

SOFA 气流特性的实验研究

秦明 孔超 吴少华 陈力哲

(哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 以一台 660 MW 超临界电站锅炉为原型,对 SOFA (分离燃尽风) 区域的气流特性进行了冷态模化实验研究。SOFA 分别采用四角和四墙两种布置形式,利用 PDA(三维粒子动态分析仪)测量各实验工况下 SOFA 的气流速度场和粒子浓度场,研究不同参数下 SOFA 的气流特性。研究表明:随着 SOFA 风率的增加,其射流刚性增强,射流的穿透性增加,有利于 SOFA 风与主气流的充分混合;角式布置 SOFA 比墙式布置的 SOFA 气流更有利于与主气流的混合;SOFA 角式布置,增加 SOFA 喷口反切角度,不利于 SOFA 风与主气流的充分混合;SOFA 墙式布置,增加 SOFA 喷口反切角度,气流刚性有所加强,有利于充分混合。

关键词: SOFA; 冷态模化; 角式布置; 墙式布置; 气流特性

中图分类号: TK223.26 文献标识码: A
DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2015.05.029

引言

SOFA(分离燃尽风)是一种深度空气分级的煤粉燃烧技术。SOFA 布置在燃烧器上部,将燃料后期燃烧所需空气供入炉内,从而在确保燃料最终燃尽的条件下,降低主燃烧区的氧浓度、燃烧速度和温度水平,达到降低主燃烧区及整个炉膛 NO_x 生成量的目的。采用 SOFA 是进行低 NO_x 燃烧的有效措施^[1-3]。近些年,分离式燃尽风技术成为广泛使用的低 NO_x 燃烧技术^[4]。但由于布置方式和运行参数的不同,实际效果有很大差异。

施行深度空气分级时,为了达到降低 NO_x 和燃尽的综合效果,SOFA 风率和布置位置的确定至关重要。由于采用分级燃烧后,在锅炉燃烧器区域形成较强的还原性气氛,不仅要求大幅度地降低 NO_x 的生成量,同时要保证燃烧后期的充分燃尽^[5-6]。为此,必须实现 SOFA 风与从主燃烧区域上升的主

气流的充分混合。而要实现这一点,就要求 SOFA 气流有足够刚性穿透力穿过下方上来的旋转主气流,以使其与大多数主气流接触;同时进入主气流后有适当的扩散,使混合更加充分。因此,SOFA 的布置和运行方式起到至关重要的作用。此外,工程应用中常常采用 SOFA 反切来减轻炉膛出口气流流动偏差,以缓解两侧烟温偏差。可见,掌握 SOFA 的气流特性十分重要。

为了解 SOFA 风的流动特性,本研究以一台切圆燃烧的煤粉锅炉为原型,采用冷态模化实验进行了 SOFA 气流特性的研究。为了便于对比,SOFA 的布置方式分别有角式和墙式两种。实验使用 PDA(三维粒子动态分析仪)测量 SOFA 风的气流流动特性,以研究在不同 SOFA 布置方式、不同燃尽风率以及不同反切角度下 SOFA 的射流特性,以期工程应用提供定性的参考。

1 实验系统

本研究所采用的原型是一台燃用褐煤的 660 MW 超临界锅炉,燃烧器为四墙式布置,燃烧采取切圆燃烧方式,共设 6 层一次风喷口。在主燃烧器上方处有 4 层 SOFA 喷口。图 1 为炉膛结构示意图。燃烧器和 SOFA 布置如图 2 所示。

燃烧器的设计参数如表 1 所示。

表 1 燃烧器设计参数
Tab. 1 Design parameters of the burner

参数	一次风	二次风	SOFA
风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	26	47	60
风温/ $^{\circ}\text{C}$	70	385.6	385.6
风率/%	28	50	22

收稿日期: 2014-12-15; 修订日期: 2015-02-15

基金项目: 国家科技支撑项目(2014BAA02B01)

