

人类“终极能源”： 可控核聚变

文 / 吴西顺 王登红

＞ 可控核聚变想象概念图 视觉中国 / 供

第一作者简介 吴西顺，副研究员，研究方向为战略性矿产资源，中国地质调查局“期刊百篇优秀论文”获得者，中国知网“高 PCSI 论文、高被引论文、高下载论文”作者，其多篇论文获核心期刊“年度优秀论文”。

通信作者简介 王登红，二级研究员，中国地质科学院矿产资源研究所所长，战略性新兴产业矿产调查工程首席科学家，《中国矿产地志》总主编，李四光地质科学奖获得者。主持项目达 40 余项，提出并创新锂矿、稀土矿等“三稀”矿产成矿理论，研发系列创新技术，在四川甲基卡、广东大宝山、江西九龙脑等地取得十几处找矿新突破；主编《中国矿产地志》10 余卷，填补我国矿产资源领域大型专业志书空白。获国家科技进步奖二等奖 1 项，省部级奖一等奖 5 项、二等奖 1 项，中国地质学会十大科技进展 2 项，以及侯德封奖等多个奖项。公开发表论文 500 余篇，出版专著 35 部，培养硕 / 博士研究生 40 余名。其所带领的团队入选自然资源部高层次科技创新人才工程科技创新团队。

能源，是人类的永恒话题，从钻木取火、水车风车、挖煤烧炭到蒸汽机、内燃机、火车、汽车，再到飞机、火箭，都离不开能源的驱动。从煤炭、石油等传统化石能源到太阳能、风能、海洋能、地热能、核能等新能源，能源利用的形式越来越丰富多样，也越来越高效环保。20 世纪 40 年代，为追求更高的能量效率和更环保的能源方式，人们开始研究可控核聚变。如今，可控核聚变被誉为人类“终极能源”之解决方案。就在第 28 届联合国气候变化大会召开的前几周，国际原子能机构总干事拉斐尔·马里亚诺·格罗西在谈到核聚变时说：“这是第一次，所有的拼图都齐备了：物理学、政策驱动力和投资。”那么，可控核聚变为人类造福的新时代真的来了吗？

“终极能源”：核聚变

在核聚变发电的社会，人们可以实现真正的“电力自由”，不再有限电的担忧。

万物生长靠太阳，而地球只接收到太阳能量的二十二亿分之一就生长出万物，那么，太阳的能量有多大呢？太阳内部每秒聚变 6.2 亿吨的氢，产生的功率高达 38×10^{26} 瓦，比最大的氢弹大 18 亿倍。太阳直径是地球的 109 倍，质量是地球的 33 万倍，巨

大的引力把氢原子拉向温度接近 1 500 万摄氏度的太阳内部，由此产生的高温高压导致氢核持续聚变生成氦，同时释放出巨大能量。

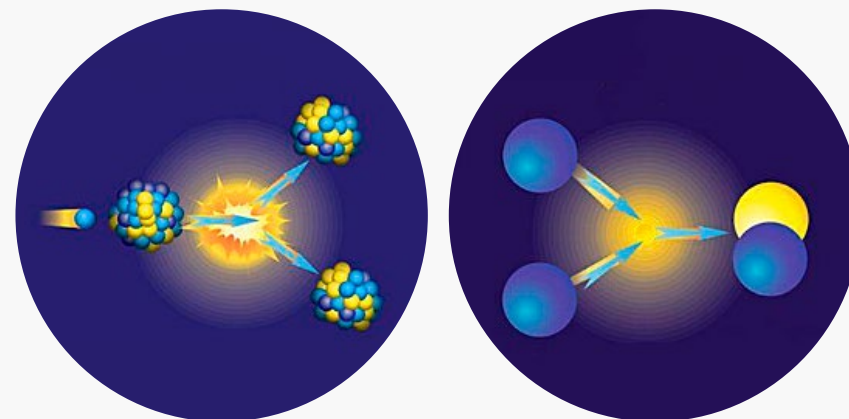
聚变与裂变同属于核反应，其过程均产生巨大的核能，但有本质不同。一个较重的铀原子受中子轰击会裂变为钡和氪两个原子，同时释放大量能量和三个新的中子，新的中子又激发其他铀原子发生裂变，从而发生链式核反应，这就是核裂变。今天，科学家已发现多种核裂变方式，但铀裂变还是最常见的，如原子弹和核电站。

