

木质成型燃料取暖炉燃烧数值模拟与优化^{*}

蒋绍坚¹ 王涛² 艾元方¹ 孙彦文¹ 彭好义¹

(1. 中南大学能源科学与工程学院, 长沙 410083; 2. 中国成达工程有限公司, 成都 610041)

摘要: 为了强化木质成型燃料取暖炉燃烧效果,减少污染排放,提高采暖炉热效率,引入旋流燃烧技术,提出新型木质成型燃料旋流炉排燃烧器。数值模拟取暖炉在不同过量空气系数和不同炉排二次风入口角度条件下,炉内速度场、温度场、浓度场的变化。结果表明:通过旋流二次风产生高温回流区,有效强化了燃烧,提高了炉膛有效利用面积;过量空气系数为1.5、二次风入口倾角为30°时,燃尽率高,烟气温度分布均匀,污染少。

关键词: 取暖炉 木质成型燃料 旋流燃烧炉排 数值模拟 优化

中图分类号: TK6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)03-0191-05

引言

木质成型燃料具有比重大、储存和运输方便、灰分小、CO₂零排放、热效率高等优点,是一种较为理想的可再生清洁燃料^[1]。基于以上优点,木质成型燃料取暖炉成为顺应当前生物质锅炉小型化、高效利用发展趋势的一种有效利用生物质资源的燃烧设备。目前,生物质成型燃料取暖炉普遍采用直燃多级配风模式^[2-3],采用较大的过量空气系数使燃料有较高的燃尽率,导致出口烟温高、易烧损换热管,且排烟损失较大。文献[4]报道了一种生物质成型燃料热风采暖炉,燃用 $\Phi 75$ mm、低热值15 658 kJ/kg原料,热效率只有48%,排烟一氧化碳体积分数高达2.64%~2.22%。Yong-Woon Lee等^[5]研究了增大炉膛空间对减小CO排放量的影响。Kituyi^[6-7]等研究指出CO₂/O₂的值越大,成型燃料燃尽率越高。蒋绍坚等^[8-9]研究了生物质成型燃料取暖炉污染物排放规律以及过量空气系数对取暖炉热效率的影响。随着计算机技术的发展,对生物质成型燃料燃烧的初步数值模拟越来越多^[10-12],且模拟结果和实验结果的一致性很高。为了进一步提高取暖炉效率,本文引入旋流燃烧概念,提出新型木质成型燃料旋流燃烧器,数值模拟取暖炉在不同过量空气系数和不同二次风入口与炉排膛壁面倾角时,炉内速度场、温度场、浓度场的变化,使取暖炉在较小过量空气系数时,生物质燃料有较理想的燃烧效果。

1 模型建立

1.1 物理模型

如图1所示,旋流炉排燃烧器外形为椭圆形,一次风由炉排底部垂直向上吹入,二次风孔位于炉排侧面,由24个均匀分布的长方形小孔通入。每个小孔均布有扰流片,改变射入空气的切角。

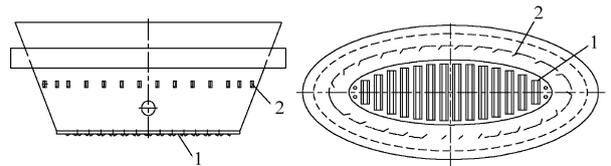


图1 旋流炉排燃烧器

Fig.1 Swirling grate burner

1. 一次风口 2. 二次风口

图2所示为生物质成型燃料取暖炉原理图,主要由引风机、螺旋给料器、料斗、点火器、炉排、炉膛、辐射及对流换热面、贯流风机等组成。本文主要仿真研究采用旋流炉排燃烧器后,取暖炉炉内稳态燃烧反应情况,对炉膛顶部换热管位置做简化处理,建立取暖炉的三维几何模型,模型坐标原点位于炉膛中心,高于炉排底部入口323.5 mm,炉膛高度方向为Z轴、炉排长轴方向为X轴、短轴方向为Y轴,如图3所示,采用混合结构网格划分。假定木质成型颗粒是相同直径的球形颗粒,燃料粒径为0.5 mm,燃料密度为700 kg/m³,燃料消耗速率为2.28 kg/h,将木质球形颗粒从炉排底部以相同的速度喷入燃烧室内。

