

旋流型 O₂/CO₂ 煤粉燃烧器的流动及燃烧试验研究

丘纪华, 邹春, 刘敬樟, 李刚, 李曼丽, 郑楚光

(煤燃烧国家重点实验室(华中科技大学), 湖北省 武汉市 430074)

Experimental Study of O₂/CO₂ Swirled Burner of Pulverized Coal on Flow Field and Combustion

QIU Ji-hua, ZOU Chun, LIU Jing-zhang, LI Gang, LI Man-li, ZHENG Chu-guang
(State Key Laboratory of Coal Combustion (Huanzhong University of Science and Technology),
Wuhan 430074, Hubei Province, China)

ABSTRACT: O₂/CO₂ recycled combustion can produce higher CO₂ concentration in flue gas (up 90% by volume), this approach is regarded as an efficient and low-risk for CO₂ capture method, and can be convenient applied and retrofitted for today power plant boilers. The O₂/CO₂ swirled burner of pulverized coal was studied at flow field and pulverized coal combustion in air and in O₂/CO₂ at 0.3 MW down-fired combustor. The flow field showed that the velocity along circle of the burner be uniform almostly, and there is a reflow zone formed at center of the flow field at down-stream the port, the relatively length and width of reflow zone are $L=1.38-1.70$ and $B=0.39-0.53$ respectively. The spread angle of the stream is $\beta=36^\circ-50^\circ$. The gas temperature profiles of the experimental show that the ignition and combustion in O₂/CO₂ (O₂ concentration 23% by volume) can be better than in air, and CO₂ concentration of flue gas with O₂/CO₂ combustion can be reached 90% and more.

KEY WORDS: pulverized coal burner; O₂/CO₂ recycled combustion; swirled flow

摘要: O₂/CO₂ 循环燃烧技术可以提高烟气中的 CO₂ 浓度(90%以上), 被认为是一种效率高、风险低的 CO₂ 捕集方式, 易于在现有火力发电锅炉技术的基础上进行应用或改造。对旋流型 O₂/CO₂ 煤粉燃烧器进行了冷态流场试验, 并在 0.3 MW 的热态试验台上进行了该燃烧器的空气气氛和 O₂/CO₂ 气氛下的煤粉燃烧实验。研究结果表明, 沿该燃烧器出口圆周上的速度分布比较均匀, 在流场中心有回流区形

成, 回流区的相对长度 $L=1.38-1.70$, 相对宽度为 $B=0.39-0.53$, 扩张角 $\beta=36^\circ-50^\circ$ 。该燃烧器形成的流场能够较好地满足煤粉在空气条件、O₂/CO₂ 气氛条件下着火燃烧的需要。煤粉在 O₂/CO₂ 气氛, O₂ 浓度为 23% 时, 其着火性能优于常规空气, 且燃烧后的烟气中 CO₂ 浓度可以达到 90% 以上。

关键词: 煤粉燃烧器; O₂/CO₂ 循环燃烧; 旋流

0 引言

由 CO₂ 引起的温室效应日益受到人们的关注。燃煤电厂作为 CO₂ 的集中排放源, 解决其 CO₂ 排放具有重大意义。常规煤粉炉烟气中 CO₂ 浓度为 14%~16%, 直接进行 CO₂ 的回收处理成本较高, 难以推广应用。富氧燃烧技术采用烟气再循环的方式^[1-3], 用空气分离获得的纯氧和一部分锅炉排烟构成的混合气代替空气作为燃烧时的氧化剂, 以提高燃烧排烟中的 CO₂ 浓度, 因此富氧燃烧技术也称为 O₂/CO₂ 燃烧技术, 或空气分离/烟气再循环技术。富氧燃烧的烟气经干燥脱水后其中的 CO₂ 体积浓度可达 95% 以上, 在液化处理以 CO₂ 为主的烟气时, SO₂ 同时也被液化回收, 可省去烟气脱硫设备^[4]。与空气气氛相比, 由于没有空气中的 N₂, O₂/CO₂ 燃烧技术中烟气的 NO_x 的排放也会相应降低^[5-8]。从技术经济角度来看, 在火电厂分离回收并封存 CO₂ 的各种主要潜在技术中, O₂/CO₂ 燃烧技术具有明显的优势。在 O₂/CO₂ 燃烧方式下由于一部分烟气会再循环进入炉膛而不排入大气, 这将减小锅炉排烟损失, 有利于提高锅炉的热效率。

