

HFIR的新燃料：ORNL通过多物理场仿真来支持燃料转型的安全性和可靠性研究

橡树岭国家实验室正在研究将高通量同位素反应堆转型为使用低浓缩铀燃料，以满足全球减少核威胁倡议所提出的要求。研究人员已转为通过多物理场仿真来评估新的燃料和反应堆堆芯设计的安全性和性能。

作者：ALEXANDRA FOLEY

简单地说，当一束中子射向样品时，一些中子会穿透材料，而其他中子则会以一定角度散射开，类似于台球比赛中的球发生碰撞。然后，可以对中子的最终偏转模式和能量进行解释，使科学家了解所研究物质的基本性质。中子散射科学家因此能够确定材料的原子和磁结构，最终更深入地了解我们周围的世界。

橡树岭国家实验室 (ORNL) 的高通量同位素反应堆或称为 HFIR (发音为 High-FIR) 包含一个中子散射设施，每年供全球超过 500 位研究者使用。HFIR 是一个多功能的研究型反应堆，还可以为学术、工业和医疗领域的客户提供稳定的放射同位素。此外，HFIR 还提供独特的辐射实验设施和中子活化分析能力。当 HFIR 产生高功率 (85 兆瓦) 时也会产生射向靶子的高通量中子，从而提供全球所有研究型反应堆中最高的稳态中子通量 (见图 1)。

HFIR 最初设计为使用高浓缩铀 (93% 的 U-235 或 HEU)，类似于武器

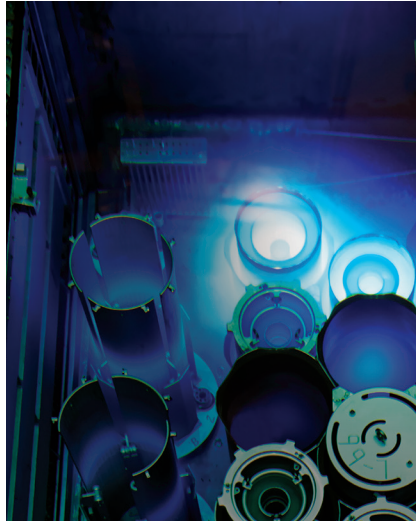


图 1: HFIR 自 1966 年以来就一直在运行 (超过 452 个燃料周期), 是 ORNL 目前唯一在运行的核反应堆。图片由橡树岭国家实验室、美国能源部提供。

级铀。然而，由于人们日益意识到核材料扩散所产生的风险，全球减少核威胁倡议 (Global Threat Reduction Initiative) 呼吁使用 HEU 燃料的研究型反应堆改用低浓缩铀 (LEU) 燃料。

“我们发现 COMSOL 是实现这些目标的上佳工具，因为它具有多物理场功能。”

虽然全球很多核反应堆都已进行转型，但仍存在一些高性能 HEU 反应堆。HFIR 就是其中之一，其独特的燃料和堆芯设计 (见图 2) 以及反应堆的高功率密度对燃料转型提出了复杂而具有挑战性的任务。ORNL 的研究人员使用 COMSOL Multiphysics® 仿真软件来探索燃料变化对 HFIR 的性能及中子散射、同位素生产、辐照实验和中子活化分析产生的影响。

“HFIR 的成功转型需要保持反应堆性能，最大程度降低对运行效率的负面影响，并帮助确保安全，” ORNL 博士研究生 Franklin Curtis 说：“我们发现 COMSOL 是实现这些目标的上佳工具，因为它具有多物理场功能，使用有限元方法，并且可以输入用户定义的方程。”

