

流化床 O₂/CO₂ 燃烧(V) - 褐煤的高氧浓度燃烧优化

赵 科, 谭 力, 段翠九, 吕清刚
(中国科学院工程热物理研究所 北京 100190)

摘 要: 循环流化床在高氧浓度燃烧时, 褐煤的热破碎特性和燃烧特性改变, 为优化褐煤在高氧气浓度下的燃烧, 在 0.15 MW 循环流化床试验系统上研究一次风氧气浓度和二次风流量比例对燃烧稳定性、污染物生成特性和燃烧效率的影响。试验结果表明, 褐煤在一次风氧气浓度 44.3% ~ 55.3%、二次风氧气浓度 43.2% ~ 60.2% 范围内能实现稳定燃烧。不同配风条件下, 煤中氮向 N₂O 的转化率为 4.2% ~ 6.2%, 煤中氮向 NO_x 的转化率为 4.2% ~ 8.3%, 煤中硫向 SO₂ 的转化率 48% ~ 62%。一次风氧气浓度 50.4%、二次风氧气浓度 50.5%、二次风流量比例 40% 为褐煤的燃烧最优工况, 该条件下燃烧效率 94.09%、煤中氮向 N₂O 的转化率为 5.4%、煤中氮向 NO_x 的转化率为 4.2%。

关 键 词: 流化床; O₂/CO₂; 燃烧; N₂O; NO_x

中图分类号: TK16 文献标识码: A

引 言

捕集和储存煤 O₂/CO₂ 燃烧生成的 CO₂, 被认为是近期内减缓 CO₂ 排放较为可行的措施与技术。循环流化床 O₂/CO₂ 燃烧技术在减缓 CO₂ 排放方面具有一系列优势。如能获得高浓度的 CO₂^[1]; 燃料适应广、脱硫成本低; 有利于实现高氧气浓度下的稳定燃烧^[2-3]。而采用较高氧气浓度燃烧, 能减少燃烧室尺寸和再循环烟气风机的能耗。

中国科学院、美国犹他大学、加拿大能源技术中心、东南大学、浙江大学等均开展了循环流化床高氧气浓度下的燃烧试验^[2-7]。中国科学院在 30 kW 循环流化床试验系统上研究了 O₂/N₂ 气氛下燃烧试验 3 个煤种在氧气浓度 33% ~ 35% 时实现安全、稳定、无结焦燃烧^[2]。2011 年中国科学院的 0.15 MW 循环流化床试验系统(以下简称 0.15 MW 系统)调试成功并投入科学研究, 在一次风氧气浓度 49% ~

53%、二次风在氧气浓度 51% ~ 56% 时实现稳定燃烧^[3]。试验结果表明, 氧气浓度提高后, 高挥发煤的热破碎性较空气气氛下增强。同时, 机理试验表明, 氧气浓度对燃烧特性有较大影响^[8-10]。热破碎和燃烧特性的改变, 表明高氧气浓度下的燃烧优化条件与常规空气燃烧存在不同。褐煤是典型的高挥发分、破碎性强煤种, 本研究在 0.15 MW 系统上组织试验, 研究一次风氧气浓度和二次风比例对褐煤的燃烧稳定性、污染物生成特性和燃烧效率的影响, 对褐煤在循环流化床高氧气浓度下的燃烧优化提供借鉴。

1 试验研究

1.1 试验系统

0.15 MW 系统的燃烧室高度 6 000 mm。燃烧室高度 0 ~ 2 000 mm 的直径 100 mm, 2 000 ~ 6 000 mm 的直径 140 mm。二次风口位于 2 000 mm 高处。旋风分离器、返料器、料腿可以选择循环水冷却或绝热, 上述 3 个部件均为绝热。燃烧气氛为 O₂/N₂, 由制氧机产生的氧气和空气混合而成, 制氧机的氧气纯度 83% 以上(其余为氮气)。燃烧室内布置 6 根 K 型热电偶, 分别位于距布风板以上 250、800、1 600、2 500、4 000、5 700 mm 高度处, 烟气中氧气浓度用氧化锆分析仪在线分析, 烟气中其余组分用 GASMET DX4000 分析仪在线分析, 试验系统如文献 [3] 所示。

1.2 试验样品

试验所用燃料为 0 ~ 4 mm 的石沟驿褐煤, 低位发热量为 19.48 MJ/kg, 工业分析及元素分析结果如表 1 所示, 粒径分布如图 1 所示。

收稿日期: 2012-01-05; 修订日期: 2012-10-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(50906084); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KGCX2-YX-399+3); 中国博士后科学基金(20090450578)

