

煤气化半焦增压流化床燃烧特性中试试验研究

熊源泉¹, 郑守忠², 金保升¹, 肖 睿¹

(1. 东南大学热能工程研究所洁净煤发电及燃烧技术教育部重点实验室, 江苏 南京 210096;

2. 中国水利电力物资有限公司, 北京 100053)

摘 要: 在热输入为 1 MW 增压流化床燃烧中试试验装置上, 对加压煤部分气化得到的气化半焦进行了加压燃烧试验研究。试验结果表明, 煤气化半焦增压流化床燃烧中试装置的各分系统设计合理, 全系统能协调、稳定运行。在燃烧室压力 0.5 MPa, 燃烧温度 900 °C, 过剩空气系数 1.2~1.3, 流化速度 1.1~1.2 m/s 条件下, 半焦的燃烧效率达到 99% 以上, 飞灰含碳量在 2% 以下; 此外, 还发现适当提高半焦燃烧的床温和一个适宜的空气过剩系数有利于半焦的充分、稳定燃烧, 而飞灰循环对提高半焦燃烧效率非常有益。

关 键 词: 半焦; 燃烧; 增压流化床; 煤部分气化; 床温

中图分类号: TQ534 文献标识码: A

引 言

我国能源在未来很长一段时间内仍将是煤炭为主的格局, 但煤炭直接燃烧不仅能量转换率低, 而且污染较为严重。为了提高煤炭的利用效率和保护环境, 人们很早就开始研究煤气化技术, 国际上最具代表和潜力的 IGCC 技术已经达到了工业示范水平, 但由于系统复杂和成本高等因素, 使得煤气化技术发展进程相当缓慢。20 世纪 80 年代初英国煤炭研究所(CRE)首先提出空气鼓风部分气化联合循环(ABGC)发电技术路线, 即将煤在增压流化床气化炉中进行部分气化, 气化后的低热值煤气经过冷却除尘后, 进入燃烧室燃烧产生 1 100~1 300 °C 高温烟气, 进入燃气轮机发电, 充分发挥燃气循环部分的优势, 燃气轮机发电比例达到 40%~50%。部分气化产生的半焦则进入增压或常压流化床锅炉燃烧, 联合循环发电效率将达到 45%~48%, 该系统显示出非常好的工业应用前景。因此, 半焦燃烧特性研究成为煤炭部分气化、半焦循环流化床锅炉燃烧组成的燃气蒸汽联合循环发电系统的重要组成部分。

半焦是一种和煤炭、焦炭等传统燃烧性质相差很大的固体物质, 是由多种组分组成的混合物。相

对煤炭而言, 半焦具有高灰分、低挥发份、高含碳量、难以燃烧和发热量低的特点。目前, 国内外的研究者在半焦燃烧的流体力学、半焦着火和燃烧特性、以及半焦燃烧的数学模型方面均作了一些相关的试验和理论研究^[1~12], 得出了一些有价值的结论。但由于半焦形态的多样性和燃烧反应的复杂性等因素, 对半焦着火特性和燃烧机理的研究主要还是集中在静态试验研究的基础上, 较大规模或中试规模的试验研究十分稀少。针对当前半焦燃烧研究的现状, 本文依托东南大学“973”项目中试试验系统——1 MW 半焦增压流化床燃烧装置对煤部分气化后的半焦直接送入增压流化床内的燃烧特性进行研究, 以期为我国未来煤炭部分气化、半焦循环流化床锅炉燃烧组成的燃气蒸汽联合循环发电系统工程化提供有力的参考数据和技术支持。

1 试验系统和试验条件

1.1 煤部分气化半焦的生成

半焦的生成是在热输入 2 MW 煤的加压部分气化试验装置上制得的。试验采用徐州烟煤, 属非粘结性烟煤。工业与元素分析如表 1 所示。试验用煤粒径范围为 0~5 mm, 平均粒径为 1.95 mm。启动时床料采用燃煤流化床锅炉排出的底渣, 底渣粒径为 0~6 mm。表 2 为气化试验工况参数。

表 1 煤的工业分析和元素分析

M _t	工业分析/%			LHV/MJ·kg ⁻¹	
	A _{ad}	V _{ad}	C _{ad}		
3	22.79	27.83	46.28	23.54	
元素分析/%					
C _{ar}	H _{ar}	O _{ar}	N _{ar}	S _{ar}	A _{ar}
59.71	3.78	9.05	1.08	0.58	22.79

