

聚变能技术从科研向工程实践和应用迈进

# “人造太阳”加速商业化意味着什么

李君强 蔡金曼 连 敏

## ■瞰前沿·大国重器

10月14日—18日,“世界聚变能源集团”第2次部长级会议暨第30届聚变能国际大会在四川省成都市举行。会上,聚变能商业化成为热议的话题。

国家原子能机构主任单忠德表示,聚变能技术正在从科学研究向工程实践和商业应用的目标加速迈进。近年来,中国先后发布相关政策文件,将可控核聚变列为实现碳达峰碳中和目标、推进绿色低碳前沿技术攻关的重点方向,前瞻部署聚变能等未来能源科技创新和产业发展。

“人造太阳”如何从实验室走向产业界?全球范围内聚变能技术商业化的加速意味着什么?还面临哪些挑战?本期“瞰前沿”揭秘这一热点话题。

——编者

我国聚变科研装置加速向“产业枢纽”转型

近年来,我国聚变装置矩阵持续扩容,形成覆盖不同技术路线、衔接不同发展阶段的多元支撑格局,为工程化、产业化突破筑牢硬件基础。

仅今年以来,我国聚变科研装置就频频取得突破,加速从“实验工具”向“产业枢纽”转型。这既为工程化、商业化突破提供技术验证,更搭建起连接全球的开放合作平台。

新一代人造太阳“中国环流三号”(HL-3)国内首次实现原子核温度1.17亿摄氏度、电子温度1.6亿摄氏度,综合参数聚变三乘积实现大幅跃升,挺进燃烧实验。在实现“双亿度”等离子体运行基础上,日前,研究团队自主设计并建成了用于聚变能量导出研究的工程性液态金属和氦气工质热工研究台架,并已全面投入运行,为未来聚变堆的工程化应用奠定了关键实验基础。2023年12月,“中国环流三号”被确立为国际热核聚变实验堆(ITER)的“卫星装置”,面向全球开放。

今年以来,中国“人造太阳”——全超导托卡马克核聚变实验装置“东方超环”(EAST)取得了重大突破,“成功实现1亿摄氏度1066秒稳态长脉冲高约束模等离子体运行,再次刷新了世界纪录。”中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所所长徐国盛表示,“中国‘人造太阳’包含超过200多项自主创新的核心技术。”在持续优化1000秒级长脉冲技术的同时,中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所与多家机构共建联合实验室,孵化出等离子体焊接设备、微波污水处理装置等产业化成果。

紧凑型聚变能实验装置“夸父启明”(BEST)完成主机杜瓦底座落位安装,标志着项目主体工程建设正式步入新阶段。聚变堆主机关键系统综合研究设施“夸父”(CRAFT)自主设计的偏滤器原型部件近期顺利通过专家组测试与验收。该部件不仅是国际尺寸最大、热负荷最高的同类部件,更能直接应对聚变堆运行中的热管理、等离子体控制等重要工程挑战,为后续商用堆关键系统研发提供关键技术验证。

民营企业在相关领域的探索也有进展。

在先进聚变构型探索领域,新奥集团“玄龙—50U”球形环装置实现重要突破。作为全球首个采用氦—硼燃料实现百万安培等离子体电流的装置,它不仅验证了150千安下环向场线圈稳定运行、产生1.2特斯拉磁场的满负荷磁体性能,更达成了所有关键工程设计目标。

初创公司能量奇点研发的高温超导磁体“经

在位于安徽省合肥市的紧凑型聚变能实验装置园区,一栋栋建筑已经显现雏形。区别于过去的核聚变实验装置,紧凑型聚变能实验装置“夸父启明”(BEST)将实际演示氦、氦等离子体“燃烧”,有望演示聚变能发电。

近日,紧凑型聚变能实验装置主机关键部件——杜瓦底座研制成功并顺利完成交付,精准落位安装在主机大厅内。

紧凑型聚变能实验装置工艺与现场协调负责人郑磊带记者来到大厅内一座“深井”旁说,“那就是杜瓦底座。”循声望去,在“深井”底部,一个大型底座安装在其中。“紧凑型聚变能实验装置高约20米,直径约18米,外形是一个圆柱体,基于生物安全需

求和实物保护需求,被放置在这口‘深井’中,最后进行密封。”郑磊说。

“杜瓦底座是紧凑型聚变能实验装置主机的首个真空大部件,设计工况复杂,接口有数百个;结构尺寸大,直径约18米,高约5米,重400余吨,是紧凑型聚变能实验装置主机系统中最重的部件。”郑磊说,虽然是个“大家伙”,但它的吊装精度极高,表面水平公差需控制在15毫米以内,落位位置偏差不得超过正负2毫米,作业空间极度

