

自主设计、自主建造全超导托卡马克核聚变实验装置创造多项世界纪录

# 人造太阳：为开发核聚变能源探路

本报记者 刘诗瑶

## 走近大科学装置③

眼下，合肥科学岛春光无限、生机盎然。小岛的中间地带，矗立着一座外形酷似宇宙飞船的大楼——中国科学院合肥研究院等离子体所；大楼深处，有一个大科学装置——全超导托卡马克核聚变实验装置(中文名为东方超环，简称EAST)，俗称“人造太阳”。

这座由我国自主设计、自主建造的核聚变实验装置，多次创造出等离子体运行的世界纪录，代表着我国磁约束聚变研究在高温等离子体运行物理和工程方面的研究水平，为全人类开发利用核聚变清洁能源奠定了重要的技术基础。

“人造太阳”长什么样？何时能造福人类？前不久，记者进行了实地探访。

### 一旦人类掌握了核聚变能，将拥有可使用上百亿年的清洁能源

尽管提前做了一些功课，当真正来到“人造太阳”面前，这个庞然大物依然让人震撼。装置主体高11米、直径8米、重达400吨，周围供电、冷却等辅助设备林立。其核心结构是一个像面包圈的环形磁容器“托卡马克”。

探访当天，“人造太阳”并未进行实验。大约十几名科研人员手持检测工具，在装置主体上下攀爬，进行设备维护和更新。装置零件数量巨大，材料和工艺完全依靠自主研发。从2006年建成至今，装置每年都会进行保养和零部件更新换代，确保实验的顺利进行。

俗话说万物生长靠太阳。在太阳内部无时无刻不在发生着核聚变，为大自然带来最普遍的能量来源。所谓“人造太阳”，是指充分利用这个科学原理，在地球上建造一套核聚变装置，像太阳一样发生核聚变反应，从而源源不断地产生能量。严格意义上讲，“人造太阳”的称谓并非专属于东方超环，凡是应用了类似原理的装置，都能这么称呼。

“人造太阳”重要性体现在哪里？这要从核聚变的优点说起。相比核裂变，核聚变没有放射性。氦和氦反应的生成物是氦气，对环境无害，一旦造成反应的等离子体熄灭，聚变反应会终止。核聚变的原料储量也很丰富，氦气可以直接在海水中提取，氦气可以通过中子和锂反应产生。据估算，一升海水中提炼出来的氦经过核聚变反应释放出的能量相当于300升汽油完全燃烧释放的能量。核聚变能凭借资源无限、清洁环保、不产生高放射性核废料等优点，是目前认识到的、可以最终解决全球能源问题的重要途径之一。一旦人类掌握了核聚变能，将拥有可使用上百亿年的清洁能源。

东方超环这座大科学装置对实现核聚变能有什么贡献？中科院合肥研究院副院长、等离子体所所长宋云海介绍，这

座大科学装置的科学目标，正是从前期基础研究出发，对受控核聚变相关的前沿物理问题展开探索性实验研究，既着眼物理理论突破，同时验证工程上的可行性，为将来打造真正的商业聚变堆、电站打下基础。

太阳发生核聚变，主要依靠星球引力约束等离子体。可地球上没有那么大的引力，要想让能量不失控，就需要借助磁场来约束。受控核聚变的实现离不开超高温、超低温、超强磁场、超大电流、超高真空的极限环境，科学家们用磁场做成“托卡马克”这座“磁笼”，牢牢将高温物质控制住，磁场外面用真空隔绝，保护装置材料不被烧毁。

尽管主流可控核聚变方式不止有磁约束这一种，还有惯性约束、引力约束等，但磁约束在实验室条件下接近成功，也是国际上主流的研究方向。因此，托卡马克核聚变实验装置被公认为是探索、解决未来稳态聚变反应堆工程及物理问题的最有效的途径，是地球寻找聚变能源出路的希望。

### 在东方超环这座大科学装置的牵引下，衍生出一系列创新成果

从5000万摄氏度放电30秒至60秒，再到百秒，再到1亿摄氏度运行20秒……东方超环不断刷新着放电纪录。如果能较长时间维持1亿摄氏度的高温，实现接近1000秒的放电时间，将证明人类距离解决核聚变商业化应用的步伐更进一步。

每一秒的增长，在科学上都具有极高的难度，背后是科研人员日以继日的钻研和呕心沥血的付出。

实现受控核聚变和稳态约束等离子体，是国际共性科学难题。根据物理学理论“劳森判据”，核聚变点火条件包括核聚变燃料的温度、密度和约束时间这三个要素。据等离子体所博士邵容介绍，想实现聚变反应，首先要达到1亿摄氏度以上，使聚变燃料完全电离，并在保证等离子体密度的前提下，将高温等离子体维持相对足够长的时间，不泄露不逃逸，才可能



