文章编号: 1001 - 2060(2016) 02 - 0074 - 06

关于过滤燃烧非平衡性和火焰结构特性的研究

谷聪伟 史俊瑞 李 智 夏永放

(沈阳工程学院 辽宁省洁净燃烧发电与供热技术重点实验室 辽宁 沈阳 110136)

摘 要: 为研究预混气体在小球填充床中的过滤燃烧特性和火焰结构 建立了简化的二维多孔介质结构模型 考虑燃烧过程中存在气固对流换热及多孔介质固体辐射换热的影响 在获取了填充床中的火焰传播速度和温度分布特点后。采用化学反应速度表征孔隙间的火焰结构特性和传播速度 并通过实验加以验证 结果表明 过滤燃烧系统的反应区域存在着明显的非平衡性。在化学反应区域,气固温差非常大。同一小球内部的温度分布也不均衡。流速和当量比对火焰面结构的影响很大。随流速的增大 火焰锋面变得弯曲 抛物线形状变得非常明显。随当量比的增大 火焰面变得平整。

关 键 词: 过滤燃烧; 火焰锋面; 多孔介质; 火焰传播; 非 平衡

中图分类号: TK411.1 文献标识码: A DOI: 10. 16146/j. enki. rndlge. 2016. 02. 012

引言

随着我国经济的快速发展,能源和环境问题日益成为人们关注的焦点。特别是近几年,全国大部分地区特别是东北、华北、华东地区的雾霾加重,其中燃煤造成的污染尤其引人注目。这迫切要求人们加大对污染较少的气体燃料的应用推广。多孔介质燃烧是能够实现稳定燃烧的、新型的、主动有效的技术,NO_x和 CO 等污染物的排放低,对低热值气体燃烧有显著的优势,集环保、节能和减排于一体。目前多孔介质燃烧技术主要应用范围包括采暖、低热值气体利用、工业有机废气处理等各个方面[1-9]。

多孔介质燃烧技术主要有单向流动和往复式流动两种技术。但是,不论是单向流动还是往复式流动 都要涉及火焰面特性和火焰传播速度的问题。文献[10]实验研究了氧化铝小球填充床内的燃烧特性,对火焰面特性分析得到在当量比为 0.27 时火焰的传播速度为 0.2 mm/s。

文献 [11] 研究了富氧和缺氧条件下丙烷 - 空气过滤燃烧的火焰特性 表明随当量比的增大 ,火焰

传播速度变小至反向,但燃烧波传播速度数量级始终在 0.1 mm/s 内。文献 [12] 用单温模型对预混气体进行数值模拟,分析了燃烧器内的温度分布和组分分布。文献 [13] 对硫化氢 - 空气预混气体在多孔介质贫燃和富燃时的火焰面移动进行研究,当量比小于 0.45 或者大于 1.7 时,火焰面向下游移动,且最大速度为 0.07 mm/s。文献 [14]通过实验研究和数值模拟对火焰面的特性进行研究,结果表明火焰面移动速度与当量比、混合气体入口速度、多孔介质的材料特性等因素有关,固体基质热容对燃烧波的传播速度影响较大;并且采用容积平均法,进行火焰面传播和演变的数值研究,成功捕捉相关的实验特性 [15]。

在燃烧波特性的数值研究中 学者大多数采用 基于体积平均方法的宏观模型,在体积平均的过程 中,大量中尺度以下的信息被过滤,微孔内的流动、 传热传质和燃烧等过程无法得到描述[13-14]。宏观 模型没有反映出填充床的形状特性,实际上填充床 结构参数对流动、传热、辐射和燃烧都有极大的影 响。文献[16-17]建立了二维多孔介质物理模型, 多孔小球顺列布置 小球之间留有空隙 数值研究了 预混气体在孔隙中的燃烧。为模拟点火过程,文献 假设整个燃烧器均匀预热到1300℃。结果表明, 火焰传播速度的数量级为 0.1 mm/s 成功捕捉到了 低速过滤燃烧特性。文献[18]对孔隙内的预混气 体燃烧开展了开拓性的工作,给出了多孔介质的简 化结构 计算了孔隙尺度下的燃烧波特性。但限于 当时的计算资源 模型做了很多的简化。如: 将多孔 小球的结构简化为方形 因此与实际的小球填充床 有很大的差距: 模型没有考虑小球的辐射等。

