

# 生物质悬浮燃烧器的设计与研究

刘洪福<sup>1,2</sup>, 刘圣勇<sup>1,2</sup>, 翟万里<sup>1,2</sup>, 管泽运<sup>1,2</sup>, 王鹏晓<sup>1,2</sup>

(1.河南农业大学农业部农村可再生能源新材料与装备重点实验室, 河南郑州450002; 2.生物质能源河南省协同创新中心, 河南郑州450002)

**摘要:**为解决现存生物质燃烧器结构设计不合理、燃烧效率低以及炉排易结渣等问题, 依据生物质粉体燃料成分分析及其悬浮燃烧特性, 通过优化设计和试验研制出一种新型结构的生物质悬浮燃烧器。在额定工况下, 对设计出的生物质悬浮燃烧器进行热性能试验, 数据显示燃烧效率达99.42%, 热效率达84%, 排烟损失11.4%, 排烟中SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>等有害气体含量低于目前市场上推出的同容量生物质燃烧器, 符合国家关于工业锅炉大气污染物排放标准的要求。在我国生物质的有效利用上, 具有较高的市场价值。

随着能源消耗以每年6%~7%的速度增长, 我国已经成为世界消耗大国, 能源形势更加严峻<sup>[1-2]</sup>

。十八大之后, 国家重视能源战略规划的编制实施, 以推动能源生产和消费革命, 打造中国能源“升级版”<sup>[3]</sup>

。生物质能与化石能相比, 具有可再生和低污染的优势, 且储量巨大。发展生物质能源和生物质产业可以在缓解我国能源紧张和环境压力的同时, 拉动农村经济, 促进农民增收, 推进新农村建设, 是一个具有巨大发展潜力和经济社会价值的领域<sup>[4]</sup>。

目前生物质燃烧方式主要包括炉排层燃、流化床燃烧、悬浮燃烧以及复合燃烧等燃烧方式<sup>[5-6]</sup>

。炉排燃烧只适用于大颗粒及块状生物质燃料, 此类燃料挥发分含量很高, 且难以在炉膛中完全燃烧, 易导致烟囱冒黑烟、滴焦油, 燃烧效率不高, 对污染环境较大<sup>[7]</sup>

; 流化床燃烧方式主要用于颗粒燃料, 虽具有燃烧效率高、污染性低等优点, 但造价成本高, 且对燃料燃烧性能要求很高, 适用于热电联产等锅炉形式<sup>[8]</sup>

; 悬浮燃烧是将粉体燃料喷入炉膛直接进行燃烧, 包括挥发分和固定碳都可以得到充分燃烧, 可以解决燃烧生物质燃料冒黑烟的问题, 具有较好的发展前景<sup>[9]</sup>

。国外生物质悬浮燃烧设备使用的大都是木质类燃料, 引进国内并不适用。我国在生物质悬浮燃烧利用方面起步较晚, 关于生物质悬浮燃烧的理论研究与应用研究还处在起步阶段<sup>[10]</sup>。

肖波<sup>[11]</sup>

进行了生物质粉体燃烧技术的初步研究, 提出了生物质粉体燃烧模型。郭献军和刘石明在生物质粉体燃烧实验研究中证明生物质粉体能够稳定燃烧。但是, 长期以来生物质粉体燃料并未得到大规模应用, 关键在于对其燃烧特性了解不够透彻, 缺乏与生物质粉体燃料燃烧良好匹配的专用燃烧器<sup>[12]</sup>。

本研究通过优化设计和试验研制出一种新型生物质悬浮燃烧器, 旨在解决目前生物质燃烧装置燃烧效率低、排烟损失大、污染物排放量较高等问题, 为生物质锅炉的推广应用提供一定的技术和理论依据。

