

Numerical analysis on Characteristics of Pulverized Coal Combustion in O₂/CO₂ Mixtures

Mingyan Gu, Hongyan Dong, Xuhui Liu, Guang Chen

Anhui University of Technology, school of Metallurgy and resource, 243002, Ma'an Shan,, China Email: gumy@ahut.edu.cn

Abstract: The combustion of pulverized coal in O_2/CO_2 atmosphere is one of the promising new technologies which can reduce the emission of carbon dioxide and NOx. In this study, a three dimensional mathematical multiphase CFD model has been developed to simulate the characteristics of pulverized coal combustion in the atmospheres of O_2/N_2 and O_2/CO_2 . The results obtained display that the combustion characters of pulverized coal show great differently; the temperature of flame is decreased significantly while the pulverized coal combustion occurred in the atmospheres of O_2/CO_2 . Increasing the oxygen concentration in O_2/CO_2 atmosphere will increase the flame temperature.

Keywords: numerical analysis; O₂/CO₂ atmosphere; pulverized coal; combustion; temperature

O₂/CO₂ 气氛下煤粉燃烧过程的数值模拟

顾明言,董红岩,刘旭辉,陈 光

安徽工业大学冶金与资源学院,马鞍山,中国,243002 Email: gumy@ahut.edu.cn

摘 要:煤粉在 O_2/CO_2 气氛下的燃烧技术是减少 CO_2 及 NOx 等气体排放的一种有很前景的新型燃烧技术。本文运用数值模拟的方法对煤粉在 O_2/N_2 与 O_2/CO_2 气氛下的燃烧特性进行分析,结果表明,煤粉在 O_2/CO_2 气氛下的燃烧特性与空气气氛下有着较大的差异。在 O_2/CO_2 气氛下的燃烧,燃烧火焰温度明显降低;增加 O_2/CO_2 气氛中的氧气浓度,将改善燃烧条件,提高火焰的温度。

关键词:数值模拟; O2/CO2气氛; 煤粉; 燃烧; 火焰温度

1 引言

在全球气候变化问题不断升温的大背景下,降低 CO_2 排放越来越受到各国重视。面对全球气候变化,国际社会呼吁全球采取积极有效的措施降低温室气体特别是 CO_2 的排放。 O_2/CO_2 燃烧技术自Horne 和 Steinburg 于1981 年提出以来,引起了人们的广泛关注 [1-3]。1982 年美国阿贡国家实验室(ANL) 率先开展 O_2/CO_2 燃烧方式的研究,国内外很多学者,对 O_2/CO_2 燃烧方式的各个方面进行了研究 [4-5];刘彦等人认为, O_2/CO_2 气氛下,煤粉的着火温度及燃尽温度都有降低的趋势 [6];Hey-Suk Kim 等对LNG/ O_2/CO_2 燃烧中 CO_2 再循环量测定的进一步数值分析,得到了当 CO_2 与空气中 N_2 等量时,能得到与LNG-空气燃烧时的最相似火焰 [7]。

本文采用数值模拟的方法,对 O_2/N_2 与 O_2/CO_2 不同气氛下煤粉燃烧过程进行了研究,分析了 O_2/CO_2

气氛下不同 O_2 浓度对燃烧特性的影响,得到了燃烧火焰分布、燃烧产物浓度分布等,为 O_2/CO_2 燃烧技术提供理论基础。

2 模拟对象及工况

燃烧器结构示意图如图 1 所示,其中燃烧室长 2m, 直径为 0.6m。

表 1 为所用煤粉的元素分析和工业分析。煤粉颗粒的平均直径为 45μm,流量为 0.009725kg/s,低位发热量为 2.96×107 J/kg。计算工况见表 2。在模拟工况





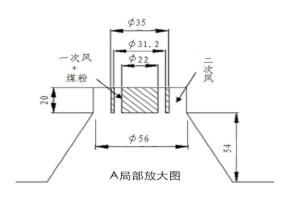


Figure 1. The structure of Burner (mm) 图 1.燃烧器的结构 (mm)

中,改变 O_2/CO_2 浓度,并保证总的 O_2 供气量不变。 入口采用速度进风,一次风速度 22.9m/s,二次风速度 36m/s。一次风入口温度为 353K,二次风温度为 573K。

Table 1. The ultimate and proximate analysis of coal

表 1.燃料的元素分析和工业分析(%)								
元素分析								
元素	С	Н	O	N	S			
含量 (%)	75.78	5.27	15.98	1.62	1.35			
固定碳	挥发分	+	灰分					
57.31	38.21		4.48					

