

基于COMSOL的棒状燃料元件热-力-辐照耦合行为分析

齐飞鹏¹, 刘振海¹, 李文杰¹

1.核反应堆系统设计技术重点实验室, 中国核动力研究设计院, 四川, 成都

简介:反应堆内高温、中子注量及核素裂变等复杂环境下, 燃料元件内部发生着复杂的热、力、辐照行为演化, 例如温度分布与结构变形紧密关联; 高温、中子辐照环境下的材料热物理性能变化显著; 裂变产物的物理(聚集、迁移等)及化学(腐蚀等)过程是影响燃料服役性能的特殊因素。因此, 燃料宏观性能预测至少应考虑燃料棒内的热扩散过程、结构静力平衡、非线性物性及本构关系、裂变产物积累及释放等过程。

芯块:

- 非线性材料物性;
- 热膨胀、肿胀、密实化;
- 裂变气体释放;

包壳:

- 非线性材料物性;
- 热膨胀、塑性、蠕变;
- 芯块-包壳接触;

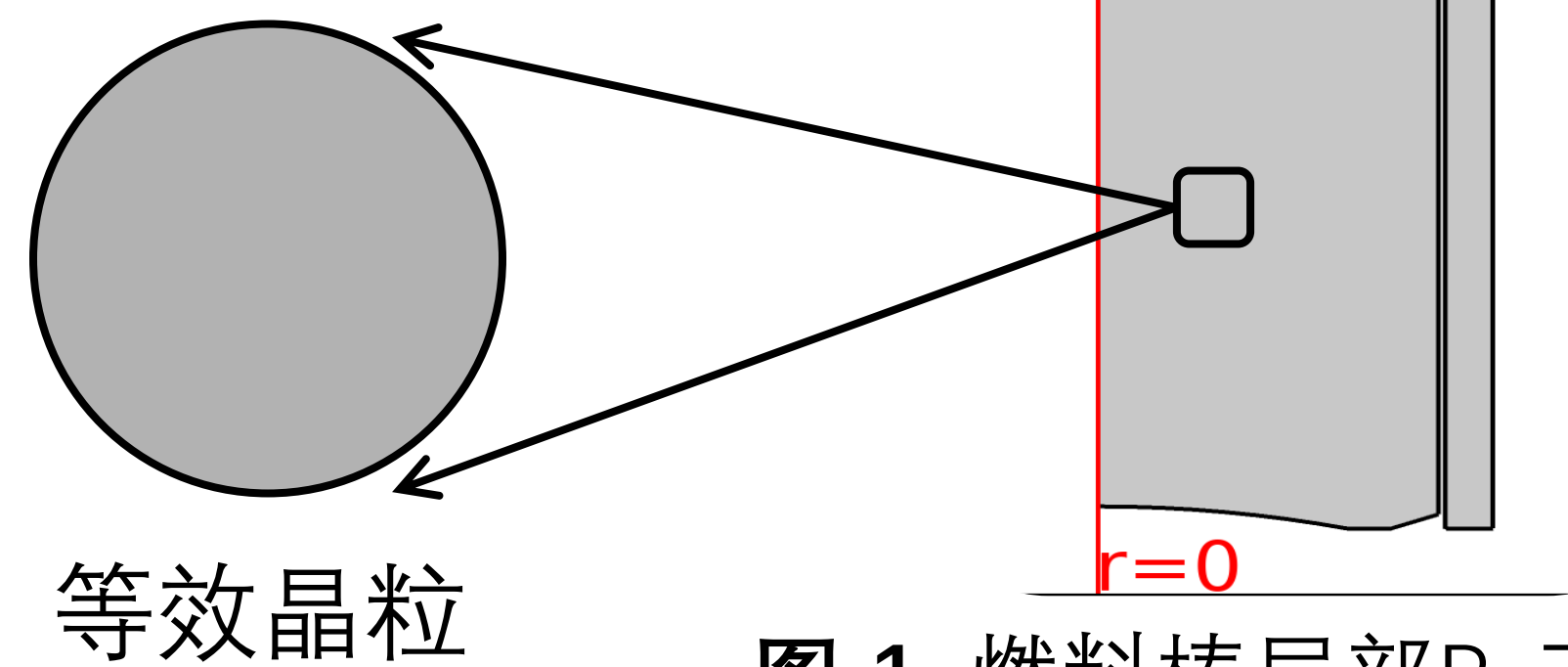


图 1. 燃料棒局部R-Z模型

计算方法:燃料元件内温度分布可由固体导热方程描述:

$$\frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q$$

传热模块中的“Heat Transfer In Solid”可实现燃料元件内温度场的求解。芯块与包壳之间属于窄间隙换热, 可利用Heat Transfer模块中的“pair thermal contact”^[1]实现, 其中等效间隙换热系数模型综合考虑了间隙宽度、表面接触状态、气腔气体组分及压力等多个参数对换热性能的影响^[2]。

