

文章编号:1672-9331(2017)02-0080-05

# 基于多孔介质模型的低质燃气燃烧排放特性数值模拟

何金桥, 赵华庚, 曾丹, 周厅, 蒋鑫

(长沙理工大学 能源与动力工程学院, 湖南 长沙 410004)

**摘要:** 为了研究多孔介质体应用于锅炉设备中的燃烧排放特性, 根据多孔介质燃烧理论, 建立了甲烷/二氧化碳(1:4)预混低质燃气在 2.8 MW 的热水锅炉中燃烧的单步反应模型。通过 Fluent 软件进行数值模拟, 对比分析了多孔介质体的材料、安装位置及孔隙率对燃烧特性的影响, 得出了燃烧温度分布以及燃烧排放物分布变化云图。研究表明, 多孔介质材料选为碳化硅、孔隙率选为 0.5、多孔介质体安装在 800 mm 处, 更有利于锅炉的燃烧。

**关键词:** 多孔介质; 低质燃气; 数值模拟; 温度分布; 氮氧化物; FLUENT 软件

**中图分类号:** TK16

**文献标识码:** A

## Numerical simulation of low-quality gas emission characteristics based on porous medium model

HE Jing-qiao, ZHAO Hua-geng, ZENG Dan, ZHOU Ting, JIANG Xin

(School of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, China)

**Abstract:** In porous media body applied to boiler equipment in order to study the combustion characteristic, based on the theory of porous media combustion, methane/Carbon dioxide premixed gas (1:4) was established in 2.8 MW hot water boiler combustion of single step reaction model, through the numerical simulation, comparison and analysis of the porous medium body materials, location, and the influence of porosity on the combustion characteristic, it is concluded that the combustion temperature distribution, combustion emissions cloud distribution change. Results show that the porous medium material is silicon carbide, choose 0.5 and porosity of porous media is installed on 800 mm, is more advantageous to the boiler combustion.

**Key words:** porous media; low quality gas; temperature distribution; Nitrogen Oxides; numerical simulation; FLUENT software

低质燃气是一类热值较低气体的简称。由于它燃烧放热量较少, 常规条件下很难对其加以利用, 因此我国能源开采和工业生产中所产生

的大量低质燃气往往直接排空, 这不仅造成了资源的浪费, 而且还污染了环境。

多孔介质燃烧技术<sup>[1]</sup>是指燃料在多孔介质的

收稿日期:2017-03-08

作者简介:何金桥(1973-),男,湖南衡阳人,长沙理工大学副教授,博士,主要从事热能工程方面的研究。

孔隙中进行燃烧,并与多孔介质固体骨架之间发生复杂热交换的燃烧过程。它具有燃烧效率高、燃烧稳定性好、贫燃极限广、污染物排放低等显著优点,这些优点可以弥补低质燃气燃烧过程中的燃烧效率低、燃烧不稳定等问题,对低质燃气的有效利用具有重要意义。

低质燃气在多孔介质中的燃烧过程极其复杂,适合采用数值模拟的方法对其进行研究。近年来,随着计算机功能日渐强大,数值模拟方法普遍应用于该领域。朱彤等<sup>[2]</sup>通过低热值煤气高温空气燃烧数值模拟,比较了不同预热温度和不同过量空气系数对低热值煤气燃烧过程的影响。杨浩林等<sup>[3]</sup>采用旋流管状火焰燃烧器内低热值燃气的燃烧,研究了不同种类低热值燃气预混气在旋流管状火焰燃烧器中的燃烧特性,比较了稀释气种类、燃气热值和组分等对可燃极限、火焰温度分布、燃烧效率及污染物排放的影响。罗渝东等<sup>[4]</sup>采用数值模拟软件,对一种低热值燃气燃烧器进行了全尺寸的三维数值模拟研究,预测了燃烧器出口的流场、温度和组分的分布情况,并考察了不同负荷和喷口形式对燃烧器性能的影响。朱茜茜等<sup>[5]</sup>采用红外热像仪,对不同当量比和进口气体速度的甲烷/空气预混气体在泡沫陶瓷多孔介质内的燃烧进行了试验研究。史俊瑞等<sup>[6]</sup>建立了二维碳化硅堆积小球的多孔介质燃烧器双温模型,对预混气体在燃烧器内的流动、传热和燃烧进行了模拟。朱建宾等<sup>[7]</sup>对天然气在双层多孔介质燃烧器中预混燃烧烟气中污染物(一氧化氮、二氧化氮、一氧化碳)体积分数进行了试验测量。程乐鸣等<sup>[8]</sup>针对低质气体燃烧过程中的稳定燃烧特性和燃烧不稳定现象开展实验室试验和数值模拟研究,并将研究结果应用于大型低热值气体处理及热量利用系统的设计及研发中。朱本奥等<sup>[9]</sup>分析了不同多孔介质燃烧器之间的联系,研究了各种实验性燃烧器的优缺点,还对多孔介质材料进行了介绍。丁建范<sup>[10]</sup>模拟了瓦斯气出口敞开和带遮热罩时燃烧室内的燃烧情况。

