

基于变压射流燃烧技术的生物质炉具设计

于磊

(黑龙江省农业机械工程科学研究院, 哈尔滨 150081)

摘要: 生物质炉具是通过生物质燃烧提供热量的环保型炉具, 具有高效、环保、热效率高、烟尘排放低等优点, 被广泛应用于民用热水、建筑采暖和工业热力等领域中, 在我国有着悠久的历史 and 广泛的基础。然而, 市面上现存的生物质炉具由于技术限制, 在燃烧过程中难以保证生物质燃料充分燃烧, 存在锅炉热效率低及污染环境等问题; 故本文设计了一种基于变压射流燃烧技术的生物质成型燃烧炉具, 即在燃烧过程中, 2个进气机构所形成的一次风和二次风在炉体中以自旋、整体旋或者二者叠加的方式存在, 通过改变两次风的风量比例、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, 在燃烧过程中有效控制氮氧化物的生成与排放。燃料燃烧试验结果表明: 玉米秸秆燃烧热效率为 85.97%, 底灰结渣率为 3.42%, 生物质颗粒燃烧较充分; SO_2 排放量为 18.34 mg/m^3 , NO_x 排放量为 91.45 mg/m^3 , CO 体积分数为 0.092%, 污染物排放量符合国家标准; 锅炉具有较好的稳定性, 满足设计要求。

关键词: 生物质炉具; 变压射流燃烧; 氮氧化物

中图分类号: TS914.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)S1-0293-06

Design of Biomass Stove Based on Variable Pressure Jet Combustion Technology

YU Lei

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

Abstract: Biomass stoves are environmentally friendly stoves that provide heat through biomass combustion, which have a long history and extensive foundation in China. It has the advantages of high efficiency, environmental protection, high thermal efficiency, low smoke and dust emission, etc. It is widely used in domestic hot water, building heating and industrial heating and other fields. In the combustion process, however, due to technical limitations, it is difficult to ensure the full combustion of biomass fuels, and problems such as low boiler thermal efficiency and environmental pollution have become constraints on the development of biomass stoves in China. To solve this problem, a biomass molding combustion stove was proposed based on variable pressure jet combustion technology. During the combustion process, the primary air and secondary air formed by the two air intake mechanisms of the stove were in the furnace body in the form of spin, integral rotation or superposition of the two, changing the air volume ratio and air intake position of the secondary air and the inflation angle. As a result, different air pressure jets were formed in the stove to strengthen the heat and mass transfer, ensure the burnout effect, and effectively control the generation and emission of nitrogen oxides during the combustion process. The fuel combustion test results showed that the combustion thermal efficiency of corn stover was 85.97%, the bottom ash slagging rate was 3.42%, and the biomass particles were fully burned; the SO_2 emission was 18.34 mg/m^3 , the NO_x emission measurement was 91.45 mg/m^3 , and the CO volume fraction was 0.092%. The pollutant discharge met the national standard. The boiler had good stability and met the design requirements.

Key words: biomass stoves; variable pressure jet combustion; nitrogen oxides

0 引言

生物质能是一种以生物质为载体,通过光合作用将获得的太阳能转化为化学能并储存于生物质中的能量形式^[1-2](如林下资源^[3]、秸秆、壳皮^[4]、藻类),是唯一一种可运输和储存的可再生绿色资源,具有生态意义上碳的零排放、易取得、燃烧产物相对清洁、转换效率高等优点,在世界能源格局中扮演着重要的角色。OLAOYE 等^[5]对比不同类型炉具所消耗能量发现:粘土炭炉每餐消耗 17.86 MJ,粘土衬金属炭炉每餐消耗 22.48 MJ,当地金属炭炉每餐消耗 36.96 MJ,使用生物质炉具可大大降低燃烧所需的燃料。然而,生物质中含有丰富的 N 元素,在其热利用过程中,燃料中的 N 可能会生成氮氧化物(NO_x)造成酸雨、光化学烟雾等环境污染^[6]。目前缓解这一问题的方法主要是掺加添加剂来降低污染物的生成^[7],然而这也势必会增加生物质应用的成本。有些科学家也混合多种灰分组成上存在显著差异的生物质进行协同效应来缓解污染物排放。HAN 等^[8]采用树体、麦秸以及添加剂共混考察其对 SO_2 、NO 排放,结果表明,协同作用可使 SO_2 和 NO 的排放量降低; CaO 、 CaCO_3 和 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 改性后的混合型煤 SO_2 和 NO 排放进一步降低,灰熔融性明显提高^[9]。但混合燃料的应用也需要大量理论技术,且普适性不强。

