

秸秆成型燃料炉具设计与试验

于磊

(黑龙江省农业机械工程科学研究院, 哈尔滨 150081)

摘要: 以作物秸秆为原料制成的生物质颗粒燃料具有便于储存运输, 燃烧热效率高等优点, 可以用来替代煤炭作为农村家庭生活炊事与冬季取暖的主要能源。但生物质颗粒燃烧会排放较多的氮氧化物, 目前生物质脱氮一般应用于大型工业炉内, 农村家用的生物质锅炉基本没有氮氧化物处理装置。根据生物质燃料的燃烧特性, 本文首先阐述了所设计秸秆成型燃料专用炉具的结构和关键燃烧技术, 对玉米秸秆成型燃料进行燃烧试验研究。采用KM9106型烟气分析仪测量燃烧时烟气中NO、NO₂和烟气氧含量。结果表明通过改变二次风的风量比例、进气位置、充气角度, 在炉具内形成不同的风压射流, 以强化热质传递, 确保燃尽效果, 有效控制氮氧化物的生成与排放。试验结果表明, 当一、二次风量比例为3:1、扰流形成的风压射流配送二次风时, 秸秆成型燃料燃烧温度最高, 燃烧充分, 满足高效清洁燃烧要求。

关键词: 秸秆成型燃料; 专用炉具; 氮氧化物

中图分类号: TS914.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2023)S1-0350-08

Design and Experiment of Straw Shaped Fuel Stove

YU Lei

(Heilongjiang Academy of Agricultural Machinery Science, Harbin 150081, China)

Abstract: Biomass pellet fuel made from crop straw has the advantages of convenient storage and transportation, high combustion heat efficiency, and can be used to replace coal as the main energy source for cooking and winter heating in rural households. However, the combustion of biomass particles will emit a large amount of nitrogen oxides. Currently, biomass denitrification is mainly used in large industrial furnaces, and there are basically no nitrogen oxide treatment devices in rural household biomass boilers. Based on the combustion characteristics of biomass fuel, the structure and key combustion technologies of a special stove for straw briquette fuel were firstly introduced, and then combustion experiments were conducted on corn straw briquette fuel. KM9106 flue gas analyzer was used to measure NO, NO₂ and oxygen content in flue gas during combustion. The results indicated that by changing the air volume ratio, intake position, and inflation angle of the two winds, different air pressure jets were formed within the furnace to strengthen heat and mass transfer, ensure burnout effect, and effectively control the generation and emission of nitrogen oxides during the combustion process. Analysis of experimental data showed that when the ratio of primary to secondary air flow was 3:1, when distributing secondary air by air pressure jet formed by disturbing flow, the straw shaped fuel had the highest combustion temperature, sufficient combustion, which can meet the requirements of efficient and clean combustion, and had high promotion and utilization value.

Key words: straw briquette fuel; special stove; nitrogen oxide

0 引言

生物质能作为可再生能源, 已经被广泛应用于炊事、取暖、发电以及一系列行业当中^[1-2]。生物质

燃烧技术具有成本低、操作简单等特点, 在我国应用较为广泛。由于生物质燃烧锅炉存在燃烧不充分、燃烧效率低、废气排放超标等问题^[3-4], 因此合理设计成型燃料炉具燃烧系统, 高效利用能源、节能减排

非常重要。

目前国内设计出多种类型的生物质成型燃料锅炉,且成果颇多,然而很多锅炉设计结构简单,方便维修,虽然满足了农民日常使用所需,但是缺乏系统全面的理论支撑和实验数据依据,生物质成型燃料不能充分燃烧,导致燃烧效率不高,燃烧产生了大量氮氧化物,反而带来了环境污染。

田宜水等^[5]针对进料方式和燃烧室进行研究,采用下饲式进料方式和双燃烧室结构,设计了一款运行稳定、热效率高的秸秆锅炉。姚宗路等^[6]设计出燃烧器以玉米颗粒为燃料,燃烧效率达到 91%,结渣率为 23%,可满足供热采暖等需求。李亚猛等^[7]针对当前生物质燃烧炉灶热效率低、火力强度达不到要求、供风不充足、燃烧不充分等问题,研制了一种以层燃为燃烧方式的直燃炉灶。翟万里等^[8]为解决生物质锅炉适用范围窄、机械化程度低、受热面易结渣、去烟消尘不良等问题,研制出专用链条蒸汽锅炉,呈单锅筒纵置式布置,采用新型链条炉膛结构。试验结果显示:锅炉的燃烧效率达 96.7%,热效率达 83.2%。夏许宁等^[9]针对我国的秸秆类生物质颗粒燃料存在的易结渣、不易点火等问题,根据生物质颗粒燃料 3 个阶段的燃烧特性,采用三级配风系统,通过风量来调节炉排温度,并配套设计燃烧器以保证燃料的充分燃烧并降低结渣率。王毅等^[10]为进一步降低生物质锅炉烟气排放污染,设计了一种集除尘、脱硫、余热利用功能的多效烟气净化装置。锅炉烟气在一次烟道内烟气与碱水发生中和反应,初步脱硫后进入二次烟道内,二次烟道的雾化喷淋装置将碱性水旋转高压喷出,使烟尘充分增湿、增重。张学敏等^[11]为对比上进料式、水平进料式和下进料式这 3 种进料方式的燃烧器对生物质成型燃料燃烧后颗粒物排放的影响。根据试验结果,建议不同的燃料匹配不同的燃烧器。玉米秸秆应该匹配水平进料型燃烧器,棉杆和木质燃料应该匹配上进料型燃烧器。