天磁体”,成功实现21.7特斯拉峰值磁场强度。该磁体专为下一代托卡马克装置设计。

这些装置聚焦发电演示、工程验证、先进构型、核心部件等不同方向,共同织就我国聚变研究“多点突破、协同推进”的立体网络,为从科研向产业转化提供全方位支撑。

聚变能商业化仍面临技术、产业生态等多重挑战

从全球视野看,聚变能商业化已形成加速态势。据国际原子能机构《2025年世界聚变展望》报告,全球近40个国家推进聚变计划,处于运行、在建或规划中的聚变装置超160座,私人投资总额已突破100亿美元。

意大利政府颁布了旨在重新引入核能 and 建立全面可持续能源生产(包括聚变)框架的法令,目标是在2030年实现首个等离子体;美国能源部宣布了6个新的“聚变创新研究引擎”合作项目,提供1.07亿美元资金,以加速燃料循环、材料和先进模拟等领域的应用研究;德国发起“聚变2040”计划,2028年前拟投入3.7亿欧元加强研发……

中核集团核工业西南物理研究院聚变科学所所长钟武律介绍,实现聚变能的商业化运用,需经历6个阶段:原理探索、规模实验、燃烧实验、实验堆、示范堆、商用堆。其中,原理探索已于上世纪五六十年代完成,规模实验通过多装置获取数据规律,燃烧实验指的是开展燃烧等离子体实验,实验堆解决工程技术问题,示范堆验证商用堆可行性,商用堆实现规模化发电。目前我国正处于“燃烧实验”阶段,已具备开展相关实验的等离子体参数条件。2027年底,“中国环流三号”计划将等离子体三乘积提升2—3倍,温度突破1.5亿摄氏度,开展高性能等离子体实验。

中国聚变能源有限公司总经理、核工业西南物理研究院院长张立波表示,“2027年,我们期待能开启聚变能燃烧实验,2030年左右,具备中国首个工程实验堆的研发设计能力,2035年左右,建成中国首个工程实验堆,到2045年左右,能建成我国首个商用示范堆。”

尽管进展显著,聚变能商业化仍面临多重挑战。技术层面需突破等离子体稳态燃烧、耐强场高温负荷材料、超导磁体、氦燃料自持等难题;产业生态上,还需解决产供链成熟性、经济可承受性、投资可持续性、监管可适配性等问题。

构建支持聚变能工程化产业化发展的“生态体系”

为推动“人造太阳”的梦想加速照进现实,我国从政策引导、国际合作、机制创新等多个层面,构建起支持聚变能工程化产业化发展的“生态体系”。

2021年,《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》首次将可控核聚变列为“低碳前沿技术攻关”的重点领域。2022年,《“十四五”现代能源体系规划》提出,支持受控核聚变的前期研发,积极开展国际合作。2024年,《关于推动未来产业创新发展的实施意见》提出,要加强以核聚变为代表的未来能源关键核心技术攻关。

2025年9月,原子能法经全国人大常委会审议通过,明确规定:“国家鼓励和支持受控热核聚变的科学研究和技术开发”。

多地出台相关配套政策。安徽合肥依托“东方超环”,打造聚变能源产业集群,吸引上下游企业入驻,形成百亿元级产业规模;四川聚变科创城致力建设“可控核聚变全球性”技术研发高地,产业发展集群、对外交流中心”。

国际合作拓宽工程化全球视野。国家原子能机构秘书长黄平介绍,作为ITER计划的关键合作伙伴,我国高质量完成18个关键部件和系统的设计制造任务,2025年主导



## ■探一线

单个体细胞如何发育成完整植株?这是植物生命科学领域一个悬而未决的世界难题。2005年,《科学》杂志在其创刊125周年时列出了125个最具挑战的关键科学问题,它就是其中之一。

近日,山东农业大学牵头联合团队,首次完整揭示了单个植物体细胞如何通过基因重编程“改变命运”,最终发育为完整植株的全过程。该成果在线发表于《细胞》杂志。

相对动物细胞而言,植物细胞具有更强的发育可塑性。在一定条件下,它们无需受精就能发育成胚胎,这种现象称为“体细胞胚胎发生”。论文通讯作者、山东农业大学教授张宪省介绍,植物细胞有着独特的“再生”能力。例如,叶片等任意一种体细胞在经历重编程后,能回归到原始的干细胞状态,并进一步进入“体细胞胚胎发生”阶段,最终再生为一棵完整的植株。

1902年,科学家就提出了“植物细胞全能性”概念,用以解释植物细胞的上述能力。即植物细胞可脱分化形成类似受精卵的全能干细胞,进而发育为完整植株。这一现象广泛存在于植物界,包括农作物、木本植物,例如,多肉叶片能萌发出新株。但其背后的分子机制始终未解。