本文以生物质燃料炉具为研究对象,基于变压射流燃烧技术设计一种环保炉具,以期改善上述问题。

1 NO_x 生成机理

NO_x 是烟气中的重要污染物,在生物质燃料燃烧过程中,根据其产生机理的不同可分为:燃料型 NO_x 、热力型 NO_x 和快速型 NO_x 。

燃料型 NO_x 的生成温度为 $600\sim 800\text{ }^\circ\text{C}$,它是由燃料中的含氮化合物热分解生成 HCN、CH 和 NH_3 等中间产物进一步氧化产生的^[10]。在实际燃烧过程中,燃料型 NO_x 排放量占总 NO_x 排放量的 $60\%\sim 80\%$,主要影响因素有:火焰温度、高温区停留时间及氧浓度^[11]。当火焰温度越高,高温区停留时间越长,氧浓度越高, NO_x 的转化率越大^[12]。

热力型 NO_x 是由空气中的 N_2 和 O_2 反应生成的,排放量主要与温度、过量空气系数、高温区停留时间等因素相关。温度是影响热力型 NO_x 产生的重要因素,当温度低于 $1\,600\text{ }^\circ\text{C}$ 时,热力型 NO_x 的生成量较少,温度变化对其影响不显著;当温度高于 $1\,600\text{ }^\circ\text{C}$ 时,热力型 NO_x 的生成量随温度的升高呈指

数增长^[13]。燃烧时,在同一过量空气系数下,热力型 NO_x 随高温区火焰停留时间的延长而增加,但当 NO_x 释放完全后,延长停留时间, NO_x 生成量不再变化^[14]。当过量空气系数增加时,解离出的氧浓度增加, NO_x 生成速率增加;燃烧火焰温度升高时,热力型 NO_x 生成量也随之升高^[15-16]。

快速型 NO_x 是指燃料中的碳氢化合物在高温下分解生成的 CH 自由基,与空气中 N_2 反应生成 HCN 和 N,再进一步与氧气作用生成的 NO_x ,其生成量与燃料种类、过量空气系数及压力等因素有关。根据快速型 NO_x 的反应机理可知,当燃料为天然气等碳氢气体燃料时,快速型 NO_x 的排放量明显增多;但对于其他气体燃料如 H_2 、CO,燃烧过程中产生的快速型 NO_x 含量极少。当过量空气系数逐渐增加时,快速型 NO_x 的生成量呈现先增大后减小的趋势,这是由于前期提高过量空气系数可促进中间氮氧化合物的生成;但当过量空气系数过大时,燃料浓度逐渐降低,快速型 NO_x 的生成量也随之降低^[17]。

2 治理方法

在燃烧过程中,热力型 NO_x 排放量约占 NO_x 总排放量的 $60\%\sim 80\%$,因此在排放物治理过程中,主要考虑减少热力型 NO_x 的生成。热力型 NO_x 的产生主要受反应条件影响,故优化燃烧技术是降低 NO_x 生成量的关键。

2.1 烟气再循环技术

烟气再循环技术是指在空气预热器前抽取燃烧后产生的一部分低温烟气,将其直接送入炉内或与一次风、二次风混合后送入炉内参与燃烧,从而有效控制 NO_x 的产生。王志宁等^[17]采用 Chemkin 软件模型来模拟烟气再循环对 CH_4 燃烧过程中 NO 的影响,发现当空气循环率从 0 增至 30% ,燃烧温度降低 $250\text{ }^\circ\text{C}$,空气燃料混合物中氧体积分数降低 $3.4\%\sim 5.0\%$,出口 NO 体积分数显著减少。宋少鹏等^[18]采用外部烟气再循环技术,使空气与一定量循环烟气混合后进入燃烧器,与天然气在炉膛内燃烧,发现在 $0\sim 25\%$ 范围内, NO_x 排放量随着烟气循环率的增加呈非线性减少,在 $0\sim 10\%$ 时, NO_x 减排量可达 65% ; $10\%\sim 45\%$ 时,对 NO_x 的生成量影响逐渐减小。

