# 烤烟用生物质颗粒燃烧机及其控制方法研究

李世军

（开封大学，河南开封，475000）

摘要：针对烤烟用生物质颗粒燃烧机在除渣、燃烧效率、熄火及火力控制等的问题，设计出推杆除渣的生物质颗粒燃烧机及其控制装置，采用推杆除渣、多级配风和自动控制原理，实现自动除渣、自动配风、自动进料，燃尽率达到95%以上，适用于密集烤房烤烟以及其他农作物烘干场合。

## 0引言

在烟叶生产领域，密集烤房已经得到了广泛推广，在烤烟生产中起到了重要作用。而密集烤房也存在着以下几个问题：首先，烘烤是烧煤进行的，污染大；再者，加煤是人工的，操作人员劳动强度大，自动化程度低；还有，循环风机是常转的，风量不能实时调节，影响烘烤质量且费电。在广大农村，各种秸秆已经成为农民朋友的心头之害，将农林的废弃物加工成颗粒燃料，不仅解决了废物污染问题，还为颗粒燃烧机提供了燃料，形成循环经济。生物质颗粒燃料是成型的固体燃料，具有高效、洁净、容易点火、$CO_2$
近零排放等优点，是代替煤的最佳选择之一，已经在烟叶烘烤领域得到较好的应用。研究表明，使用生物质颗粒燃烧机代替煤烤烟，能够明显地提高烤房内干湿温度的控制精度，大幅度降低污染物排放，节约劳动力开支，大幅降低人工成本，提高烟叶烘烤质量。

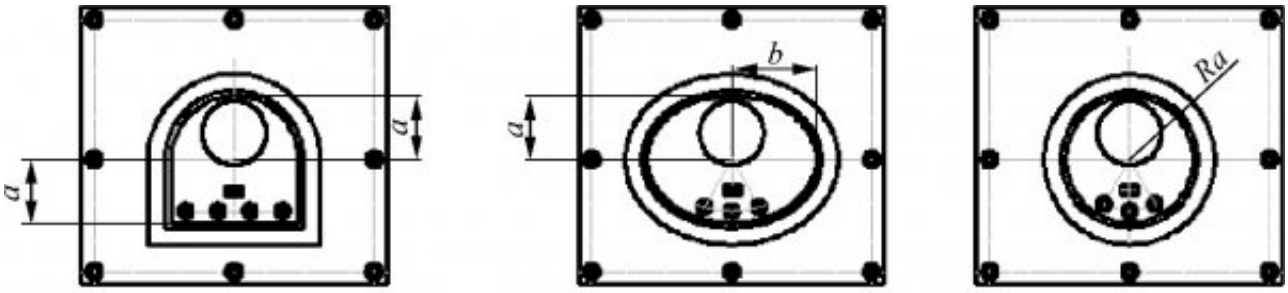
经过多年的研究、试验、实践，在生物质的工业和化学分析、生物质颗粒燃烧机对生物质燃料的适应性、生物质燃料的燃烧特性及生物质燃料燃烧焦油产生和处理方法等方面的研究，为设计更好的生物质颗粒燃烧机奠定了基础，使生物质颗粒燃烧机的设计进入了相对成熟阶段。中烟办[2018]30号文件颁布了《密集烤房生物质颗粒成型燃料燃烧机技术规范》，根据《密集烤房生物质颗粒成型燃料燃烧机技术规范》规定，设计烤烟用生物质颗粒燃烧机及其控制装置是当务之急。随着技术的提高进步，对生物质颗粒燃烧机的要求也越来越高，使燃烧机在燃烧过程中不结渣或少结渣、及时除渣，最大限度地提高燃料的燃烧效率，提高自动控制的性能及可靠性等是生物质颗粒燃烧机研发设计的主要要解决的问题。本研究研发的烤烟用生物质颗粒燃烧机及其控制装置，使用推杆除渣方式除渣，对颗粒燃料适应性强，采用三级自动配风、自动送料，对不同火势要求实施科学配风、送料，自动除渣，装置结构简单，操作维护方便，使用寿命长，具有良好推广价值。

