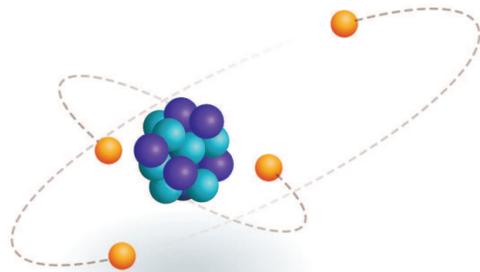


宇宙中，核聚变驱动着恒星发光发热。在地球上实现可控核聚变，一直是人类的“终极能源”梦想。上世纪50年代起，科学家就开始为实现“人造太阳”而接力攻关。由于技术难度极大，该领域曾流传着“未来能源或许永远存在于未来”的说法。

最近几年，随着新技术的兴起与应用迭代，以及商业资本的加速入局，人类用上可控聚变这种低成本清洁能源的希望陡增。就在全球最早的核聚变反应堆——欧洲联合环状反应堆（JET）运行40年后退役之际，一群聚变能初创企业正以蓬勃发展之势，向人类的“梦想能源”发起冲刺。



随着资本和初创公司涌入可控核聚变领域，“恒星引擎”或将点亮万家灯火

商业加速，人类“梦想能源”有望冲出梦想

■本报记者 孙欣祺/编译

日前，位于英国牛津附近的全球最早的核聚变反应堆——欧洲联合环状反应堆（JET），在其运行40年后宣布退役。据《自然》报道，拆除JET的过程将长达17年，研究人员将由此获得很多细节，并利用这些信息确保今后的核聚变发电厂的安全性和经济性。

美国西雅图以北的一个闪闪发光的大型仓库内，大卫·科特利正在建造他理想中的未来发电设施。在他身后是一组铝线圈，那是一架酷似星际飞船的超现实引擎，而他面前的则是一群风投公

司代表和私人投资者。科特利向他们表示，聚变能或将改变世界。如果成功，它将为人类提供大量电力，而不会产生任何温室气体。“理论上，我们可以用远低于当前的成本来发电，而且可以不用化石燃料。”

2021年11月的最新一轮融资中，科特利领导的Helion公司募得5亿美元。这些投资者中就包括OpenAI首席执行官山姆·奥特曼。目前，Helion的200多名员工正加班加点，试图造出世界上第一座商业聚变发电厂。他们希望，在建的这台最新机器能于今年年底输出电力。



延伸阅读

尽管核聚变技术已历经70余年发展，但在大众眼里仍十分神秘。那么，究竟什么是聚变能？为何这种能源如此难以提取、难以应用？

如今的核电站运用的是核裂变过程，它通过将重原子分裂而释放出的能量产生电力。核聚变则相反，它通过将轻原子融合在一起产生能量。当原子融合时，它们产生的新元素和粒子比之前总质量轻。这部分缺失的质量通过爱因斯坦的质能方程转化为能量。正是这种从质量到能量的转化，使聚变成为宇宙中最强大的能量释放过程之一。

这一过程如何在自然界中实现？原子核带正电荷。就像两块磁铁的N极一样，这些正电荷在靠近时会互相排斥——它们越靠近，原子就越难克服这种强大的排斥力而融合在一起。这种情况最见于恒星内部，比如太阳就是靠核聚变维持稳定的发光发热。

可控核聚变：将磅礴巨能变成潺潺流水

然而，在地球上，要在没有天然引力场的辅助下实现聚变，就会异常困难。聚变的原子必须被加热到很高的温度，并保持彼此足够接近，以克服它们之间的排斥力。在这个过程中，它们不能与容器或周围的任何东西发生相互作用或接触，否则它们将熔化容器——就好比要把太阳放入一个气罐中。

在地球上，人类已经实现核聚变，那就是热核炸弹。但这种聚变反应一旦开始，就不可能再遏制，只需几分之一秒就会释放出毁灭性的巨大能量。正因如此，聚变科学家的目标是建造一种能够安全地产生稳定电流的设备，让聚变产生的磅礴巨能变成潺潺流水，输送到人类社会的每个角落。