生物质能源种类众多,不同生物质的燃烧特性以及微量元素都有所不同^[12]。针对生物质燃烧特性及污染物排放特性的研究^[13-14]对后续的生物质燃烧装备的研究有着重要的作用。

国外生物质燃烧技术发展早,技术成熟。20 世纪 30 年代,美国、日本就开始研究压缩成型燃料技术及燃烧技术,并先后研制出螺旋压缩机、棒状燃料成型机及相关的燃烧设备;到 20 世纪 90 年代,日本、美国及欧洲一些国家生物质成型燃料燃烧设备已经定型,并形成了产业化,并普遍推广应用^[15]。目前,生物质燃烧特性、降低废气排放、提高燃烧效

率等依然是国外学者研究的热点。

BUCHMAYR 等^[16]针对目前准确地模拟生物质燃烧,需要较高的计算量这一问题,为小型生物质燃烧系统提供了一种精确、高效的 CFD 方法——稳态小火焰模型,该方法以较低的计算运行时间提供高度精确的模拟结果。SMITH 等^[17]将优化工具 Sculptor 与商用 CFD 代码 STARCCM + 相结合,可以在较短时间内找出生物质燃烧装置的最优设计。PASYMI 等^[18]为了设计一个具有轴向入口和一对切向入口的圆柱形生物质燃烧器,利用 Ansys-Fluent 的 $k-\varepsilon$ 湍流模型进行了数值计算。仿真结果表明,在一定的切向入口方向角下,燃烧器内部有回流现象,从而导致燃烧不稳定。在相同的横截面面积下,矩形切向入口形状比圆形形状会产生更深的回流渗透和更高的湍流强度。圆形形状轴向入口的缺点是会产生较高的静压,提高燃烧器运行成本,因此,矩形切向进口形状和方向角为 20°的燃烧器具有最佳的燃烧器性能。BÖHLER 等^[19]为了控制小型生物质炉膛的瞬态和稳态运行,利用间隙度量,为选定的若干操作点设计了几个局部线性控制器。将所得到的局部预测控制器与隶属度函数合并,形成一个模糊模型预测控制器。并将模糊模型预测控制器、线性模型预测控制器和 PI 控制算法的闭环仿真结果进行了比较,仿真结果表明,模糊模型预测控制器具有最好的性能。

FAROKHI 等^[20]研究稳定火焰模型(SFM)、非稳定火焰模型(UFM)和涡耗散概念(EDC)这 3 种燃烧模型对 8~11 kW 实验室小型生物质炉燃烧的影响,将模型预测的结果与实际测量结果进行对比,结果表明:所有被测试的燃烧模型都能够预测温度和主要排放物,但只有 EDC 能够准确地预测污染排放物。本文根据分级燃烧技术原理设计一种秸秆成型燃料炉具,以强化热质传递,确保燃尽效果,以保证完全燃烧与稳定燃烧,提高燃料实际燃烧期间 NO 排放量的控制力度。

1 生物质炉具设计

家用生物质锅炉的推广可以取代农村广大家庭中的传统燃煤锅炉,使得农村大量生物质资源得到有效利用,大大减少了环境污染。

按照生物质燃料的综合特征,其燃烧过程通常包括 4 个阶段:第 1 阶段散失内部水分,第 2 阶段压制燃料开始热解,第 3 阶段燃料强化燃烧,第 4 阶段稳定燃烧生热。强化燃烧过程中若炉膛只有一次进风,表面层固定碳剧烈燃烧,在高温下灰渣形成熔融态并附着在尚未燃烧的固定碳表面上,形成致密的

外壳,阻碍固定碳与氧气接触,不利于燃料的充分燃烧。因此炉膛需要引入二次进风、三次进风,将炉膛内的燃烧过程分为一次燃烧阶段、二次燃烧阶段和三次燃烧阶段。与单一的一次燃烧相比,引入多次进风可以减少一次风量,适当降低一次燃烧温度,减小结渣率;所增加的多次进风可以促进生物质燃料挥发分充分燃烧,提高燃烧效率。实验时所用燃料为秸秆粉碎后压制的生物质块状燃料,燃料尺寸约为 3 cm × 3 cm × 3 cm。其工业分析、元素分析与低位发热量如表 1 所示。

