doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.040

生物质锅炉多效烟气净化装置设计与性能研究

王　毅[1,2]　杜金宇[3]　张全国[2]　荆艳艳[2]　赵纬莉[2]　常建民[1]

(1.北京林业大学材料科学与技术学院,北京 100083;2.河南农业大学农业部可再生能源新材料与装备重点实验室,郑州 450002;
3.河南牧业经济学院食品工程系,郑州 450011)

摘要:为进一步降低生物质锅炉烟气排放污染,针对生物质锅炉烟气排放特点,设计了一种具有除尘、脱硫、余热利用功能的多效烟气净化装置,研究了该装置的工艺设计、系统计算,考察了该套装置的连续烟气净化性能。生物质锅炉多效烟气净化装置经过连续性运行,整体运行稳定,烟气温度、烟气 SO_2 含量、烟尘含量、SO_2 去除率、烟尘去除率等工艺参数和运行指标均较为平稳。出口烟气温度控制在(62 ± 3)℃范围内,平均出口烟气 SO_2 质量浓度为 4.2 mg/m^3,SO_2 去除率达到 70.6%。平均出口烟尘质量浓度为 4.6 mg/m^3,烟尘去除率达到 90.57%,具有较好的运行稳定性和较高的除尘、脱硫效率。

关键词:生物质锅炉;烟气净化;脱硫;除尘;余热利用

中图分类号:TK6　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2018)02-0313-06

Research on Multiple Purification Device Design and Performance of Biomass Boiler Flue Gas

WANG Yi[1,2]　DU Jinyu[3]　ZHANG Quanguo[2]　JING Yanyan[2]　ZHAO Weili[2]　CHANG Jianmin[1]

(1. *College of Materials Science and Technology*, *Beijing Forestry University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *Key Laboratory of New Materials and Facilities for Rural Renewable Energy of China's Ministry of Agriculture*, *Henan Agricultural University*, *Zhengzhou* 450002, *China*
3. *Department of Food Engineering*, *Henan University of Animal Husbandry and Economy*, *Zhengzhou* 450011, *China*)

Abstract: Boiler flue gas has become an important source of atmospheric pollution, biomass fuel boiler was applied widely. However, the biomass boiler flue gas purification technology and equipment was shortage. In order to further reduce the pollution of biomass flue gas emissions, a multiple flue gas purification device with dust removal, desulphurization and waste heat utilization was developed. Flue gas dust removal using cyclone separation and atomized spray method, flue gas desulfurization using alkaline water washing and atomized spray desulphurization, waste heat utilization using high, low pressure multistage flue gas heat transfer utilization. The structure design, system calculation and running performance of this biomass flue gas purification device were also studied. The study showed that the flue gas purification device showed a stable operation characteristic and high purification efficiency, which gas temperature, SO_2 content, dust content, SO_2 removal rate, dust removal rate and other operating parameters were stable during the continuous operation. The result showed that the outlet gas temperature was (62 ± 3)℃, SO_2 concentration 4.2 mg/m^3, and dust content of 4.6 mg/m^3. The mean SO_2 and dust removal rate add up to 70.6% and 90.57% respectively. The multiple flue gas purification device had good operating stability and high dust removal, desulfurization efficiency.

Key words: biomass boiler; flue gas purification; desulfurization; dust removal; waste heat utilization

0　引言

目前,我国城市拥有大量的燃煤锅炉,其中大都分布在城区内及城市周边,由于使用的都是含硫量高的劣质煤,锅炉烟气没有脱硫装置,加上操作、管理等因素,冒黑烟、硫污染等烟气污染十分严重,直

收稿日期:2017-08-07　修回日期:2017-09-27

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(201303099)、"十二五"国家科技支撑计划项目(2015BAD21B03)和河南省高等学校重点科研项目(16A480002)