燃料元件力学分析中假设每个时间步内结构处于力学平衡状态:

$$\nabla \cdot \sigma + f = 0$$

柯西应力张量满足广义胡克定律:

$$\sigma = C : (\epsilon - \epsilon_{inel})$$

式中 ϵ_{inel} 为非弹性应变, 体现了反应堆内高温、高中子注量环境对燃料力学性能的影响:

$$\epsilon_{inel} = \begin{cases} \epsilon^{th} + \epsilon^{sw} + \epsilon^{den} & \text{芯块} \\ \epsilon^{th} + \epsilon^{pl} + \epsilon^{cr} & \text{包壳} \end{cases}$$

结构力学模块中的“Solid mechanics”可实现上述结构力学方程的求解, 辐照引起的非弹性应变项可通过修改材料本构方程引入。

裂变反应产生的难溶性气体原子从晶粒内部扩散到晶粒边界的过程可用修正booth扩散模型描述:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \beta + \nabla \cdot (D \nabla c)$$

本文采用L.C. Bernard等人^[3]建立的解析式裂变气体释放模型, 将气体释放到自由空腔前的孵化过程转化为给定温度下的燃耗阈值。裂变气体的产生和释放模型通过自定义“Domain ODEs and DAEs”功能加载到芯块区域。

结果: 计算结果表明, 寿期末燃料中心最高温度达到1282.3°C, 气腔压力达到5.32MPa。平均裂变气体释放份额约为2.4%, 芯块中心局部区域释放份额超过20%。芯块-包壳间隙在9100h附近开始闭合。