在实际的燃烧器中,不可能在整个燃烧器上是完全均匀预热的,这与实验有很大的区别,并且可能会影响计算结果。本研究借鉴文献[16]的多孔介质模型,用 FLUENT 软件对甲烷 - 空气预混气体的

收稿日期: 2014 - 12 - 23; 修订日期: 2015 - 04 - 07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51406123,51476105)

作者简介: 谷聪伟(1990-) ,女 ,河北石家庄人 ,沈阳工程学院硕士研究生.

燃烧进行了数值模拟 与实验的预热保持一致 假设预热是局部的固体高温区 研究火焰面在简化的多孔结构中的传播特性以及演变过程 分析过滤燃烧的非平衡特性 与相关文献的比对验证模拟结果的可靠性 并定量给出不同当量比、不同入口速度对火焰传播的影响。

1 物理模型

本模型选用直径 90 mm,长度 440 mm 的多孔介质燃烧器,假设燃烧器内的小球分布为轴对称结构。如图 1 所示,对燃烧器进行截面切割,可得到图 2 所示的二维平面图,图中圆形即是氧化铝小球。小球直径为 6 mm。模型分为 2 个区域:流体区和固体区。整个计算区域采用结构网格划分,由于气固之间强烈的对流换热,因此在固体外表面采用了尺寸较小的网格,共生成 253 633 个网格。

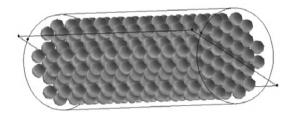


图 1 内部堆积小球的多孔介质燃烧器 Fig. 1 Porous media burner packed with Alumina (Al₂O₃) sphares

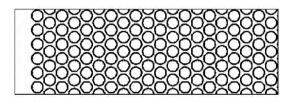


图 2 燃烧器剖面模型

Fig. 2 Cross section of porous medium burner

2 数值模拟方法

为使问题简化 引入以下假设:

- (1) 气体流动为层流且混合气体为不可压缩的 理想气体;
- (2) 燃烧室壁面为绝热,且气体在燃烧器壁面上的速度无相对滑移。
 - (3) 甲烷燃烧简化为单步总包反应。

2.1 控制方程

连续性方程

$$\frac{\partial(\rho_{\rm g})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_{\rm g} v) = 0 \tag{1}$$

式中: $\rho_{\rm g}$ 一气体密度 $k{\rm g/m}^3$; v 一气体速度矢量 m/s; t 一时间 s 。

轴向动量方程

$$\frac{\partial(\rho_{g}v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_{g}vu) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nabla(\mu \nabla u) \qquad (2)$$

式中: p 一静压 ,Pa; x 一轴向坐标。 μ 一运动粘度 , m^2/s ; u 一轴向速度 ,m/s。

径向动量方程

$$\frac{\partial (\rho_{g}v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_{g}v\nu) = -\frac{\partial p}{\partial v} + \nabla (\mu \nabla \nu) \quad (3)$$

式中: γ — 径向坐标。 ν — 径向速度 μ /s。

固体能量方程

$$\frac{\partial (\rho_{s}c_{s}T_{s})}{\partial t} + \nabla \cdot (\lambda_{s} \nabla T_{s}) = 0$$
 (4)

式中: $\rho_s \setminus \lambda_s \setminus T_s$ 一多孔介质材料密度 ,kg/m³、热导率 ,W/(m • K)、固体温度 ,K。