Table 2. Simulation cases

衣 2. 快拟二元							
工况	气体成分	气体组成(质量分数%)					
		O_2	CO_2	N_2			
1	空气	23.3	0	76.7			
2	O2/CO2	23.3	76.7	0			
3	O2/CO2	28	72	0			
4	O2/CO2	30	70	0			

3 网格划分及数学模型

由于控制体体积比较大,本文采用四分之一控制体然后设置对称(symmetry)边界条件。采用 GAMBIT 对整个计算区域进行网格划分,网格总数为 141899,网格划分如图 2 所示。

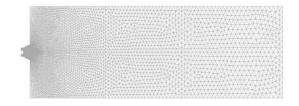


Figure 2. Grid system of burner 图 2.燃烧器网格划分

煤粉的燃烧是一个复杂的物理化学过程,包括固相燃料与气相之间的传热传质交换、固体燃料中挥发分的析出与燃烧、残炭的燃烧等过程。本文在FLUENT软件的基础上,建立了燃烧器内煤粉燃烧过程的三维数学模型。其中气相湍流流动采用RNG κ-ε湍流模型;煤粉运动采用随机轨道模型;煤粉挥发分析出采用单方程模型;焦炭燃烧采用动力-扩散模型;辐射换热采用DO模型。燃烧室壁面设为绝热。

4 模拟结果及分析

4.1 O₂/N₂ 和 O₂/CO₂ 气氛下燃烧器内的燃烧情况

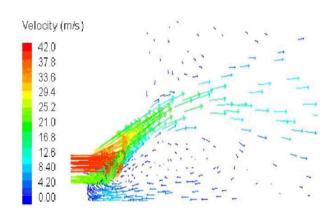


Figure 3. Velocity vector distribution 图 3. 气体速度矢量图

图 3 是燃烧器入口附近气相速度矢量图。从图中可以看出,在扩口段中心区域形成一个内部旋流区,这是因为一次风由环口进入燃烧室内,在扩口段形成了局部的低压区,受下游气流影响下造成压力差,形成了内部回流。

图 4 为相同 O_2 质量分数 (23.3%) 下,煤粉在 O_2/CO_2 和 O_2/N_2 气氛下燃烧器内温度场的比较图。从 图中可以看出,在两种不同气氛下煤粉的燃烧过程明



显不相同。与模拟的空气条件相比,在 O_2/CO_2 气氛下,煤粉燃烧火焰面较窄且平均温度也较低。这主要是由于氧化气氛中的高 CO_2 浓度,使得辐射散热损失增加,理论燃烧温度降低;另一方面,是由于气氛的比热变化造成的,由相应数据可知,当气体温度在590K 以上, CO_2 的比热开始大于 N_2 ,并随气体温度升高,比热增加。 CO_2 的高比热进一步导致了火焰温度的降低。由此可见,在相同 O_2 浓度下,采用 CO_2 替代 N_2 将降低火焰温度。

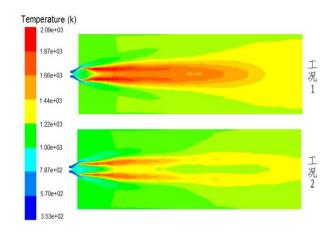
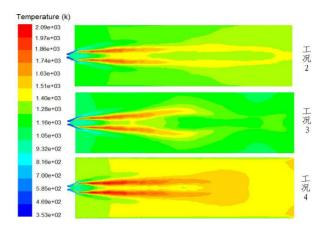


Figure 4. Contour of furnace temperature 图 4. O₂/N₂和 O₂/CO₂气氛下燃烧器内温度场分布

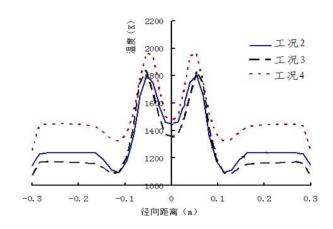
4.2 O₂/CO₂ 气氛下 O₂ 浓度对燃烧过程的影响

图5为O₂/CO₂气氛中O₂质量分数分别为23.3%、28%和30%时沿轴向上的燃烧温度分布及沿径向(x=0.4m)的温度分布。由图可见,三种工况都出现相似的环形火焰,随着气氛中O₂浓度升高,煤粉燃烧后所形成的火焰高温区向中心轴线靠近,中心煤粉燃烧过程提前,表明燃烧条件得到改善。O₂质量分数为28%时,沿中心轴线上温度最低,O₂质量分数为30%时,温度最高,与空气气氛下火焰温度分布最为接近。

