(通信作者),副编审,研究方向为科技编辑学,电子信箱:zhuyehua@cast.org.cn

引用格式:王康友,徐丽娇,刘志远,等. 2021年中国重大科学、技术和工程进展[J]. 科技导报, 2022, 40(3): 6-24; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2022.03.001

《科技导报》自2004年第3期刊登“2003年中国重大科学、技术与工程进展”以来,至今已连续18年遴选发布中国年度重大科学、技术和工程进展^[1-19]。为盘点2021年中国重大科学、技术和工程进展,《科技导报》编辑部从国内外重要科技期刊和科技新闻媒体2021年1月1日至12月31日间发表、公布或报道的中国科技成果中,遴选、推荐27项重大科学进展、28项重大技术进展、27项重大工程进展候选条目,由《科技导报》编委、审稿人等专家通信评选,根据每项进展的得票情况,推选出2021年中国重大科学进展10项、重大技术进展10项、重大工程进展10项,以下按发表、公布及报道的时间先后逐一介绍。

1 2021年中国重大科学进展(10项)

1.1 阐明新冠病毒逃逸抗病毒药物的分子机制

随着新冠肺炎疫情的蔓延,不断出现的病毒突变株给疫情防控和疫苗研发带来了严峻挑战。阐明新冠病毒逃逸抗病毒药物的分子机制,开发能够有效应对各型突变株的广谱药物是当前亟待解决的问题。

新冠病毒转录复制的核心结构是由复制酶组成的转录复制复合体(RTC)。该结构是一种复杂的超分子蛋白质机器,在各型突变株中高度保守,也是开发广谱抗病毒药物的关键靶点。清华大学饶子和、姜智勇和上海科技大学高岩等对新冠病毒的转录复制机制开展了深入研究,先后阐明了“核心转录复制复合体”(C-RTC)、“延伸转录复制复合体”(E-RTC)和“加帽中间态转录复制复合体”[Cap(-1)'-RTC]的工作机制。研究团队通过解析新冠病毒mRNA“帽结构合成”过程的关键复合物Cap(-1)'-RTC的2.8 Å的冷冻电镜结构,证实聚合酶nsp12的NiRAN结构域在“帽结构合成”过程中起到重要催化作用,首次明确了mRNA合成过程中全部的关键酶分子(图1)^[20]。

在此基础上,研究团队解析了RTC关键状态的三维结构,阐明病毒mRNA加帽、基因组复制矫正和逃逸核苷类抗病毒药物的分子机制^[21]。研究

揭示了新冠病毒“反式回溯”剔除错配碱基和抗病毒药物的机制,提出这可能是瑞德西韦等抗病毒药物效果不良的原因。研究团队通过深入研究新冠病毒逃逸核苷类抗病毒药物的分子机制,为开发广谱、高效的抗病毒药物提供了关键的科学依据^[22]。相关成果分别于2021年1月7日和2021年5月24日发表于《Cell》。

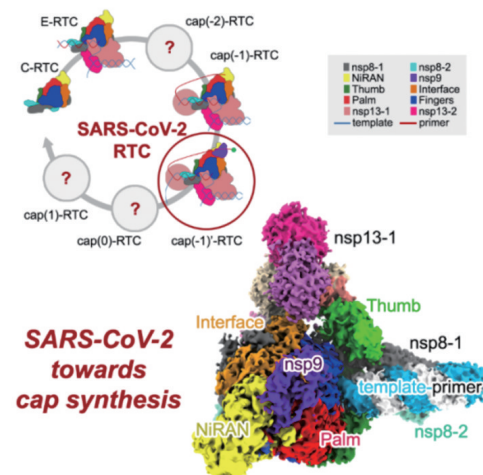


图1 新冠病毒mRNA“帽结构合成”复合物结构
(图片来源:《Cell》)

1.2 揭示鸟类迁徙策略变迁的遗传基础

为了适应气候变化等环境波动,很多鸟类将季节性迁徙作为重要的生存策略。迁徙路线的形成和变迁,以及气候变化对鸟类迁徙的影响,一直是学界研究的热点和难点。

中国科学院动物研究所詹祥江团队与多国科学家合作,在大陆尺度对北极游隼(*Falco peregrinus*)的迁徙进行了系统研究(图2)^[23]。研究人员利用安置在鸟背上的卫星跟踪设备,对来自欧亚北极种群的56只游隼的迁徙路线进行追踪,共确定了150条完整的迁徙路线。研究发现,游隼主要通过其中5条路线穿越亚欧大陆,西部游隼表现为短距离迁徙,东部游隼为长距离迁徙,且不同路线之间的环境异质性很强。研究还发现,长距离迁徙的游隼携带一个与长时记忆能力相关的优势等位基因*ADCY8*,表明长时记忆可能是鸟类长距离迁徙的重要基础。该研究结合遥感卫星追踪、基因组学、神经生物学等研究手段,揭示鸟类迁徙策略变迁的遗

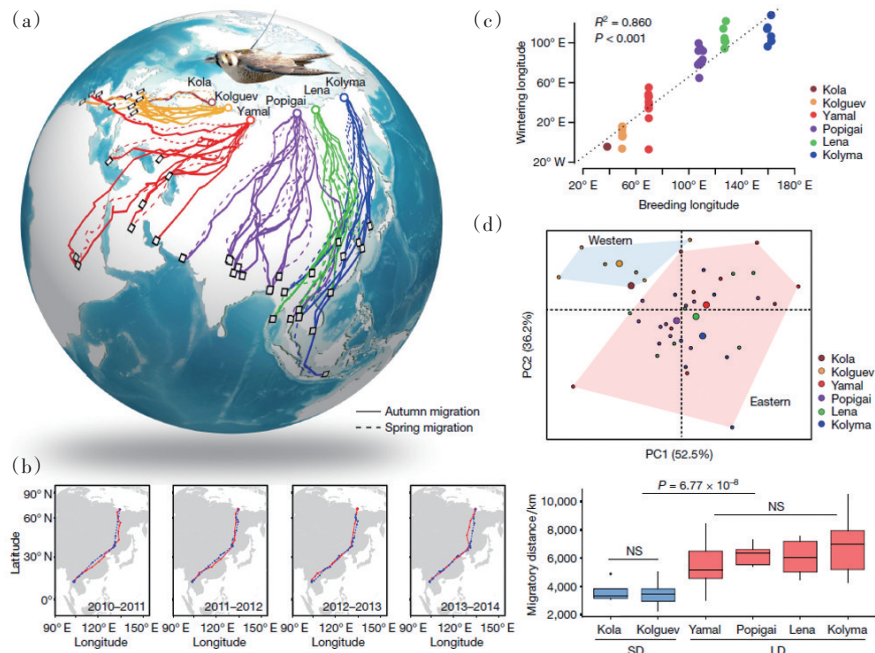


图2 北极游隼卫星追踪和迁徙系统(图片来源:《Nature》)

传基础,为全球气候变化背景下鸟类的保护工作提供了理论依据^[24]。相关研究成果作为封面文章于2021年3月3日发表在《Nature》上,并被《Nature Ecology & Evolution》杂志评为2021年12项年度回顾工作之一。

1.3 绘制东亚长时间尺度下古人群动态演化遗传图谱

现代人类在东亚地区的起源与演化问题一直是人类学研究领域广泛关注的焦点,古基因组技术与遗传学分析手段的不断进步,为阐明东亚人群的动态演化过程提供了新的思路。

中国科学院古脊椎动物与古人类研究所付巧妹及云南大学张虎才团队对东亚北部人群的古基因组进行了研究,系统绘制出4万年来东亚北部人群的群体动态演化图谱^[25]。研究人员将中国黑龙江地区距今33000—3400年的25个早期人类样本,与中国北京4万年前的田园洞人样本的古基因组序列进行演化遗传学与群体遗传学分析。结果表明,在末次盛冰期之前,田园洞人相关人群广泛分布于东亚北部地区;在距今1.9万年的末次盛冰期前后,田园洞人相关人群逐渐消失,而东亚古北方人群已在黑龙江出现,且自距今1.4万年起该人群

基本保持遗传连续性。该研究是首次在东亚地区开展跨度为4万年的大规模人类古基因组研究,研究成果填补了东亚北部人群遗传历史的时间断层,为进一步探索东亚人群与环境的关系提供了重要遗传学证据^[26]。相关研究成果于2021年5月27日发表于《Cell》。

付巧妹团队与云南省文物考古研究所吉学平等合作,对来自中国南方(广西和福建)的31个古人类样本进行了古基因组测序,揭示了自1.1万年以来东亚与东南亚交汇处人群迁徙与互动的历史(图3)^[27]。研究首先揭示广西地区存在一支此前未知的、以隆林人为代表的东亚古老人群,且直到6000年前依然在该区域活动。其次,研究证明距今9000—6000年,广西人群祖源成分复杂多样,且在农业出现前已与东南亚人群存在基因交流。最后,研究发现距今6000—1500年,广西人群发生更替。距今1500—500年的古人群基因组数据与距今6000年之前的史前古老人群完全不同,但与现今生活在广西的侗傣语系和苗瑶语系的人群有着密切的遗传联系。这一研究对了解东亚和东南亚的人类进化历史、迁移轨迹等具有重大意义,也为进一步阐明横跨东南亚的人类基因在史前具有显

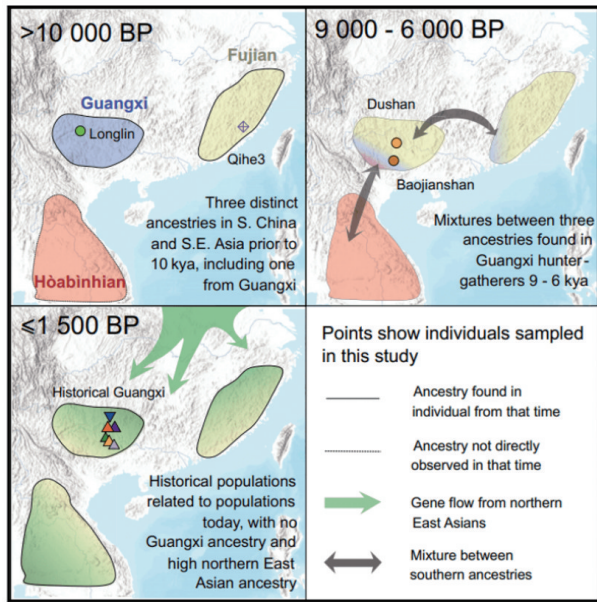


图3 东亚与东南亚交汇处自1.1万年以来人群动态示意 (图片来源:《Cell》)