收稿日期: 2013-03-10 修回日期: 2013-05-11

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51276023)、中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2010QZZD0106)、中欧中小企业节能减排科研合作资助项目(SQ2011ZOD200002)和“可再生能源电力技术”湖南省重点实验室基金资助项目(2011KFJJ002)

作者简介: 蒋绍坚,教授,主要从事燃烧与气化过程与技术研究,E-mail: sjjiang@csu.edu.cn

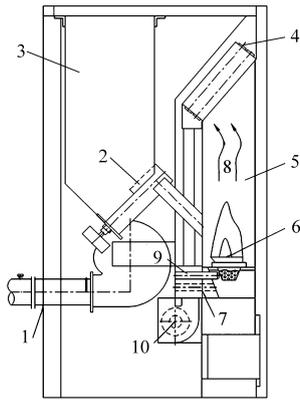


图2 取暖炉示意图

Fig. 2 Biomass briquette heating stove

1. 引风机烟气出口 2. 螺旋给料器 3. 料斗 4. 热空气出口
5. 燃烧室 6. 炉排 7. 助燃空气入口 8. 烟气 9. 点火棒
10. 贯流风机室内冷空气入口

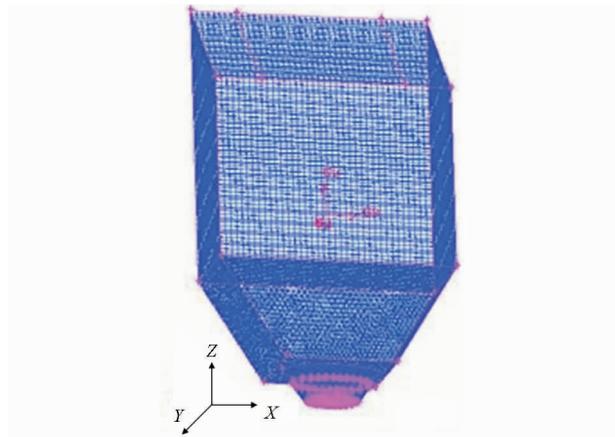


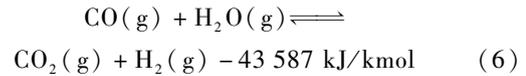
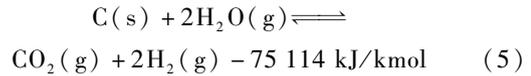
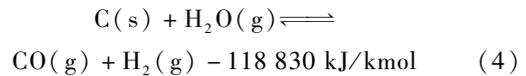
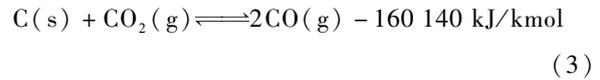
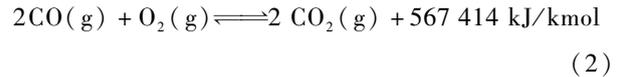
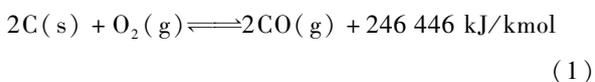
图3 取暖炉网格示意图

Fig. 3 Generated grids in heating stove model

1.2 数学模型

木质成型燃料取暖炉炉内燃烧过程遵循能量转换和守恒定律、质量守恒定律、组分转换和守恒定律等^[13-14]。本文采用 $k-\varepsilon$ 模型模拟湍流气相流动, 采用标量守恒的混合分数-概率密度函数模拟挥发分燃烧, PDF 模型简化形式采用 β 函数分布, 采用 P-1 辐射模型进行仿真研究, 计算辐射换热量。选用动力学/扩散控制反应速率模型, 模拟焦炭燃烧^[15]; 选用 RosinRammler 描述固相颗粒分布特征, 采用拉格朗日离散相模型考虑颗粒相和气相间的相互作用, 并采用随机轨道模型追踪颗粒运动轨迹。