作者简介: 秦明(1963-),男,黑龙江哈尔滨人,哈尔滨工业大学副教授。

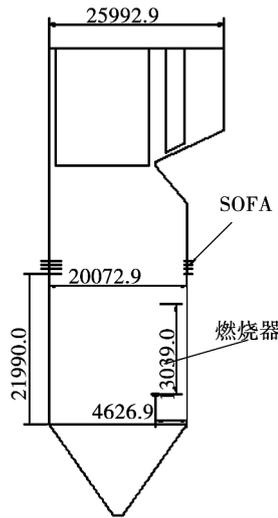


图 1 炉膛简图

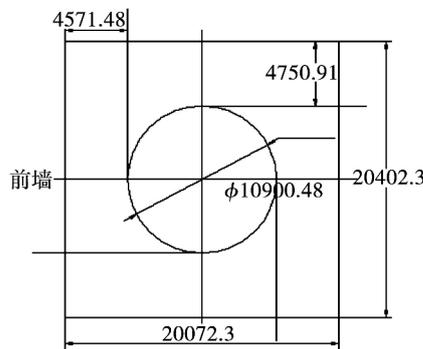
Fig. 1 Sketch drawing of the furnace

比与原型相等,设计运行参数为一次风风速 8.96 m/s,二次风风速 11.65 m/s,SOFA 风速 14 m/s。为了研究 SOFA 在不同位置 and 不同旋转角度时的气流特性,SOFA 的布置位置可以在四墙与四角进行更换,并且 SOFA 喷口能够水平摆动 $-10 \sim 0^\circ$ 。实验台如图 3 所示。

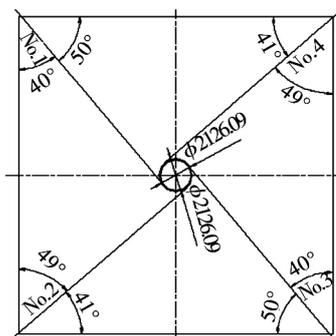


图 3 实验设备

Fig. 3 Experiment facilities



(a) 燃烧器布置



(b) SOFA 的角式布置

图 2 燃烧器及 SOFA 水平布置示意图

Fig. 2 Arrangements of burners and SOFA horizontal layout sketch map

实验台设计根据相似与模化理论^[7-8],采用纯几何相似模化方法,模型比例为 1:17。各喷口射流进入第二自模化区,并且一、二次风及 SOFA 风动量

测试系统采用 PDA,它是一种采用非接触的测试方式的测量系统^[9],既不影响流场也不影响粒子,是当今测量颗粒动态特性的最先进的工具之一。它可以在不干扰流场的基础上,同时采集气固两相速度和颗粒粒径信号,并据此分析出时间、空间内的颗粒浓度分布、两相滑移速度、各种脉动指数和湍动能分布等数据^[10-14]。

实验时运行参数均满足模化要求。各喷口风速及流量由所测得的动压经过换算而得,并经过严格标定。实验采用直径在 0-10 μm 玻璃微珠代表 SOFA 气流。给粉口为单支 SOFA, PDA 测量截面为第二层 SOFA 喷口所在截面,各测量区域如图 4 所示。

实验共分 7 个工况,如表 2 所示。

表 2 实验工况

Tab. 2 Experiment operating conditions

工况	SOFA 布置位置	SOFA 喷口 风速 / $m \cdot s^{-1}$	SOFA 反切 角度 / $(^\circ)$
A1	四角	10	0
A2	四角	14	0
A3	四角	14	5
A4	四角	14	10
A5	四墙	14	0
A6	四墙	14	5
A7	四墙	14	10