核裂变存在风险，如核污染等，而核聚变则没有这种风险，其产物氦是自然界中广泛分布的惰性气体，无色、无味、无辐射。核聚变是与核裂变相反的过程，它是把小原子聚合成大原子。例如，氢是宇宙中最小的原子，它有三种同位素氕（H）、氘（D）、氚（T）。氕原子和氘原子在一定条件下发生聚合，会产生一个氦原子和一个中子，并释放更多能量。氢弹就属于这一类型，而且能量比原子弹要大很多。可见，核聚变不但能量比核裂变大，而且没有核辐射的危险，是模仿恒星机制的一种清洁绿色终极能源。

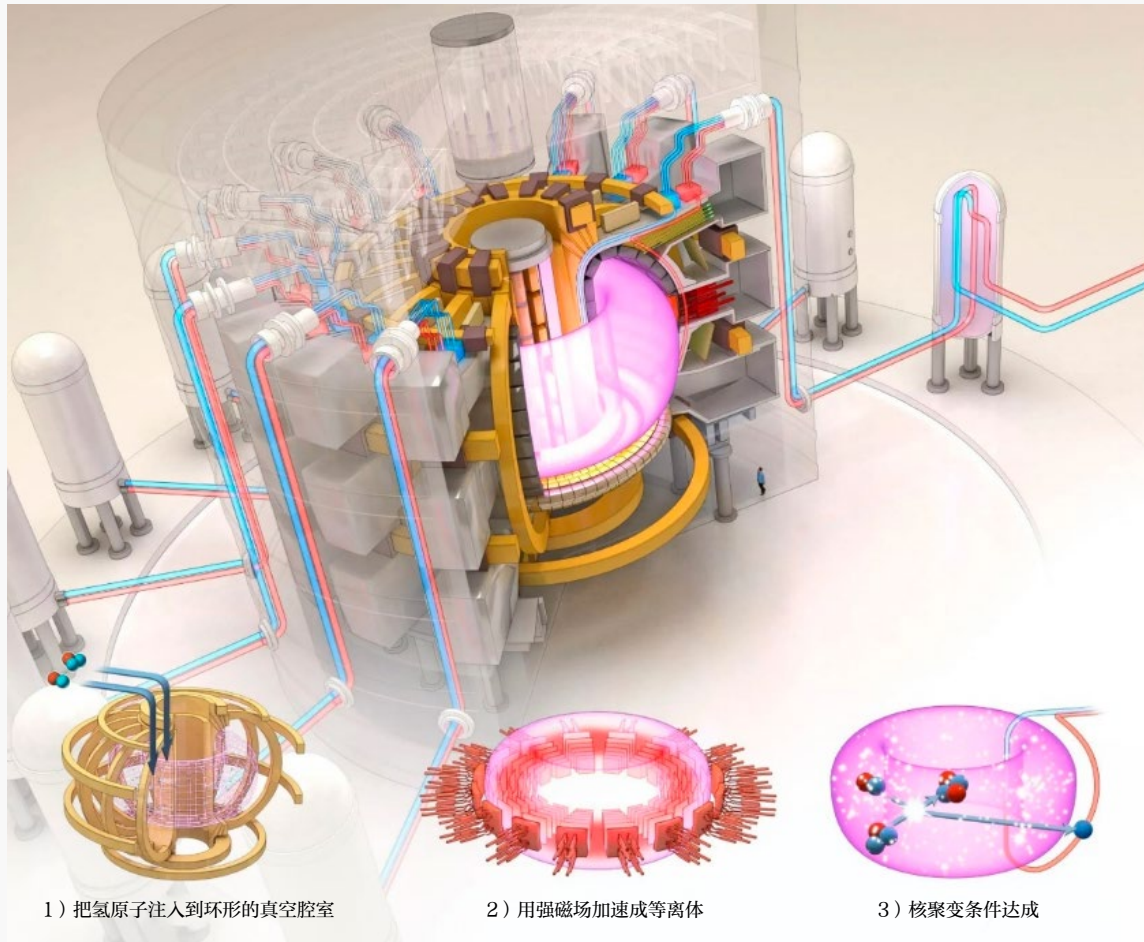
虽然氢弹利用的是无污染的核聚变，但它是爆炸式核能武器，破坏性的爆炸能量无法维系长期的日常生产生活供电需求，要想和平利用核能，还需要研发可控核聚变，人们称之为“人造太阳”。

