
重庆科技学院



毕业设计（论文）

题目 煤粉颗粒燃烧过程的数值模拟

学 院 冶金与材料工程学院

专业班级 冶金工程 2010-01

学生姓名 肖 辉 学号 2010440379

指导教师 高 绪 东 职称 讲 师

评阅教师 杨 治 立 职称 教 授

2014 年 06 月 09 日

注 意 事 项

1. 设计（论文）的内容包括：

- 1) 封面（按教务处制定的标准封面格式制作）
- 2) 原创性声明
- 3) 中文摘要（300 字左右）、关键词
- 4) 外文摘要、关键词
- 5) 目次页（附件不统一编入）
- 6) 论文主体部分：引言（或绪论）、正文、结论
- 7) 参考文献
- 8) 致谢
- 9) 附录（对论文支持必要时）

2. 论文字数要求：理工类设计（论文）正文字数不少于 1 万字（不包括图纸、程序清单等），文科类论文正文字数不少于 1.2 万字。

3. 附件包括：任务书、开题报告、外文译文、译文原文（复印件）。

4. 文字、图表要求：

- 1) 文字通顺，语言流畅，书写字迹工整，打印字体及大小符合要求，无错别字，不准请他人代写
- 2) 工程设计类题目的图纸，要求部分用尺规绘制，部分用计算机绘制，所有图纸应符合国家技术标准规范。图表整洁，布局合理，文字注释必须使用工程字书写，不准用徒手画
- 3) 毕业论文须用 A4 单面打印，论文 50 页以上的双面打印
- 4) 图表应绘制于无格子的页面上
- 5) 软件工程类课题应有程序清单，并提供电子文档

5. 装订顺序

- 1) 设计（论文）
- 2) 附件：按照任务书、开题报告、外文译文、译文原文（复印件）次序装订
- 3) 其它

学生毕业设计（论文）原创性声明

本人以信誉声明：所提交的毕业设计（论文）是在导师的指导下进行的设计（研究）工作及取得的成果，设计（论文）中引用他（她）人的文献、数据、图件、资料均已明确标注出，论文中的结论和结果为本人独立完成，不包含他人成果及为获得重庆科技学院或其它教育机构的学位或证书而使用其材料。与我一同工作的同志对本设计（研究）所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

毕业设计（论文）作者（签字）：

年 月 日

摘 要

煤炭作为我国的主要能源，其燃烧产物会对环境产生很大的污染，研究煤粉的燃烧，提高煤的利用率，做到清洁燃烧是现阶段亟待解决的问题。随着计算机科学的发展，对煤粉燃烧的研究不再只通过实验来实现，也可以利用 CFD 软件来模拟其燃烧过程。与实验研究相比，计算机模拟具有成本低、节约时间、模拟产生的结果更直观等优点。

本文通过使用 CFD 商业软件对煤粉的燃烧过程进行数值模拟，对煤粉的燃烧过程中温度、反应物和生成物的浓度、粒子的运动轨迹、 NO_x 和 SO_x 进行量的分析。本在对煤粉燃烧过程进行数值模拟的过程中，燃烧模型选用的是非预混燃烧模型，采用标 k - ϵ 模型来模拟燃烧室内的湍流流动，对燃烧室的壁面用标准壁面函数方程处理，辐射传热的模拟采用 P-1 辐射模型，对挥发分的析出采用双方程反应模型，对煤粉颗粒表面的燃烧使用的是动力学和扩散速率模型。

通过软件模拟后输出的结果可以看出，煤粉主要集中在燃烧室前半段进行燃烧。在燃烧室的前半段，由于煤粉的燃烧，燃烧室中的湍动能和湍动能耗散率的值、反应物和生成物的含量都变化比较大；挥发分也在燃烧室前半段完全析出并燃烧。在燃烧室的后半段，由于煤粉已经完全燃烧，燃烧室中湍动能和湍动能耗散率的值、各种物质含量都趋于稳定，变化很小。

关键词：FLUENT 煤粉 燃烧 数值模拟

ABSTRACT

China is a country with coal as its main energy source, the product of pulverized coal combustion will produce great pollution to the environment, studying the process of pulverized coal combustion, improving coal utilization, doing clean combustion is the urgent problems. With the development of computer science, the study of pulverized coal combustion is not only achieved through experiments, but also can be used to simulate the combustion process by using CFD software. Compared with the doing experiment, through computer simulation cost less than the test process, the simulation process more simple and convenient.

In this paper, we use the FLUENT software to do some numerical simulation on pulverized coal combustion process. We have a good understanding on temperature, the concentration of reactants and resultants, the trajectories of particles and the value of SO_x and NO_x . During the simulation we use the standard k-epsilon turbulence model to simulate turbulent flow, choose standard wall functions on wall equation and use the P-1 radiation model to simulate the radiation heat transfer. And then choose PDF model on gas combustion. By using two-equation reaction model to simulate volatile precipitation. Finally we use the kinetic and diffusivity model on the combustion of pulverized coal's surface.

According to the result of simulation we know that the pulverized coal combustion mainly occurs in front of the combustion. In front of the combustion, due to the combustion of pulverized coal, the value of the turbulent kinetic energy and turbulent dissipation rate and the content of the reactants and products in the combustion have a large change; Volatile has been completed separation and burnt, in the first half of the combustion. In the second half of the combustion chamber, the combustion of pulverized coal has been completely, the value of the turbulent kinetic energy and turbulent dissipation rate, the various substances are stable and have a little change.

Key words: FLUENT ; pulverized coal; combustion; numerical simulation

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	II
1 绪 论.....	1
1.1 引言.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.3 本课题研究的目的意义和主要内容.....	4
2 煤粉颗粒燃烧过程的数值模拟.....	5
2.1 FLUENT 软件简介.....	5
2.2 模拟过程的计算流程.....	5
2.3 燃烧室模型的建立.....	6
2.4 反应模型的定义.....	7
2.4.1 单双精度的选择.....	7
2.4.2 湍流模型的选择.....	7
2.4.3 能量方程的激活.....	8
2.4.4 燃烧模型的选择.....	9
2.4.5 辐射模型的选择.....	10
2.4.6 离散相模型的定义.....	11
2.5 入口射流的定义.....	11
2.6 材料属性的定义.....	12
2.6.1 混合体物质的属性的设定.....	12
2.6.2 燃烧粒子属性的设定.....	13
2.7 边界条件的确定.....	13
3 煤粉燃烧模拟结果.....	15
3.1 燃烧室中煤粉颗粒燃烧模拟结果.....	15
3.2 燃烧室内流场的模拟结果.....	16
3.3 燃烧室内烟气各组分的模拟结果.....	17
3.4 燃烧室内煤粉颗粒运动的模拟结果.....	18
3.5 燃烧室内温度场的分布.....	19
3.6 燃烧室中平均混合分数的模拟结果.....	20
3.7 燃烧室中挥发分的模拟结果.....	21
3.8 煤粉燃烧过程中 NO_x 的模拟.....	21

3.8.1 NO _x 的生成模型 ^[18]	21
3.8.2 NO _x 的模拟结果	22
3.9 煤粉燃烧过程中 SO _x 的模拟	23
3.9.1 SO _x 的生成模型	23
3.9.2 SO _x 的模拟结果	24
4 结 论	26
5 本课题的不足和后续研究计划	27
参考文献	28
致 谢	30

1 绪 论

1.1 引言

我国是以煤为主要能源的国家，表 1.1 和图 1.1 是 2006 年到 2012 年的我国能源消费结构。数据显示^[1]，2013 年我国煤炭消费总量 36.5 亿吨，占一次能源消费结构的 67%左右，占世界煤炭消费总量的 50%左右。据测算^[2]，在我国大气污染物排放总量中，由燃煤产生二氧化硫占 70%以上、氮氧化物占 60%以上、烟尘占 70%左右。而在我国的煤炭消费结构中，除了一半燃煤用作发电外，另一半燃煤用于工业和生活。目前我国煤电的总体的发展都处于世界先进水平。但是，工业用煤不仅燃煤率远低于大型煤电企业，而且一些企业为了提高生产效益，对燃烧产物没有进行严格的处理；而生活用煤，燃烧产物则是没有经过系统的脱硫、脱硝、除尘就直接排放，可见，“用煤不当”才是问题的关键。因此，研究煤粉燃烧过程，提高煤的利用率，降低燃烧产物对环境的污染是当前在工业用煤和家庭燃煤过程中亟待解决的问题。

表 1.1 能源消费总量和构成

年份	能源消费总量 (万吨标准煤)	占能源消费总量的比重(%)			
		煤炭	石油	天然气	水电/核电
2006	247562	74.3	20.2	3.0	2.5
2007	268413	74.3	19.7	3.5	2.6
2008	277515	74.9	19.2	2.9	3.0
2009	292028	74.0	18.8	4.1	3.1
2010	307987	71.9	20.0	4.6	3.5
2011	331173	72.0	19.5	5.2	3.3
2012	341094	70.6	19.9	5.6	3.9

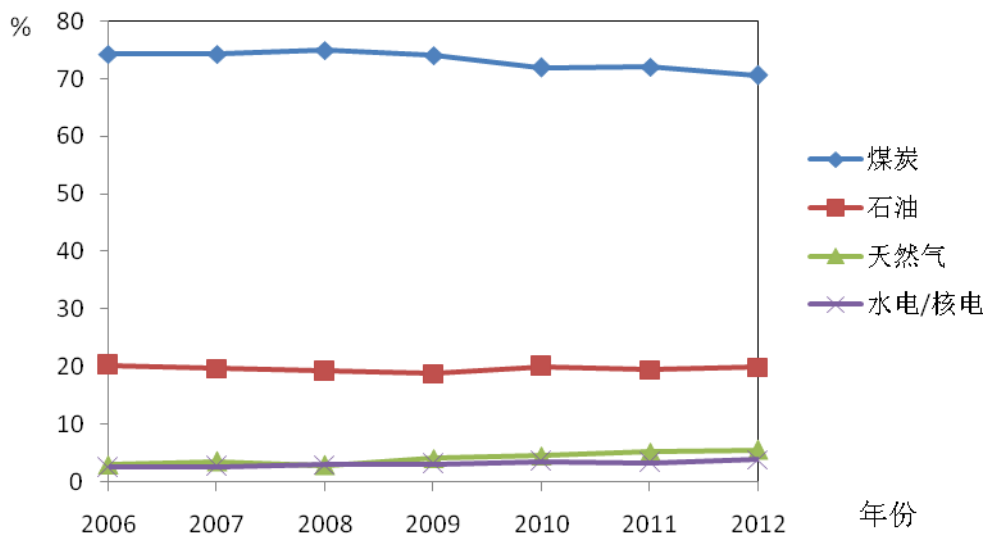


表 1.1 我国消费结构比例

1.2 国内外研究现状

张鹏飞等^[3]在 2003 年通过建立一维数学模型模拟炉内煤粉的燃烧，从煤粉粒子燃烧的宏观机理入手，避开了繁琐的粒子运动微分方程，通过对燃烧过程的适当简化，给出了计算煤粉燃尽率的显示方程。从模拟结果得出，影响煤粉的燃烧速度的因素主要包括以下几个方面，质温度、氧气浓度以及初始粒径的和焦炭的活化。