作者简介: 赵 科(1979-), 男, 陕西宝鸡人, 中科院工程热物理研究所助理研究员。

表 1 工业分析及元素分析(%)

Tab. 1 Industrial and elementary analysis(%)

工业分析			元素分析					
M _{ar}	A _{ar}	V _{daf}	FC _{ar}	C _{ar}	H _{ar}	O _{ar}	N _{ar}	S _{ar}
9.0	25.87	41.10	38.37	50.43	3.21	0.62	0.62	2.03

1.3 试验工况

试验共进行 6 个工况,各工况下热功率为 0.15 MW、平均氧气浓度约 50%、燃烧室平均温度 830 ~ 900 °C、二次风由距布风板 2 m 处的二次风口加入。研究内容如表 2 所示,各工况的试验条件如表 3 所示,各工况的风量配比如表 4 所示(表中气体流量为标准状态下的流量)。表 2 及表 3 中的一次风氧气浓度、二次风氧气浓度是根据表 4 中空气流量和

氧气流量所得的计算值。

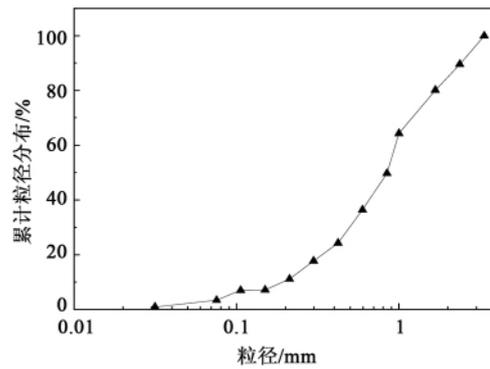


图 1 煤的粒径分布

Fig. 1 Particle diameter distribution of coal

表 2 研究内容

Tab. 2 Research contents

工况	研究内容	试验条件	主要参数
1	一次风氧气浓度对燃烧的影响	一次风氧气浓度 44.3%	平均温度 830 ~ 900 °C、烟气中氧气 3% ~ 7%、二次风流量比例 40%、总风量不变、平均氧气浓度 50%、同时改变一、二次风氧气浓度
2		一次风氧气浓度 50.4%	
3		一次风氧气浓度 55.3%	
4	二次风流量比例对燃烧的影响	二次风流量比例 0%	平均温度 830 ~ 900 °C、烟气中氧气 3% ~ 7%、保持一、二次风氧气浓度约 50%、同时改变一、二次风流量比例
5		二次风流量比例 30%	
6		二次风流量比例 50%	

表 3 各工况的试验条件

Tab. 3 Test conditions for various operating conditions

工况	一次风氧气浓度/ %	一次风温度/ °C	二次风氧气浓度/ %	二次风温度/ °C	返料风氧气浓度/ %	二次风口高度/ m	给煤量/ kg · h ⁻¹
1	44.3	360	60.2	40	20.9	2	29.7
2	50.4	359	50.5	40	20.9	2	27.5
3	55.3	358	43.2	41	20.9	2	27.1
4	50.5	358	0	41	20.9	2	27.1
5	50.4	295	50.6	39	20.9	2	26.4
6	50.6	340	50.3	40	20.9	2	25.6

表 4 各工况的风量配比(m³ / h)

Tab. 4 Air distribution under various operating conditions

工况	一次风空气	一次风氧气	二次风空气	二次风氧气	返料风空气	返料风氧气	总风量
1	22.88	13.80	8.71	15.00	3.25	0	63.64
2	19.05	17.22	12.78	11.58	3.25	0	63.88
3	16.12	19.92	15.63	8.70	3.25	0	63.62
4	31.67	28.80	0	0	3.25	0	63.72
5	22.23	19.98	9.53	8.70	3.25	0	63.69
6	15.88	14.46	15.96	14.34	3.25	0	63.89