表 1 秸秆元素分析
Tab.1 Analysis of straw elements

物料	元素质量分数/%				
	碳	氧	氢	氮	硫
秸秆	46.48	39.20	5.50	1.62	0.01

设计的新型生物质锅炉的炉膛结构如图 1 所示。根据 NB/T 47062—2017《生物质成型燃料锅炉》中要求,生物质锅炉容积热负荷为 100 ~ 140 kW/m³,过大或过小的炉膛容积均会导致生物质颗粒燃烧效率降低。据此,炉膛设计容积计算式为

$$V=\frac{BQ_{\text{net.ad}}}{3\,600q}$$
 (1)

式中 $Q_{\text{net.ad}}$ ——生物质燃料低位发热量,kJ/kg
 B ——燃料消耗量,kg/h
 V ——炉膛容积,m³
 q ——炉膛容积热负荷,kW/m³

1.1 炉具整体结构设计

炉具整体结构如图 1 所示,包括炉具、充气机构 I、充气机构 II 和充气机构 III。所述炉具的底部设置有充气机构 I,炉具的外侧连接有充气机构 III,炉具的内侧设置有充气机构 II。

1.2 炉体设计

炉体设计如图 2 所示,炉体由中部充气段、底部充气段、拢火圈、底部通道、盖板 I、挡料板 I、入料筒、盖板 II、盖板 III 和烟囱组成。中部充气段的下端固定连接有底部充气段,中部充气段上设置有多个充气孔 I。底部充气段上设置有多个充气孔 II,中部充气段的上端固定连接有拢火圈,拢火圈上设置有盖板 III。中部充气段上固定连接有入料筒和烟囱,入料筒上设置有盖板 II,中部充气段的底部设置有底部通道,底部通道上设置有盖板 I。中部充气段的内侧固定连接有 2 个挡料板 I,2 个挡料板 I 分别位于充气孔 I 的上下两侧。

使用时将燃料通过入料筒倒入炉具内,点燃燃料,通过盖板 II 将入料筒盖合,通过底部通道,将炉

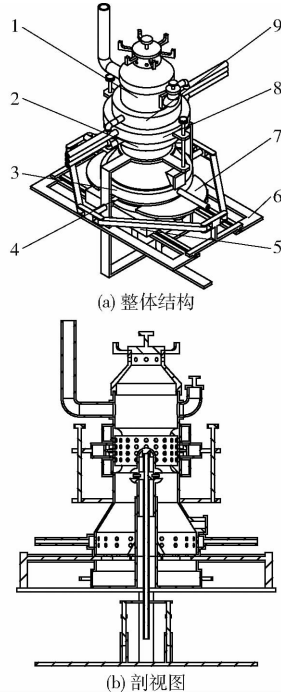


图 1 秸秆成型燃料炉具结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of straw shaped fuel stove structure

1. 炉具 2. 水套机构 3. 充气机构 I 4. 漏灰底板 5. 收纳箱
6. 装置支架 7. 闭合机构 8. 充气机构 II 9. 充气机构 III

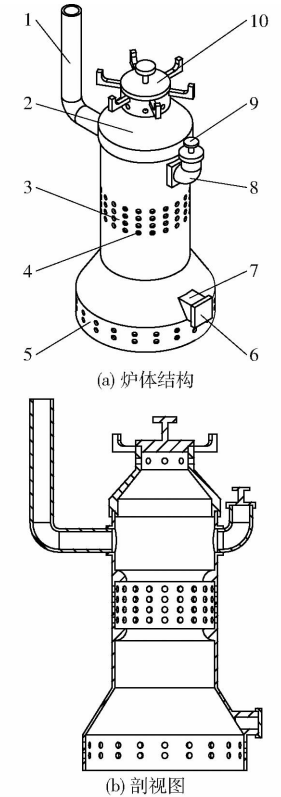


图 2 炉体结构示意图
Fig.2 Schematic diagram of furnace structure

1. 烟囱 2. 拢火圈 3. 中部充气段 4. 挡料板 I 5. 底部充气段 6. 底部通道 7. 盖板 I 8. 入料筒 9. 盖板 II 10. 盖板 III

钩子等插入其内,可以对底部充气段内底部的燃料

进行推动,调整燃烧时燃料的位置;2 个挡料板 I 可以防止燃料堆积在多个充气孔 I 处。

2 关键燃烧技术

2.1 变压射流燃烧技术

变压射流是指一次风和二次风以自旋、整体旋或者二者叠加的方式在炉体内形成的风压射流。通过改变二次风风速、风量和射入角度,形成螺旋式射流层、对冲式射流层和扰动式射流层。风量配比方面,一次风风量比 50% ~ 70%,二次风风量比 30% ~ 50%,当二次风比例偏上限时,合理布置二次风分层;一次风风速偏小为宜,不超过 0.5 m/s,二次风风速偏大为宜,不低于 10 m/s,也不宜过高;风压依系统烟风阻力,采用平衡或强制通风,通常都不会太高,不超过 2 ~ 3 kPa。并且一、二次风尽可能在炉膛截面上均匀分布,二次风需有足够的穿透能力,采用旋流加强扰动,以强化热质传递,确保燃料和热力型 NO_x 的燃烧充分度^[21]。

