



II型碘吸附器阴燃研究

宣讲作者：刘孟杰 电话：138-3714-1966
宣讲单位：郑州大学——化工与能源学院

01

研究背景及意义

02

研究对象及建模

03

数值模拟及分析

04

研究结论与展望

1.1 研究背景

- 核电事故危害较大。第七级核事故就发生过两次：前苏联1986年切尔诺贝利核事故和2011年福岛核事故，造成了重大的人员伤亡和环境污染。调研发现二级以上核事故的判定，无不涉及到放射性物质的泄露。
- 碘吸附器是核电厂内放射性碘的主要净化设备，是防止放射性碘等泄露技术方法中关键的一环；
- 碘吸附器的吸附效率与气流的相对湿度有关，因此设置有电加热器，但由于碘吸附器吸附床中的活性炭是可燃材料，其燃点高于330℃，当通过的气流温度过高时，有可能导致其燃烧。

1.1 研究背景



图1 切尔诺贝利核泄漏事故现场



图2 切尔诺贝利核泄漏事故现场



图3 切尔诺贝利核泄漏事故现场



图4 切尔诺贝利核泄漏事故现场

2.1 研究对象



图5 碘吸附器上视图



图6 碘吸附器侧视图

2. 研究对象及建模

2.2 建模

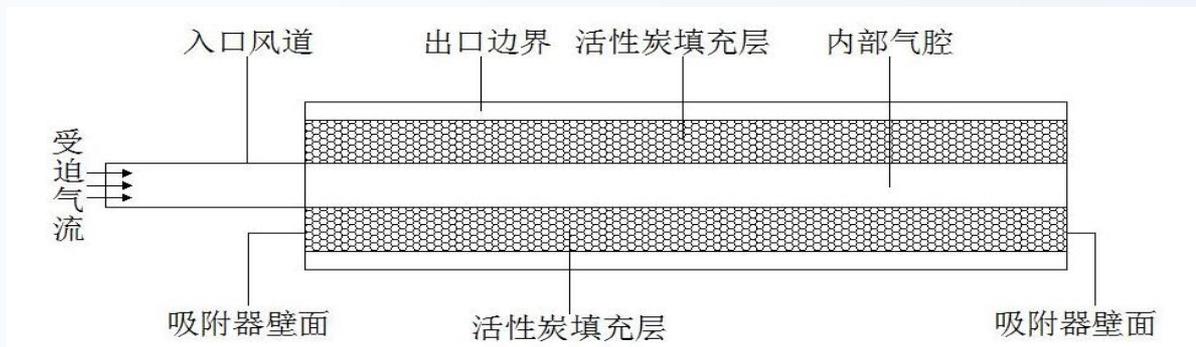


图8 示意图

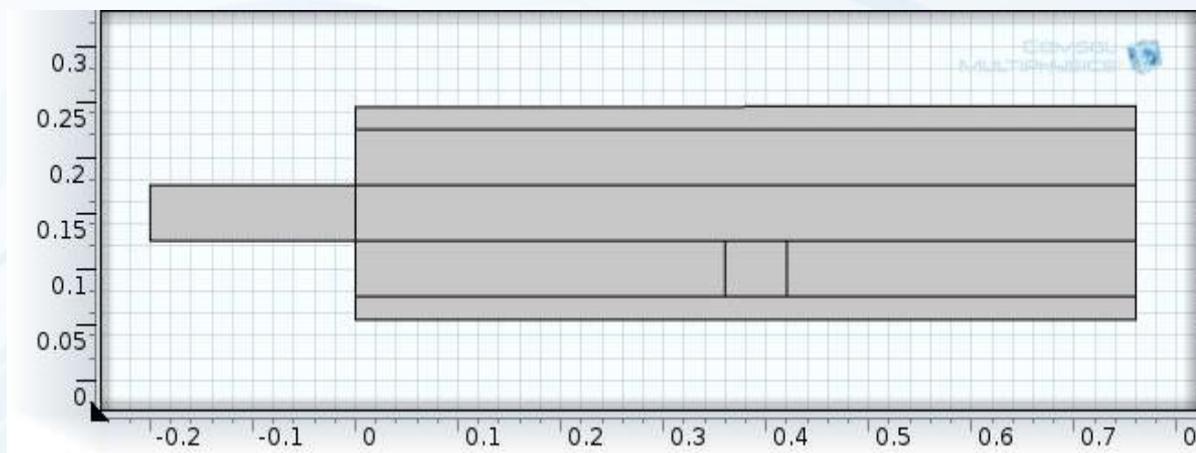


图9 二维模型

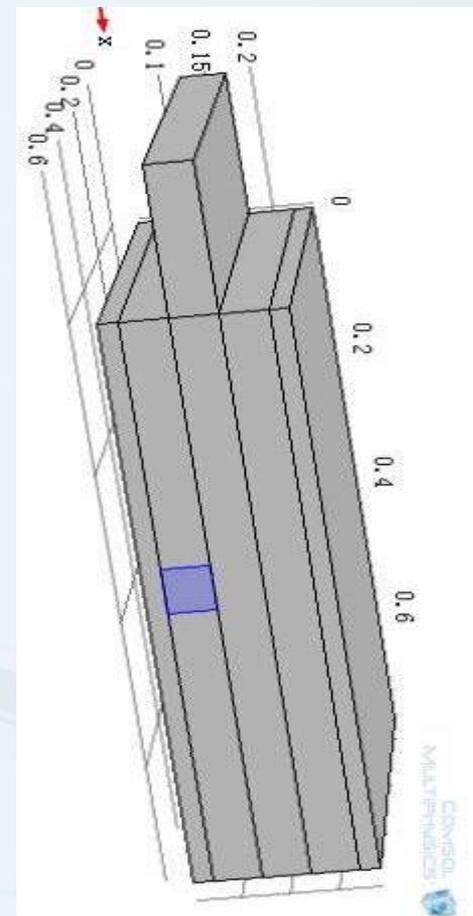
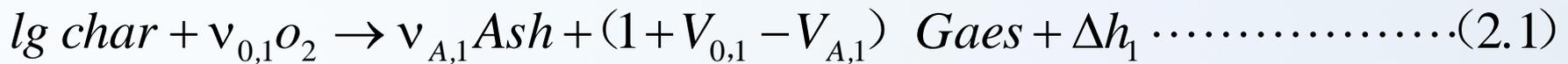


图10 三维模型

2. 研究对象及建模

数学控制方程严格遵照“三传一反”设立。

活性炭的氧化反应方程：



以上公式化学反应计量系数分别为： $V_{0,1} = 1.65$ ， $V_{A,1} = 0.05$ ， $\Delta h_1 =$ 所示， Δh_1 为反应的反应热。反应遵循单步Arrhenius方程，反应速率可表示为：

$$r_1 = A \exp\left(\frac{E_1}{RT_1}\right) \rho_c \rho_g Y_{O_2} \dots\dots\dots(2.2)$$

式中， r_1 指化学反应的反应速率， $kg/(m^3\ s)$ ； A 指化学反应的指前频率因子， $1/s$ 或 $m^3(kg \cdot s)$ ； E_1 指反应的活化能， J/mol ； R 指气体通用常数， $J/(mol \cdot K)$ ； T_1 指阴燃反应中的固体温度， K ； ρ_c 活性炭的容积密度 kg/m^3 ； ρ_g 指气流密度， kg/m^3 ； Y_{O_2} 指气流中氧气的质量分数。

