

# 缩小核聚变的材料和技术差距

文/Matteo Barbarino

**地**球上最具挑战性的科学和工程尝试可以说是聚变。建造一座核聚变反应堆，实现自持反应，并将这种能量转换为几乎取之不尽的电力，将永远改变人类和我们与能源的关系。尽管这听起来很诱人，但进展并不容易或顺利。围绕支撑这种复杂装置所需的结构、燃料和材料的技术挑战仍然只得到部分解决。

了解当今聚变能源所面临的技术限制和知识差距，首先要研究聚变反应堆本身。

在托卡马克反应堆内（见第6页文章），超高温的电离气体或“等离子体”被加热到超过1亿摄氏度，以诱发核聚变反应。在强大磁场的约束下，反应堆壁被保护起来，免受多变等离子体的影响。

核聚变中使用的等离子体通常由氢的两种重同位素——氘和氚——组成，然后聚变产生氦和中子。在核聚变电厂中，工程师们希望通过尚未测试的锂增殖区屏蔽层，对聚变产生的中子作出反应，“增殖”或创造更多

的氦。

英国原子能管理局首席执行官Ian Chapman解释说：“聚变所产生中子的能量对聚变电厂第一壁和真空容器构成严重挑战，这意味着需要考虑辐射损伤、生物屏蔽、远程操作和安全等问题。”