## 1 设计的依据

### 1.1 生物质粉体燃料成分分析试验

对玉米秆、麦秸秆、花生壳三种生物质粉体燃料(河南农业大学毛庄实验基地)进行工业分析、元素分析和发热量测定, 试验结果如表1所示。

表1 3种典型生物质粉体燃料的工业分析、元素分析和发热量

燃料种类	工业分析 / [%]				元素分析 / [%]						低位热值 / kJ·kg <sup>-1</sup>
	M	A	V	F <sub>cad</sub>	H	C	S	N	O	P	
花生壳	4.97	13.86	65.11	16.06	5.06	38.32	0.01	0.63	35.6	0.146	13 980
麦秆	4.39	8.90	67.36	19.35	5.31	41.28	0.08	0.65	36.9	0.33	15 374
玉米秆	4.87	5.93	71.45	17.75	5.45	42.17	0.02	0.74	35.2	2.60	15 550

注：M、A、V、F<sub>cad</sub>、分别代表燃料水分、灰分、挥发分、固定碳含量百分数；H、C、S、N、P、O 分别代表燃料中氢、碳、硫、氮、磷、氧含量百分数。

从表中看出，不同种类的生物质粉体燃料的组成成分存在差异，但总体看来，其挥发分含量(V)相对较高，易着火；灰分含量(A)较低，燃烧所产生的固体排放污染较少；几乎不含硫，因此燃烧后不会排放SO<sub>x</sub>，有利于环保；低位热值(Q<sub>dw</sub>)约为无烟煤热值的2/3。

### 1.2 生物质悬浮燃烧特性分析

生物质粉体燃料中含有较高比例的碳，含氢和水分比较少，含挥发分较高，灰分比较低，因此生物质粉体燃料着火点低，易点火。生物质粉体热分解的温度很低，一般在350℃就分解释放出80%左右的挥发分，在预燃室中能够形成一种悬浮状的体积燃烧。在燃烧初期，生物质粉体燃料经过热分解析出挥发分，并分离出焦炭，先是挥发分的燃烧，然后是固定碳的旋流燃烧，由于粉体燃料粒径很小，分布均匀，故其燃烧形式接近于气体燃料。生物质粉体表面积较大，也加速了挥发分的析出速度，减小了固定碳的粒径，提高了燃烧速度和燃烧效率。生物质粉体燃料燃烧充分，且随着粒径的减少，结渣率降低。

总之，生物质粉体燃料燃烧速度均匀，燃烧波浪轻微，燃烧需氧量与外界供氧量能够良好匹配，燃烧相对稳定。

### 1.3 主要设计参数

1kg生物质粉体燃料完全燃烧时，由外部供给标准状态下的理论氧气量为

$$V_{O_2} = 1.866C_{ar}/100 + 0.7S_{ar}/100 + 5.55H_{ar}/100 - 0.7O_{ar}/100 \text{ m}^3/\text{kg}$$

那么 1 kg 粉体燃料完全燃烧所需的理论空气量为

$$V_k = 1 / (0.21 \times 100) V_{O_2} \text{ m}^3/\text{kg}$$

式中  $C_{ar}$  —— 碳占燃料全部成分的百分比；

$S_{ar}$  —— 硫占燃料全部成分的百分比；

$H_{ar}$  —— 氢占燃料全部成分的百分比；

$O_{ar}$  —— 氧占燃料全部成分的百分比。

为了保证燃料的充分燃烧，通常采用1.2~1.5的过量空气系数，由于生物质粉体燃料空隙大，燃烧速率非常快，所以较低的空气流量不利于粉体燃料与空气的充分接触，但过大的空气流量又容易降低燃烧器内的温度而不利燃烧。因此，本试验将空气过量系数设定为1.3。本试验采用0.5T热水锅炉，锅炉每h燃烧器进料量设计为13kg/h，可通过计算得出所需的进风量为25m<sup>3</sup>/h。