2.2 分级层燃烧技术

分级层燃烧是指燃料分层和空气分级、分层,可在燃烧过程中有效控制氮氧化物的生成与排放。本实验研究采用空气分级技术。工作原理是一级(次)风从炉底充入,燃料进行欠氧燃烧,二、三级(次)风等以分层和多角度方式射入燃烧室形成多级层空气射流层,改变烟气在炉膛内的运动路线和运动状态,使未燃尽的可燃性气体继续燃烧,释放能量。空气分级燃烧是将空气分级送入炉膛,使燃烧过程分阶段完成。首先,将约占总燃烧空气量 75%,过量空气系数小于 1 的空气供入炉膛,使燃烧温度及速率降低,形成还原性气氛,从而降低 NO_x 的生成量,此区域为主燃烧区。然后,将剩余的空气通过主燃烧器上方的喷口通入炉膛,此时过量空气系数大于 1,火焰温度相对较低,NO_x 的生成量减少。对于空气分级燃烧技术而言,调节其分级配风比例并优化配风位置是实现低 NO_x 排放的关键。

3 关键部件设计

气体射流是指气体自孔口、喷嘴或断面条缝向外喷射并同周围的气体掺混形成的流动。气流自半径为 R 的圆断面喷嘴喷出与出口处周围介质之间不断发生质量、动能交换,形成向前直线方向的柱状流动场。

气体扰流是指气体自管口通过管内螺旋叶片,使气体流动时受到扰动,形成不稳定的气流,在管壁的限制下,形成更加平滑的气流。扰流管是一种改

善空气动力学特性的装置,主要作用是改善管内气体流动状态,减小空气阻力,增强启动稳定性,从而提高气体的动能。

根据气体射流和气体扰流燃烧技术原理优化设计了户用一体炉、热水炉和热风炉(国家重点研发计划项目中的基础研究炉型)的关键燃烧部件,提高燃料实际燃烧期间 NO 排放量的控制力度。

3.1 户用一体炉燃烧部件设计

户用一体炉具配风装置包括一次配风机、二次配风机和二次配风装置等,一次配风机通过管路与炉底风腔连通安装,一次风(全压额定风量约 97 m³/h)从炉排下方送入,穿透燃料层,携带氧气加速燃料燃烧产生热量。

二次配风机通过管路与燃烧室出火口处的二次配风装置联通,二次配风装置上有多个吹气孔,自上而下,花洒式吹入炉膛出火口。在进入炉膛的二次风管前端,加装了 2 种形式的变压射流供风装置,如图 3、4 所示,分别为射流装置和扰流装置。

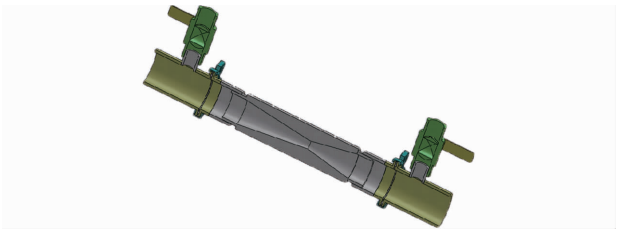


图 3 户用一体炉具射流部件示意图
Fig.3 Schematic of ejector element of household integrated furnace

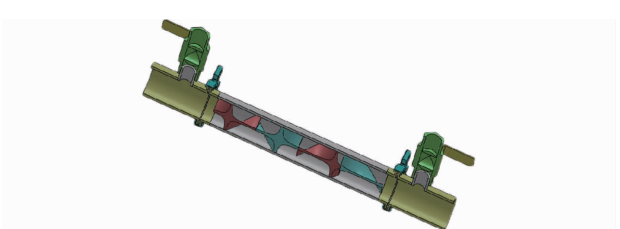


图 4 户用一体炉具扰流部件示意图
Fig.4 Schematic of spoiler component of household integrated furnace

3.2 热水炉关键部件设计

热水炉具一次风(风量 1 659 m³/h)从炉排下方送入,穿透燃料层,携带氧气加速燃料燃烧产生热量。二次风(风量 690 m³/h)从炉膛前端向下 45°射入炉膛。在炉体左侧进入炉膛的二次风管前段,加装了 2 种形式的变压射流器,如图 5、6 所示,分别为射流装置和扰流装置。二次风作用是冲击高温烟气形成多层气体旋流,改变烟气在炉膛内的运动路线和运动状态,使未燃尽的可燃性气体继续燃烧,释放能量。