2 试验结果与分析

2.1 高氧气浓度燃烧的稳定性的

工况 1 ~ 工况 6 均是石沟驿褐煤在平均氧气浓度约 50% 下的燃烧试验,调节一、二次风氧浓度和一、二次风流量比例。各工况均稳定运行 1 h。各工况下,燃烧室内高度 250、800、1 600、2 500、4 000、5 700 mm 均稳定无波动。工况 3 在本次试验中的一次风氧气浓度最高,以该工况为例,其温度曲线和烟气曲线分别如图 2 和图 3 所示。温度曲线中,10 s 采集一个数据,燃烧室内 6 个温度测点均连续采集 340 个数据,各时刻的温度都在平均温度的 $\pm 20\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内波动。烟气分析数据如图 3 所示,1 min 采集一次数据,连续采集 19 min(烟气分析仪需每 30 min 抽取空气清洗,故不能在整个工况内分析烟气),烟气中 N_2O 、 NO_x 、 SO_2 等均保持稳定。综上所述,褐煤在平均氧气浓度约 50% 下燃烧时,燃烧室每个点的温度稳定、无波动,工况内未发生结焦现象,烟气成份稳定,表明褐煤在平均氧气浓度约 50%、一次风氧气浓度 44.3% ~ 55.3%、二次风氧气浓度 43.2% ~ 60.2% 下可以实现稳定燃烧。

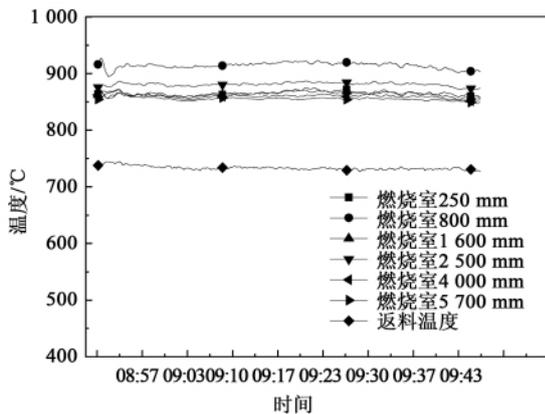


图 2 工况 3 的温度曲线

Fig. 2 Temperature curves at the operating condition No. 3

2.2 燃烧室温度

6 个工况下沿燃烧室高度的温度分布如图 4 所示。可以看出,各工况下沿燃烧室高度的温度相互接近,温度梯度较小,燃烧室内 6 个点的温差为 32 ~ 71 $^\circ\text{C}$ 。本次试验中各工况的平均氧气浓度约 50%,其中一次风氧气浓度 44.3% ~ 55.3%、二次

风氧气浓度 43.2% ~ 60.2%。可见,循环流化床燃烧褐煤时,即使平均氧气浓度提高到 50%、局部氧气浓度提高到 60.2%,仍能保证稳定燃烧,而且燃烧室内温度均匀。主要有两个原因:第一,循环流化床燃烧时,燃烧室内有大量循环物料,燃烧室内传热传质强烈,有利于降低局部高温;第二,系统热惯性大。普通循环流化床内的燃料占 2% ~ 5%,0.15 MW 系统在燃烧神木煤时循环倍率为 17.6,据此估测在试验中循环流化床内的燃料占 5% ~ 10%。相比煤粉炉燃烧,燃料浓度仍降低很多,热惯性较煤粉炉大。由于提高平均氧气浓度能够减小循环流化床燃烧室的尺寸并降低再循环烟气流,将会大幅度降低系统的制造成本和运行成本,这是循环流化床 O_2/CO_2 燃烧的优势。

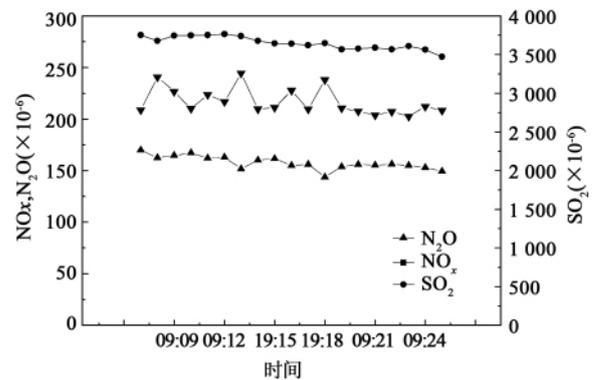


图 3 工况 3 的烟气曲线

Fig. 3 Flue gas curves the operating condition No. 3

值得指出的是,试验的工况中,燃烧室 800 mm 处温度均比燃烧室 250 mm 和燃烧室 1 600 mm 处温度高,主要是由于石沟驿煤的挥发分高达 41.1%;同时,煤从 600 mm 高度处加入,离燃烧室 800 mm 处的温度测点较近。煤加入后,挥发分析出并与一次风中的氧气燃烧,造成局部高温,导致所有工况燃烧室 800 mm 处的温度偏高。由于配风不同,燃烧室 800 mm 处高出的数值有所差异。工况 1、2 高出约 30 $^\circ\text{C}$,工况 3、4、6 高出 40 ~ 50 $^\circ\text{C}$,工况 5 甚至高出 71 $^\circ\text{C}$ 。工况 5 结束后,排渣并未发现焦块,但考虑到局部高温容易导致结焦,燃烧高挥发分燃料时应尽量避免工况 5 的风量配比。