对煤粉在 O₂/CO₂ 气氛和空气下的着火温度、燃烧速率、火焰稳定性和碳燃尽率等方面的研究表明^[9-13], 在 O₂/CO₂ 气氛燃烧条件下, 由于 CO₂ 的高

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(863 计划)(2009AA05Z315); 国家重点基础研究发展规划基金项目(2006CB705806)。

Project Supported by The National High Technology Research and Development of China (863 Program) (2009AA05Z315); The Major State Basic Research Development Program of China (2006CB705806).

比热容和低氧扩散能力,煤粉火炬特性发生了显著变化,对比同等氧分压的空气燃烧条件下,绝热燃烧温度下降 200~400 K,火焰传播速度约为原来的 1/4~1/5。如 Liu^[11]等人的研究结果认为, O₂ 的浓度在 O₂/CO₂ 气氛中低于 30%,则煤粉的着火推迟,当 O₂ 浓度达到 30%时煤粉的燃烧温度曲线与在空气中燃烧基本相同,且与空气中燃烧相比,其煤粉的燃尽率较高,NO_x、CO 的排放减少。

近些年来,已有一些机构和学者进行了 O₂/CO₂ 煤粉燃烧器的研究^[14-20]。Khare^[14]在日本 IHI 的 1.2 MW 中试台架上对常规煤粉旋流燃烧器富氧燃烧进行了试验,观察到燃烧器出口火焰高温区后移、火焰传播速度减慢的现象。Tan^[15-16]在加拿大 CANMET 的 0.3 MW 的燃烧实验台上进行了 O₂/CO₂ 多种燃料的适应性试验,并应用 CFD 对煤粉燃烧器进行模拟研究。这表明在 O₂/CO₂ 循环燃烧的研究中,已经开始进行半工业化实验。

如何在 O₂/CO₂ 条件下解决好煤粉着火燃烧,且能适应不同煤种和负荷的变化,提高燃烧效率,降低污染物的排放,燃烧器是最重要的因数。因此,有必要开展 O₂/CO₂ 煤粉燃烧器研究,为 O₂/CO₂ 燃烧方式电站燃煤锅炉的运行提供技术支持。

1 O₂/CO₂ 煤粉燃烧器的结构

本文研究的 O₂/CO₂ 煤粉燃烧器以煤粉在 O₂/CO₂ 循环方式下燃烧为主进行设计,同时考虑该燃烧器在空气条件下仍可以保持稳定燃烧和较高的燃烧效率^[21]。该燃烧器设计为 4 层共轴环形套管形式,由内向外依次为油枪风管、氧气风管(内二次风管)、一次风管、二次风管(外二次风管),图 1 给出了 O₂/CO₂ 煤粉燃烧器结构示意图。在燃用空气时,与常规的旋流燃烧器类似,一次风管内输送空气与煤粉,内二次风管和外二次风管均输送空气。与常规的旋流燃烧器不同的是内二次风管的位置在一次风管内而不是在一次风管外。当采用 O₂/CO₂ 循环燃烧方式时,内二次风管输送纯氧气,一次风管采用循环烟气来输送煤粉,外二次风管输送循环烟气。这样的设计方便燃烧试验台升温加热和进行空气和 O₂/CO₂ 气氛之间的切换,单独管道输送纯氧可以保持氧化剂的高品质,有利于煤粉的着火和燃烧,同时也易于电厂现有燃烧器的改造。