作者简介:王毅(1981—),男,博士生,河南农业大学实验师,主要从事生物质能利用研究,E-mail:Wangyi2543@126.com

通信作者:常建民(1955—),男,教授,博士生导师,主要从事可再生能源研究,E-mail:cjianmin168@126.com

接影响了城市及周边的空气质量[1-3]。为此,许多城市采取取消煤锅炉,采用煤改气、煤改电等措施减少燃煤锅炉污染,但由于气源紧张、电价昂贵,在城市热力难以达到的区域,收效甚微[4-5]。用清洁的生物质燃料替代煤,在城市锅炉内使用替代燃煤锅炉就成为首选[6-7]。根据我国的生物质资源条件,利用农林剩余物作为锅炉燃料使用则具有环境友好、可以再生的特点[8]。研究工业锅炉生物质燃烧技术,开发生物质燃料锅炉,对节约常规能源、优化我国能源结构、减轻环境污染有着积极意义[9-11]。

目前我国已经有相当规模的生物质燃料锅炉研发使用,减少锅炉排放污染尤其是大气污染成为生物质锅炉研发人员和环境保护工作者必须直面的问题[12]。然而针对生物质燃料锅炉烟气净化的装置却一直未有大的突破,较多的仍在沿用以往燃煤锅炉烟气净化工艺和装置[13]。为此,亟需研发出一种除尘效果好、设备操作简单、净化功能多样、生产成本低的适用于中小型生物质锅炉使用的烟气净化设备[14-16]。本文针对中小型生物质锅炉烟气排放实际情况,设计一种适用于中小型生物质锅炉烟气除尘、净化、脱硫于一体的烟气净化设备,研究该套设备的工艺设计、系统计算、运行性能等。

1 设计依据

1.1 设计方案

(1)烟气除尘、脱硫、余热利用一体化设计,实现烟气多效净化。烟气除尘采用旋风分离一次除尘和雾化喷淋二次除尘,烟气脱硫采用碱性水洗涤脱硫和雾化喷淋脱硫,余热利用采用高、低压烟气多级换热。

(2)烟气除尘采用三级除尘设计。主烟道排出的烟气第一步通过烟道旋风分离器进行初步除尘,初次除尘后烟气进入箱体箱实现气液二次除尘,然后进入副烟道利用雾化喷淋装置进行三次除尘。

(3)排烟烟道采用螺旋换热、旋风分离一体化设计。一次烟道中设立螺旋换热盘管,一方面烟气中的烟尘经过螺旋旋风分离后沿着气壁被烟气吹入碱水箱中,另一方面利用换热盘管进行烟气余热换热,通过控制盘管液体流速控制一次排烟温度,降低烟气中有害金属离子的排放。多效烟气净化装置的工艺流程图如图 1 所示。

1.2 设计原则

烟气净化装置要求结构简单,有较好的气液、固液混合性能,可实现高效率的烟气除尘、脱硫、净化等功能,能实时进行净化系统运行参数的检测及调控,可满足中小型生物质锅炉烟气净化的工艺要求,易于放大。

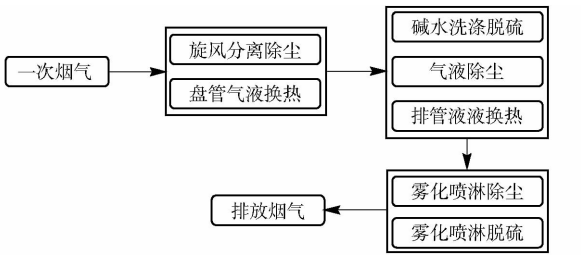

图 1 多效烟气净化装置工艺流程图

Fig. 1 Process flow chart of multifunction liquid and condensational purification device

2 多效烟气净化装置的设计

2.1 整体结构

结合生物质锅炉烟气的排放特点以及烟气脱硫、除尘净化的需要,设计的生物质锅炉多效烟气净化装置结构如图 2 所示,主要由一次烟道、换热盘管、碱水箱、换热排管、二次烟道、雾化喷淋器、逆向旋流板等组成。