2.3 各工况 CO 生成量

不同工况下的 CO 生成量如图 5 和表 5 所示。工况 1 的 CO 排放量较高,达 1 482 mg/MJ,由图 5 可以看出,燃烧室 5 700 mm 处温度均为 855 ~

888℃ 烟气中氧气浓度也与其它工况接近, 可以认为由于一次风氧气浓度偏低, 细煤粉没有充足氧气燃烧就进入稀相区, 但 0.15 MW 系统的停留时间较短, 细煤粉未燃尽就排出燃烧室, 导致 CO 偏高。工况 2~6 燃烧充分, CO 仅 22~62 mg/MJ。实际循环流化床中, 停留时间 4~6 s, CO 浓度会较工况 2~6 进一步降低。

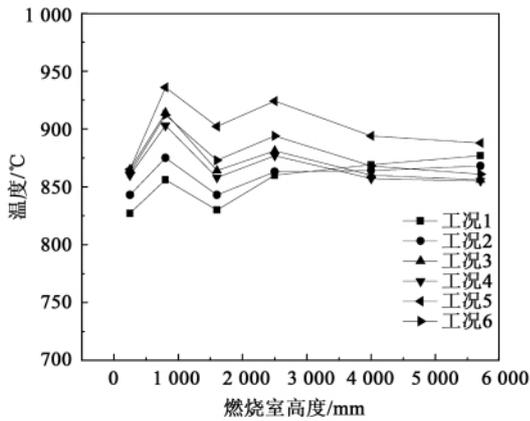


图 4 各工况沿燃烧室高度的温度分布

Fig. 4 Temperature distribution along the height of the combustion chamber under various operating conditions

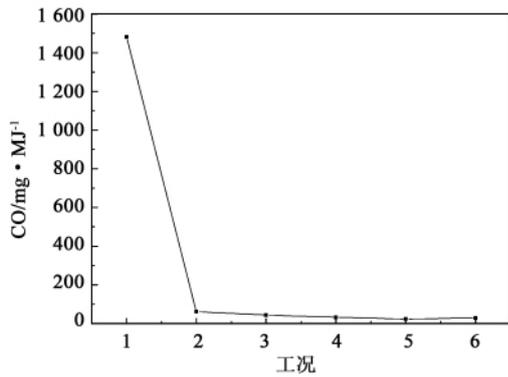


图 5 各工况下 CO 生成量

Fig. 5 CO production quantity under various operating conditions

2.4 飞灰含碳量及燃烧效率

本次试验的飞灰含碳量及燃烧效率如表 6 所示。由表可知, 飞灰含碳量 10.1%~18.53%, 燃烧效率 90.07%~95.1%。工况 3 的飞灰含碳量仅 10.1%, 燃烧效率 95.1%, 对比风量配比、温度特性和烟气分析数据可以看出, 工况 3 的一次风氧气浓度为 55%, 从风量配比看, 提高一次风氧气浓度, 有助于提高燃烧效率。

表 5 烟气成份(mg/MJ)

Tab. 5 Composition of the flue gas(mg/MJ)

工况	CO ₂ /%	CO	N ₂ O	NO _x	SO ₂	O ₂ /%
1	44.4	1482	21	67	996	3.6
2	42.9	62	27	44	1130	4.2
3	40.7	43	31	44	1040	4.9
4	42.8	32	26	46	1138	3.9
5	40.2	22	24	87	1245	6.1
6	37.7	28	22	71	1273	6.8

表 6 飞灰含碳量及燃烧效率

Tab. 6 Carbon content of the flying ash and combustion efficiency

工况	飞灰含碳量 /%	燃烧效率 /%
1	18.53	90.07
2	11.92	94.09
3	10.10	95.10
4	13.22	93.35
5	14.08	92.85
6	15.50	91.99