气体能量方程

$$\frac{\partial (\rho_{g} c_{g} T_{g})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_{g} c_{g} \nabla T_{g}) = \nabla \cdot (\lambda_{g} \nabla T_{g}) -$$

$$\sum_{i} W_{i} h_{i} \omega_{i} \tag{5}$$

式中: $T_g \ c_g \ \lambda_g$ 一混合气体的温度 ,K、比热容 ,J/ (kg • K) 和导热系数 ,W/(m • K) ; h_i , W_i 和 ω_i 一混合气体第 i 种气体的显焓 ,J/kg、分子量和化学反应速度 ,Kmol/(m³ • s) 。

气体组分方程:

 $\nabla \cdot (\rho_{\rm g} v Y_i) - \nabla \cdot (\rho_{\rm g} D \nabla Y_i) + \omega_i W_i = 0 \quad (6)$ 式中: Y_i 一组分 i 的质量分数; D 一组分扩散系数, m^2/s 。

$$p = \rho_{x} R T_{x} \tag{7}$$

式中: R—气体常数 8.314 kJ/(Kmol·K)。

2.2 边界条件

设置氧化铝小球为固体边界条件。燃烧器入口设置为速度入口,气体入口温度设为常温。

入口边界:

 $T_{
m g}=300~{
m K}~\mu_{
m g}=u_{
m g,in}~p=0$, $Y_{
m CH_4}=Y_{
m CH_4,in}$, $Y_{
m O_2}=Y_{
m O_2,in}$ 出口边界设置为充分发展边界条件。

出口边界:

$$\frac{\partial T_{\rm g}}{\partial x} = \frac{\partial T_{\rm s}}{\partial x} = \frac{\partial y_{\rm CH_4}}{\partial x} = \frac{\partial y_{\rm O_2}}{\partial x} = 0$$

$$\lambda_{\rm s} \frac{\partial T_{\rm s}}{\partial x} = - \varepsilon_{\rm r} \sigma (T_{\rm s, out}^4 - T_0^4)$$

式中: $\lambda_s \setminus T_s \setminus \varepsilon$ 一多孔介质导热系数 $\mathcal{N}/(\mathbf{m} \cdot \mathbf{K}) \setminus \mathbf{b}$ 体温度、发射率; $T_s \rightarrow \mathbf{m}$ 一出口边界温度 $\mathcal{N}/(\mathbf{m} \cdot \mathbf{K})$; σ 一固体辐射常数。

2.3 初始条件及求解

为激活化学反应,在燃烧器的入口设置一定长度的高温区域。燃烧器入口的前6排固体温度为1700 K,从第7排到第12排时每排递减200 K(图4的0s时刻温度分布)。由于直接画出了多孔介质结构,因此气体和固体之间的对流换热不再采用经验公式计算。考虑固体的辐射,多孔介质温度通过求解固体能量方程得到。压力和速度的耦合采用SIMPLE 算法。模型的固体物性取1300 K下时的氧化铝参数[17],气体物性参数随温度变化。

3 模拟结果分析

3.1 数值模型的验证

为验证数值模型的有效性,取与实验相同的诸种工况^[10],比较二者的燃烧波波速。图 3 为流速0.23、0.43、0.63 和 0.83 m/s 时数值预测的燃烧波波速和实验值的比较。由图 3 可以看出,在流速为0.23 和 0.43 m/s 时,数值预测值与实验值的误差很小,二者吻合的很好,二者的燃烧波的速度数量级均在 0.1 mm/s。随入口流速的增加,燃烧波传播速度显著增大,说明气体速度对燃烧波的传播速度有很大的影响。综上所述,模型很好地预测了燃烧波特性。