著多样性提供了重要依据^[28]。相关研究成果于2021年6月24日发表于《Cell》。

1.4 实现基于吸收型量子存储器的量子中继架构

实现远程量子纠缠传输,是构建全球量子通信网络的核心任务。但由于不可克服的信道损耗,单光子在光纤传输中会呈现指数级衰减,导致目前量

子态在光纤中传输的距离被限制在100 km左右。

量子中继方案是解决该问题的有效措施,中国科学技术大学郭光灿团队李传锋、周宗权研究组实现了首个基于吸收型量子存储的量子中继(图4)^[29]。研究人员设置了间距为3.5 m的2个量子节点,每个节点内包括1个偏振纠缠光子源和1个1 GHz带宽的固态量子存储器。当量子存储器捕获并存储纠缠光子对中的一个光子,另一个光子同时通过光纤传输至中间站点进行贝尔态检验。一次成功的贝尔态检验会完成一次成功的纠缠交换操作,使得这2个空间分离的固态量子存储器之间建立起量子纠缠。量子中继基本链路的演示实验中实现了4个时间模式的复用,使得纠缠分发的速率提升了4倍,实测的纠缠保真度达到80.4%。该成果证实了基于吸收型量子存储器的量子中继架构的可行性,并首次展现了多模式复用在量子中继中的加速作用。《Nature》审稿人评价该发现是对量子中继器基本链路的一次非常直接和清晰的演示,是在地面上实现远距离量子网络的一项重大成就,为后续的量子中继研究以及实用化高速量子网络的构建打下基础^[30]。相关研究成果作为封面文章于2021年6月2日发表在《Nature》上。

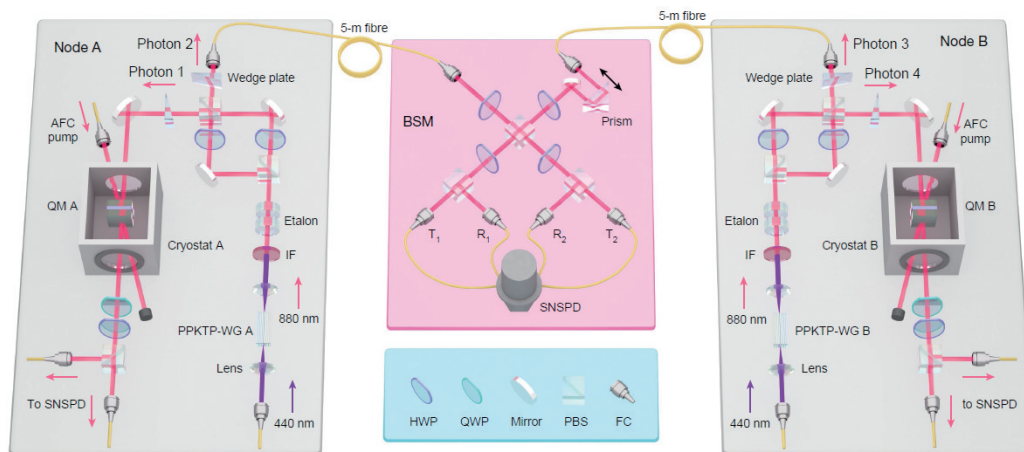


图4 基于吸收型量子存储的量子中继实验装置(图片来源:《Nature》)

1.5 揭示人体正常组织体细胞突变规律

人体内各种细胞在正常的生理活动中不可避免地不断产生突变,体细胞突变累积的过程及其克隆演化的模式,是理解人体衰老和癌症早期发生机

制的重要依据。

北京大学白凡、黄岩谊,清华大学王建斌,中国医学科学院北京协和医学院肿瘤医院吴晨、林东昕等共同绘制出来源于同一正常个体多器官的正常

组织的体细胞突变图谱(图5)^[31]。研究团队获取了5名85岁以上的遗体捐赠者的支气管、食管、贲门等9个器官内形态正常的组织,采用激光捕获显微切割技术获取有明确空间位置的连续微小组织,并捕获组织中极少量的体细胞突变,对1737个形态正常的组织进行了全面的基因组分析。研究首先发现,不同正常组织器官的体细胞均存在大量的突变积累,且体细胞突变负荷和等位基因突变频率2个指标表现出明显的器官差异性。研究人员共解析出7种不同的突变特征,并找到了 *NOTCH1*、*TP53*、*ARID1A* 和 *ERBB2* 等32个与肿瘤发生相关的基因。通过结合空间取样的位置信息及突变克隆细胞比率聚类情况,研究人员构建了亚毫米级别分辨率的突变克隆空间扩张图谱。该图谱从器官、组织、细胞和分子4个层面逐级刻画了人体正常体细胞突变基线,揭示了在相同种系背景下,人体跨器官正常组织中体细胞突变积累和变异克隆演化的基本规律,为理解癌症发生发展及细胞衰老等相关过程的机制奠定重要基础。相关研究成果于2021年8月25日发表在《Nature》上。

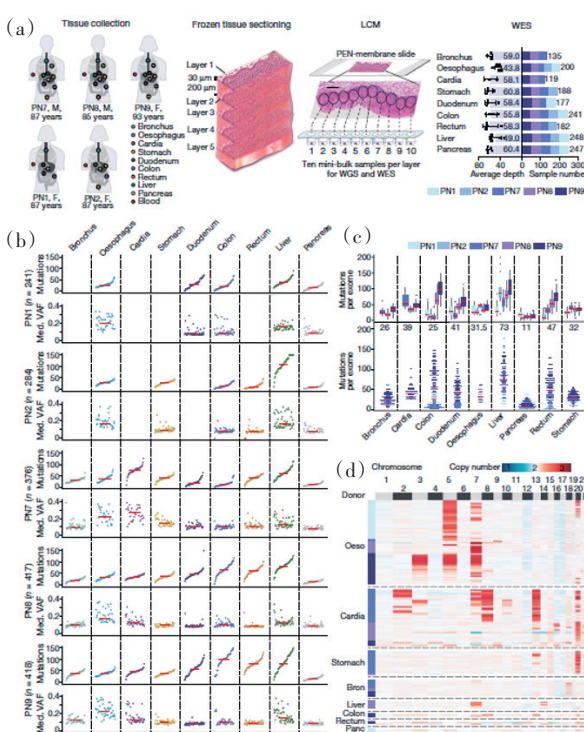


图5 正常组织体细胞突变及拷贝数变异图谱(图片来源:《Nature》)

1.6 实现超顺电弛豫铁电体中的超高能量存储

电介质电容器具有功率密度高、充放电速度快、耐压能力强等特性,在能源电力系统中具有广泛的应用前景。但其较低的能量储存密度成为制约相关技术发展的瓶颈。开发具有高储能密度、高效率的介电材料是当前材料学研究的前沿和热点。

清华大学南策文、林元华团队通过对弛豫铁电薄膜材料的稳定的超顺电设计,实现了介电储能性能的显著提升(图6)^[32]。研究人员结合系统实验表征和相场理论模拟,发现超顺电态区间中铁电畴可演化为几个晶胞大小的极化单元,其翻转能垒可降低至与热扰动同一量级,从而显著抑制损耗。研究表明,在超顺电态温区中储能密度和效率可以实现综合优化,通过制备Sm掺杂的BiFeO₃-BaTiO₃超顺电态弛豫铁电薄膜,可以实现152 J/cm³的超高储能密度,并显著提高储能效率(在3.5 MV/cm电场下超过90%)。该成果可为下一代高端储能电容器提供关键材料和技术,也为介电新材料开发和其他基于弛豫铁电的功能优化提供了新的途径^[33]。相关成果于2021年9月30日发表在《Science》上。

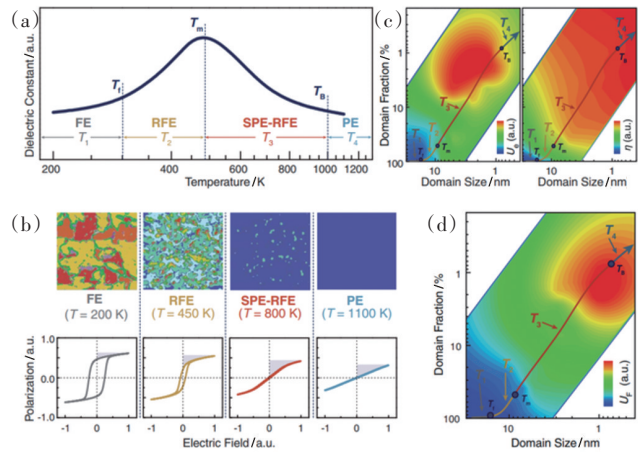


图6 弛豫铁电中超顺电态设计及其介电、极化、储能性质的相场模拟(图片来源:《Science》)

1.7 利用FAST捕获迄今最大快速射电暴爆发事件样本

快速射电暴(FRB)是无线电波段宇宙最明亮的爆发现象。FRB 121102于2017年被精确定位并确认其宿主星系,是人类目前所知的第一个重复快速射电暴。

中国科学院国家天文台李菡等利用“中国天眼”——500 m口径球面射电望远镜(FAST)对FRB 121102进行观测,在47 d共59.5 h观测中探测到1652个高信噪比的FRB信号,获得迄今最大的快速射电暴爆发事件样本(图7)^[34]。研究发现,FRB峰值爆发率为 122 h^{-1} ,各向同性等效能量分布的峰值在1.25 GHz处约为 $E_0=4.8 \times 10^{37} \text{ erg}$ ($1 \text{ erg}=10^{-7} \text{ J}$)。爆发能量呈双峰分布,低能端接近正则对数展现快速射电暴重复过程的随机性;高能端接近洛伦兹函数,展现强辐射存在可能的相关过程。研究首次揭示了快速射电暴爆发率的完整能谱,排除了FRB 121102爆发在1 ms~1 h之间的周期性或准周期性,严格限制了重复FRB由单一致密天体起源的可能性,是揭示FRB基础物理机制的重大进展^[35]。相关研究成果于2021年10月14日发表在《Nature》上。

