

在未来三十年，核聚变技术有望实现突破。一旦突破，它会让发电成本降至0.05元/千瓦时，综合用电价格0.1元/千瓦时。低廉的用能成本，将有助于解决能源供给、粮食安全、环境治理等诸多难题。

# 核聚变技术：“终极能源”在路上

文 / 高正琦

1925年，经济学家康德拉季耶夫（Nikolai D. Kondratieff）发现，市场经济中存在一个50~60年的周期，这就是我们今天经常听到的康波周期。

推动康波周期的核心要素有两个：人口和技术。人口意味着需求，需求是推动市场发展的主要动力；技术意味着创新，创新能推动经济实现快速发展，推动经济与技术周期波动，进而让人类社会持续前进。

按照规律，在未来三十年，康波周期将进入新一轮上升期，这意味着，全球将迎来革命性的科学技术突破。这种突破将体现在四个方面：一是能源，二是材料，三是人工智能，

四是生物技术。也就是说，这四方面的科技突破，将决定未来50~100年的发展。

一种普遍的观点认为，以光伏为代表的新能源将是推动绿色发展的核心技术。但除了光伏，核聚变技术，即我们熟悉的“人造太阳”同样是能源行业的终极解决方案。

## 另一种能源解决终极方案

从17世纪至今，全球能源体系已进行了四轮演替。按照能源出现的顺序，四轮演替依次是木柴时代、煤炭时代、石油时代和天然气时代。接下来要登场的将是核聚变时代。

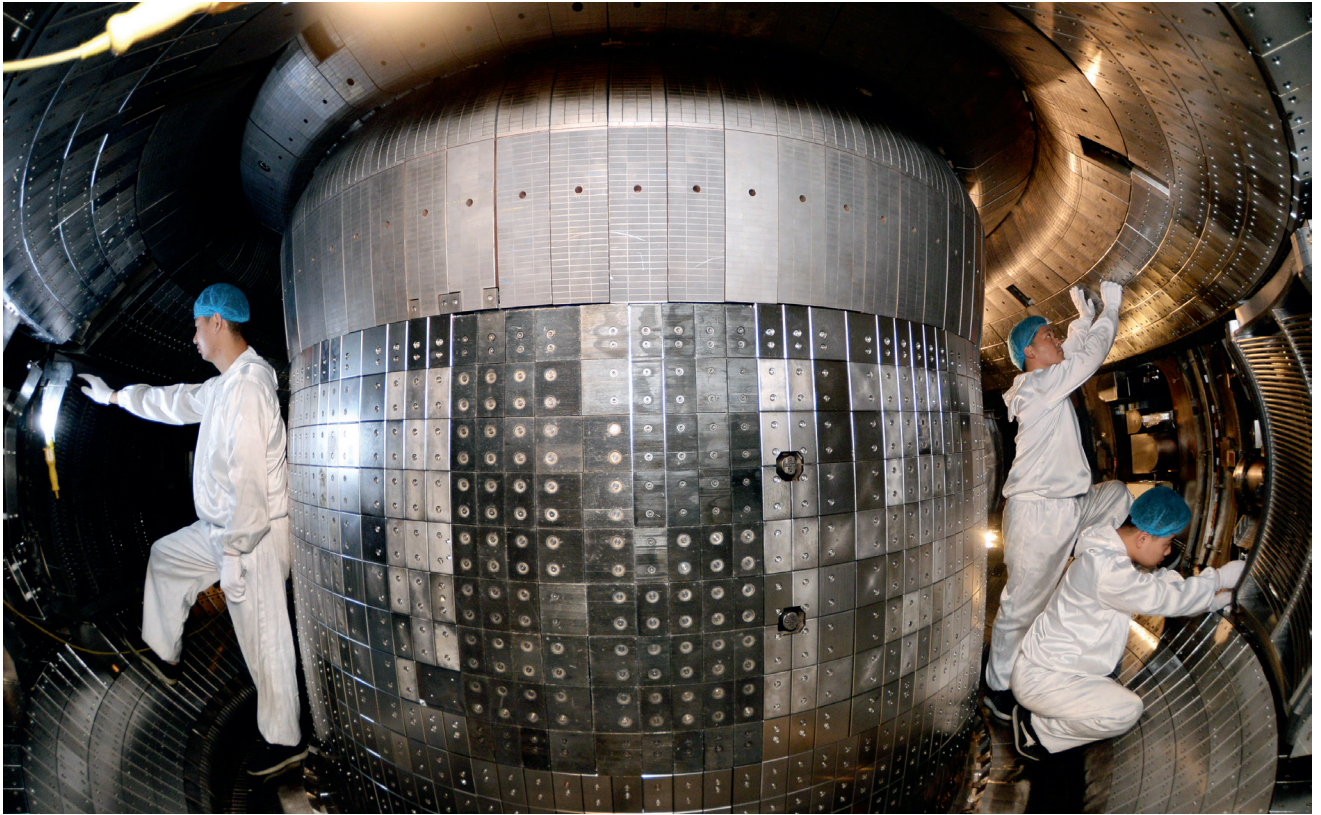
核聚变技术之所以能在众多技术

中脱颖而出，成为改变未来能源行业核心技术，我认为原因有三。

第一，核聚变释放的能量比核裂变更大；第二，核聚变不产生高水平核废料，可降低对环境造成污染的风险；第三，核聚变所需的燃料供应充足。地球上重氢有10万亿吨，每1升海水中含30毫克氘，理论上30毫克氘聚变产生的能量相当于300升汽油。