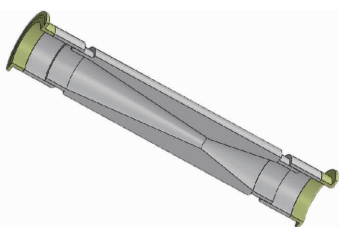


图 5 热水炉具射流部件示意图

Fig. 5 Schematic of jet component of hot water stove

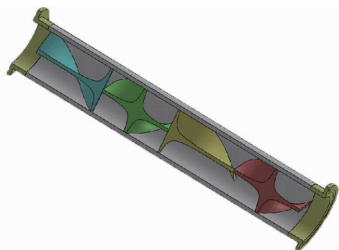


图 6 热水炉具扰流部件示意图

Fig. 6 Schematic of spoiler component of hot water stove

3.3 热风炉关键部件设计

热风炉具一次风(风量 5 200 m³/h)从炉排下方送入,穿透燃料层,携带氧气加速燃料燃烧产生热量。二次风(风量 1 700 m³/h)从炉体两侧对向射入炉膛,射入方式分为正对式、错位式和倾角式。在进入炉膛的二次风管前段,加装了 2 种形式的变压射流器,如图 7、8 所示,分别为射流装置和扰流装置。在炉体两侧二次风管前端安装射流器,改变二次风的风速和风量,与一次风形成螺旋式射流层、对冲式射流层和扰动式射流层。

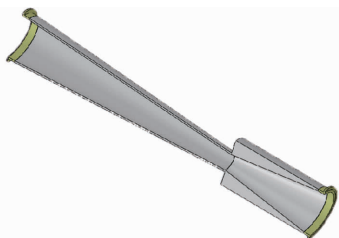


图 7 热风炉具射流部件示意图

Fig. 7 Sketch of jet component of hot air stove

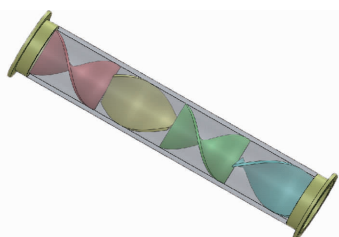


图 8 热风炉具扰流部件示意图

Fig. 8 Schematic of spoiler component of hot air stove

4 不同形式风压射流对氮氧化物排放浓度的影响

在秸秆成型燃料稳定燃烧阶段,进行数据的采

集和测量。首先调节控制台变频器,使炉膛内一次燃烧区与二次燃烧区的燃烧温度趋于稳定,成型燃料进入稳定燃烧阶段。开启 KM9106 型烟气分析仪,在清洁空气中校准氧气和 NO、NO₂ 传感器的读数,待污染物读数清零,氧气体积分数在 20.9% 时校准完毕。将烟气分析仪的采样管伸入至烟道中央,每 5 min 记录 1 组烟道温度、氧气浓度、NO 浓度、NO₂ 浓度与 SO₂ 浓度。

4.1 户用一体炉燃烧试验

一体炉是顶部供风,二次风自上而下直吹燃烧区出火口,二次风管直径 60 mm。对比表 2~4 同等工况下不同配风方式下风速、风量和相对应 NO_x 生成量的变化,可以看出在射流方式下二次风风压增大,NO_x 生成量减小,说明二次风通过射流管,提高了二次风的动能,使得生物质成型燃料的燃烧效果得到改善,成型燃料燃烧充分,NO_x 排放量最低,平均排放量 133.8 mg/m³。而扰流方式下二次风风压继续增大,NO_x 生成量逐渐减小,说明通过扰流管的二次风更平滑稳定,动能增加,有效提高成型燃料燃烧效率,燃烧充分,NO_x 排放浓度最低,平均排放量 121.5 mg/m³。

表 2 户用一体炉不同风压射流下的风速

Tab.2 Wind speeds of household integrated furnace under different air pressure jets								m/s
二次风射入方式	风速						均值	
	1	2	3	4	5	6		
扰流	2.3	2.3	2.3	2.2	2.3	2.3	2.28	
射流	2.2	2.1	2.2	2.2	2.1	2.2	2.17	
直通	2.2	2.1	2.1	2.2	2.0	2.2	2.13	

表 3 户用一体炉不同风压射流下的风量

Tab.3 Air volume of household integrated furnace under different air pressure jets								m ³ /h
二次风射入方式	风量						均值	
	1	2	3	4	5	6		
扰流	23.2	23.7	23.5	23.3	23.4	22.9	23.4	
射流	23.1	23.4	23.1	21.8	23.5	22.5	22.9	
直通	22.7	22.5	21.9	22.1	22.4	22.5	22.3	