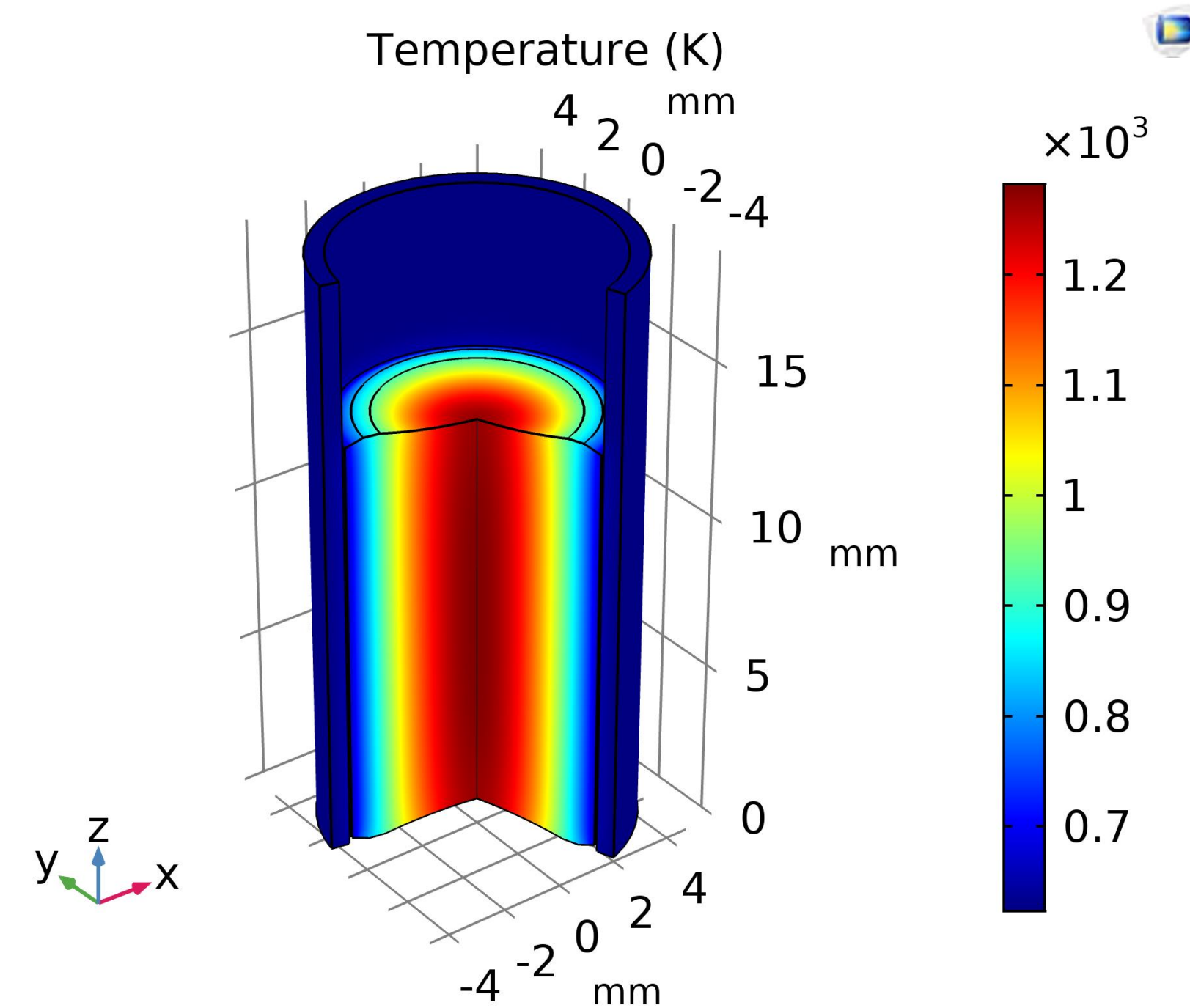


图 2. 燃料棒温度分布 (寿期末燃料中心最高温度达到1282.3°C)