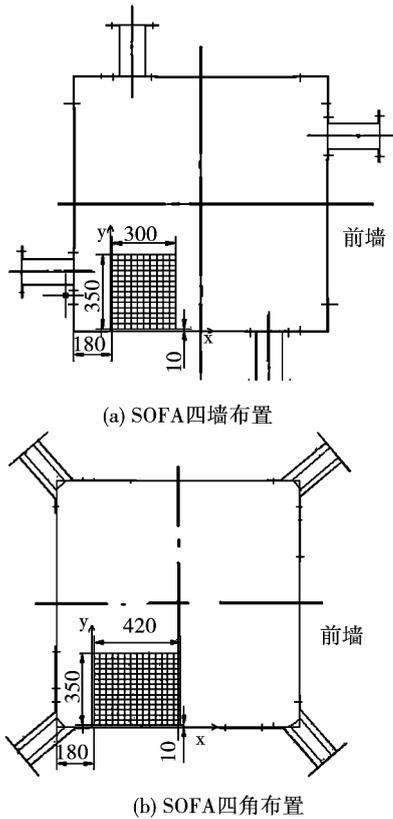


图 4 测量区域

Fig. 4 Measuring fields

2 实验结果及分析

各个工况的速度场及浓度场的实验结果如图 5 - 图 11 所示。图中所示速度场的单位为 m/s; 浓度场定义为测量范围内的粒子分布数量,其单位为颗粒数/cm²,用以表示气流的流动分布。图中 X 轴为左侧墙边距, Y 轴为后墙边距。

(1) 由图 5 和图 6 中 A1 和 A2 工况对比可以看出,工况 1 射流刚性比工况 2 小,射流衰减较快,穿透性较差,不利于 SOFA 风与主旋气流的混合。工况 1 风速较小,边壁处的速度较大,说明工况 1 的射流比工况 2 的贴壁严重,也不利于 SOFA 风与主旋气流的混合。表明 SOFA 风速提高后,SOFA 气流刚性增强,有利于 SOFA 气流与主气流的混合。