图 6 为不同 O_2 浓度下 CO_2 和 CO 浓度分布图。如图 6 (a) 所示,随着 O_2 浓度升高,沿中心轴线上 CO_2 浓度变化趋势相似,先降低后升高,在内部回流区达到最低。从图 6 (b) CO 浓度分布图可见,当 O_2 浓度为 30%时,内部旋流区对应的 CO 浓度达到最高,随着 O_2 不断向火焰内部扩散,CO 与 O_2 混合反应,燃烧器中心区域 CO 量逐渐降低。

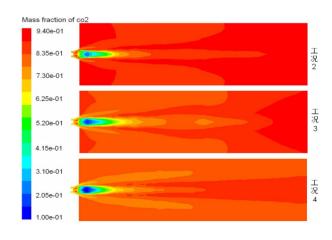


(a) 过中心线平面气体温度分布



(b) 径向温度分布 (x=0.4m)

Figure 5. Temperature distributions
图 5.不同工况下过轴线平面温度分布图及其沿径向方向曲线图



(a)CO2浓度分布



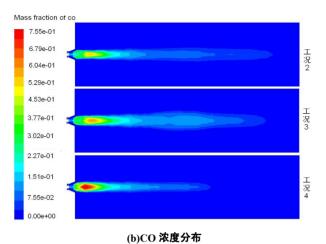


Figure 6. Contour of CO₂ and CO mass concentration 图 6. 不同工况下过轴线平面组分浓度分布

5 结论

运用数值模拟方法对煤粉在空气和 O_2/CO_2 气氛下的燃烧特性进行了研究;并对 O_2/CO_2 气氛下,不同 O_2 浓度对煤粉燃烧过程的影响进行了分析。

- (1) O_2/CO_2 与 O_2/N_2 气氛下的火焰差别较大,在相同氧浓度下, O_2/CO_2 气氛中的燃烧火焰温度低于 O_2/N_2 气氛下的火焰温度。 O_2/CO_2 气氛下,由于比热容及辐射率较高的气体 CO_2 的大量存在,导致煤粉燃烧火焰的温度降低。
- (2)在 O_2/CO_2 气氛下,不同 O_2 浓度对煤粉燃烧过程有着较大的影响,随着 O_2 质量分数的增加,火焰中心温度升高,高温区增加,燃烧更加稳定。 O_2/CO_2 气

氛中 O_2 浓度到达 30%时,于煤粉在空气中的燃烧火焰接近。

References (参考文献)

- Qingzhao Li, Changsui Zhao Comparison of pulverized coal combustion in air and in O2/CO2 mixtures by thermo-gravimetric analysis [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2009, 85(5): 521-528.
- [2] A.G. Borrego, E. Osório, M.D. Casal, A.C.F. Vilela Coal char combustion under a CO2-rich atmosphere: Implications for pulverized coal injection in a blast furnace[J] Fuel Processing Technology, 2008, 89(11):1017-1024.
- [3] Yamadea T, Kiga T, Okaua M. Characteristics of pulverized-coal combustion in CO2 recovery power plant applied O2/CO2 [J].JSME Enternational Journal, 1998, 41(4): 1017-1022.
- [4] S Nakayama. Pulverized Coal Combustion in O2/CO2 Mixture on a Power Plant for CO2 Recovery. Energy Conversion and Management [J], 1992,33(8):379-386.
- [5] HUANG Xiao-Hong , LIU Zhao-Hui , LIU Jing-Zhang. Experimental Investigation On Flame Characteristics Of Pulverized Coal Combustion Under O2/CO2 Atomsphere [J] . Journal Of Engineering Thermophysics 2009, 30 (7): 1245—1248.
 - 黄晓宏,柳朝晖,刘敬樟,等. O2/CO2 条件下煤粉燃烧火焰 特性的实验研究[J]. 工程热物理学报,2009,30(7):1245—1248.
- [6] LIU Yan, ZHOU Jun-hu, FANG Lei. A Study On Coal Combustion And Desulfurization Characteristics In Atmosphere Containing O2/CO2[J] .Proceedings of the CSEE 2004, 24 (8): 224–228.
 - 刘彦,周俊虎,方磊,等. O2/CO2 气氛煤粉燃烧及固硫特性研究[J]. 中国电机工程学报,2004,24(8): 224—228.
- [7] Hey-Suk Kim, Mi-Soo Shin. In-depth numerical analysis on the determination of amount of CO2 recirculation in LNG/O2/CO2 combustion [J] .Thermal Engineering 2009, 30 (2010): 616–622.