郭术义等^[4]为了降低生产成本，提高高炉的经济技术指标，对高炉喷煤过程进行数值模拟。以湍流两相流理论为基础，建立一个关于高炉喷煤的两相流动和传质的三维模型，利用模拟出来的结果改进高炉喷煤工艺。

郭文忠、张卫军^[5]将高炉和煤枪喷射简化为二维模型，利用 FLUENT 对本溪钢铁集团的 5#3 高炉喷煤过程进行数值模拟。得出喷煤量的多少并不影响煤粉的喷射，但是，未燃烧的煤粉的绝对数量会随着煤粉喷入量的增多而增多，从而影响高炉顺行的结论。同时，喷煤的效果与煤粉喷枪有很大的关系，喷枪性能的提高能显著提高改善喷煤比和煤粉的利用率，减少燃料比。

张丽丽等^[6]以欧拉气相方程组，欧拉颗粒连续方程和动量方程以及拉氏颗粒能量和质量变化方程为基础，建立并发展了高炉风口回旋区湍流气固两相流动和煤粉的燃烧的三维数学模型，将该模型用来分别对冷态模型内气固两相的流动和 750m³ 高炉风口回旋区内的气固两相三维流动与煤粉的燃烧进行数值模拟，通过模拟结果可以看出，该模型能比较准确的反应出高炉风口回旋区内的燃烧情况。高炉风口回旋区的流场中包括回流，正在发展流和各向异性湍流三种特点的流场。

张宏博等^[7]采用 FLUENT 对煤粉燃烧及流场进行数值模拟分析，采用混合分

数/概率密度函数法模拟湍流燃烧,对辐射传热采用 P-1 辐射模型,气固两相间的能量、动量和质量的交换利用拉格朗日/欧拉法处理,用双速率竞争模型来模拟挥发分的析出,对煤粉颗粒的表面燃烧的模拟采用动力/扩散反应速率模型。本文的模拟对象是新型煤粉燃烧装置,通过模拟得出煤粉在该类型的燃烧装置的燃烧室内有良好的分散性,煤粉在燃烧室中与空气完全混合,使其在燃烧室中达到最佳的分布状态。通过模拟得出的煤粉燃烧规律也与实际比较相符,即煤粉的燃烧是分为几步进行的,先是挥发分的析出和燃烧,然后才是煤粉颗粒的燃烧。

刘向军、林超^[8]根据多孔介质的传热传质学理论,引入对流项,建立了气流场中煤粉团的三维数学模型,并对不同孔隙率的煤粉团的燃烧过程进行了对比计算,结果表明,孔隙率越大,煤粉团的燃烧过程也越迅速,温度分布也越均匀。

李永华等^[9]采用 κ - ϵ 双方程模型作为湍流气相流动模型,两相流动采用颗粒随机轨道模型,挥发份析出采用单分子模型,气相燃烧采用扩散控制模型,焦炭燃烧采用菲尔德模型,辐射传热模型采用 Monte-Carlo 法。对绥中发电有限责任公司 800MW 锅炉改烧混煤燃烧过程进行了数值模拟。结果表明,混煤燃烧温度要低于组分煤中煤质好的单煤,说明混煤燃烧特性介于组分煤种之间,在运行中注意调整运行方式,改烧混煤是可行的。

顾明亮^[10]通过对不同旋流数下沿煤粉颗粒运行轨迹上氧浓度变化的研究,定量分析了旋流煤粉燃烧器煤粉燃烧中不同颗粒大小在不同旋流数下的运行特性,结果表明,煤粉颗粒大小直接影响了煤粉在中心回流区的停留时间以及回流区的有效作用时间。煤粉颗粒粒径对中心回流区的停留时间以及回流区的有效作用时间的影响规律为,先增加后减小,存在着一个颗粒直径最佳值。

丁历威、李凤瑞^[11]指出,煤粉燃烧数值模拟是一个非常复杂的过程,涉及到气体和颗粒辐射、煤粉浓淡分离、煤粉颗粒热解、焦炭表面燃烧以及煤粉颗粒分级燃烧等情况。

张海茹等^[12]指出 FLUENT 把模拟计算分成了 4 个过程:煤粉颗粒的吸热、挥发分的析出、焦炭的表面燃烧以及灰分的吸热或者冷却。

Liyuan Hu 等^[13-14]利用 PIV,热电偶和烟气分析仪研究了不同旋流煤粉燃烧和在二次风下 NO 的形成。通过模拟旋流煤粉的燃烧,结果表明,在旋流煤粉的燃烧过程中,颗粒都集中在靠近入口外围条件的相干结构,高温的发展在进口区,在高涡度和高颗粒浓度的区域,表面没有旋流气体燃烧产生的火焰。由于温度、CO 还原的综合影响,不同的二次风率不影响 NO 在燃烧室出口的形成。

Yansong Shen 等^[15]利用三维图形在 CFD 软件中模拟管道内的气体和粒子的行为,以达到了了解高炉喷煤后炉内现象。回旋区的气体粒子流动与风口中心线有着显著差异,在这里的气体-粒子流中低速回流着更小粒径的煤颗粒,改变滴落带的

孔隙率对气体的流动和燃烧行为的影响有限。

1.3 本课题研究的目的意义和主要内容

我国的能源消费结构中，煤炭消费占了很大的比重。煤粉的燃烧过程中又会产生很多对大气环境破坏严重的产物，如氮氧化物和硫氧化物。因此，提高煤粉的利用率，降低污染产物的排放，就成了工业用煤和生活用煤过程中亟待解决的问题。

煤粉的燃烧是一个非常复杂的物理化学过程，不同于对煤粉进行燃烧实验，本课题。以一个简单的燃烧器为原型建立二维模型，利用 CFD 软件对其燃烧过程进行：

(1)利用 FLUENT 的前处理软件 Gambit 对燃烧室进行二维建模，并划分好网格。

(2)用 FLUENT 读入建立好的模型，定义煤粉燃烧的各种模型、流体属性和边界条件来模拟煤粉燃烧。

(3)使用 Tecplot 和 Origin 软件对 FLUENT 模拟后得出的数据进行处理。

(4)分析结果。

2 煤粉颗粒燃烧过程的数值模拟

2.1 FLUENT 软件简介

FLUENT 是用来模拟不可压缩到可压缩范围内的复杂流动的计算机程序。由于具有灵活的非结构化网格和基于解的自适应网格技术及成熟的物理模型，使 FLUENT 在转换与湍流、传热与相变、化学反应与燃烧、多相流、旋转机械、动/变形网格、噪声、材料加工、燃料电池等方面有广泛应用^[16]。作为一款用 C 语言编写的软件，它具有很大的灵活性与能力。对于这款软件而言。它可以求解下面这些类型的问题：

- 1) 用非结构自适应网格模拟流场
- 2) 不可压或可压流动
- 3) 定常状态或者过渡分析
- 4) 无粘、层流和湍流
- 5) 牛顿流或者非牛顿流
- 6) 对流热传导
- 7) 耦合热传导和对流
- 8) 辐射热传导模型
- 9) 惯性(静止)坐标系和非惯性(旋转)坐标系模型
- 10) 多重运动参考框架
- 11) 化学组分混合和反应
- 12) 热量、质量、动量、湍流和化学组分控制体源
- 13) 粒子、液滴和气泡的离散相的拉格朗日轨迹的计算
- 14) 多孔流动
- 15) 一维风扇/热交换模型
- 16) 两相流，包括气穴现象
- 17) 复杂外形的自由表面流动

2.2 模拟过程的计算流程

利用 FLUENT 模拟煤粉的燃烧过程需要按下面的流程来求解：

- 1) 创建网格
- 2) 运行合适的解算器

- 3) 输入网格
- 4) 检查网格
- 5) 确定反应模型
- 6) 定义射流条件
- 7) 指定材料的物理性质
- 8) 指定边界条件
- 9) 调节解的控制参数
- 10) 初始化流场
- 11) 计算解
- 12) 检查结果
- 13) 保存结果

2.3 燃烧室模型的建立

本文模拟的燃烧室的示意图如图 2.1 所示，其尺寸为： $D=0.6\text{m}$ ， $D_1=22.2\text{mm}$ ， $D_2=35\text{mm}$ ， $D_3=56\text{mm}$ ，燃烧室长度为 2.2m 。

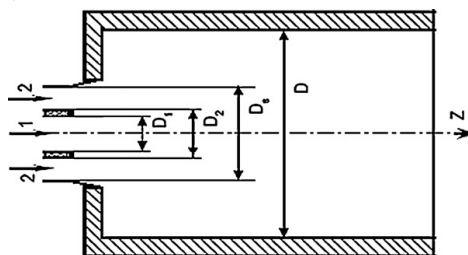


图 2.1 燃烧室示意图

燃烧室的网格和边界图如图 2.2~2.4 所示，因为燃烧室的二维图是一个对称图形，因此只画出二分之一即可。



图 2.2 燃烧室的网格图

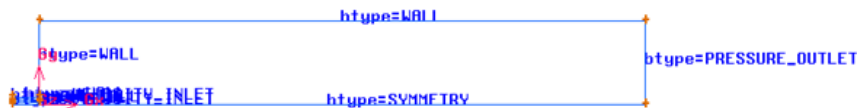


图 2.3 燃烧室的边界图

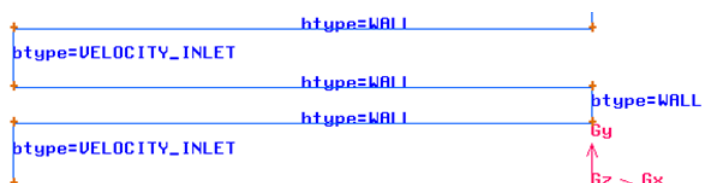


图 2.4 燃烧室的入口边界图

2.4 反应模型的定义

本课题需要定义的反应模型的主要包括单双精度、湍流模型、能量方程、燃烧模型、辐射模型以及离散相模型。

2.4.1 单双精度的选择

单双精度之间的区别只是计算精度的不同，在本次模拟中，受限于计算机硬件水平，采用的是单精度模拟。

2.4.2 湍流模型的选择

2.4.2.1 湍流模型

在本文的模拟过程中选择的是 $k-\varepsilon$ 模型中的标准 $k-\varepsilon$ 模型，表 2.1 给出了三种 $k-\varepsilon$ 模型的区别。

