

激光切割机器人：放着，我来！

英国温弗里斯场址的 20 兆瓦原型石墨慢化氦冷龙核反应堆退役的挑战，促使了用于此项工作的激光切割机器人的开发。



温弗里斯场址龙核反应堆

位于英国多塞特郡的温弗里斯场址建于 20 世纪 50 年代，曾是核反应堆研究的卓越中心，为核能的进一步发展奠定了基础。该场址的 9 座独特实验反应堆中，已有 7 座被移除，但最后两座——龙核反应堆和蒸汽发生重水反应堆——仍在退役过程中。

龙核反应堆是一个原型堆，热功率输出为 20 兆瓦，采用石墨慢化、氦气冷却，运行温度高达 1000 摄氏度。从 1964 年到 1975 年，用于测试核燃料和材料，以支持高温反应堆项目。当时它是欧洲最成功的应用科学合作之一，也是核能领域最重要的多国技术合作项目。龙核反应堆是高温气冷堆的首次示范，并被用作材料测试，以支持全球高温反应堆项目。

早期工作

2011 年开始移除和处置反应堆压力容器之外的所有反应堆设备。这包括整个主冷却回路、氦冷却剂净化系统、燃料装卸系统、乏燃料储存设施、控制棒驱动机构、反应堆压力容器顶部以及为便于进入反应堆顶部而移除一半生物屏蔽层，以及吹扫气体预冷器。



退役早期，移除主屏蔽塞，更换为预制混凝土临时屏蔽塞

所有无需完全远程操作即可进行的退役工作均已完成。高放射性的反应堆压力容器及其内部构件是这座直径约 30 米的圆柱形龙核反应堆构筑物内仅存的重要放射性设备。

工程挑战

尽管反应堆已停运 50 年，但其放射性水平仍然过高，工作人员无法进入并手动拆除。反应堆在建造期间建有厚达 1.8 米的

生物屏蔽墙，以容纳 10 米高的反应堆并保护构筑物内的人员免受辐射。

如今进入反应堆的唯一方式是通过早期退役工作中在顶部打开的孔洞。进入反应堆内部的空间极其有限、昏暗且狭窄。20 世纪 50 年代和 60 年代最初的反应堆设计者几乎未考虑过其最终如何退役。

开拓创新

首要问题是足够接近所有反应堆部件以便进行分段和移除。解决方案是采用可远程定位的伸缩式桅杆，配备六自由度的机械臂。该机械臂能承受一辆小型摩托车的重量，同时仍具备出色的灵活性和柔韧性，可在堆芯的狭窄空间内进行操作。

其次是如何切割和移除由各种由金属制成、几何形状不同、厚度从 2 毫米到 75 毫米不等的部件。

激光切割在制造业中是一项成熟的技术，但在核退役中的却是一项相对全新的应用。然而当用于远程反应堆拆卸时，与传统方法相比，它具有几个显著的优势：

- 与其他热切割技术相比，产生的二次废物更少
- 切割速度快
- 反冲力可忽略不计
- 对工件间距的容忍度非常高
- 可以跨越空气间隙切割多层材料

为了利用这些优势，将激光切割系统与主要核心分割机器人

集成。

微孔手术

最初在剑桥焊接研究所的模拟件上测试了激光技术切割不同种类和厚度反应堆堆芯材料的可行性；随后在温弗里斯场址进一步测试了全尺寸模拟件。



温弗里斯场址的龙核反应堆模拟件

从这些试验中获得的技术数据和经验随后应用于进行微孔手术——2018年，工业界使用蛇形机器人（Lasersnake）远程从龙核反应堆高放射性堆芯中切割出了一个重达3吨的换热器容器（吹扫气体预冷器）。这在英国核工业尚属首次，成功证明了激光切割作为反应堆堆芯拆卸的主要技术优于其他替代的热切割技术。