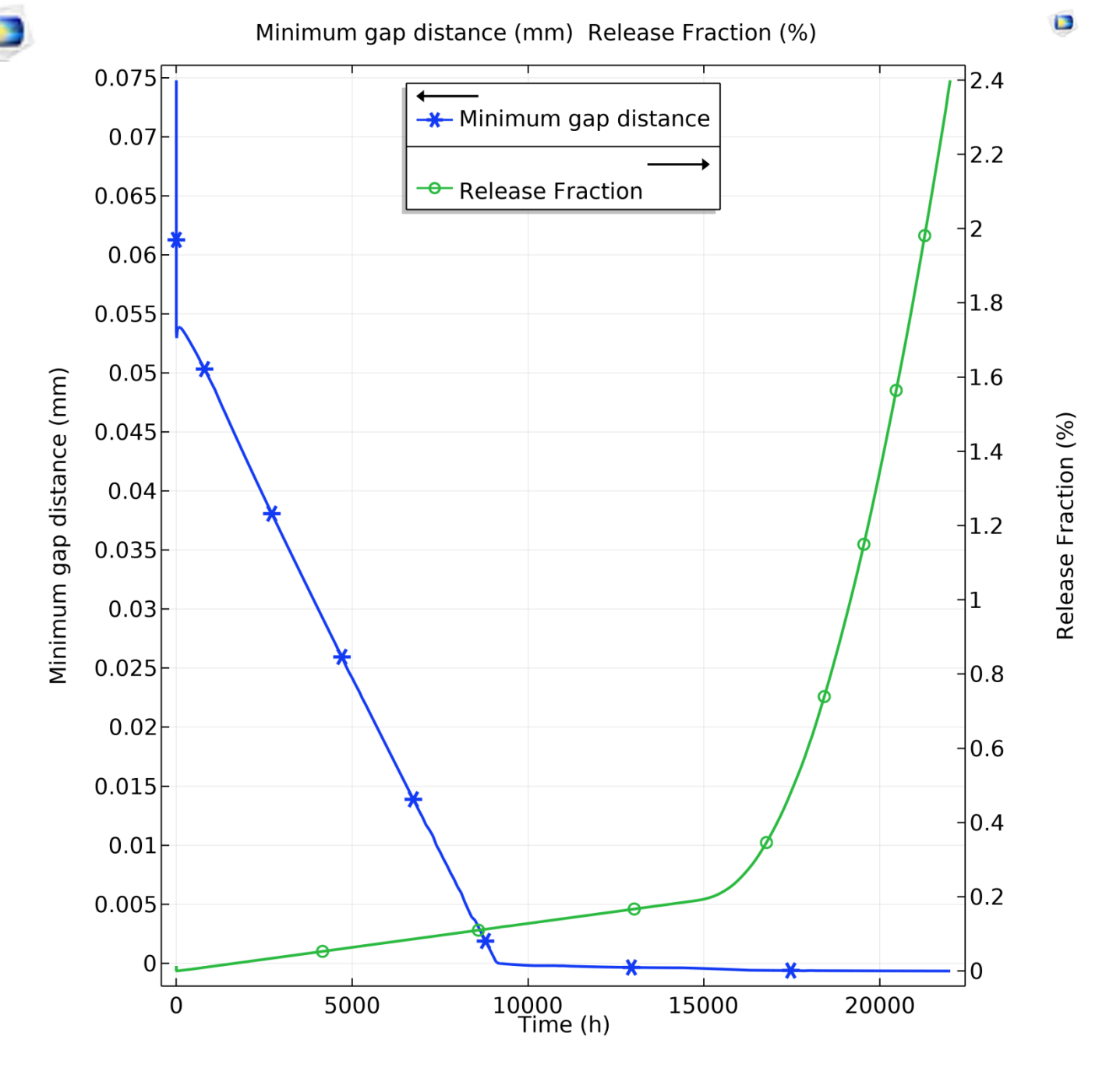


图 3. 最小间隙宽度及气体释放份额随时间变化

包壳与芯块顶端接触区域出现显著应力集中, 该区域附近接触状态较为复杂。芯块端部与包壳强接触位置附近存在未闭合的三角区域 (见图4)。

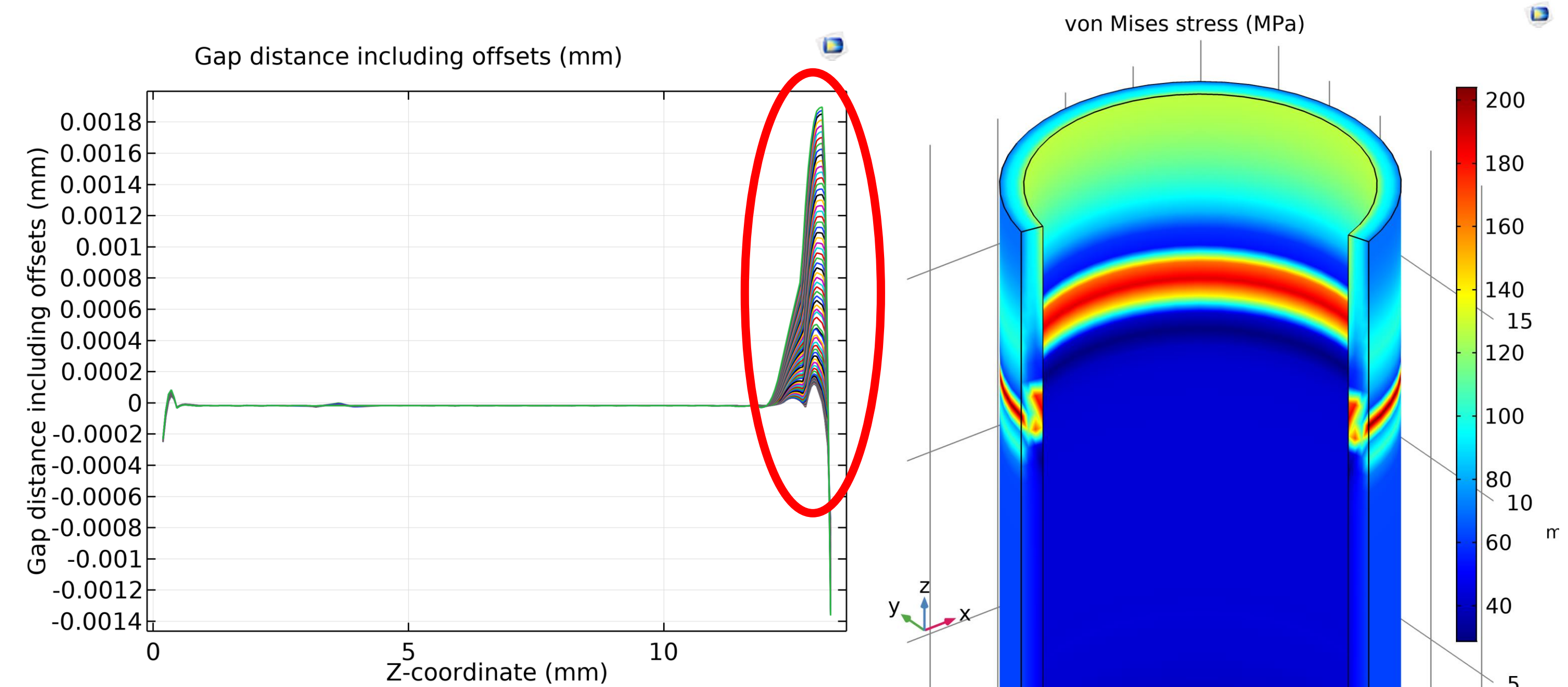


图 4. 间隙宽度 (芯块顶端区域附近接触状态复杂)