对阴燃的燃烧和传播机理的描述主要从能量守恒、质量守恒、动量守恒以及化学组分变化入手，控制方程如下所示：

(1)质量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varphi\rho_g) + \nabla \cdot (\varphi\rho_g \mathbf{v}_g) = -\mu_g A_s \omega_c \dots\dots\dots(2.3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}[(1-\varphi)\rho_s] + \nabla \cdot [(1-\varphi)\rho_s \mathbf{v}_s] = -\mu_g A_s \omega_c \dots\dots\dots(2.4)$$

(2)能量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}[\varphi\rho_g h_g + (1-\varphi)\rho_s h_s] + \nabla \cdot (\varphi\rho_g h_g \mathbf{v}_g) = \nabla \cdot (\lambda_{eff} \nabla T) + A_s \sum \omega_i \Delta h \dots\dots\dots(2.5)$$

(3)动量守恒方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\varphi\rho_g \mathbf{v}_g) + \nabla \cdot (\varphi\rho_g \mathbf{v}_g) \mathbf{v}_g = & -\nabla(\varphi\rho) + \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla \cdot (\varphi \mathbf{v}_g)) - \varphi^2 \mathbf{v}_g \left[\frac{\mu_g}{K} + \frac{\varphi\rho_g B}{\sqrt{K}} \cdot |\mathbf{v}_g| \right] \\ & + g\varphi(\rho_{ref} - \rho_g) \dots\dots\dots(2.6) \end{aligned}$$