反应堆拆卸

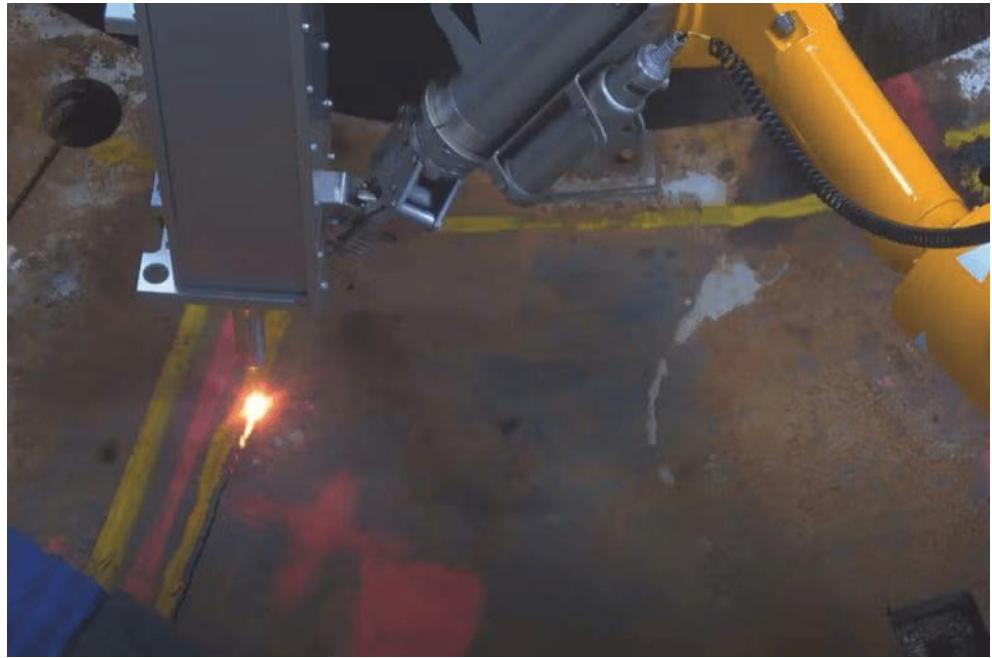
该项目被划分为 11 项独立的任务，分别处理不同的反应堆部件组：切割上部屏蔽结构以暴露堆芯、移除可直接吊出的部件、移除石墨上下反射层、移除钢结构、移除反应堆压力容器和热屏蔽层。

每项任务都有一份计划，涵盖：

- 组件和结构的切割与操作，包括详细的切割顺序；
- 操作安排；
- 使用定制废物筐辅助废物从堆芯转移和/或在堆芯内操作；
- 使用废物存储装置，以便将废物打包到储存容器中，并为每个废物包制定详细的打包计划。

远程分割

2024 年 7 月开始远程拆卸上部的屏蔽结构。分割反应堆顶部的 50 吨环热屏蔽层是独特且重大的挑战，该结构的一部分移除工作已接近完成，随后将可进入反应堆内部。



2024 年 7 月，激光切割顶部环热屏蔽层

目前，已从设施中回收并运出约 28 吨废物。分割顶部环热屏蔽层和反应堆压力容器颈部需要移除超过 120 个独立部件。总体而言，激光切割系统和反应堆堆芯分割机已被证明是一种非常有效的工程解决方案。



现场退役试验期间的反应堆堆芯分割机

预计该项目在整个生命周期中将产生大约 22 个废物包。这些废物包将分批次地运往位于牛津的哈维尔场址进行临时储存，直到英国国家地质处置设施可提供永久处置。

后续安排

目前，已成功移除反应堆压力容器颈部，将继续优化该系统应用，为突破反应堆堆芯做准备。在堆芯结构附近精确操纵机器以切割部件时，预计将面临重大挑战。

已开发其他工具以提供有价值的参考：

- 虚拟现实系统，允许非工程人员快速掌握部件的形状和尺寸。
- 现已实施数字孪生功能，基于实时位置反馈，提供反应堆核心分割机在堆芯环境中的实时图形表示。

尽管有这些进步，但操作的成功与否将极大地取决于在狭窄核心空间内导航的专业技能，以避免损坏或卡住设备。

对外交流合作部 张灵宇 供稿

编译自国际核工程