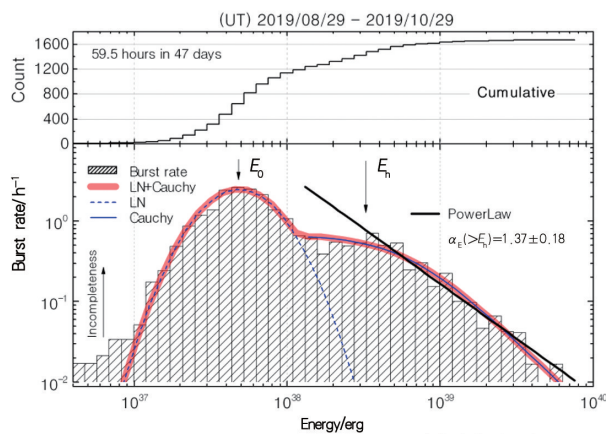


图7 FRB 121102平均每小时爆发率的能量分布(图片来源:《Nature》)

1.8 “嫦娥五号”月球样品研究为揭示月球演化提供新依据

月球的起源与演化是人类关注的自然科学的基本问题之一。2021年7月12日,第一批“嫦娥五号”月球科研样品正式发放,研究人员通过对样品进行基础物性、岩相学等多方面的综合分析,证明“嫦娥五号”月球样品为一类新的月海玄武岩。

中国科学院地质与地球物理研究所李献华、杨蔚、胡森、林杨挺和中国科学院国家天文台李春来等,对“嫦娥五号”月球样品玄武岩展开了一系列研究。研究团队采用超高空间分辨率的定年和同位素

分析技术,分别对年代学、岩石地球化学及岩浆水含量3个科学问题设计了新的研究途径(图8)^[36-38]。科研人员对“嫦娥五号”月球样品玄武岩岩屑中50余颗富铀矿物进行分析,确定玄武岩形成年龄为 20.30 ± 0.04 亿年,表明月球的岩浆活动持续到20亿年前,比以往月球样品限定的岩浆活动停止时间延长了约8亿年。研究还揭示“嫦娥五号”玄武岩初始熔融时并没有卷入富集钾、稀土元素、磷的“克里普物质”,揭示了月球晚期岩浆活动的源区并不富集放射性元素。研究还发现,月幔源区的水含量仅为 $1 \sim 5 \mu\text{g/g}$,证明月幔源区几乎没有水。多位国际专家表示,这一系列研究成果填补了地球岩浆活动数据的空白,改变了人类对月球热历史和岩浆历史的认识,为未来进一步探索月球的起源和演化开辟了新的方向^[39]。相关研究成果于2021年10月19日同期发表在《Nature》上。

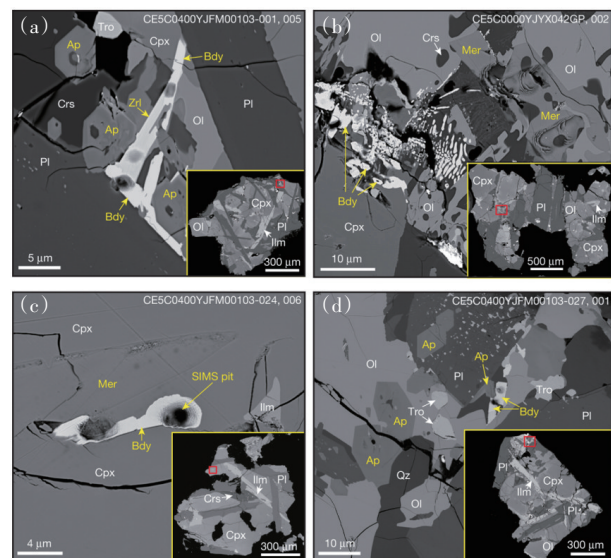


图8 “嫦娥五号”岩石碎屑主要矿物图像(图片来源:《Nature》)

1.9 研制出系列高性能铂合金催化剂

催化剂等关键材料是氢燃料电池的“芯片”,其性能直接决定燃料电池的发电能力及寿命。

中国科学技术大学梁海伟、林岳和北京航空航天大学水江澜等研发出一类高效低铂燃料电池催化剂材料,解决了传统铂合金催化剂高温合成难题(图9)^[40]。研究人员以硫掺杂碳(S-C)为载体,设计出一种高温硫锚定合成方法,实现了小尺寸金属

间化合物(intermetallic compounds, IMCs)燃料电池催化剂的普适性合成。基于此方法,研究团队构建出由46种小尺寸Pt基IMCs催化剂组成的材料库,包括20种二元(囊括了所有3d过渡金属元素和数种p区元素)以及26种多元IMCs。基于该庞大、完备的材料库,研究人员发现IMCs氧还原活性随着压缩应变的增加呈现单调上升趋势并,揭示了铂合金燃料电池氧还原活性与其二维晶面应力之间的强关联性。特别地,所制备的部分IMCs催化剂表现出优异的电催化氧还原性能。例如,氢氧燃料电池测试表明,PtNi IMC催化剂展现出记录性催化活性;氢空燃料电池测试表明,PtCo IMCs催化剂表现出与Pt/C催化剂相当的电池性能^[41]。这项研究为氢燃料电池中铂合金催化剂的合成提供了一种新的方法,有望提高燃料电池性能的同时减少铂的使用量,从而降低燃料电池的成本,对推动燃料电池大规模产业化具有重要意义。相关成果于2021年10月22日发表在《Science》上。

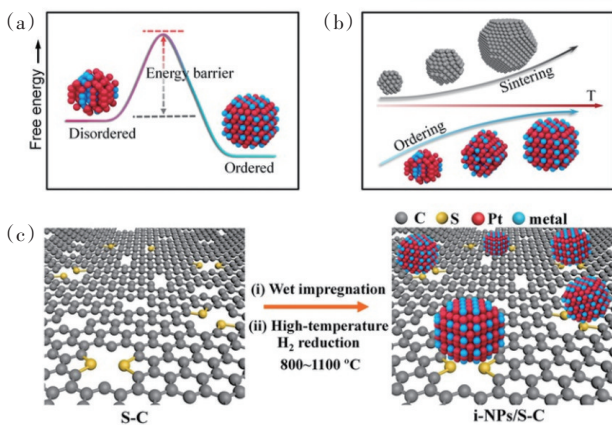


图9 高温硫锚定合成法(图片来源:《Science》)

1.10 高压合成毫米级极硬的非晶碳材料

寻找新型碳材料一直是材料领域的前沿科学问题,合成与金刚石结构、性质相对应的,由全 sp^3 键形成的非晶碳块体材料是碳材料领域的科学难题。

吉林大学刘冰冰、姚明光等利用自主发展的高压制备技术,采用国产硬质合金,突破了商用大腔体压机的压力极限,首次在高温条件下成功实现了毫米级近全 sp^3 非晶碳块体材料的合成(图10)^[42]。此次合成的近全 sp^3 非晶碳具有优异的力学、热学

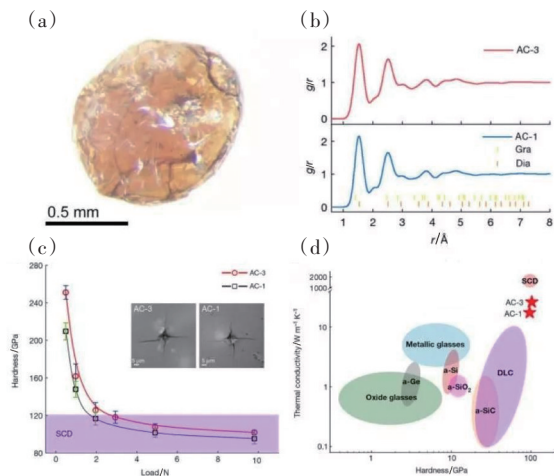


图10 毫米级近全 sp^3 非晶碳块体材料
(图片来源:《Nature》)

和光学等物理性质, sp^3 碳含量最高可达97.1%,维氏硬度高达102 GPa(9.8 N载荷下),热导率高达26 W/mK,是目前非晶材料中发现的硬度、热导率、模量最高的材料。研究实现了 sp^3 键含量与性能的精确调控,将光学带隙从1.85 eV调到2.79 eV。该成果被《Nature》评价为非晶材料领域的重大进展,有助于扩展对材料中原子无序的认识,进而通过无序调控材料的性质产生新的应用^[43]。相关成果于2021年11月25日发表在《Nature》上。

2 2021年中国重大技术进展(10项)

2.1 自供电软机器人成功挑战马里亚纳海沟

深海机器人与装备需要高强度金属耐压外壳或压力补偿系统来保护内部机电系统。浙江大学李铁风等从深海狮子鱼“头部骨骼分散融合在软组织中”这一生理特性获取仿生灵感,揭示了在深海中软体机器人自适性极端水压力的机制;提出了硬质器件分散融入软基体实现内应力调控的方法,以及适应深海低温、高压环境的电驱动人工肌肉融合制造方法;建立了万米深海软体机器人的系统构造方法和驱动理论。实现了无需耐压外壳的软体机器人深潜马里亚纳海沟10900 m海底实现驱动与南海3224 m深海航行。该研究大幅降低了深海机器人的重量及经济成本,推动了软体机器人与智能装备在深海工程领域的应用,同时也为极端环境作

业机器人的设计应用提供了新思路。相关成果作为封面文章于2021年3月4日发表在《Nature》(图11)^[44]上。



图11 《Nature》封面刊发自供电软机器人挑战马里亚纳海沟成果

2.2 首次实现高性能的纤维聚合物锂离子电池

锂离子电池已成为人类生产生活不可或缺的组成部分。如何通过设计新结构如创建纤维锂离子电池,获得优异的电化学储能性能,满足电子产品高度集成化和柔性化发展要求,是锂离子电池领域面临的重大挑战。国际学术界长期以来有一个共识:纤维锂离子电池内阻随长度增加而显著增大,导致无法实现其高性能化与应用^[45]。复旦大学彭慧胜团队颠覆了上述传统认知,发现纤维锂离子电池内阻与长度之间独特的双曲余切函数关系(即内阻随长度增加并不增大,反而先下降后趋于稳定),奠定了纤维锂离子电池发展的理论基础。在此理论指导下构建的新型纤维聚合物锂离子电池,能量密度较过去提升了近2个数量级,弯折10万次后容量保持率超过80%。建立了世界上首条纤维锂离子电池生产线,在国际上率先实现了其规模化连续制备。编织集成得到的纤维锂离子电池系统,电化学性能与商业锂离子电池相当,而稳定性和安全性更加优异,在柔性电池领域开拓出一个新方向(图12)。以上成果分别于2021年3月和9月发表在《Nature》^[46-47]上。