## 1总体设计

根据《密集烤房生物质颗粒成型燃料燃烧机技术规范》，烤烟用生物质颗粒燃烧机采取整体可移动的结构形式，高度通过支脚的丝杆调节，以适应不同的应用场合。烤烟用生物质颗粒燃烧机总体设计的关键问题是：优选燃烧机的燃烧器总成结构、优选破渣除渣装置和系统的控制方法。这些问题解决后，其他方面即可顺理成章。

### 1.1选择燃烧器的结构形式

针对密集烤房使用的颗粒燃烧机，燃烧器火嘴的结构形式有三种，半圆形截面、椭圆截面和圆形截面，如图1所示。设火嘴的内径为2a；椭圆的长轴为2b，短轴为2a，且b=（7/5）a。不论那种形式燃烧器火嘴的长度相同，轮廓宽和高受到同样的限制，连接方式类同，区别主要是采用什么样的截面形状。在相同热功率和炉膛的长度方向相等的前提下，比较三种形式的炉膛容积热负荷，就可以比较出哪种形式燃料燃烧得最完全。在轮廓尺寸许可情况下要尽可能地降低炉膛容积热负荷。




（a）半圆形火嘴　（b）椭圆形火嘴　（c）圆形火嘴

图 1　火嘴截面形状

Fig. 1　Cross section shape of fire nozzle

炉膛容积热负荷

$$q_v = 0.278BQ/V \tag{1}$$

式中：$q_v$——炉膛容积热负荷，kW/m$^3$；

$B$——燃料消耗量，kg/h；

$Q$——燃料低位发热量，kWh/kg；

$V$——炉膛容积，m$^3$。

设半圆形火嘴的截面面积为 $A_1$，椭圆形火嘴的截面面积为 $A_2$，圆形火嘴的截面面积为 $A_3$，则

$$A_1 = (0.5\pi + 2)a^2, A_2 = 2.4\pi a^2, A_3 = \pi a^2$$

所以，$A_2 > A_1 > A_3$，截面积越大，炉膛容积 $V$ 越大，炉膛容积热负荷 $q_v$ 越小。由此可见，三种截面形状的炉膛，椭圆形的炉膛容积热负荷最小。炉膛容积热负荷的大小反映颗粒燃料通过炉膛的时间长短，炉膛容积热负荷越小，颗粒燃料通过炉膛的时间就越长，燃烧就越完全。所以我们采用截面形状为椭圆形的结构形式，且便于助燃风在炉膛内形成旋流，进一步延长颗粒燃料和烟气通过炉膛的时间，提高燃尽率。

1.2选择除渣形式

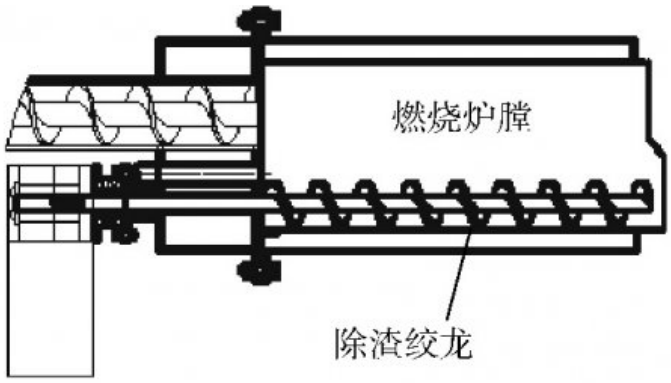
根据《密集烤房生物质颗粒成型燃料燃烧机技术规范（试行）》的规定，有四种除渣形式可选。对于链排除渣方式和旋转炉膛方式，虽然除渣效果良好，但由于结构复杂成本高不便维护，不予采用。绞龙除渣和推杆除渣的结构如图2所示。

对于绞龙除渣，除渣绞龙在除渣电机的带动下间歇运转，在转动的过程中将结渣破掉并逐渐排出燃烧炉膛，破渣除渣效果良好。但是，除渣绞龙长期在炉膛内，研究和试验表明，炉膛内二次燃烧区的温度可达到1250°C，而工作温度最高的耐高温不锈钢（310S）制作的除渣绞龙连续大火工作24h，变形十分严重。使用非金属耐火材料无法制出满足技术规范的除渣绞龙。