## 2 生物质悬浮燃烧器的设计

### 2.1 进料系统的设计

进料系统的作用是控制物料进入炉膛，其设计直接影响燃烧系统的实用性和性能。如图1所示，进料系统由进料仓、进料螺旋、变速电机、下粉管及料仓等结构组成。处于进料仓的生物质粉体燃料在螺旋桨机的推送下，经下粉管进入料仓，与空气混合进入燃烧系统中。这种输送方式能够有效保证预燃室进料的持续性，并且进料螺旋可通过变频器来调控转速，从而实现进料工况的调整，为实现多工况运行提供了基础。生物质粉体进料量的大小由变速电机、进料螺旋来调节并与电机转速成正比，下粉管用于防止一次风管内压力过高而导致的反喷现象，进料螺旋及料仓防止物料过密形成真空压力导致粉体压至成块状，从而堵塞下粉管。

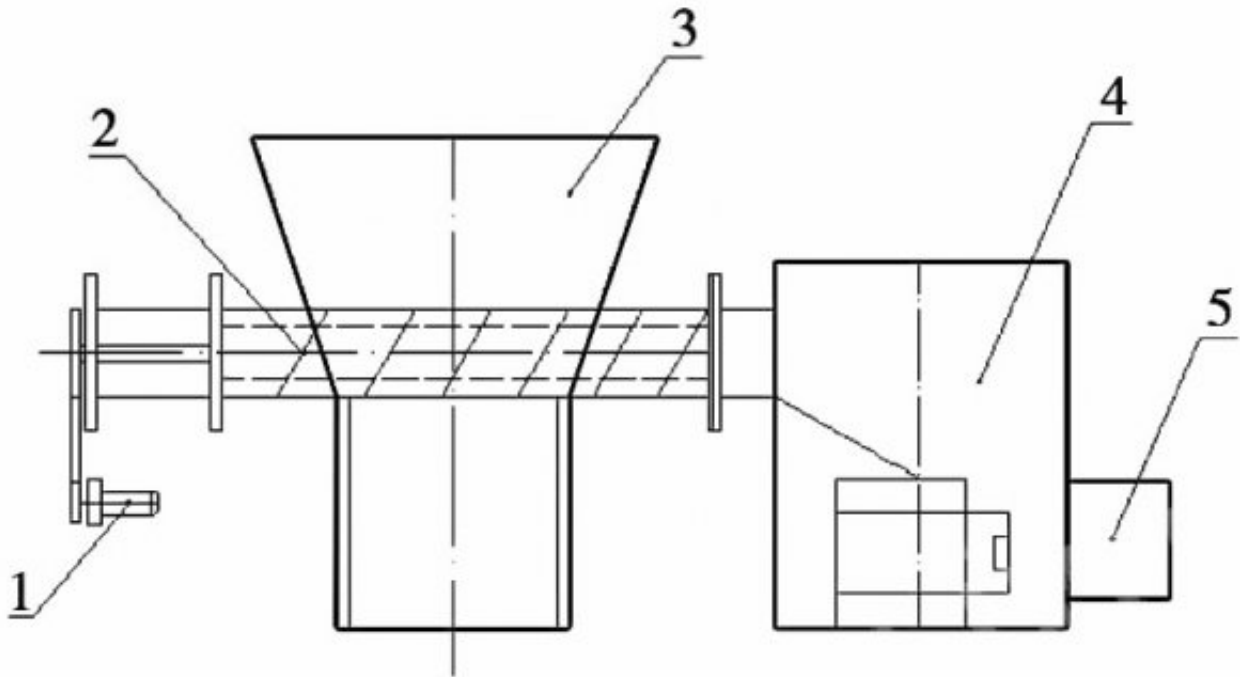


图1 进料系统结构图

1 - 变速电机；2 - 进料螺旋；3 - 进料仓；4 - 料仓；5 - 下粉管

### 2.2 燃烧系统的设计

生物质悬浮燃烧器燃烧系统主要由炉排和预燃室组成。如图2，炉排设计成炉圈形式，炉圈内的斜楞倾角设置为 $35^{\circ}$ ，使粉体燃料在二次风作用下以螺旋形式进入预燃室，这有助于空气与粉体燃料的均匀混合与充分接触，并延长粉体燃料在预燃室中的燃烧路程，使其得到充分燃烧，降低排烟热损失。