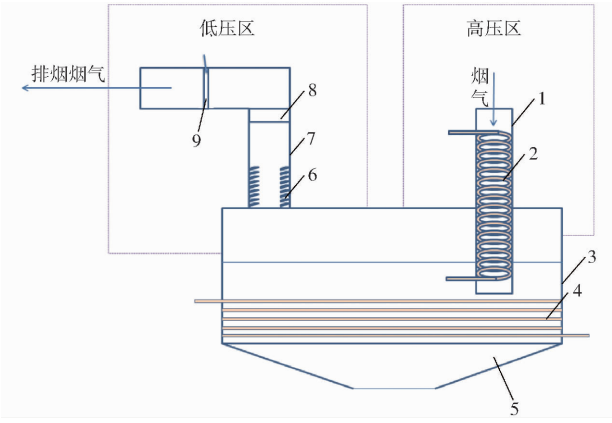

图 2 多效烟气净化装置结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of multifunction gas purification device

1. 一次烟道 2. 换热盘管 3. 碱水箱 4. 换热排管 5. 料渣分离斗 6. 逆向旋流板 7. 二次烟道 8. 雾化喷淋器 9. 涡轮引风机

锅炉烟气在一次烟道的旋流板以及烟道内部导向、旋流、离心除尘等机构作用下,烟尘沿气壁在烟气吹动下进入下方碱水箱内,烟气与碱水发生中和反应,并形成鼓泡作用,进行初步脱硫,然后进入二次烟道内,二次烟道的雾化喷淋装置以较高压力将碱性水旋转喷出,形成粒径约 100 μm 的水雾,大大提高了液滴比表面积,与烟气充分接触,烟尘充分增湿、增重[17]。烟尘在强烈气流作用下,惯性力增大,被抛甩到筒内壁水膜层中,流入液体净化箱内,烟气中的硫氧化物气体与雾化的碱性水滴接触反应生成亚硫酸和硫酸盐随水膜流入碱水箱内,然后排入灰渣池[18]。碱水雾化喷淋洗涤过的烟气经百叶窗格

栅阻挡分离水滴，进行气水分离，清洁的烟气经引风机引入烟塔排出。

2.2　二次烟道设计

二次烟道是烟尘脱硫、除尘的主要区域，采用碱水雾化喷淋的方式，进行脱硫和除尘。雾化喷淋除尘可分切向出风和轴向出风两种类型，实际的应用和实验表明，轴向出风式无论是气流流动的对称性还是稳定性均优于切向出风式，因此采用轴向出风方式，二次烟道结构如图 3 所示。以 LEITH 的边界层分离理论为基础，对轴向出风的立式二次风道进行设计[19-20]。

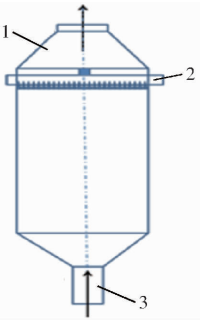

图 3　二次烟道轴向出风方式

Fig. 3　Secondary pipe axial gas outlet

1. 二次烟道　2. 旋流雾化喷淋器　3. 烟气入口

根据 LEITH 的边界层分离理论，假设空间内气流流场为准自由涡场，烟气在二次烟道空间内气流切向速度满足

$$v_t r^n = \text{const} \tag{1}$$

式中　v_t——捕尘空间内气流的切向速度，m/s

r ——捕尘空间内任意一点的半径，m

n——修正系数，一般取 0.5 ~ 0.9

根据分级除尘效率计算式，结合实验条件，二次烟道捕尘空间尺寸为：筒体高度 1 800 mm，捕尘空间高度 917.5 mm，筒体直径 600 mm，入口高度 125 mm，出口直径 125 mm，入口风速 20 m/s。