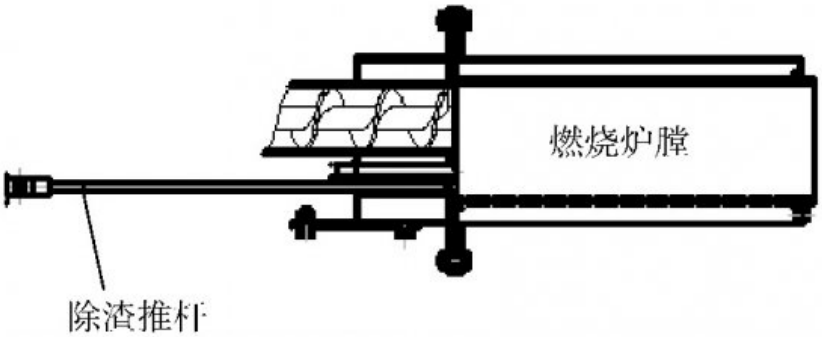
对于推杆除渣，除渣推杆由2~3根平行的金属园钢组成，除渣推杆由推杆导套支撑。在电动推杆的推拉下，除渣时推杆前进过程推渣，返回后推入其导套内，将结渣推至距喷火口50~70mm左右处形成一个小堰，而此处正是炉膛的

二次燃烧区，未燃尽的燃料和烟气产生二次燃烧，同时也使结焦在此裂解燃烧。但对于不同的颗粒燃料要调整除渣间隔时间，且要定期清除沾结在推杆上的焦渣，否则将影响正常使用。

相比之下，推杆除渣方式结构简单，维护方便，使用寿命长，能满足烤烟需要。综合考虑后决定的燃烧机总体结构如图3所示。




（a）绞龙除渣结构




（b）推杆除渣结构

图 2　除渣装置结构图

Fig. 2　Structure diagram of slag removal device

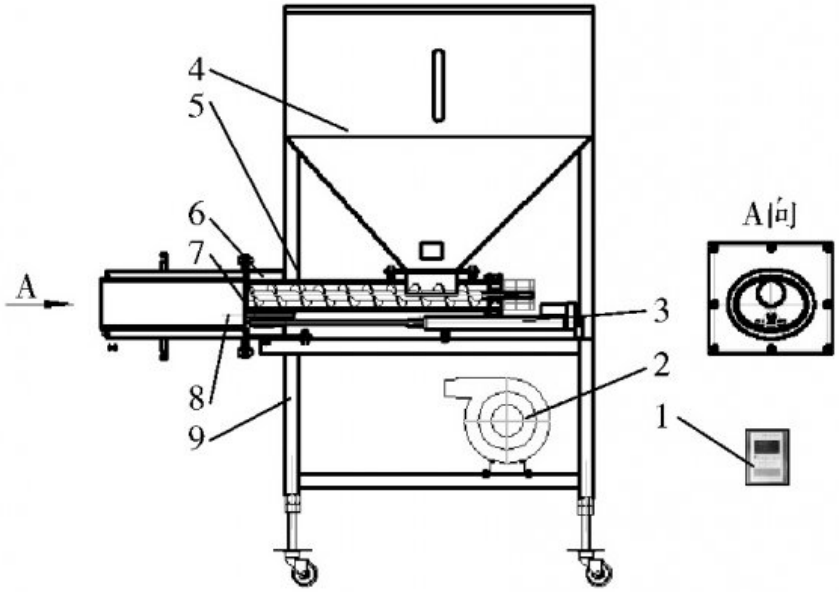



图 3　生物质颗粒燃烧机总体结构示意图

Fig. 3　Schematic diagram of the overall structure of a biomass pellet burner

1. 控制器　2. 助燃风机　3. 除渣装置　4. 料仓　5. 送料装置　6. 配风室　7. 点火装置　8. 燃烧器　9. 支架

运行中，生物质颗粒从加料管进入燃烧室，其灰分首先起燃，加料管中燃料被预热有利于起火燃烧。助燃风机的助燃风进入分风室后被分成二部分，一部分通过加料管、点火器套管、推渣杆套管上小孔进入燃烧炉膛，形成一次助燃风；另一部分通过分风室前下部风口进入火嘴夹层，燃烧室下部开设多个Φ5圆孔，风通过这些孔进入燃烧室，形成主燃的二次助燃风；燃烧室的前端上面，开设有多个Φ5助燃风孔，由分风室下部进风口来的风部分地由这些孔进入燃烧室前端形成三次助燃风。一次风首先起到防回火作用，再者与二次风作用在燃烧室内形成涡流，延长燃料在燃烧室内的时间，提高燃烧率。三次风风路最长，经过预热激发燃烧室前端的可燃气体形成二次燃烧，温度可达900℃~1250℃，在此高温下，焦油被裂解燃烧。