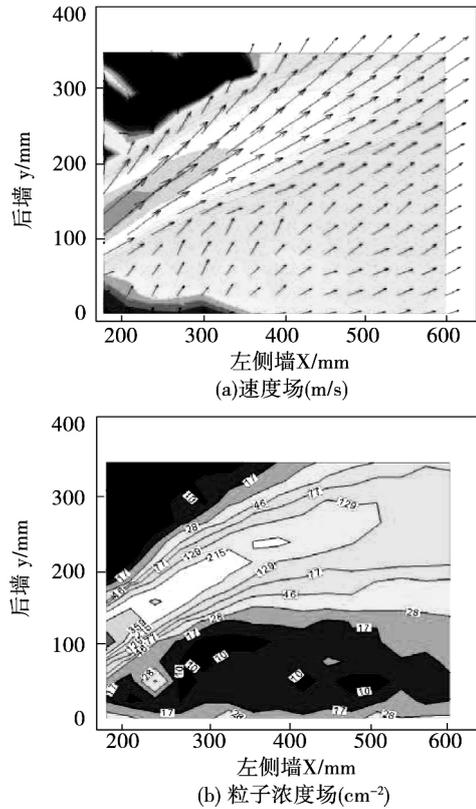


图 5 A1 工况

Fig. 5 A1 operating conditions

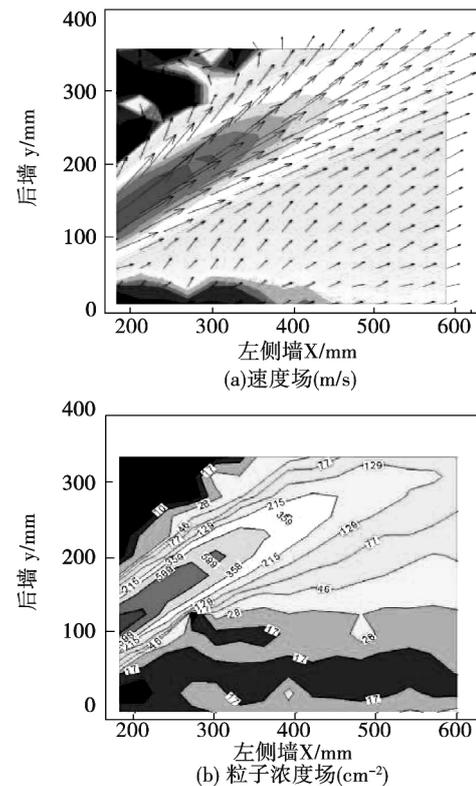


图 6 A2 工况

Fig. 6 A2 operating conditions

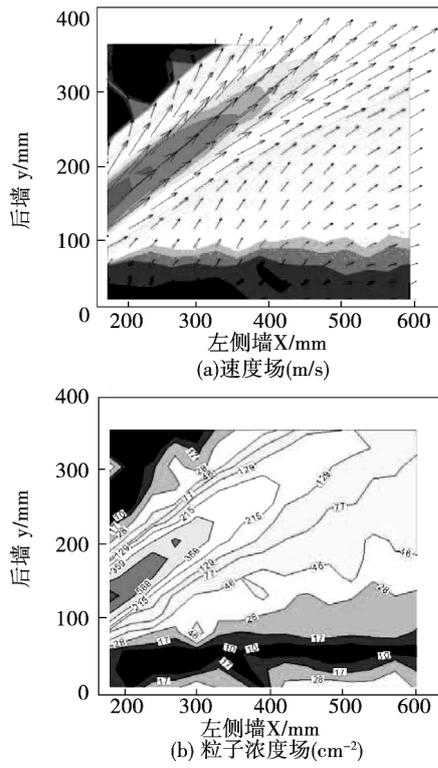


图 7 A3 工况

Fig. 7 A3 operating conditions

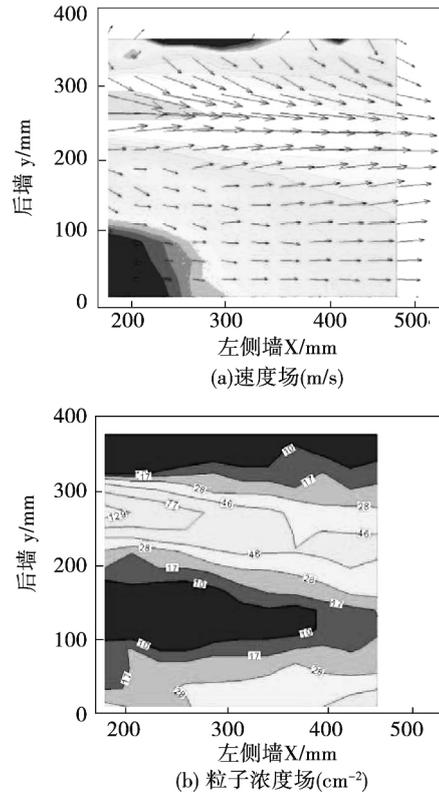


图 9 A5 工况

Fig. 9 A5 operating conditions

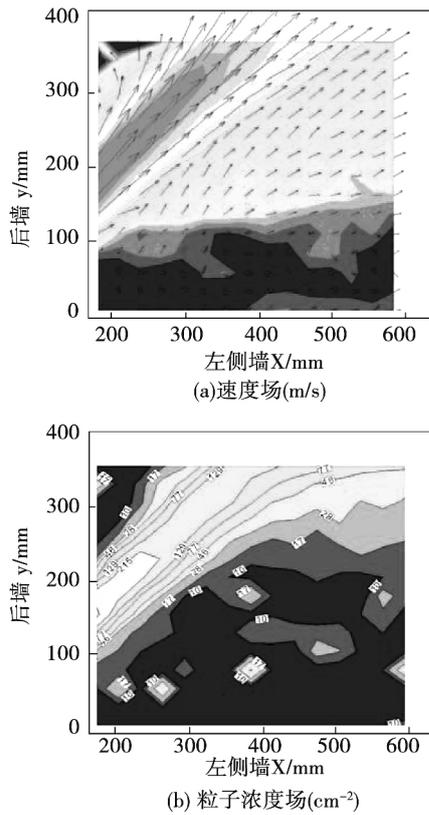


图 8 A4 工况

Fig. 8 A4 operating conditions

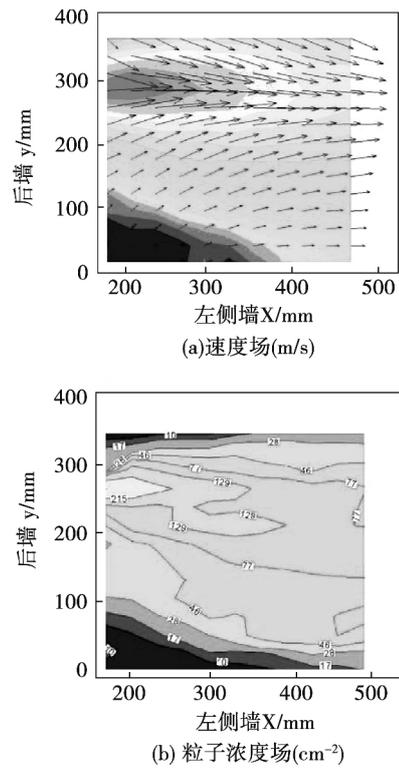


图 10 A6 工况

Fig. 10 A6 operating conditions

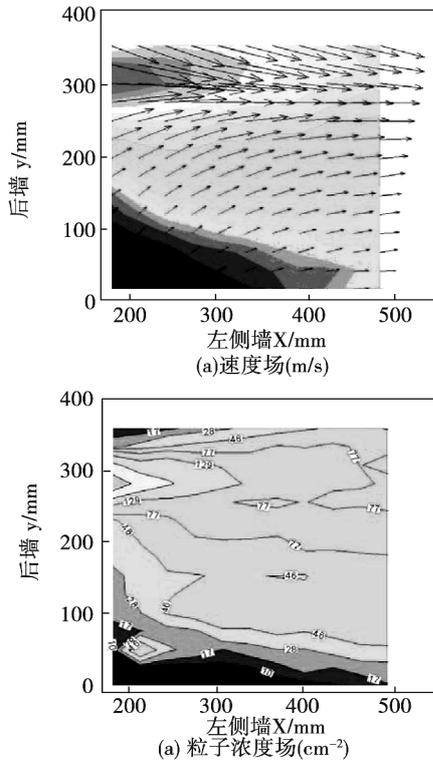


图 11 A7 工况

Fig. 11 A7 operating conditions