粉体燃料的初步燃烧在预燃室内进行，不在炉排上进行，这样避免了单位面积炉排的放热较多，形成高温，致使炉排上的燃烧条件变差甚至炉排变形，引起通风不匀，引诱“火口”现象的形成，最终导致预燃室温度降低，排烟热损失增加。

一次风与生物质粉体燃料混合后经炉圈进入预燃室内进行初步燃烧。如图3，在预燃室容积不变化的情况下，预燃室设置成细长型，既增加了粉体燃料与空气的充分混合，又延长了粉体燃料在预燃室中的燃烧时间，这样不仅可以有效地提高粉体燃料燃烧效率，而且可以使粉体燃料燃烧的尾气更加清洁。

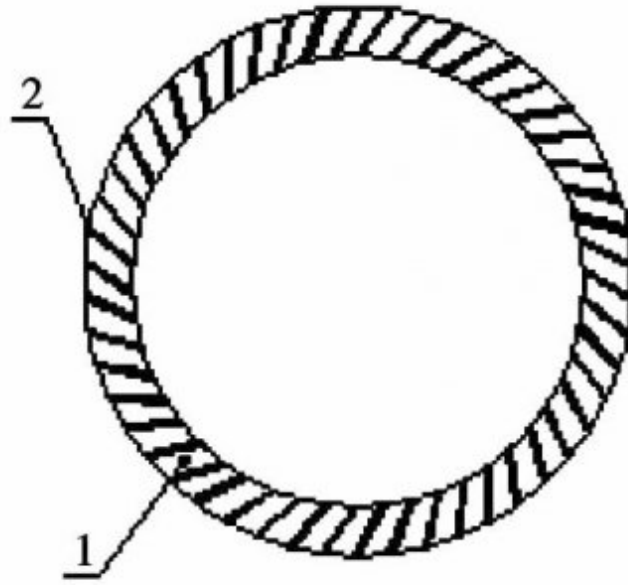


图2 炉排结构图  
1 - 风孔; 2 - 斜楞

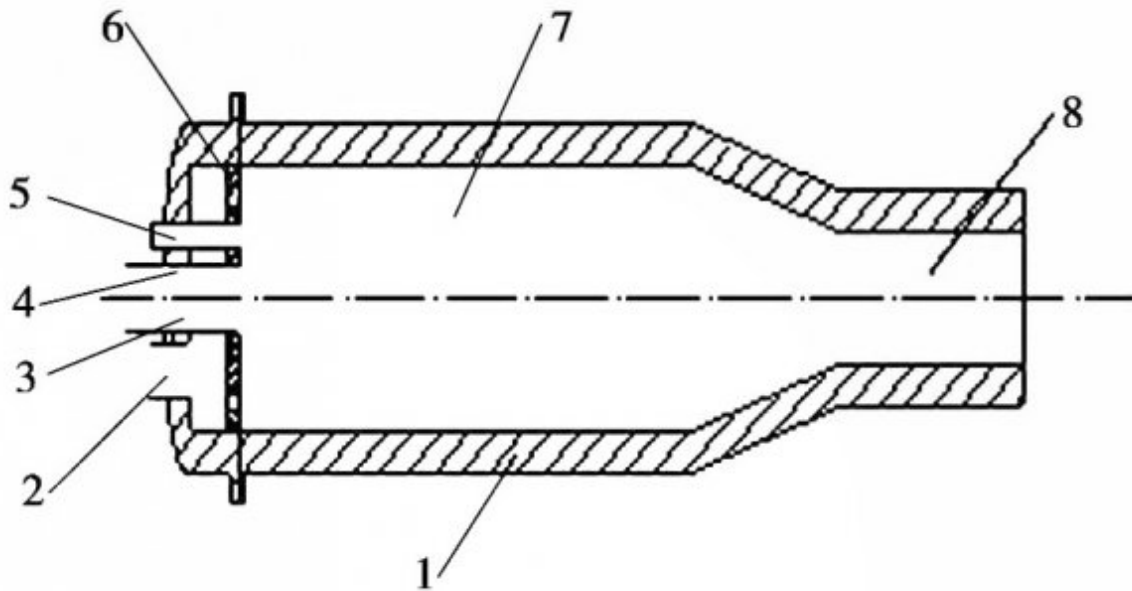


图3 预燃室结构图  
1 - 耐火层; 2 - 二次进风口; 3 - 底料进风口; 4 - 点火器; 5 - 观察孔; 6 - 炉圈; 7 - 预燃室; 8 - 喷口



