

# “人造太阳”：能源自由的愿景

钟武律

## R 瞰前沿·大国重器

地球上的石油、煤等化石能源耗尽后，人类靠什么生活？一种被称为“托卡马克”的“人造太阳”实验装置，承载起人类迈向能源自由的梦想。近期，我国托卡马克核聚变实验装置取得重大成果：新一代“人造太阳”中国环流三号（HL-3）实现等离子体电流1.6兆安，达到国际领先水平，等离子体电流、聚变“三乘积”等核心参数再上新台阶；东方超环（EAST）首次实现1066秒长脉冲高约束模等离子体运行，再次创造了托卡马克装置新的世界纪录。本期“瞰前沿”聚焦国内外“人造太阳”的最新研究进展，看看人类距离可控核聚变还有多远。

——编者

“一团耀眼的白光从山脉尽头升起……”在科幻小说《三体》中，太空飞船核聚变发动机发出的光芒如同太阳。利用核聚变等技术，人类走出地球家园，走向广袤宇宙。

万物生长靠太阳。太阳之所以能发光发热，是因为内部的核聚变反应。核聚变能具有资源丰富、环境友好、固有安全等突出优势，是人类理想的未来能源。如果能造一个“太阳”来发电，人类有望实现能源自由。

2024年，科技部、工业和信息化部、国务院国资委等七部门联合发布《关于推动未来产业创新发展的实施意见》，指出加快推进以核聚变为代表的未来能源关键核心技术攻关。实现聚变能源应用是我国核能发展“热堆一快堆一聚变堆”三步走战略的最终目标。

可控核聚变作为典型的前沿、颠覆性技术，未来一旦实现应用，将彻底改变世界能源格局，保障我国未来能源安全。

### “人造太阳”从“核”而来 用1升水“释放”燃烧300升汽油的能量

核聚变是将较轻的原子核聚合反应而生成较重的原子核，并释放出巨大能量。

1952年，世界上第一颗氢弹成功试爆，让人类认识到氘核聚变反应的巨大能量。但氢弹爆炸是不可控的核聚变反应，不能提供稳定的能源输出。从此，人类便致力于在地球上实现人工控制下的核聚变反应（即可控核聚变），希望利用太阳发光发热的原理，为人类铺展能源自由之路。因此，人们也将可控核聚变研究的实验装置称为“人造太阳”。

氘聚变作为能源，具有明显优势。首先，氘聚变所需燃料在地球上的储量极为丰富。氘大量存在于水中，每升水可提取出约0.035克氘，通过聚变反应可释放相当于燃烧300升汽油的能量；氘可通过中子轰击锂来制备，在地壳、盐湖和海水中，锂大量存在。其次，氘聚变反应不产生有害气体，无高放射性活化物，对环境友好。

然而，“人造太阳”维持自身燃烧的条件非常苛刻。英国科学家劳伦在20世纪50年代研究了这一条件的门槛——也被称为聚变点火条件。据计算，实现可观的氘聚变等离子体离子温度要大于1亿摄氏度，等离子体密度、温度和等离子体能量约束时间的乘积（“三乘积”）大于 $5 \times 10^{31}$ 千电子伏特·秒/立方米。

数十年来，国际上探索了众多核聚变路线。目前，实现核聚变反应主要有引力约束、磁约束、惯性约束3种方式。太阳因本身质量巨大，可通过巨大引力，在极端高温高压的环境下发生引力约束核聚变反应。而在地球上，实现可控核聚变主要有磁约束核聚变、激光惯性约束核聚变两种方式。激光惯性约束核聚变可以采用激光作为驱动器压缩氘燃料靶丸，在高密度燃料等离子体的惯性约束时间内实现核聚变点火燃烧。采用强磁场约束等离子体的方法把核聚变反应物质控制在“磁笼子”里面，就是磁约束核聚变。

### 道路依旧充满挑战

“稳态自持燃烧”是源源不断获取聚变能的关键

在众多技术途径中，托卡马克是通过等离子体电流和外部磁体线圈产生的螺旋磁场约束聚变燃料离子，被认为有望率先实现聚变能源的应用，也是目前全球研发投入最大、最接近核聚变点火条件、技术发展最成熟的途径。

托卡马克最初是由苏联库尔恰托夫研究所的阿齐莫维奇等人在20世纪50年代发明的，

是一种利用磁场约束带电粒子来实现可控核聚变的环形容器。当前，世界上建成并运行了超过50个不同规模的托卡马克装置，不同托卡马克装置的几何尺寸、等离子体约束性能等也各有不同。目前中国运行的托卡马克主要包括常规托卡马克和球形托卡马克。

自托卡马克开展实验以来，等离子体综合参数不断提升，“三乘积”提升了几个数量级，逐渐趋近点火条件。欧洲的JET与美国的TFTR装置上获得氘聚变功率输出，揭示了托卡马克磁约束可控核聚变路线的原理可行性。2021—2023年，JET创造了69兆焦耳聚变能输出的世界纪录。