(2) 对比图 6、图 7、和图 8，当 SOFA 反向旋转 5° 、 10° 后，临近的壁面气流速度减小十分明显，表明 SOFA 反切后，气流旋转减弱，有利于消旋；但是同时气流速度有所衰减，而且颗粒浓度减少较快，射程减小，说明角式布置的 SOFA 反切后，有利于消旋，但 SOFA 气流衰减较快，对混合没有好处。

(3) 由图 6 - 图 8 与相应的图 9 - 图 11 比较，可以明显看出，运行参数相同时，SOFA 在角式布置时，其气流的刚性明显较强，速度衰减较慢，并且射流扩散情况较好，因而其气流与主旋转气流的混合较好；而 SOFA 墙式布置下，虽然气流扩散较快，但是射流的刚性较弱，速度衰减较快，因而射流穿透力不够，不利于与下游上来的旋转气流的混合。例如工况 A3 与工况 A6，运行参数相同，反切角度相同，测量区域基本一样，但二者在测量区域内、沿气流流动方向气流速度和颗粒浓度相差明显，A3 工况的数值明显要高，而且 A3 工况的边壁处气流速度较小，气流贴壁情况较轻，说明 A3 工况的气流刚性强、能够与上升的主气流充分混合。

(4) 比较图 9 - 图 11 可以发现，对于墙式布置

的 SOFA，随着 SOFA 气流的反切角度的增加，气流刚性反而有所增强，而且壁面处气流速度和颗粒浓度也有所减小，有利于混合。这也说明，对于墙式切圆布置的喷口，气流偏斜的主要原因之一是相邻的上游喷口气流的影响，因为它的射流直接朝向下游气流。而随着反切角度的增加，该影响也有所减弱。

