

基于多物理场耦合方法分析熔盐堆工况

刘国财¹，张海黔¹，王凯凯¹

1. 南京航空航天大学，材料科学与技术学院，江宁开发区将军大道29号，南京，江苏，211106

引言：熔盐堆是唯一一种以液态为燃料的反应堆，熔盐堆研究不同于其他反应堆。本文采用多物理场耦合方法模拟熔盐堆发生工况时熔盐堆中一些参数的变化。我们将反应堆模型简化为一个石墨围成的空腔结构如图[1a]。为简化计算采用二维轴对称图形如图[1b]。

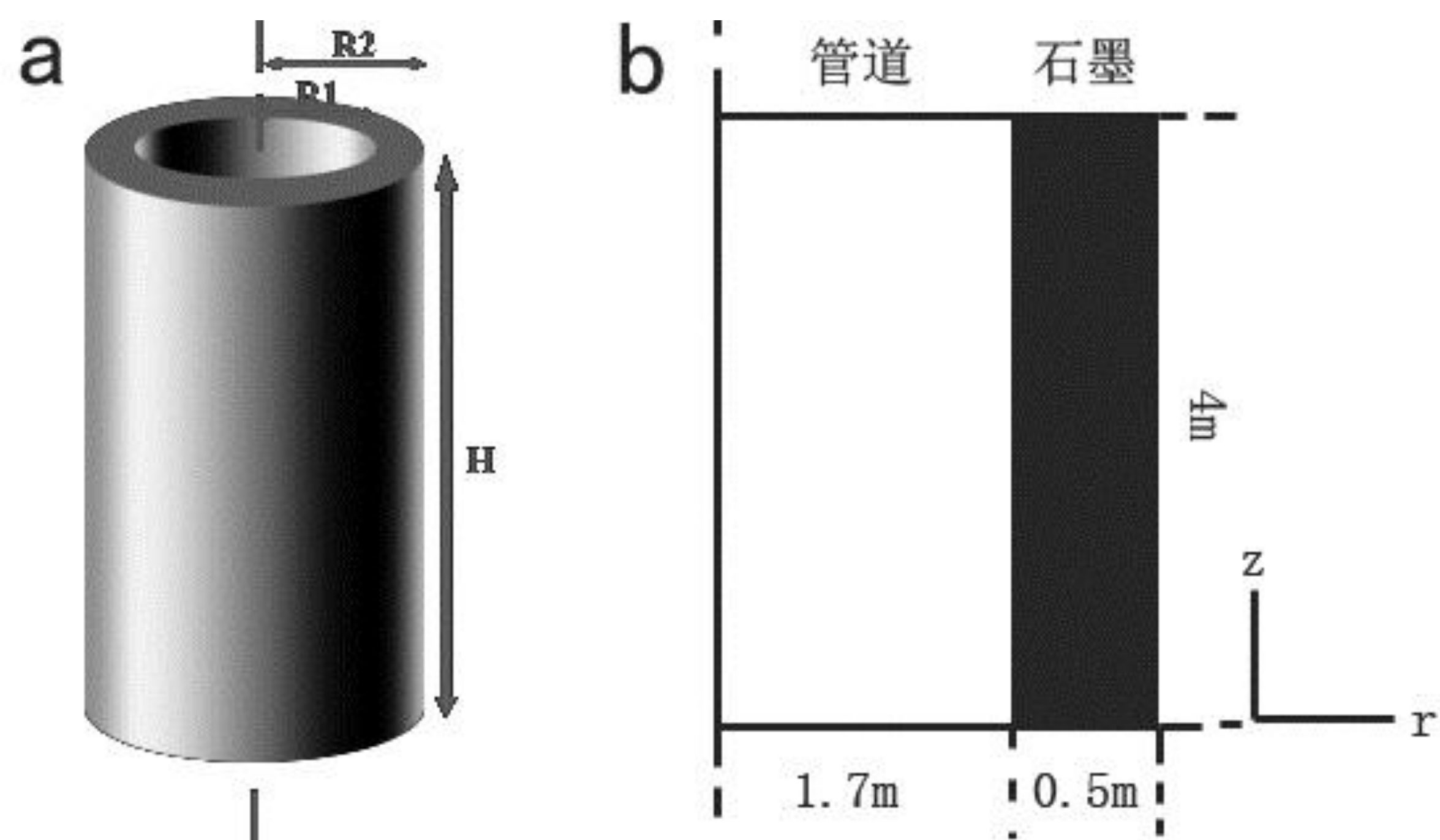


图 1. 结构示意图

计算方法：采用流体流动接口单向流中的湍流模式模拟熔盐流体流动、传热模块中流体传热模拟熔盐传热、传热模块中固体传热模拟石墨传热、稀物质传递接口模拟反应堆中先驱核浓度、系数型偏微分方程模拟中子扩散。基于以上五个物理场耦合的情况下对一回路发生失流以及石墨发生膨胀两种工况下研究熔盐堆温度变化及先驱核浓度的变化。具体采用方程如下