“人造太阳”：可控核聚变

太阳之所以能长期发生核聚变，是因为其存在着巨大的引力场，同时太阳的核心还有着近 1 500 万摄氏度的高温。“人造太阳”不可能制造如此高温高压的巨大引力场，于是人们主要采用磁约束和惯性约束来解决“人造太阳”的相关问题。



＞ 核裂变与核聚变示意图



磁约束，是利用磁场把氘、氚等轻原子核和自由电子组成的超高温等离子体约束在有限空间内，让核聚变反应发生并释放能量。由于在核聚变高温下没有任何材料是固态的，俄国科学家于1968年首先提出用“托卡马克（Tokamak）”方法来约束核聚变。托卡马克是俄语中“磁场”“环形”“真空室”三个词词头的组合。这种磁约束的形状就像一个“甜甜圈”，用无形的磁场将等离子体束缚住而持续反应。托卡马克技术较为成熟，如位于英国的JET装置于2021年12月生产了5秒内持续提供59兆焦耳的能量。除了托卡马克，仿星器、磁镜、球形环、紧凑环、环箍缩等采用的也是磁约束方法。

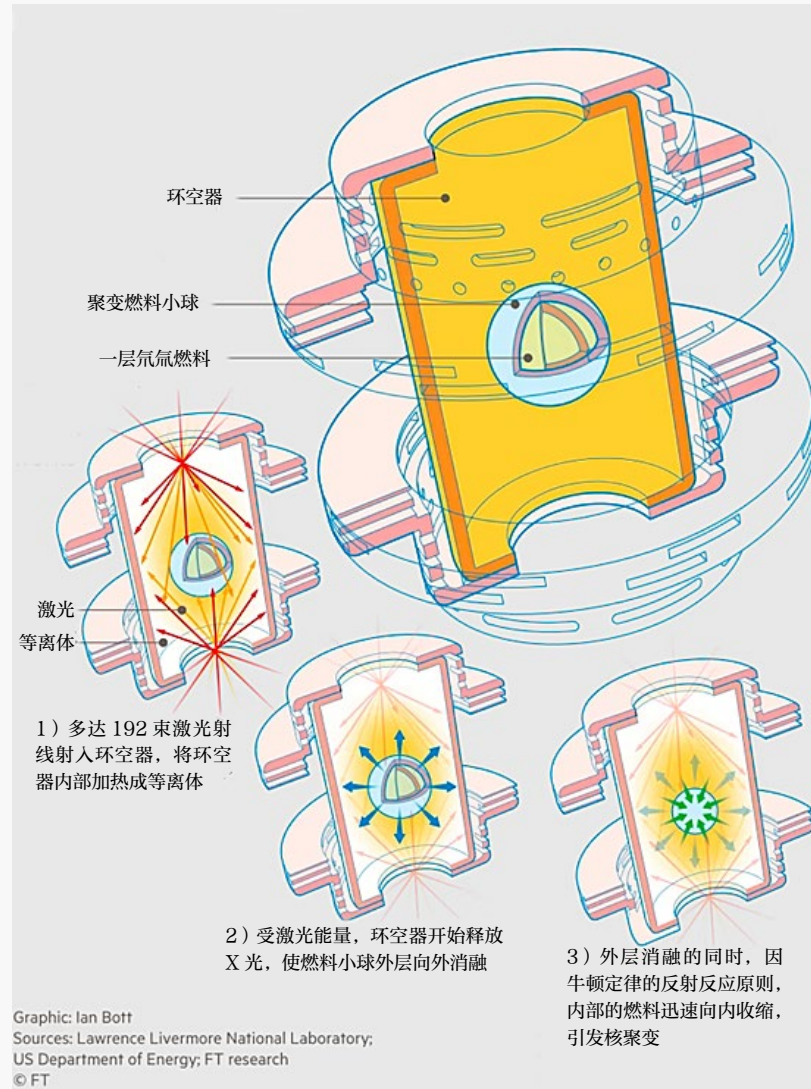
> 托卡马克磁约束示意图

国外研发进展

截至2022年年底，全世界约130个国有或私营聚变实验堆中有90个在运行，12个在建，28个在计划中。科研经费不足

是当今制约核聚变研究的最大问题。例如，近70年里，美国研究经费平均每年仅5亿美元。英国政府将在2027年前共投资6.5亿英镑支持核聚变研究，德国未