3 结 论

(1) 在满足低氮燃烧的前提下，提高 SOFA 风率或风速，其射流刚性增强，速度衰减变慢，射流的穿透性增加，有利于 SOFA 风与主气流的混合。

(2) 与墙式布置的 SOFA 相比，角式布置的 SOFA 气流的气流刚性强、穿透性较好，有利于与主气流的混合。

(3) SOFA 在角式布置的方式下，随着反切角度的增加，射流的扩散减弱，射流的刚性增强，但速度衰减提前、穿透性降低，不利于 SOFA 风与主气流的混合。

(4) 对于墙式布置的 SOFA，随着反切角度的增加，射流强度增加，衰减变慢，有利于混合。表明对于四墙布置的喷口，气流偏斜不仅受到炉内旋转气流的影响，由于其设计切圆较大，沿着气流旋转方向，相邻的上游喷口气流的对下游喷口气流也有影响，因为它的射流直接朝向下游气流。而随着反切角度的增加，该影响也有所减弱。

参考文献:

[1] 毕玉森. 低氮氧化物燃烧技术的发展状况[J]. 热力发电, 2000 (2): 2-9.
 BI Yu-sen. Present status of low- NO_x combustion technology [J]. Thermal power generation 2000 (2): 2-9.

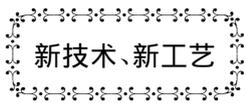
[2] 魏恩宗, 骆仲决, 岑可法等. 燃煤锅炉低 NO_x 燃烧技术及其试验研究[J]. 电站系统工程, 2001, 17(6): 363-365.
 WEI En-zong, LUO Zhong-yang, CEN Ke-fa, et al. Low NO_x Combustion Technology for Coal-fired Boiler and Experimental Research [J]. Power system engineering 2001, 17(6): 363-365.

[3] Mana CK, Gibbins JR, Witkamp JG. Coal characterization for NO_x prediction in air-staged combustion of pulverized coals [J]. Fuel 2005; 84: 2203-2190.

[4] Li S, Xu TM, Hui SE, Wei XL. NO_x emission and thermal efficiency of a 300 MWe utility boiler retrofitted by air staging [J]. Ap-

- plied Energy 2009; 86: 1803 – 1797.
- [5] Wang EL ,Zhang HY ,Lou YH ,Ling P. Analysis of low NO_x combustion techniques and its application for the coal fired power plants in china[J]. Power Eng 2004 24(1) : 28 – 23.
- [6] A. Ribeirete ,M. Costa. Detailed measurements in a pulverized-coal-fired large-scale laboratory furnace with air staging[J]. Fuel 2009; 88: 45 – 40.
- [7] 刘 勇 魏 凤 唐必光. 四角切圆锅炉冷态空气动力场流动特性的实验研究[J]. 武汉大学学报(工学版) 2002 35(6) : 52 – 55.
LIU Yong ,WEI Feng ,TANG Bi-guang. Experimental research on flue gas flow characteristics of four square tangential circle boiler in cold aerodynamical field [J]. Engineering Journal of Wuhan University.
- [8] 车得福 惠世恩 徐通模 等. 四角切圆燃烧锅炉烟道内气体速度分布的模化试验研究[J]. 动力工程 ,1994 ,14(5) : 22 – 28.
CHE De-fu ,HUI Shi-en ,XU Tong-mo ,et al. Experimental modeling research on gas velocity distribution in flue ducts of corner tangentially fired boiler [J]. Power Engineering ,1994 ,14(5) : 22 – 28.
- [9] Ren F ,Li ZQ ,Chen ZC ,Xu ZX ,and Yang GH. Experimental investigations into gas/particle flows in a down-fired boiler: Influence of the Vent Air Ratio. [J] Energy Fuel 2010; 24: 1602 – 1592.
- [10] Moon S ,Bae C ,Choi J ,Abo-Serie E. The influence of airflow on fuel spray characteristics from a slit injector[J]. Fuel 2007 86: 409 – 400.
- [11] Hu'bnner AW ,Tummers MJ ,Hanjalic' K ,vander Meer ThH. Experiments on a rotating-pipe swirl burner[J]. Thermal Fluid Sci 2003; 27: 489 – 481.
- [12] Al'sa L ,Garcia JA ,Cerecedo LM. Particle concentration and local mass flux measurements in two-phase flows with PDA. Application to a study on dispersion of spherical particles in a turbulent air jet [J]. Int Multiphase Flow 2002 28: 324 – 301.
- [13] Fan WD ,Li YY ,Lin ZC ,Zhang MC ,PDA research on a novel pulverized coal combustion technology for a large utility boiler [J]. Energy 2010 35: 2141 – 48.
- [14] Lin ZC ,Fan WD ,Li YY ,Li YH and Zhang MC. Research of low NO_x combustion with large-angle counter flow of a fuel-rich jet and its particle-dynamics anemometer (PDA) experiment [J]. Energy Fuel 2009 23: 753 – 744.