2.3　雾化喷淋装置设计

二次烟道内雾化喷淋装置喷淋量过小，在极板上易形成沟流，长期运行易造成极板结垢。而喷淋量过大时，则会造成水的浪费，加重循环水处理系统的负担，能耗也会增大[21]。合理的喷嘴排布方式及喷嘴选型可在较小水量下实现液膜均匀分布。本研究喷淋装置采用封闭循环系统，循环水泵扬程为 16 ~ 20 m，流量为 10 ~ 68 L/min，电压为 220 V。循环水在喷嘴雾化作用下形成液滴，液滴在空间内沉降速度计算参照颗粒计算公式

$$v = 1.74\sqrt{\frac{d(\rho_s - \rho)g}{\rho}} \tag{2}$$

式中　v——颗粒沉降速度，m/s

d—— 烟尘颗粒直径，m

ρ_s——烟尘颗粒密度，kg/m^3

ρ——水介质密度，kg/m^3

g ——重力加速度，m/s^2

根据实验数据和二次烟道高度，代入式(2)，当喷淋量设定为 13.7 L/min，喷嘴喷雾分布情况如图 4、5 所示。可以看出该范围内水雾分布均匀，覆盖面广，形成的水膜能够有效地覆盖在阳极板之上。

图 4　喷嘴喷雾分布情况

Fig. 4　Water spray distribution of nozzle

图 5　喷嘴喷雾极板分布特性

Fig. 5　Distribution characteristics of nozzle spray on positive plate

2.4　喷淋高度设计

喷淋高度是决定喷淋水雾分布的重要因素，在保证水雾喷淋均匀，水膜完整形成的条件下，喷淋高度越低，越有利于降低能耗[22]。本研究选用 1 000、1 500 mm 2 种喷淋高度，研究不同喷淋高度对喷雾液滴粒径的影响，结果如图 6 所示。

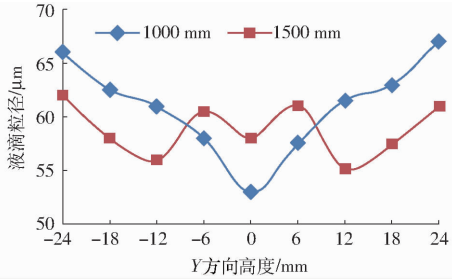

图 6　不同喷淋高度对雾化液滴粒径的影响

Fig. 6　Effect of different spray heights on particle size of atomized liquid

由图 6 可以看出，当喷淋高度较大时，喷雾液滴

平均粒径较小,喷雾分布也较均匀。而当喷淋高度较小时,喷雾液滴平均粒径则增大,粒径分布均匀性也降低,不利于液滴的均匀分布和液膜的形成。因此,当喷嘴位置于处 1 500 mm 时,喷淋波动较小,喷雾液滴均匀,水利用率高。

2.5 水循环处理系统设计

水循环系统工作原理是以碱性循环水吸收 SO_2,主要在二次烟道旋流雾化喷淋和下水箱中进行。吸收液用石灰乳化再生,在反应池和沉灰池中完成,生成灰渣共沉在沉灰池中[23]。当水箱中水质恶化,由清水池补加水,水循环处理系统工艺流程如图 7 所示。

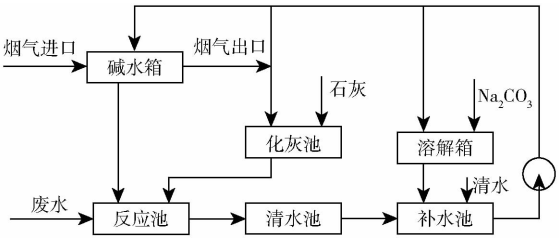

图 7 水循环处理系统工艺流程图

Fig. 7 Process flow chart of water recycle treatment

3 烟气净化装置的性能测试实验

3.1 实验依据

锅炉烟气排放检测采用 GB13271—2014《锅炉大气污染物排放标准》来计算。实验数据采用在线仪表计量与现场计量。

3.2 实验装置

采用的实验装置主要有一套小型生物质锅炉(包括炉膛、蒸发器、烟道、风道等),一套烟气净化装置,温度测试系统(包括温度计和热电偶),烟气分析仪器等。图 8 为烟气净化装置样机。