3.2 火焰面形状的演变分析

图 4 所示的是当量比为 0.15 ,入口速度为 0.63 m/s 时甲烷 - 空气预混气体在多孔介质燃烧器内燃

烧波传播过程温度变化图。由图可知 D s 为初始时 刻 固体温度设定为预热温度 固体温度分布非常规 整,气体温度为初始温度300 K。在5 s 时刻,在预 热区域的下游 有 5 排多孔介质的孔隙内 ,气体温度 明显升高 而对应的 5 排多孔介质的温度几乎不变。 而在燃烧器入口处,第1和第2排多孔介质的温度 略有降低 这主要是由于来流的冷空气与固体进行 了对流换热 ,气体得到预热 ,而固体温度降低 ,这也 是过滤燃烧的一个显著特性。而到 50 s 的时候 ,高 温区域相对变窄。这主要是由于该工况下,当量比 非常小,反应放热小,化学反应在一个相对小的区域 内完成。尽管当量比较小 随着反应的进行 燃烧波 前后区域的高温区域不断变宽。这是由于小球的蓄 热作用 将反应放出的热量蓄积在小球填充床中。 这也是过滤燃烧区别于自由空间燃烧的重要特征之 一,也是发生超绝热燃烧的基础。随着时间的推移, 火焰面逐渐演变为抛物线型火焰 ,且弧度越来越大。

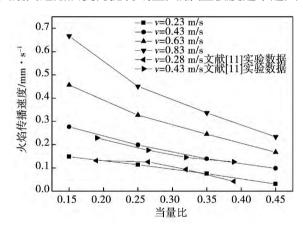


图 3 流速对火焰传播速度的影响 Fig. 3 Effect of inlet velocities on combustion wave propagation velocity

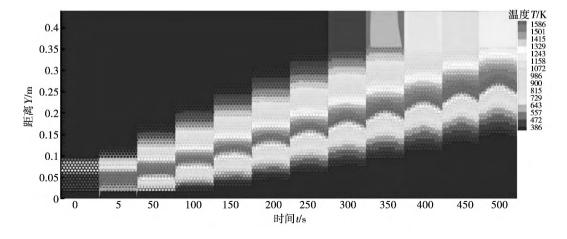


图 4 不同时刻燃烧器内温度分布云图

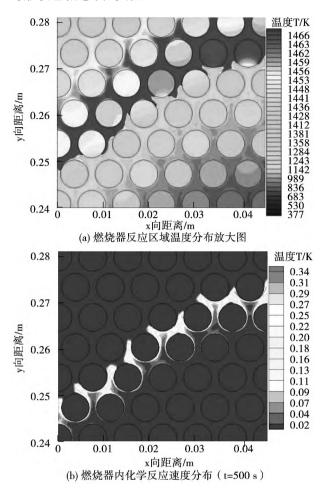
Fig. 4 Temperature evolution in porous medium burner at different times

图 5 是上图的燃烧器内反应区域的温度和化学 反应速度局部放大图(t = 500 s)。 从图 5(a) 可以看 出 在高温区域 ,气固温差很大 ,气体温度明显高于 固体温度 气体高温区域的宽度大约是 1.5 倍小球 直径:同时,同一小球内部温度分布也是不均匀的, 热的非平衡表现的很明显。在使用体积平均法预测 燃烧器内的温度分布时,假设当地的气固温度处于 热平衡状态,而本文在给出具体的多孔介质结构时, 预测的气固温差非常大 如图 5(b) 所示是数值预测 的化学反应速度。其在孔隙中的分布也是不均匀 的。最大化学反应速度出现在了小球表面。

3.3 流速对火焰面结构的影响

图 6 是 t = 300 s,当量比为 0.25 时,流速为 0.23、0.43、0.63 和 0.83 m/s 的温度分布图。由图 可见 流速对火焰面结构的影响很大 流速越低的火 焰面越平整。入口速度越大时,火焰面上游的近似 于抛物线的火焰锋面就越明显。火焰面附近的最高 温度也相应的提高,径向方向的温度梯度也越小。 这主要是因为入口速度提高,气固间对流换热强度 相应的提高了 更多的热量送入多孔介质燃烧器内。 根据图 6 可以观察到 随着入口速度的增加 火焰面 前沿最高温度呈抛物线分布也越明显。这是由于本 研究采用的是二维模型 火焰面是二维分布的 滪混 气体进入多孔介质燃烧器后速度分布呈抛物线状, 边壁处的气体流动较慢 ,而中间处气体流动速度较 快 化学反应需要的燃料就越多 燃烧反应也就越剧