几十年来，科学家一直在探索两种主要方法来实现可控核聚变。一种称为磁约束，需要让等离子体悬浮在磁壳内。这种方法很难，它需要一个能够容纳但不接触热气的容器。另一种方法称为惯性约束，使用激光挤压微小的氢燃料颗粒，直到它们发生失控的聚变反应。这个过程与核武器相似，这也是为什么第一次成功产生净能量的实验是在核武器实验室进行的。但遗憾的是，截至目前，这两种方法的相关研究、实验，距实际应用仍相当遥远。

(孙欣祺/编译整理)

磁约束聚变 ITER 拖延而商业力量崛起

即使用“雄心勃勃”来形容Helion的预定目标，也实在是过于渺小了。因为，自上世纪五六十年代以来，全球各国政府投入了海量研发资金，希望在地球上获得完全清洁且取之不尽的能源。

过去几十年，科学家在磁约束和惯性约束两条技术路径上探索实现可控聚变能。但到目前为止，这个过程看起来比科学家们预期的要困难许多。

先来谈磁约束核聚变。在法国南部，始于上世纪80年代的“国际热核聚变实验反应堆”（ITER）计划的建设正在艰难推进中。作为人类有史以来规模最大、最宏伟的科学实验之一，ITER共有35个国家和地区参与，中国于2006年正式加入该计划。

有着“人造太阳”之称的ITER计划，目标是帮助人类社会实现由化石燃料向聚变能的转变。科学家希望它能产生比太阳核心高出数倍的温度，并在这个温度下“燃烧”等离子体，以实现像太阳一样源源不断输出海量清洁能源的目标。

这台机器的构想形成于上世纪80年代中期，竣工后将是一个巨型、高科技的圆环状容器，被称为“托卡马克”。作为聚变能实验堆，ITER要达成产生50万千瓦的聚变功率、持续时间达500秒的目标——这一功率相当于一座小型火力发电厂的水平。

然而，要做到这一点并不容易。自上世纪50年代以来，尚无任何一台托卡马克装置能够达到或接近将聚变能成功向电网输出的目标。而ITER是有史以来科学家设计出的最大也是最强壮的托卡马克装置，其设计者准备藉此最终证明核聚变电厂的可行性。

由于ITER计划不断发生进度延后和预算超支问题，它将成为史上拖延时间最长、成本上涨最多的科研项目。

2006年ITER计划正式启动时，各国同意在10年内资助约50亿欧元。按照计划，ITER应于2016年上线。2016年，ITER理事会宣称，其预估总成本将可能超过200亿欧元，并推迟到2025年建成并出束。然而，去年披露的一份文件显示：ITER计划不仅面临多次额外推迟，而且该计划余下的技术挑战可能需要进一步扩大预算。

ITER计划的项目延迟问题由来已久。例如，ITER复合体的底座包含一个防震系统，其中配备数百块减震橡胶和金属层压板。按照之前公布的时间表，这个工程2017年就应接近完工。在此基础上，反应堆本身的组装计划应于2018年开始。而ITER装置的两个主要部件——围绕在托卡马克周围的大型磁线圈和大部分托卡马克真空容器，本应分别于2017年2月和当年年底前准备运输，但直到2020年1月和4月才完成。

此外，ITER装置的部分零件迟迟不到位或存在缺陷，也拖延着整体工期。2022年底，ITER组织总干事彼得·巴拉巴斯表示，真空容器和隔热罩的问题将对ITER的首次运行日期，即“第一等离体”的完成日期产生严重影响。

2023年3月，法国核安全局（ASN）发现，ITER部分焊工的职业证被篡改过。这些焊工要对金属零件开展核电站级别的焊接工作。ITER官员随后禁止焊接服务商的人员在施工现场进行作业，但ASN还要求ITER审核相关承包商的所有工作，并计算问题草案影响声明。

不过，ITER计划实施以来，对全球磁约束核聚变的推动作用有目共睹。目前，世界各地的托卡马克装置新进展不断，还出现了一批以实现托卡马克技术商业化运行为目标的初创公司。