为揭开谜团,2005年起,张宪省率领的科研团队以拟南芥为研究对象开启探索。

“一片叶子能‘变身’为一株株新植物,我们想知道这种‘命运逆转’是如何发生的。”论文通讯作者之一苏英华说。

20年来,团队先后构建了单个体细胞直接发育成胚胎的实验技术体系,以及诱导单细胞起源的“体细胞胚胎发生”稳定体系,并首次发现大量生长素的积累是激活细胞全能性的“开关”。借助先进的科研仪器和前沿生物技术,团队首次捕捉到单个植物细胞的分裂全过程。

进一步研究后,团队找到了触发细胞全能性的“关键钥匙”:叶片气孔前体细胞特有的基因SPCH,与人工诱导高表达的基因LEC2,二者协同作用形成“分子开关”。“就像转动一把锁需要两把钥匙,缺一不可。”张宪省说。

两个关键基因如何“点亮”全能性?论文第一作者、山东农业大学副教授唐雨苹介绍,体细胞胚来源于单个的全能干细胞,原本注定要发育成气孔的“前体细胞”,在全能性调控因子LEC2与气孔发育关键因子SPCH的协同作用下,激活生长素合成通路,导致生长素特异性大量积累,致使前体细胞脱离“气孔发育之路”,转而成为能够孕育新生命的全能干细胞。

在上述发现基础上,团队完整记录细胞命运重塑的完整路径,揭示了关键的命运岔点。

在从“普通细胞”转变为“全能干细胞”的关键过渡状态下,细胞发生了深度的染色质重塑,大量沉默的基因被逐步激活,细胞命运轨迹由此产生分岔,为全能性的建立打开了大门。

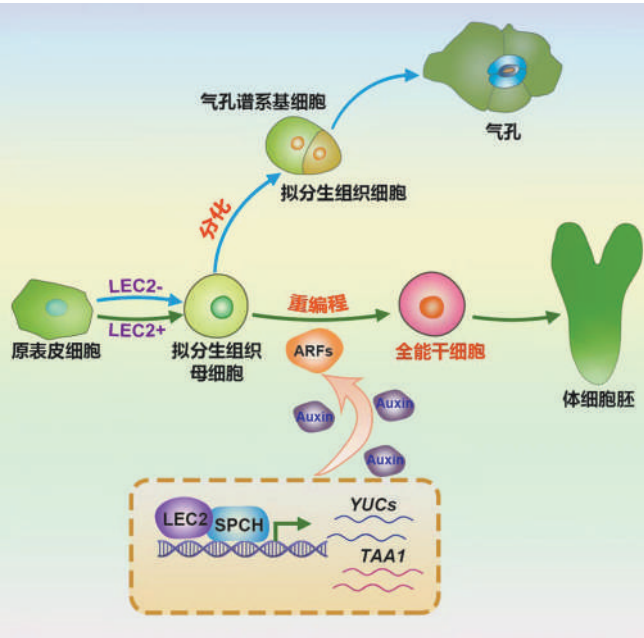
这一理论的解析不仅有助于理解植物细胞发育的根本规律,也为精准调控植物再生和定向改良作物性状提供了全新的思路与技术工具。

目前,该体系在小麦、玉米和大豆等作物上的实验正同步推进。“未来或可通过精准调控细胞全能性,实现作物优良品种的快速克隆,大幅度缩短育种周期,服务精准设计育种。”张宪省表示,“这也将为珍稀植物种质资源的高效保护、植物合成生物学注入新动力。”

我科学家解答植物生命科学领域世界难题

单个体细胞这样发育成完整植株

喻思南 王静



## 科学家揭示特定尺度下“推进力反转”现象

本报电（付蓉）近日,北京邮电大学丁阳教授团队在著名学术期刊《美国国家科学院院刊》发表研究成果,首次发现螺旋桨在特定尺度流体环境中出现的“推进力反转”现象,并对此进行了系统阐释。

研究发现,在毫米至亚毫米尺度下,顺时针旋转的螺旋桨不仅不会使微型潜艇向前推进,反而会使其后向运动。“像是螺旋桨在吸着自己往后走,而不是推着向前。”丁阳介绍,物体在不同雷诺数环境下表现出截然不同的运动特性。普通尺度下,螺旋桨通过向后推水产生向前的推力;而毫米至亚毫米尺度下,螺旋桨旋转时,原本应该向后喷射的水流被偏折向四周,像一个小型离心水泵,把周围的液体往外甩开,反而在螺旋桨中心形成吸力,这种吸力把潜艇拉向反方向。

这一发现不仅挑战了人们对螺旋桨推进方式的传统认知,也对微型医疗机器人、管道检测设备 etc 应用具有重要意义。“一些微型设备通常只有几毫米大小,传统螺旋桨推进装置可能失效,要研究如何调整参数,来抑制或利用这种离心吸力。”丁阳说。

本版责编:智春丽 管璇悦 陈世涵  
版式设计:汪哲平