收稿日期: 2006-07-11; 修订日期: 2006-11-24

基金项目: 国家重点基础研究基金资助项目(G 199902210535; 2004CB217702-03)

作者简介: 熊源泉(1966-)男, 江西泰和人, 东南大学副教授

表 2 气化试验工况参数

	1 号	2 号	3 号
操作压力/MPa	0.5	0.5	0.5
床层温度/℃	950	980	950
给煤量/kg·h ⁻¹	316.8	330	330
蒸汽流量/kg·h ⁻¹	100	100	143
蒸汽压力/MPa	0.8	0.8	0.8
蒸汽温度/℃	350	350	270
总空气量/m ³ ·h ⁻¹	508	534	516
流化风量/m ³ ·h ⁻¹	198	203	163
空气温度/℃	290	300	270
空气压力/MPa	0.60	0.63	0.63
静止床层高/m	2.1	2.7	3.6
碳转化率/%	70.1	68	68.6

气化试验中, 气化炉炉渣含碳量基本达到稳定值, 煤气热值和成份基本稳定, 实际碳转化率为 68.6%~72.1%, 得到的半焦(包含气化炉的排渣和

飞灰的含碳量)热值在 14.8 MJ/kg 左右。

1.2 1 MW 半焦增压流化床锅炉(PFB)燃烧试验系统及试验条件

1.2.1 试验装置

图 1 为 1 MW 半焦增压流化床锅炉(PFB)燃烧试验系统流程图, 主要由以下几个部分组成: 增压流化床燃烧室、半焦添加锁斗系统、灰渣排放系统、飞灰排放系统、快加排系统和测量控制系统。增压流化床燃烧室采用飞灰低倍率循环鼓泡流化床燃烧方式, 密相区下部断面积 460 mm×400 mm, 自由空间区断面积 500 mm×750 mm, 设计压力 0.8 MPa, 自由空间高度 5700 mm。燃烧室为双层设备, 外层压力壳(直径 2 m, 高 12 m), 内部为带有砖墙的燃烧室, 下部设有风室和布风板。半焦由燃烧室底部加入, 渣由燃烧室底部排出。燃烧室内设有水冷埋管模拟锅炉受热面。各关键部位均装有温度、压力、压差、流量测点, 采用数据巡测系统采集数据, 采集温度信号 24 点, 压力信号 14 点, 压差信号 8 点, 流量信号 8 点, 转速信号 2 点。