2023年4月，位于中国合肥的正在

运行的世界首个全超导托卡马克EAST装置成功实现403秒稳态长脉冲高约束模式等离子体运行，这创造了托卡马克装置高约束模式运行的新世界纪录。同年8月，新一代人造太阳“中国环流三号”首次实现100万安培等离子体电流下的稳态运行。

去年11月，世界上最新、规模最大的核聚变反应堆——由日本和欧盟共同合作建造运行的超导托卡马克装置JT-60SA成功点火。据报道，日本希望到2050年建造一座示范发电厂，作为JT-60SA和ITER未来商业化运行的铺路石。此外，来自麻省理工学院的聚变初创公司联邦聚变系统（CFS）目前已筹集到20多亿美元资金，超过之前所有核聚变创业公司融资之和。该公司也在使用托卡马克技术，计划在本世纪30年代初将其第一座发电厂接入电网并出售电力。

商业聚变能 资本入场博弈未来能源

在Helion公司的大卫·科特利看来，各国政府在聚变能源领域的探索脚步仍过于迟缓。他说，自己刚刚涉足科研时，就想要解决宇宙和人类的重大问题。但在攻读物理学博士学位期间，他发现，学校老师教的聚变方法“在我有生之年不可能付诸实践，更不可能为电网输送电力”。

于是，科特利把希望寄托于Helion。成立于2013年的Helion，其唯一目标就是将聚变能引入电网。据公司官网介绍，该公司的“磁-惯性聚变技术”分别吸取了磁约束聚变和惯性约束聚变的优点，综合起来形成一套超高效的聚变方式——这种聚变发电装置跳过了蒸汽循环的步骤，将直接捕获由磁场改变所产生的电流。

这是一种大胆或许也相当高效的发电方式，但它同样面临巨大的技术挑战。美国能源部在2018年委托第三方编写的一份报告中称，Helion需要40特斯拉的磁场来实现商业可行性，主要挑战是“能否在保持等离子体稳定性的同时实现足够强的压缩”。这可能还低估了“商业可行”的难度。

在聚变研究的早期阶段，科研人员也曾努力探索过类似的设计方案。但得益于高速电子设备、光纤，以及先进的固态继电器，加热和挤压聚变燃料的速度比过去有了大幅提升。“速度越快，就越能挤压、越能加热，我们就能从中获得越多的聚变能。”科特利说。

目前，Helion已经研制了六代设备，第七代设备Polaris的研发正在稳步推进。据透

露，这台在建的机器预计将于年内开始运行。科特利相信，他们将在今年年底证明能够从该设备中获得电力，尽管目前尚不清楚输出电力是否能超过输入电力。他表示，如果可以达到能量的“盈亏平衡点”，这台机器将可能实现一个里程碑式的突破。

为了彰显决心，Helion已经将自己摆上了资本的赌桌。去年5月，Helion与微软签署了一份电力购买协议，将从2028年开始为微软在华盛顿的园区和数据中心提供基载电力。科特利表示，这份购电协议标志着公司对供电的承诺是认真的，因为如果Helion未能履行合同义务，将支付一笔可观的违约金。

自2021年开始，商业资本正加速进入可控核聚变领域。当前，世界上共有50多个国家正在进行140多项核聚变装置的研发和建设。预计到2050年，世界上第一座核聚变发电厂有望建成并投入运行。来自聚变能行业协会的统计，2017年全球聚变能私营企业仅有5家，到2022年已接近50家，这些初创公司仅在2022年一年内就从风投机构获得了约50亿美元的资金，2023年更是获得了该领域约95%的募集资金。

除最终实现核能发电目标外，可控核聚变也拥有多样化的商业化模式。例如，由政府投入的大型托卡马克装置最终将建造可控核聚变发电站，而大量初创公司则会试图开辟更多新的商业模式，例如发电、核医疗、中子照相，以及围绕超导、中子源等新技术，生发出更多新兴产业。

惯性约束聚变 “点火”成功催化商用进程

第二种聚变方式是惯性约束。2022年12月，经过十多年不懈努力，美国国家点火装置（NIF）的科学家们宣布终于实现了激光“点火”，即核聚变产生的能量超过激光束输入的能量。如今，他们已多次复现了这一过程。

