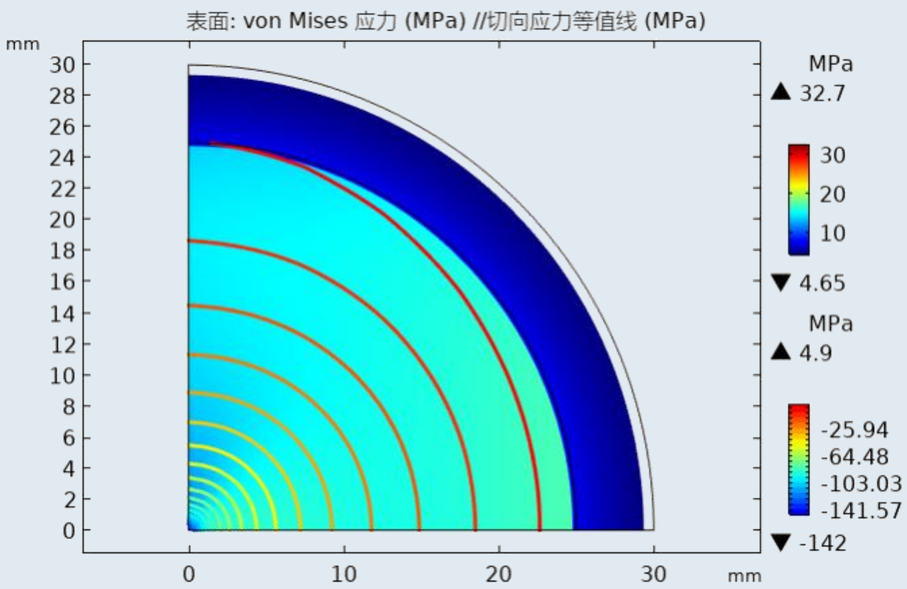
考虑基体与 TRISO 相互作用的球形燃料元件多物理场耦合分析研究



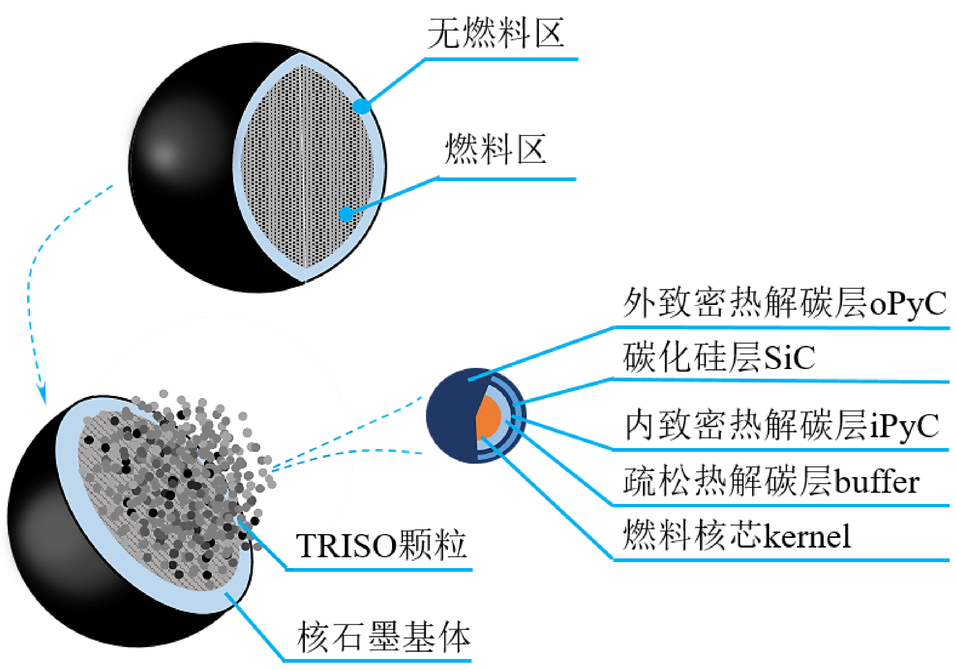
通过COMSOL与MATLAB联合仿真研究了球形燃料元件稳态工况下的服役性能演变，同步分析了代表性TRISO颗粒的传热-力学-裂变产物释放的多物理场耦合结果，揭示了单个球形燃料元件内部TRISO颗粒的应力变化规律，并分析了TRISO颗粒的失效风险，为反应堆燃料元件性能分析提供理论基础。

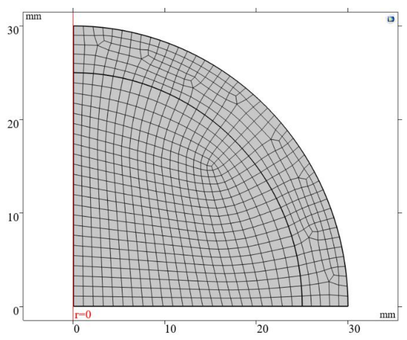
顾晨[1]，周勤[1]，刘伟[1]