表 2.1 $k-\varepsilon$ 模型的功能列表

模型	功能与主要适用范围
标准 $k-\varepsilon$ 模型 ^[17]	是个半经验公式，它是从实验现象中总结出来的，应用多，计算量合适，有较多的数据积累和相当精度，鲁棒性最好，适于初始迭代、设计选型和参数研究，对于流向有曲率变化，较强压力梯度有旋问题等复杂流动模拟效果欠缺。
RNG $k-\varepsilon$ 模型 ^[18]	适于涉及快速应变、中等涡、局部转捩的复杂剪切流动（如边界层分离、块状分离、涡的后台阶分离、室内通风等），受到涡旋粘性各向同性假设限制。
Realizable $k-\varepsilon$ 模型	与 RNG $k-\varepsilon$ 模型的性能相似，但计算精度要优于 RNG $k-\varepsilon$ 模型，还可以模拟圆口射流问题。

标准 $k-\varepsilon$ 模型的湍动能 k 和耗散率 ε 方程为如下形式：

$$\rho \frac{dk}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b + \rho \varepsilon - Y_M$$

$$\rho \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

式中： G_k 表示由于平均速度梯度引起的湍动能产生， G_b 表示由于浮力影响引起的湍动能产生； Y_M 表示可压缩湍流脉动膨胀对总的耗散率的影响。湍流粘性系数：

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

在 Fluent 中，作为默认值常数， $C_{1\varepsilon}=1.44$ ， $C_{2\varepsilon}=1.92$ ， $C_{3\varepsilon}=0.09$ ，湍动能 k 与耗散率 ε 的湍流普朗特数分别为 $\sigma_k=1.0$ ， $\sigma_\varepsilon=1.3$ 。

2.4.2.2 壁面方程

近壁面区域可以分成三层。图 2.5 清楚地显示了这三层的流动情况(用半对数坐标)。

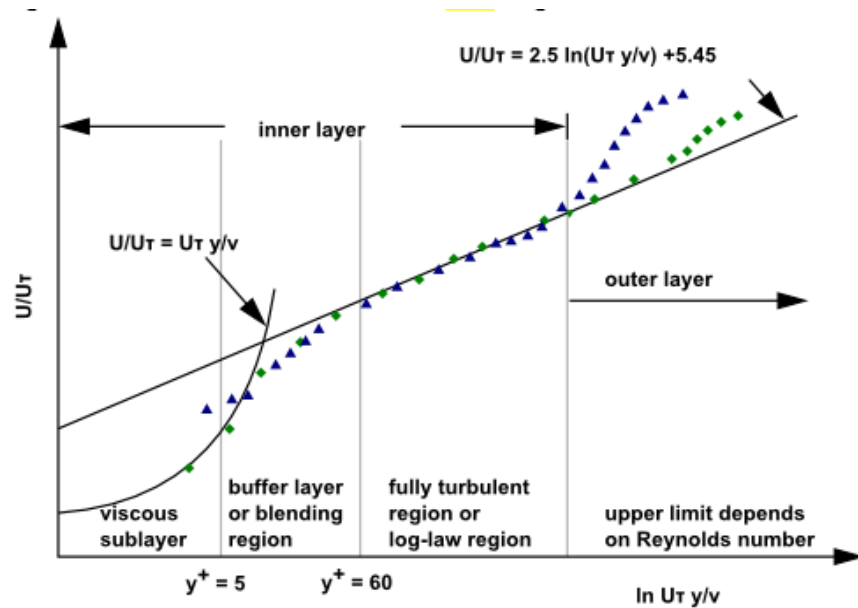


图 2.5 近壁面处无量纲的速度分布图

湍流流动受壁面影响很大，平均流动区域将由于壁面不光滑而受到影响。因此需要选择合适的壁面函数来处理燃烧室的壁面。在标准 $k-\epsilon$ 模型下包含四种壁面方程，它们分别是：标准壁面函数、不平衡壁面函数、增强壁面函数以及自定义壁面函数。

本模拟中选择的是标准壁面函数。标准壁面函数的方程组是建立在 Launder 和 Spalding 的假设上，在工业上有广泛的应用。在标准壁面函数中，用得比较多的变量为 y^* ， y^* 的下限为 15，低于此值，将会导致结果精度恶化。

2.4.3 能量方程的激活

通过求解能量方程，可以计算流体和固体区域之间的传热问题。

能量方程形式如下：

$$(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[k_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_j h_j J_j + u_j (\tau_{ij})_{\text{eff}} \right] + S_h$$

式中, $k_{\text{eff}} = k_t + k$, 为有效导热系数(湍流导热系数根据湍流模型来定义)。 J_j 是组分 j 的的扩散通量。方程右边前三项分别为导热项、组分扩散项和粘性耗散项。 S_h 是包括化学反应热和其他体积热源的源项。其中：

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{u_i^2}{2}$$

对于理想气体，焓定义为：

$$h = \sum_j m_j h_j$$

对于不可压缩气体，焓定义为：

$$h = \sum_j m_j h_j + \frac{p}{\rho}$$

其中 m_j 是组分 j 的质量分数，组分 j 的焓定义为：

$$h_j = \int_{T_{ref}}^T c_{p,j} dT$$

其中， $T_{ref}=298.15K$

2.4.4 燃烧模型的选择

在 FLUENT 中燃烧模型中一共包含以下五种模型(表 2.2)。

表 2.2 组分输运模型分类及简介

模型	功能与主要适用范围
通用有限速率模型 ^[19]	该模型基于求解组分质量分数输运方程，化学反应机理由用户自己定义。反应速率在组分输运方程中作为源项，并且由阿累尼乌斯公式计算。该模型适合求解预混，部分预混以及非预混湍流燃烧
非预混燃烧模型 ^[19]	该模型求解混合分数输运方程，单个组分的浓度由预测得到的混合分数的分布求得。该模型是专门求解湍流扩散火焰问题，考虑了湍流对燃烧的影响，反应机理不能由用户自己定义
预混燃烧模型 ^[19]	该模型主要针对纯预混湍流燃烧问题，在这些问题中，反应物和生成物由火焰峰面隔开，该模型通过求解各种反应过程参数来预测火焰峰面的位置，该模型为考虑湍流对燃烧的影响，引入了一个湍流火焰速度
部分预混燃烧模型 ^[19]	该模型针对预混和非预混都存在的湍流反应流动。通过求解混合分数方程换热反应过程参数来确定火焰峰面的位置
组分概率密度输运燃烧模型 ^[19]	该模型用来模拟湍流火焰中存在的有限速率反应，任意的反应机理都可以导入 FLUENT，该模型可用于求解预混，非预混及部分预混火焰，但只用此模型需要的投资较大

对煤粉的燃烧模拟来说，通常选用的是通用有限速率模型或非预混燃烧模型。在本次模拟中采用的是非预混燃烧模型，要求使用 FLUENT 组件 prePDF 创建 PDF 文档。具体的一些参数如下：

煤的元素分析如表 2.3：

表 2.3 煤的元素分析

元素	C	H	O	N	S
Wt%(DAF)	89.3	5.0	3.4	1.5	0.8

煤粉的低位发热值为 35.3MJ/kg,比热容为 1000J/kg-K, 燃料的温度为 400K, 氧气的温度为 1500K。

2.4.5 辐射模型的选择

FLUENT 中有五种辐射模型(表 2.4)。

表 2.4 辐射模型分类及简介

模型	功能与主要适用范围
Rosseland 辐射模型 ^[20]	在介质的消光系数很大时, 辐射的 Rosseland 或漫射近似是种有效的处理方法。一般在光学深度大于 3 时, 可以使用 Rosseland 辐射模型
P-1 辐射模型 ^[20]	是 P-N 模型中最简单的类型。P-N 模型的出发点是把辐射强度展开成为正交的球谐函数
离散传播辐射模型 ^[20]	主要是假设用单一的(辐射)射线代替从辐射表面沿某个立体角的所有辐射效应
表面辐射模型 ^[20]	只考虑了面与面之间的辐射传热, 而对介质之间的发射、散射和吸收, 在大多数情况下并不适合模拟计算
离散坐标辐射模型 ^[20]	求解的是从有限个立体角发出的辐射传播方程(RTE), 每个立体角对应着坐标系(笛卡尔)下的固定方向 \hat{s} 。立体角的离散精度由用户确定, 它有点类似于 DTRM 模型中的射线数目, 但与其不同的地方在于, 它并不进行射线跟踪

对于吸收、发射、散射性介质, 在位置 \hat{r} 处沿着 \hat{s} 方向的辐射传递方程(RTE)为:

$$\frac{dI(\hat{r}, \hat{s})}{ds} + (\alpha + \sigma_s)I(\hat{r}, \hat{s}) = \alpha n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\hat{r}, \hat{s}') \Phi(\hat{s}, \hat{s}') d\Omega'$$

式中:

\hat{r} —— 位置向量

\hat{s} —— 方向向量

\hat{s}' —— 散射方向向量

s —— 沿程长度(行程长度)

α —— 吸收系数

n —— 折射系数

σ_s —— 散射系数

σ ——斯蒂芬—玻耳兹曼常数($5.672 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$)

I ——辐射强度，取决于位置(r)与方向(s)

T ——当地温度

Φ ——凝聚相的散射相函数

Ω' ——立体角

$(\alpha + \sigma_s)s$ ——介质的消光系数

本模拟中选择 P-1 辐射模型，与其它几种模型相比，P-1 辐射模型是一个扩散方程，考虑了燃烧过程中的扩散效应，求解过程需要较少的 CPU 时间。

2.4.6 离散相模型的定义

在煤粉燃烧模拟过程中除了求解连续相的输运方程外，还需要模拟流场中离散的相。

在离散相模型中，需要考虑离散相轨道(连同颗粒的传质和传热)对气相方程的影响作用，设定耦合参数、最大计算步数和时间步长。

在离散相模型中，耦合参数的值表示连续流场每计算多少次，计算一次离散相(颗粒轨道)计算，并更新源项对气相场的影响。在本文模拟中耦合参数选择 50。Max. Number of Steps 的值表示当某个颗粒轨道计算的最大步数。在本模拟中该值为 10000。Length Scale 选项控制着用于对离散相轨道积分的时间步长，本模拟中值为 0.01m 表示在计算域中，每 10m 长的轨道大致计算 1000 个时间步长。而 Step Length Factor 的不同之处在于它确定时间步长的根据是颗粒穿越一个计算网格所需的时间步数。