该燃烧器在内二次风管和外二次风管内装有切向旋流叶片,内、外二次风的旋流强度分别为 0.66

和 0.73。一次风管为直流,没有旋流叶片。通过内、外二次风产生的气流旋转,在燃烧器出口形成合理的流场结构,包括回流区、气流扩展角、射程等,增加气流混合及传热传质,以利于煤粉火焰的稳定和燃烬率的提高。在 O₂/CO₂ 气氛下,由于内二次风管输送的是纯氧,内二次风的旋转有利于煤粉与氧气的混合,保证煤粉着火和燃烧初期氧气的及时供应。

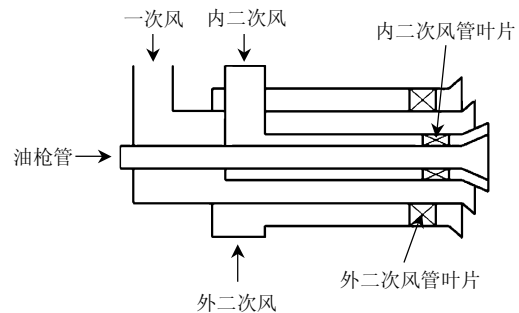


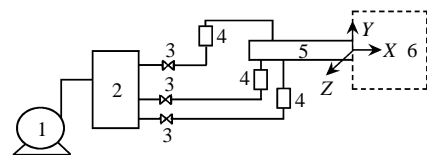
图 1 O₂/CO₂ 旋流燃烧器结构示意图
Fig. 1 O₂/CO₂ swirled burner of pulverized coal

2 O₂/CO₂ 燃烧器出口速度场测量

2.1 试验系统及试验条件

O₂/CO₂ 煤粉燃烧器速度场测量试验系统如图 2 所示,从风机出来的风经风箱稳压后分别进入内二次风管、一次风管和外二次风管,各个风管都安装有阀门和流量计,可以对各风管的风量进行调节和计量。在燃烧器出口区域采用微型速度测量仪进行速度场测量。

试验中选取的一次风、内二次风、外二次风的风量以及出口速度列入表 1。



1—风机; 2—风箱; 3—阀门; 4—流量计; 5—燃烧器; 6—场测量区。

图 2 试验台架系统示意图
Fig. 2 Schematics of the experiment apparatus for fluid testing

表 1 试验条件

Tab. 1 Volume and velocity of primary air and secondary air in the fluid experiments

工况	一次风		内二次风		外二次风	
	风量/ (m ³ /h)	风速/ (m/s)	风量/ (m ³ /h)	风速/ (m/s)	风量/ (m ³ /h)	风速/ (m/s)
1	61.6	23	48.3	20	115.2	25
2	53.6	20	54.1	25	108.1	20
3	47.7	18	79.2	30	158.4	30
4	53.6	20	0	0	115.2	25
5	53.6	20	48.3	20	0	0
6	0	0	48.3	20	115.2	25

2.2 测量结果及分析

2.2.1 沿燃烧器圆周速度分布的均匀性

对于旋流燃烧器，燃烧器出口的速度沿圆周度分布容易产生不均匀，受管道长度以及旋流叶片的结构影响较大。图 3 为工况 1 条件下旋流型 O₂/CO₂ 煤粉燃烧器出口处轴向速度的测量结果。由图可见，在该燃烧器的出口处，一次风、内二次风、外二次风的速度分布沿燃烧器喷口圆周度是比较均匀的，在煤粉的燃烧过程中不会形成较大气流偏斜。