2. 研究对象及建模

(4) 化学组分平衡方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varphi\rho_g Y_{gi}) + \nabla \cdot (\varphi\rho_g Y_{gi} \mathbf{v}_g) = \nabla \cdot (\varphi\rho_g D \nabla Y_{gi}) \pm \mu_i A_s \omega_i \dots \dots \dots (2.7)$$

(5) 气体状态方程

$$P = \rho_g \frac{RT_g}{M_{mix}} \dots \dots \dots (2.8)$$

3.1 网格独立性考核

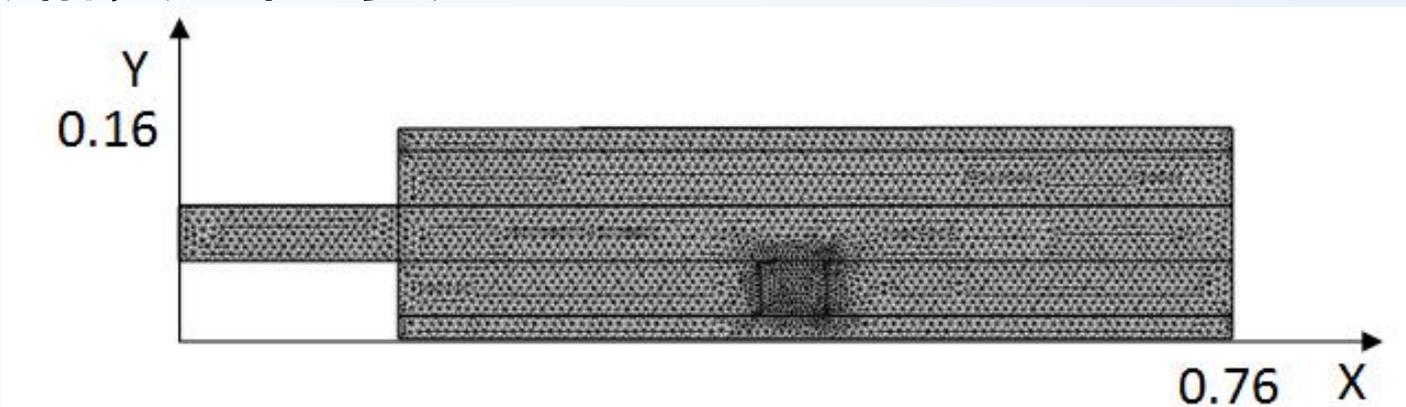


图11 自由三角形网格剖分

考核项	Case-1	Case-2	Case-3
最大单元尺寸 (m)	0.0079	0.0069	0.0035
单元数 (个)	6608	8430	32672
平均单元质量	0.9783	0.9870	0.9896
参数:	与 case-1 的绝对误差值 (%)		
最大出口边界风速 (m/s)	0.37908	1.562	0.290
120s时最大反应区温度 (k)	634.3877	0.7487	0.5511