2.5 入口射流的定义

在 FLUENT 中包含了十种类型的射流源，本文在模拟过程中采用的是组射流源来定义射流类型。煤粉流被定义为一组有 10 种不同的初始条件的射流，射流的参数给出了每组颗粒流的起始位置、速度及其他各种参数值。这些初始条件决定每个颗粒的瞬时状态值的颗粒因变量的初值。具体的参数设置见表 2.5~2.6。

表 2.5 射流的一般属性

参数	值
Injection Type	group
Number of Particle Streams	10
Particle Type	Combusting
Material	coal-mv
Diameter Distribution	rosin-rammler
Oxidizing Species	O ₂
Turbulent Dispersion	Stochastic Model with values for Number of Tries 和 Time Scale Constant 的值分别为 10 和 0.15

表 2.4 射流的其它参数设置

Parameter	First Point	Last Point
X-Position	0.001m	0.001m
Y-Position	0.001m	0.001m
X-Velocity	10m/s	10m/s
Y-Velocity	5m/s	0
Temperature	400K	400K
Total Flow Rate	0.05kg/s	——
Min. Diameter	70e-6m	——
Max. Diameter	200e-6m	——
Mean Diameter	134e-6m	——
Spread Parameter	4.52	——

2.6 材料属性的定义

2.6.1 混合体物质的属性的设定

由于使用的是非预混燃烧模型和创建了 PDF 文档，因此所有热力学参数，包括密度、比热和生成焓都会直接从数据库中读取，这些参数在 FLUENT 中作为 pdf-mixture 物质的性质，因此只需要定义传输性质，例如速度和导热系数。其它参数的设置见表 2.7。

表 2.7 混合体物质其它参数设置

参数	值
Thermal Conductivity	0.025
Viscosity	2e-5
Absorption Coefficient	wsggm-cell-based
Scattering Coefficient	0
Scattering Phase Function	isotropic

2.6.2 燃烧粒子属性的设定

燃烧离子的参数如表 2.8.

表 2.8 燃烧粒子的参数设置

属性	值
Density	1300kg/m ³
Cp	1000J/kg-K
Thermal Conductivity	0.0454w/m-K
Latent Heat	0
Vaporization Temperature	400K
Volatile Component Fraction(%)	28
Binary Diffusivity	5e-4m ² /s
Swelling Coefficient	2
Burnout Stoichiometric Ratio	2.67
Combustible Fraction(%)	64
Devolatilization Model(1/s)	single-rate
Combustion Model	Pre-exponential Factor=492000
	Activation Energy(J/kgmol)=7.4e+07
	kinetics/diffusion-limited
	Mass Diffusion-Limited Rate Constant=5e-12
	Kinetics-Limited Rate Pre-Exponential Factor=0.002
	Kinetics-Limited Rate Activation Energy=7.9e+07

2.7 边界条件的确定

为了得出煤粉燃烧过程中物理问题的唯一解，必须确定边界的各种参数值，具体包括流动变量和热变量在边界处的值。它是 FLUENT 在计算过程中很重要的一部分，直接影响了求解过程和所得到的结果。

在本模拟中的要设定的边界条件包括两个速度入口(v-1,v-2)、一个压力出口(p-1)和五个壁面(w-1,w-2,w-3,w-4,w-5)。下面的表 2.9~2.12 给出了相关边界条件的参数。

表 2.9 v-1 边界条件的相关参数

参数	值
Velocity	45m/s
Temperature	1500K
Turbulence Intensity	10%
Hydraulic Diameter	0.0222m

表 2.10 v-2 边界条件的相关参数

参数	值
Velocity	30m/s
Temperature	1500K
Turbulence Intensity	10%
Hydraulic Diameter	0.0210m

表 2.11 p-1 边界条件相关参数

参数	值
Gauge Pressure	0
Backflow Total Temperature	1000K
Backflow Turbulence Intensity	10%
Backflow Hydraulic Diameter	0.6m

表 2.12 壁面区域边界条件相关参数

Zone	Temperature	Internal Emissivity
w-1	1500K	1
w-2	1500K	1
w-3	1500K	1
w-4	1500K	1
w-5	1500K	1

3 煤粉燃烧模拟结果

3.1 燃烧室中煤粉颗粒燃烧模拟结果

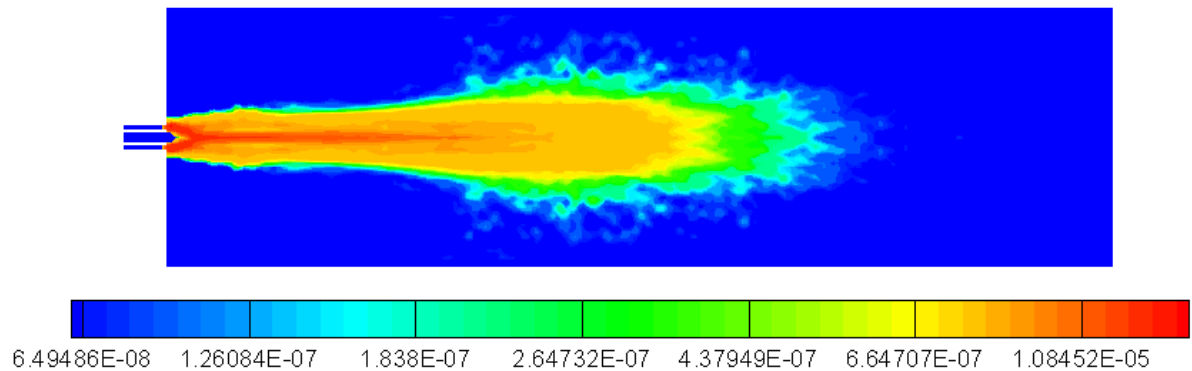


图 3.1 煤粉颗粒燃烧速率模拟结果图(kg/s)

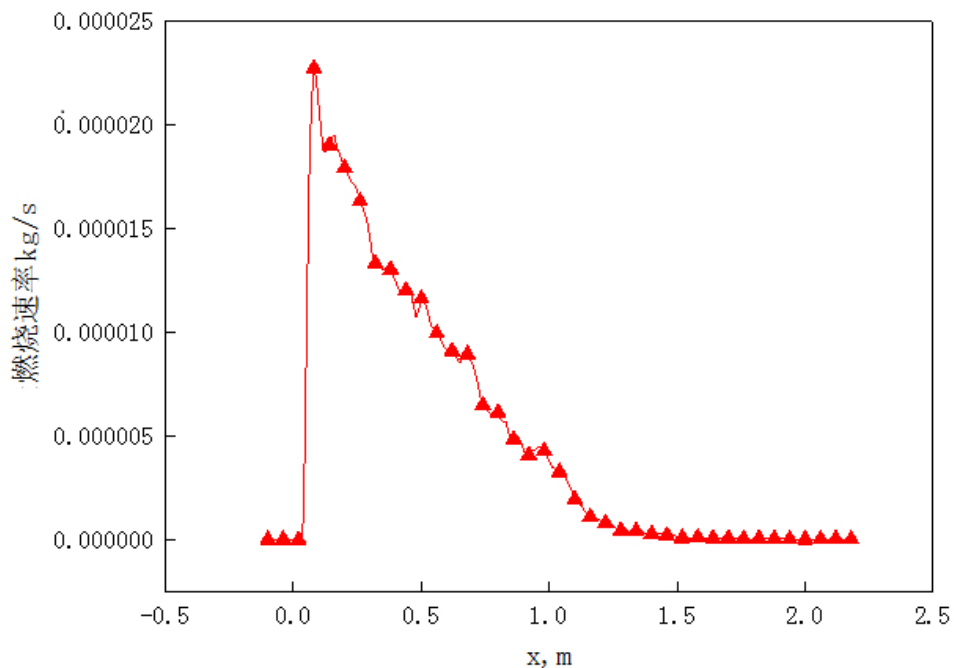
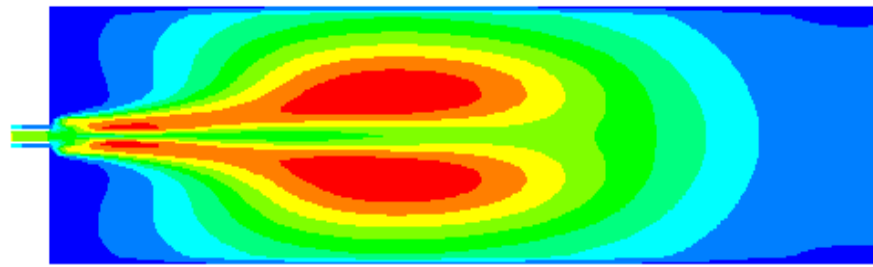


图 3.2 中心线上煤粉颗粒燃烧速率曲线图

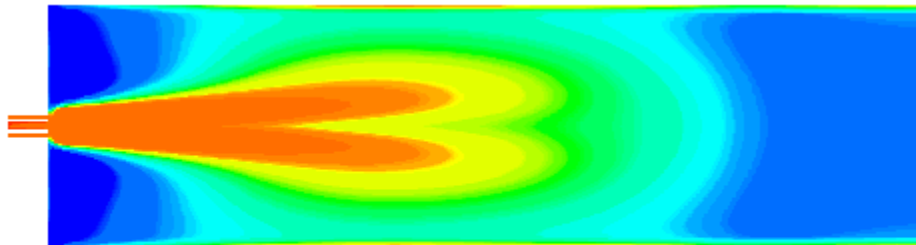
图 3.1~3.2 中可以看出,煤粉在进入燃烧室中就开始燃烧,其燃烧速率先随着 x 轴的增大而迅速增大,在 $x=0.08\text{m}$ 处达到一个最大值后随着 x 轴的增大而减少,在 $x=1.4\text{m}$ 处燃烧速率趋近于零,说明在此时煤粉颗粒已经基本燃烧完全,其燃烧过程主要发生在燃烧室的前半段。

3.2 燃烧室内流场的模拟结果



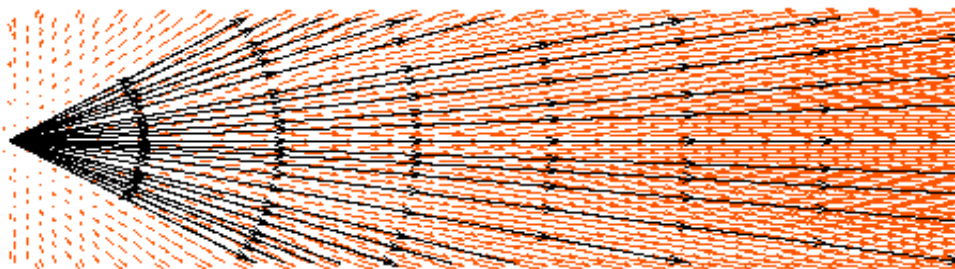
turb-kinetic-energy: 5 10 15 20 25 30 35 40

