

# 探讨磁约束的可替代方案

## 激光聚变、线性装置和先进燃料

文/Aleksandra Peeva

**激**光聚变是点燃核聚变反应的一种方法，是磁约束的潜在可替代方案（见第6页文章）。激光聚变通过惯性约束，使用高功率激光器加热和压缩含有氢同位素（例如氘和氚）燃料芯块的微小球形胶囊。

强烈加热胶囊表面，使燃料发生微内爆，结果燃料芯块表层被烧蚀，并发生爆炸。这个过程所产生的惯性保持燃料长时间受到约束，足以产生聚变反应。

激光聚变实验始于20世纪70年代。目前，美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室的国家点火装置拥有192束激光，无疑是世界上最大的激光装置。在国家点火装置中，一个称作“空腔”的圆柱形金色容器里面装有包含氘-氚燃料的胶囊，利用激光加热该容器内壁，激光与空腔的相互作用产生X射线，X射线使胶囊加热并压缩，在芯块内形成一个中心热斑，在那里发生聚变反应。

为实现点火——核聚变实现完全自持的点，国家点火装置的胶囊应该释放出比其吸收的能量多30倍左右的能量。

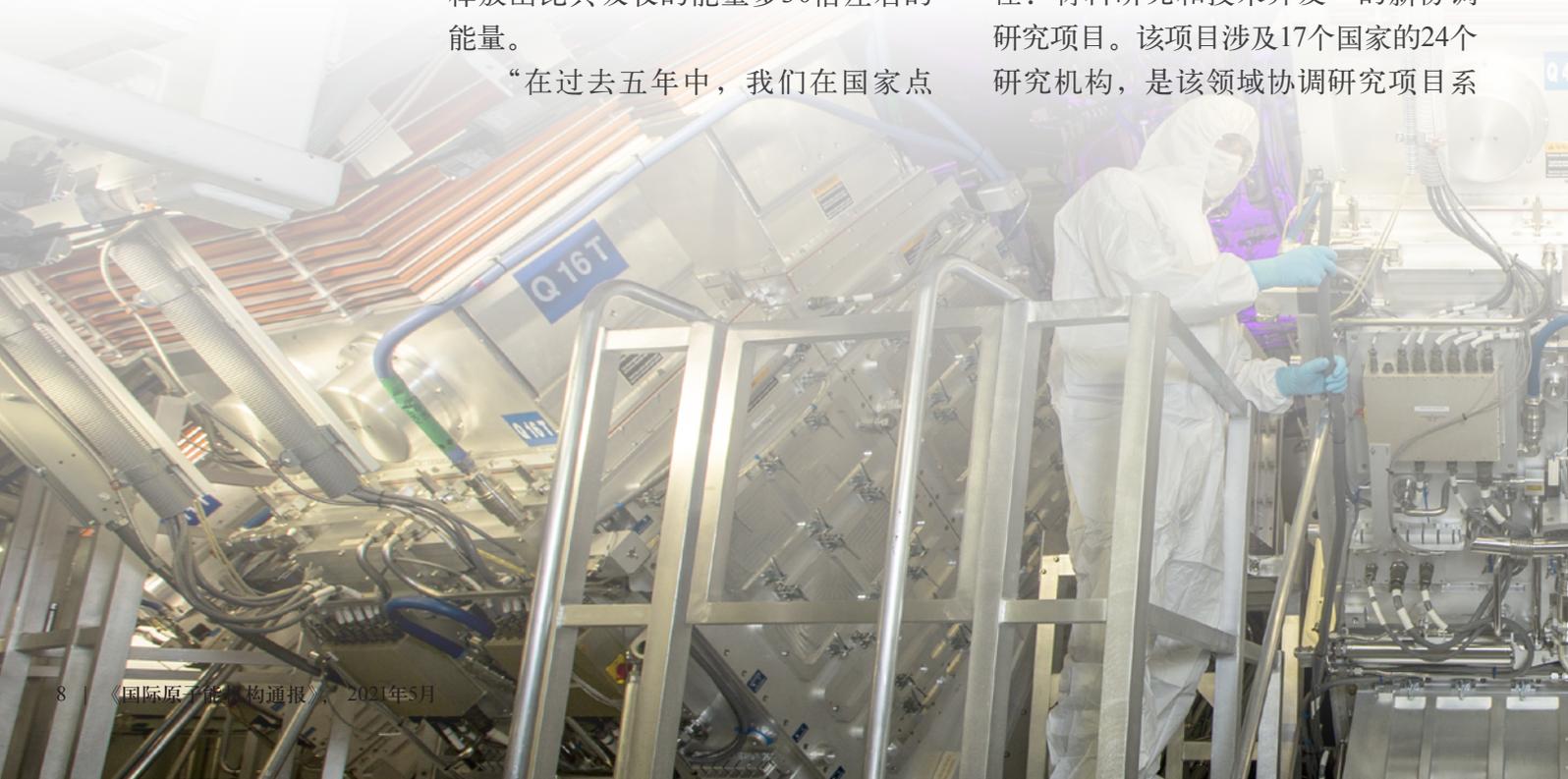
“在过去五年中，我们在国家点

火装置取得了重大进展，现在能够产生的能量比我们投入燃料热斑能量的2.5~3倍还多。”国家点火装置惯性约束聚变建模副主管Brian Spears说，“达到30倍放大增益仍然是主要目标，但这是非线性过程，我们已采取许多重要技术步骤，以实现这一目标。”

将燃料热斑内的中心压力增加到大气压力的几十亿倍，是实现商业可行的核聚变的关键。通过从塑料囊转向微晶、高密度碳囊，改进用于支撑碳囊的工程特性，以及增强用于向碳囊内填充聚变燃料的结构，国家点火装置已在该领域取得实质性进展。这使专家们能够显著提高从激光所产生能量到胶囊所吸收能量的能量耦合效率，并最终产生更多能量。

“重大科学挑战仍然摆在眼前，但最近在国家点火装置和其他装置的进展证明，我们离通过激光聚变实现点火阈值越来越近。”Spears说。

2020年，国际原子能机构启动了一个题为“从惯性聚变获得能源的途径：材料研究和技术开发”的新协调研究项目。该项目涉及17个国家的24个研究机构，是该领域协调研究项目系



列第四期项目，重点是开发高增益胶囊设计，以实现完全自持聚变。