来五年将投资超过10亿欧元用于核聚变开发。尽管如此，经费仍然不足。然而，科学家们用如此少的资源却取得了如此大的成就，实属不易。从前，核聚变研



惯性约束，是利用外壳的惯性限制聚变规模，通过内爆对热核燃料进行压缩，使其达到高温高密度条件，进而实现热核点火并燃烧，其中最有名的是用激光作为驱动源的惯性约束。2023年7月30日，美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室宣布国家点火装置（NIF）取得新突破，就是采用“激光惯性约束”制造的，耗资35亿美元。

> 惯性约束聚变示意图

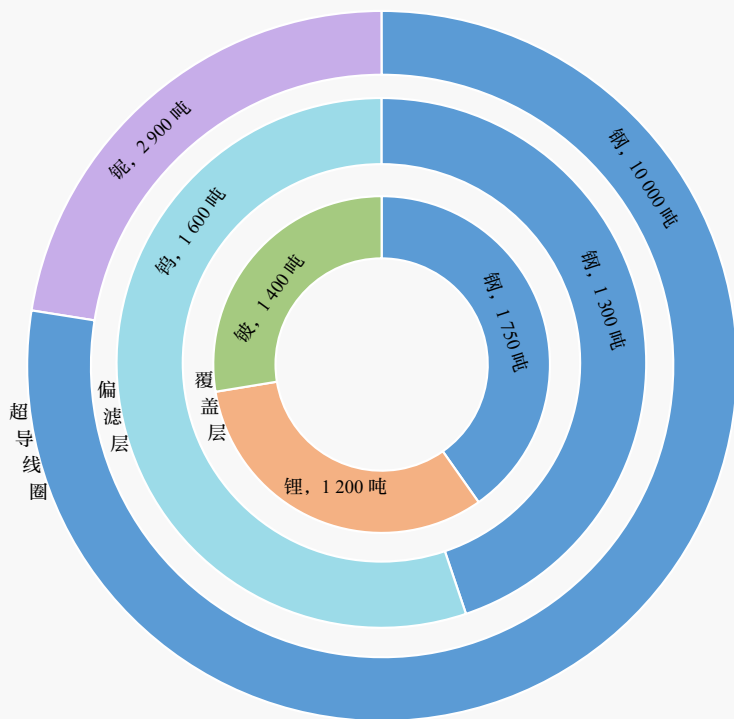
究主要由国家机构或国际政府合作来主导。2021年以来，鉴于核聚变的快速发展，私人资本开始加速进入小型商用托卡马克领域。

国际空前大合作开展国际热核聚变实验。位于法国南部的ITER是世界最大的核聚变堆，由35个国家合作建造，重2.3万吨，100多

万个部件。这次国际大合作的程度是人类史上前所未有的，如欧盟和俄罗斯等制造偏滤器和真空室，中国等建造磁体馈线（Feeders）和极向线圈（PF coils），美国制造ITER的“心脏”中心螺管（Central Solenoid, CS），日本等制造超环线圈（Toroidal Field Coils），印度制造最重的低温恒温器（Cryostat），韩国制造热防护（Thermal Shield），等等。