2.3 研发成功-271℃超流氦大型低温制冷装备

2021年4月15日,由中国科学院理化技术研

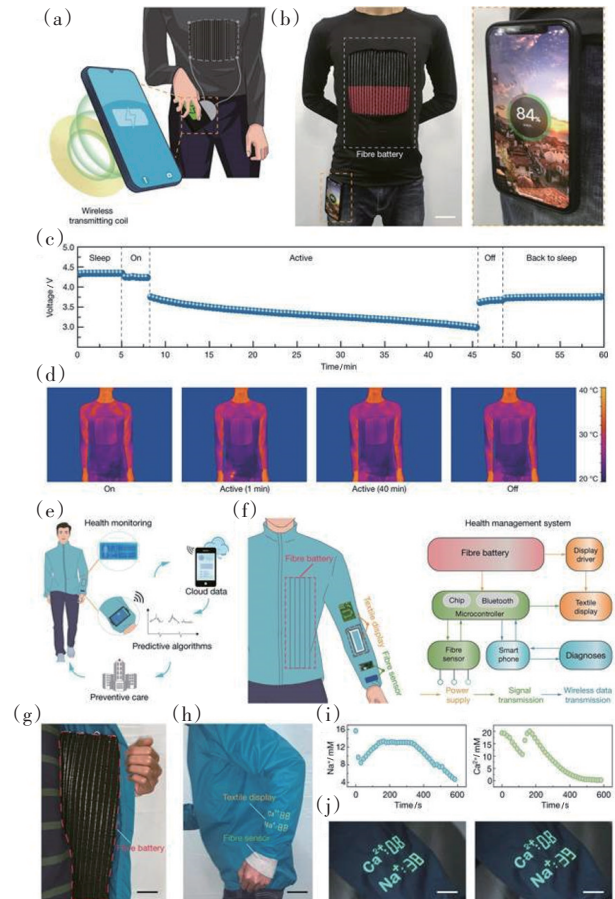


图12 纤维锂离子电池纺织品的应用
(图片来源:《Nature》)

究所承担的国家重大科研装备研制项目“液氦到超流氦温区大型低温制冷系统研制”通过验收及成果鉴定,标志着中国具备了研制液氦温度(-269℃)千瓦级和超流氦温度(-271℃)百瓦级大型低温制冷装备的能力,可满足大科学工程、航天工程、氦资源开发等国家战略高技术发展的迫切需要(图13)^[48]。



图13 液氦到超流氦温区大型低温制冷系统
(图片来源:科学网)

该装置取得了一系列核心技术突破,包括大型低温制冷系统整机设计体系构建及控制技术、系列化气体轴承氦透平膨胀机技术、大型超流氦负压换热器技术、大型高效氦气喷油螺杆压缩机技术、高稳定性离心式冷压缩机技术、大型复杂低温制冷系统集成与调试技术等。项目的成功实施还带动了我国高端氦螺杆压缩机、低温换热器和低温阀门等行业的快速发展,使相关技术实现了从无到有、从低端到高端的提升,提高了一批高科技制造企业的核心竞争力,在我国初步形成了功能齐全、分工明确的低温产业集群^[49]。

2.4 研制出应用于哺乳动物成像的自适应扫描光场显微成像仪器

显微仪器存在的光毒性会造成活体损伤,导致很难同时实现长时间、高速度和高时空分辨率成像,难以揭示肿瘤转移和免疫机制。清华大学戴琼海、俞立团队提出了自适应扫描光场成像原理,建立了高维时空耦合扫描机制,给出了自适应解耦重构映射关系,解决了显微仪器光毒性制约,突破了高时空分辨率性能提升的瓶颈问题,研制出扫描光场显微镜(digital adaptive optics scanning lightfield mutual iterative tomography, DAOSLIMIT)。该仪器满足衍射极限分辨率、毫秒级速度等活体显微的苛刻条件,实现哺乳动物连续30万时间帧的三维观测,将国际最长观测时间从分钟级提升至6 h,为揭示神经、肿瘤、免疫新现象和新机制提供了变革性工具。相关成果于2021年6月发表在《Cell》上(图14)^[50]。

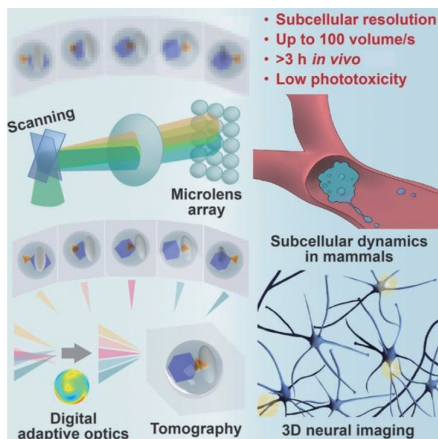


图14 DAOSLIMIT系统概念与原理应用示意
(图片来源:《Cell》)

2.5 世界最大的小鼠全脑神经元数据集建成

单神经元精度全脑图谱,对理解大脑至关重要。东南大学脑科学与智能技术研究院彭汉川、顾忠泽、谢维团队建立了世界上首个完整的全脑单神经元分辨率大数据和信息学平台并应用于全鼠脑研究,针对神经元的全脑三维影像数据进行高通量神经元重建,全脑映射以及智能数据挖掘,并基于此平台生产了目前世界上数目最大的单细胞神经元形态数据集,首次揭示了长程投射规则和分子水平基础上的神经元形态亚类多样性,对研究大脑细胞分型和功能、脑连接环路、全脑大规模模拟、类脑计算、基于生物脑的新型人工智能算法和系统等会持续产生重要作用(图15)。本成果实现了首个软硬件结合的PB级超大规模脑大数据平台和首个完整的单细胞形态数据生产流水线,定量证明了完整单细胞解剖学分析对神经细胞类型鉴定至关重要。主要科研成果分别于2021年10、12月发表在《Nature》^[51]、《Nature Methods》^[52]上。

2.6 12英寸超精密晶圆减薄机正式进入集成电路大生产线

12英寸超精密晶圆减薄机是集成电路制造不可或缺的关键装备。该装备复杂程度高、技术攻关难度大且市场准入门槛高,长期被国外厂商高度垄断,国内市场严重依赖进口。为了突破减薄装备领域技术瓶颈,清华大学路新春教授带领清华大学成果转化项目公司华海清科集中力量开展超精密减薄理论与技术研究,攻克晶圆背面超精密磨削、平整度智能控制、表面损伤及缺陷控制系列核心技术,研制出首台用于12英寸3D集成电路制造、先进封装等领域晶圆超精密减薄机Versatile-GP300(图16)。2021年10月,Versatile-GP300正式出机,发往国内某集成电路龙头企业。该装备是路新春教授团队与华海清科继解决中国集成电路抛光装备“卡脖子”问题后的又一突破性成果,将满足12英寸晶圆超精密减薄工艺需求^[53]。

2.7 国产宫颈癌疫苗、四价流脑结合疫苗获重大突破

2021年10月26日,由厦门大学和厦门万泰沧海生物技术有限公司联合开发的双价人乳头瘤病

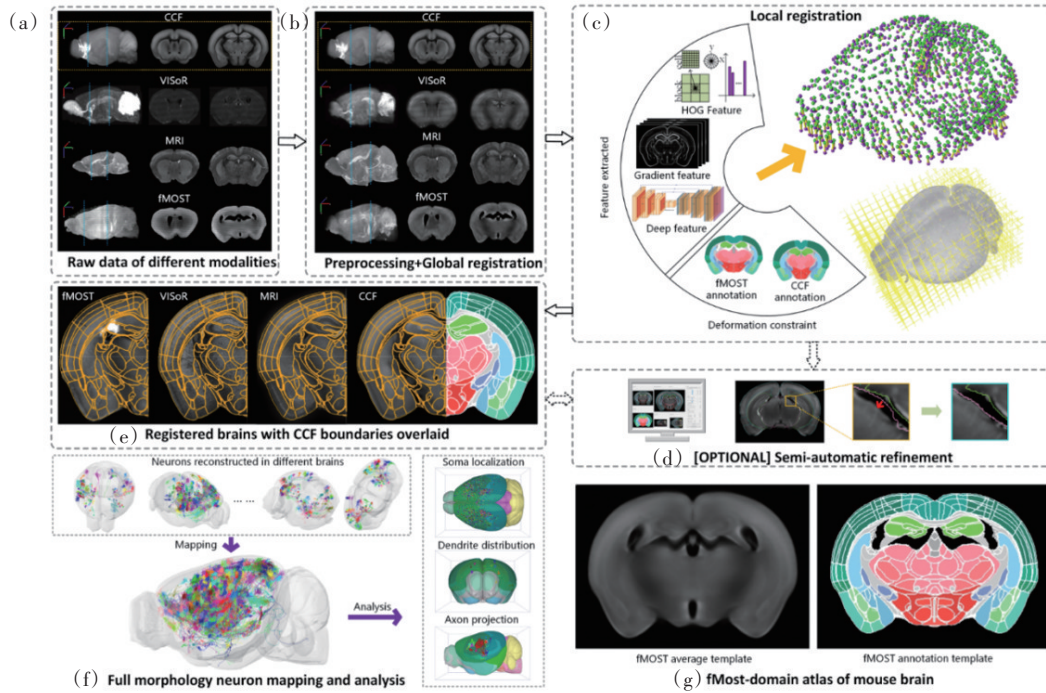


图 15 神经元分析模块 mBrainAnalyzer 用于跨模态图像配准、大脑轮廓绘制、全脑完整形态神经元重建数据映射、fMOST 鼠脑图谱建立的总体流程(图片来源:《Nature Methods》)



图 16 12英寸超精密晶圆减薄机 Versatile-GP300
(图片来源:清华大学网站)

毒疫苗——馨可宁(Cecolin)正式通过世界卫生组织预认证(图 17)。这是第 6 个通过预认证的国产疫苗,也是首个获得该认证的国产宫颈癌疫苗产品,使中国继美国、英国之后,成为世界上第三个具备宫颈癌疫苗对外供应能力的国家,标志着中国疫苗产品的监管、研制和生产体系及产品质量获得了国际的广泛认可^[54]。