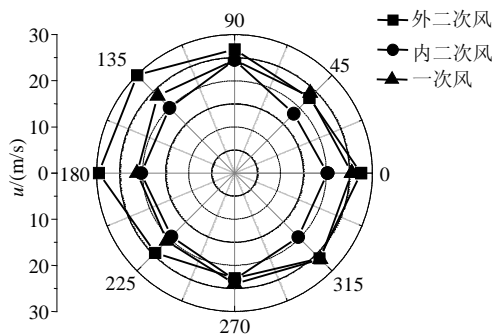


图 3 燃烧器出口各层速度图

Fig. 3 Distribution of velocity around burner

2.2.2 回流区与扩张角

旋流燃烧器出口由于气流的旋转，会在气流的中心形成回流区。回流区的大小以及燃烧器出口流场的分布情况对煤粉的燃烧有着直接的影响。影响流场及回流区大小的主要因素是燃烧器的旋转强度、各次风量的分配以及燃烧器喷口的张角大小。本试验所用旋流 O₂/CO₂ 煤粉燃烧器出口的轴向流场测量结果如图 4 所示，其他工况的流场都与此相似。图 4 中可以看出燃烧器出口流场中有明显的回流区，只是不同的配风条件下回流区的大小形状有一些差别，气流的扩张角也略有不同。表 2 给出了不同工况下回流区相对于燃烧器外二次风喷口的长度(L)和宽度(B)，以及扩张角的角度。

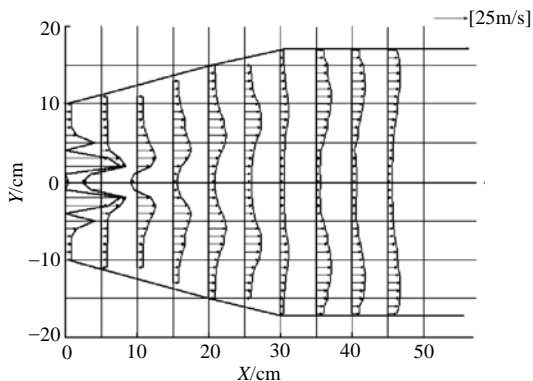


图 4 X-Y 平面轴向速度图

Fig. 4 Axis velocity field in X-Y plane

表 2 不同工况下回流区长度和扩张角的测量结果

Tab. 2 Refluence and expand angle in difference conditions

工况	回流区相对长度 L	回流区相对宽度 B	扩张角/(°)
2	1.68	0.44	42
3	1.71	0.46	49
4	1.38	0.53	45
5	1.58	0.39	36
6	1.97	1.32	71

由表 2 可见，当内、外二次风流量同时增加时，回流区长度和宽度都有一定的增加(工况 3 与工况 2 相比)，且气流的扩张角增大。当关闭内二次风时(工况 4)，回流区的长度减小而宽度增加；当关闭外二次风时(工况 5)，回流区的长度和宽度都减小。

2.2.3 冷态试验结果分析

从试验结果来看，旋流型 O₂/CO₂ 煤粉燃烧器出口气流有良好的回流区与扩张角，并且回流区和扩张角可以通过内、外二次风的比例在一定范围内调整。

对于在空气条件下燃烧煤粉，该燃烧器的流场结构与常规旋流燃烧器的流场类似，因此是适合煤粉在空气中燃烧的。而在 O₂/CO₂ 循环燃烧方式进行煤粉燃烧，由于内二次风管是输送纯氧，一次风和外二次风输送 CO₂(或循环烟气)，内二次风气流的旋转可以加速氧气与煤粉的混合，使得煤粉能够在短时间内着火燃烧。而由内、外二次风旋转形成的回流区也有利于着火燃烧的的稳定。

3 O₂/CO₂ 燃烧器燃烧试验

3.1 试验台架及试验条件

煤粉燃烧试验台设计为竖直式，输入热量为 0.3 MW，炉膛高为 8.7 m，内径为 600 mm，用油枪进行预热。旋流型 O₂/CO₂ 燃烧器安装在炉膛顶部，其结构及尺寸与冷态试验完全相同，并可进行空气、O₂/CO₂ 气氛下燃烧方式的切换。整个实验系统包括炉膛、送风机、引风机、O₂ 储罐、CO₂ 储罐、煤粉仓、给粉机、烟气除尘装置以及相关控制仪表和阀门(见图 5)。试验中，在进行空气方式燃烧时，只需开启送风机和引风机，而在 O₂/CO₂ 气氛下燃烧时关闭送风机，将内二次风切换为氧气，一次风和外二次风切换为 CO₂，一次风的体积流量保持不变，外二次中的 CO₂ 流量可以根据燃烧情况进行调节。

试验用煤为某电厂提供的贫煤，煤样的工业分析和元素分析见表 3。试验中在空气的气氛下一次风量为 40 m³/h(标准状态)，内二次风量为 100 m³/h，外二次风量为 160 m³/h。当切换为 O₂/CO₂ 气氛下燃