2.5 SO₂ 生成量

各工况下 SO₂ 生成量如图 6 所示。整体而言, 配风对 SO₂ 生成量影响较小, 煤中硫向 SO₂ 的转化率为 48%~62% (SO₂ 生成量为 996~1273 mg/MJ)。煤燃烧时, SO₂ 生成量主要受煤中硫含量和煤灰的自脱硫影响, 本研究用褐煤的硫含量高达 2.03%, 煤自身的 Ca/S 较低, 所以各工况下 SO₂ 生成量接近。相比之下, 工况 1 的 SO₂ 生成量较其它工况低, 主要是由于工况 1 的燃烧效率偏低, 部分硫残留在飞灰中。

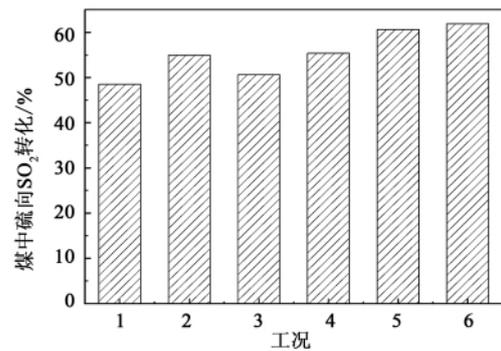


图 6 SO₂ 生成量

Fig. 6 SO₂ production quantity

2.6 NO_x 和 N₂O 生成量

一次风氧气浓度对 NO_x 和 N₂O 的影响如图 7 所示。为方便讨论,定义煤中氮向 NO_x 的转化率 (CR_{N→NO_x}) 和煤中氮向 N₂O 的转化率 (CR_{N→N₂O}) 如式 (1) 和 (2) 所示。本试验中,保持二次风流量比例 40%,增大一次风氧气浓度并减小二次风氧气浓度,以确保总风量和平均氧气浓度不变。可见,一次风氧气浓度在 44.3% ~ 55.3% 变化时,CR_{N→N₂O} 随一次风氧气浓度增大而接近线性增大。一次风氧气浓度由 44.3% 增加到 55.3%,CR_{N→N₂O} 由 4.2% 增加到 6.2%。和空气燃烧不同,循环流化床 O₂/CO₂ 燃烧中,可以选择较低一次风氧气浓度,有助降低 CR_{N→N₂O}。CR_{N→NO_x} 在一次风氧气浓度 44.3% 时最高,为 6.4%,浓度 50.4% ~ 55.3% 范围内 CR_{N→NO_x} 基本保持在 4.2%。综合考虑 NO_x 和 N₂O 排放,一次风氧气浓度 50.4% 时最优。

$$CR_{N \rightarrow NO_x} = \frac{\text{烟气中 NO}_x \text{ 的氮的质量}}{\text{煤中氮的质量}} \times 100 \% \quad (1)$$

$$CR_{N \rightarrow N_2O} = \frac{\text{烟气中 N}_2\text{O 的氮的质量}}{\text{煤中氮的质量}} \times 100 \% \quad (2)$$

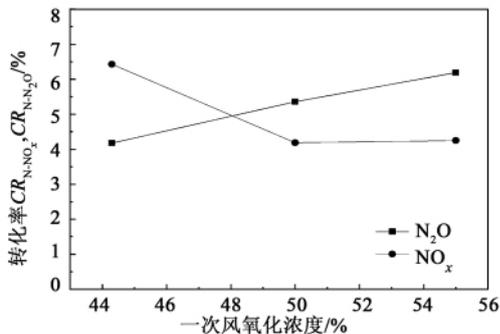


图 7 一次风氧气浓度对 NO_x 和 N₂O 的影响
Fig. 7 Effect of the oxygen concentration of the primary air on NO_x and N₂O

由图 7 可知,一次风氧气浓度 50% 时排放最优。因此,选择该氧气浓度,研究不同二次风流量比例对排放的影响,结果如图 8 所示。二次风流量比例对 N₂O 影响不明显,二次风流量由 0 ~ 50% 变化时,CR_{N→N₂O} 在 4.3% ~ 5.4%。但是,对 NO_x 影响较大,二次风流量为 0 和 40% 时较低,分别为 4.4% 和 4.2%。二次风流量 30% 时最高,为 8.3%。