### 2.2.1 预燃室的容积设计

通过预燃室容积与燃料处理量及预燃室热强度的关系，计算公式为

$$V = BQ_d / 3600 q_v$$

式中  $V$ ——预燃室容积/ $\text{m}^3$ ；

$B$ ——燃料消耗量/ $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ ；

$Q_d$ ——燃料低位发热量/ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ；

$q_v$ ——预燃室热强度/ $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

选取  $Q_d = 15550 \text{ kJ/kg}$ ,  $B = 13 \text{ kg/h}$ ,  $q_v = 253 \text{ kW/m}^2$ , 带入上式计算可得  $V = 0.22 \text{ m}^3$ 。

### 2.2.2 预燃室特征参数值的计算

由于粉体燃料与空气混合后均匀进入预燃室，因此可以视作为均匀流体，预燃室特征参数主要包括燃烧器预燃室截面直径 $D_1$ ，预燃室喷口截面直径 $D_2$ ，渐缩段的长度 $L$ ，其计算过程如下

$$\rho_1 = \frac{P_1}{RT_1}$$

$$\rho_2 = \frac{P_2}{RT_2}$$

$$A_1 = \frac{m}{\rho_1 v_1}$$

$$A_2 = \frac{m}{\rho_2 v_2}$$

$$D_1 = \sqrt{\frac{4A_1}{\pi}}$$

$$D_2 = \sqrt{\frac{4A_2}{\pi}}$$

$$L = \left( \frac{D_2 - D_1}{2} \right) c \tan\left( \frac{\alpha}{2} \right)$$

式中  $\rho_1、\rho_2$ ——粉体燃料进出口密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ；  
 $P_1、P_2$ ——预燃室进出口压力/Pa；  
 $R$ ——热力学常数/ $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$ ，8.134  
 $\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{C})$ ；  
 $T_1、T_2$ ——进出口温度/ $^{\circ}\text{C}$ ；  
 $A_1、A_2$ ——进口出截面积/ $\text{m}^2$ ；  
 $m$ ——流量/ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ；  
 $V_1、V_2$ ——粉体燃料流速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ；  
 $c$ ——比热容/ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$ ；  
 $\alpha$ ——渐缩角/ $^{\circ}$ ，一般选定  $13^{\circ}$ 。

选取  $P_1 = 140\,000\text{ Pa}$ ， $P_2 = 97\,770\text{ Pa}$ ， $T_1 = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、  
 $T_2 = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ， $m = 0.003\,6\text{ kg/s}$ ， $v_1 = 2.33\text{ m/s}$ ， $v_2 =$   
 $1.3\text{ m/s}$ ；依次带入上式可得  $D_1 = 0.535\text{ m}$ ， $D_2 =$   
 $0.34\text{ m}$ ， $L = 0.34\text{ m}$ 。

### 2.2.3 点火装置的设计

为保证预燃室中点燃生物质粉体 - 空气流并使其稳定燃烧，需要相应的点火装置。该生物质燃烧器选择液化气点火装置，主要依据烧嘴的直径 $d$ 、长度 $L$ 以及可燃混合物喷出的速度 $V$ 。其计算公式

$$F_1 = A [ Bmn - C(m-1)(n-1) ]$$

$$d = d_1 \sqrt{\sqrt{\frac{mn(1+\varepsilon)\Delta P_c}{F_1(\Delta P_c - \Delta P_{\text{炉}})}}$$