2.2 富氧燃烧技术

富氧燃烧技术是以高于空气的富氧气体作为反应的助燃剂,从而加快燃烧速度,提高燃烧效率,降低污染物排放量的燃烧技术^[19]。根据烟气循环方

式的不同又可分为干烟气循环(O_2/CO_2 气氛)与湿烟气循环($O_2/CO_2/H_2O$ 气氛)^[20]。干烟气循环条件下 N_2 含量很少,且烟气中高浓度的 CO_2 在燃烧初期与煤焦生成大量还原性的 CO 可在煤焦的催化作用下还原 NO_x ,使 NO_x 总生成量减少。孙瑞金等^[21]对比不同氧浓度下高碱煤燃烧后产 NO 的不同发现,空气氛围 NO 体积分数为0.017%;富氧气氛下 NO 体积分数为0.008%,降低了113%,这是由于湿烟气循环下,水蒸气的存在会抑制 HCN 转化为 CN 、促进 HCN 转化为 NH_3 ,而 NH_3 脱氢转变成的 NH_2 对 NO 有较强的还原作用,因此抑制了 NO_x 的生成。

2.3 燃料分级燃烧

燃料分级燃烧技术又称再燃燃烧技术,它是沿炉膛长度方向,从下至上划分为3个燃烧区:主燃区、再燃区及燃尽区。燃烧时,将第1批燃料投入炉内进行燃烧,生成大量 NO_x ;随后将第2批再燃燃料送入炉内燃烧,使其形成还原性气氛,从而还原主燃区烟气中的 NO_x ;最后,在燃尽区将未完全燃烧的含碳物质燃尽。宋少鹏等^[18]通过试验发现二次燃料比例对 NO_x 含量有重要影响,在50%负荷情况下, NO_x 排放量随二次燃料的增加而升高,当二次燃料的比例达到40%时, NO_x 排放量到达最大值(135 mg/m^3),随后增加二次燃料比例, NO_x 排放量随之降低。

2.4 空气分级燃烧

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 的生成量较少。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,该技术也是目前应用最为广泛且成熟可靠的低氮燃烧技术^[22-23]。王为术等^[24]通过Fluent软件分析发现,加入燃尽风可降低炉膛出口温度和 NO_x 的生成量,当主燃区最佳过量空气系数为0.9,燃尽风最佳配比为0.15、0.1、0.5时, NO_x 的生成量为 398.3 mg/m^3 ,相比无燃尽风的工况降低35.97%,炉膛出口烟温为900.4 K,相比无燃尽风的工况降低31.42%。

3 低 NO_x 炉具设计

根据分级技术原理设计了一种基于变压射流燃烧技术的生物质成型燃烧炉具,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_x 排放量的控制力度。

3.1 关键技术

该炉具核心技术是变压射流燃烧技术,变压射流技术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技术。一次风风量比50%~70%,二次配风风量比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;风压要依系统烟风阻力,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,二次风要有足够的穿透能力,采用旋流加强扰动,以强化热质传递,确保燃尽效果。

3.2 结构设计

生物质炉具整体结构如图1所示,主要由炉体、进气机构I、进气机构II、水套机构、卸料机构、装置支架、安装机构组成,炉具底部设置有进气机构I,中部滑动连接进气机构II。

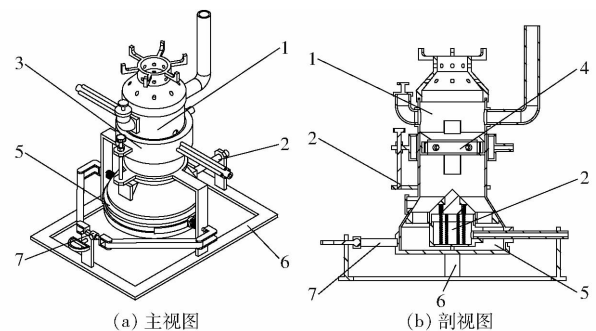


图1 生物质成型燃料炉具

Fig. 1 Structure diagrams of biomass briquetting fuel stove

1. 炉体 2. 进气机构I 3. 水套机构 4. 进气机构II 5. 卸料机构 6. 装置支架 7. 安装机构

3.2.1 炉体设计

如图2所示,炉体由炉身、出料段、滑动腰孔、拢火圈、底部通道、盖板I、入料管道、盖板II和烟囱组成,炉身上设置有滑动腰孔,上端固定连接拢火圈和底部通道,下端固定连接出料段。底部通道上盖合有盖板I,上侧固定连接入料管道,对侧连接烟囱。入料管道上盖合有盖板II。

3.2.2 进气机构I

如图3所示,进气机构I由进气腔体I、进气锥体、射流通道的进气挡块和进气管道I组成。进气腔体I上固定连接进气锥体;锥体上设置有多个射流通道的进气挡块,其上滑动连接多个进气挡块。多个进气挡块分别位于多个射流通道的上端,和腔体底部固定连接压缩弹簧I。进气腔体I上固定连有进气管道I,腔体与进气管道I及多个射流通道的进气管