$$\begin{cases} \rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q \\ d_s \frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot (-c \nabla u - \alpha u + \gamma) + \beta \cdot \nabla u + a u = f \\ \nabla \cdot (-D_i \nabla c_i) + u \cdot \nabla c_i = R_i \\ \rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-pI + (\mu + \mu_T)(\nabla u + (\nabla u)^T)] + F \end{cases}$$

参考文献：

- [1]Cammi A., et.al. Innovative techniques for the simulation and control of nuclear power plants.Nuclear Energy Research Progress. Nova Science Publishers, pp. 1–4.(2008)
- [2]Nicolino, C.,et.al. Coupled dynamics in the physics of molten salt reactors. Ann. Nucl. Energy 35, 314–322.(2008)
- [3]Suzuki, N.,et.al. Preliminary safety analysis on depressurization accident without scram of a molten salt reactor.J. Nucl. Sci. Technol. 43, 720–730.(2006)
- [4]Cammi A.,et.al.A multi-physics modelling approach to the dynamics of Molten Salt Reactors. Annals of Nuclear Energy, 38(6): 1356-72.(2011)

结果：一回路流速减小会导致反应堆温度明显升高如图[2]，流速在5m/s减小到1m/s时温度升高不明显由1m/s减小变化到0m/s时温度变化呈指数升高。先驱核浓度会随着流速减小先增大后减小如图[3]。当一回路石墨发生膨胀时，会导致膨胀处上方的温度升高如图[4]，先驱核浓度变化不明显。