欧盟最早攻克磁约束技术，领头开发各种装置。1984年，欧洲多国共同合作建成了欧洲联合环状反应堆（Joint European Torus, JET）。除此之外，欧洲多国也掌握托卡马克技术，包括德国的ASDEXU、意大利的FTU、英国的MAST、法国的WEST，等等。

美国兼顾两种技术，其中，惯性约束获重大突破。劳伦斯·利弗莫尔国家实验室2009年启动国家点火装置（NIF），最初是为了通过模拟核爆炸测试核武器，后来被用于惯性约束研究。192束1053纳米、长度仅几纳秒的红外激光脉冲，被转换成351纳米的紫外线聚焦在燃料球上。燃料球是一个铅笔橡皮大小的金罐，装有胡椒粒大小的燃料舱。金罐被加热到几百万摄氏度后发出X射线，使燃料舱的钻石壳融化蒸发，燃料内爆压



“人造太阳”20年内对金属矿产的需求量

缩并加热舱中的氘和氚，实现核聚变。2016年10月，麻省理工学院的阿尔卡特（Alcator）C-Mod 创造了磁约束等离子体高压的世界纪录，首次超过2个大气压，每秒发生300万亿次聚变反应。2019年11月，洛斯·阿拉莫斯国家实验室的等离子体线性实验（PLX），结合了磁约束和惯性约束两种主流方法的优势，提升了生产效率。

日本曾长期处于世界可控核聚变前列。1985年建成的大型托卡马克 JT-60U 创造的5.22亿摄氏度聚变温度至今保持着世界最高温纪录，直到2021年8月8日，被美国国家点火装置打破。世界最先进的激光聚变器之一 Gekko-XII 和最大的螺旋磁约束仿星器也在日本。超导托卡马克 JT-60SA 与欧洲聚变能组织（F4E）合作开发，该装置高16米，可将等离子体加热到2亿摄氏度并维持约100秒，2023年10月实现了首次等离子体实验第一阶段目标。

我国研究进展

我国对可控核聚变的研究后来居上，发展稳健，并屡创新高。

在磁约束方面，中国科学院合肥等离子体物理研究所的“东方超环”EAST 和中核工业西南物理研究院的环流器二号 HL-2M 都很先进。

“东方超环”于2006年正式建成，是我国自行研制的国际首个全超导装置，近年来屡次创下世界纪录。2021年5月，“东方超环”成功在1.2亿摄氏度下运行101秒。2023年4月12日，EAST 又成功实现高功率稳定403秒稳态长脉冲高约束运行。我国新一代“人造太阳”屡获突破性进展，“环流二号”2022年等离子体电流突破1兆安培，“环流三号”则次年刷新持续时间403秒，并与ITER 签署协议面向全球开放。

在惯性约束方面，神光二号是我国2002年成功研制的大型激光装置，建在中国科学院上海光学精密机械研究所。上百台光学设备集成在一个足球场大小的空间内，可在十亿分之一秒的超短瞬间内发射出相当于全球电网电力总和数倍的强大功率，释放出极端高温高压。技术路线与NIF 类似。

2021年，中国聚变工程实验堆（CFETR）立项，计划在2035年开始开展大规模科学实验，在2050年建设聚变商用示范堆。国内小型初创公司，如能量奇点公司的“洪荒70”高温超导装置，于2022年2月完成首轮融资近4亿元人民币，主要用于经天磁体和奇门系统研发。清华大学核能所的衍生公司——星环聚能在2022年6月也完成数亿元天使轮融资，用于小型化、