图 8 多效烟气净化装置

Fig. 8 Picture of multifunction gas purification device

3.3 实验材料

生物质锅炉燃料为玉米秸秆颗粒成型燃料,颗粒燃料的粒径为 5 ~ 15 mm,长度 20 ~ 30 mm,密度 800 kg/m^3,颗粒燃料含水率 4.85%,灰分质量分数 5.66%,挥发分质量分数 71.84%,碳质量分数 43.21%,氢质量分数 5.35%,氧质量分数 37.85%,硫质量分数 0.12%,燃料热值 14 654 kJ/kg。

生物质锅炉热效率 42.9%,火力强度 14.1 kW,锅炉排放烟气中 SO_2 质量浓度 14.3 mg/m^3,CO 质量浓度 0.087 mg/m^3,NO 质量浓度 0.087 mg/m^3,NO_2 质量浓度 0.087 mg/m^3,林格曼黑度小于 1。

3.4 实验仪器

质量称量采用 XK3190 - A12E 型电子落地台秤(北京万众机械制造有限公司),精度 10 g。烟气速度测定采用风速仪(石家庄力克风力设备有限公司),测量范围 0 ~ 10 m/s,精度为 0 ~ 5 m/s。温度测定采用镍铬-镍硅 K 型热电偶(北京绿能温度测量设备有限公司),测温范围 - 200 ~ 1 200℃。烟气成分分析采用 KM Quintox 9106 型烟气分析仪(郑州东陆机电设备有限公司)。

3.5 实验方法

实验在室内进行,环境温度为 25℃,相对湿度小于 85%,室内风速小于 1.0 m/s,测试工质为常温水,实验样机和测试仪器远离其他热源,引燃物为干燥的棉花秸秆。实验进行 3 次,取其平均值为测试结果。

3.6 结果与分析

生物质锅炉多效烟气净化装置经过超过 200 h 的连续运行,设备整体运行稳定。运行过程中各单元内测定参数的变化情况如图 9 ~ 11 所示。

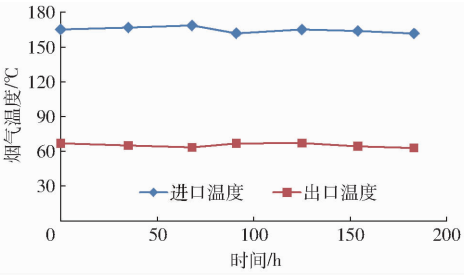

图 9 烟气净化装置进、出口烟气温度曲线

Fig. 9 Import and export temperature curves of multifunction gas purification device

图 9 给出了多效液相冷凝烟气净化装置进出口温度变化曲线。设备连续运行过程中,室外最低温度为 16.3℃,最高温度达到 38.6℃,温度波动显著,而烟气净化装置进、出口烟气温度变化幅度均较小,进口温度浮动在(161 ± 3)℃范围内,出口温度波动在(62 ± 3)℃范围内,说明温度调节装置尤其是余热换热装置可以很好地调节装置高压区和低压区的烟气排放温度,保证锅炉烟气的出口温度低于 62℃,降低烟气中有害物的排放。

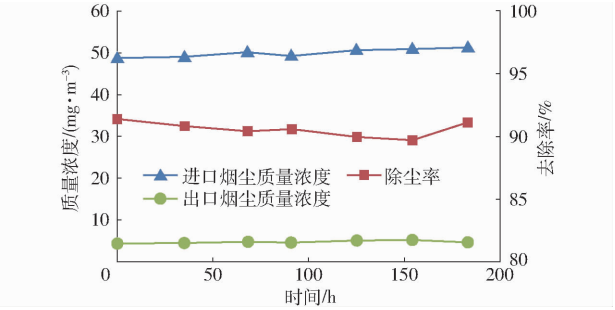

图 10　烟气净化装置进、出口烟尘质量浓度和去除率曲线

Fig. 10　Import and export dust concentration curves of multifunction gas purification device