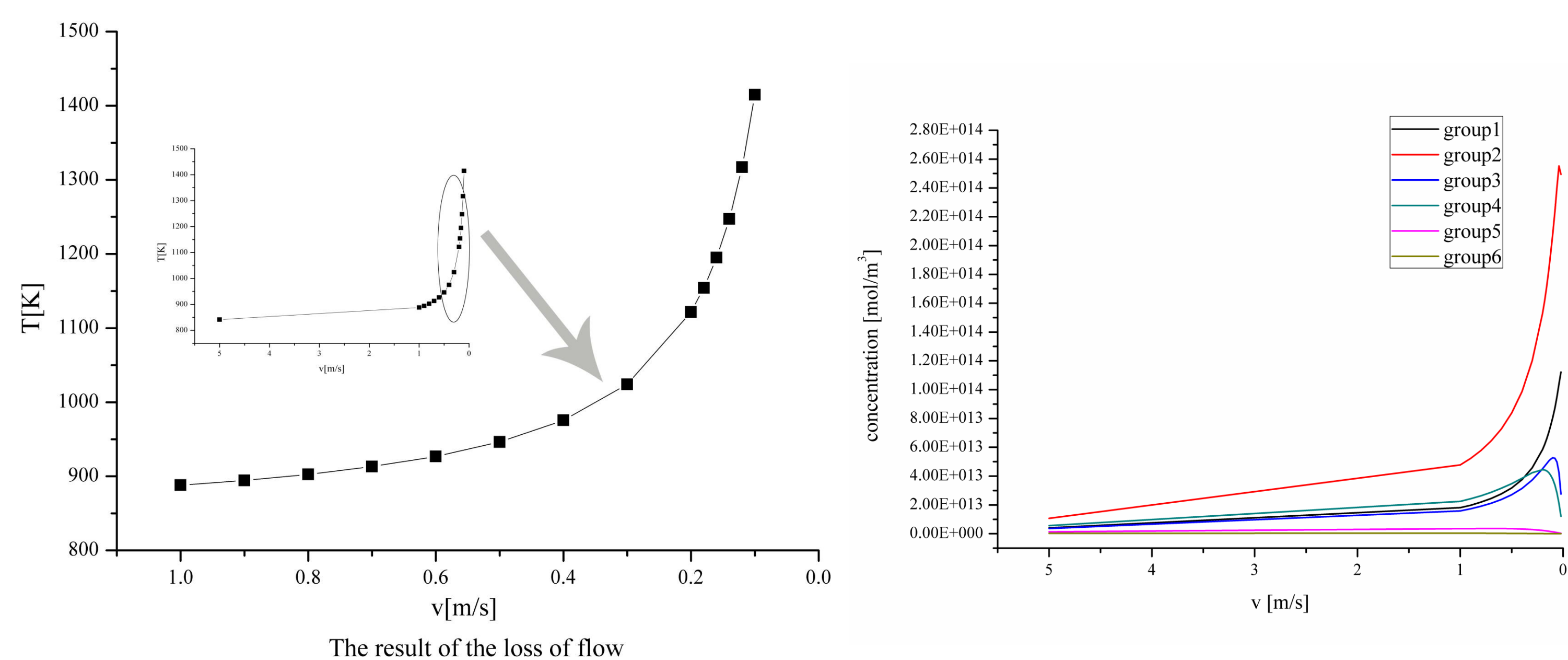


图 2. 失流下的温度变化 图 3. 失流下六组先驱核浓度

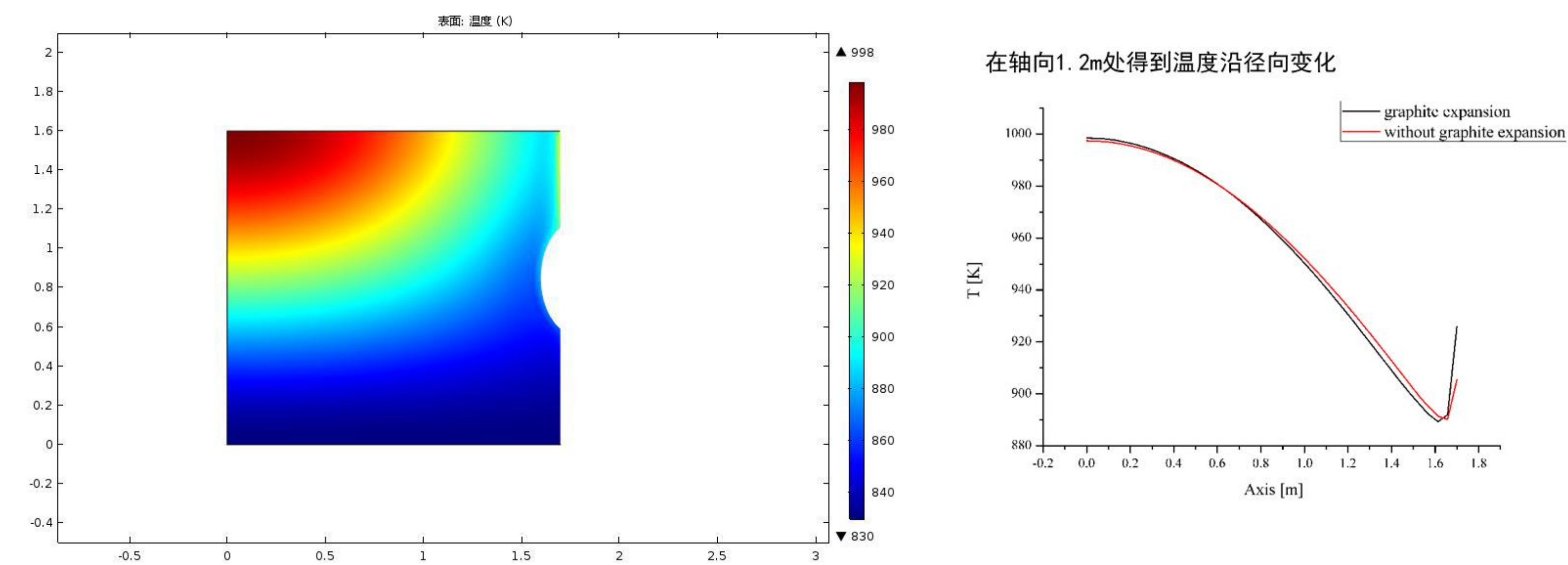


图 4. 石墨膨胀导致温度变化

结论：熔盐堆一回路发生失流时开始温度变化不大，但是流速减少到1m/s时会明显升高；石墨膨胀会导致温度场发生变化。最终模拟结果和理论结果相符。