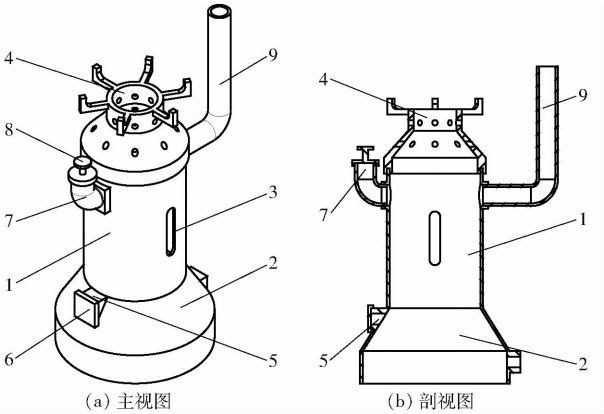


图 2 炉体结构图

Fig.2 Structure diagrams of furnace body

1. 炉身 2. 出料段 3. 滑动腰孔 4. 拢火圈 5. 底部通道 6. 盖板 I 7. 入料管道 8. 盖板 II 9. 烟囱

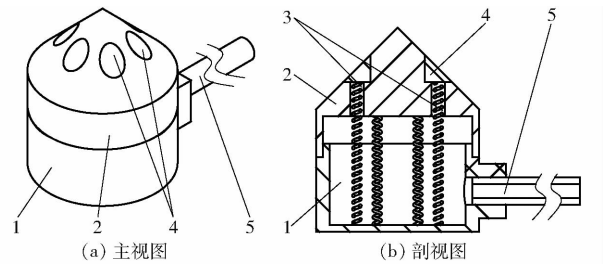


图 3 进气机构 I 结构图

Fig.3 Structure diagrams of air intake mechanism I

1. 进气腔体 I 2. 进气锥体 3. 射流通道 4. 进气挡块 5. 进气管道 I

道 I 固定连接在出料段上。

燃烧时,向进气管道 I 内通入空气,空气流经进气腔体 I 后,从射流通道通入炉身底部,进行第 1 次充气。在压缩弹簧的压力下,使进气挡块对射流通道内流出的气体进一步挤压,增加气体流出的压力。同时,进气锥体的锥形设置可保证气体可以通入炉内。

3.2.3 水套机构

如图 4 所示,水套机构由水套腔体、入水管道、出水管道、进气管道 II、螺纹杆和锁紧螺母组成。水套腔体滑动连接在炉身上,腔体上固定连接入水管道,左右两侧与多个出水管道连通,2 个进气管道 II 均穿过水套腔体。

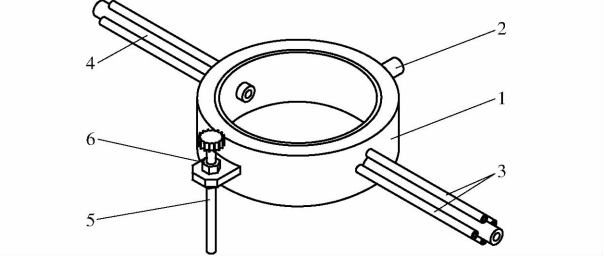


图 4 水套机构结构图

Fig.4 Structure diagram of water jacket mechanism

1. 水套腔体 2. 入水管道 3. 出水管道 4. 进气管道 II 5. 螺纹杆 6. 锁紧螺母

3.2.4 进气机构 II

如图 5 所示,进气机构 II 由进气腔体 II、挡料倾斜板、挡料侧板、转动内环和射流管道构成。进气腔体 II 的上固定连接挡料倾斜板和 2 个挡料侧板,挡料侧板均滑动连接在炉身内分别和 2 个滑动腰孔相互对应。进气腔体 II 上转动连接转动内环,转动内环上固定连接有多个射流管道,可对炉内燃料进行二次充气。