木质成型燃料固定碳占 13.2%、挥发分占 81.52%、水分占 4.88%、灰分占 0.4%, 低位发热量为 18 500 kJ/kg。入口空气温度为 300 K, 标准大气压, 一次风入口速度为 2.151 m/s, 二次风入口速度为 2.22 m/s, 与壁面呈 30° 夹角。建立仿真模型时主要考虑的燃烧过程化学反应有



2 模拟结果与分析

2.1 过量空气系数

过量空气系数、一次风和二次风入口速度设置如表 1 所示。

表1 速度入口设置

Tab. 1 Inlet velocity settings

过量空气系数 α	一次风入口速度 / (m·s ⁻¹)	二次风入口设置	
		速度 / (m·s ⁻¹)	方向
1.3	2.15	2.22	切壁 30°
1.5	2.48	2.56	切壁 30°
1.7	2.81	2.90	切壁 30°

取暖炉模型中心 YOZ 面以及中心轴线、水平截面、模型出口等位置, 研究取暖炉内速度、温度、浓度, 探寻取暖炉旋流燃烧反应的最佳过量空气系数。

2.1.1 速度场分析

图 4 所示为不同过量空气系数条件下, 取暖炉中心截面速度分布云图。图 5 所示为旋流炉排燃烧器出口椭圆面速度矢量图。

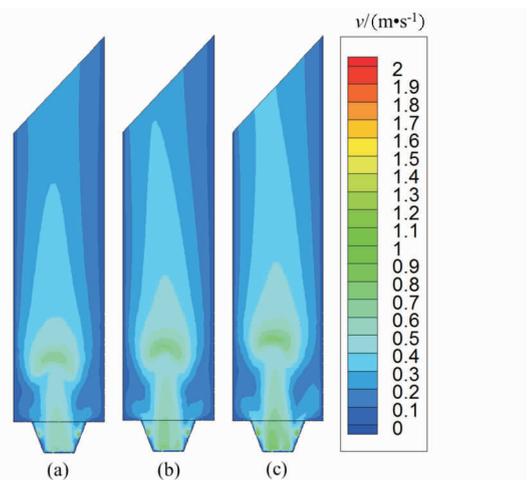
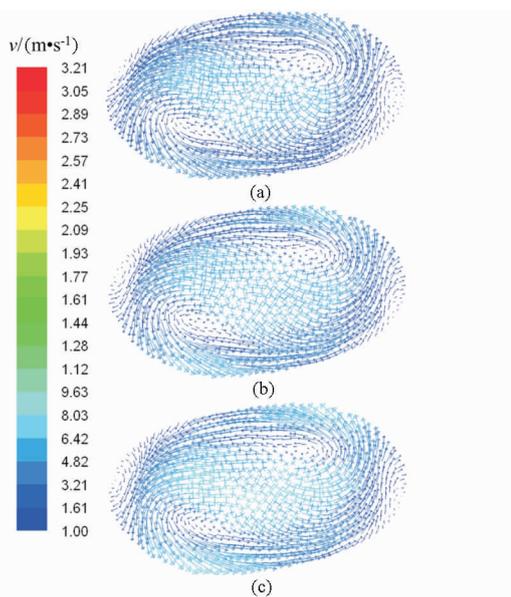


图4 取暖炉内速度分布云图

Fig. 4 Furnace velocity distribute

(a) $\alpha=1.3$ (b) $\alpha=1.5$ (c) $\alpha=1.7$

由图 4 可知, 气流主要分布在取暖炉中心, 随 α 增大, 炉内类火焰状高速气流区增大, 位置升高, 这

图5 炉排上部出口($Z = -271$ mm)截面速度矢量图Fig. 5 Furnace velocity distribution at the grate exit section ($Z = -271$ mm)(a) $\alpha = 1.3$ (b) $\alpha = 1.5$ (c) $\alpha = 1.7$