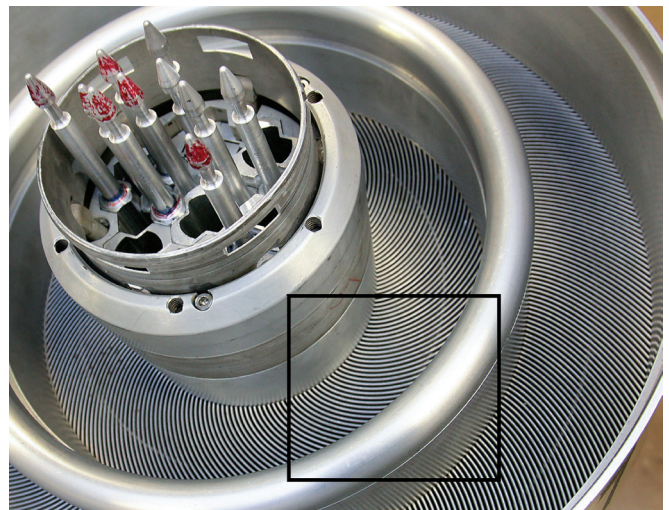
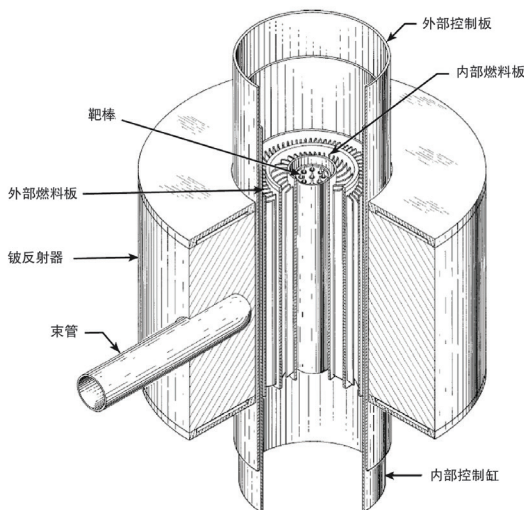


图 2: 左: 当前 HFIR 堆芯的简化示意图。反应堆的堆芯包含一系列同心环状区域，划分为内部燃料板和外部燃料板。右: 黑框代表在 ORNL 的流体-结构分析中分析的燃料板的前缘。图片由橡树岭国家实验室、美国能源部门提供。

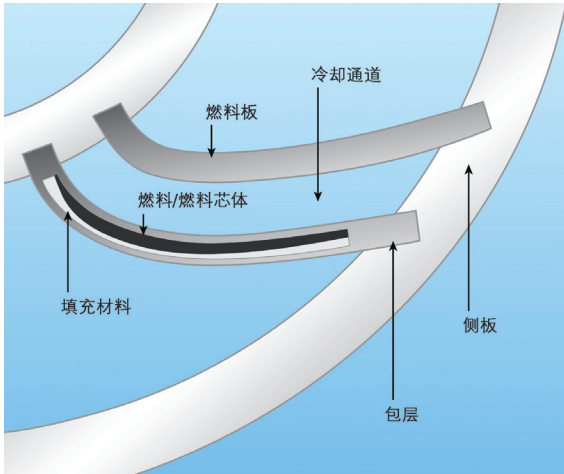


图 3: 当前的 HFIR 高浓缩铀燃料板由三个区域构成——燃料（或燃料芯体）、填充材料和包层。冷却剂通道围绕着燃料板。LEU 转型过程将改变内部燃料芯体。该图未按比例绘制，不是 ORNL 官方提供的图片。它是通过 COMSOL 创建的 HFIR 堆芯的设计概念重现。