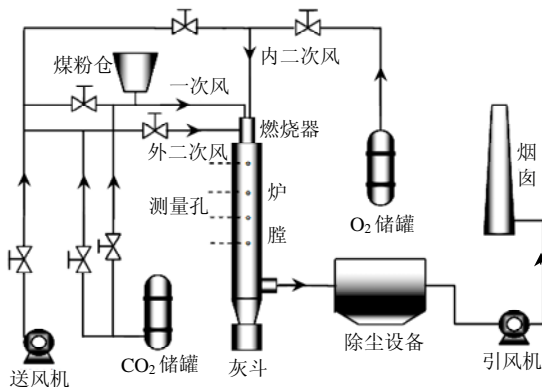
图5 O₂/CO₂循环燃烧试验台系统Fig. 5 Schematic of O₂/CO₂ recycled combustion pilot-scale facility

表3 煤样的工业分析和元素分析

Tab. 3 Coal proximate analysis and ultimate analysis %								
M _{ad}	V _{ad}	A _{ad}	FC _{ad}	C _{ad}	H _{ad}	O _{ad}	N _{ad}	S _{ad}
1.38	14.03	41.90	42.69	47.70	2.74	3.35	0.70	2.23

烧时,一次风管中为CO₂气体,流量为40 m³/h,内二次风管中为O₂,流量为60 m³/h,外二次风管中为CO₂气体,流量为160 m³/h,O₂占整个送入气体的体积分数为23%。

试验时开启送、引风机,先用轻柴油燃烧加热炉膛,当炉膛温度升到1100℃时,投入煤粉混烧,并逐渐减少油枪的油量,直到断油,再按试验工况调整配风,保持煤粉在空气条件下燃烧稳定,然后根据需要进行空气气氛下燃烧试验或切换为O₂/CO₂气氛下进行试验。在空气气氛或O₂/CO₂气氛下当燃烧稳定1h后,用铂铑-铂热电偶从测量孔伸入炉内进行燃烧温度测量,在炉膛出口用英国凯恩公司便携式KM940型烟气分析仪进行O₂浓度分析,用华分赛瑞分析仪器公司SR-2000型红外气体分析仪进行CO₂浓度测定。KM940型分析仪测量O₂浓度范围在0~21%,精度为±0.2%。SR-2000型分析仪测量CO₂浓度范围在0~100%,精度为±1%,测量前用标气进行标定。

由于炉膛的漏风对烟气中的CO₂浓度有直接的影响,若有空气漏入炉内,炉膛出口烟气中的CO₂浓度就会相应降低,而该燃烧试验台设有多个测量孔,因此,在燃烧试验中为了避免外界空气漏入炉膛,炉膛的压力保持在20~50 Pa微正压范围。

3.2 燃烧试验结果与分析

试验中沿炉膛中心的燃烧温度测量结果见图6。由图6可见,O₂/CO₂气氛下,第1测量孔的燃烧温度比空气条件下高100℃以上,第2测量孔的温度也比空气条件下略高,这表明该燃烧器在

O₂/CO₂气氛中煤粉的着火燃烧比在空气中着火燃烧情况要好很多,在现场用肉眼观察可以看见在O₂/CO₂气氛下燃烧器区域火焰更加明亮。

由于煤粉在O₂/CO₂气氛下的燃烧,O₂已经从空气中分离出来,成为高品质的氧化剂,适时进入煤粉周围对煤粉的着火可以起到积极的作用。若按文献[11]和[14]的方法先将O₂与烟气混合,则氧化剂的品质降低,其对煤粉的着火和燃烧的作用都无法与纯氧相比。因此,本文的O₂/CO₂气氛下燃烧,在燃烧器中采用单独的管路输送纯氧,而不是将氧气与CO₂(烟气)混合后进行输送,利用内二次风的气流旋流,将纯氧及时与煤粉混合,虽然氧气的总浓度为23%,但煤粉着火仍提前且燃烧温度较高,而不必达到文献[11]和[14]提出的30%的氧气浓度。炉膛出口的烟气分析表明(见图7),在O₂/CO₂方式下的煤粉燃烧,烟气中的CO₂浓度达到90%以上,为以后采用干燥脱水处理烟气中的CO₂提供了条件。