我国自主设计、自主建造的全超导托卡马克核聚变实验装置。中国科学院合肥研究院等离子体所供图

释放出足够的能量。托卡马克的高温物质，就像是一群正在嬉戏打闹的淘气孩子，很难控制。温度、密度、时间这三个要素缺一不可，相互协调到最佳状态，才能实现稳态约束。

除了科学实验难度高，作为集成系统，这个装置对工程配合要求也极高。据了解，整个大科学装置总共有48个窗口，零件数量相当于5架波音777飞机的零件总和。短短的数十秒运行中，任何一个零件失灵，任何一滴不该出现的水珠，任何一个停滞的环节，都会导致实验风险。科研人员不舍昼夜地实验、调试，就是希望能更精确掌握等离子体的基本特性，研究改进磁笼子的形态和性质，在看似杂乱无章的现象中发掘科学规律，提出长时间等离子体稳定约束的最佳运行方案。

大科学装置集高精尖技术于一身，其承载的意义早已不止追求科学目标本身。在东方超环这座大科学装置的牵引下，衍生出一系列重要的创新成果，形成了超导技术、低温技术、等离子体技术、生物技术、材料技术、机器人技术等多个产业技术板块，推动一大批高新技术成果实现转移转化，实现了“一路摘瓜”沿途下蛋。

此外，质子和重离子放疗是目前国际公认最尖端的放射治疗技术，一直被发达国家所垄断。等离子体所利用大科学装置的超导技术，积极研制国内首套具有自主知识产权的医用超导质子癌症治疗系统，将大幅降低患者治疗费用。

此外，等离子体还能治疗皮肤病，有广谱抗菌、加速凝血、促进细胞增殖、无耐药性及副作用等优点；等离子体所将大科学装置离子束技术引入生物学科，致力于微生物

新菌种的创制、发酵调控、产物分离分析及终端产品的研究和产业化转化。

据介绍，我国的核聚变研究与国际基本同步，甚至在聚变某些技术领域确立了领跑地位，在超导、稳态控制、加热等方面巩固了中国特色。有国外期刊称赞“中国创造了聚变历史”“在这里科学价值得到极大体现”。

### 以东方超环项目为依托，科研人员参与了目前全球规模最大的国际科研合作项目

在国际科技合作方面，东方超环作为国际磁约束聚变装置中最前沿的国际开放平台之一，积极开展国际联合实验，促进了全面开放共享。

更重要的是，以这个项目为依托，我国科研人员参与了目前全球规模最大的国际科研合作项目ITER(国际热核聚变实验堆计划)。该计划的目标是在和平利用聚变能的基础上，探索聚变在科学和工程上的可行性。包含中国在内的多个国家参与了这个大科学项目，举多国合力向受控聚变实验堆迈进。

“东方超环很像ITER的缩小版，运行模式也都是采用了长脉冲高约束。我国科研人员在这个装置上摸爬滚打这么多年，每个材料都摸过，每个环节都练过，真正积累了等离子体运行的实际经验，能在科学原理和工程建设上为ITER提供宝贵参考经验。”宋云海说。

当前，我国承担了ITER10%左

右的采购包，其中七成由中科院合肥研究院等离子体所承担。科研人员勇于担当，直接争取到ITER最重要的核心设备“超导磁体”的建造任务。这个任务风险很大，但科研人员不畏艰难，高效高质交付了18个采购包制造内容，涵盖了ITER装置几乎所有关键部件，由上百家科研院所和企业承担。大电流高温超导直流电缆、脉冲高压变电站台主变压器……自主研发的各项设备运到欧洲，获得了合作伙伴的高度认可。也正因为他们们的出色表现，我国直接拿下了整个装置的首席任务。2020年10月，ITER计划启动主体安装工作，我国科研人员恪守承诺，确保安装进度正常。

参与ITER项目十几年，我国科研团队获得了深度参与国际科研合作项目的机会，积累了建造“人造太阳”的经验，在材料科学、超导技术等领域研发能力得到进步，为中国建造聚变工程实验堆(CFETR)奠定了基础。

“许多研究物理的年轻人通过在ITER的历练，开阔了眼界，锻炼了本领，回国后成为‘挑大梁’的骨干。”宋云海说，许多与合肥院合作的国内企业，在生产超导材料、打造零部件方面达到水平一流，积累了国际工程管理、国际合作经验；一些企业甚至走出国门，拿到了国际订单。