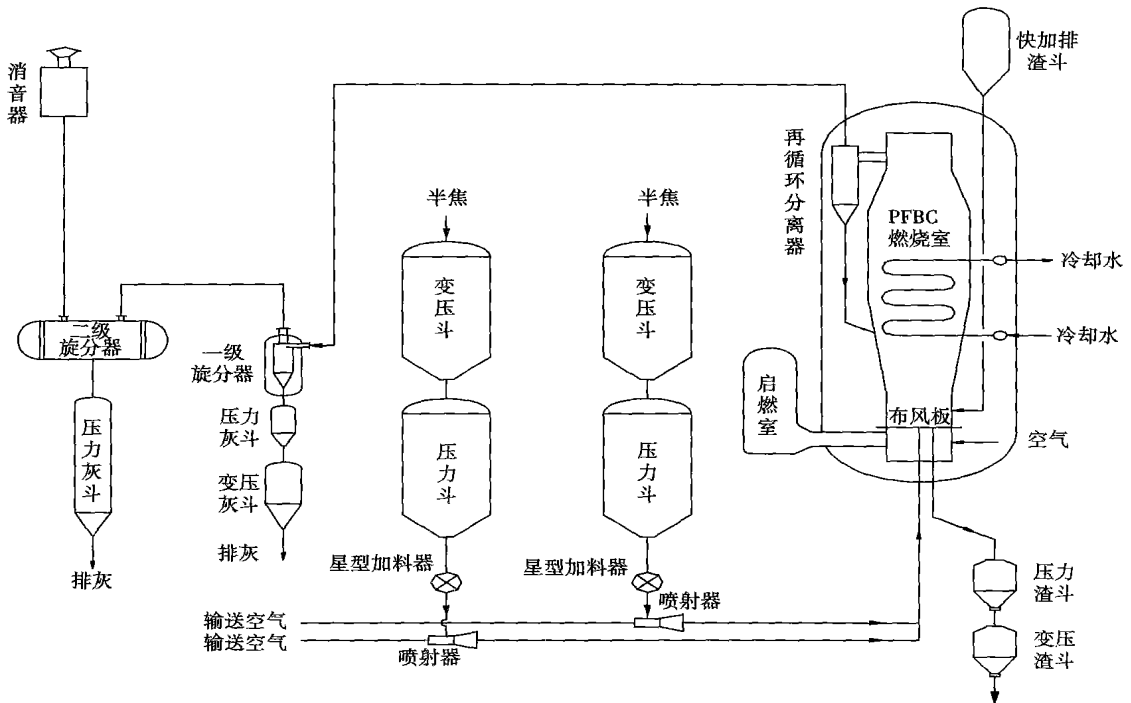


图 1 1 MW 增压流化床锅炉(PFB)试验装置系统图

1.2.2 试验物料

试验采用经煤加压部分气化后的半焦(炉渣和除尘器下的细粉), 半焦平均热值在 14.8 MJ/kg 左右。表 3、表 4 和表 5 分别为入炉半焦的工业分析数

据、元素分析数据和半焦粒径的筛分数据。流化床床料采用燃煤流化床锅炉排出的底渣, 底渣粒径为 0~6 mm。表 6 为增压流化床床料各组分的成份分析。

表3 半焦工业分析数据 (%)

W_y	V_y	C_y	A_y	$Q_{1'}/MJ \cdot kg^{-1}$
1.65	3.2	47.8	47.3	14.83

表4 半焦元素分析数据 (%)

元素分析				
C_{ad}	H_{ad}	O_{ad}	N_{ad}	S_{ad}
56.54	3.71	8.31	0.87	0.48

表5 半焦粒径分析

粒径/mm	0.1	0.17	0.355	0.6	1.0	1.43	2.0	2.5	3.0	> 3.0
重量比/%	0.15	1.15	8.14	6.65	12.95	10.31	14.89	9.22	13.46	23.08

表6 床料成份组成分析 (%)

$w(SO_2)$	$w(Al_2O_3)$	$w(Fe_2O_3)$	$w(CaO)$	$w(MgO)$	$w(K_2O)$	$w(Na_2O)$	$w(\text{全硫})$	$w(\text{烧失量})$
66.25	23.23	5.44	0.75	0.94	1.52	0.42	0.03	0.46

1.2.3 试验过程

启动时,通过启动燃烧室产生的热烟气将床料加热到460℃时投煤,炉温在10~15min内从460℃上升到900℃左右。当燃烧稳定后,气化炉升压至试验工况0.5MPa,系统达到稳定后,逐渐投入半焦,并相应减少投煤量直至完全关闭煤给料器。煤和半焦通过气力输送送入增压流化床内,流化风和气力输送风量由孔板流量计计量,风量、温度和压力参数联入计算机采集系统,各参数修正在计算机内完成。半焦燃烧试验产生的飞灰实行循环再燃。烟气经过一、二级旋风分离器除尘后取样,排出的固体物料,如渣、飞灰等一同送化验室分析。整个半焦燃烧试验过程炉内温度变化如图2和图3所示。

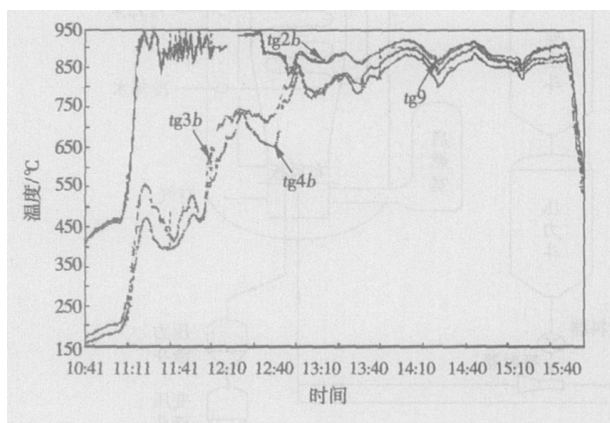


图2 工况一床温变化曲线(t_{g9} 和 t_{g2b} 在密相区内)