图 3.1 燃烧室中湍动能(k)模拟结果图(m²/s²)

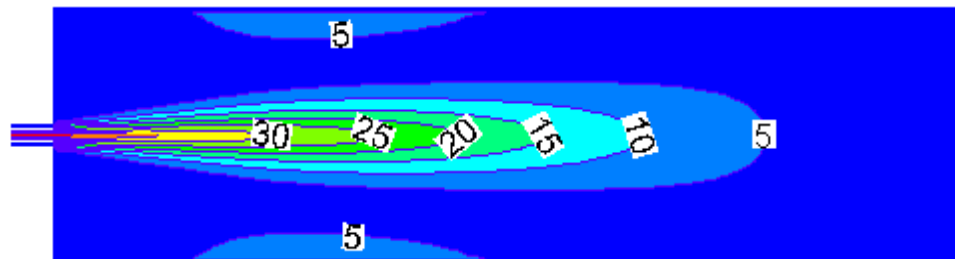


56.4916 133.646 266.465 541.48 788.053 910.06 1551.52 14000

图 3.2 燃烧室中湍动能耗散率(ε)模拟结果图(m²/s³)



(a)燃烧室中速度矢量图



velocity-magnitude: 5 10 15 20 25 30 35 40

(b)燃烧室中速度云图

图 3.3 燃烧室中速度模拟结果图(m/s)

图 3.1~3.3 分别描述了燃烧室内的湍动能(k)、湍动能耗散率(ϵ)和速度的变化情况。从图中可以看出,在燃烧室的前半段,煤粉燃烧剧烈,导致燃烧室内的湍动能(k)逐渐变大、湍动能耗散率(ϵ)慢慢变小和速度变化较大;但是在燃烧室的后半段,由于煤粉已经充分燃烧,湍动能(k)和速度在燃烧室后半段缓慢变小,湍动能耗散率(ϵ)保持不变。

3.3 燃烧室内烟气各组分的模拟结果

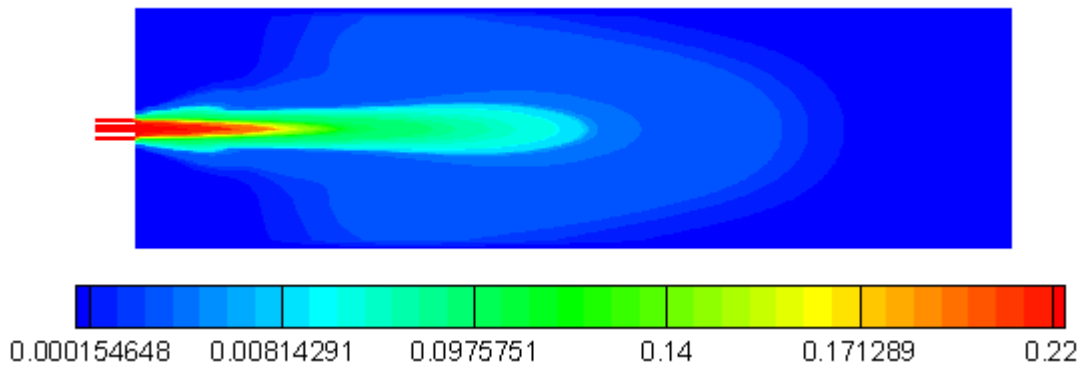


图 3.4 燃烧室中 O₂ 含量模拟结果图

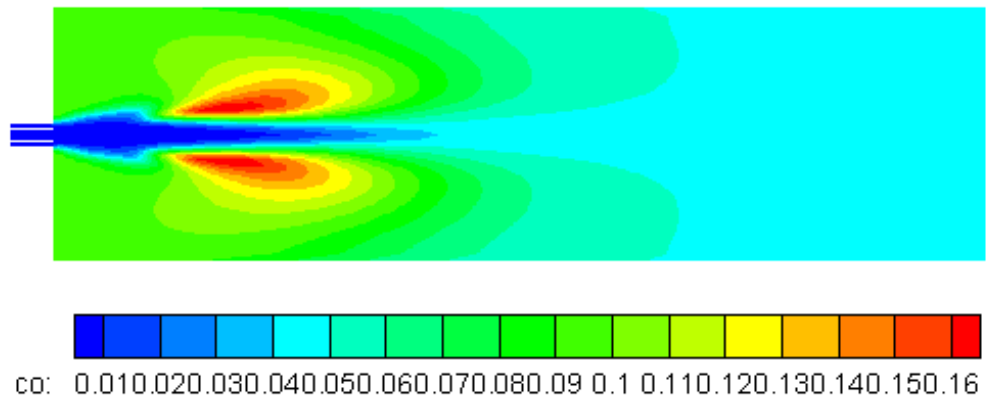


图 3.5 燃烧室中 CO 含量模拟结果图

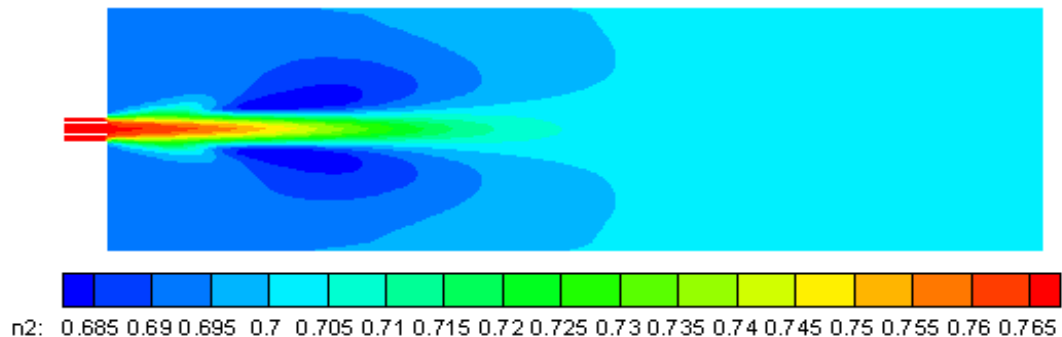


图 3.6 燃烧室中 N₂ 含量模拟结果图

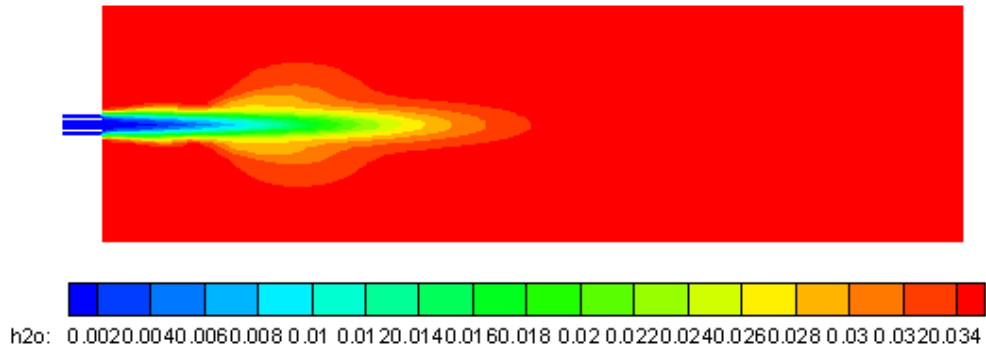


图 3.7 燃烧室中 H₂O 含量模拟结果图

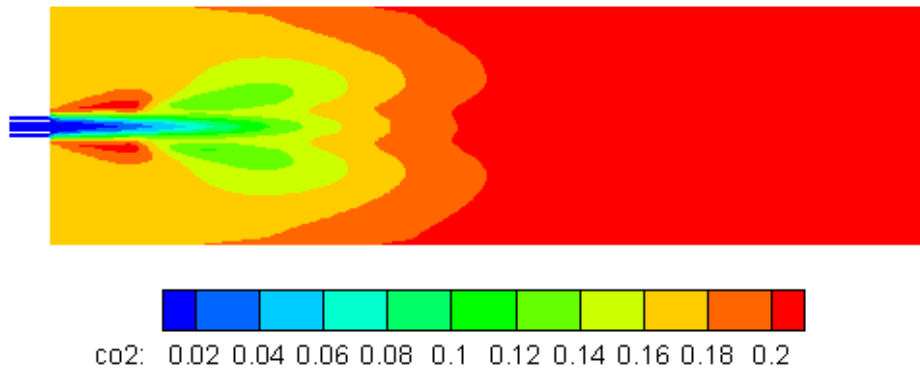


图 3.8 燃烧室中 CO₂ 含量模拟结果图

图 3.4~3.8 分别描述了煤粉燃烧过程中 O₂、CO、N₂、H₂O 和 CO₂ 的质量分数变化情况。从图中可以看出，在燃烧室的前半段，由于煤粉的剧烈燃烧，O₂ 含量急剧降低，N₂ 也因为生成了 NO_x 含量也明显减低，而 CO、CO₂、H₂O 大量生成，含量明显增多。但是在燃烧室后半段，由于煤粉已经充分燃烧，燃烧产物中的各个组分含量基本稳定，变化不大。