1. 华能核能技术研究院有限公司，上海，中国

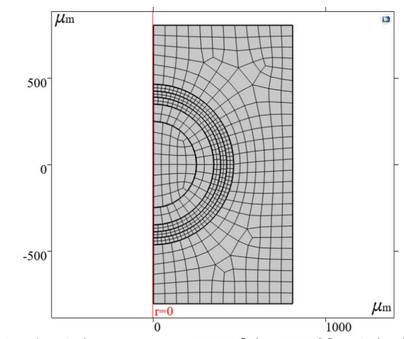
摘要

球床式高温气冷堆球形燃料元件（SFE, Spherical Fuel Element）内弥散大量TRISO颗粒（约12000个），传统的均匀化方法以固定等效物性描述燃料区，难以反映颗粒辐照性能演化；而采用直接模拟手段则造成计算成本难以接受。本文基于以往的COMSOL Multiphysics与MATLAB在线耦合发展的双向混合模型，在COMSOL Multiphysics中分别建立球形燃料元件二维轴对称模型、多个代表性含TRISO颗粒的周期性单胞二维轴对称模型和相应的周期性单元体模型，并扩展研究了SFE对TRISO颗粒的相互作用在不同尺度模型间的数据传递，实现了代表性TRISO颗粒的SiC应力分析。

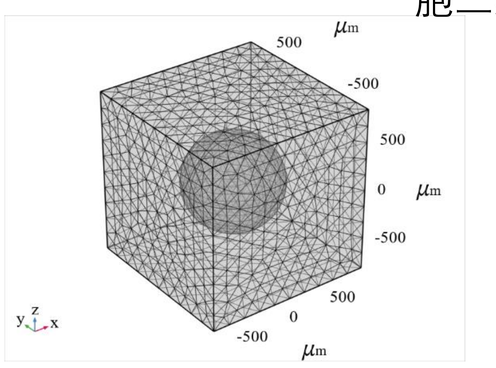




燃料元件二维轴对称模型



代表性TRISO颗粒周期性单胞二维轴对称模型



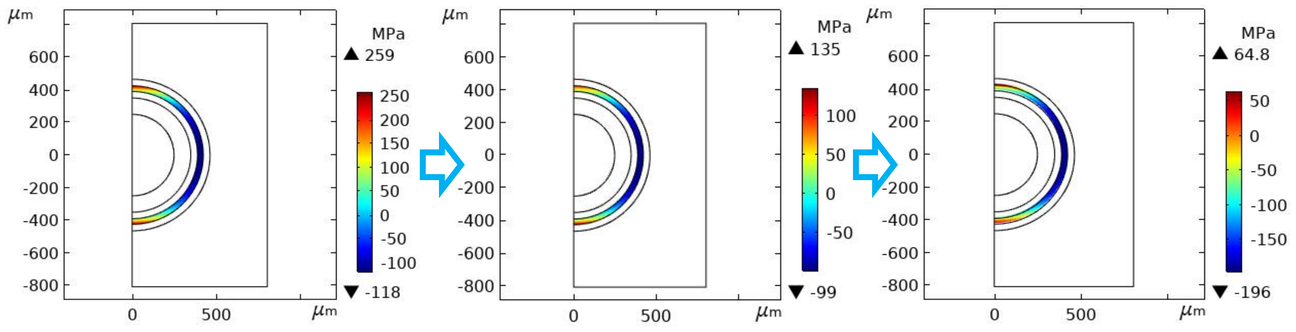
代表性单元体模型

方法

本文提供一种使用COMSOL与MATLAB联合仿真研究了球形燃料元件稳态工况下的服役性能演变分析的方法。首先基于周期性排列假设建立代表性TRISO颗粒周期性单胞二维轴对称模型，并将燃料元件简化为二维轴对称模型。为实现燃料元件物性参数更新，借助COMSOL的单元周期性研究建立了代表性单元体模型。每一种模型均在COMSOL软件中完成材料性能、辐照行为等数学模型定义、固定参数设置与网格无关性验证。本文提供的分析方法须借助联合COMSOL和MATLAB的耦合接口。在每一个时间步长内，由燃料元件二维轴对称模型根据初始参数开展热力耦合计算，将其温度分布与变形张量输出并由MATLAB按分区平均化进行处理，传递并完成代表性TRISO颗粒周期性单胞二维轴对称模型的边界条件设置，在当前步长下，代表性单元体模型通过COMSOL软件的广义拉伸算子实现模型映射，进而获取等效弹性系数、泊松比与热胀系数。等效物性由MATLAB提取并传递至燃料元件二维轴对称模型完成物性更新。

结果

联合仿真结果表明，燃料元件对各区代表性TRISO颗粒的作用表现为：径向上挤压TRISO颗粒，其挤压速率随时间增加先增加后降低；而在轴向上则为拉伸TRISO颗粒，其拉伸速率随时间增加先降低后增加。越靠近燃料元件中心，两个方向的变形差异导致对TRISO颗粒SiC层存在额外的拉应力，TRISO颗粒的失效风险越高。



参考文献

[1]张永栋. TRISO包覆燃料颗粒结构和失效行为研究[D]. 中国科学院研究生院 (上海应用物理研究所), 2016.
[2]Liu M, Lee Y, Rao D V. Development of effective thermal conductivity model for particle-type nuclear fuels randomly distributed in a matrix[J]. Journal of Nuclear Materials, 2018, 508: 168-180.
[3]顾晨，贺亚男，邓超群，等．基于在线耦合的球形燃料元件温度场计算[J]．核动力工程，2022，1(2)：55~58.
[4]He YN, Gu Chen, Deng CQ, et al. Development of a hybrid model for fuel performance analysis of spherical fuel elements under normal conditions[J]. Journal of Nuclear Materials, 2023, 578(154355) .

中国华能 CHINA HUANENG　核能院 NEI