焦燃烧试验床温实时变化曲线。 t_{g9} 、 t_{g2b} 、 t_{g3b} 、 t_{g4b} 的温度分别位于流化床布风板风帽上70mm、570mm、1760mm、2400mm,热电偶插入深度为距炉内壁160mm。表7为半焦燃烧试验工况及试验结果,从表7中数据可以看出,两次试验静止床在1.4~1.6m之间,流化后床层高度约在1.7~2.0m之间。

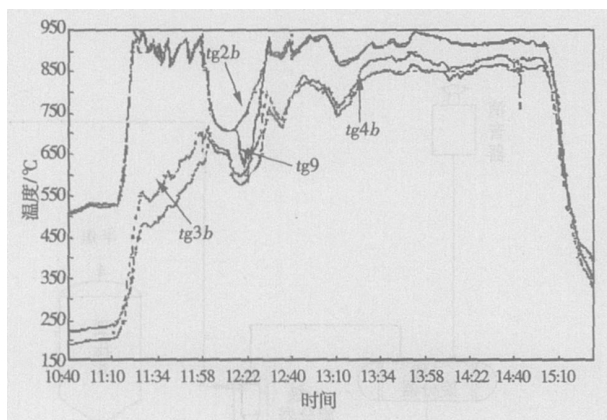


图3 工况二床温变化曲线(t_{g9} 和 t_{g2b} 在密相区内)

2 试验结果与分析

系统整体调试结束后,进行了2次半焦加压流化床燃烧行为的试验研究,第一次稳定运行约5h,第二次运行约4h,主要考察煤部分气化半焦燃烧系统的可靠性、稳定性和半焦的燃烧性能。图2和图3为半

从试验的过程来看,试验初始投入半焦时,床温有一定波动,见图2中第一次试验时间约12:50时刻(注:图3第二次试验中时间从12:00~12:30之间的温度下降是半焦气力输送系统堵塞导致的),整体床温下降50℃左右。这说明在半焦燃烧的过程中,初始床温宜适当抬高些,以利于煤/焦切换时温度波动带来对半焦燃烧稳定性的影响。两次试验的主要结果如表7所示。从图2和图3可以看出,第一次试验由于床层相对较高,从 $t_{g9} \sim t_{g4b}$ 温度相差不大(相差约20~30℃);而第二次试验由于床层相对较低一点,从 $t_{g9} \sim t_{g4b}$ 温度相差大一些(相差约50~70℃)。总体来说,流化床内密相区温度分布相对均匀一致,表明床内处于良好的流化状态。

表 7 1 MW PFBC 半焦燃烧试验工况及结果

	1号	2号
工		
工作压力/MPa	0.5	0.5
床层温度/℃	890	920
半焦加入量/kg ^o h ⁻¹	155~160	165
空气流量/m ³ h ⁻¹	870	890
流化速度/m ^o s ⁻¹	1.15	1.20
空气过剩系数	1.2~1.34	1.35
况		
烟气含氧量/%	3~5	5.2
流化床层高度(静止)/m	1.6	1.4
半焦热值/MJ ^o kg ⁻¹	14.8	14.8
结		
飞灰含碳量/%	1.39~1.69	1.13~1.55
炉渣含碳量/%	0.8	0.85
果		
燃烧效率/%	99.02	99.2

从表 7 中的燃烧效率来看, 两次半焦燃烧试验的燃烧效率都很好, 均达到 99% 以上, 飞灰含碳量在 2% 以下, 达到或超过了英国煤炭研究所 (CRE) 空气鼓风机部分气化联合循环 (ABGC) 发电系统中半焦流化床锅炉燃烧中试规模 99% 的燃烧效率。这说明本文研究的增压流化床半焦燃烧试验取得了非常满意的效果, 达到了理想的指标。此外, 飞灰循环再燃对半焦整体燃烧效率的提高带来了可靠的保证, 试验中发现飞灰循环投入对改善流化床内温度和降低飞灰含碳量大大有益, 而且对于将来 CaS 在燃烧过程中转为稳定的 CaSO₄ 也会有很好的帮助。