**2关键部分设计**

以额定热功率400000kJ/h为基本的设计依据，生物质颗粒燃料低位发热量的平均值按15485KJ/kg计算，400000kJ/h生物质颗粒燃烧机单位时间内的进料能力应满足

$$M \geqslant \frac{N}{Q\eta} \tag{2}$$

式中：$M$——送料装置的送料能力，kg/h；

$N$——额定热功率，kJ/h；

$Q$——颗粒燃料的低位发热量，kJ/kg，$Q=15\ 485$kJ/kg；

$\eta$——燃烧效率，按 90%计算。

$$M \geqslant \frac{N}{Q\eta} = \frac{400\ 000}{15\ 485 \times 0.9} = 28.7\text{kg/h}$$

取 $M=28.8$kg/h。

## 2.1 配风设计

### 2.1.1 实际需要空气量计算

1kg 颗粒燃料燃烧需要的理论氧气量

$$V_{o2}^{0} = 1.866\frac{C_{ar}}{100} + 0.7\frac{S_{ar}}{100} + 5.56\frac{H_{ar}}{100} - 0.7\frac{O_{ar}}{100} \tag{3}$$

空气中氧气的含量占 21%，所以 1kg 燃料燃烧所需的理论空气量

$$V^{0} = \frac{V_{o2}^{0}}{0.21} \tag{4}$$

式中：$V_{o2}^{0}$——1kg 燃料燃烧所需的理论氧气量；

$V^{0}$——1kg 燃料燃烧所需的理论空气量；

$C_{ar}$——燃料中碳元素收到基的含量；

$S_{ar}$——燃料中硫元素收到基的含量；

$H_{ar}$——燃料中氢元素收到基的含量；

$O_{ar}$——燃料中氧元素收到基的含量。

按典型
生物质颗粒燃料元
素分析中各组成部分含量的平均值计
算，1kg燃料燃烧所需的理论氧气量为0.93$m^3$/kg，1kg燃料燃烧所需的理论空气量为4.43$m^3$/kg。

烤烟用生物
质颗粒燃烧机为常压使用，
进料量28.8kg/h，热功率400000kJ/h，所需理论空气量为
127.6$m^3$
/h；考虑到使用各种原料的生物质颗粒燃料，且实际风量可以由控制器进行调节，过量空气系数取1.3，计算得出实际需要空气量为165.86$m^3$/h。

2.1.2一次风、二次风、三次风的配风比

一次风的作用是防回火和与二次风形成涡流，占比过小会影响防回火效果，多大则容易将燃料吹出火嘴，结合旋风炉设计规范和实践总结，一次风量占总风量的10%~15%较为合适；二次风是主要助燃风，占总风量的80%；三次风是二次燃烧助燃风，占总风量的5%~10%。

根据这样的配风比，在绞龙套管出料端开设6个Φ5孔，点火器套管前端开设3个Φ5孔，3个推渣杆套管前端各开设4个Φ5孔，共21个Φ5孔为一次助燃风孔，分风室前端对应燃烧器夹层处开设16mm×160mm的扇形进风口，一次助燃风孔面积占总进风面积的13.9%。在燃烧炉膛下部均布开设156个Φ5孔为二次助燃风孔；在燃烧炉膛前端上部开设16个Φ5孔与其对应燃烧室底面的孔组成三次助燃风孔。由于一般的生物质颗粒燃料的直径是Φ6~Φ8，所以所有助燃风孔的直径均为Φ5，这样的孔径可保证颗粒不漏料，且使用消失模铸造时可以直接铸造成型，不需再次加工。