3.4 燃烧室内煤粉颗粒运动的模拟结果

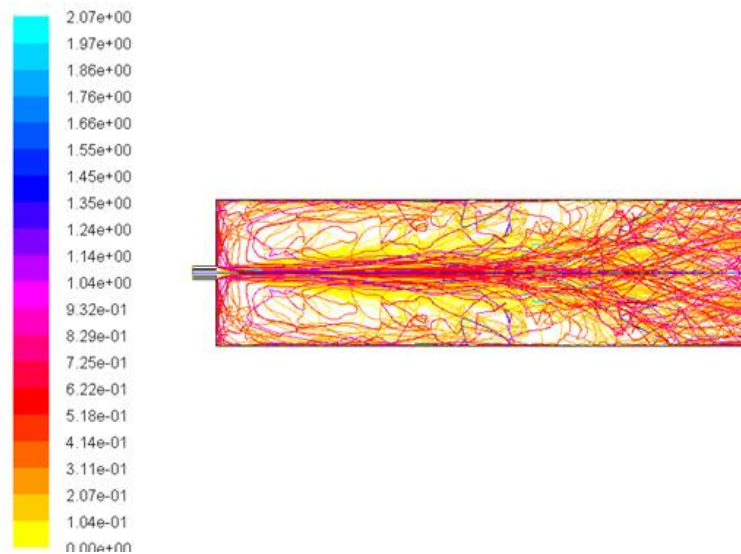


图 3.9 燃烧室中煤粉颗粒运动的模拟结果图

从图 3.9 中可以看出，煤粉颗粒喷入燃烧室后，大部分由于惯性沿着中心线继续向前直到燃烧，而也有一部分在进入燃烧室中就扩散开来后燃烧。

3.5 燃烧室内温度场的分布

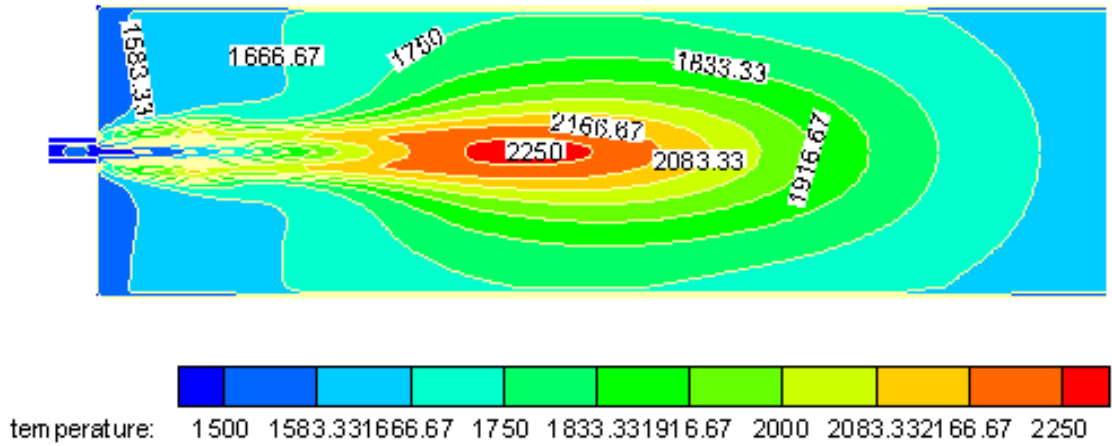


图 3.9 燃烧室中温度模拟结果图(K)

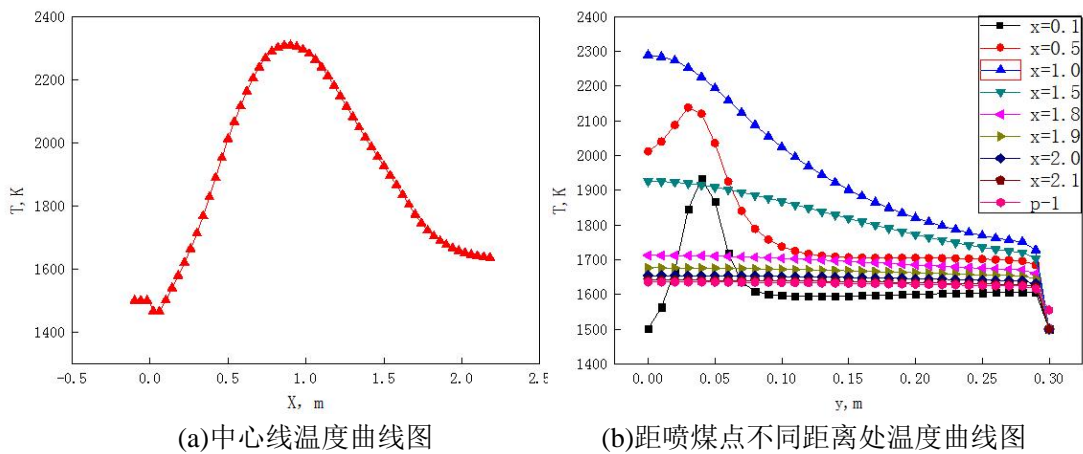


图 3.10 燃烧室不同处的温度曲线图

从图 3.9~3.10 中可以看出，燃烧室的温度随着 x 轴的增大而增大，在 $x=1.0\text{m}$ 处温度达到最大值，而后随着 x 轴的增大而减少。从中可以看出煤粉在燃烧室中部才充分燃烧，温度也在此时达到最高，而在燃烧室后半段，由于煤粉燃烧基本完成，温度开始慢慢降低。

3.6 燃烧室中平均混合分数的模拟结果

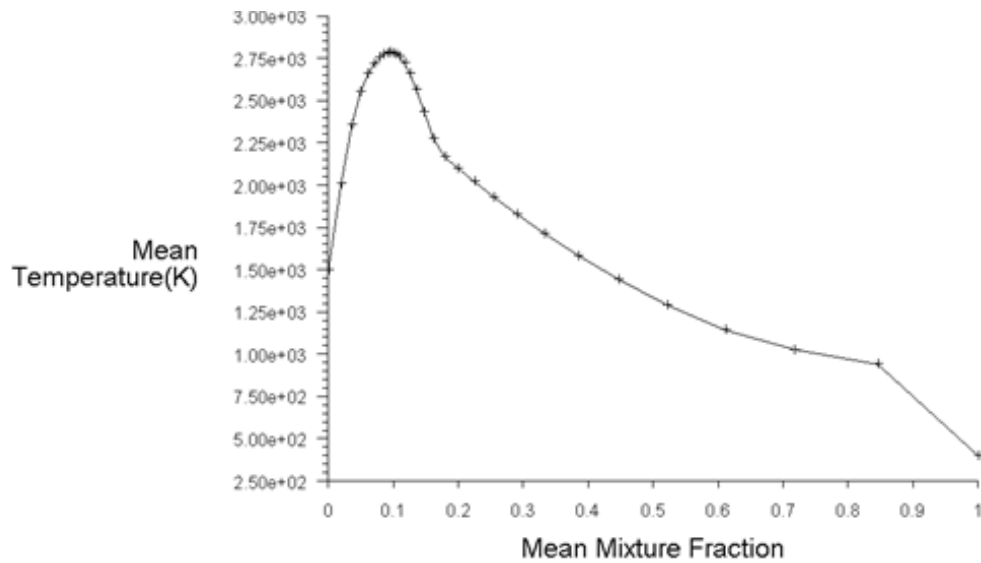
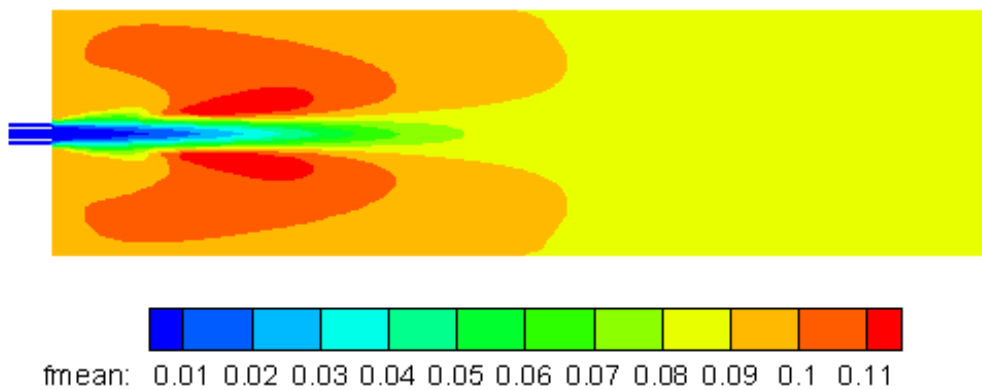


图 3.13 平均混合分数与温度的关系图



3.14 烧室中的平均混合分数模拟结果图

从图 3.9 和图 3.13~3.14 中可以看出煤粉与空气的平均混合分数影响燃烧室中温度分布，在平均混合分数达到 0.1 左右时温度应该达到 2800K 左右。但是对比图 3.9 和 3.14 可以看出，当混合分数达到 0.1 时，燃烧室中的温度并没有达到图 3.13 中所对应的温度，说明影响煤粉燃烧后燃烧室中的温度的因素不仅仅只有平均混合分数一项。

3.7 燃烧室中挥发分的模拟结果

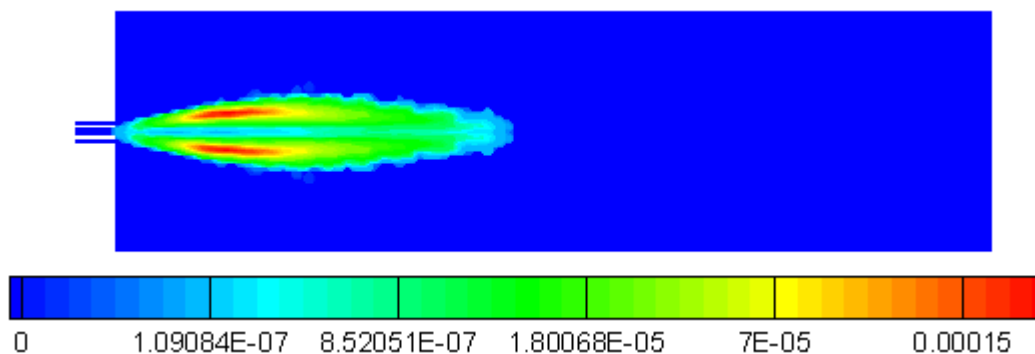


图 3.15 燃烧室中挥发分模拟结果图

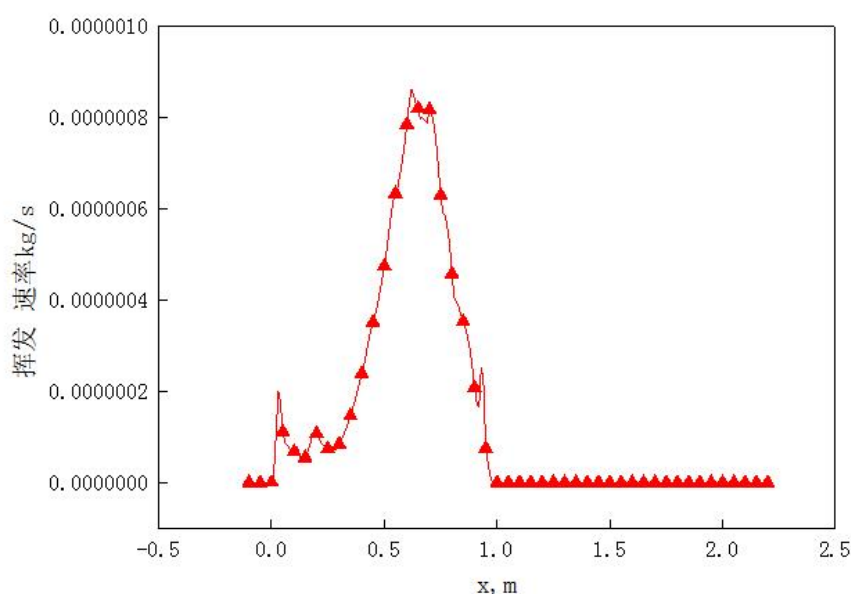


图 3.16 燃烧室中心线上煤粉挥发速率变化曲线图

图 3.15~3.16 描述的是煤粉喷入燃烧室后挥发分的变化趋势。煤粉颗粒在进入燃烧室之后，颗粒开始升温并析出挥发分，挥发分析出的速率随着 x 轴的增大而增大，在 $x=0.6\text{m}$ 处左右达到最大值，然后开始下降，在 $x=1.0\text{m}$ 处基本挥发完毕；挥发分的析出集中在较小的范围内，而且由于挥发分的燃烧过程非常迅速，可以认为一旦析出就迅速燃烧，所以挥发分的析出和燃烧都是在燃烧室前半段完成。