试验中发现当炉膛处于微负压燃烧时,烟气中的CO₂浓度很难达到90%以上。在微负压条件下由于炉膛存在漏风,炉膛出口烟气中的CO₂浓度降低至78%~85%,其降低的幅度应该与漏风量有关。

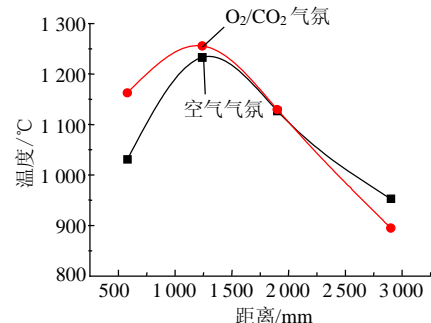
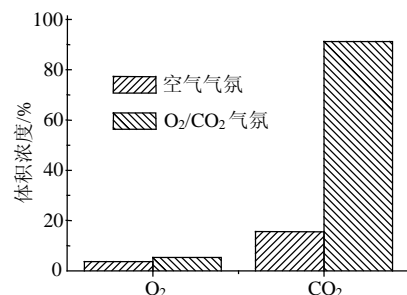


图6 炉膛沿中心线温度分布

Fig. 6 Measured furnace centreline temperature profiles

图7 炉膛出口O₂、CO₂气体分析Fig. 7 Concentration of O₂ and CO₂ in flue gas

4 结论

通过对旋流型O₂/CO₂煤粉燃烧器的流场试验

和燃烧试验研究, 表明该旋流燃烧器的结构合理, 能够形成较好的流场, 满足在空气条件、或 O₂/CO₂ 气氛条件下煤粉的着火燃烧的需要。

在 O₂/CO₂ 方式下的煤粉燃烧, 本燃烧器以单独管道输送纯氧, 对煤粉的着火燃烧十分有利。在炉膛微正压的条件下, 试验中氧气总浓度为 23%, 其着火性能优于空气, 且烟气中的 CO₂ 浓度可以达到 90% 以上。