是因为随着 α 的增大,炉排入口速度增加,导致炉膛内上升气流迅速增大。由图5可知,炉排上部气流均能形成旋流,且有2个明显漩涡区。随着 α 的增大,中心上升气流逐渐增大,且上升气流区增大,漩涡向壁面方向移动,且旋流强度减弱。燃烧反应要求气流分布于较大空间,但气流速度太大会造成空气中的氧利用率下降,同时会带走燃烧热,不利于旋流燃烧。因此,过量空气系数为1.5时,取暖炉内气流分布较理想。

2.1.2 温度场分析

图6所示为不同过量空气系数条件下,取暖炉中心截面温度分布云图。图7所示为不同过量空气系数条件下取暖炉中心温度曲线。

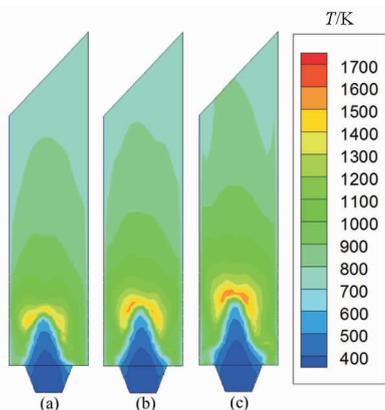


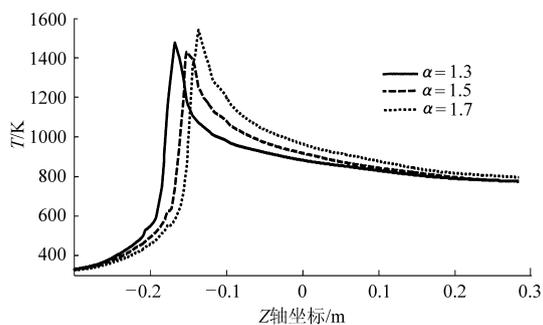
图6 取暖炉内温度分布云图

Fig. 6 Furnace temperature distribution

(a) $\alpha = 1.3$ (b) $\alpha = 1.5$ (c) $\alpha = 1.7$

由图6可知, α 为1.7时,出口中心温度高,热量损失大。由图7可知,温度快速上升后逐渐下降,

说明木质成型燃料着火后温度迅速升高,然后沿着取暖炉高度逐渐降低,火焰传播的不同高度截面迅速由小增大后逐渐减小,火焰呈扁平环形薄片状。 α 增大时,入口速度增大,火焰前沿面升高,火焰传播速度加快,燃烧更完全,辐射释放热量更多,传热温度更高,贴壁附近区域由于存在二次旋流风,火焰迅速扩张,反应时间短,燃烧更充分。因此,较大的过量空气系数有利于木质成型燃料快速而完全反应,增加炉内热负荷,强化换热。

图7 取暖炉中心线($X = 0, Y = 0$)温度曲线Fig. 7 Furnace centerline temperature curve ($X = 0, Y = 0$)

2.1.3 烟气成分分析

过量空气系数为1.3、1.5、1.7时,炉膛出口处烟气温度、成分和平均浓度列于表2。

表2 取暖炉出口烟气温度和成分(不同过量空气系数)
Tab. 2 Flue gas temperature and compositions at the furnace exit (different excess air coefficient)

α	温度/K			出口烟气平均浓度/($\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$)		
	平均温度	最高温度	最低温度	O_2	CO_2	CO
1.3	757.93	917.28	289.67	0.27	2.50	0.34
1.5	760.63	783.07	696.25	0.0037	2.63	0.19
1.7	741.10	900.88	286.12	0.22	2.51	0.26

由表2可知,过量空气系数为1.5时,出口烟气温度分布最均匀,说明此时炉内燃烧组织最好。 O_2 和CO平均浓度最小, CO_2 平均浓度最大,说明此时木质成型燃料燃尽率高。因此,结合出口处温度分布和烟气成分分析可知, α 为1.5时,炉内温度分布最均匀,燃烧组织最好,燃料燃尽率高,污染物排放少,是最优选择。