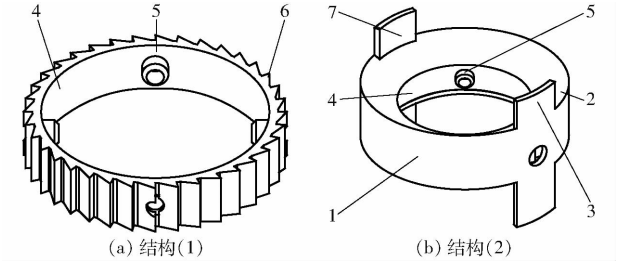


图 5 进气机构 II 结构图

Fig.5 Structure diagrams of intake mechanism II

1. 进气腔体 II 2. 挡料倾斜板 3、7. 挡料侧板 4. 转动内环 5. 射流管道 6. 倾斜体

进气机构 II 转动内环外侧固定连接多个倾斜体。同时,进气管道 II 向进气腔体 II 内通气时,气体的吹动使多个倾斜体推动转动内环发生转动,转动内环带动多个射流管道发生转动,使得多个射流管道的气体均匀通入炉内,增加充气效果。

3.2.5 装置支架

炉身固定连接在装置支架上,螺纹杆转动连接在装置支架上。可根据不同的使用需求转动螺纹杆,调整水套机构和进气机构 II 的高度,从而调整进气机构 II 的充气位置。

3.2.6 安装机构

安装机构由安装滑块、安装弧板、安装拉手和安装连杆组成。安装滑块设置 2 个,均滑动连接在装置支架上,内侧均固定连接安装弧板;2 个安装弧板均卡在卡接槽内。2 个安装滑块和装置支架之间均固定连有压缩弹簧 II,安装拉手滑动连接在装置支架上,拉手与滑块之间铰接安装连杆。

燃烧完成后,推动安装拉手向后进行运动,使得 2 个安装弧板从卸料机构上分离,卸料机构掉落,使得炉内的残渣掉落,可以快速排出燃烧残渣,方便使用。

3.3 工作原理

一次风由鼓风机送入,从炉排下部穿透燃料层,与二次风叠加形成射流层。一次风携带的氧气加速助燃从而产生热量。二次风由风机从炉身顶端送入,通过风道从炉身高温主燃烧区两侧高速射入炉膛。强行冲击高温烟气并与其碰撞混合,冲击使高温烟气的气流运动状态发生改变,增加高温烟气在炉膛内的

行走路线和停留时间,同时高温作用下使烟气内未曾燃尽的可燃性气体继续燃烧,释放其热量。

根据炉膛内燃料燃烧和需氧状况,通过 PLC 智能控制变频器,控制一次风机和二次风机,无级调节转速补风和补氧,满足炉膛内设定的炉温。一次风补风范围设定为 2 664 ~ 5 268 m³/h。二次风补风范围设定为 824 ~ 1 704 m³/h。

3.4 工作过程

使用时,生物质燃料通过入料管道进入炉身并点燃,炉钩子等通过底部通道插入其内,对内底部的燃料进行推动,调整燃烧时燃料的位置。此时,通过进气管道 I 向进气腔体 I 通入空气,空气通过射流通道通入炉底进行第 1 次充气。向进气管道 II 通入空气流入进气腔体 II,空气通过射流管道对炉身中部进行第 2 次充气。进气管道 II 向进气腔体 II 内通气时,气体吹动倾斜体,使其推动内环发生转动,内环又带动多个射流管道发生转动,管道内的气体均匀通入炉内,增加充气效果。燃烧时,预先通过入水管道向水套腔体注水,在燃烧时,产生热量可对腔内水进行加热,使出水管道流出的水具备一定温度。2 个进气管道 II 分别位于对应的多个出水管道之间,出水管道内温度的升高对 2 个进气管道 II 产生预热效果,使通入进气机构 II 内的空气具备一定的温度,有利于燃料燃尽。第 2 次充气还可分层送入,以强化热质传递,确保燃尽效果,可在燃烧过程中有效控制氮氧化物的生成与排放。

4 燃烧试验

4.1 试验材料

试验选取的玉米秸秆压缩成型颗粒呈圆柱形,直径为 7 ~ 10 mm,长度为 30 mm,其工业分析及元素分析如表 1 所示。

表 1 玉米秸秆特性分析

Tab.1 Characteristic analysis of corn stover

项目	参数	数值
工业分析(基于空气干燥基)	水分百分数/%	9.1 ± 0.08
	挥发分百分数/%	74.4 ± 0.40
	灰分百分数/%	10.2 ± 0.20
	固定碳百分数/%	6.3 ± 0.07
元素分析	碳百分数/%	52.83 ± 0.10
	氢百分数/%	4.75 ± 0.02
	氮百分数/%	2.67 ± 0.01
	硫百分数/%	0.86 ± 0.01
	氧百分数/%	38.89 ± 0.05
热值分析	低位热值/(MJ·kg ⁻¹)	16.18