综上所述,前人根据低热值燃气的各个特点,研究了多孔介质燃烧的辐射热效率、燃烧能量的累积效应、火焰瞬时特性、火焰稳定性等方面的燃烧理论及模拟研究<sup>[11-12]</sup>,然而对多孔介质燃烧处

理低质燃气的具体应用研究则较少。为了更好地实现对低质燃气的有效利用,作者将多孔介质应用于燃气锅炉设备中,分析低热值燃气在不同工况下对多孔介质燃烧排放特性的影响,以期更好地利用低热值燃气。

## 1 物理模型与数学模型。

本研究对象是 2.8 MW 的热水锅炉,其燃烧室结构如图 1 所示。波纹炉膛长 3 640 mm,宽 800 mm,锅炉的喷嘴入口为 180 mm,其简化后的物理模型如图 2 所示。多孔介质厚度为 100 mm,位置分别距入口 200 mm 或者 800 mm。



图 1 2.8 MW 热水锅炉燃烧室结构图

Fig. 1 2.8 MW hot water boiler structure

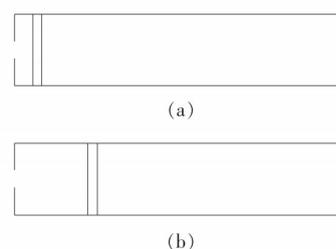


图 2 不同多孔介质位置模型简图

Fig. 2 Different position of porous media model diagram

### 1.1 控制方程

根据质量守恒、能量平衡、化学组分平衡、化学元素质量守恒定律以及理想气体定律,可得到以下控制方程<sup>[13]</sup>。

连续性方程为:

$$\nabla(\phi\rho v) = 0. \quad (1)$$

气体能量方程为:

$$\begin{aligned} \nabla g(\phi\rho v c_p T_g) + \phi \sum_{k=1}^N h_k \omega_k^g W_k + \\ \phi \sum_{K=1}^N \rho_k Y_k V_k c_{pk} \nabla T_g = \\ \nabla g(\phi\lambda_g \nabla T_g) + H_v(T_s - T_g). \end{aligned} \quad (2)$$

式中:  $g$  和  $s$  分别表示气体和固体阶段;  $V_k$  为扩散

速度;  $Y_k$  为质量分数;  $h_k$  为焓值;  $\dot{w}_k$  为净摩尔数;  $W_k$  为物种分子量;  $N$  为所涉及的物种总数;  $H_v$  为固体和气体之间的高压传热系数, 其计算公式为:

$$H_v = \frac{A\lambda_g}{d_p^2} \text{Nu}_o \quad (3)$$

对于泡沫多孔介质, 诺赛尔系数  $\text{Nu}$  可以表示为:

$$\text{Nu} = \left(0.0426 + \frac{1.236}{L/d_p}\right) \text{Re}_o \quad (4)$$

式中:  $L$  为泡沫多孔介质的长度;  $\text{Re} = \rho\phi u d_p / \mu$ 。

对于填充床, 诺赛尔数可以定义为:

$$\text{Nu} = 2 + 1.1 \text{Pr}^{1/3} \text{Re}_p^{0.6} \quad (5)$$

式中:  $\text{Pr}$  为普朗特数。

固体能量方程为:

$$\begin{aligned} \nabla(1 - \phi)\lambda_s \nabla T_s = \\ H_v(T_s - T_g) + \nabla g q_r \end{aligned} \quad (6)$$

式中:  $q_r$  为辐射热通量, 其计算公式为:

$$q_r = -\frac{16\sigma T_s^3}{3\kappa} \nabla T \quad (7)$$

式中:  $\lambda_s$  为固体导热系数;  $\sigma$  为玻尔兹曼常数;  $\kappa$  为消光系数, 它的基本值为  $\kappa = 270 \text{ m}^{-1}$ , 在多孔介质中, 消光系数与孔隙度的关系为  $\kappa = (3/d_p)(1 - \phi)$ 。