(陈 滨 编辑)



DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.05.030

燃气发动机有希望达到最低的运行费用

据《Gas Turbine World》2014 年 9 – 10 月刊报道 ,Caterpillar 公司声称 ,它最新研制的燃气发动机可以在 2.5 MW 功率范围内拥有最低的运行费用。

G3520H 发动机是可利用天然气运行的 H 系列生产线的第二型发动机。

在 50 Hz 和 60 Hz 应用中 ,该发动机能提供 2 500 kW 输出电力。它被设计成在该功率等级和额定参数机组的市场上达到最低的运行费用。它提供 45.3% 的电效率和 80 000 h 的大修寿命。

该发动机把长时间基本负荷应用作为设计目标 因此可以在恒载连续工作中高效地运行。它可被应用于诸如医院、数据中心、制造工厂、温室和分布式电站等众多工业和商业设施中。

(吉桂明 摘译)

the final pyrolytic products. It has been found that under the condition of a relatively low cracking temperature of 600 °C ,the residence time of pyrolytic gases has no big influence on the pyrolytic products of bituminous coal while under the condition of a cracking temperature of higher than 600 °C ,with an increase of the residence time of the pyrolytic gases from 0 to 16 seconds ,the gas phase secondary reaction will become intensified and the coal tar with large molecules will tend to form more stable benzenes ,toluene ,xylene and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) ,such as naphthalene ,methyl naphthalene ,phenanthrene and anthracene and hydrogen under the joint action of the decomposition and polycondensation reactions and in the meantime ,the phenols will first increase and then decompose to form CO ,the aromatic side chains and others will form CH₄ through demethylation. **Key words:** secondary reaction ,residence time of pyrolytic gases ,bituminous coal

SOFA 气流特性的实验研究 = **Experimental Study of the Gas Flow Characteristics of SOFA** [刊 ,汉] QIN Ming ,KONG Chao ,WU Shao-hua ,CHEN Li-zhe (College of Energy Source Sciences and Engineering ,Harbin Institute of Technology ,Harbin ,China ,Post Code: 150001) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015 ,30(5) . -762 -767

With a 660 MW supercritical utility boiler serving as the prototype ,experimentally studied was the cold-state modeling of the characteristics of the gas flow in the SOFA (separated overfired air) zones. During the test ,two arrangement modes ,i. e. four corners and walls respectively ,were adopted for the SOFA and by making use of a particle dynamic analyzer (PDA) ,the gas flow speed field and particle concentration field of the SOFA were measured under various test conditions and the gas flow characteristics of the SOFA were studied under various parameters. It has been found that with an increase of the SOFA flow rate ,its jet flow rigidity will enhance and the penetration capacity of the jet flow will become higher ,favorable for a sufficient mixing of the SOFA with the main gas flow. Compared with the wall type arrangement ,the gas flow of the SOFA of the corner type arrangement is more favorable for a mixing with the main gas flow. For the corner type arrangement of the SOFA ,with an increase of the reverse tangential angle of the spout of the SOFA ,it will be unfavorable for a sufficient mixing with the main gas flow. For the wall type arrangement of the SOFA ,with an increase of the reverse tangential angle of the spout of the SOFA ,the gas flow rigidity will somewhat become higher ,thus favorable for a sufficient mixing. **Key words:** SOFA ,cold state modeling ,corner type arrangement ,wall type arrangement ,gas flow characteristics