综上所述,工况 2 的燃烧室温度较均匀,250 ~

5 700 mm 的 6 个温度测点的温差仅 31℃; CO 排放较低,为 61 mg/MJ; 燃烧效率较高,达到 94.09%; NO_x 和 N₂O 的总体排放较低,CR_{N→N₂O} 为 5.4%, CR_{N→NO_x} 为 4.2%。即,工况 2 的风量配比(一次风氧气浓度 50.4%、二次风氧气浓度 50.5%、二次风流量比例 40%) 为高氧气浓度下燃烧褐煤时较理想的条件。

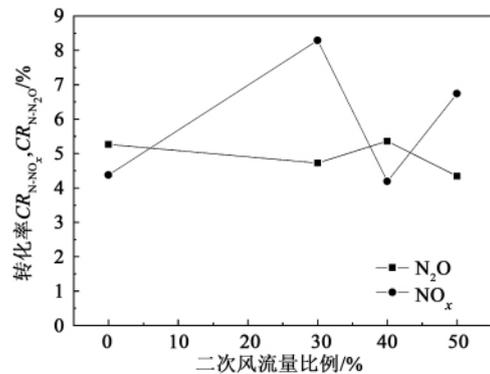


图 8 二次风流量比例对 NO_x 和 N₂O 的影响
Fig. 8 Effect of the proportion of the flow rate of the secondary air on NO_x and N₂O

3 结 论

高氧浓度下褐煤的热破碎特性和燃烧特性改变,为优化褐煤在高氧气浓度下的燃烧,在 0.15 MW 系统上进行了褐煤在高氧气浓度下燃烧试验,得到以下结论:

(1) 褐煤能在一次风氧气浓度 44.3% ~ 55.3%、二次风氧气浓度 43.2% ~ 60.2% 条件下实现稳定燃烧,温度、压力和烟气中各组分浓度在工况内稳定,各工况内未发生结焦现象。

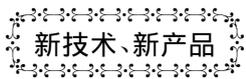
(2) 褐煤在不同配风条件下,燃烧室内温度梯度较小,燃烧室内温差 32 ~ 71℃,CO 可以达到 22 ~ 62 mg/MJ,飞灰含碳量 10.1% ~ 18.53%,燃烧效率 90.07% ~ 95.1%,煤中氮向 N₂O 的转化率 4.2% ~ 6.2%,煤中氮向 NO_x 的转化率 4.2% ~ 8.3%,煤中硫向 SO₂ 转化率 48% ~ 62%。

(3) 褐煤在一次风氧气浓度 50.4%、二次风氧气浓度 50.5%、二次风流量比例 40% 为最优工况,燃烧室内温差仅 32℃,燃烧效率 94.09%,N₂O 中氮的产率为 5.4%,NO_x 中氮的产率为 4.2%。

参考文献:

- [1] Buhre B J P ,Elliott L K ,Sheng C D ,et al. Oxy-fuel combustion technology for coal-fired power generation [J]. Progress in Energy and Combustion Science 2005 31 (4) :283 - 307.
- [2] 赵 科 ,吕清刚 ,段翠九. 流化床 O₂/CO₂ 燃烧(I) -高氧浓度下的燃烧实验 [J]. 热能动力工程 2011 26(4) 453 - 456.
ZHAO Ke ,LU Qing-gang ,DUAN Cui-jiu ,et al. O₂/CO₂ combustion on a fluidized bed (I) -Combustion experiment at a high oxygen concentration [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power 2011 26(4) 453 - 456.
- [3] 赵 科 ,段翠九 ,谭 力 等. 流化床 O₂/CO₂ 燃烧(II) -高氧浓度的中试研究[J]. 热能动力工程 ,2012 27(3) :350 - 354.
ZHAO Ke ,DUAN Cui-jiu ,TAN Li ,et al. O₂/CO₂ combustion on a fluidized bed (II) - Pilot study at a high oxygen concentration [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power 2012 , 27(3) :350 - 354.
- [4] Ahn J ,Okerlund R ,Fry A ,et al. Sulfur trioxide formation during oxy-coal combustion [J]. International Journal of greenhouse gas control 2011 5 S127 - S135.
- [5] Jia L ,Tan D ,McCalden Y ,et al. Commissioning of a 0. 8 MWth CFBC for oxy-fuel combustion [C] //Proceedings of the 10th international conference on circulating fluidized beds and fluidization technology -CFB-10. Engineering Conferences International: Sunriver 2011: 569 - 576.
- [6] 段伦博 ,周 鹭 ,屈成锐 ,等. 50 kW 循环流化床 O₂/CO₂ 气氛下煤燃烧及污染物排放特性 [J]. 中国电机工程学报 2011 31 (5) :7 - 12.
DUAN Lun-bo ,ZHOU Wu ,QU Cheng-rui ,et al. Combustion and pollutant emissions characteristics of coal in a 50 kW circulating fluidized bed under O₂/CO₂ atmosphere [J]. Proceedings of Chinese Electric Machinery Engineering 2011 31(5) :7 - 12.
- [7] 毛玉如 ,方梦祥 ,骆仲决 等. 富氧气氛下循环流化床煤燃烧试验研究 [J]. 燃烧科学与技术 2005(2) :188 - 191.
MAO Yu-ru ,FANG Meng-xiang ,LUO Zhong-yang ,et al. Experimental study of the combustion of coal in a circulating fluidized bed in an oxygen-enriched atmosphere [J]. Combustion Science and Technology 2005(2) :188 - 191.
- [8] Kazanc F ,Khatami R ,Crnkovic P ,et al. Emissions of NO_x and SO₂ from coals of various ranks ,bagasse ,and coal-bagasse blends burning in O₂/N₂ and O₂/CO₂ environments [J]. Energy & Fuel , 2011 25(7) :2850 - 2861.
- [9] Brix J ,Jensen P ,Jensen A. Coal devolatilization and char conversion under suspension fired conditions in O₂/N₂ and O₂/CO₂ atmospheres [J]. Fuel 2010 89(11) :3373 - 3380.
- [10] Huang X ,Jiang X ,Han X ,et al. Combustion characteristics of fine-and micro-pulverized coal in the mixture of O₂/CO₂ [J]. Energy & Fuel 2008 22(6) :3756 - 3762.