组分运输方程为:

$$\begin{aligned} \nabla(\phi\rho D_{km} \nabla Y_k) + \phi w^k W_k = \nabla(\phi\rho v Y_k), \\ k = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (8)$$

式中:  $D_{km}$  是混合物中  $k$  物种的扩散系数。

理想气体状态方程为:

$$P = \rho_g RT \quad (9)$$

进口:

$$u = u_0, T_g = T_s = T_0, Y_k = Y_{k_0}$$

出口:

$$\frac{dT_g}{dx} = 0, \frac{dT_s}{dx} = 0, \frac{dY_k}{dx} = 0$$

## 1.2 网格划分和边界条件设置

1) 网格的划分。

网格划分是 Fluent 模拟中看似简单却很重要的部分, 它会直接影响到模拟的效果和结果的准确度。该网格划分采用结构化四边形来划分, 网格间距为 10 mm, 网格总数为 2.912 万个, 计算结果能满足精度要求。图 3 是 800 mm 处时的网格划分。

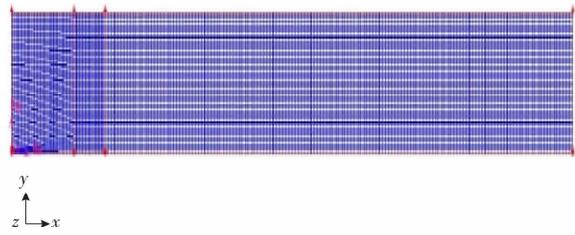


图 3 多孔介质体距入口 800 mm 时的锅炉炉膛网格划分  
Fig. 3 Porous media when the body is 800 mm from entrance of boiler furnace meshing

2) 边界条件的设置。

利用 Fluent 软件进行计算, 边界条件的设置是极为关键的一步, 能否正确设置边界条件会影响模拟的精度和结果。本研究采用预混燃烧模型, 甲烷和二氧化碳按一定比例混合而成的低质燃气从燃料入口进入炉膛, 过量空气系数为 1.28。入口边界条件采用速度进口条件, 出口边界条件采用压力出口。

## 2 数值模拟及结果

采用  $\text{SiC}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  三种不同的多孔介质材料, 200, 800 mm 两种不同的多孔介质的位置, 0.7, 0.5, 0.3 三种不同的多孔介质的孔隙率, 对温度、甲烷、氧气、氮氧化物、二氧化碳的分布进行对比分析。计算结果判断收敛条件为: 能量方程的残差小于  $10^{-6}$ , 其他方程残差小于  $10^{-4}$ 。计算误差范围均小于 10% 的工程中容许的误差范围。

### 2.1 不同多孔介质材料的影响

由图 4 对比分析可知, 在甲烷浓度分布中, 材料是  $\text{SiC}$  时的浓度集中在多孔介质区域, 材料是  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{Si}_3\text{N}_4$  时的浓度分布相对没有较大差别; 氧气浓度分布与二氧化碳浓度分布则刚好相反, 氧气浓度高的地方二氧化碳浓度低; 而  $\text{SiC}$  材料时的燃烧反应基本在多孔介质与炉膛前部,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  时的二氧化碳浓度在炉膛尾部, 比材料是  $\text{Si}_3\text{N}_4$  时的分布均匀一些, 且梯度变化小。锅炉污染物的排放特性是评价锅炉优劣的另一重要因素。由于氮氧化物的燃烧机理相当复杂, 通过数值计算进行模拟存在较大的偏差, 甲烷相对于煤、石油等一次性能源是清洁能源, 产生的污染物较少。