“作为东方超环的科研团队，我们感到责任重大、使命光荣。近期，我们希望通过努力，向超高温更长时间的放电努力，产出一批原创性、战略性、集成性创新成果；长期而言，我们盼望着能够实现大科学装置量输出大于输入，争取在2040年前后建成聚变电站，让千家万户早日用上核聚变能源，实现清洁能源梦想。”宋云海说。

一代信息技术，与企业深度合作、无缝对接，对工业生产流程进行系统优化和数字化、智能化升级，打造智慧工厂、智能车间、智慧园区、智慧港口，重塑企业的生产和管理方式，以最大限度地为用户提质增效、降本降耗。

目前，海澜智云的业务已涵盖化工、化纤、冶金、电子、纺织等八大行业，打造了华昌化工等多个工业互联网应用标杆案例，并得到国家发改委、工信部和节能协会的充分认可。

“截至去年，我们提供给用户的系统节能服务综合节能率达25%—40%，每年可为服务企业节约电量达7000万千瓦时、节约标煤达2.4万吨，减碳排量达6.3万吨。”徐国平说，“国家提出的碳达峰、碳中和目标提供了难得的历史机遇，我们将加大科技创新力度，不断拓展新业务，为节能减排、提质增效做出更大贡献。”

## 创新谈

大科学装置除了产出重大科技成果之外，还有很大的溢出效应，其建设与应用本身就是科技创新的过程，能从多方面推进创新，同时还是人才成长的摇篮

最近，国内一些大科学装置相继传来好消息，西藏羊八井中日合作实验在国际上首次发现超高能宇宙线加速器在银河系中存在的证据，距离解开宇宙线起源的世纪之谜又近了一步；500米口径球面射电望远镜(FAST)正式对全球开放，征集来自全球科学家的观测申请；包含先导巡天及正式巡天前8年的郭守敬望远镜(LAMOST)数据集对国内天文学家和国际合作者发布，相关光谱数据将成为建设“数字银河系”的重要基石。

功能强大的大科学装置，已成为重大原创成果产出和关键核心技术突破的重要条件。自上世纪80年代末的北京正负电子对撞机开始，我国相继建成了一批大科学装置，获得了许多具有重大国际影响的科学成果。这些装置的建设和运行，为提高我国自主创新能力发挥了重要作用。

评判大科学装置的价值，不能只盯着成果产出。一方面，科学研究有其自身的规律，成果产出需要长期积累，既要看眼前更要看长远；另一方面，除了产出重大科学成果之外，大科学装置还有很大的溢出效应。

事实上，大科学装置的建设与应用本身就是科技创新的过程，能从多方面推动创新。比如，大科学装置往往瞄准国际最先进水平，所需要的仪器需要自行设计研制，对所需材料和制造工艺要求极高。通过参与建设，相关企业的研发能力和制造水平得到大幅提升。在我国第一台X射线相干光源——上海软X射线自由电子激光试验装置的建设中，很多分布于长三角的企业竞标参与，绝大多数关键设备实现了国产化。其中，波荡器、直线加速器还实现了对外出口。大科学装置建设中取得的新技术成果，也被广泛应用于其他重大工程中。为FAST研发的抗疲劳索网技术，就在港珠澳大桥建设中大显身手。

同时，大科学装置还是人才成长的摇篮。在大科学装置的建设、使用中，许多优秀的青年科研人才和技术工程人才脱颖而出。高能物理界的多位实验物理学家和理论物理学家，都与北京正负电子对撞机有千丝万缕的联系。

在看到成绩的同时，也要看到不足。重建建设维护、后续运行和管理机制不够完善，相应管理维护人才欠缺等，也在一定程度上影响了大科学装置作用的发挥。

让大科学装置在科研中最大限度发挥作用，更好服务国家战略，相关部门还需加把力。比如，在重大科技基础设施的规划上要更为合理和科学，在重视立项和建设的同时，也要统筹考虑运行维护和后续升级改造。在管理层面，要重视科学研究的软环境建设，摒弃急功近利的量化评价。

## 新闻速递

### 科学基金改革取得阶段性成效

**本报电** 从国家自然科学基金委员会获悉，2020年科学基金深化改革任务取得阶段性成效。11.68万项的项目申请纳入分类评审试点范围，在8个科学部的10个学科试点实施负责人、讲信誉、讲贡献的评审机制，申请人对评审意见的评价满意率达87.3%。2020年，基金委共接收2364个依托单位28.11万项申请，择优资助1507个依托单位的各类项目4.57万项，资助金额283.03亿元。同时，基金委坚持优化科学基金管理机制，成立了交叉科学部，试点实施项目经费使用“包干制”等。(沙迪)