2.2 二次风入口角度

在 α 为1.5,一次风入口速度为2.48 m/s,二次风入口风速大小为2.56 m/s,不同二次风入口角度条件下取暖炉出口烟气温度、成分和平均浓度列于表3。

由表3可知,二次风入口角度为 30° 时,炉膛出口处烟气温度分布最均匀,说明此时炉内燃烧组织更好,炉膛有效利用面积更大,温度分布更均匀的烟气能与换热管有更好的换热效果,从而提高取暖炉

表3 取暖炉出口烟气温度和成分(不同入口角度)

Tab.3 The flue gas temperature and compositions at the furnace exit (different inlet angle)

工况编号	入口角度/(°)	温度/K			出口烟气平均浓度/(mol·m ⁻³)		
		平均温度	最高温度	最低温度	O ₂	CO ₂	CO
K1	15(切壁)	765.42	874.83	295.08	0.073	2.54	0.35
K2	30(切壁)	760.63	783.07	696.25	0.0037	2.63	0.19
K3	45(切壁)	712.23	899.90	288.74	0.31	2.60	0.30
K4	60(切壁)	780.67	859.47	684.73	0.0082	2.50	0.28
K5	75(切壁)	846.49	914.38	293.67	0.096	2.14	0.33

热效率。分析烟气成分可知,二次风入口角度为30°时,O₂和CO的平均浓度最小,CO₂的平均浓度最大,说明在二次风入口角度为30°时,氧气的利用率高,木质成型燃料的燃尽率高,燃烧反应较完全。

综上所述可知,在过量空气系数为1.5时,二次风入口角度的最优选择是30°。

3 结论

(1) 通过旋流二次风产生高温回流区,强化了燃烧,提高了炉膛有效利用面积。

(2) 在过量空气系数为1.5的前提下,二次风入口角度为30°时,出口烟气温度分布均匀,燃烧组织较好,燃料燃尽率高,污染物排放少。

参 考 文 献

- 徐飞, 侯书林, 赵立欣, 等. 生物质颗粒燃料燃烧技术发展现状及趋势[J]. 安全与环境学报, 2011, 11(1): 70-74.
Xu Fei, Hou Shulin, Zhao Lixin, et al. Development status and trends of biomass pellet combustion technology[J]. Journal of Safety and Environment, 2011, 11(1): 70-74. (in Chinese)
- 郭飞强, 董玉平, 董磊, 等. 生物质成型燃料三次配风锅炉的设计及低NO_x排放效果[J]. 农业工程学报, 2012, 28(14): 42-46.
Guo Feiqiang, Dong Yuping, Dong Lei, et al. Design and low NO_x emission effect of biomass briquette boiler with third air distribution type[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(14): 42-46. (in Chinese)
- 姚宗路, 赵立欣, Ronnback M, 等. 生物质颗粒燃料特性及其对燃烧的影响分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(10): 97-102.
Yao Zonglu, Zhao Lixin, Ronnback M, et al. Comparison on characterization effect of biomass pellet fuels on combustion behavior [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 97-102. (in Chinese)
- 刘稳廷, 赵迎芳, 刘圣勇, 等. 生物质成型燃料热风采暖炉的设计与研究[J]. 河南农业大学学报, 2006, 4(2): 201-204.
Liu Wenting, Zhao Yingfang, Liu Shengyong, et al. Design and development of biomass briquette hot-blast stove[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2006, 4(2): 201-204. (in Chinese)
- Lee Y, Ryu C. Assessment of wood pellet combustion in a domestic stove[J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2011, 13(3): 165-172.
- Kituyi E, Marufu L. Carbon monoxide and nitric oxide and nitric oxide from biofuel fires in Kenya[J]. Energy Conversion and Management, 2001, 42(13): 1517-1542.
- Balland-Tremeer G, Jawurek H. Comparison of five rural, wood-burning cooking devices efficiencies and emissions[J]. Biomass and Energy, 1996, 11(5): 419-430.
- 蒋绍坚, 黄波, 艾元方, 等. 助燃空气温度对生物质成型燃料炉点火过程污染物排放的影响[J]. 热科学与技术, 2011, 10(1): 68-74.
Jiang Shaojian, Huang Bo, Ai Yuanfang, et al. Effect of excessive air coefficient on thermal efficiency of pellet stove[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2011, 10(1): 68-74. (in Chinese)
- 蒋绍坚, 魏烈旭, 艾元方, 等. 生物质成型燃料炉点火和熄火过程中排放行为的实验研究[J]. 热科学与技术, 2010, 9(3): 256-261.
Jiang Shaojian, Wei Liexu, Ai Yuanfang, et al. Experimental research on emission behavior of pellet stove during ignition and shutting process[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2010, 9(3): 256-261. (in Chinese)
- Collazo J, Porteiro J. Numerical simulation of a small-scale biomass boiler[J]. Energy Conversion and Management, 2012, 64: 87-96.
- Westerlund L B, Hermansson R L, Cervantes M J. CFD optimization of a pellet burner[J]. Thermal Science, 2012, 16(4): 1175-1186.
- Jordan, Christian, Harasek, et al. Improvement of a combustion unit based on a grate furnace for granular dry solid biofuels using CFD methods[J]. Heat Transfer Engineering, 2010, 31(9): 774-781.
- Porteiro J. Numerical modeling of a biomass pellet domestic boiler[J]. Energy & Fuels, 2009, 23(2): 1067-1075.
- Klason T, Bai X S. Computational study of the combustion process and NO formation in a small-scale wood pellet furnace[J]. Fuel, 2007, 86(10-11): 1465-1474.