工程师的主要任务是开发能够承受高温和反应产生的强中子注量的高性能材料。了解运行条件对面向等离子体的部件的影响，对于未来的大型核聚变电厂也是至关重要的。

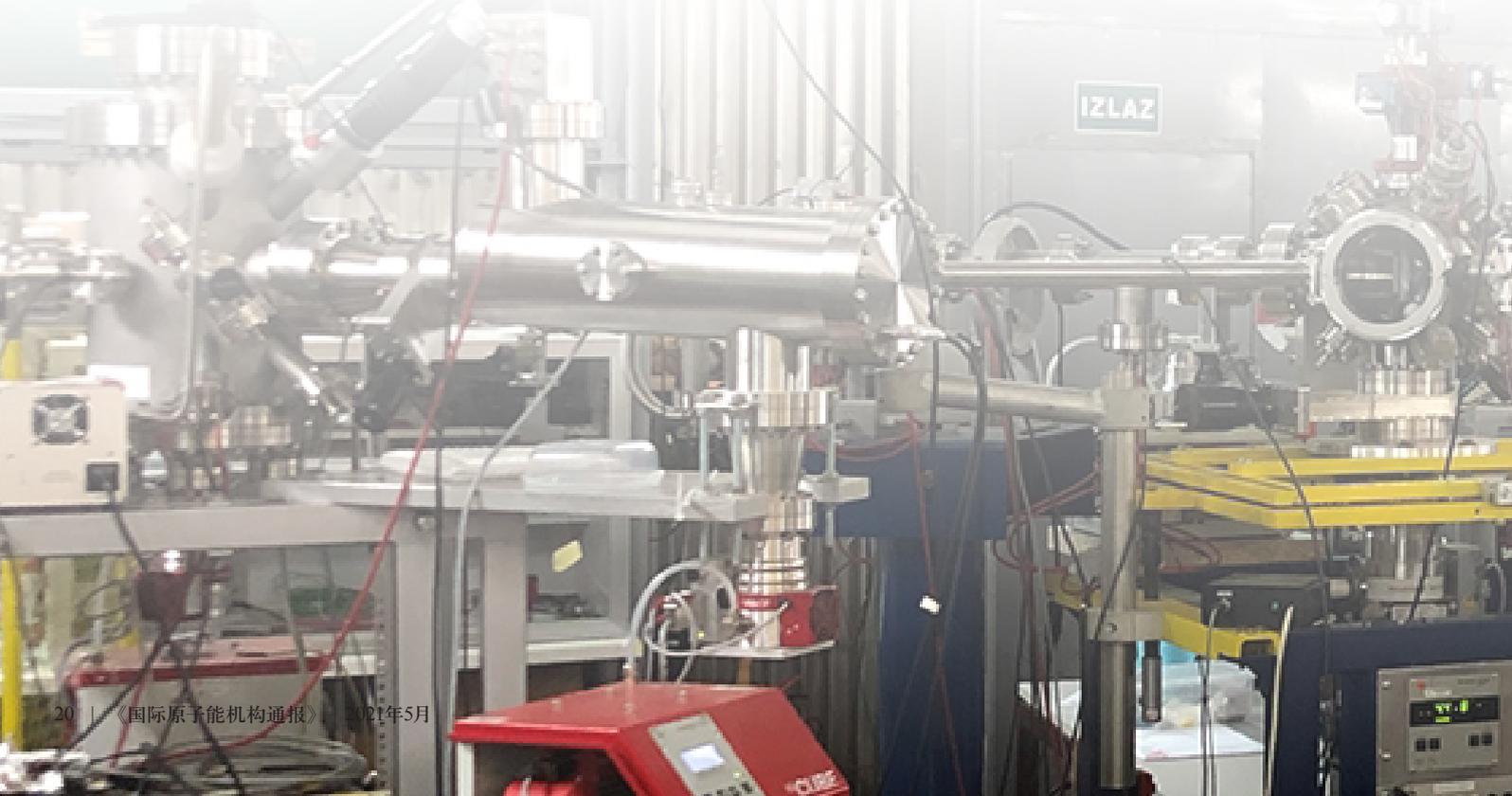
## 为极端情况而制造的材料

创造能够承受中子降解的结构性和面向等离子体的材料是研究人员的首要任务。这些材料需要安全特性，例如低中子诱导的放射性，以尽量减少放射性废物的产生。然而，目前缺乏在其中可以测试辐射降解机制并在必要条件下开发和鉴定材料的专门聚变辐照装置。

国际原子能机构通过协调起草基准材料测试技术的导则，并通过弥补

在国际原子能机构的支持下，在克罗地亚的鲁德·博斯科维奇研究所安装了“氦离子源和DiFU双束设施”。

（图/国际原子能机构）



设计聚变反应堆材料和部件测试设施方面的知识差距，正在协助解决与聚变材料开发和研究有关的问题。

“在国际原子能机构的支持下，2019年在克罗地亚鲁德·博斯科维奇研究所安装的双束离子装置等技术可以模拟材料在聚变反应堆中所暴露的条件。这些条件包括产品嬗变和模拟高能聚变产生的中子和粒子产生的损害。”国际原子能机构物理和化学科学司司长Melissa Denecke说。

反应堆中等离子体与反应堆容器直接接触的主要部件被称为“偏滤器”，科学家和工程师正在研究其最佳构型，以便它更好地处理所遇到的热通量。他们还利用从各种辐照实验和模拟工具中获得的知识 and 数据，为包括偏滤器在内的所有容器内部件开发和验证一个反应堆设计标准框架。

## 极热排除

在大多数设计中，偏滤器位于反应堆的最底部，氦“灰”等杂质被偏滤到这里，偏滤器充当聚变反应堆的“排除管”，是任何过量热量被引导到的地方。这种构型有助于产生具有更好能量约束的“更纯净”的等离子

体——这是核聚变装置性能的一个关键参数，确保等离子体在足够长的时间内保持足够的温度，以便能够发生持续的核聚变反应。

在世界最大的聚变实验装置ITER中，偏滤器将由54个“箱体”组成，每个盒体重达10吨。箱体所处的条件将非常苛刻；面对每平方米10~20兆瓦的稳定热通量，部件暴露在1000~2000摄氏度的温度下，箱体将需要在装置的寿命内通过遥控操作至少更换一次。为了应对极端的热量和破坏性的粒子，面对等离子体的部件将用钨装备，这种材料既具有低氦吸收率，又是所有自然元素中熔化温度最高的。

“尽管ITER的偏滤器设计从物理学和技术的角度反映了我们当前认识和能力的最新水平，但未来的核聚变电厂还需要进一步的发展。了解这些是ITER项目的许多重要任务之一。”ITER组织实验和等离子体运行处处长Richard Pitts说。

设计和建造未来的聚变反应堆将取决于ITER和其他完善的多国协调研究和开发活动的技术、工艺和材料成果，但我们与核聚变动力的未来之间的距离每天都在不断缩小。