表 4 户用一体炉不同风压射流下的排放物浓度

Tab.4 Emission concentration of household integrated furnace under different air pressure jets					
二次风射入方式	O ₂ 体积分数/%	SO ₂ 质量	NO 质量	NO ₂ 质量	NO _x 质量
		浓度/	浓度/	浓度/	浓度/
		(mg·m ⁻³)	(mg·m ⁻³)	(mg·m ⁻³)	(mg·m ⁻³)
扰流	13.9	0	187.7	0	121.5
射流	17.2	0	222.7	0	133.8
直通	16.1	0	307.0	0	144.7

4.2 热水炉燃烧试验

热水炉二次风是左侧单侧供风,二次风向下45°斜吹燃烧区,二次风管直径 80 mm。对比表 5~7 同等工况下不同配风方式下风速、风量和相对应生成 NO_x生成量的变化,可以看出在单侧配风射流方式下二次风风压增大,NO_x生成量减小,说明射流通过压缩和瞬间释放的方式能增加风速和风量,改变二次风风压,使得生物质成型燃料的燃烧效果得到改善,成型燃料燃烧充分,NO_x排放量最小,平均排放量 56.6 mg/m³。而扰流方式下二次风风压继续增大,NO_x生成量逐渐减小,说明扰流螺旋式改变风向,形成瞬时风压,从而改变二次风风压,有效提高成型燃料燃烧效率,燃烧充分,NO_x排放量最小,平均排放量 26.4 mg/m³。

表 5 热水炉不同风压射流下的风速

Tab.5 Wind speed under different air pressure jet

		air pressure jets						m/s
二次风 射入方式	风速						均值	
	1	2	3	4	5	6		
扰流	9.1	8.8	8.8	9.1	9.1	8.9	8.97	
射流	8.6	8.7	8.7	8.6	8.9	8.4	8.65	
直通	6.9	7.2	6.5	6.2	7.0	6.8	6.77	

表 6 热水炉不同风压射流下的风量

Tab.6 Air volume of water heater under different

		air pressure jets						m ³ /h
二次风 射入方式	风量						均值	
	1	2	3	4	5	6		
扰流	126.2	122.4	126.5	126.4	123.6	124.5	124.7	
射流	111.6	112.3	110.7	114.5	110.2	111.3	111.8	
直通	95.5	90.3	85.9	96.9	94.2	98.3	93.1	

表 7 热水炉不同风压射流下的排放物浓度

Tab.7 Emission concentration of water heater under

		different air pressure jets								
二次风 射入 方式	O ₂ 体积 分数/%	SO ₂ 质量	NO 质量	NO ₂ 质量	NO _x 质量					
		浓度/ (mg·m ⁻³)	浓度/ (mg·m ³)	浓度/ (mg·m ³)	浓度/ (mg·m ⁻³)					
扰流	19.8	0	13	0	26.4					
射流	19.4	0	37	0	56.6					
直通	12.8	0	143	0	238.0					

4.3 热风炉燃烧试验

热风炉是双侧供风,二次风双侧对吹燃烧区,二次风管直径 120 mm。对比表 8~10 同等工况下不同配风方式下风速、风量和相对应生成 NO_x生成量的变化,可以看出在射流方式下的二次风风压增大,NO_x生成量减小,说明双侧对流方式射入二次风,形成的旋涡气流动能增大,使得生物质成型燃料的燃

烧效果得到改善,成型燃料燃烧充分,NO_x排放量最低,平均排放量 96.0 mg/m³。而扰流方式下的二次风风压继续增大,NO_x生成量逐渐减小,说明双侧扰流式供风能有效改变烟气在炉膛内的运动路线和运动状态,增大气体动能,使未燃尽的可燃性气体继续燃烧,NO_x排放量最低,平均排放量81.7 mg/m³。

表 8 热风炉不同风压射流下的风速

Tab.8 Wind speeds of hotair stove under different

		air pressure jets						m/s
二次风 射入方式	风速						均值	
	1	2	3	4	5	6		
扰流	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.80	
射流	1.3	1.3	1.4	1.4	1.4	1.4	1.37	
直通	1.4	1.3	1.2	1.2	1.2	1.3	1.27	

表 9 热风炉不同风压射流下的风量

Tab.9 Air volume of hot air stove under different

		air pressure jets						m ³ /h
二次风 射入方式	风量						均值	
	1	2	3	4	5	6		
扰流	97.1	101.1	101.6	98.3	99.8	96.7	99.5	
射流	71.2	77.1	75.5	77.5	80.2	73.6	76.8	
直通	76.3	66.5	64.1	64.8	70.7	62.0	65.6	

表 10 热风炉不同风压射流下的排放物浓度

Tab.10 Emission concentration of hot air stove

		under different air pressure jets								
二次风 射入 方式	O ₂ 体积 分数/%	SO ₂ 质量	NO 质量	NO ₂ 质量	NO _x 质量					
		浓度/ (mg·m ⁻³)	浓度/ (mg·m ⁻³)	浓度/ (mg·m ⁻³)	浓度/ (mg·m ³)					
扰流	19.8	0	52.5	0	81.7					
射流	18.8	0	62.0	0	96.0					
直通	19.6	0	70.5	0	108.8					