烈 局部区域火焰面的温度也就越高。这种抛物线 的形状也就愈发的明显。



燃烧器内化学反应速度分布(t = 500 s)

Fig. 5 Enlarged temperature distribution of reaction zone in combustor(t = 500 s)

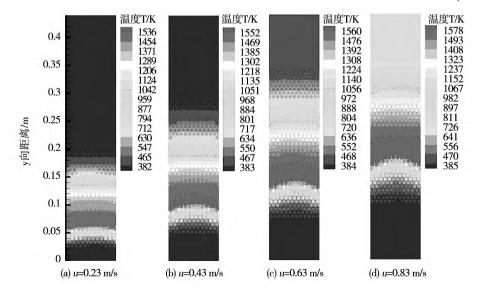


图 6 入口速度不同时多孔介质燃烧器温度分布图(φ =0.25,t=300 s)

Fig. 6 Temperature contours in combustor at different gas velocities ($\phi = 0.25$ t = 300 s)

3.4 当量比对火焰面结构的影响

图 7 为 4 种当量比 0.15、0.25、0.35 和 0.45 在 200 s 时多孔介质燃烧器温度分布图。从图中可以 看出 ,火焰面的形状还受当量比的影响。在相同的

入口速度条件下,当量比越高,火焰面越平整,火焰面的弯曲程度越小,抛物线形状越来越不明显。这是因为随着当量比的增大,燃烧放出的热量增大,高温区域相应的增大,因此火焰面显得平整。

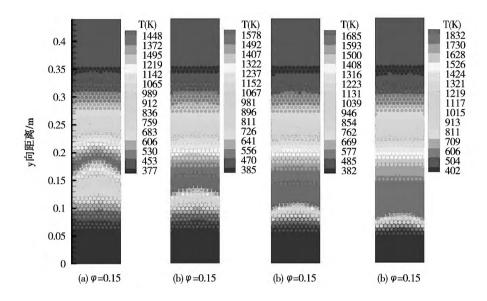


图 7 当量比不同时多孔介质燃烧器温度分布图(u = 0.83 m/s, t = 200 s)

Fig. 7 Temperature contours at different equivalence ratios (u = 0.83 m/s t = 200 s)

4 结 论

- (1) 过滤燃烧系统存在着明显的非平衡性:在燃烧区域气固温差大,同一小球内部也存在着温度差异; 化学反应速度在孔隙中的分布非常不均匀。
- (2) 随着时间推移 ,火焰面变得弯曲且弧度越来越大。
- (3) 气体入口速度和当量比对火焰前沿结构有很大的影响。随当量比的增大 ,火焰面变得规整; 随流速增大 ,火焰前沿弯曲程度变大 ,火焰面呈抛物线状越明显。

参考文献:

- [1] 褚金华 程乐鸣 施正伦 等. 渐变型多孔介质燃气装置的实验研究[J]. 燃烧科学技术 2009, 15(2):83-94.

 CHU Jin-hua , CHENG Le-ming , SHI Zheng-lun , et al. Experimental research on a porous media gas-fired boiler [J]. Journal of Com-
- [2] Mujeebu M A 'Abdullah M Z 'Mohamad A A 'et al. Trends in modeling of porous media [J]. Progress in Energy and Combustion Sci-

bustion Science and Technology 2009 ,15(2):83 -94.

ence 2010 36(6):627-650.