4.2 试验仪器及方法

试验采用 KM Quintox 9106 型烟气分析仪测量

炉具燃烧工况下 SO₂、NO_x、CO 的实际排放值。JK804 型多路温度测试仪,连接有 K 型热电偶,可测量燃烧温度。WS70-1 型远红外干燥箱、SX2 型马弗炉对炉渣中可燃物含量进行检测。

根据 GB 10180—2003《工业锅炉热工性能试验规程》,GB 13271—2011《锅炉大气污染物排放标准》,及 GB 5468—1991《锅炉烟尘测试》对生物质锅炉进行性能试验。

4.3 试验结果

生物炉具分配恰当的二级风和底风,达到合适的燃烧温度,保证燃烧充分,其试验各阶段燃烧温度、燃烧效率和各项热损失,以及灰渣含碳量等试验结果如表 2 所示。

表 2 炉具性能试验数据

Tab.2 Test data of furnace performance

参数	数值
炉膛中间温度/℃	839.7
燃烧器出口温度/℃	927.6
排烟温度/℃	219.0
气体不完全燃烧热损失/%	0.31
固体不完全燃烧热损失/%	2.36
灰渣物理热损失/%	0.07
排烟热损失/%	11.29
炉具热效率/%	85.97
灰渣含碳量/%	2.87
底灰结渣率/%	3.42
SO ₂ 排放量/(mg·m ⁻³)	18.34
NO _x 排放量/(mg·m ⁻³)	91.45
CO 体积分数/%	0.092
烟气灰度等级	1

由表 2 可知,燃烧时,二级配风分配均匀,使燃料颗粒充分燃烧,玉米秸秆燃烧热效率为 85.97%,结渣率较低。同时,根据 GB 13271—2001《锅炉大气污染物排放标准》要求,颗粒燃烧器的污染物排放达到环保标准。生物质颗粒燃烧器的设计合理,各级配风能够满足燃料的每个阶段的燃烧,颗粒燃料燃烧充分、效率高。

5 结束语

设计了基于变压射流燃烧技术的生物质炉具,在燃烧工程中,通过不同位置机构的二次充气强化热质传递,确保燃尽效果,可在燃烧过程中有效控制氮氧化物的生成与排放。玉米秸秆燃烧试验结果表明:玉米秸秆燃烧热效率为 85.97%,底灰结渣率为 3.42%,生物质颗粒燃烧较充分;SO₂ 排放量为 18.34 mg/m³,NO_x 排放量为 91.45 mg/m³,CO 体积分数为 0.092%,污染物排放量符合国家标准;锅炉具有较好的稳定性,满足设计要求。