(辉 编辑)



GE Energy 的 50 MW 级 Flex Aero LM6000 - PH

据《Gas Turbine World》2012 年度手册报道,GE 公司 LM6000 生产系列,GE Energy 的 50 MW 级 Flex Aero LM6000-PH 代表最先进的技术。

对于简单循环, Flex Aero LM6000-PH 额定总输出功率为 51 MW,效率为 42. 6%,对于该级燃气轮机来说,这是突破性的效率。

联合循环额定净输出功率的范围从 1 + 1 配置(1 台 Flex Aero LM6000-PH 加 1 台汽轮机)的 65 MW 到 2 + 1 配置(2 台 flex Aero LM6000-PH 加 1 台汽轮机)的 130 MW 以上,效率可高达 54%。

对于工业 CHP(冷热电联产)项目,较高的排气温度 480 ℃和排气流量 136. 1 kg/s 可使联产效率高达 84%。

前二代 LM6000 是基于最先进的 CF6-80C2 航空涡轮风扇发动机。对于第三代 LM6000,CF6-80E 和 GE90 航空涡轮风扇发动机的材料和技术升级和改进是达到高输出功率和性能的关键。

(吉桂明 摘译)

that measured by using a laser Doppler particle analyzer (PDPA) . It has been found that when the particle diameter of the liquid drop in the sparse phase zone along the radial direction has little change and is irrelative to the particle velocity ,the corrected LHF model can predict the liquid drop velocity in the lower reaches of the flow field atomized. With an increase of the axial length of the mist torch ,the predicted values of the liquid drop velocities in both atomization center and rim are more and more close to the test values. **Key words:** effervescent atomization ,liquid drop velocity ,prediction model

气液两相横向绕流错列管束上阻力系数和阻力脉动系数的试验研究 = **Experimental Study of the Resistance Coefficient and Fluctuation Coefficient of a Staggered Tube Bundle Laterally Going Around by a Gas-liquid Two-phase Flow** [刊 汉]SU Xin-jun (Tianjin City Key Laboratory on Refrigeration Technology ,Tianjin Commerce University ,Tianjin ,China ,Post Code: 300134) ,WANG Dong ,LIN Zong-hu(National Key Laboratory on Multiphase Flow in Power Engineering ,Xi'an Jiaotong University ,Xi'an ,China ,Post Code: 710049) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013 28(2) . - 154 ~ 157