参考文献

- [1] Kiga T. O₂/RFG combustion-applied pulverised coal fired plant for CO₂ recovery//[M]. Miura T. Advanced Coal Combustion. New York: Nova Science Publishers Inc, 2001: 185-225.
- [2] Wall T, Gupta R, Buhre B, et al. Oxy-fuel (O₂/CO₂, O₂/RFG) technology for sequestration-ready CO₂ and emission compliance [C]. The Clearwater Coal Conference: The 30th International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems, Coal Technology: Yesterday-Today-Tomorrow, Clearwater USA, 2005: 17-21.
- [3] Okawa M, Kimura N, Kiga T, et al. Trial design for a CO₂ recovery power plant by burning pulverized coal in O₂/CO₂[J]. Energy Convers Manage, 1997, 38(Suppl.): S123-S129.
- [4] Herzog H J, Drake E M. Carbon dioxide recovery and disposal from large energy system[J]. Annual Review of Energy and the Environment, 1996(21): 145-166.
- [5] Croiset E, Thambimuthu K V. NO_x and SO₂ emission from O₂/CO₂ recycled coal combustion [J]. Fuel, 2001, 80(14): 2117-2121.
- [6] Liu H, Zailnai R, Gibbs B M. Pulverized coal combustion in air and in O₂/CO₂ mixtures with NO_x recycle[J]. Fuel, 2005, 84(16): 2109-2115.
- [7] 王宏, 董学文, 邱建荣, 等. 燃煤在 O₂/CO₂ 方式下 NO_x 生成特性的研究[J]. 燃料化学学报, 2001, 29(5): 458-462.
Wang Hong, Dong Xuewen, Qiu Jianrong, et al. NO_x formation characteristics of coal in O₂/CO₂ mixture[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2001, 29(5): 458-462(in Chinese).
- [8] 孟德润, 赵翔, 周俊虎, 等. 煤在 O₂/CO₂ 中燃烧的 NO_x 释放规律[J]. 化工学报, 2005, 56(12): 2410-2414.
Meng Derun, Zhao Xiang, Zhou Junhu, et al. NO_x emissions of coal combustion in O₂/CO₂[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering in China, 2005, 56(12): 2410-2414(in Chinese).
- [9] Kiga T, Takano S, Kimura N, et al. Characteristics of pulverized-coal combustion in system of oxygen/recycled flue gas combustion [J]. Energy Convers Manage, 1997, 38(suppl.): S129-S134.
- [10] Yamada T, Kiga T, Okawa M. Characteristics of pulverized-coal combustion in CO₂ recovery power plant applied O₂/CO₂ combustion [J]. JSME International Journal, 1998, 41(4): 1017-1022.
- [11] Liu H, Zailani R, Gibbs B M. Comparisons of pulverized coal combustion in air and in mixtures of O₂/CO₂[J]. Fuel, 2005, 84(7-8): 833-840.
- [12] Chen J C, Liu Z S, Huang J S. Emission characteristics of coal combustion in different O₂/N₂, O₂/CO₂ and O₂/RFG atmosphere [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 142(1-2): 266-271.
- [13] 李庆钊, 赵长遂, 武卫芳, 等. O₂/CO₂ 气氛下煤粉燃烧反应动力学的试验研究[J]. 动力工程, 2008, 28(3): 447-452.
Li Qingzhao, Zhao Changsui, Wu Weifang, et al. Kinetics of pulverized coal combustion under mixed O₂/CO₂ atmospheres [J]. Journal of Power Engineering, 2008, 28(3): 447-452(in Chinese).
- [14] Khare S P, Wall T F, Farida A Z, et al. Factors influencing the ignition of flames from air-fired swirl pf burners retrofitted to oxy-fuel[J]. Fuel, 2008, 87(7): 1042-1049.
- [15] Tan Y, Croiset E, Mark A, et al. Combustion characteristics of coal in a mixture of oxygen and recycled flue gas[J]. Fuel, 2006, 85(4): 507-512.
- [16] Tan Y, Chui E, Douglas M, et al. Oxy-fuel coal burner design: from CFD modeling to pilot scale testing[C]. Proceedings of the 7th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, Edinburgh, Scotland, 2005: 1791-1795.
- [17] Li Guoneng, Zhou Hao, Cen Kefa. Emission characteristics and combustion instabilities in an oxy-fuel swirl-stabilized combustor [J]. Journal of Zhejiang University Science A, 2008, 9(11): 1582-1589.
- [18] Kimura N, Omata K, Kiga T, et al. The characteristics of pulverized coal combustion in O₂/CO₂ mixtures for CO₂ recovery[J]. Energy Convers. Mgmt, 1995, 36(6-9): 805-808.
- [19] Sangras R, Chatel-Pelage F, Pranda P, et al. Oxycombustion process in pulverized coal-fired boilers: a promising technology for CO₂ capture[C]. The 29th international technical conference on coal utilization and fuel systems, Clearwater, Florida, 2004: 18-22.
- [20] Suda T, Masuko K, Sato J, et al. Effect of carbon dioxide on flame propagation of pulverized coal clouds in CO₂/O₂ combustion[J]. Fuel, 2007, 86(12-13): 2008-2015.
- [21] 何佩整, 赵仲虎, 秦裕琨, 等. 煤粉燃烧器设计及运行[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987: 12.
He Peiao, Zhao Zhonghu, Qin Yukun, et al. The design and running of pulverized coal burner[M]. Beijing: China Machine Press, 1987: 12(in Chinese).



丘纪华

收稿日期: 2009-11-20。

作者简介:

丘纪华(1957—), 男, 教授, 从事电站锅炉煤粉燃烧、污染物控制及新型燃烧技术等方面研究, jhqu@mail.hust.edu.cn。

(责任编辑 王庆霞)