图12 网格独立性考核对照表

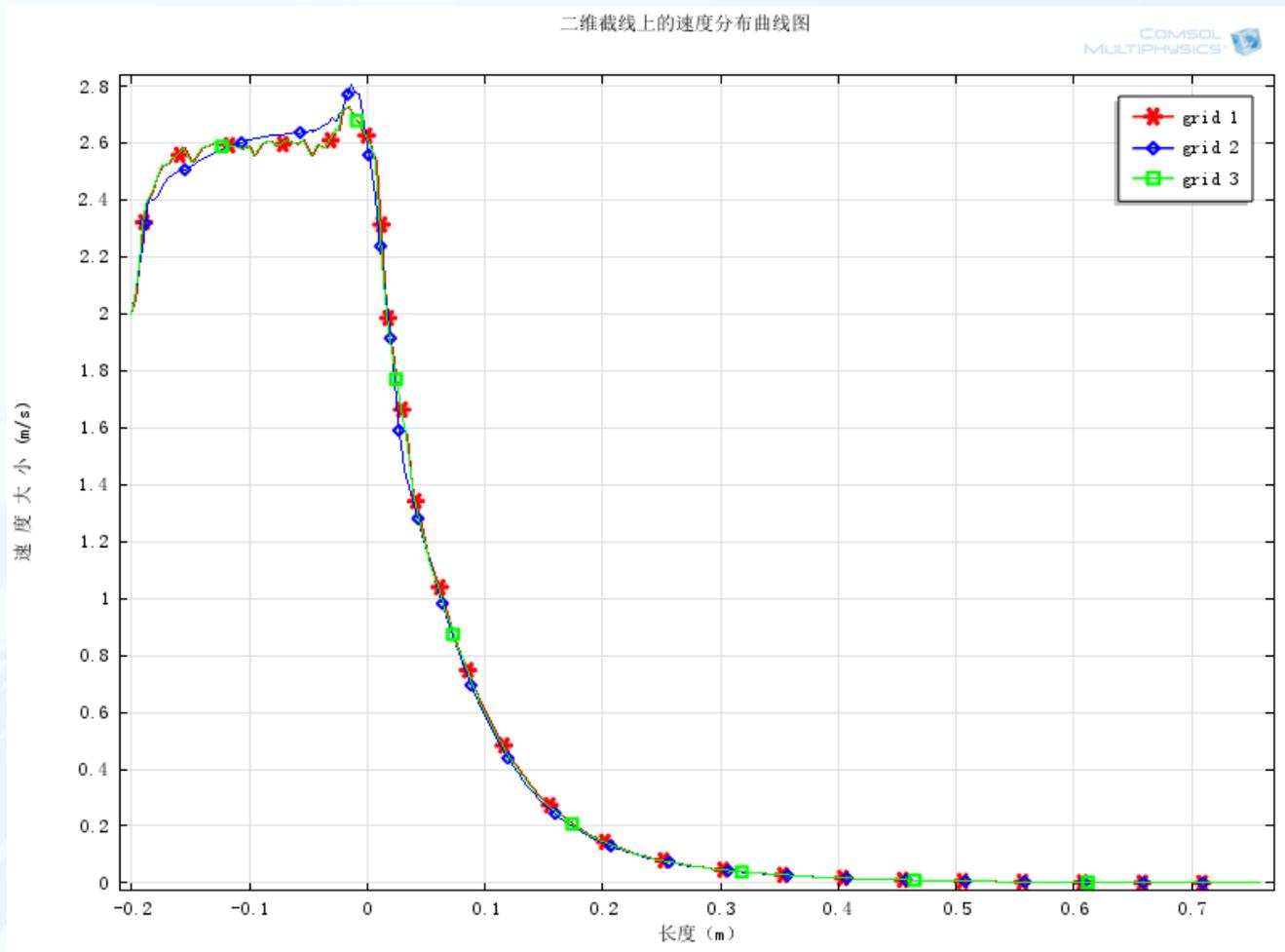


图13 二维截线上速度分布曲线图

3.2 风速影响分析

热源反应区域温度的大小主要与氧气含量和散热有关。

实际工作风速在2m/s左右，选择了1m/s、2m/s、3m/s三个工况进行研究。

因为碘吸附器的实际工作气流量有限，所以采用2m/s作为入口风速。

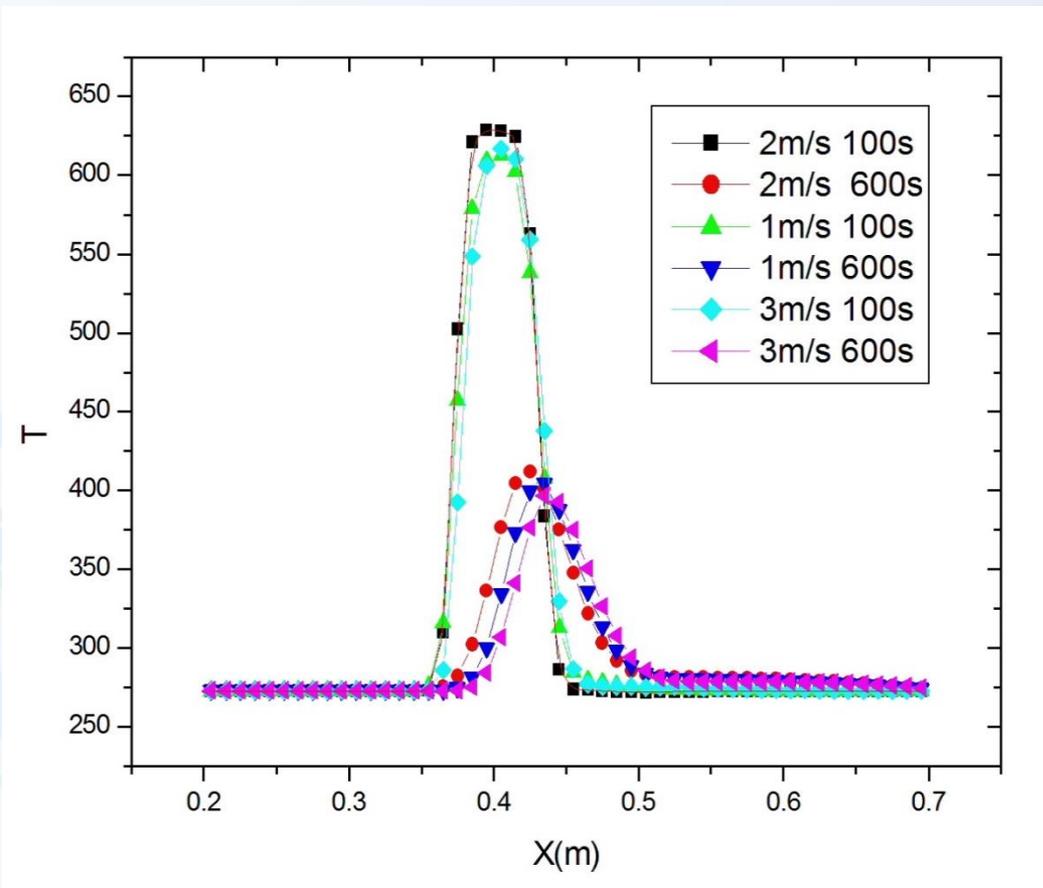


图14 不同入口风速下的温度变化曲线