- 15 Baum M M, Street P J. Predicting the combustion behavior of coal particles[J]. *Combustion Science Technology*, 1971, 3(5): 231 - 243.
- 16 黄波. 生物质成型燃料应用于取暖炉的燃烧特性实验研究[D]. 长沙:中南大学, 2011:46 - 55.
Huang Bo. Experiment research on combustion character of heating furnace using the biomass pellet[D]. Changsha: Central South University, 2011:46 - 55. (in Chinese)

Numerical Simulation and Optimization on Combustion of Wood Briquette Heating Stove

Jiang Shaojian¹ Wang Tao² Ai Yuanfang¹ Sun Yanwen¹ Peng Haoyi¹

(1. School of Energy Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

2. China Chengda Engineering Co., Ltd., Chengdu 610041, China)

Abstract: The technology of swirling combustion and a new kind of wood briquette fuel swirling burner were proposed to improve thermal efficiency and reduce pollution emissions of the wood briquette heating stove. Numerical simulation on combustion processing of different excess air coefficient and different inclination between the secondary air inlet and grate wall in the heating stove was considered, aiming to solve the velocity, temperature and concentration field. The results reveal that high temperature backflow zone coming out through rotational flow secondary wind effectively strengthened combustion and improved the furnace using area; combustion efficiency is the highest and pollution is the lowest, when excess air coefficient is 1.5 and inclination angle is 30°.

Key words: Heating stove Wood briquette Swirling combustion grate burner Numerical simulation Optimization

(上接第 183 页)

Numerical Simulation of the Effect of Gas Property on the Performance of Cyclone Separator

Li Kai Chen Dengyu Zhu Xifeng

(Key Laboratory for Biomass Clean Energy of Anhui Province, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: The flow fields in cyclone at various model gases with $\rho = 0.6125 \sim 2.4500 \text{ kg/m}^3$ and $\mu = 4.4735 \times 10^{-6} \sim 4.4735 \times 10^{-5} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ were simulated by the computational fluid dynamics (CFD) software package, FLUENT 6.3. The influences of density and viscosity of gases on the dimensionless tangential velocity and pressure drop were performed respectively by single factor analysis. The result indicated that the dimensionless tangential velocity of gas flow in cyclone increases as the viscosity increase, while decreases with the increase of viscosity. Both density and viscosity have logarithmic function relations with the dimensionless maximum tangential velocity. The drag coefficient is not only influenced by the geometric parameters of the cyclone, but also affected by the viscosity of gases; there is a logarithmic regression between the pressure drop and viscosity of gas. Moreover, a fitting bivariate polynomial equation between the dimensionless tangential velocity and the factors was obtained.

Key words: Cyclone separator Performance Viscosity Density Simulation