By using a resistance strain meter and a beam type resistance strain sensor ,experimentally studied were the resistance coefficient and fluctuation resistance coefficient of a staggered tube bundle in three tows laterally swept by a gas-liquid two-phase flow. Organic glass cylinders with a diameter of $\phi 30$ mm were used as the tubes for testing ,the flow pattern of the gas-liquid two-phase flow was of cell shape and the Reynolds number of the two-phase gas flow was within a range from 2.0×10^4 to 6.0×10^4 with the void fraction in the section ranging from 0 to 0.30. It has been found from the test that with an increase of the void fraction and the Reynolds number ,the fluctuation resistance coefficient of the cylinders will decrease while the resistance coefficient of the staggered cylinders will increase with an increase of the void fraction. **Key words:** gas-liquid two-phase flow ,fluctuation resistance coefficient ,gap flow ,staggered cylinder

流化床 O_2/CO_2 燃烧(V) - 褐煤的高氧浓度燃烧优化 = **O_2/CO_2 Combustion in a Fluidized Bed(V) -Optimization of Lignite Combustion at a High Oxygen Concentration** [刊 汉]ZHAO Ke ,TAN Li ,DUAN Cui-jiu , et al(Engineering Thermophysics Research Institute ,Chinese Academy of Sciences ,Beijing ,China ,Post Code: 100190) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013 28(2) . - 158 ~ 163

When combustion at a high oxygen concentration takes place in a circulating fluidized bed ,the thermal fragmentation and combustion characteristics of lignite will change. To optimize the combustion of lignite at a high oxygen concentration ,the influence of the primary air oxygen concentration and the secondary air flow proportion on the combustion stability ,pollutant formation characteristics and combustion efficiency was studied in a 0.15 MW circulating fluidized bed test system. The test results show that lignite can realize a stable combustion when the oxygen concen-

tration of the primary air ranges from 44.3% to 55.3% and that of the secondary air is between 43.2% and 60.2%. Under the condition of different air distributions, the conversion rate of the nitrogen in the coal to N_2O is in a range from 4.2% to 6.2% while that of the nitrogen to NO_x ranges from 4.2% to 8.3% and that of the sulfur in the coal to S_2O is between 48% and 62%. When the oxygen concentration of the primary air is 50.4%, that of the secondary air is 50.5% and the flow proportion of the secondary air is 40%, such a case is regarded as the optimum operating condition for lignite, under which the combustion efficiency will be 94.09%, the conversion rate of nitrogen in the coal to N_2O 5.4% and that to NO_x 4.2%. **Key words:** fluidized bed, O_2/CO_2 , combustion, N_2O , NO_x

液体正庚烷在微细直管燃烧器中的燃烧特性研究 = **Study of the Combustion Characteristics of Liquid N-heptane in a Tiny Straight Tube Type Burner** [刊, 汉] ZHAO Jun-ying, LI Jun-wei, HUANG Jin-huai, et al (College of Astronautics, Beijing University of Science and Technology, Beijing, China, Post Code: 100081) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013, 28(2). - 164 ~ 170

To learn the flame extinction and diffusion characteristics of liquid fuel in a micro space, various sleeve tubes and porous media were used. In a tiny straight tube, the diffused flame of heptane was experimentally studied. The research results show that with an increase of the flow rate of heptane, the stable location of the flame will gradually move to the outlet of the straight tube type burner, the flammable limits will first become wide at a high speed and then tend to be constant. To increase the number of the sleeve tubes can effectively expand the flammable limits and the structure of the sleeve tubes has a big influence on the flame stability and flammable limits. The more the number of the sleeve tubes, the smaller the heat quantity released from the burner. In addition, the location of the porous medium influences greatly the flame stability. When the nozzle of heptane is placed at the upper reaches of the porous medium or in it, the evaporation and mixing effectiveness of liquid heptane will be the best, thus obtaining a better oxygen-enriched combustion limit. **Key words:** tiny straight tube, n-heptane, combustion, flame stability, porous medium

“煤拔头”工艺快速热解产物分布的实验研究 = **Experimental Study of the Distribution of Products Quickly Pyrolyzed in the “Coal-topping” Process** [刊, 汉] JIN Qi-long, WANG Wen-yu, WU Shao-hua (Combustion Engineering Research Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), LUAN Ji-yi (Mechanical Engineering College, Jiamusi University, Jiamusi, China, Post Code: 154007) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013, 28(2). - 171 ~ 176

On a small coal topping test stand, simulated was the coal topping process and experimentally studied was the distribution of products quickly pyrolyzed from the following three types of typical coal, namely, Grade No. 6 coal, coal fed into a furnace for coal gas production and oil shale rock originated from Yilan County of Heilongjiang Province. The