2021 年 12 月,由康希诺生物股份公司自主研



图 17 用于接种的双价人乳头瘤病毒疫苗馨可宁
(图片来源:《新京报》)

发的 ACYW135 群脑膜炎球菌多糖结合疫苗(CRM197 载体)曼海欣正式获得国家药监局批准上市。该疫苗是国内首个上市的覆盖 A、C、W135、Y 4 种血清群的流脑结合疫苗,可用于预防 3 月龄至 3 周岁儿童因脑膜炎奈瑟球菌引起的流行性脑脊髓膜炎,有效克服了多糖疫苗在保护年龄范围上的不足^[55]。作为中国首个且唯一覆盖 A、C、W135、Y 4 种血清群的流脑结合疫苗,曼海欣将填补国内尚无四价流脑结合疫苗的空白。

2.8 SWQSIM 实现每秒 4.4 百亿亿次的持续计算性能

由之江实验室、国家超算无锡中心等单位研究人员组成的联合科研团队基于新一代神威超级计算机,研发了量子计算模拟器 SWQSIM,提出近似最优的张量网络并行切分和收缩方法及混合精度算法,可高效扩展至数千万核并行规模,并提供 4.4 百亿亿次/s 的持续计算性能,是超算领域全世界目前已知的最高混合精度浮点计算性能。与“悬铃木”系统 200 s 完成 0.2% 保真度的百万采样任务相比较,SWQSIM 可在 304 s 内得到百万更高保真度的关联样本,在一星期内得到同样数量的无关联样本,还可以在 60 h 内完成比“悬铃木”系统复杂 1000 多倍的量子电路模拟,实现 100~400 比特量子电路算法的单振幅和多振幅模拟,为未来量子计算的发展提供了坚实的模拟支撑^[56]。

2021 年 11 月 18 日,美国密苏里州圣路易斯举行的全球超级计算大会(SC21)上,SWQSIM 获颁 2021 年度“戈登贝尔奖”(图 18)^[49,56]。



图 18 SWQSIM 获颁 2021 年度“戈登贝尔奖”现场
(图片来源:科学网)

2.9 开发出搜寻暗物质的超灵敏量子精密测量技术

在宇宙物质质量组成中暗物质约占 85%,然而迄今为止还没有找到暗物质存在的直接证据。中国科学技术大学彭新华研究组利用气态铷和铯原子混合蒸气室,发明了具有超高灵敏度的新型核自旋量子测量技术,实现了新型核自旋磁传感器。该技术利用激光先极化铷原子蒸气,再利用铷与气态铯原子的自旋交换碰撞,从而将铯原子的核自旋极

化和超灵敏读出。基于该物理机制,研究人员设计出磁场量子放大器,并将这台自旋放大器与团队已发展的原子磁力计相结合,将原子磁力计的磁探测灵敏度提高了 100 倍。暗物质搜寻结果比先前的国际最好水平提升至少 5 个数量级,并且突破国际公认最强的宇宙天文学界限^[57]。相关成果于 2021 年 11 月 18 日在线发表在《Nature Physics》^[58]上(图 19)。

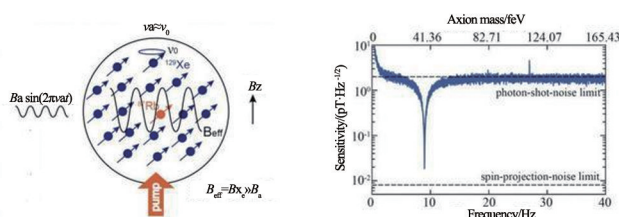


图 19 自旋放大器基本原理和超灵敏磁场放大效应
(图片来源:《Nature Physics》)

2.10 新冠病毒监测、防治取得系列重要进展

新冠病毒处于不断变异发展的态势,为了应对这项危机,需要对其进行持续有效的监测。上海交通大学 Bio-X 研究院师咏勇团队利用深度学习算法 AlphaFold2 获得了新冠奥密克戎毒株突刺(S)蛋白、膜(M)蛋白及核衣壳(N)蛋白的高精度结构(图 20),揭示奥密克戎毒株的潜在免疫逃逸机制,为后续研发针对奥密克戎毒株的潜在药物提供基础。成果展示了高精度结构模拟在其中的有效性,AlphaFold2 算法可以迅速地获得不同突变株的关键结构,为抗击新冠突变株提供第一手资料,同时也可以与实验结果相辅相成为疫苗和新药开发提供有力支撑。这可以成为后续研究新突变株的一种典范和方法。相关研究成果于 2021 年 12 月在线发

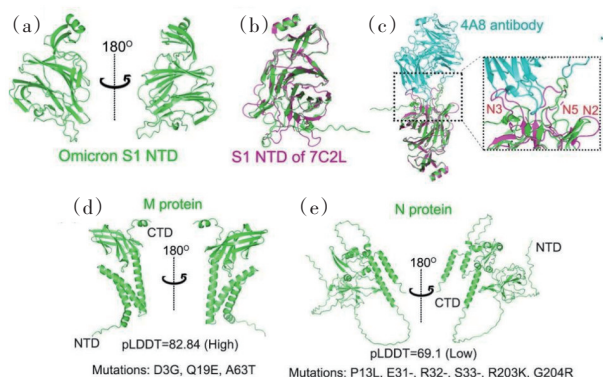


图 20 奥密克戎 S1 NTD、M 蛋白和 N 蛋白结构
(图片来源:《Research》)

表在《Research》^[59]上。

2021年11月30日,香港大学微生物学系宣布成功从临床标本中分离出新冠变异病毒奥密克戎毒株。这是亚洲研究团队首次成功分离和培养奥密克戎毒株,分离出来的毒株将可用于开发和生产灭活全病毒疫苗。据了解,该毒株的分离和培养都是在香港大学生物安全三级实验室(P3 laboratory)严格按照操作规范下进行,研究团队正在对该病毒株进行进一步的分离与培养,以得到大量的毒株用于后续实验。培养出来的病毒将用于动物模型,以评估其传播性、免疫逃逸性和致病性^[60]。

2021年12月8日,腾盛华创医药技术(北京)有限公司的新冠病毒中和抗体联合治疗药物安巴韦单抗注射液及罗米司韦单抗注射液注册申请获批^[61]。这是中国首款获批的、具有自主知识产权的新冠病毒中和抗体联合治疗药物,用于治疗轻型和普通型且伴有进展为重型高风险因素的成人和青少年新型冠状病毒感染患者,其中青少年适应证人群为附条件批准。新冠病毒中和抗体联合治疗药物有望成为助力全球抗击新冠肺炎疫情的又一重要武器。

3 2021年中国重大工程进展(10项)

3.1 中国三代和四代核电工程取得新突破

2021年1月30日,具有完全自主知识产权的三代核电技术“华龙一号”全球首堆——中核集团福建福清核电5号机组(图21)投入商业运行,标志着中国在三代核电技术领域跻身世界前列^[62]。



图21 “华龙一号”全球首堆——中核集团福建福清核电5号机组(图片来源:中青在线)

“华龙一号”由中国核工业集团公司和中国广核集团有限公司设计研发,在安全性上满足国际最高安全标准要求。福清核电5号机组于2015年5月开工建设,并于2020年9月顺利完成177组燃料组件装载,首堆所有核心设备均已实现国产,设备国产化率达88%。2020年10月,福清核电5号机组正式进入带功率运行状态^[19]。

“华龙一号”每台机组装机容量116.1万kW·h,每年发电近100亿kW·h,能够满足中等发达国家100万人口的年度生产和生活用电需求^[62]。首堆投入商运为“华龙一号”的批量化建设和走向世界奠定了坚实基础。

2021年12月20日,全球首座球床模块式高温气冷堆核电站——华能石岛湾核电高温气冷堆示范工程送电成功,中国成为世界上少数几个掌握第四代核电技术的国家。

石岛湾高温气冷堆示范工程由中国华能联合清华大学、中核集团共同建设,是全球首座球床模块式高温气冷堆。装机容量20万kW,采用“两堆带一机”模块化方案,设备国产化率达到93.4%^[63]。

2012年石岛湾高温气冷堆示范工程开工建设,于2015年完成核岛、常规岛主体结构施工,2016年完成世界上尺寸最大、重量最重的反应堆压力容器吊装,2019年完成首台蒸汽发生器吊装。作为世界首座球床模块式高温气冷堆,石岛湾高温气冷堆示范工程对推动中国在第四代先进核能技术领域抢占全球领先优势具有重要意义^[63]。

3.2 中国首次火星探测任务取得圆满成功

2021年2月10日,中国首次火星探测任务“天问一号”探测器实施近火捕获制动,环绕器3000 N轨控发动机点火工作约15 min,探测器顺利进入近火点高度约400 km,周期约10个地球日,倾角约10°的大椭圆环火轨道,成为中国第一颗人造火星卫星,实现“绕、着、巡”目标的第一步,环绕火星获得成功^[64]。

2021年5月15日,“天问一号”探测器成功着陆于火星乌托邦平原南部预选着陆区,中国首次火星探测任务着陆火星取得成功^[65]。2021年6月11日,国家航天局发布了“天问一号”探测器着陆火星

的首批科学影像图,包括“祝融号”火星车拍摄的着陆点全景、火星地形地貌、“中国印迹”和“着巡合影”(图22)等。首批科学影像图的发布,标志着中国首次火星探测任务取得圆满成功。

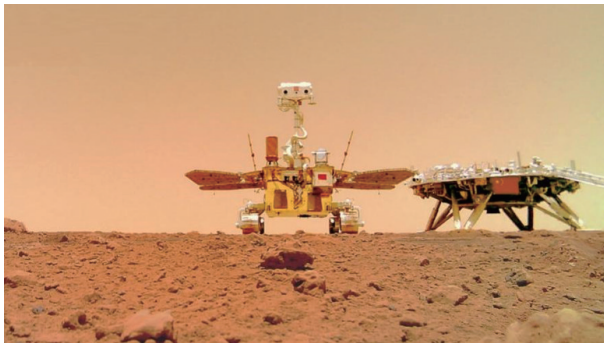


图22 着巡合影(图片来源:国家航天局)

中国首次火星探测任务于2013年全面启动论证,2016年1月批准立项。2020年7月23日,“天问一号”探测器于海南文昌成功发射,历经地火转移、火星捕获、火星停泊、离轨着陆和科学探测等阶段,工程任务按计划顺利开展。中国火星任务的成功是中国迈出星际探测征程的重要一步,是中国航天事业发展的又一具有里程碑意义的进展^[66]。