从表 7 还可以发现, 尽管第一次半焦燃烧试验流化床层高度为 1.6 m, 而第二次流化床层高度为 1.4 m, 第一次流化床层高度比第二次高出约 15%, 而第二次试验流化风速比第一次高出约 4.3% (试验流化风速见表 7)。但是, 第一次半焦燃烧试验的飞灰含碳量为 1.39%~1.69%, 而第二次飞灰含碳量为 1.13%~1.55%, 第一次飞灰含碳量比第二次高出约 8.3%~18.7%, 整体燃烧效率第一次比第二次也低 0.18 个百分点。引起这一结果, 其一是因为第一次半焦燃烧试验流化床内温度约 890 ℃, 而第二次为 920 ℃, 第二次床温比第一次高出 30 ℃; 其二是因为第二次空气过剩系数也相对大些, 引起了半焦的充分燃烧。这说明在一个合理的温度范围内, 相对较高的床温和适宜的过剩空气系数有利于半焦的充分燃烧。

3 结 论

(1) 本文半焦燃烧中试装置各分系统设计合理, 全系统能协调稳定运行。预计系统中大部分的设备配置、操作运行方式、工况参数可以直接提供今后工业试验装置作为借鉴。

(2) 半焦燃烧试验条件: 燃烧室压力 0.5 MPa,

燃烧温度 900 ℃, 过剩空气系数 1.2~1.3, 流化速度 1.1~1.2 m/s, 静止床高 1.5 m 左右, 半焦燃烧获得成功, 半焦的燃烧效率达到 99% 以上, 飞灰含碳量在 2% 以下。

(3) 试验研究表明: 半焦燃烧的过程中, 初始床温建立宜适当抬高些 (约在 920~930 ℃ 之间), 有利于煤/焦切换时温度波动带来对半焦燃烧稳定性的影响; 在一个合理的温度范围内, 相对较高的床温和适宜的过剩空气系数有利于半焦的充分燃烧。

(4) 采用飞灰循环, 不仅有利于半焦燃烧, 保证半焦燃烧效率在 99% 以上, 而且对于将来 CaS 在燃烧过程中转为稳定的 CaSO₄ 也会有很好的帮助。

注: 本文研究工作还有以下研究人员参与: 东南大学洁净煤电及燃烧技术教育部重点实验室陈晓平、钟文琪、段钰峰、仲兆平、章名耀等老师; 哈尔滨电站设备集团公司薛德明教授级高工、李永星教授级高工。

参考文献:

- [1] 沈胜强, 李素芬, 石 英. 焦粒子着火与燃烧过程实验研究 [J]. 燃烧科学与技术, 2000, 6: 66-69.
- [2] MACNEIL S, BASU P. Effect of pressure on char combustion in a pressurized circulating fluidized bed boiler [J]. Fuel, 1998, 77(4): 269-275.
- [3] HUSTARD J E. Burnin grates of coke particles in the fireboard above a fluidized bed reactor [J]. Combustion and Flame, 1991, 85: 223-240.
- [4] CAIH Y, GUELL A J, CHATZAKIS I N, et al. Combustion reactivity and morphological change in coal chars: effect of pyrolysis temperature, heating rate and pressure [J]. Fuel, 1996, 75(1): 15-24.
- [5] 向银花, 王 洋, 张建民, 等. 部分气化煤焦燃烧特性的研究 [J]. 煤炭转化, 2002 25(4): 35-38
- [6] MESSENBCK REINHARD C, DUGWELL DENIS R, KANDIYOTI RAFAEL. Coal gasification in CO₂ and steam: development of a steam injection facility for high-pressure wire-mesh reactors [J]. Energy & Fuels, 1999, 13(1): 122-129.
- [7] TAKARADA TAKAYUKI, ONOYAMA YOSHIYUKI, TKAKYAMA KENJI, et al. Hydrolysis of coal in a pressurized powder-particle fluidized bed using several catalysts [J]. Catalysis Today, 1997 39(1-2): 127-136.
- [8] 陈晓平, 谷小兵, 段钰峰, 等. 半焦加压燃烧特性研究 [J]. 工程热物理学报, 2004 25(2): 345-347.
- [9] LI MING LU, CHUN HUA KONG, VEENA SAHA JWALLA, et al. Char structural ordering during pyrolysis and combustion and its influence on char reactivity [J]. Fuel, 2002, 81(9): 1215-1225.
- [10] 章明川, 于 娟. 考虑碳粒表面还原反应的移动火焰锋面 (MFF) 模型 [J]. 工程热物理学报, 2004(3): 511-514.
- [11] TSENG H P, EDGAR T F. Change of the physical properties of coal char during reaction [J]. Fuel, 1989, 68(1): 114-119.
- [12] 刘 鑫, 沈胜强. 半焦粒子团燃烧模型与计算分析 [J]. 燃烧科学与技术, 1997 3: 304-308.