图 10 给出了烟气净化装置进、出口烟尘质量浓度和去除率的变化曲线。可以看出，烟气净化装置连续运行时，进、出口烟尘质量浓度波动范围均较小，入口烟尘质量浓度波动在 48.7 ~ 51.1 mg/m^3 范围内，出口烟尘质量浓度波动在 4.2 ~ 5.1 mg/m^3 范围内。原料一次烟道旋风除尘、碱水箱液体洗涤除尘、雾化喷淋除尘三级除尘后，烟尘质量浓度显著下降，烟尘去除率在 90.2% ~ 90.8% 的范围内小幅度波动，平均烟尘去除率为 90.57%。出口烟尘质量浓度波动较小，说明系统具有较好的烟尘去除能力和连续运行能力，整体稳定性较好。

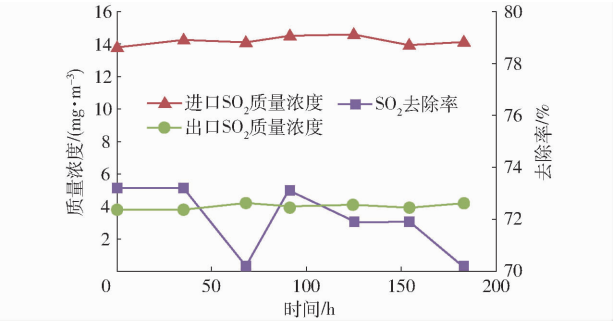

图 11　烟气净化装置进、出口 SO_2 质量浓度和去除率曲线

Fig. 11　Import and export SO_2 concentration curves of multifunction gas purification device

图 11 给出了多效液相冷凝烟气净化装置进、出口 SO_2 质量浓度和去除率的变化曲线。可以看出，烟气净化装置续运行时，排烟烟气 SO_2 质量浓度平稳，进口烟气 SO_2 质量浓度波动在 13.9 ~ 14.6 mg/m^3 范围内，出口烟气 SO_2 质量浓度波动在 3.7 ~ 4.6 mg/m^3 范围内，SO_2 去除率波动在 70.1% ~ 71.2%，波动范围非常小，平均 SO_2 去除率为 70.6%，说明设备连续运行过程中 SO_2 去除稳定性较好。

综合来看，生物质锅炉多效液相冷凝烟气净化装置经过连续性运行，整体运行稳定，烟气温度、烟气 SO_2 含量、烟尘含量、SO_2 去除率、烟尘去除率等工艺参数和运行指标均较为平稳，出口烟气温度控制在(62 ± 3)℃ 范围内，平均出口烟气 SO_2 质量浓度为 4.2 mg/m^3，平均 SO_2 去除率达到 70.6%。平均出口烟尘质量浓度为 4.6 mg/m^3，平均烟尘去除率达到 90.57%，具有较好的运行稳定性和较高的除尘脱硫效率。排放指标远低于《锅炉大气污染物排放标准》中燃气锅炉的排放标准，烟气净化装置性能测试如表 1 所示。

表 1　多效烟气净化装置性能测试结果

Tab. 1　Performance test results of multifunction gas purification device

参数	进口	出口
烟气温度/℃	164.7	65.2
阻力/Pa	1 200	-500
SO_2 质量浓度/(mg·m^{-3})	14.3	4.2
烟尘质量浓度/(mg·m^{-3})	50.2	4.6
脱硫效率/%	70.60	
除尘效率/%	90.57	