3.3 中国强流高功率质子加速器研制再创世界纪录

2021年2月12日,中国科学院近代物理研究所独立自主研制的加速器驱动次临界系统(ADS)超导直线加速器样机(图23)在国际上首次实现束流强度10 mA连续波质子束176 kW运行指标,并实现10 mA束流稳定运行,为中国未来在国际上率先建设ADS商用装置和加速器驱动的先进核裂变能装置奠定基础^[67]。



图23 ADS超导直线加速器样机
(图片来源:中国科学院近代物理研究所)

ADS是加速器和反应堆的“结合体”,可将乏燃料中那些半衰期高达数十万年的放射性废物变成几百年的短寿命废物,将短寿命废物变成裂变产物,并在此过程中发电。射频超导强流高功率质子直线加速器是ADS三大关键系统之一^[67]。

2011年中国科学院启动实施战略性先导科技专项(A类)“未来先进核裂变能——ADS嬗变系统”,ADS先导专项打破多项世界记录,并于2017年验收,为后续开展连续波高功率束流稳定运行技术研究奠定基础。2019年1月,研究团队实现了30 kW连续波质子束功率大于100 h长时间稳定运行;2021年1月,连续波质子束最大束流强度达到5.6 mA、最大束流功率达到110.9 kW,具备了百千瓦连续波束流运行的能力^[67]。

此ADS超导直线加速器样机成功加速10 mA连续波质子束流,为中国在建的国家重大科技基础设施强流重离子加速器和加速器驱动嬗变研究装置提供坚强支撑^[68]。同时,此次突破首次验证了全超导直线加速器可以稳定加速5~10 mA连续波质子束这一国际加速器领域长期追求的目标,为国际上同类强流高功率加速器装置建设及其一系列重大应用提供了成功案例。

3.4 “海牛II号”刷新世界深海海底钻机钻探深度

2021年4月8日,由湖南科技大学领衔研发的中国首台“海牛II号”(图24)海底大孔深保压取芯钻机系统,在南海超2000 m深水成功下钻231 m,刷新世界深海海底钻机钻探深度,填补了中国海底钻探深度大于100 m、具备保压取芯功能的深海海



图24 “海牛II号”搭载海洋某科考船行驶在大海上
(图片来源:湖南科技大学)

底钻机装备的空白,标志着中国在这一技术领域已达到世界领先水平。

“海牛II号”由海底钻机本体、海底原位探测仪、移动式海底钻机配套收放系统等部分组成,其中钻机本体高7.6 m,腰围10 m,体重12 t,水下重量10 t,是目前中国水下重量最重的地质勘探科考设备。“海牛II号”采用全新的基于海底钻机绳索取芯技术的水合物保压取芯原理、保压取芯技术与工艺、轻量化设计技术,以及海底复杂地层智能钻进专家系统,使得钻探效率、取芯质量、保压成功率显著提高,钻机重量较国外同类钻机大幅减少,水下收放作业难度大幅降低^[69]。

2000年,湖南科技大学团队开始研发深海海底钻机。2003年该团队研制出中国首台深海浅层岩芯取样钻机,并在海底下钻0.7 m,获得首个岩芯样品。2010年团队研发的深海深孔岩芯取样钻机,把海底钻探深度推进到20 m。2012年,“海牛II号”的前身——“海牛号”研制项目正式启动。2015年,“海牛号”在3000 m海水下下钻了60 m。由此,中国成为世界上第4个拥有能在水深大于3000 m的海底进行60 m钻探技术的国家^[70]。此次深海试验的成功,意味着中国在该技术领域已达到世界领先水平^[69]。

3.5 中国空间站开启有人长期驻留时代

2021年4月29日,中国空间站天和核心舱在海南文昌航天发射场发射成功,中国空间站建造进入全面实施阶段,为后续任务展开奠定了坚实基础^[71]。

2021年6月17日,神舟十二号载人飞船发射成功,并与天和核心舱成功完成对接,顺利将聂海胜、刘伯明、汤洪波3名航天员送入太空,这是天和核心舱发射入轨后,首次与载人飞船进行的交会对接。3名航天员进驻核心舱后,进行了为期3个月的驻留,开展了一系列空间科学实验和技术试验,在轨验证了航天员长期驻留、再生生保、空间物资补给、出舱活动、舱外操作、在轨维修等空间站建造和运营关键技术^[72]。2021年10月16日,神舟十三号载人飞船发射成功,入轨后与天和核心舱和天舟二号、天舟三号组合体完成自主快速交会对接,实

现了中国载人飞船在太空的首次径向交会对接。翟志刚、王亚平、叶光富3位航天员(图25)开启为期6个月的在轨驻留。航天员将在空间站开展机械臂操作、出舱活动、舱段转位及空间科学实验与技术验证试验等工作,中国空间站有人长期驻留时代到来^[73]。



图25 翟志刚(中)、王亚平(右)、叶光富(左)3名航天员进驻天和核心舱(图片来源:新华社)

建设中国人自己的空间站是中国载人航天“三步走”战略的第三步,该项目于2010年立项,目前已进入空间站建造的关键时期。中国空间站的建成,将为开展包括航天员联合飞行在内的更广泛的国际合作提供更好的平台^[74]。

3.6 全球在建规模最大的白鹤滩水电站首批机组投产发电

2021年6月28日,在建规模全球第一、单机容量世界第一、装机规模全球第二大水电站——金沙江白鹤滩水电站(图26)首批机组正式投产发电。2021年7月17日,白鹤滩水电站第3台百万千瓦机组正式投产发电,全部机组将于2022年7月投产发电。电站全面投产后,将对助力长江经济带高质量



图26 白鹤滩水电站
(图片来源:人民网)

发展、促进国家碳达峰碳中和目标的实现具有重要作用^[75-76]。

白鹤滩水电站位于四川省宁南县和云南省巧家县交界的金沙江河道上,电站总装机1600万kW,共安装16台中国自主研发、全球单机容量最大的百万千瓦水轮发电机组。白鹤滩水电站枢纽工程由拦河坝、泄洪消能设施、引水发电系统等建筑物组成。水库正常蓄水位825 m,总库容206.27亿m³,防洪库容75亿m³,是长江防洪体系的重要组成部分。电站总装机容量1600万kW,仅次于三峡工程,位居世界第二。全部投产发电后,多年平均发电量624.43亿kW·h,每年可节约标煤约1968万t,减排二氧化碳5160万t、二氧化硫17万t、氮氧化物约15万t,节能减排效益显著^[75-76]。

白鹤滩水电站主体工程于2017年7月全面开工建设,2021年4月下闸蓄水,2021年5月大坝全线浇筑到顶。白鹤滩水电站工程规模巨大,地质条件复杂,工程地处金沙江干热河谷地带,综合技术难度位居世界第一,主要技术指标创6项世界第一^[75]。该水电站是实施“西电东送”的国家重大工程,是中国构建清洁低碳、安全高效能源体系的国家重大工程。

3.7 世界首套设计时速达600 km的高速磁浮交通系统成功下线

2021年7月20日,由中国中车承担研制、具有完全自主知识产权的世界首套设计时速达600 km的高速磁浮交通系统(图27)在青岛成功下线,标志着中国掌握了高速磁浮成套技术和工程化能力^[77]。



图27 时速达600 km的高速磁浮交通系统样机
(图片来源:央广网)

该系统研发取得了多项创新,实现了GOA3级全自动运行控制,系统安全防护满足SIL4最高安全等级要求;采用先进激光复合焊和碳纤维技术,研制了满足超高速气密承载要求的轻质高强度车体;自主开发悬浮导向和测速定位装置,控制精度达到国际领先水平;攻克大功率集成门极换向晶闸管(IGCT)牵引变流、高精度同步牵引控制等关键技术;开发了满足列车高速平稳运行的高精度新型轨道梁。在系统集成方面进行创新,突破运用场景和复杂环境适应性技术瓶颈,使高速磁浮满足长途、通勤多场景运用需求,适应江河隧道、高寒、高温高湿等复杂地理气候环境^[77]。

时速600 km高速磁浮交通系统项目于2016年10月启动,2019年研制出试验样车,并于2020年6月在同济大学试验线上成功试跑,2021年1月研制出成套系统并完成了6个月的联调联试^[78]。时速600 km的高速磁浮可以填补高铁和航空运输之间的速度空白,按“门到门”实际旅行时间计算,是1500 km运程范围内最快捷的交通模式,可以助力形成航空、高铁、高速磁浮和城市交通速度梯度层级完善、高效、灵活便捷的多维立体交通构架,丰富中国交通运输速度谱系^[78]。

3.8 中国首个自营超深水大气田“深海一号”全面投产

2021年9月7日,中国首个1500 m深水自营大气田“深海一号”全面投产(图28),气田投产后每年将向粤港澳大湾区和海南等地稳定供应深海天然气超30亿m³,标志着中国深海勘探开发从300 m向1500 m的迈进取得重大进展^[79]。



图28 “深海一号”能源站火炬臂点火成功
(图片来源:中国海油)

“深海一号”大气田是中国自主发现的水深最深、勘探开发难度最大的海上深水气田,该气田于2014年钻探发现,距海南省三亚市150 km,所在海域水深1220~1560 m,气田东西横向跨度50 km,天然气探明地质储量超千亿 m^3 ,最大水深超过1500 m,最大井深达4000 m以上^[79]。

“深海一号”大气田由东区和西区两部分组成,共部署11口开发井,采用“半潜式生产平台+水下生产系统+海底管线”模式开发,共用半潜式生产平台——“深海一号”能源站,并开发能源立柱储油技术,用来存储深海天然气中分离出的凝析油。2021年6月25日,“深海一号”大气田西区已先期投产^[79]。后续“深海一号”大气田全面投产后,将带动周边陵水25-1等新的深水气田开发,形成气田群,依托已建成的连通粤港澳大湾区和海南自由贸易港天然气管网大动脉,对保障国家能源安全、带动周边区域经济发展和能源结构转型升级具有重要意义^[80]。