3.8 煤粉燃烧过程中 NO_x 的模拟

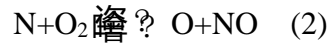
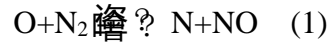
3.8.1 NO_x 的生成模型

NO_x 排放主要是 NO ，其次是 NO_2 和 N_2O 。 NO_x 会导致光化学烟雾，酸雨，破坏臭氧层。

FLUENT 中 NO_x 模型能够模拟热力型、快速型、燃料型以及由于燃烧系统里回燃导致的 NO_x 的消耗^[21]。本文主要模拟的是热力型、快速型和燃料型 NO_x 的生

成。

热力型 NO_x 的形成是由一组被称为广义的 Zeldovich 机理的高度依赖于温度的化学反应决定的^[21]。从氮分子形成的热力型 NO_x 的主要反应如下：



快速型 NO_x 形成机理是由 Fenimore 首先确定的，目前快速型 NO_x 占固定燃烧器中总的 NO_x 的比例很小，快速型 NO_x 在富燃火焰中最为普遍，其实际形成过程包括一系列复杂的反应和许多可能的中间组分，比如 CH、HCN、CN 等^[21]。

含氮的有机化合物，无论存在于液态还是固态化石燃料中，在燃烧过程中都将增加 NO_x 的形成^[21]。燃料中的氮转化为 NO_x 的程度取决于实际的燃烧特性及含氮化合物浓度，当燃料液滴或粒子液化被加热时，燃料中的含氮化合物变为气态，随着这些化合物在反应区域中的热分解，像 HCN、NH₃、N、CN 和 NH 这些二级中间氮化物就能形成和转化为 NO_x^[21]。

3.8.2 NO_x 的模拟结果

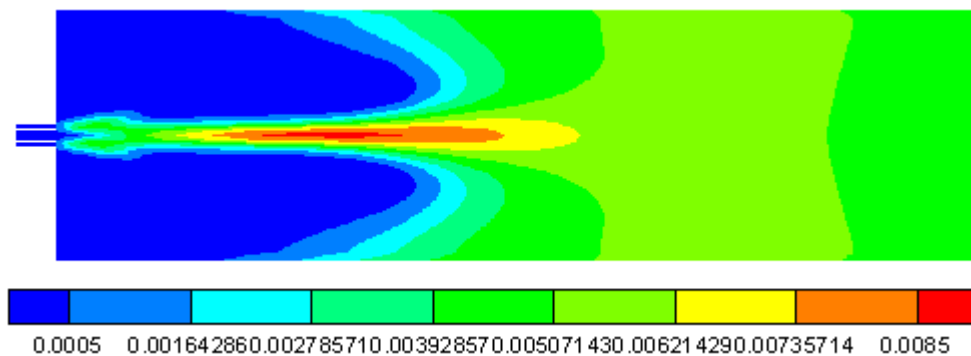
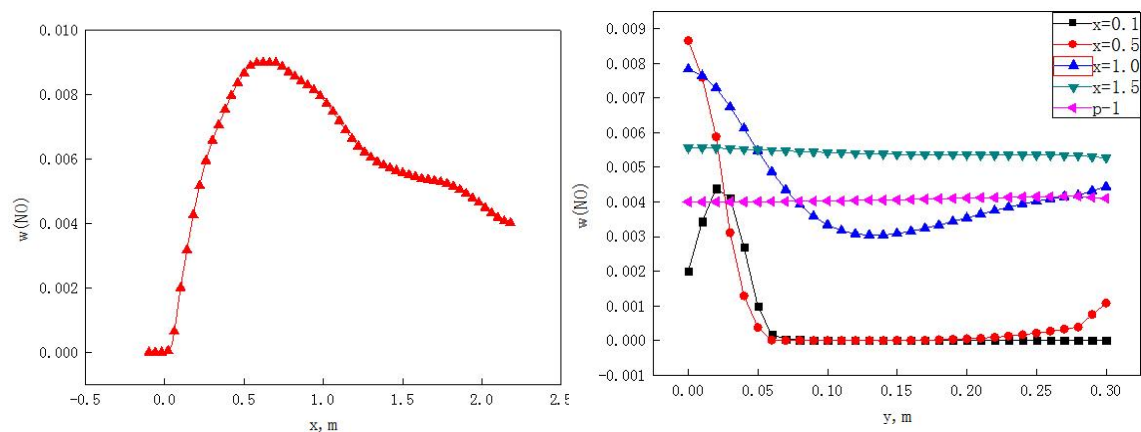


图 3.17 燃烧室中 NO 含量模拟结果图



(a)中心线上 NO 含量变化曲线图

(b)距喷煤点不同距离处 NO 含量曲线图

图 3.18 燃烧室不同处 NO 含量变化曲线图

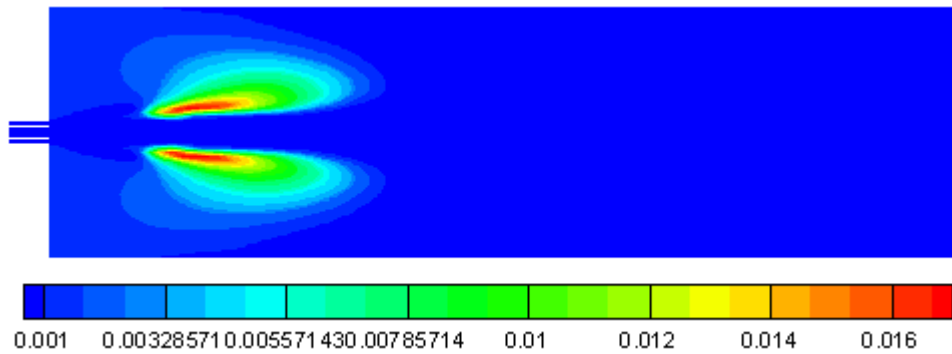


图 3.19 燃烧室中 HCN 含量模拟结果图

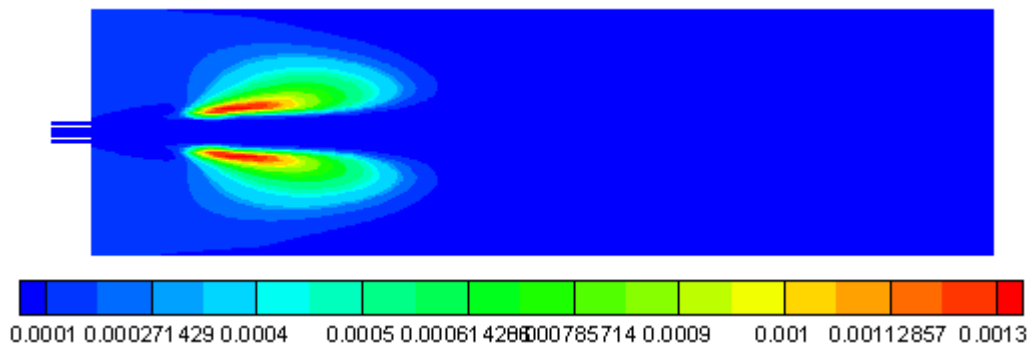
图 3.20 燃烧室中 NH₃ 含量模拟结果图

图 3.17~3.20 分别描述了燃烧室中 N 最终的生成物 NO 的含量模拟结果和 N 的中间产物 HCN 和 NH₃ 的模拟结果。从图中可以看出在中心线上 NO 的含量也是随着 x 轴的增加而增加，在 x=0.6m 处达到最大，然后随着 x 轴的增大而减小；在燃烧室的前半段，NO 的生成区域与煤粉颗粒燃烧的区域大致一致，说明 NO 含量的增加主要是由于煤粉中含氮物质燃烧产生的，而在燃烧室后半段，由于煤粉已经基本燃烧完全，故 NO 浓度没有继续上升，而是逐渐扩散并分布均匀。从 NH₃ 和 HCN 的模拟结果图中可以看出，NH₃ 和 HCN 的生成区域基本一致，可以相信它们基本上是同时生成的，而且它们的生成主要集中在煤粉燃烧区域的两侧，然后在转换为 NO。

3.9 煤粉燃烧过程中 SO_x 的模拟

3.9.1 SO_x 的生成模型

在煤粉中，硫主要存在形态分为四种，分别是单质硫、有机硫、硫化物硫和硫酸盐硫，可燃硫占煤中硫成分 90% 以上，属于不可燃硫的硫酸盐占煤中硫成分的 5%~10%^[22]。煤粉中的可燃硫主要集中在挥发分中，煤在燃烧过程中，由于温度的升高，挥发分析出并燃烧，所有的可燃硫均会燃烧而生成 SO₂。通常在一些特定条件下，一部分 SO₂ 会转化生成 SO₃。一般情况下，生成的 SO₃ 只占 SO₂ 的 0.5%~2% 左右，所以在本模拟中没有考虑 SO₃ 的生成。

可燃硫燃烧的最终产物基本上都是硫氧化物，硫化物硫在燃烧的过程中会产

生中间产物 H_2S 。硫氧化物的产生，不仅会造成大气污染，而且在燃烧过程中还可能对氮氧化物的形成产生影响，模拟煤粉燃烧过程中 SO_x 的生成，不仅有助于找到减少 SO_x 排放的方法，而且对了解它们与其他污染物的生成条件的相互关系也很重要^[23~24]。