这个体育场大小的激光设施位于美国加利福尼亚州劳伦斯利弗莫尔国家实验室。该设施在最近的6次尝试中，4次明确实现了“点火”目标。负责实验室惯性约束聚变科学项目的物理学家理查德·唐表示：“我认为我们都应该为这一成就感到骄傲。”

在NIF装置终端的金色圆柱体内，悬浮着一颗针头大小的钻石胶囊，其中含有氘同位素和氚的冷冻颗粒。NIF的192束激光共同打到这一颗粒上，由此引发其内爆而使氘同位素发生聚变反应，产生氦和大量能量。2022年12月5日，这些聚变反应产生的能量首次超过了激光束传递到颗粒的能量，前者比后者多出约54%。

该设施在2023年7月30日创下新纪录：激光束向颗粒传递了同样的2.05兆焦能量，但这一次，内爆产生了3.88兆焦的聚变能量，比输入能量增加了89%。实验室的科学家们在同年10月进行的两次进一步尝试中又实现了“点火”。而实验室在6月和9月进行的两次尝试中，聚变产生的能量仅略高于激光提供的能量，不足以确认“点火”。

这些结果不仅证实了科学界十多年来一直追逐的目标，如今还可反复实现。虽然目前有些“点火”还存在瑕疵，但科学家们已更深入地掌握了这一过程中的重要变量及其操控方式。NIF负责该实验的安妮·克里彻表示，“即使出现这些问题，我们仍可获得超过1兆焦的净能量，这是很好的现象”。

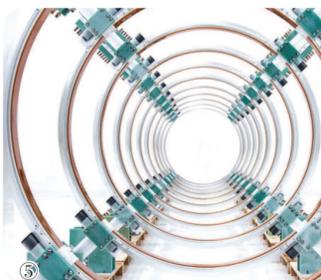
与ITER不同，NIF的初衷并不是建成发电厂，而只是作为一个复刻并研究



热核爆炸反应过程的装置。但现在，由于实现了可观的净能量增益，该设施已能激起人们对无限清洁能源的热情。美国总统气候问题特使约翰·克里在第28届联合国气候变化大会上呼吁建立新的国际伙伴关系，以推动聚变能源发展。

然而，要将这种聚变能源并入到电网，还有很长的路要走。美国密歇根大学核工程专业副教授卡罗琳·库兰兹解释，要产生持续的聚变能量流，需要激光每分钟，甚至每秒钟就能进行多次打靶。要达到这一目标，NIF必须将目前所使用的激光效率再提高数倍。NIF虽然是世界上最大的激光聚变点火装置，但它并非为此项任务量身定制——该设施的激光系统效率极低，单次“点火”尝试中超过99%的能量在到达目标之前就已经丢失。

美国科罗拉多州立大学研究中心负责人、物理学家卡门·梅诺尼表示，基于NIF最近的一系列成功，专门设立激光聚变项目的时机已经成熟。她说，“我们知道这种方法将奏效。但要技术发展到能够建造发电厂的水平，还需要时间。”



为研发更高效的激光系统，美国能源部于去年12月宣布了新惯性聚变能源研究计划（IFE-STAR），未来4年内将投资4200万美元建立新的研究中心，其资助的项目将整合国家实验室、学术界和工业界的专业知识与能力，以推进惯性聚变能源（IFE）系统向前发展。该计划将在高增益靶设计、高效率高功率激光，以及IFE相关的聚变靶制造、跟踪和应用等领域发力，包括建立一个包容而多样化的惯性聚变从业群体。



- ① 实验中的新一代人造太阳“中国环流三号”。 新华社发
- ② ITER托卡马克是世界上同类装置中最大的，等离子体体积达840立方米。 ITER网站
- ③ 日欧合作建造运行的超导托卡马克装置JT-60SA。 JT-60SA网站
- ④ 初创公司联邦聚变系统（CFS）正在建造世界首个商业意义的净能量聚变系统。 CFS网站
- ⑤ Helion公司的聚变反应堆磁线圈阵列。 Helion网站
- ⑥ 2022年，Helion公司车间内正在吊装大型磁线圈。 Helion网站

本版图片除注明外均视觉中国