4　结束语

针对中小型生物质锅炉烟气排放特点，设计了一种具有除尘、脱硫、余热利用于一体的多效烟气净化装置。烟气净化装置经过 200 h 的连续性运行，整体运行稳定，烟气温度、烟气 SO_2 含量、烟尘含量、SO_2 去除率、烟尘去除率等工艺参数和运行指标均较为平稳，出口烟气温度控制在(62 ± 3)℃ 范围内，平均出口烟气 SO_2 质量浓度为 4.2 mg/m^3，平均 SO_2 去除率达到 70.6%。平均出口烟尘质量浓度 4.6 mg/m^3，平均烟尘去除率达到 90.57%，具有较好的运行稳定性和较高的除尘脱硫效率。烟气净化装置性能指标均达到或超过同类型设备水平，污染物排放低于 GB13271—2014《锅炉大气污染物排放标准》中燃气锅炉的排放标准。

参　考　文　献

1　ALATTAB K A, HO J C, ZAINAL Z A. Experimental investigation of submerged flame in packed bed porousmedia burner fueled by low heating value producer gas[J]. Experiment Thermal and Fluid Science, 2015, 62(3): 1 - 8.

2　李大中，王晨颖，娄云. 垃圾与煤、秸秆混燃锅炉污染物排放优化[J/OL]. 农业机械学报，2012，43(7)：117 - 123. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20120722&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.07.022.
LI Dazhong, WANG Chenying, LOU Yun. Pollutant emission optimization of boiler burning waste mixed with coal and straw[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(7): 117 - 123. (in Chinese)

3 HOSSEINI S, URBANSKI S P, DIXIT P, et al. Laboratory characterization of PM emissions from combustion of wildland biomass fuels[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118(17): 9914 - 9929.

4 欧春华, 李蜀庆, 张军, 等. 重庆市煤改气及其环境效益分析[J]. 重庆大学学报:自然科学版, 2004, 27(11): 100 - 104.
OU Chunhua, LI Shuqing, ZHANG Jun, et al. Boiler transforming from using coal into using natural gas in Chongqing and analysis of its environmental benefits[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2004, 27(11): 100 - 104. (in Chinese)

5 CHANG Guanqin , SONG Cunyi , WANG Li . A modeling and experimental study of flue gas desulfurization in a dense phase tower [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 189(1 - 2):134 - 140.

6 刘联胜,赵荣煊,王高月,等. 基于 ASPEN PLUS 的烟气气氛下生物质气化模拟[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 278 - 283. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20170636&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.036.
LIU Liansheng, ZHAO Rongxuan, WANG Gaoyue, et al. Simulation on pyrolysis gasification of biomass in flue gas based on ASPEN PLUS [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 278 - 283. (in Chinese)

7 KENDRY P M. Energy production from biomass(part2):conversion technologies[J]. Bioresource Technology, 2002, 83: 47 - 54.

8 JOHANSSON L S,TULLIN C,LEEKNER B, et al. Particle emissions from biomass combustion in small combustors[J]. Biomass and Bioenergy, 2003, 25(4): 435 - 446.

9 龚彬, 余春江, 王准, 等. 生物质炉排锅炉飞灰特性及影响因素分析[J]. 太阳能学报, 2016, 37(7): 1671 - 1676.
GONG Bin, YU Chunjiang, WANG Zhun, et al. Study on abnormities and influencing factors of fly a biomass-fired grate boiler [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2016, 37(7): 1671 - 1676. (in Chinese)

10 翟万里, 刘圣勇, 管泽运, 等. 生物质成型燃料链条蒸汽锅炉的研制[J]. 农业工程学报, 2016, 32(1): 243 - 249.
ZHAI Wanli, LIU Shengyong, GUAN Zeyun, et al. Development of chain-steam boiler for biomass briquette[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(1): 243 - 249. (in Chinese)

11 苏俊林, 王震坤, 矫振伟. 高效洁净生物质锅炉的开发及应用[J]. 农机化研究, 2009, 31(8): 202 - 208.
SU Junlin, WANG Zhenkun, JIAO Zhenwei. The exploitation and application on biomass boiler by high efficiency and clean combustion[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(8): 202 - 208. (in Chinese)

12 余有芳, 尚鹏鹏, 盛奎川. 生物质燃烧烟气排放特性与污染物控制[J]. 农业工程, 2017, 7(2): 50 - 54.
YU Youfang, SHANG Pengpeng, SHENG Kuichuan. Emission characteristics and pollutant control of biomass combustion[J]. Agricultural Engineering, 2017, 7(2): 50 - 54. (in Chinese)

13 ROY M M, DUTTA A, CORSCADDEN K W. An experimental study of combustion and emissions of biomass pellets in a prototype pellet furnace[J]. Applied Energy, 2013, 108(8): 298 - 307.