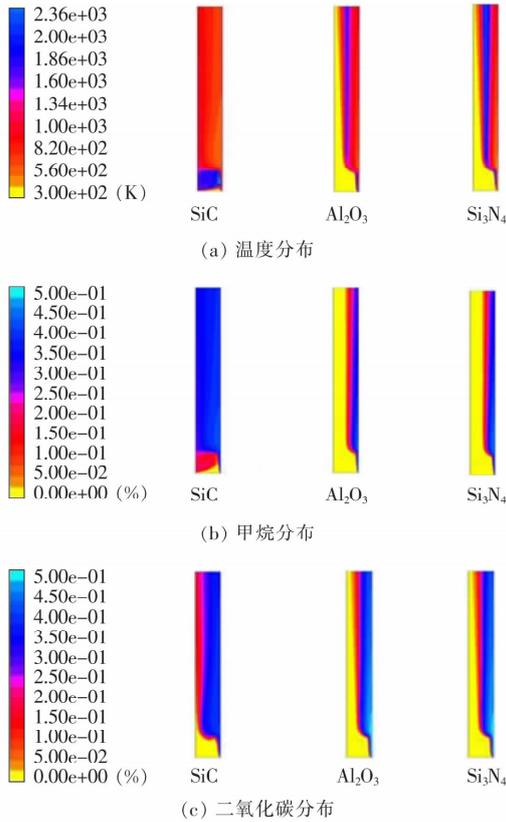


图 4 燃烧排放分布模拟结果(孔隙率:0.7 ; 多孔介质的位置:200 mm)

Fig. 4 Combustion emission distribution simulation (Porosity:0.7; The location of the porous medium:200 mm)

### 2.2 多孔介质的位置及孔隙率的影响

由图 5,6 对比分析可知,多孔介质在 200 mm 处时燃烧扩散速度快,在多孔介质区域就基本已达到炉膛大面积的燃烧;而在 800 mm 的位置则燃烧峰值推迟,也是在多孔介质区域前达到最高温度。

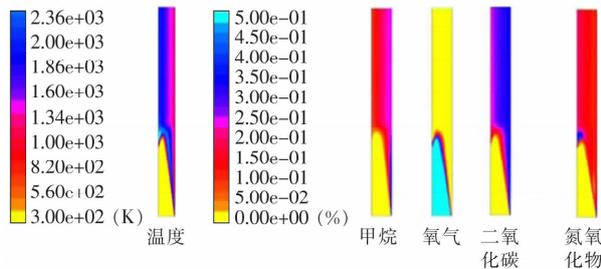


图 5 燃烧排放分布模拟结果(孔隙率:0.5 ; 材料:SiC; 多孔介质的位置:800 mm)

Fig. 5 Combustion emission distribution simulation (Porosity:0.5; Material: SiC; The location of the porous medium:800 mm)

由图 1,6,7 对比分析还可知,温度梯度随孔隙率的增大而增加。也就是说,高孔隙率的多孔介质内燃烧时,热量扩散快,温度变化快。这是因为具有高孔隙率的燃烧器具有高磁导率和低粘滞阻力,这有利于燃气的混合流动并留下更多的空间和时间来进行燃烧。但它也会打破火焰传播速度和混合速度之间的平衡,导致回火或熄火。高孔隙度也意味着小的热传导和辐射,这将削弱混合物预热,影响火焰稳定。尽管孔隙率低会导致很高的热辐射和热传导,但大的比表面积使燃烧区域与固体壁分子碰撞的可能性更高,从而导致淬灭现象。因此,应谨慎选择多孔介质燃烧器的适当参数。

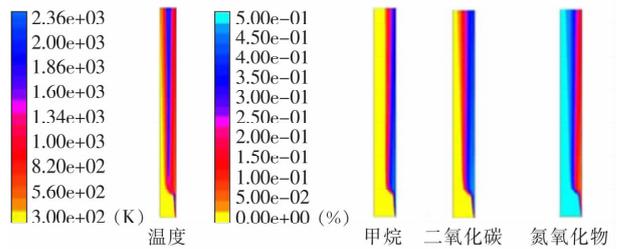


图 6 燃烧排放分布模拟结果(孔隙率:0.5 ; 材料:SiC; 多孔介质的位置:200 mm)

Fig. 6 Combustion emission distribution simulation (Porosity:0.5; Material: SiC; The location of the porous medium:200 mm)

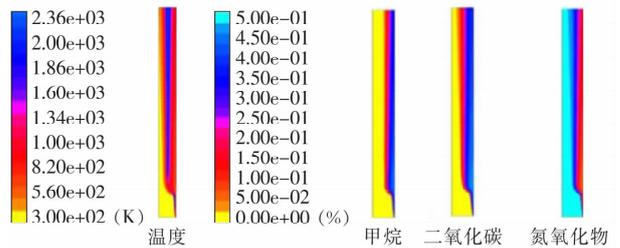


图 7 燃烧排放分布模拟结果(孔隙率:0.3 ; 材料:SiC; 多孔介质的位置:200 mm)

Fig. 7 Combustion emission distribution simulation (Porosity:0.3; Material: SiC; The location of the porous medium:200 mm)