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.
XIAO Jiumei. Developing biomass energy—a new idea of environmental protection and energy conservation (Part I)[J]. Agricultural Engineering Technology, 2015(9): 32–36. (in Chinese)
- [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.
MU Xianzhong, YU Shushi, XU Peng. A review of research on rural biomass energy utilization[J]. Modern Chemical Industry, 2018, 38(3): 9–13, 15. (in Chinese)
- [3] ANTOLINI E. Lignocellulose, cellulose and lignin as renewable alternative fuels for direct biomass fuel cells[J]. ChemSusChem, 2020, 14(1): 189–207.
- [4] 李震, 王宏强, 高雨航, 等. 沙柳生物质燃料颗粒致密成型粘结机理研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(21): 235–241.
LI Zhen, WANG Hongqiang, GAO Yuhang, et al. Bonding mechanism of salix biomass fuel particles[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(21): 235–241. (in Chinese)
- [5] OLAOYE I, BOLAJI M, OLOYEDE A O. Adoption of innovation technology in the face of efficient energy use: a case of improved biomass stoves in Kwara State, Nigeria[J]. African Journal of Science, Technology, Innovation and Development, 2022, 14(1): 1–11.
- [6] 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.
ZHOU Jianqiang, GAO Pan, DONG Changqing, et al. Review on the generation mechanism of nitrogen oxides in solid biomass combustion[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(12): 1–9, 16. (in Chinese)
- [7] 李贤, 韩奎华, 王茜, 等. 生物质成型燃料添加剂的研究进展[J]. 可再生能源, 2021, 39(12): 1563–1569.
LI Xian, HAN Kuihua, WANG Qian, et al. Research progress of biomass briquette fuel additives[J]. Renewable Energy, 2021, 39(12): 1563–1569. (in Chinese)
- [8] HAN Kuihua, LI Xian, QI Jianhui, et al. Synergistic effect of additives and blend on sulfur retention, NO release and ash fusibility during combustion of biomass briquettes[J]. International Journal of Green Energy, 2021, 18(2): 187–202.
- [9] 王晶, 廖昌建, 王海波, 等. 锅炉低氮燃烧技术研究进展[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(2): 99–114.
WANG Jing, LIAO Changjian, WANG Haibo, et al. Research progress of boiler low nitrogen combustion technology[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(2): 99–114. (in Chinese)
- [10] 周昊航, 张哲巖, 邵卫卫, 等. 天然气燃料分级燃烧中 NO_x 排放特性分析[J]. 推进技术, 2018, 39(5): 1024–1032.
ZHOU Haohang, ZHANG Zhedian, SHAO Weiwei, et al. Analysis of NO_x emission characteristics in staged combustion of natural gas fuel[J]. Propulsion Technology, 2018, 39(5): 1024–1032. (in Chinese)
- [11] 孙余凭, 周小兰, 沈光林, 等. 富氧助燃技术减少 NO_x 排放[J]. 能源环境保护, 2007(6): 14–16, 19.
SUN Yuping, ZHOU Xiaolan, SHEN Guanglin, et al. Reduction of NO_x emission by oxygen enriched combustion supporting technology[J]. Energy and Environmental Protection, 2007(6): 14–16, 19. (in Chinese)
- [12] 李芳, 毕明树. 燃煤过程中 NO_x 的生成机理及控制技术[J]. 工业锅炉, 2005(6): 32–35.
LI Fang, BI Mingshu. Generation mechanism and control technology of NO_x during coal combustion[J]. Industrial Boiler, 2005(6): 32–35. (in Chinese)
- [13] 梁晓林, 孟德润, 姚滨玉, 等. 颗粒粒度对神华煤 NO_x 排放影响的实验研究[J]. 黑龙江电力, 2007(5): 345–347.
LIANG Xiaolin, MENG Derun, YAO Binyu, et al. Experimental study on the influence of particle size on NO_x emission of Shenhua coal[J]. Heilongjiang Electric Power, 2007(5): 345–347. (in Chinese)
- [14] 刘联胜. 燃烧理论与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [15] 姜涌, 夏明明, 覃绍亮, 等. 热力型 NO_x 的抑制[J]. 电站系统工程, 2005(2): 25–26.
JIANG Yong, XIA Mingming, QIN Shaoliang, et al. Suppression of thermal NO_x [J]. Power Station System Engineering, 2005(2): 25–26. (in Chinese)
- [16] 崔名双. 低 NO_x 燃气燃烧技术研究进展[J]. 洁净煤技术, 2020(2): 24–33.
CUI Mingshuang. Research progress of low NO_x gas combustion technology[J]. Clean Coal Technology, 2020(2): 24–33. (in Chinese)
- [17] 王志宁, 蔡晋, 张扬, 等. 烟气再循环对燃烧过程 NO 生成的作用机理研究[J]. 热力发电, 2021, 50(3): 27–33.
WANG Zhining, CAI Jin, ZHANG Yang, et al. Study on the effect mechanism of flue gas recirculation on no generation during combustion[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(3): 27–33. (in Chinese)
- [18] 宋少鹏, 卓建坤, 李娜, 等. 燃料分级与烟气再循环对天然气低氮燃烧特性影响机理[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(24): 6849–6858, 6940.
SONG Shaopeng, ZHUO Jiankun, LI Na, et al. Influence mechanism of fuel classification and flue gas recirculation on low nitrogen combustion characteristics of natural gas[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2016, 36(24): 6849–6858, 6940. (in Chinese)

YAO Yumei, YUAN Xiangru, HAN Lujia, et al. Microstructures and properties of bovine bone collagen polypeptide composite films with different molecular weight distributions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 318 – 325. (in Chinese)

[22] CHEN X, YUAN P P, DENG X Y. Watermelon ripeness detection by wavelet multiresolution decomposition of acoustic impulse response signals[J]. Postharvest Biology and Technology, 2018, 142: 135 – 141.

[23] SHEN W, JI N, YIN Y, et al. Fusion of acoustic and deep features for pig cough sound recognition[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 197: 106994.

[24] ZENG W, HUANG X, ARISONA S M, et al. Classifying watermelon ripeness by analysing acoustic signals using mobile devices[J]. Personal and Ubiquitous Computing, 2014, 18(7): 1753 – 1762.

[25] AVA Company. Applied vibro acoustic[EB/OL]. [2022 – 05 – 06]. <http://www.ava.co.jp>.