(编辑 何静芳)

tion, coal gasification, CO₂ separation, ASPEN PLUS

煤气化半焦增压流化床燃烧特性中试试验研究 = **An Experimental Study of the Combustion Characteristics of Coal Gasification Semi-coke in a Pilot-scale Pressurized Fluidized Bed** [刊, 汉] / XIONG Yuan-quan, JIN Bao-sheng, XIAO Rui (Education Ministry Key Laboratory on Clean Coal Power Generation and Combustion Technology, Thermal Energy Engineering Research Institute under the Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096), ZHENG Shou-zhong (China State Water Conservancy and Hydropower Materials Co. Ltd., Beijing, China, Post Code: 100053) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(2). — 154 ~ 157

On the pilot-scale test run device of a pressurized fluidized bed with a thermal input of 1 MW, an experimental study of pressurized combustion has been conducted of the semi-coke obtained from the partial gasification of coal. The test results show that various sub-systems in the pilot-test run device for the coal gasification semi-coke are rational in design and the whole system can ensure a harmonious and reliable operation. Under the condition featuring a pressure of 0.5 MPa in the combustion chamber, a combustion temperature of 900 °C, excess air ratio of 1.2 to 1.3 and fluidized speed of 1.1 to 1.2 m/s, the combustion efficiency of the semi-coke can exceed 99% with the carbon content of fly ash being below 2%. In addition, it has been also found that properly raising the bed temperature for semi-coke combustion and employing a suitable excess air ratio will contribute to a complete and steady combustion of the semi-coke while the circulation of the fly ash can be very beneficial to enhancing semi-coke combustion efficiency. **Key words:** semi-coke, combustion, pressurized fluidized bed, partial coal gasification, bed temperature

方形分离器结构优化试验研究 = **An Experimental Study of the Structural Optimization of Square Shaped Cyclone Separators** [刊, 汉] / WANG Yu-zhao (Thermal Energy Engineering Department, Chengde Petroleum School, Chengde, China, Post Code: 067000), YANG Hai-rui, YUE Guang-xi (Thermal Energy Engineering Department, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(2). — 158 ~ 162

On a cold-state test rig, a structural optimization study has been conducted of a square shaped cyclone separator having an inlet of characteristic dimension $D=300$ mm with an acceleration section. The study results show that with an increase in core tube diameter (d) and core tube inserting depth (s), the separation efficiency tends to go up at the beginning followed by a decrease. The inlet height-width ratio (a/b) and straight section height (h) have an interactive impact on the separation efficiency. With an increase in inlet height-width ratio a/b , the separation efficiency goes up first and then decrease. When the inlet height-width ratio undergoes a change, the separation efficiency tends to change differently with a change in straight section height. When a/b is above 5.92, the separation efficiency will go down first with an increase in straight section height and then rise, attaining a minimum value at $h/D=2.3$. When a/b is below 5.92, the above efficiency will decrease with an increase in straight section height. The resistance of the cyclone separator will increase with an increase in the inlet height-width ratio and decrease with an increase in straight section height. The optimized values of the four parameters can be given as follows respectively: $d=0.4D$, $s=0.6D$, $a/b=8$ and $h=1.8D$. In such a case, the corresponding resistance of the cyclone separator will be 1.22 kPa. **Key words:** circulating fluidized bed boiler, square shaped cyclone separator, structural optimization, experimental study

锅炉“内爆”的动态模拟和预测 = **Dynamic Simulation and Forecast of “Boiler Implosion”** [刊, 汉] / ZHAO Zhen-zhou, JIN Bao-sheng, XIONG Yuan-quan (Education Ministry Key Laboratory on Clean Coal Power Generation and Combustion Technology, Thermal Energy Engineering Research Institute under the Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096), SUN Ke-qin (Jiangsu Suyuan Environmental Protection Project Stock Co. Ltd., Nanjing, China, Post Code: 210024) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(2). — 163 ~ 167

The pressure fluctuations caused by a boiler implosion can affect the whole boiler flue gas and air system. Up to now, no relevant literature concerning three-dimensional numerical simulation of boiler flue gas and air systems has been found in China. To study the boiler implosion, a dynamic mathematical model has been established. Based on a CFD (computa-