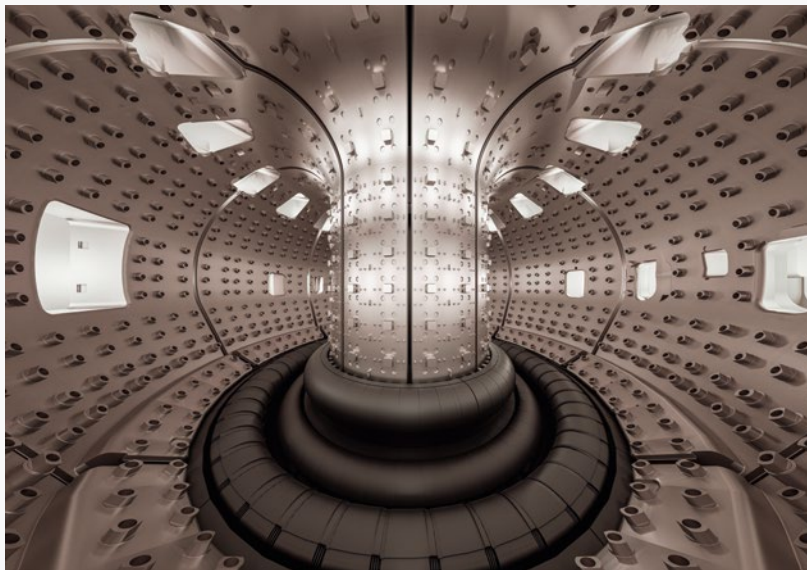
商业化、快速迭代装置的设计、建设、运行和研发，其SUNIST-2 球形托卡马克建成并获得了第一批等离子体。

矿产资源与“人造太阳第一壁”

矿产资源在“人造太阳”研发中不可或缺，有些甚至是关键材料。例如，核聚变反应堆包层材料要加入锂，以便中子与锂反应产生新的氚核。这一步至关重要，因为每次氘氚反应都会消耗一个氚核，如果不利用这个机会补充氚核，反应堆燃料很快就会耗尽。因此，氚增殖剂的主要材料是锂，包括锂陶瓷、纯锂或液态金属含锂共晶体材料。

聚变反应是以高速中子的形式产生大部分能量，由于中子不带电荷无法被磁场约束，它不仅可以穿越磁场，还可以穿过反应堆壁。因此，反应堆壁必须裹上多层“厚毯子”来吸收中子，并将其能量转化为热能，如冷却剂里有液态金属、水和氦气，而中子倍增剂材料则是含铍或钢的化合物，等等。我国科学家最近利用铍金属自主研发制造出“人造太阳第一壁”，经过特殊处理的高纯度铍直接面对反应堆几亿摄氏度的高温，向外依次为铜合金和不锈钢材料，均采用特殊的工艺共同构成隔热防护结构。

由此可见，金属矿产特制的核聚变反应堆包层材料，不但可以增殖氚以供燃料循环，还可以把中子能量转化为热能形式输出，以及屏蔽保护磁体线圈和外围环境。



托卡马克真空容器内部 视觉中国 / 供

“能源自由”在路上

可控核聚变的商业化应用前景非常广阔，目前各国政府加快实验研究，商业资本快速推进落地，新时代加速到来，工业应用越来越远。终极能源革命愿景即将呈现，新能源更环保、高效、便捷。实现“能源自由”不再遥不可及，家家户户能源充足，气候不再人为变暖，星际旅行能量满满。

人工智能和超导应用都将助力核聚变新能源事业，“人造太阳”将使人类命运更加光明和美好，诗和远方，蓝天白云，碧水绿茵，重塑人们的美好家园。

科学家的智慧加上全社会的力量将敦促这一切早日变成现实。正如托卡马克之父列夫·阿齐莫维奇（Lev Artsimovich）所说：“当整个社会都需要的时候，聚变就会实现。”新时代将加速到来，实现“能源自由”的科技革命正在路上。

本文由 中国地质调查局“中国矿产地质志（编号：DD20221695）”项目资助。

第一作者单位 / 中国地质图书馆
通信作者单位 / 中国地质科学院矿产资源研究所

（本文编辑：张佳楠）