$$L = (d_A - d) / 2 \tan \frac{\beta}{2}$$

$$V = \frac{q(1 + \alpha L_1) T_1 \times 10^6}{0.785 d^2 T_2}$$

式中  $F_1$ ——混合管与液化气喷嘴的最佳面积比；  
 $A$ ——修正系数，取  $A = 1$ ；  
 $B$ ——引射器内空气、液化气混合气的沿程阻力；  
 $m$ ——体积喷射比；  
 $n$ ——重量喷射比；  
 $C$ ——引射器内空气沿程流动阻力；  
 $\varepsilon$ ——烧嘴喷头阻力系数，取  $\varepsilon = 0.2$ ；  
 $\Delta P_c$ ——烧嘴内混合气体压力的增高值/Pa；  
 $\Delta P_{\text{炉}}$ ——预燃室内粉体 - 空气混合物压力的升高值/Pa；  
 $d_A$ ——扩张管的最粗直径/m；  
 $\beta$ ——烧嘴的收缩角/°，取  $14^\circ$ ；  
 $T_1、T_2$ ——可燃物混合温度、空气温度/°C；  
 $\alpha$ ——引射器过量空气系数。



### 2.3 供风系统的设计

供风系统的作用是为了实现一次风和二次风的供给。生物质粉体燃料粒径小，分布均匀，若在炉膛内完全燃烧，则需要燃料与风量配合恰当。风量过大，燃料还未燃烧充分就会被吹进换热锅炉中，增加了固体不完全燃烧热损失，并且降低了烟气温度，影响燃烧器热效率；风量过小，燃料燃烧后，其灰渣会落在预燃室内，这样会使预燃室容积变小，并且影响二次风的输入，降低燃烧器的燃烧效率。根据生物质粉体燃料悬浮燃烧特性，设计合理的供风系统，配合适宜的风量，从而达到合适的燃烧温度，使燃料充分燃烧产生高温烟气，以提高燃烧效率与燃烧器热效率。

该生物质悬浮燃烧器的供风系统由两个供风机组成。一次风为底料进风与粉体均匀混合形成风粉气流，二次风用于补充适量的空气、对气粉起到混合搅匀的目的并对预燃室的气流状态进行调节。风机与变频器结合，从而达到变频调整风机转速，实现送风量的控制与调整。

风机的选型应能保证燃烧器在既定的工作条件下，满足燃烧器正常运行时对粉体燃料持续均匀的进料需要。它的选型需依据计算粉体量和全压降。由于风机运行与计算条件之间有所差别，在选择风机时应考虑一定的储备(用储备系数修正)。引风机选型主要由其流量、压头以及风机功率确定，根据选定参数即可计算出引风机计算流量及压头，进而根据风机制造厂产品目录选择出引风机类型。

### 3 燃烧器热性能测试

#### 3.1 实验装置

本实验装置如图4所示，主要由进料系统、供风系统、预燃室、换热锅炉、除尘器等部分组成。其中，自行设计的燃烧器以及常用换热锅炉等其它实验设备均由河南力为节能环保科技有限公司制造。