在未来三十年，核聚变技术有望实现突破。一旦突破，它会让发电成本降至0.05元/千瓦时，综合用电价格降至0.1元/千瓦时。低廉的用能成本，将有助于解决能源供给、粮食安全、环境治理等诸多难题。

核聚变通常有三种方式：重力场



**从17世纪至今，全球能源体系已进行了四轮演替。按照能源出现的顺序，四轮演替依次是木柴时代、煤炭时代、石油时代和天然气时代。接下来要登场的将是核聚变时代。**

>> 2021年4月28日，合肥，科研人员正在全超导托卡马克核聚变实验装置（EAST）真空室安装被动板钨瓦，检查天线。

约束（太阳）、惯性约束和磁约束。在能源领域，主要的可控核聚变方式有两种：一种是激光约束核聚变（惯性约束的一种），我国的神光计划、美国的国家点火计划都是这种技术方式；另一种是磁约束核聚变（托卡马克、仿星器、磁镜、反向场、球形环等），这种方式被认为更具应用前途。

2月9日，欧洲核聚变研发创新联盟（EUROfusion）、英国原子能管理局（UK Atomic Energy Authority, UKAEA）和国际热核聚变实验堆计划（ITER）联合宣布，

2021年12月21日，来自欧洲的研究团队创造了受控核聚变能量的新纪录：他们在目前世界上最大的聚变反应堆，即欧洲联合环（JET）中，将氢的同位素氘和氚加热到了1.5亿摄氏度并稳定保持了5秒钟，同时核聚变反应发生，原子核融合在了一起，释放出59兆焦耳的能量。

5秒内产生了59兆焦耳能量，也就是每秒平均产生11.8兆焦耳能量，大约相当于每秒产生3.3千瓦时电能，一小时可以生产接近1.2万千瓦时电，足够供应数万个家庭使用。

JET是目前全世界唯一能够使用

氘和氚的混合燃料进行运行的装置，它位于英国牛津郡卡勒姆（Culham）的英国原子能管理局基地。尽管JET完成了此次实验，但这并不意味着核聚变所发的电力能很快流入电网中。因为实现应用的前提，是其产生的能量需达到此次核聚变反应能量的3倍。

国际热核聚变实验堆计划（ITER）也在同时推进。这项计划的装置位于法国南部，由中国、欧盟、印度、日本、韩国、俄罗斯和美国七个成员共同资助，总耗资约为250亿美元，计划于2025年开始运行。但要让项目产生足够多的电力，仍需等到2035年。

## 中国“人造太阳”已经入2.0阶段

当前，我国对核聚变技术方向已进入2.0阶段，我们可以重点关注磁约束的两个主力装置：一是全超导托卡马克核聚变实验装置（EAST）、二是中国环流器二号M装置（HL-2M）。

全超导托卡马克核聚变实验装置的运行原理是在装置的真空室内加入少量氢的同位素氘或氚，通过类似变压器的原理使其产生等离子体，然后提高其密度、温度使其发生聚变反应，反应过程中会产生巨大的能量。

2021年12月30日，中科院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所展开实验，在为全超导托卡马克核聚变实验装置（EAST）注入能量达到1.73吉焦的条件下，实现7000万摄氏度、1056秒的长脉冲高参数等离子体运

行。这是目前世界上托卡马克装置高温等离子体运行的最长时间。

中国环流器二号M装置则是HL-2A的改造升级版。HL-2A是我国第一个具有偏滤器位形的大型托卡马克装置，该装置利用德国ASDEX装置主机3大部件改建而成，具有由相应的线圈和靶板组成的偏滤器，可以运行在双零或单零偏滤器位形。这对开展高约束模（H模）物理和边缘物理研究及提高等离子体参数是非常关键的。该装置1999年正式动工建设，2002年获得初始等离子体。

HL-2M属于工业西南物理研究院，其建造目的是研究未来聚变堆相关物理及其关键技术，研究高比压、高参数的聚变等离子体物理，为下一步建造聚变堆打好基础。2020年12月4日，装置首次放电成功。

HL-2M装置在“东方超环”“中国环流器2M”托卡马克装置上开展的实验，将为中国聚变工程实验堆（CFETR）物理相关的验证性实验奠定坚实基础。在“十三五”后期，我国已经开始独立建设20万~100万千瓦的聚变工程实验堆，在2030年前后建成中国聚变工程实验堆。

相较于目前正在建的国际热核聚变实验堆计划（ITER），中国聚变工程试验堆主要解决未来商用聚变示范堆必需的稳态燃烧等离子体的控制、氦的循环与自持、聚变能输出等问题。在工程技术与工艺上，对中国聚变工程实验堆的研发将重点聚焦于聚变堆材料、聚变堆包层、聚变能发电等ITER不能开展的工作。上述研发，将

**相较于目前正在建的国际热核聚变实验堆计划（ITER），中国聚变工程试验堆主要解决未来商用聚变示范堆必需的稳态燃烧等离子体的控制、氦的循环与自持、聚变能输出等问题。**

有助于我国掌握并完善建设商用聚变示范堆所需的工程技术。■

（作者系中油资产管理有限公司副总裁，张昭贵对本文亦有贡献）