### 中国城市数字经济指数蓝皮书发布

**本报电** 日前，新华三集团数字经济研究院与中国信息通信研究院云计算与大数据研究所共同发布了《中国城市数字经济指数蓝皮书(2021)》，从总体态势、经济复苏、治理创新、区县发展四个方面解读了城市数字化发展的当前现状和未来趋势。调研显示，目前数字经济发展迅速，数据要素大大推动了城市现代化治理能力的升级。数字乡村、高新区、经济开发区等区县发展也初现成效。新华三集团首席执行官于英涛表示，为助力城市数字经济发展，公司更新了多个智能产品和解决方案，努力为用户提供数字化创新能力，加快推进数字产业化和产业数字化转型。(刘诗瑶)

### 数字化植物生态支持系统研制成功

**本报电** 日前，四川大学李绍才教授团队历经15年科研攻关，研制成功一种数字化植物生态支持系统。据介绍，这个系统集装饰、防护、防水、绿化、碳汇于一体，是一种能生长灌木花卉、用于绿色碳汇建筑的复合板材，可在墙面、坡面、声屏、护栏、场地、公园、道路交通等领域广泛应用。这个系统以力学稳定、水分—养分—植物高效协同调控为核心，已经申请发明专利近百项，并在干旱半干旱区、湿润半湿润区、青藏高原区等地进行了千余项的试验测试。(蒋建科)

本版责编：吴月辉

# 让大科学装置更好发挥作用

吴月辉

### 采用多变量控制、模型识别、大数据等先进技术助力节能降耗

## 海澜智云碳减排成效明显

本报记者 赵永新

诉记者，“这次智能化改造还延伸到工艺泵，实现了生产流程智能化，不仅能大幅节能降耗，还可以提升产品质量、提高生产效率。”

帮助华昌化工实现节能降耗、提质增效的，就是海澜智云精心打造的“海澜工业互联网智慧云平台”。

4月9日上午，在位于江阴市的海澜智云中控室，记者目睹了智慧云平台的魅力：随着工作人员点击鼠标，从硕大的电子屏幕上不仅可以实时看到海澜智云所服务企业的用电情况、节能效果，还能查阅已授权入网企业的生产运行状态、各个用能系统的能耗变化，以及他们每年、每月、每日的用电数量……

“通过这个平台，企业管理者对所有情况都了如指掌。”海澜智云副总经理陈炯告诉

记者，这个屏幕背后连接着省内外的6132家企业用户、109104套采集设备和1515450个监测点，成千上万条各类数据经过加密、打包后源源不断地上传，并被实时计算、存储、呈现。

“海澜智云不仅仅是一个数据采集、汇总、预警的平台，它更像一个聪明的‘大脑’，通过‘自我学习’‘私人定制’，依托大数据对传统行业进行个性化、系统化改造，在‘用料最少、用能最少、产能最高’的基础上，以数字驱动和智能运营赋能传统制造业的转型升级，找到实现高效生产的‘最佳平衡点’，进而提升其核心竞争力。”据徐国平总经理介绍，公司以工业互联网平台为基础，运用自主研发的多变量控制、机理模型、模型辨识等核心技术，以及人工智能、大数据、数字仿真等新

位于张家港的江苏华昌化工股份有限公司(以下简称“华昌化工”)，是一家以煤化工为主业的上市公司。作为耗能大户，近年来华昌化工对生产设备和工艺技术多次升级换代，节能降耗取得很大成效，多项产品的单位能耗位居行业前列。因此，当2018年年底海澜智云科技有限公司(以下简称“海澜智云”)技术团队前来商谈对全厂公用循环水系统进行数字化、智能化改造，并承诺“1年可节约1万吨标煤”时，公司能源管理办公室主任赵惠平怎么也不相信。

2020年8月，赵惠平惊喜地发现：该示范项目运行一年来，循环水系统的用电量节省了3000万千瓦时，折算成标煤是1万吨左右，减少二氧化碳排放2.66万吨。不仅如此，操作工再也不用跑来跑去、到现场手动调节水泵阀门了。他们在主控室的电脑上轻点鼠标，就可以对几百米外的设备精确操控。

尝到甜头的华昌化工与海澜智云签署了二期改造工程，对尿素车间和联碱车间进行智能化改造。“二期改造工程很快就要验收，预计今年六七月份正式投入使用。”赵惠平告

## 创新故事