结合 3 种炉具燃烧试验,经过实际试验,对比 3 种方式供风燃烧数据可知,扰流形成的风压射流燃烧效果最佳。

5 扰流工况下一、二次风量比例对氮氧化物排放浓度的影响

经过分析计算试验数据可以看出,当以扰流形成的风压射流模式下,NO_x排放浓度最低,在此基础上继续研究不同一、二次风量比例对锅炉燃烧排放 NO_x 的影响。

结合表 11 中不同配风工况下 NO_x的排放量、O₂ 体积分数与 NO_x折算质量浓度数据,可以看出当一、二次风量比例为 2:3 时,一次燃烧所需氧气量不足,燃烧不充分,二次燃烧区空气过量导致燃烧温度较低,其 NO_x排放量不高。增大一次风量后,NO_x排放

量逐步上升,烟气氧含量逐步下降,燃烧温度升高,说明成型燃料燃烧更加完全,燃烧排放的 NO 和 NO₂ 气体均有所增加。体现到 NO_x 折算质量浓度方面,随着温度的升高,NO_x 折算排放质量浓度增速降低,一、二次风量比例为 1:1 时相较 2:3 NO_x 折算质量浓度升高 9.5 mg/m³,而比例为 3:2 时 NO_x 折算值

上升仅为 1.73 mg/m³。这是因为燃料完全燃烧会导致炉膛内的氧气含量有所降低,氧化气氛逐渐转变为还原性气氛,使得一些氮氧化物被还原。当一、二次风量比例为 3:1 时,NO_x 平均排放量仅为 72.83 mg/m³,NO_x 折算质量浓度为 141.33 mg/m³。综合分析得出,选择一、二次风量最佳配比为 3:1。

表 11 不同一、二次风量比例时 NO_x 的排放浓度和折算浓度

Tab.11 NO _x emission concentration and converted concentration at different ratios of primary and secondary air volume												
时间/ min	一、二次风量比例 2:3			一、二次风量比例 1:1			一、二次风量比例 3:2			一、二次风量比例 3:1		
	NO _x 质量 浓度/ (mg·m ⁻³)	O ₂ 体积 分数/ %	折算质 量浓度/ (mg·m ⁻³)	NO _x 质量 浓度/ (mg·m ⁻³)	O ₂ 体积 分数/ %	折算质 量浓度/ (mg·m ⁻³)	NO _x 质量 浓度/ (mg·m ⁻³)	O ₂ 体积 分数/ %	折算质 量浓度/ (mg·m ⁻³)	NO _x 质量 浓度/ (mg·m ⁻³)	O ₂ 体积 分数/ %	折算质 量浓度/ (mg·m ⁻³)
5	61	15.8	140.77	45	18.2	192.86	51	18.4	235.38	55	17.6	194.12
10	85	13.8	141.67	68	15.5	148.36	58	16.9	169.76	81	15.5	176.73
15	95	11.3	117.53	65	15.4	139.29	70	14.5	129.23	65	15.4	139.29
20	28	18.7	146.09	102	12.1	137.53	82	11.9	108.13	90	13.4	142.11
25	90	13.6	145.95	82	13.1	124.56	96	9.6	101.05	74	12.6	105.71
30	104	10.2	115.56	124	8.8	121.97	127	9.4	131.38	72	11.4	90.00
均值	77.17	13.90	134.59	81.00	13.85	144.09	80.67	13.45	145.82	72.83	14.32	141.33

6 结论

(1)保持一、二次风量比例为 1:1 不变,分别改变二次风送风形式为射流、扰流和直通。分析数据表明当以扰流方式配送二次风时,通入炉膛的二次风风量和风速偏大,秸秆成型燃料燃烧充分,NO_x 排放量最低。对比分析,扰流配送二次风降低 NO_x 生成量更有效。

(2)在扰流配送二次风的基础上,以一、二次风

量比例为变量,分别研究成型燃料不同一、二次风量比燃烧时氮氧化物的排放状况。结果表明,一次风量较少时,不利于生物质颗粒的燃烧,排放的氮氧化物较少。二次风配比的增加,炉膛前部未燃尽的可燃物在炉膛后部的供氧量随之增加,燃料的燃尽率、锅炉的热效率得以提高,降低 NO_x 排放量。经过多次试验得出,一、二次风量配比为 3:1 左右,燃烧的效率最高,NO_x 排放浓度最低。

参 考 文 献

[1] 肖九梅. 发展生物质能源——环保节能新主张(上)[J]. 农业工程技术,2015(9):32-36.

[2] 穆献中,余漱石,徐鹏. 农村生物质能源化利用研究综述[J]. 现代化工,2018,38(3):9-13,15.