### 3 结论

综合数值仿真结果,可得出如下结论。

- 1) 当多孔介质材料具有低定压比热容和高导热率时,燃烧会加剧。在此基础上,碳化硅是一种

理想的多孔介质材料。

2) 多孔介质位置的不同,会导致入口速度的不同。入口流速越高,壁温、温度梯度越高,会导致更高的压力下降和更大的火焰核心。

3) 孔隙率等参数对燃烧过程有影响,过大或过小的气孔都会削弱燃烧。

由此可见,多孔介质材料选为碳化硅、孔隙率选为 0.5、多孔介质安装在 800 mm 处,更适合锅炉燃烧。

### 〔参考文献〕

- [1] 秦朝葵,郑璐.多孔介质燃烧技术现状[J].城市燃气,2015,485(7):7-11.  
QIN Zhao-kui,ZHENG Lu.The present situation of porous media combustion technology[J].Journal of Urban Gas,2015,485(7):7-11.
- [2] 朱丹,张毅勋.低热值煤气高温空气燃烧数值模拟[J].同济大学学报,2013,28(8):163-168.  
ZHU Dan,ZHANG Yi-xun.Low calorific value gas high temperature air combustion numerical simulation[J].Journal of Tongji University,2013,28(8):163-168.
- [3] 杨浩林.旋流管状火焰燃烧器内低热值燃气的燃烧研究[J].燃烧科学与技术,2013,19(2):109-114.  
YANG Hao-lin.Vortex tube in low heat value gas burner flame combustion research [J].Journal of Combustion Science and Technology,2013,19(2):109-114.
- [4] 罗渝东.低热值煤层气燃烧器燃烧器的数值模拟与实验研究[D].重庆:重庆大学,2006:3-6.  
LUO Yu-dong.Low calorific value of coalbed gas burner burner numerical simulation and experimental research [D].Chongqing:Chongqing University,2006:3-6.
- [5] 朱茜茜,程乐鸣.预混气体在泡沫陶瓷多孔介质燃烧温度分布与火焰面移动特性[J].中国电机工程学报,2012,32(17):63-69.  
ZHU Xi-xi,CHENG Le-ming.Temperature distribution and combustion wave propagation characteristics of premixed gas combustion in ceramic foams [J].Proceedings of the Csee,2012,32(17):63-69.
- [6] 史俊瑞,李本文.预混气体在多孔介质中燃烧火焰面倾斜的演变[J].东北大学学报:自然科学版,2013,24(2):252-270.  
SHI Jun-rui,LI Ben-wen.Evolution of flame inclination of filtration combustion in porous media [J].Journal of Northeastern University:Natural Science,2013,24(2):252-270.
- [7] 朱建宾,崔永章.天然气多孔介质预混燃烧污染物排放实验研究[J].煤气与热力,2013,33(10):22-25.  
ZHU Jian-bin,CUI Yong-zhuang.Porous media premixed gas combustion pollutants discharge experiment[J].The Gas and Heat,2013,33(10):22-25.
- [8] 程乐鸣,张俊春,骆仲泱.多孔介质燃烧处理低热值气体及燃烧不稳定性研究[D].杭州:浙江大学,2014.  
CHENG Le-ming,ZHANG Jun-chun,LUO Zhong-yang.Porous media combustion for low calorific gases and combustion instabilities[D].Hangzhou: Zhejiang University,2014.
- [9] 朱本奥,匡勇.多孔介质燃烧器研究[J].应用能源技术,2015(2):30-33.  
ZHU Ben-ou,KUANG Yong.Porous media burner study[J].Applied Energy Technology,2015(2):30-33.
- [10] 丁建范,李意民,汤明镝.多孔介质不同出口形状下瓦斯燃烧特性研究[J].煤矿机械,2015,36(6):90-92.  
DING Jian-fan,LI Yi-min,SHANG Ming-di.Porous medium under different shape of export gas combustion characteristic research [J].Coal Mine Machinery,2015,36(6):90-92.
- [11] Mujeebu M A,Abdullah M Z,Abubaka R M Z,et al.Combustion in porous media and its applications-a comprehensive survey [J].Journal of Environmental Management,2009,90(3):2287-2312.
- [12] Mujeebu M A,Abdullah M Z,Mohamad A A,et al.Trends in modeling of porous media[J].Progress in Energy and Combustion Science,2010,36(6):627-650.
- [13] M Bidi,M R H Nobari,M Saffar Avval.A numerical evaluation of combustion in porous media by EGM (entropy generation minimization)[J].Energy,2010(35):3483-3500.