- [3] Mujeebu M A ,Abdullah M Z ,Bakar M Z ,et al. Applications of porous media combustion technology—A review [J]. Applied Energy 2009 86(9):1365-1375.
- [4] Djordjevic N ,Habisreuther P Zaralis N A. Numerical investigation of the flame stability in porous burners employing various ceramic sponge-like structures [J]. Chemical Engineering Science 2011 66 (4):682-688.
- [5] Shi J R Xie M Z Liu H et al. Two-dimensional numerical study of combustion and heat transfer in porous media combustor-heater [J]. Proceedings of the Combustion Institute 2011 33 (2): 3309 -3316.
- [6] 郑成航 程乐鸣 李 涛 等. 多孔介质内低热值气体燃烧及传热的数值模拟[J]. 浙江大学学报: 工学版 2010 A4(8):1567-1572.
 - ZHENG Cheng-hang, CHENG Le-ming, LI Tao, et al. Numerical simulation of low calorific gas combustion and heat transfer in porous media [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science 2010 44(8):1567-1572.
- [7] 朱茜茜 程乐鸣 郑成航 等. 预混气体在泡沫陶瓷多孔介质燃烧温度分布于火焰面动特性[J]. 中国电机工程学报 2012 32 (7):63-69.
 - ZHU Xi-xi , CHENG Le-ming ZHENG Cheng-hang ,et al. Temperature distribution and combustion wave propagation characteristics

- of premixed gas combustion in ceramic foams [J]. Proceedings of the CSEE 2012 32(17):63-69.
- [8] Liu H ,Dong S ,Li B W ,et al. Parametric investigations of premixed methane-air combustion in two-section porous media by numerical simulation [J]. Fuel 2010 89(7):1736-1742.
- [9] 刘宏升 涨金艳,谢茂昭. 多孔介质内预混混合燃烧的二维数值模拟[J]. 哈尔滨工程大学学报 2014 35(7):814-819.

 LIU Hong-sheng ZHANG Jin-yan XIE Mao-zhao. Two-dimensional numerical simulation of the combustion of the premixed gas in a porous medium [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2014 35(7):814-819.
- [10] Zhdanok S A ,Kennedy L A ,Koester G ,Superadiabatic combustion of methane air mixtures under filtration in a packed bed [J].
 Combustion and Flame ,1995 ,100(1/2): 221 231.
- [11] Kennedy L A Saveliev A V ,Bingue J P ,et al. Filtration combustion of a methane wave in air for oxygen-enriched and oxygen-depleted environments [J]. Proceedings of the Combustion Institute , 2002(29):835-841.
- [12] Bubnovich V I Zhdanok S A Dobrego K V et al. Analytical study of the combustion waves propagation under filtration of methaneair mixture in a packed bed [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2006 49(15): 2578 - 2586.
- [13] Bingue J P , Saveliev A V , Fridman A A ,et al. Hydrogen sulfide filtration combustion: comparison of theory and experiment [J]. Experimental Thermal and Fluid Science ,2002 ,26 (2): 409

-415.

- [14] 史俊瑞. 多孔介质中预混气体超绝热燃烧机理及其火焰特性的研究[D]. 大连: 大连理工大学 2007.
 - SHI Jun-rui. Combustion mechanism and flame characteristics of the superadiabatic combustion of premixed gases in porous media [D]. Dalian: Dalian University of Technology 2007.
- [15] Jun-Rui Shi Mao-Zhao Xie Zhi-Jia Xue et al. Experimental and numerical studies on inclined flame evolution in packing bed [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer 2012 55:7063 -7071.
- [16] 郑成航 程乐鸣 李 涛 ,等. 多孔介质燃烧火焰面特性数值模拟[J]. 中国电机工程学报 2009 29(5):48-53.

 ZHENG Cheng-hang ,CHENG Le-ming ,LI Tao ,et al. Numerical simulation of combustion fronts in porous media [J]. Proceedings of the CSEE 2009 29(5):48-53.
- [17] 张金艳. 预混气体在堆积床内燃烧的数值研究[D]. 大连: 大连理工大学 2013.