3.3 速度场模拟

图15、图16：横坐标

0.2m之前，流线密集，0.2m之后流线疏密，变化明显。

可知：

在碘吸附器前侧气流速度较大，随水平轴向右迅速下降。前后两侧碘吸附器气流速度和压差明显不同，可知其中活性炭利用率也相差较大，这也是以后改进的要点之一。

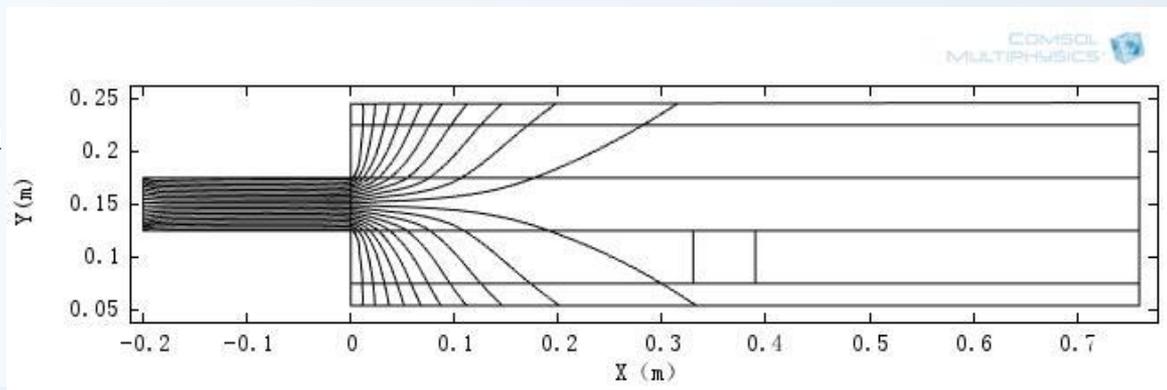


图15 竖向截面速度流线图

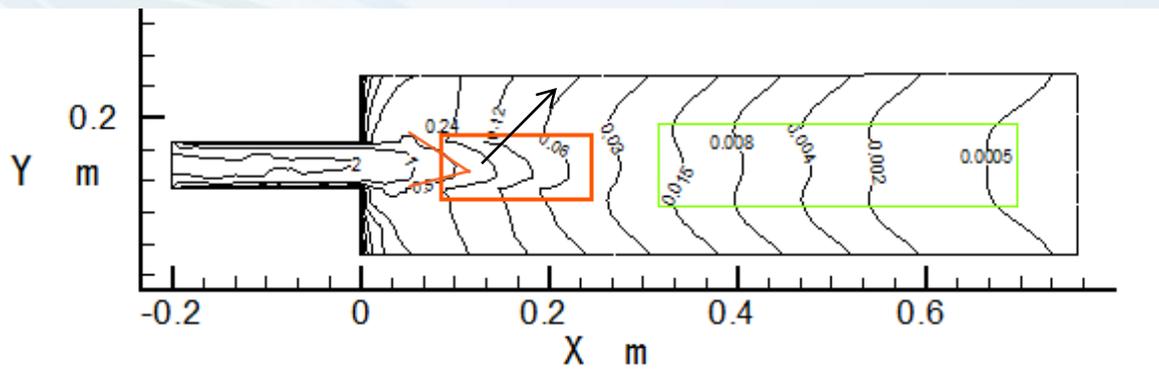


图16 竖向截面速度等值线图 (m/s)