托卡马克磁约束核聚变研究虽然不断取得突破，但前方的道路依旧充满挑战。堆芯等离子体“稳态自持燃烧”是源源不断获取聚变能的关键，实现该目标主要有五大类问题需要解决。

一是等离子体非感应电流驱动问题。等离子体电流由欧姆驱动电流和非感应驱动的电流组成。欧姆驱动电流是基于变压器原理，通过等离子体外部线圈电流变化感应而来的。对于非感应电流驱动，一部分可以通过外部的高功率微波和中性粒子束注入来驱动，另一部分则来自等离子体自身压强梯度产生的“自举电流”，实际上希望等离子体自己提供的这部分电流份额越高越好。

二是加料与排灰问题。聚变等离子体被约束在真空中，形成一种类似“甜甜圈”的形状。

三是加料与排灰问题。聚变等离子体被约束在真空中，形成一种类似“甜甜圈”的形状。

四是等离子体与材料相互作用问题。聚变堆运行期间，一些携带高能量的粒子可能突破磁场的约束，撞击在聚变装置的内部部件上，对这些部件材料造成威胁。同时，如果聚变堆运行期间发生的粒子与材料相互作用在等离子体边缘产生大量杂质，这些杂质会稀释燃料离子的浓度，使聚变等离子体性能显著下降，聚变功率难以稳定维持。

五是大尺度磁流体不稳定性与大破裂控制问题。聚变等离子体中还存在大量的

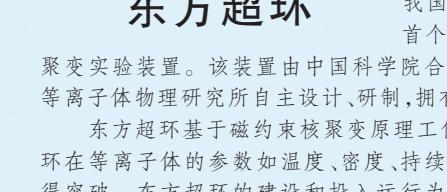
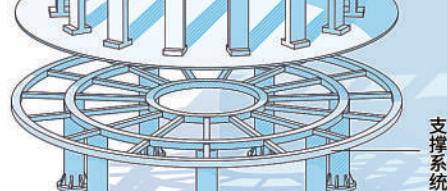
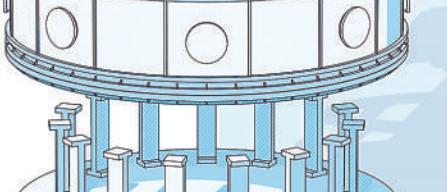
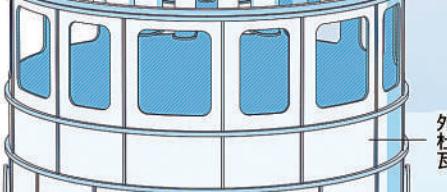
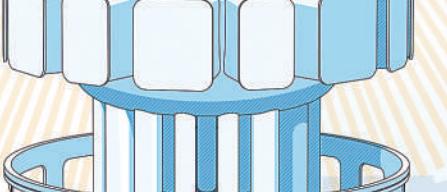
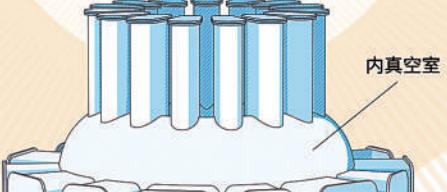
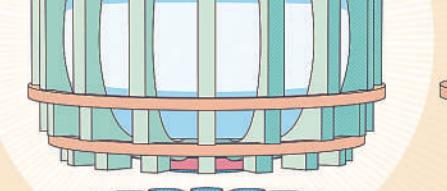
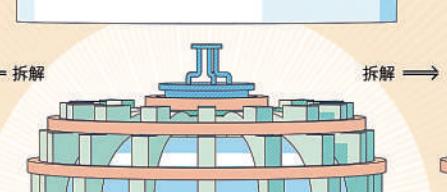
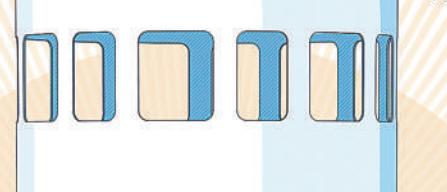
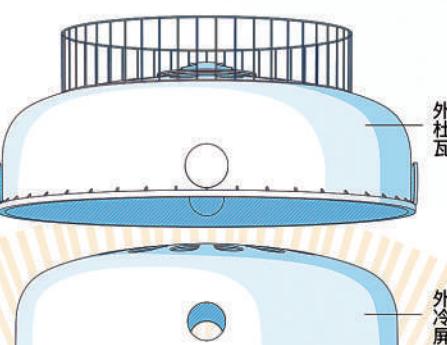