3.9.2 SO_x 的模拟结果

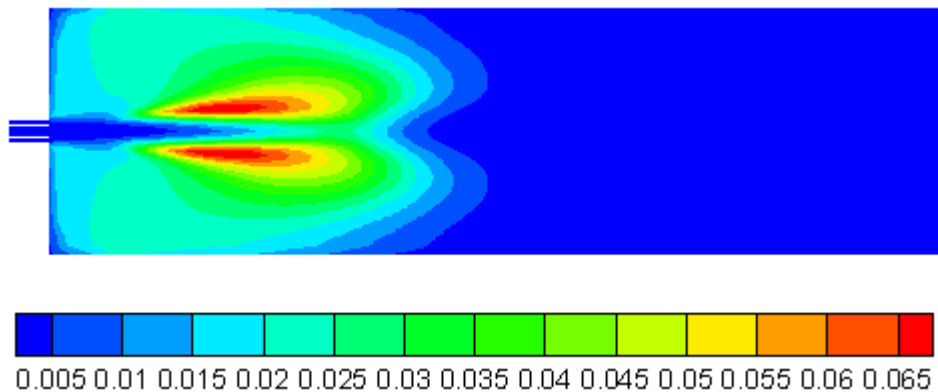
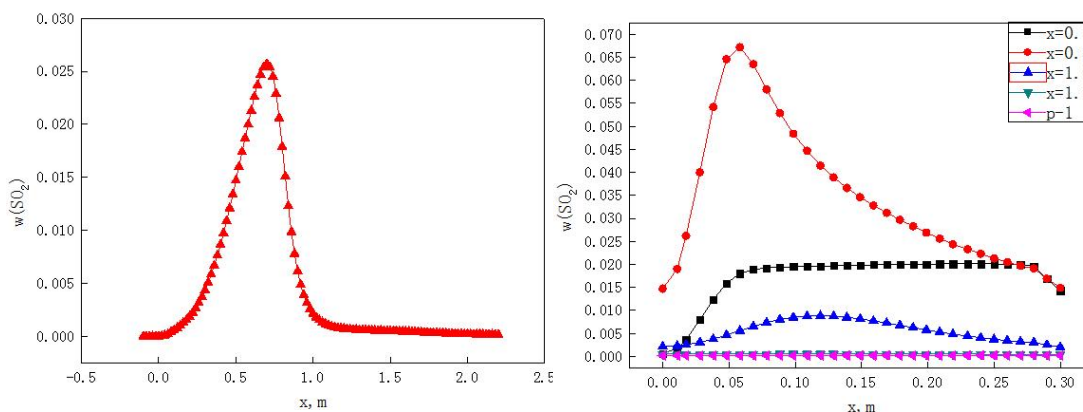


图 3.21 燃烧室中 SO_2 含量模拟结果图



(a)中心线上 SO_2 含量变化曲线图

(b)距喷煤点不同距离处 SO_2 含量曲线图

图 3.22 燃烧室不同处 SO_2 含量变化曲线图

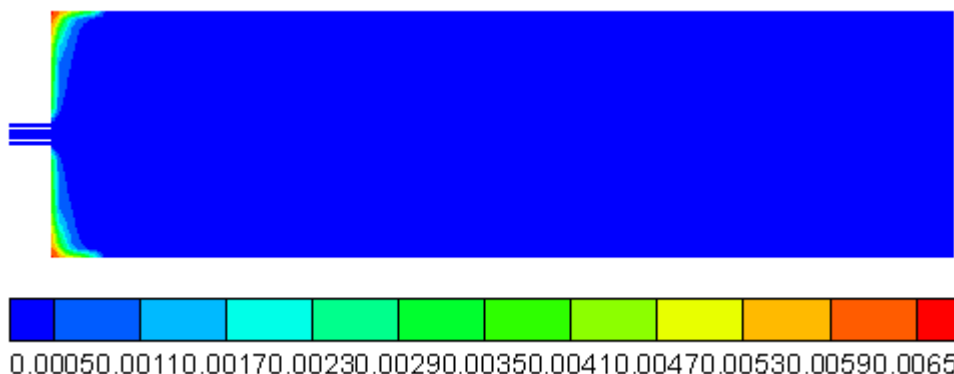


图 3.23 燃烧室中 H_2S 含量模拟结果图

图 3.21~3.23 分别描述了燃烧室中 S 最终的生成物 SO_2 的含量模拟结果和 S 燃烧中间产物 H_2S 的模拟结果。从图中可以看出中心线上 SO_2 的含量也是随着 x 轴的增大而增大，在 $x=0.6m$ 处大到最大值，然后随着 x 轴的增大开始减小。在燃

烧室的前半段，由于煤粉的燃烧， SO_2 大量生成，燃烧室中的 SO_2 含量开始升高；而在燃烧室后半段，由于煤粉中的可燃硫已经燃烧随着煤粉的燃烧转换为硫氧化物，所以燃烧室中 SO_2 含量基本不变。煤粉中硫燃烧的中间产物硫化氢气体由于具有可燃性，又易于与氧气反应生成二氧化硫和水。所以， H_2S 的生成量很少，在燃烧室的高温区域不会存在，只会在如图 3.23 所示区域才会有 H_2S 的存在。

4 结 论

本文采用数值模拟的方法，建立了二维坐标系下煤粉燃烧室中煤粉燃烧的模型。深入研究燃烧室中煤粉燃烧的动力学特性、煤粉的运动和燃烧过程、 NO_x 和 SO_x 的生成过程。

(1)从模拟结果可以看出，由于煤粉的燃烧，温度、湍动能和湍动能耗散率都变化较大， NO 、 SO_2 、 CO 、 H_2O 、 CO_2 也大量生成。

(2)煤粉的燃烧主要集中在距离喷嘴出口处 0~1.4m 的范围内，燃烧过程包括挥发分的析出和燃烧和煤粉颗粒的燃烧两个部分。其中，挥发分的析出集中在距离喷嘴出口处 0~1.0m 的范围内。

(3)在混合分数达到 0.1 左右时，燃烧室内的温度并达到利用 prePDF 模拟出来的温度，可见影响煤粉燃烧的因素不仅仅只有平均混合分数。

(4)除了煤粉中含氮物质燃烧生成 NO 外，还有一部分 NO 是由空气中的 N_2 转换生成。

5 本课题的不足和后续研究计划

本课题只是对燃烧室中煤粉的燃烧进行了二维模拟，未能进行三维条件的模拟。与二维相比，三维的模拟结果显然能更好的反应煤粉在燃烧室中的燃烧情况。由于对模拟点火过程不是很熟悉，在本课题的模拟过程中通入的空气温度为1500K，这就避免了在软件计算过程中区模拟点火来使煤粉燃烧。同时，本课题仅仅只是完成了对煤粉燃烧的模拟，并未与煤粉实际燃烧的结果去比较验证。

因此，在本课题的下一步研究计划中主要要解决三个方面的问题：

- (1)建立三维模型来模拟煤粉的燃烧；
- (2)降低喷入空气的温度，在模拟过程中模拟点火；
- (3)将模拟结果与实际燃烧结果记性对比分析。

参考文献

- [1] <http://www.ccoalnews.com>. 王显政: 实施洁净煤战略抗雾霾[DB/OL]. [2014-03-28].
<http://www.ccoalnews.com/101773/102232/240552.html>
- [2] <http://www.nea.gov.cn>. 煤炭业必须实施“洁净战略”[DB/OL]. [2014-03-31].
http://www.nea.gov.cn/2014-03/31/c_133226333.htm
- [3] 张腾飞等. 炉内煤粉燃烧一维数学模型及其仿真[A]. 热能动力工程, 2003.
- [4] 郭术义等. 高炉喷煤的数值模拟与应用[A]. 济南大学学报(自然科学版), 2003.
- [5] 郭文忠, 张卫军. 本钢 5#高炉喷煤过程的数值模拟[A]. 辽宁科技学院学报, 2008.
- [6] 张丽丽等. 高炉三维气固湍流和煤粉燃烧过程数值模拟[A]. 南京理工大学学报, 2007.
- [7] 张宏博等. 煤粉燃烧过程的数值模拟[A]. 北京航空航天大学学报, 2009.
- [8] 刘向军, 林超. 煤粉颗粒团燃烧过程的数值模拟[A]. 矿冶, 2010.
- [9] 李永华等. 800MW 锅炉混煤燃烧数值模拟[A]. 中国电机工程学报, 2002.
- [10] 顾明亮. 煤粉燃烧空气动力学特性与燃烧过程的数值模拟及其应用[D], 上海交通大学, 2008.
- [11] 丁历威, 李凤瑞. Fluent 软件模拟计算煤粉燃烧机理及其模型实现的方式[B], 浙江电力, 2010.
- [12] 张海茹等. 煤粉燃烧过程中汞反应子模型的比较研究[R], 中国工程热物理学会学术会议论文, 2012.
- [13] Liyuan Hu, Lixing Zhou, Yonghao Luo and Caisong Xu. Measurement and simulation of swirling coal combustion[J]. Particuology, 2013.
- [14] 胡璠元等. 燃料中心进入的旋流燃烧数值模拟[J]. 动力工程, 2007(01).
- [15] Yansong Shen, Aibing Yu, Peter Austin and Paul Zulli. Modelling in-furnace phenomena of pulverized coal injection in ironmaking blast furnace: Effect of coke bed porosities[J]. Minerals Engineering, 2012.
- [16] 吴光中等. FLUENT 基础入门与案例精通[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012: 4~8.
- [17] 温正. FLUENT 流体计算应用教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 5~16.
- [18] 韩占忠等. FLUENT 流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004: 5~10.
- [19] 江帆, 黄鹏. FLUENT 高级应用与实例分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 6~13.
- [20] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2008: 347~351.
- [21] 郭印诚等. 煤粉燃烧过程中 NO_x 生成的数值模拟[J], 燃料科学与技术, 1998.
- [22] 陈列绒. 型煤粘结剂和固硫剂的复配及固硫机理研究[D], 天津大学, 2003.

- [23] 赵伟. 大型循环流化床锅炉脱硫剂性能的试验研究[D], 华中科技大学, 2006.
- [24] 李芳芹. 旋流式燃烧器对冲布置的锅炉炉内 NO_x 生成机理及控制的研究[D], 同济大学, 2004.

致 谢

在论文即将结束之际，谨向半年来给予我无限关怀帮助和指导的高绪东老师表示由衷的感谢和崇高的敬意。从论文的选题、资料的收集到论文的撰写编排整个过程中，我得到了许多的热情帮助。在这学期里，高老师对我进行了悉心的指导和教育，使我能够不断地学习提高。老师渊博的学识、严谨的治学态度以及平易近人的作风使我受益匪浅、终生难忘，我相信在今后的工作和生活中，我会时刻保持勤奋刻苦的态度和求实创新的精神。

在此还要感谢这篇论文所涉及到的各位学者。本文引用了数位学者的研究文献，如果没有各位学者的研究成果的帮助和启发，我将很难完成本篇论文的写作。同时感谢王宏丹老师在 FLUENT 软件方面对我的一些教导和启发。

最后，再次衷心感谢你们一直以来对我的关心、指导、帮助和支持。