由图可知：三维和二维结果基本相符：
0-0.2m区间气流速度变化剧烈，在0.2m之后气流速度成梯度下降，在0.05m±0.05m处为“高流速”区域。

碘吸附器存在明显的利用率不均衡问题。

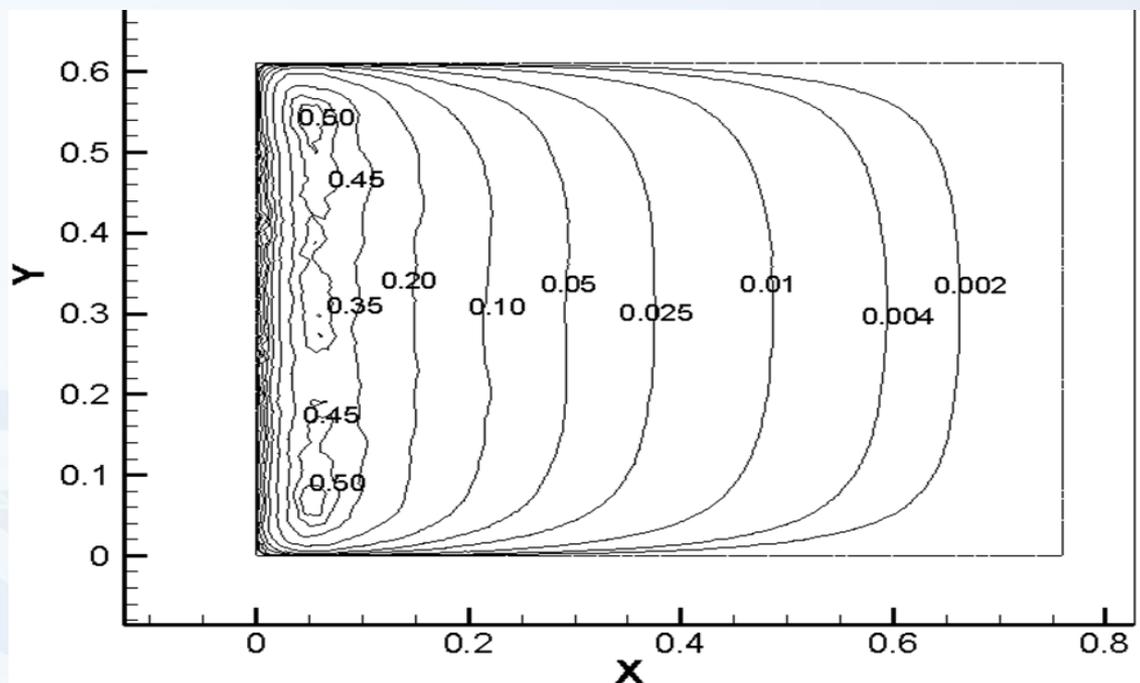


图17 碘吸附器内部Y=0.095m处x-y横向截面速度等值线(m/s)

3.4 不同热导率对热源传播的影响

对比分析了六种不同热导率情况下的热源温度变化情况：

当 $K_p=0.10 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{k})$ 时，热源温度不仅没有降低，反而有了一定程度的增加；