中国环流三号建成后取得的主要成果

不稳定因素，这些“不稳定因素”会在不同程度上破坏核聚变反应的安全稳定运行。

### 探索交叉领域 人工智能崭露头角

近年来，为开展“稳态自持燃烧”问题的研究，国际上各大装置实验向着更高参数迈进。我国的中国环流系列、东方超环等可控核聚变装置运行不断取得突破，如国内当前规模最大、参数能力最高的中国环流三号首次实现100万安培等离子体电流高约束模运行，创造我国磁约束聚变装置运行纪录。2023年在欧盟与日本合建的当前规模最大托卡马克JT-60SA上也实现了100万安培等离子体放电。2025年1月，



东方超环创造了1066秒的高约束模等离子体运行纪录。

近年来，人工智能在可控核聚变研究领域展现出强大的赋能作用。深度学习、扩散模型等前沿技术被应用于高精度等离子体模拟程序的加速计算等场景，带来技术突破。

2019年，哈佛大学与普林斯顿等离子体物理实验室的研究团队，使用在美国运行的DIII-D托卡马克装置上训练出的深度神经网络模型，以超过90%的正确率预警了JET装置的破裂事件。2022年，谷歌旗下DeepMind团队与瑞士联邦理工学院合作使用强化学习智能体在TCV托卡马克上实现了限流器、常规偏滤器、先进偏滤器甚至双环等离子体位形的控制。2024年，韩国中央大学与普林斯顿等离子体物理实验室的研究团队使用深度学习方法，在KSTAR与DIII-D托卡马克上成功预测了撕裂模不稳定性增长概率，并结合强化学习算法，在提升等离子体比压的同时对撕裂模增长概率进行控制。

国内机构、高校也在聚变与人工智能交叉领域开展了大量探索。中核集团核工业西南物理研究院将破裂预测、平衡反演代理模型、边缘局域模实时识别与控制等人工智能模块应用于核聚变装置的控制运行，有效解决了部分控制问题。

展望未来，可控核聚变一旦实现应用，将为人类提供丰富、清洁的理想能源。

科幻中的未来科技，或许能在可控核聚变的支撑下成为现实。

（作者为中国核工业西南物理研究院聚变科学所长）

资料来源：中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所

巨大能量从“核”而来

1克 铀-235 ≈ 1.8吨 石油 (核裂变燃料)

1克 氕-氚 ≈ 8吨 石油 (核聚变燃料)

氘 来自于水中

氘 可由中子和锂制备

EAST装置主机结构

资料来源：中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所

巨大能量从“核”而来

1克 铀-235 ≈ 1.8吨 石油 (核裂变燃料)

1克 氕-氚 ≈ 8吨 石油 (核聚变燃料)

氘 来自于水中

氘 可由中子和锂制备

EAST装置主机结构

资料来源：中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所

巨大能量从“核”而来

1克 铀-235 ≈ 1.8吨 石油 (核裂变燃料)

1克 氕-氚 ≈ 8吨 石油 (核聚变燃料)

氘 来自于水中

氘 可由中子和锂制备

EAST装置主机结构

资料来源：中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所

巨大能量从“核”而来

1克 铀-235 ≈ 1.8吨 石油 (核裂变燃料)

1克 氕-氚 ≈ 8吨 石油 (核聚变燃料)

氘 来自于水中

氘 可由中子和锂制备

EAST装置主机结构

资料来源：中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所

巨大能量从“核”而来

1克 铀-235 ≈ 1.8吨 石油 (核裂变燃料)

1克 氕-氚 ≈ 8吨 石油 (核聚变燃料)

氘 来自于水中

氘 可由中子和锂制备

EAST装置主机结构

资料来源：中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所

巨大能量从“核”而来

1克 铀-235 ≈ 1.8吨 石油 (核裂变燃料)

1克 氕-氚 ≈ 8吨 石油 (核聚变燃料)

氘 来自于水中

氘 可由中子和锂制备

EAST装置主机结构

资料来源：中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所

巨大能量从“核”而来

1克 铀-235 ≈ 1.8吨 石油 (核裂变燃料)

1克 氕-氚 ≈ 8吨 石油 (核聚变燃料)

氘 来自于水中

氘 可由中子和锂制备

EAST装置主机结构

资料来源：中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所

巨大能量从“核”而来

1克 铀-235 ≈ 1.8吨 石油 (核裂变燃料)

1克 氕-氚 ≈ 8吨 石油 (核聚变燃料)

氘 来自于水中

氘 可由中子和锂制备

EAST装置主机结构

资料来源：中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所

巨大能量从“核”而来

1克 铀-235 ≈ 1.8吨 石油 (核裂变燃料)

1克 氕-氚 ≈ 8吨 石油 (核聚变燃料)

氘 来自于水中

氘 可由中子和锂制备

EAST装置主机结构

资料来源：中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所

巨大能量从“核”而来

1克 铀-235 ≈ 1.8吨 石油 (核裂变燃料)

1克 氕-氚 ≈ 8吨 石油 (核聚变燃料)

氘 来自于水中

氘 可由中子和锂制备

EAST装置主机结构

资料来源：中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所

巨大能量从“核”而来

1克 铀-235 ≈ 1.8吨 石