 ZHANG Jin-yan. Numerical investigation of the premixed gases combustion in packed bed [D]. Dalian: Dalian University of Technology 2013.
- [18] M. SAHRAOUI ,M. KAVIANY. Direct simulation vs volume-averaged treatment of adiabatic ,premixed flame in a porous medium
 [J]. Heat Mass Tranfer ,1994 37(18): 2817 2834.

(姜雪梅 编辑)

╬╬╬╬╬╬╬╬╬╬ ╬新技术、新工艺┆ ╬╬╬╬

Capstone 微型涡轮机的定单

据《Gas Turbine World》2015 年 5 - 6 月刊报道 "Capstone 涡轮机公司已接受了 25 台 C65 微型涡轮机的 定单 用来满足连续不断扩大的跨越美国西部的页岩油气开发作业的需求。

以天然气作为燃料的 C65 微型涡轮机的安装方式有两种,它们允许用户不依赖电网或以负载分配容量的方式和电网一起运行。在投入运行以后,这些微型涡轮机系统将减少关键的美国页岩油气作业的运行成本,并确保把可靠的电力交付到每个现场。

在这 25 台定单后面是用于纽约州纽约市能量效率项目的 2 台 C1000 微型涡轮定单。1 台将被安装在纽约大学的研究性实习工厂 "而另一台将代替在布朗克斯的 River Park Towers 居民集合体处现有的发电机。这些项目将在 2016 年投入运行。

这 2 台以天然气作为燃料的 C1000 微型涡轮机将以 CHP(热电联产) 应用的方式被安装,以便把电力和热水提供到需用场所。

(吉桂明 摘译)

fluidized bed boiler (CFBB) combustion system. A PID design method was first proposed based on model predictive control method and then a decentralized PID controller was designed after RGA analysis. Compared to centralized PID controller the decentralized controller is inferior in decoupling and robustness performance. To overcome the difficulty in implementation and tuning of centralized controller partially decentralized controllers were designed. Two partially decentralized control structures were determined based on Gramian method and the corresponding performance and robustness were compared with both centralized and decentralized controllers. Simulation results show that partially decentralized controllers are superior to the decentralized one and also can achieve comparable performance as the centralized one. Furthermore that a simpler structure and is easier to implement and tune and thus more applicable in practice. **Key words**: circulating fluidized bed boiler (CFBB) analysis and design decentralized control partially decentralized control centralized control

关于过滤燃烧非平衡性和火焰结构特性的研究 = Study on the Non-equilibrium and Flame Structure Characteristics of Filtration Combustion [刊 汉] GU Cong-wei SHI Jun-rui ,LI Zhi ,XIA Yong-fang (Key Laboratory of Clean Combustion for Electric Generation & Heating Technology of Liaoning Shenyang Institute of Engineering , Shenyang ,Liaoning ,Post Code: 110136) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2016 ,31(2) . -214 -219

In order to study the premixed combustion characteristics and flame structure of filtration combustion in a packed bed of pellets a simplified two-dimensional model for porous media was established. The effect of the heat transfer of gas-solid convection and solid radiation in porous media during combustion process were taken into account after the flame propagation speed and temperature distribution in the packed bed were obtained and examined. The chemical reaction rates were then used to represent flame structure characteristics and propagation speeds in the pores, and the predicted flame speeds were validated by experimental results and a satisfying agreement was achieved. The simulation results show evident nonequilibrium in the reaction zone of filtration combustion, and a large difference between gas and solid temperatures in the reaction zone. Furthermore the thermal nonequilibrium even exists within pellet. Gas velocity and equivalence ratio have significant effects in fame structures. Increase in the gas velocity leads to the increased bending of flame front which has clearly parabolic shape. The flame structure however becomes more regular with equivalence ratio. **Key words**: filtration combustion flame front porous media flame propagation ponequilibrium