当 $K_p=0.05 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{k})$ 时增加得更加明显。

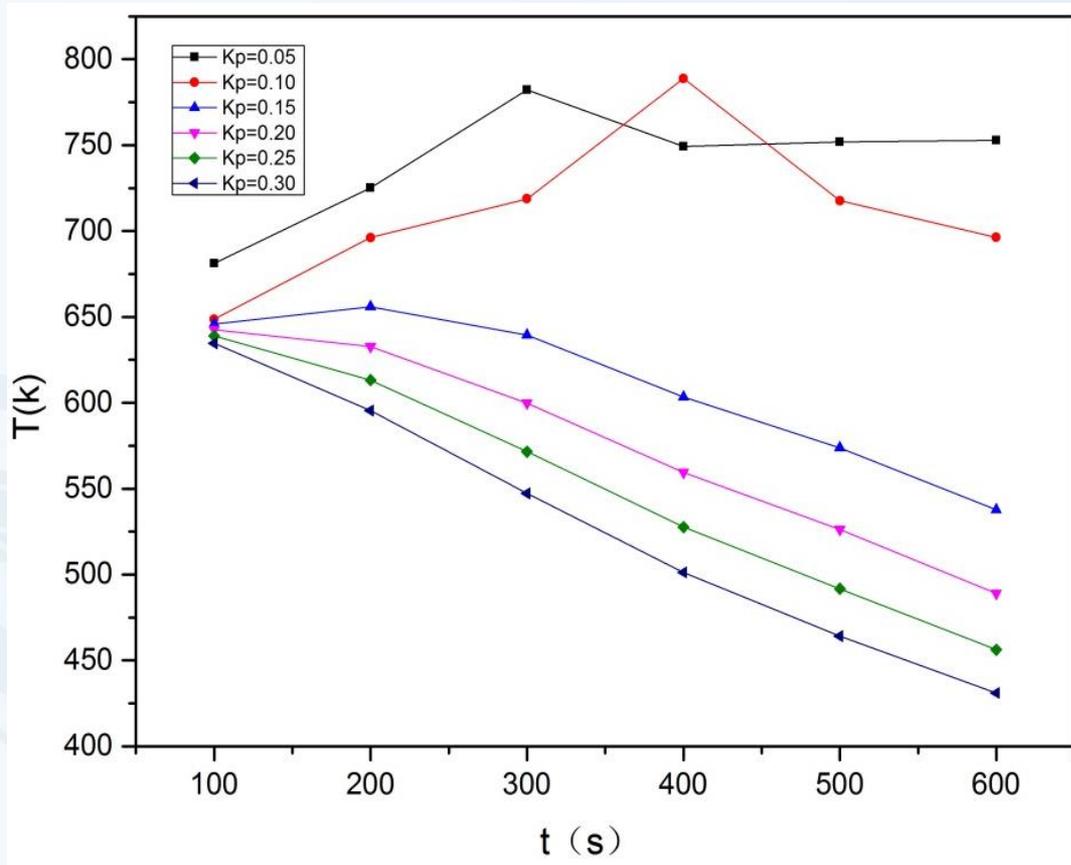


图18 不同热导率下的温度变化曲线图

3.5 碘吸附器阴燃的温度分布

从图中可以看出，填充床热源区段主要集中在“0.32m—0.46m”图中绿线（左）和红线（右）之间段距离。

10分钟以后热源最高点温度基本降低到了400k，热源消失趋势明显。

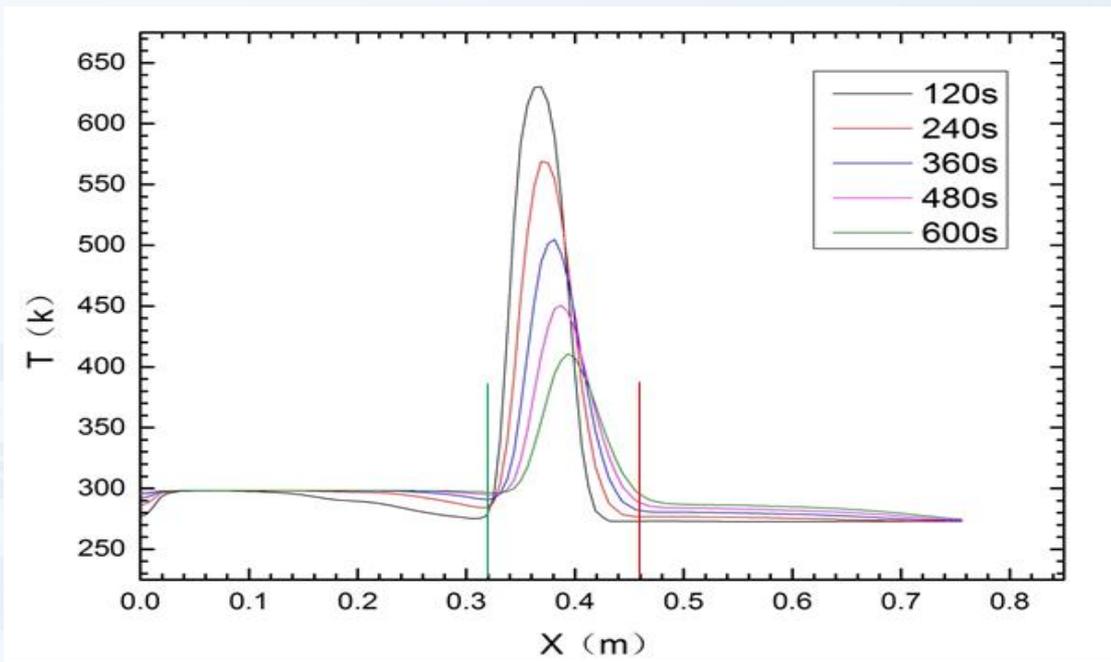


图19 不同时间热源温度分布曲线图

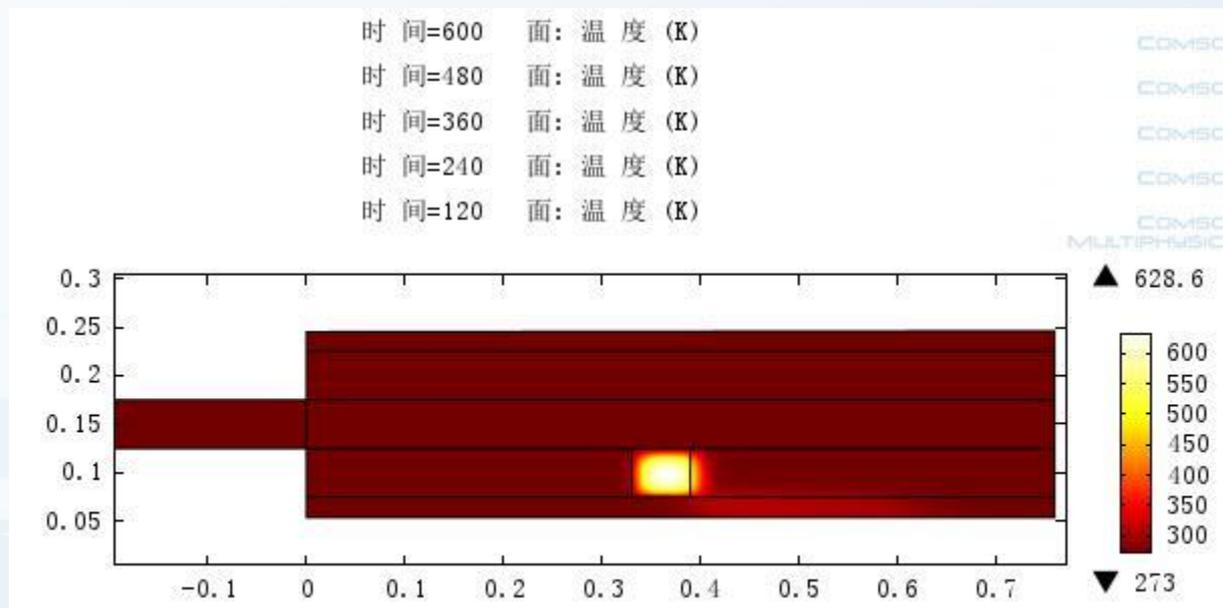


图20: $t=120s$ 、 $t=240s$ 、 $t=360s$ 、 $t=480s$ 、 $t=600s$ 各时刻的模拟结果

4.1 结论

通过软件模拟及数值分析得出如下结论：

- ✓通过对竖向截面速度分析可知，碘吸附器内活性炭填充床前后利用率有较大不同。
- ✓企业所给参数下，碘吸附器热源热传导、热对流作用明显，碘吸附器内阴燃难以传播。
- ✓热导率较低时阴燃就有可能发生进一步的传播和发展。

4.2 展望

利用COMSOL软件对II型碘吸附器开展了一系列的模拟研究工作，在以后的学习研究过程中还需要开展的进一步工作，主要包括：

- ★ 多孔介质各向异性对实验结果有一定的影响，因此基于多孔介质的物理性质还要进行深入研究；
- ★ 在热解反应过程中多孔介质以及生成的气体等各种物性保持不变的假设，显然有失准确，因此还需要进一步深入的研究；
- ★ 模拟研究的工况还较少，还应增加一定的验证性实验。

作者研究期间获得的成果（排名第二，导师第一）

- ✓在2014中国消防协会科学技术年会上投稿会议论文“基于COMSOL II型碘吸附器阴燃模拟分析”一篇，已经被录用，将被核心期刊出版；
- ✓在SCI期刊“Process Safety and Environmental Protection”发表论文“A Study of the Probability Distribution of Pool Fire Extinguishing Times using Water Mist”论文一篇；
- ✓消防相关专利2个：“一种侧开口式超声雾化灭火器”、“一种智能超声雾化灭火器”均已经被授权。

COMSOL
CONFERENCE
2014 SHANGHAI



谢谢

姓名：刘孟杰 电话：138-3714-1966
专业：动力工程
单位：郑州大学化工与能源学院