14 姚宗路, 赵立欣, RONNBACK M, 等. 生物质颗粒燃料特性及其对燃烧的影响分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(10):97 - 102.
YAO Zonglu, ZHAO Lixin, RONNBACK M, et al. Comparison on effect of characterization of biomass pellet fuels on combustion behavior[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 97 - 102. (in Chinese)

15 解海卫. 城市生活垃圾与生物质混烧发电及烟气净化的研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
JIE Haiwei. Study on co-combustion power generation of municipal solid waste with biomass and flue gas purification[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. (in Chinese)

16 TAO Min, JIN Baosheng, ZHONG Wenqi, et al. Modeling and experimental study on mufti-level humidifying of the under feed circulating spouted bed for flue gas desulfurization [J]. Powder Technology, 2010, 198(1): 93 - 100.

17 钟瑾, 朱庚富. 垃圾焚烧发电过程中的二次污染物控制处理技术[J]. 污染防治技术,2007,20(3):56—60.
ZHONG Jin, ZHU Gengfu. Control and disposal technology of secondary pollutant from power generation by incineration of rubbish [J]. Pollution Control Technology, 2007, 20(3): 56 - 60. (in Chinese)

18 陈国金. 中小型燃煤锅炉脱硫除尘及节能技术[J]. 动力工程, 2003, 23(2): 2330 - 2332.
CHEN Guojin. Research on technology of desulphurizing, dedusting and energy-saving of middle and small-sized coal fired boilers [J]. Power Engineering, 2003, 23(2): 2330 - 2332. (in Chinese)

19 张鹏. 卡尔指数法在评价煤粉粉体特性中的应用[J]. 中国粉体技术, 2000, 10(5):33 - 36.
ZHANG Peng. Application of Carr index method in comprehensive evaluating properties of coal powder[J]. China Powder Science and Technology,2000,10(5):33 - 36. (in Chinese)

20 钱付平, 章名耀. 基于边界层理论旋风分离器分离效率的改进模型[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(5): 71 - 75.
QIAN Fuping, ZHANG Mingyao. An extended model for determining the separation efficiency of a cyclone with boundary layer theory[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2007, 27(5): 71 - 75. (in Chinese)

21 岳焕焕. 烟气及排烟系统对喷淋系统的影响分析[J]. 山东农业大学学报:自然科学版, 2012, 43(3): 449 - 452.
YUE Huanhuan. Impact analysis of smoke and exhaust system for the sprinkler syetem[J]. Journal of Shandong Agricultural University:Natural Science, 2012, 43(3): 449 - 452. (in Chinese)

22 赵增慧, 于力, 梁存珍. 提高湿法烟气脱硫喷淋塔脱硫和除尘效率的探讨[J]. 北京石油化工学院学报, 2014, 22(3): 18 - 23.
ZHAO Zenghui, YU Li, LIANG Cunzhen. A study on improving the efficiency of wet flue gas desulphurization and dust removal [J]. Journal of Beijing Institute of Petro-chemical Technology, 2014,22 (3): 18 - 23. (in Chinese)

23 魏宏鸽, 叶伟平, 柴磊, 等. 湿法脱硫系统除尘效果分析与提效措施[J]. 中国电力, 2015, 48(8): 33 - 35.
WEI Hongge, YE Weiping, CHAI Lei, et al. Analysis of dust removal effect in wet-FGD system and its efficiency-enhancement techniques[J]. Electric Power, 2015, 48(8): 33 - 35. (in Chinese)