3.9 “海斗一号”跨入万米科考新阶段

2021年10月10日,在马里亚纳海沟深渊科学考察中,由中国科学院沈阳自动化研究所主持研制的“海斗一号”全海深自主遥控潜水器(图29)在国际上首次实现了对“挑战者深渊”西部凹陷区的大范围全覆盖声学巡航探测。“海斗一号”的成功应用,表明中国全海深无人潜水器正式跨入万米科考应用的新阶段,填补了当前国际上全海深无人潜水器万米科考应用的空白^[81]。

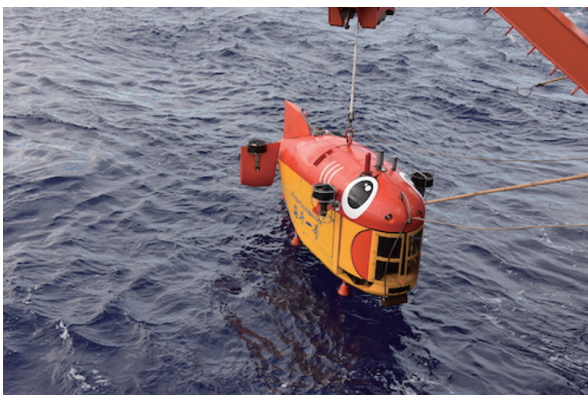


图29 “海斗一号”布放

(图片来源:中国科学院沈阳自动化研究所)

“海斗一号”自主遥控无人潜水器具有独特的“三合一”多模式操控和作业模式,同时具备多种类型潜水器的本领,既能大范围自主巡航探测,又能实现实时定点精细观测,还能够通过所携带的机械手采集样品。

在无缆自主(AUV)模式下,“海斗一号”打破了多项无人潜水器的世界纪录,包括最大下潜深度达到了10908 m,海底连续作业时间超过8 h,近海底航行距离超过14 km等,填补了中国全海深无人无缆潜水器AUV技术与装备空白。“海斗一号”在国际上首次对挑战者深渊西部凹陷区进行了大范围的全覆盖声学巡航探测,并首次实现了无人无缆潜水器AUV万米坐底并连续拍摄高清视频影像。“海斗一号”连续万米深潜与科考应用的成功,标志着中国在全海深无人潜水器领域正在迈向国际领先水平,正在实现由“并跑”向“领跑”的转变^[81]。

3.10 世界最大推力整体式固体火箭发动机试车成功

2021年10月19日,由中国自主研发的目前世界上推力最大、可工程化应用的整体式固体火箭发动机(图30)在西安地面热试车成功,为中国运载火箭型谱发展提供了更多的动力选择,对推动未来大型、重型运载火箭技术的发展具有重要意义^[82]。



图30 直径3.5 m/500 t推力先进固体发动机

(图片来源:中国航天科技集团第四研究院)

该发动机由中国航天科技集团第四研究院自主研发,直径3.5 m,推力达500 t,采用高性能纤维复合材料壳体、高装填整体浇注成型燃烧室、超大尺寸喷管等多项先进技术,发动机综合性能达到世界领先水平^[82]。

早在“十一五”时期,中国就立足“整体式”和“分段式”两条技术路线,开展了大型固体发动机的预先研究攻关。2009年,成功研制了直径2 m、推力120 t、当时国内最大的整体式固体火箭发动机,直接推动了长征十一号的立项研制。2019年,中国又自主研制成功了直径2.6 m、推力200 t的整体式固体发动机,进一步提升了航天固体动力运载能力^[83]。

目前,基于500 t推力整体式固体发动机,中国航天科技集团第四研究院已经在开展直径3.5 m级分段发动机的研究,发动机分5段,最大推力将达到千吨级以上,可应用于大型、重型运载火箭固体助推器中,以满足中国空间装备、载人登月、深空探索等航天活动对于运载工具的不同发展需求,为建立国内固体、液体运载火箭相得益彰,以及完善的航天运输系统提供更加强大有力的动力支撑^[82]。

致谢 本次遴选中,“2021年重大科学进展”候选条目,是从科学技术部高技术研究发展中心主办,《中国基础科学》《科技导报》《中国科学院院刊》《中国科学基金》《科学通报》协办的2021年度“中国科学十大进展”候选条目中产生的,特此感谢!

参考文献(References)

- [1] 本刊编辑部. 2003年中国重大科学、技术与工程进展[J]. 科技导报, 2004, 22(3): 59-61.
- [2] 本刊编辑部. 2004年中国重大科学、技术与工程进展[J]. 科技导报, 2005, 23(2): 58-62.
- [3] 苏青. 2005年中国重大科学、技术与工程进展[J]. 科技导报, 2006, 24(1): 5-10.
- [4] 苏青. 2006年中国重大科学进展[J]. 科技导报, 2007, 25(1): 5-10.
- [5] 苏青. 2006年中国重大技术与工程进展[J]. 科技导报, 2007, 25(2): 5-14.
- [6] 苏青. 2007年中国重大科学、技术与工程进展[J]. 科技导报, 2008, 26(1): 19-27.
- [7] 苏青, 代丽, 岳臣. 2008年中国重大科学、技术与工程进展[J]. 科技导报, 2009, 27(1): 19-29.
- [8] 苏青, 朱宇, 代丽, 等. 2009年中国重大科学、技术与工程进展[J]. 科技导报, 2010, 28(1): 19-29.
- [9] 苏青, 朱宇, 陈广仁, 等. 2010年中国重大科学、技术和工程进展[J]. 科技导报, 2011, 29(3): 19-29.
- [10] 朱宇, 苏青, 陈广仁, 等. 2011年中国重大科学、技术和工程进展[J]. 科技导报, 2012, 30(3): 15-25.
- [11] 朱宇, 陈广仁, 苏青, 等. 2012年中国重大科学、技术和工程进展[J]. 科技导报, 2013, 31(3): 15-27.
- [12] 朱宇, 陈广仁, 史永超, 等. 2013年中国重大科学、技术和工程进展[J]. 科技导报, 2014, 32(3): 15-24.
- [13] 陈广仁, 吴晓丽, 刘志远, 等. 2014年中国重大科学、技术和工程进展[J]. 科技导报, 2015, 33(2): 15-28.
- [14] 陈广仁, 吴晓丽, 刘志远, 等. 2015年中国重大科学、技术和工程进展[J]. 科技导报, 2016, 34(3): 13-29.
- [15] 陈广仁, 刘志远, 田恬, 等. 2016年中国重大科学、技术和工程进展[J]. 科技导报, 2017, 35(3): 13-28.
- [16] 陈广仁, 刘志远, 田恬, 等. 2017年中国重大科学、技术和工程进展[J]. 科技导报, 2018, 36(3): 8-26.
- [17] 陈广仁, 刘志远, 田恬, 等. 2018年中国重大科学、技术和工程进展[J]. 科技导报, 2019, 37(3): 6-26.
- [18] 陈广仁, 刘志远, 祝叶华, 等. 2019年中国重大科学、技术和工程进展[J]. 科技导报, 2020, 38(3): 7-33.
- [19] 刘志远, 祝叶华, 徐丽娇, 等. 2020年中国重大科学、技术和工程进展[J]. 科技导报, 2021, 39(3): 12-30.
- [20] Yan L, Ge J, Zheng L, et al. Cryo-EM structure of an extended SARS-CoV-2 replication and transcription complex reveals an intermediate state in cap synthesis [J]. Cell, 2021, 184(1): 184-193.
- [21] Yan L, Yang Y, Li M, et al. Coupling of N7-methyltransferase and 3'-5' exonuclease with SARS-CoV-2 polymerase reveals mechanisms for capping and proof-reading[J]. Cell, 2021, 184(13): 3474-3485.
- [22] 医学院成果“新型冠状病毒逃逸宿主天然免疫和抗病毒药物的机制”入选2021年度中国生命科学十大进展[EB/OL]. (2022-01-11)[2022-02-11]. <https://www.med.tsinghua.edu.cn/info/1049/3870.htm>.
- [23] Gu Z R, Pan S K, Lin Z Z, et al. Climate-driven flyway changes and memory-based long-distance migration[J]. Nature, 591(7849): 259-264.
- [24] 科学家揭秘鸟类迁徙路线形成原因和长距离迁徙关键基因[EB/OL]. (2021-03-05)[2022-01-10]. <https://m.gmw.cn/baijia/2021-03/05/34663062.html>.
- [25] Mao X W, Zhang H C, Qiao S Y, et al. The deep population history of northern East Asia from the Late Pleistocene to the Holocene[J]. Cell, 2021, 184(12): 3256-3266. e13.
- [26] 解锁东亚人的“哲学三问”! 付巧妹/张虎才揭示冰河时代东亚人群遗传和适应性基因演化[EB/OL]. (2021-05-28)[2022-02-08]. <https://blog.sciencenet.cn/blog-3423233-1288581.html>.
- [27] Wang T Y, Wang W, Xie G M, et al. Human population history at the crossroads of East and Southeast Asia since 11000 years ago[J]. Cell, 184(14): 3829-3841.
- [28] 解密1.1万年以来东亚与东南亚交汇处人群的遗传历史[EB/OL]. (2021-06-25)[2022-02-09]. <https://view.inews.qq.com/a/20210625A017U300>.