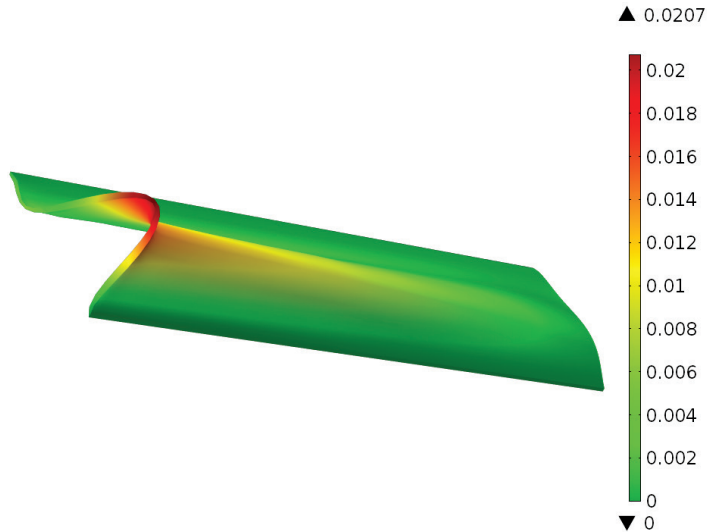


图 4: 渐开线燃料板的前缘扭曲。特征频率分析预测了 ANSR 和 HFIR 的渐开线燃料板的“S”形扭曲。

计划用于 HFIR 的 LEU 燃料

参与该项目的 ORNL 研究人员开发了替代的燃料设计，使用浓度为 19.75% 的铀 -235 来代替当前 93% 的

铀 -235。为了适应 LEU 燃料核特性、密度和热属性的变化，必须重新设计 HFIR 堆芯燃料芯体——位于燃料板内的裂变材料（见图 2 和图 3）。新设计将保

留当前 HFIR 堆芯对于外部燃料芯体所表现出的现有总体几何特性。

此外，初步的研究发现，为了维持相同的中子通量，HFIR 需要在 100 MW 功率而不是 85 MW 功率下运行，这对于反应堆的热裕度提出了更高的要求。“由于我们面对的是一个核反应堆，安全性对我们来说是最重要的，我们需要知道我们的模型准确而可靠，”ORNL 高级研究工程师 James D. Freels 说道：“我们的模型必须经过严格的验证过程，最终必须由我们的能源部管理者审查和接受，才能继续进行转型。”

ORNL 的研究人员正在对 COMSOL 代码进行验证研究，以证明其准确性。Curtis 介绍说：“我在 ORNL 的项目是建立一种流固耦合 (FSI) 仿真技术，可以对照 HEU 燃料当前的安全基本计算进行验证，并且可以对使用 LEU 燃料的设计进行评估和安全分析，同时仍然使反应堆可以保持所需的冷却剂流动速率。”

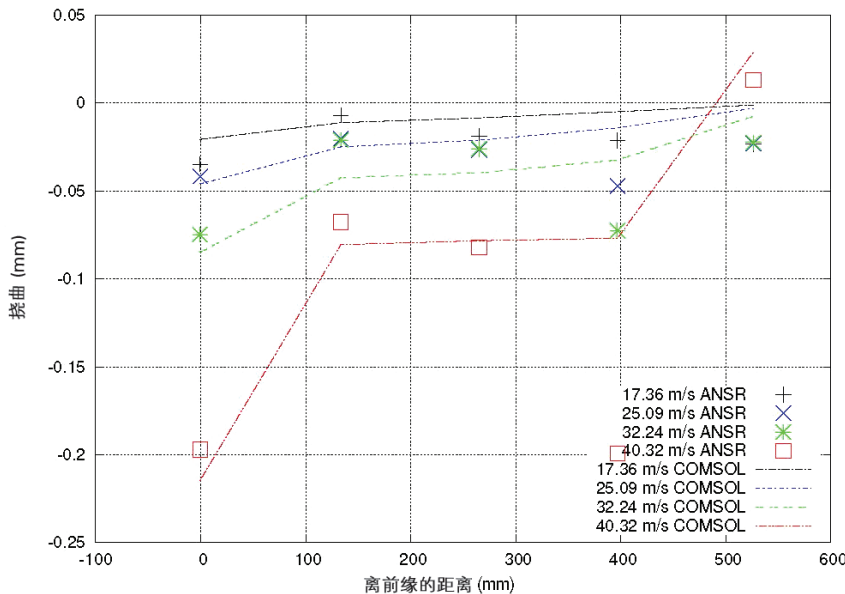


图 5: 不同流体流动速率下 ANSR 流动测试的燃料板扭曲的实验结果与仿真结果进行比较。

燃料板挠曲的 FSI 模拟

HFIR 的主要组件之一是燃料板，它们控制冷却剂进入和流过反应堆堆芯的速度和温度分布。由于反应堆运行引起速度和温度变化，这些燃料板会发生轻微的振动和变形。对板型研究型核反应堆进行的最重要研究之一是在挠曲干扰反应堆性能和安全性之前确定最大可流动速率。“如果挠曲足够大，”Curtis 说道：“它会导致燃料板减小流动区域甚至彼此接触，使通道内的流动发生改变，扰乱冷却剂流入堆芯的速率。”

通过使用类似于 HFIR 的流动几何进行代表性测试，可以深入了解燃料板挠曲，并用于进行代码验证。高级中子源反应堆 (ANSR) 是 ORNL 的一座拟建设但已被取消的反应堆，它具有类似于 HFIR 的设计，并经过了大量的实验测试，为验证 COMSOL 代码提供了有价值的结果¹。