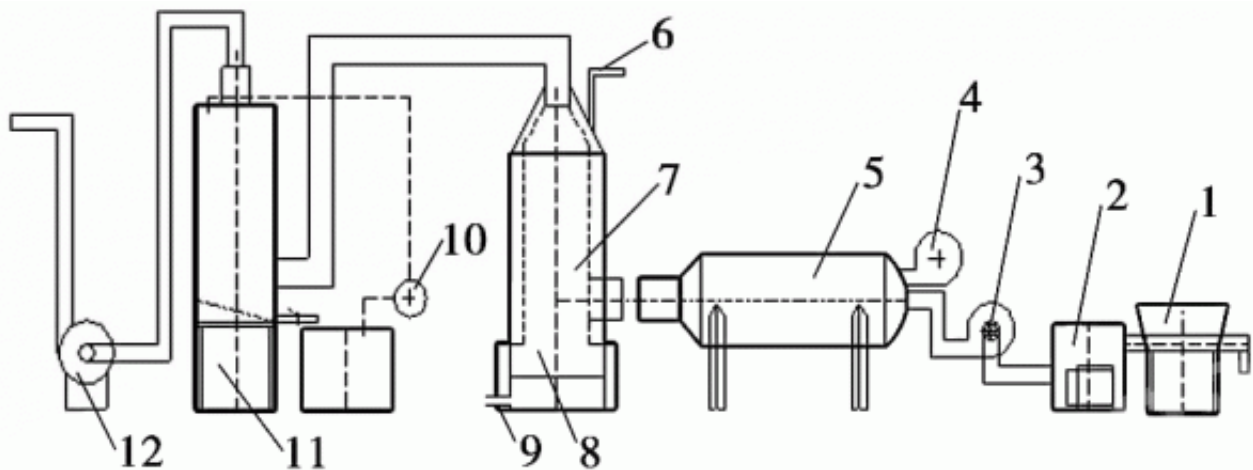


图4 燃烧实验装置图

- 1 - 进料仓; 2 - 料仓; 3 - 一次风机; 4 - 二次风机; 5 - 预燃室; 6 - 蒸汽出口; 7 - 炉膛(燃烧室); 8 - 换热锅炉; 9 - 出渣口; 10 - 循环水泵; 11 - 除尘器; 12 - 引风机

生物质粉体燃料由进料仓经进料螺旋进入料仓，一次风与粉体燃料混合进入预燃室进行燃烧，在燃烧器正常运行5 min后，开启二次风机。燃烧产生的高温烟气进入换热锅炉，尾气经水幕除尘排空，排烟温度控制在140℃以下。在实验过程中，由调频电机进行一、二次风量的调整以达到燃烧的最佳工况，实现粉体燃料燃烧完全，尾气清洁排放。生物质粉体燃料在换热锅炉内燃烧产生的灰渣，沉降于锅炉底部，经底部出渣口排出。

#### 3.2 分析方法和仪器

实验依据为GB/T12496 - 1999工业锅炉热工性能试验规程、GB5468 - 91锅炉烟尘测定方法以及GB13271 - 2001锅炉大气污染物排放标准。

尾气成分测量仪器为KM9106综合

燃烧分析仪，其各指标的测量精度分别为： $O_2$

浓度 - 0.1%和+0.2%、CO浓度 -  $20 \times 10^{-6}$ 、 $CO_2$

浓度  $\pm 5\%$ ；效率  $\pm 1\%$ ；排烟温度  $\pm 0.3\%$ 。温度测量仪器为SWJ精密数字热电偶温度计，精度为  $\pm 0.3\%$ ；IRT - 2000A手持式快速红外测温仪，测量精度为读数值  $1\% \pm 1$ 。其它测量仪器包括大气压力计，精度为1.0级；C型压力表，精度为1.0级；磅称，秒表，米尺，水表，水银温度计；其中，尾气的林格曼黑度参照HJ/T398 - 2007测定。

### 3.3实验结果

于2015年10月对该文研制出的生物质悬浮燃烧器进行热性能及环保指标实验。实验燃烧的生物质粉体燃料取自郑州德润锅炉股份有限公司，3种燃料分别为花生壳、麦秆、玉米秆，平均粒径100目，堆积密度  $0.216 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ ，含水率3.8%。试验地点为河南农业大学机电工程学院三区试验工厂，实验日锅炉每天正常运行6h，持续7d。试验结果如表2所示。