- [29] Liu X, Hu J, Li Z F, et al. Heralded entanglement distribution between two absorptive quantum memories[J]. *Nature*, 2021, 594(7861): 41–45.
- [30] 中国科大首次演示多模式量子中继并实现两个固态存储器的量子纠缠[EB/OL]. (2021-06-02)[2022-01-10]. <http://news.ustc.edu.cn/info/1055/75308.htm>.
- [31] Li R Y, Di L, Li J, et al. A body map of somatic mutagenesis in morphologically normal human tissues[J]. *Nature*, 2021, 597(7876): 398–403.
- [32] Pan H, Lan S, Xu S Q, et al. Ultrahigh energy storage in superparaelectric relaxor ferroelectrics[J]. *Science*, 2021, 374(6563): 100–104.
- [33] 材料学院研究团队报道高储能密度无铅介电材料新进展[EB/OL]. (2021-10-07)[2022-02-09]. <https://www.tsinghua.edu.cn/info/1175/87630.htm>.
- [34] Li D, Wang P, Zhu W W, et al. A bimodal burst energy distribution of a repeating fast radio burst source[J]. *Nature*, 2020, 598(7880): 267–271.
- [35] “中国天眼”迎来多项重磅成果 开启人类理解恒星形成新模式[EB/OL]. (2022-01-10)[2022-02-07]. https://www.cas.cn/cm/202201/t20220110_4821298.shtml.
- [36] Li Q L, Zhou Q, Liu Y, et al. Two-billion-year-old volcanism on the Moon from Chang'e-5 basalts[J]. *Nature*, 2021, 600(7887): 54–58.
- [37] Tian H C, Wang H, Chen Y, et al. Non-KREEP origin for Chang'e-5 basalts in the Procellarum KREEP Terrane[J]. *Nature*, 2021, 600(7887): 59–63.
- [38] Hu S, He H, Ji J, et al. A dry lunar mantle reservoir for young mare basalts of Chang'E-5[J]. *Nature*, 2021, 600(7887): 49–53.
- [39] 吴月辉. 中科院发布嫦娥五号月球科研样品最新研究成果[N]. *人民日报*, 2021-10-20(12).
- [40] Yang C L, Wang L N, Yin P, et al. Sulfur-anchoring synthesis of platinum intermetallic nanoparticle catalysts for fuel cells[J]. *Science*, 2021, 374(6566): 459–464.
- [41] 中国科大团队发明高温“硫固体胶”,有望助力燃料电池降本[EB/OL]. (2021-10-22) [2022-02-07]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1714284512286919207&wfr=spider&for=pc>.
- [42] Shang Y, Liu Z, Dong J, et al. Ultrahard bulk amorphous carbon from collapsed fullerene[J]. *Nature*, 2021, 599(7886): 599–604.
- [43] Nature 重磅! 刘冰冰教授团队高压技术突破,合成出极硬非晶碳! [EB/OL]. (2021-11-27)[2022-02-03]. http://news.cyol.com/gb/articles/2021-11/27/content_Rlo-YETGVK.html.
- [44] Li G R, Chen X P, Zhou F H, et al. Self-powered soft robot in the Mariana Trench[J]. *Nature*, 2021, 591(7848): 66–71.
- [45] 复旦大学彭慧胜团队《Nature》发文实现纤维聚合物锂离子电池新突破[EB/OL]. (2021-09-03)[2022-02-05]. <https://www.nsf.gov/csc/20340/20343/58397/index.html>.
- [46] Shi X, Zuo Y, Zhai P, et al. Large-area display textiles integrated with functional systems[J]. *Nature*, 2021, 591(7849): 240–245.
- [47] He J Q, Lu C H, Jiang H B, et al. Scalable production of high-performing woven lithium-ion fibre batteries[J]. *Nature*, 2021, 597(7874): 57–63.
- [48] 陈欢欢. 我国研发成功-271℃超流氦大型低温制冷装备[N]. *中国科学报*, 2021-04-19(1).
- [49] 2021年中国十大科技进展新闻[N]. *中国科学报*, 2022-01-19(1).
- [50] Wu J M, Lu Z, Jiang D, et al. Iterative tomography with digital adaptive optics permits hour-long intravital observation of 3D subcellular dynamics at millisecond scale [J]. *Cell*, 2021, 184(12): 3318–3332.
- [51] Peng H C, Xie P, Liu L J, et al. Morphological diversity of single neurons in molecularly defined cell types[J]. *Nature*, 2021, 598(7879): 174–181.
- [52] Qu L C, Li Y Y, Xie P, et al. Cross-modal coherent registration of whole mouse brains[J]. *Nature Methods*, 2022, 19(1): 111–118.
- [53] 机械系路新春教授带领研发首台12英寸超精密晶圆减薄机正式进入集成电路大生产线[EB/OL]. (2021-10-02)[2022-02-06]. <https://www.tsinghua.edu.cn/info/1175/87517.htm>.
- [54] 首个国产宫颈癌疫苗获得世界卫生组织预认证[EB/OL]. (2021-10-26)[2022-01-30]. <https://www.nmpa.gov.cn/yaowen/ypjgyw/20211026092419159.html>.
- [55] 张秀兰. 国内首个四价流脑结合疫苗获批 今年7款“新苗”均为国产[N]. *新京报*, 2021-12-31.
- [56] 程婷. 中国团队荣获超算应用领域国际最高奖项[EB/OL]. (2021-11-26)[2022-01-06]. http://www.cnii.com.cn/gxww/rmydb/202111/t20211126_326045.html.
- [57] 田先进. 中国科大发布新成果 为搜寻暗物质提供超灵敏量子精密测量技术[N]. *人民日报*, 2021-11-29(12).
- [58] Jiang M, Su H W, Garcon A, et al. Search for axion-like dark matter with spin-based amplifiers[J]. *Nature Physics*, 2021, 17(12): 1402–1407.
- [59] Yang Q Z, Syed S A A, Fahira A, et al. Structural analysis of the SARS-CoV-2 Omicron variant proteins[J]. *Research*, 2021, doi: 10.34133/2021/9769586.
- [60] 港大团队成功分离及培养奥密克戎毒株[EB/OL]. (2021-12-01) [2022-02-04]. <https://m.gmw.cn/baijia/2021-12/01/1302701461.html>.
- [61] 中国首个新冠病毒中和抗体联合治疗药物获国家药监局批准上市[EB/OL]. (2021-12-10)[2022-02-04]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1718716513888802132&wfr=spider&for=pc>.
- [62] 张均斌. 华龙一号全球首堆投入商业运[EB/OL]. (2021-01-31) [2021-12-23]. <http://news.cyol.com/con>

- tent/2021-01/30/content_18938238.htm.
- [63] 冉永平, 蒋建科, 丁怡婷. 全球首座第四代核电机组 华能石岛湾高温气冷堆示范工程并网发电[N]. 人民日报, 2021-12-21(1).
- [64] 胡喆. “天问一号”探测器实施火星捕获 我国首次火星探测任务环绕火星成功[EB/OL]. (2021-02-10)[2021-10-25]. <https://news.sciencenet.cn/htmlnews/2021/2/453-109.shtm>.
- [65] 我国首次火星探测任务天问一号探测器成功着陆火星[N]. 光明日报, 2021-05-16(1).
- [66] 天问一号探测器着陆火星首批科学影像图发布[EB/OL]. (2021-06-11)[2021-12-05]. <http://finance.people.com.cn/n1/2021/0611/c1004-32128667.html>.
- [67] 陆成宽. 我国强流高功率质子加速器研制再创世界纪录[N]. 科技日报, 2021-02-18(1).
- [68] 刘如楠. 我国强流高功率质子加速器创世界纪录[N]. 中国科学报, 2021-02-19(1).
- [69] “海牛 II 号”刷新世界深海钻机钻探纪录[N]. 湖南日报, 2021-04-09(2).
- [70] 喻思南, 唐亚慧. 在超 2000 米水深中成功下钻 231 米, 刷新世界纪录[EB/OL]. (2021-05-17)[2021-12-01]. http://www.xinhuanet.com/2021-05/17/c_1127453299.htm.
- [71] 李国利, 黎云. 天和核心舱成功发射 中国空间站建造全面开启[EB/OL]. (2021-04-29)[2021-11-23]. http://www.xinhuanet.com/2021-04/29/c_1127391173.htm.
- [72] 赵竹青, 吕骞. 神舟十二号载人飞船发射任务取得圆满成功[EB/OL]. (2021-06-17)[2021-11-30]. <http://finance.people.com.cn/n1/2021/0617/c1004-32132694.html>.
- [73] 神舟十三号载人飞船发射成功[EB/OL]. (2021-10-17)[2021-11-26]. http://www.xinhuanet.com/mrdx/2021-10/17/c_1310250910.htm.
- [74] 中国空间站开启 有人长期驻留时代[N]. 中国青年报, 2021-10-17(A3).
- [75] 瞿剑. 白鹤滩水电站首批机组投产发电[EB/OL]. (2021-06-28)[2021-10-23]. http://www.stdaily.com/index/kejixinwen/2021-06/28/content_1164243.shtml.
- [76] 白鹤滩水电站正式投产发电 首批投产机组发电量超 10 亿度[EB/OL]. (2021-07-18)[2021-11-23]. <https://news.cctv.com/2021/07/18/ARTIhZ30Ng2Ve88M7Ppl0e-51210718.shtml?spm=C94212.P4YnMod9m2uD.ENPMk-WvfnaiV.309>.
- [77] 廖洋, 邓旺盛. 我国时速 600 公里高速磁浮交通系统下线[EB/OL]. (2021-07-20)[2021-11-25]. <https://paper.sciencenet.cn/htmlnews/2021/7/461695.shtm>.
- [78] 白宇, 赵欣悦. 时速 600 公里高速磁浮交通系统在青岛下线[N]. 人民日报, 2021-07-21(1).
- [79] 赵超, 吕骞. “深海一号”大气田全面投产 每年将稳定供气超 30 亿立方米[EB/OL]. (2021-09-07)[2021-11-03]. <http://finance.people.com.cn/n1/2021/0907/c1004-32219827.html>.
- [80] “深海一号”将正式投产 能源站的背后是“中国速度”和“中国精度”[EB/OL]. (2021-06-24)[2021-11-03]. <https://news.cctv.com/2021/06/24/ARTIoz778A3rhjqEI-HIOHChy210624.shtml>.
- [81] 沈春蕾. “海斗一号”跨入万米科考新阶段[EB/OL]. (2021-10-10)[2021-12-23]. <https://paper.sciencenet.cn/htmlnews/2021/10/466673.shtm>.
- [82] 史俊斌. 世界最大推力整体式固体火箭发动机地面热试车成功[N]. 科技日报, 2021-10-20(2).
- [83] 重大突破! 世界最大推力整体式固体火箭发动机试车成功[EB/OL]. (2021-10-19)[2021-12-01]. http://tech.cnr.cn/techyw/technews/20211019/t20211019_52563743-7.shtml.

Top advances of science, technology and engineering from China in 2021

WANG Kangyou, XU Lijiao, LIU Zhiyuan, ZHU Yehua*

Editorial Department of *Science & Technology Review*, Beijing 100081, China

Abstract For the event sponsored by *Science & Technology Review* to select Chinese annual top advances in science, technology and engineering, altogether top 10 scientific, top 10 technological and top 10 engineering achievements have been selected from influential academic journals and scientific newspapers during Jan. 1 to Dec. 31, 2021. The selection procedure involved screening and recommending candidates internally, followed by appraisal of experts including editorial board members and external reviewers. This article introduces these selected achievements in a chronological order of publishing.

Keywords S&T achievements of China; major advance of science; major advance of technology; major advance of engineering



(责任编辑 王志敏)