ANSR 设计为采用与 HFIR 具有类似渐开线形状的燃料板，冷却流速约为 25 m/s。ANSR 的其中一项测试涉及到通过实验来确定燃料板的挠曲特性。“HFIR 和 ANSR 的渐开线燃料板与美国的其他较简单的弯曲板研究型反应堆具有不同的燃料芯体设计，”Curtis 说道：“整体形状可以在堆芯中维持恒定的冷却剂通道厚度。然而，由于其独特的形状，HFIR 需要特别注意新的燃料和堆芯设计，使反应堆可以保持所需的中子通量。”

为了解在 COMSOL 模型内发生的流固耦合，科研人员开发了一个单板、双通道模型。初始分析先检查平板，之后再分析复杂性更高的渐开线形状的燃料板。所产生的模型准确地预测了 FSI 以及 ANSR 燃料板实验沿板的长度方向产生的变形（见图 4）。

当前的 FSI 仿真包括冷却剂通道的湍流 CFD 分析和燃料板的流体 - 结

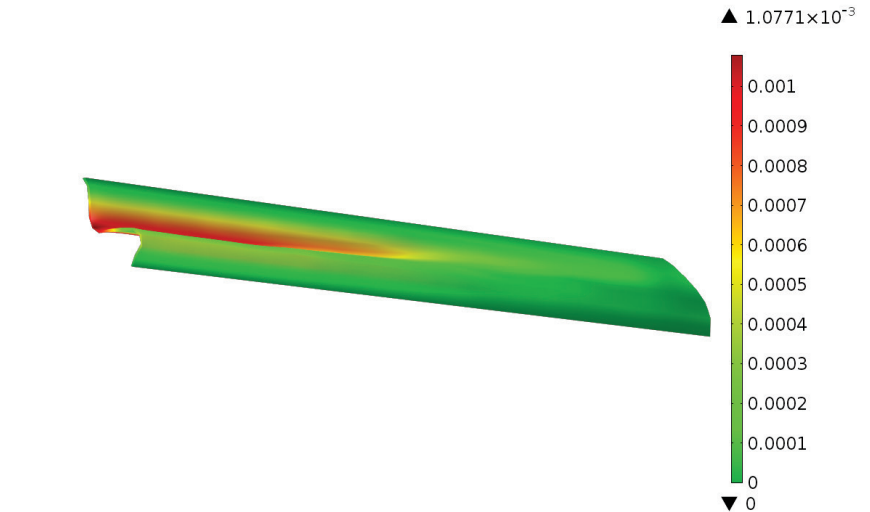


图 6：HFIR 燃料板前缘的挠曲。

构挠曲。ORNL 以前尝试求解 FSI 问题时采用了弱耦合的方法，即先求解流体域，然后再使用该结果来进行结构分析。“然而，这种方法得到的是不稳定的解，不是十分成功，”Curtis 说道：“在当前的分析中，我们改为使用 COMSOL Multiphysics 中提供的全耦合求解方法，发现它同时改善了 ANSR 模型的稳定性和准确性。”使用这种全耦合的方法，Curtis 发现不同流动速率下的仿真结果与实验结果都能够很好地吻合（见图 5）。

目前，正在根据用于 ANSR 模型的分析技术，开发使用 LEU 燃料的 HFIR 内部燃料板的模型（见图 6）。“对于这个模型得到的初步结果，我们感到很高兴，”Curtis 说道：“在接下来的几个月里，我们会继续改进这个模型，为

最终的燃料转型提供安全的基础。”之后，该模型将与 ORNL 正在开发的其他 COMSOL 模型相结合，这些模型耦合了沿燃料板的多维传热、燃料板的热 - 结构挠曲，以及燃料缺陷、腐蚀和流动阻塞等其他物理场。

检验和验证是关键

在设计像一座核反应堆这样复杂的设施时，工程师们必须采取一切预防措施，确保设计的安全性。这就要求对所创建的仿真进行大量的检验，并对代码本身进行验证。“对 ORNL 过去一些实验进行的其他仿真检验了 COMSOL Multiphysics 的热、结构和湍流模拟能力，”Curtis 说道：“我们最近的研究检验了 COMSOL 的 FSI 工具，这些工具使我们能够充满信心地设计和优化新的 HFIR 堆芯。”■

参考文献

¹ Swinson, W. F., Battiste, R. L., Luttrell, C. R. & Yahr, G. T. Fuel-Plate Stability Experiments and Analysis for the Advanced Neutron Source, Symposium on Flow-Induced Vibration and Noise, 1992, (5) 133-143.