**表 2 生物质悬浮燃烧器实验结果**

项目		数据来源	花生壳	麦秆	玉米秆
热效率	收到基静发热量/ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	燃料分析	13 980	15 374	15 550
	热水流量/ $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	实测	515	527	525
	热水温度/ $^{\circ}\text{C}$	实测	96.1	96.3	96.7
	热水压力	实测	1.0	1.0	1.0
	给水温度/ $^{\circ}\text{C}$	实测	25	25	25
	燃料消耗量/ $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	实测	12.88	12.23	12.04
	热效率/ [%]	计算	83.5	83.7	84.0
燃烧效率	预燃室温度	实测	369	374	382
	喷口温度	实测	600	620	630
	排烟温度	实测	110	119	115
	排烟处过剩空气系数	实测	1.45	1.36	1.35
	排烟热损失/ [%]	计算	11.5	11.8	11.4
	固体不完全燃烧损失 (包括漏料及飞灰中的 固体不完全燃烧损 失)/ [%]	计算	1.5	1.6	1.8
	气体不完全燃烧损失/ [%]	计算	0.44	0.38	0.48
燃烧效率	计算	98.11	98.26	98.17	
污染物排放	排烟中 $\text{CO}$ 含量/ $10^{-6}$	实测	135	132	138
	排烟中 $\text{CO}_2$ 含量/ [%]	实测	13.8	13.9	13.85
	排烟中 $\text{NO}_x$ 含量/ $10^{-6}$	实测	245	259	254
	排烟中 $\text{SO}_2$ 含量/ $10^{-6}$	实测	32	45	36
	排 烟 中 烟 尘 含 量/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	计算	26.3	28.4	27.9
	烟气林格曼黑度/级	实测	<1	<1	<1

#### 4结论

(1)实验得出，当一次风与二次风配比为1.86 1时，该生物质悬浮燃烧器达到最优工况，燃烧效率高达99.42%，热效率达84.0%，热水流量达到527kg/h，各项指标均满足设计要求，证明了该设计方法的正确性和科学性。

(2)由于生物质粉体燃料在预燃室中进行悬浮燃烧，故炉圈上基本不存在结渣现象，保证了进料和燃烧的顺利进行。

(3)燃烧尾气中CO、NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>、烟尘含量分别为 $132 \times 10^{-6} \text{mg/m}^3$ 、 $245 \times 10^{-6} \text{mg/m}^3$ 、 $32 \times 10^{-6}$ 、 $26.3 \text{mg/m}^3$

，优于相同规格的生物质颗粒燃烧器，符合国家工业锅炉大气污染物排放标准要求，具有较高的环保效益。

## 参考文献

- [1] 李小民, 林其钊. 玉米热解的最概然机理 [J]. 化工学报, 2012, 63 (8): 2599 - 2605.
- [2] 王平, 温雨, 张鸿玉, 等. 赤峰市清洁能源发展路径研究 [J]. 电网与清洁能源, 2015, 31 (8): 80 - 87.
- [3] 国务院. 能源发展战略行动计划 (2014 - 2020) [Z]. 2014.
- [4] MA longlong, WANG Tiejun, LIU Qiying, et al. A review of thermal - chemical conversion of lignocellulosic biomass in China [J]. biotechnology Advances, 2012, 30 (4): 859 - 873.
- [5] 刘福, 杨旭, 李亮亮, 等. 固体生物质燃料发热量检测防止爆燃的研究 [J]. 节能技术, 2015, 33 (4): 369 - 371.
- [6] 吕学敏, 虞亚辉, 林鹏, 等. 典型生物质燃料层燃烧特性的实验研究 [J]. 动力工程, 2009, 29 (3): 15 - 18.
- [7] 朱艳艳, 张林华, 崔永章, 等. 基于富氧条件的生物质颗粒燃烧特性实验研究 [J]. 山东建筑大学学报, 2013, 28 (1): 36 - 41.
- [8] 马洪儒, 苏宜虎. 生物质直接燃烧技术研究探讨 [J]. 农机化研究, 2007 (8): 155 - 158.
- [9] 闵凡飞, 张明旭. 生物质燃烧模式及燃烧特性的研究 [J]. 煤炭学报, 2005, 30 (1): 104 - 108.
- [10] 马文超, 陈冠益, 等. 生物质燃烧技术综述 [J]. 生物质化学工程, 2007, 4 (11): 43 - 48.
- [11] 肖波, 郭勇, 杨加宽, 等. 生物质粉体燃烧技术的初步研究 [J]. 能源技术, 2004, 25 (5): 197 - 199.
- [12] 樊孝华, 米翠丽, 安国银, 等.  $O_2/CO_2$  条件下生物质焦和煤焦燃烧动力学特性 [J]. 节能技术, 2014, 32 (6): 496 - 499.



原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/138281.html>