[26] 何东健,李增武,王洪群. 西瓜打击音波特性的研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 1994,22(3): 105 – 107.

[27] 高冠东. 西瓜成熟度的音频检测技术研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2010.

[28] 肖珂, 高冠东, 滕桂法, 等. 西瓜成熟度音频无损检测技术[J]. 农机化研究, 2009, 31(8): 150 – 152, 155.

[29] 崔玉露, 杨玮, 王炜超, 等. 基于光谱学原理的便携式土壤有机质检测仪设计与实验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(增刊): 323 – 328, 350.

CUI Yulu, YANG Wei, WANG Weichao, et al. Design and experiment of portable soil organic matter detector based on spectroscopy principle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(Supp.): 323 – 328, 350. (in Chinese)

[30] 高升, 王巧华, 施行, 等. 便携式红提葡萄多品质可见/近红外检测仪设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(2): 308 – 319.

GAO Sheng, WANG Qiaohua, SHI Hang, et al. Design and test of portable red globe grape extraction multi-quality visible/near infrared detector[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 308 – 319. (in Chinese)

[31] LI H, LIANG Y, XU Q, et al. Key wavelengths screening using competitive adaptive reweighted sampling method for multivariate calibration[J]. Analytica Chimica Acta, 2009, 648(1): 77 – 84.

[32] 韩亚芬, 赵庆亮, 吕程序, 等. 基于能量谱和吸光度谱的马铃薯黑心病判别模型优化[J]. 农业机械学报, 2021, 52(9): 376 – 382.

HAN Yafen, ZHAO Qingliang, LÜ Chengxu, et al. Discriminant analysis on potato blackheart defect based on energy spectrum and absorbance spectrum[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 376 – 382. (in Chinese)

[33] 刘莉, 陶红燕, 方静, 等. 基于近红外高光谱的梨叶片炭疽病与黑斑病识别[J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 221 – 230.

LIU Li, TAO Hongyan, FANG Jing, et al. Identifying anthracnose and black spot of pear leaves on near-infrared hyperspectroscopy[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 221 – 230. (in Chinese)

[34] LI H D, XU Q S, LIANG Y Z. libPLS: an integrated library for partial least squares regression and linear discriminant analysis[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2018, 176: 34 – 43.

(上接第 298 页)

[19] PAN Liang. Study on oxygen-enriched combustion application technology[J]. Advanced Materials Research, 2014(3137): 912 – 914.

[20] 卜昌盛, 王文康, 韩启杰, 等. 基于 Langmuir – Hinshelwood 动力学解析 O₂/CO₂/H₂O 气氛下烟煤焦反应机理[J]. 化工学报, 2018, 69(12): 5301 – 5308.

PU Changsheng, WANG Wenkang, HAN Qijie, et al. Analysis of reaction mechanism of bituminous coal char in O₂/CO₂/H₂O atmosphere based on Langmuir – Hinshelwood kinetics[J]. Journal of Chemical Engineering, 2018, 69(12): 5301 – 5308. (in Chinese)

[21] 孙瑞金, 王长安, 赵林, 等. 氧分级对准东煤富氧燃烧 NO_x 生成与积灰特性的影响[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(4): 42 – 50.

SUN Ruijin, WANG Chang'an, ZHAO Lin, et al. Effect of oxygen classification on NO_x formation and ash deposition characteristics in oxygen enriched combustion of Zhundong coal[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(4): 42 – 50. (in Chinese)

[22] CHEN Ping, GU Mingyan, WANG Dongfang, et al. Experimental and density functional theory study of the influence mechanism of oxygen on NO heterogeneous reduction in deep air-staged combustion[J]. Combustion and Flame, 2021(223): 127 – 141.

[23] 胡广涛, 焦亮亮, 周丹丹, 等. 低 NO_x 空气分级燃烧技术研究[J]. 河南科技, 2015(10): 106 – 108.

HU Guangtao, JIAO Liangliang, ZHOU Dandan, et al. Research on low NO_x air staged combustion technology[J]. Henan Science and Technology, 2015(10): 106 – 108. (in Chinese)

[24] 王为术, 罗晓宇, 熊翰林, 等. 空气分级对旋风锅炉燃烧及 NO_x 释放的影响规律[J]. 工业加热, 2022, 51(2): 1 – 5.

WANG Weishu, LIU Xiaoyu, XIONG Hanlin, et al. Effect of air classification on combustion and NO_x release of cyclone boiler[J]. Industrial Heating, 2022, 51(2): 1 – 5. (in Chinese)