图 5. 包壳Mises等效应力 (应力集中现象)

分析结果表明, 上气腔气体平均温度对气腔压力水平影响显著 (见图6、图7)

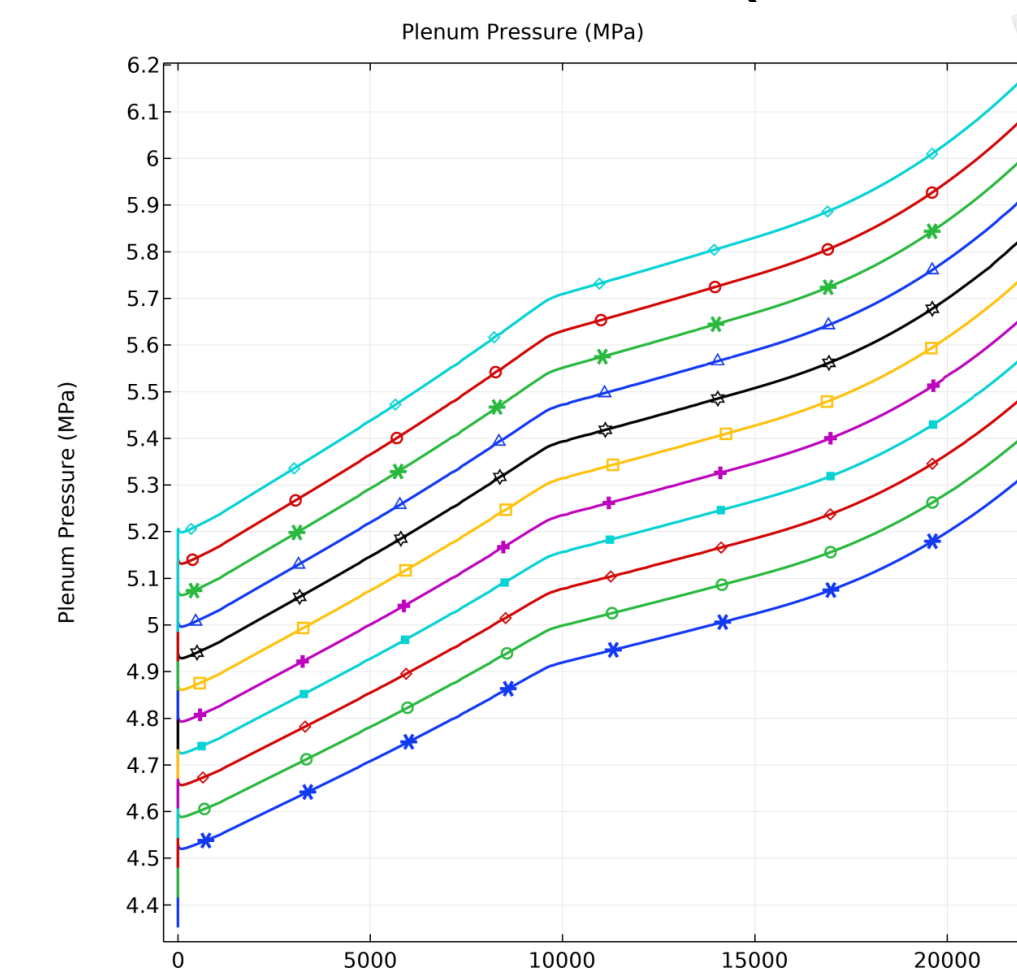


图 6. 不同上气腔温度下的气腔压力水平

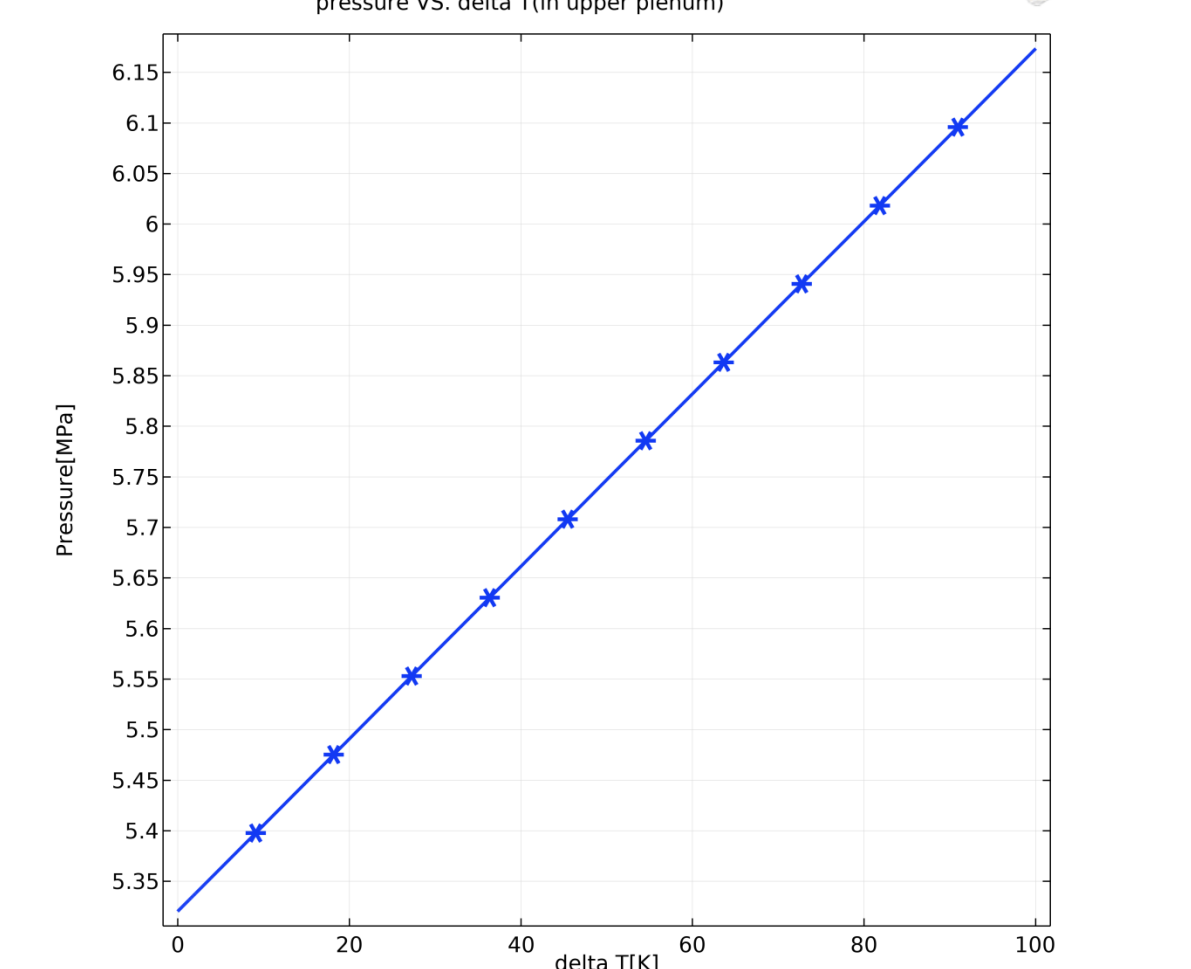


图 7. 最大气腔压力 VS. ΔT

结论:

本文在考虑非弹性本构关系、非线性材料物性及多尺度裂变气体释放等行为的基础上, 实现了燃料棒宏观热-力-辐照耦合性能分析, 为燃料设计及性能评价提供支持。主要结论如下:

1. 准确获取上气腔气体平均温度成为改善燃料棒内压预测精度的重要方向;
2. 包壳与芯块顶端接触位置发生应力集中, 该区域附近存在间隙未闭合的三角区域, 影响局部换热和包壳应力, 这应当引起燃料设计人员更多的关注。

参考文献:

1. COMSOL Reference: Heat Transfer Module Users Guide, 255.
2. Luscher W, Geelhood K, Porter I. Material Property Correlations Comparisons between FRAPCON-4.0, FRAPTRAN-2.0, and MATPRO[R]. PNNL-19417 Rev.2, Richland: 2015.
3. L.C. Bernard, J.L. Jacoud, P. Vesco. An efficient model for the analysis of fission gas release[J]. Journal of Nuclear Materials, 302, 125-134(2002).