## 光束碰撞产生聚变

激光和磁约束方案的另一种选择是利用由粒子加速器产生的离子束，使这些光束相互瞄准，在碰撞时便会发生聚变。这种方法的一大缺点是，粒子相互碰撞不发生聚变且不产生能量的概率很高。

美国私营TAE技术公司利用一种线性装置：一个25米长的圆柱形反应器。从反应器两端发射的两个等离子体，在反应器中央的云中发生碰撞与融合，实现聚变。然后，氘原子被点火进入云中以使云旋转，从而保持等离子体的高温和稳定性。

## 从可替代约束到先进燃料

通过激光器或线性装置实现核聚变的另一个优点是，这些方法可以更容易地适应使用氘和氚以外的燃料。传统上，这些氢同位素的混合物一直被用于实现聚变，因为它们可以在比其他燃料更低的温度下达到最高的反应速率。

然而，氘具有放射性，并且在自然中不会大量存在。因此，必须通过聚变所产生的中子与围绕着反应堆壁的锂之间的核反应进行“增殖”。这些中子能量也对反应堆真空容器中的

材料构成重大挑战，因为当中子与反应堆壁碰撞时，反应堆的结构和部件会变得具有放射性。这就需要注重辐射安全和废物处置方面的考虑（见第14页文章）。

为了绕过使用氘所带来的挑战，现在一些实验使用可替代或先进的聚变燃料，例如质子与硼-11（p-B-11）聚变中的硼-11。硼-11不具有放射性，自然界中发现的所有的硼含有80%左右的硼-11，所以它很容易获得。然而，质子与硼-11聚变的主要问题是，它要求等离子体的温度比含有氘和氚的等离子体温度高一百倍。幸运的是，通过激光点火或线性装置，加热被限定于热斑，而不必使整个等离子体温度显著提高。

“硼-11是地球上最清洁、最环保的燃料来源，有足够的自然资源供地球持续使用几千年，并且质子与硼-11聚变不产生任何有害的副产品。这些因素综合起来，可以最大限度地提高聚变电厂的安全性、经济性、效率和持久性。”TAE技术公司首席执行官Michl Binderbauer说，“质子与硼-11聚变的主要难点在于它需要比其他燃料循环更高的温度来维持聚变反应。TAE技术公司已开发一种可替代约束概念来解决这一难题。”

因此，先进燃料可以为未来生产聚变能源提供一种更有效和高效的方式。

国家点火装置操作人员在例行维护期间检查一个决定性的光学组件。国家点火装置是世界上最大和能量最高的激光系统，位于劳伦斯·利弗莫尔国家实验室。

（图/劳伦斯·利弗莫尔国家实验室）

