

燃烧等离子体 迈向核聚变发电的关键石阶

文/Matteo Barbarino

在我们的太阳核心，极端的温度和巨大引力所产生的巨大压力为核聚变创造了理想的条件。

然而，在没有恒星的极端引力的情况下，通过核聚变反应堆在地球上重现这种情况，会带来许多技术挑战。其中最大的挑战是将加热的聚变等离子体（由离子和在其中发生反应的自由电子组成的带电气体）保持在1亿摄氏度以上，将其粒子约束在一个磁场中，并保持足够长的时间，以便发生反应并产生能量。

了解和验证目前关于这种热核聚变等离子体的行为方式的假设，是聚变科学家和工程师为最终从核聚变产生电力而必须解决的关键问题之一。

温度比太阳更高的超级燃料

聚变的燃料选择是有限的。地球上性能潜力最大的燃料是由氘和氚离子的混合物制成的，氘和氚离子是氢的两种较重同位素。当在极端温度下碰撞时，氘和氚融合产生带有两个质子和两个中子的带电粒子，称为 α 粒子，以及自由中子。虽然中子逃离磁场，并且不与等离子体发生作用，但 α 粒子被磁场约束，并

进一步加热周围的等离子体。澳大利亚国立大学Matthew Hole教授说：“控制这种加热对利用核聚变发电至关重要。”

安全和可持续的聚变动力依赖这些带电 α 粒子及其能量来维持等离子体的恒定温度，从而使反应能够自持。实现这一点对于运行聚变反应堆至关重要。

20世纪90年代，聚变实验堆在不到一秒内产生了16兆瓦的能量。在这些实验中， α 粒子只提供了外部供热的10%。将通过ITER——正在法国建造的国际实验反应堆（见第10页文章）——之类的计划，探索了解 α 粒子提供更多热量时发生的情况。

“ITER将为我们提供研究‘燃烧等离子体’的机会，燃烧等离子体中至少66%的总加热量将来自聚变 α 粒子。在这些条件下，ITER将产生500兆瓦的聚变能量，持续时间长达500秒。”ITER组织科学司司长Alberto Loarte说。他说，ITER组织的实验将为燃烧等离子体物理学中的关键问题提供急需的答案，例如如何创造通过其 α 粒子的内部加热而自持的等离子体，以及如何为高聚变性能找到与反应堆壁的功率处理能力相适应的最佳运行条件。

“ITER将为我们提供研究‘燃烧等离子体’的机会，燃烧等离子体中至少66%的总加热量将来自聚变 α 粒子。”

—ITER组织科学司司长
Alberto Loarte

如何使等离子体自持

聚变反应堆性能的一个重要指标是它的“聚变功率增益”。它由等离子体的温度、密度和能量约束时间决定，是衡量磁场随着时间的推移如何有效地维持等离子体能量的一个量度。创造自持反应需要三个条件：大约1亿摄氏度的温度；比空气小一百万倍的密度；只有几秒钟的能量约束时间。

虽然所需的条件已被充分理解，但如何同时达到这些条件却远非显而易见。例如，增加等离子体密度在原则上是有利的，因为它增加了发生聚变反应的可能性。然而，美国普林斯顿等离子体物理实验室负责聚变的副主任Richard Hawryluk认为，当密度接近其最大值时，许多实验表明，等离子体约束的退化程度超过了预期。

为使ITER实验成功，需要找到解决这些问题的方案，而为此进行的许多研究需要国际合作。国际原子能机构通过其关于高能粒子物理、等离子体控制和聚变数据获取、验证和分析的一系列技术会议，为交流科学和技术成果提供了一个平台，并正在帮助开发可用于预测ITER和未来聚变动力堆中聚变等离子体行为的建模工具。

找到“最佳点”

最大的挑战之一是找到具有最大聚变功率和等离子体控制的最佳工作条件，以便在长时间内不打破运行边

界的情况下实现高性能。打破运行边界会产生问题，因为它可能导致不稳定，从而终止等离子体，这种现象被称为等离子体破裂。

“在像ITER这样的环形托卡马克型反应堆中，破裂可能会在几毫秒内迅速终止等离子体，并对反应堆部件产生巨大的热应力和机械应力。”ITER组织稳定与控制处科学协调员Michael Lehnen说，“国际原子能机构正在通过促进这一领域的实验、理论和建模工作的信息交流，帮助避免这种情况，同时特别强调将在今后几年为设计ITER破裂缓解系统奠定坚实的基础。”

最近纳入基于人工智能方法的实验和建模工作正在明确有效等离子体控制的要求，这有助于为未来聚变电厂的安全设计和运行铺平道路。”麻省理工学院等离子体科学与聚变中心研究科学家Cristina Rea说：“应用于破裂研究的强大的高级统计学和机器学习方法，可以帮助识别重要的模式，并揭示多年的实验数据中隐藏的信息。”

控制物理学家、建模师、场景开发人员和数据工程师之间正在形成富有成效的协同作用，他们正在设计新的解决方案，以避免这些破坏性的界限。Rea说，虽然评价这些数据驱动方法在ITER等项目中的适用性还需要开展更多的工作，但迄今的结果是令人鼓舞的。

高能粒子以等离子体的形式流过托卡马克型反应堆的可视化图。

(图/Shutterstock)