[3] 孙玮. 生物质资源及其利用技术分析[J]. 中国高新区,2018(14):213.

[4] 周建强,高攀,董长青,等. 固体生物质燃烧中氮氧化物产生机理综述[J]. 热力发电,2018,47(12):1-9,16.

[5] 田宜水,张鉴铭,陈晓夫,等. 秸秆直燃热水锅炉供热系统的设计[J]. 农业工程学报,2002,18(2):87-90.

TIAN Yishui, ZHANG Jianming, CHEN Xiaofu, et al. Study & design on straw hot water boiler for heating plant[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(2): 87-90. (in Chinese)

[6] 姚宗路,孟海波,田宜水,等. 抗结渣生物质固体颗粒燃料燃烧器研究[J]. 农业机械学报,2010,41(11):89-93,137.

YAO Zonglu, MENG Haibo, TIAN Yishui, et al. Design and experiment on anti-slagging biomass pellet fuel burner[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(11):89-93,137. (in Chinese)

[7] 李亚猛,周雪花,胡建军,等. 生物质颗粒直燃炉灶设计与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(10):280-285.

LI Yameng, ZHOU Xuehua, HU Jianjun, et al. Design and test of direct-fired stove using biomass pellet fuel[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10):280-285. (in Chinese)

[8] 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)

[9] 夏许宁,刘圣勇,洪福,等. 生物质颗粒燃烧器的设计与性能测试[J]. 农机化研究,2017,39(1):227-231.

XIA Xuning, LIU Shengyong, HONG Fu, et al. Design and performance testing of biomass particle burners[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017,39(1):227-231. (in Chinese)

[10] 王毅,杜金宇,张全国,等. 生物质锅炉多效烟气净化装置设计与性能研究[J]. 农业机械学报,2018,49(2):313-318.

WANG Yi, DU Jinyu, ZHANG Quanguo, et al. Research on multiple purification device design and performance of biomass boiler flue gas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2):313–318. (in Chinese)

[11] 张学敏,张永亮,姚宗路,等. 不同进料方式燃烧器对生物质燃料颗粒物排放特性的影响[J]. 农业工程学报,2014, 30(12): 200–207.

ZHANG Xuemin, ZHANG Yongliang, YAO Zonglu, et al. Effect of burners with different feeding modes on emission characteristics of biomass molding fuel particles[J]. Transactions of the CSAE, 2014,30(12): 200–207. (in Chinese)

[12] 罗娟,侯书林,赵立欣,等. 典型生物质颗粒燃料燃烧特性试验[J]. 农业工程学报,2010,26(5):220–226.

LUO Juan, HOU Shulin, ZHAO Lixin, et al. Experimental study on combustion and emission characteristics of biomass pellets [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(5): 220–226. (in Chinese)

[13] 司耀辉,陈汉平,王贤华,等. 农业秸秆燃烧特性及动力学分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2012,40(1): 128–132.

SI Yaohui, CHEN Hanping, WANG Xianhua, et al. Combustion characteristics and dynamics analysis of agricultural straw[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 2012,40(1):128–132. (in Chinese)

[14] 陈国华,李运泉,彭浩斌,等. 大颗粒木质成型燃料燃烧过程烟气排放特性[J]. 农业工程学报,2015,31(7):215–220.

CHEN Guohua, LI Yunquan, PENG Haobin, et al. Characteristics of flue gas emissions during large wood pellet combustion [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(7): 215–220. (in Chinese)

[15] 陈汉平,李斌,杨海平,等. 生物质燃烧技术现状与展望[J]. 工业锅炉,2009(5):1–7.

[16] BUCHMAYR M, GRUBER J, HARGASSNER M, et al. A computationally inexpensive CFD approach for small-scale biomass burners equipped with enhanced air staging[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 115: 32–42.

[17] SMITH J D, SREEDHARAN V, LANDON M, et al. Advanced design optimization of combustion equipment for biomass combustion[J]. Renewable Energy, 2020, 145: 1597–1607.

[18] PASYMI, BUDHI Y W, BINDAR Y. Effects of tangential inlet shape and orientation angle on the fluid dynamics characteristics in a biomass burner[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2018,1090: 012007.

[19] BÖHLER L, KRAIL J, GÖRTLER G, et al. Fuzzy model predictive control for small-scale biomass combustion furnaces[J]. Applied Energy, 2020, 276: 115339.

[20] FAROKHI M, BIROUK M, TABET F. A computational study of a small-scale biomass burner: the influence of chemistry, turbulence and combustion sub-models[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 143: 203–217.

[21] 于磊. 基于变压射流燃烧技术的生物质炉具设计[J]. 农业机械学报,2022,53(增刊1):293–298,323

YU Lei. Design of biomass stove based on variable pressure jet combustion technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(Supp.1):293–298, 323. (in Chinese)