2.2送料设计

根据《密集烤房生物质颗粒成型燃料燃烧机技术规范（试行）》要求，送料装置主要由螺旋绞龙、绞龙套管和送料电机构成。绞龙套管采用Φ83mm、壁厚4mm的无缝钢管，其内壁的有效直径为Φ75mm；选用螺旋绞龙的有效外径Φ70m，导程60mm，绞龙轴Φ28mm，螺旋绞龙与绞龙套管的单边间隙是2.5mm，绞龙轴采用双轴承支撑，使绞龙轴转动灵活；送料电机选用功率60W、转速10r/min的减速电机，通过键连接带动绞龙旋转。螺旋绞龙外径与绞龙筒间必须有合适的间隙，间隙过大会使颗粒间相互挤压使颗粒碎掉，间隙过小不足以弥补各项误差，对于Φ6~Φ8mm的颗粒燃料，取单边间隙2.5mm是合适的。螺旋绞龙的导程直接影响送料能力，导程越大需要的送料电机功率越大、送料能力越强，但细化控制相对困难，在满足送料能情况下宜采用相对小的导程，本设计采用60mm导程，使用电机功率小且能以秒为单位控制送料与停料循环。

水平螺旋绞龙送料能力

$$M_z = \left[\left(\frac{D_1}{2}\right)^2 - \left(\frac{D_0}{2}\right)^2\right]\pi r n S\phi \frac{60}{1\,000} \qquad (5)$$

式中：$M_z$——送料能力，kg/h；

$D_1$——螺旋绞龙有效外径，cm；

$D_0$——绞龙轴直径，cm；

$r$——颗粒密度，g/cm$^3$，颗粒密度 1.0～1.3 g/cm$^3$，本设计取 $r$=1.1g/cm$^3$；

$n$——绞龙转速，r/min；

$S$——绞龙导程，cm；

$\phi$——物料充填系数，本设计取 $\phi$=0.45。

带入已知数据，计算得 $M_z$=57.6kg/h，大于需要的送料能力 28.8kg/h。

2.3控制方法

生物质颗粒燃烧机的控制是密集烤房控制的重要部分，要根据烤房内温度传感器的温度信号，综合控制点火器、助燃风机、送料装置和除渣装置，实现自动点火、自动配风、自动送料和自动除渣。点火器一般使用AC220V、600W，助燃风机一般使用AC220V、150W的交流调速风机，送料电机使用AC220V、60W、转速10r/min的减速电机，除渣装置由DC24V的电动推杆带动。

开始使用时，送料电机得电先预进料，然后点火器得电开始自动点火，助燃风机延时提供小风，点火成功后点火器自动失电。燃烧机按照烤房需要的温度由控制器控制自动送料、自动配风、自动除渣。停止时，停止送料后助燃风机延时停止，以避免回火冒烟。

烤烟有升温过程也有稳温过程，烘干工艺是多个升温、稳温的组合。升温时火力要大，稳温时火力要小；大火阶段送料要多，小火阶段送料要少；送料量增大助燃风就要增大，送料量减小助燃风相应也要减小。为了适应火势的要求，把助燃风机风量和送料划分11个档位，1档最低是保证小火不熄火的最小送料量，11档最高是保证大火不积料的最大送料量。

根据不同的颗粒燃料，能够设定除渣时间间隔，对于使用易结渣的颗粒燃料（如秸秆类颗粒）除渣时间间隔就设置小些，若使用木质颗粒除渣时间间隔就设置大些。生物质颗粒原料中Si、碱金属和碱土金属含量越高，结渣趋势越严重，颗粒燃烧机要适应各种颗粒燃料，除渣间隔时间必须能够进行实时调整。

2.3.1控制原理

影响密集烤房装烟室内温度的因素很多，不仅与供热系统有直接的关系，还与装烟量、装烟的均匀性以及烤房密封

性有很大的关系，难以建立数学模型，从而采用模糊控制较合适。模糊控制是一种自动控制，以模糊数学、模糊语言和模糊逻辑为理论基础。模糊控制系统是一种具有闭环结构的数字控制系统。

设 $E_t$ 表示烘干室内干球温度的温度偏差 $E_t = T_t - T$，($T_t$ 为目标温度，升温时为每 30min 时设定的计算值，稳温时是设定的稳温温度，$T$ 为测得干球温度)，$E_t'$ 为温度偏差随时间的变化率。将 $E_t$ 分为 3 个模糊子集：$B$(大)、$M$(中)、$S$(小)。将 $E_t'$ 分为三个模糊子集：$P$(正)、$Z$(零)、$N$(负)，对应偏差变化量的取值范围为 $(T_n - T_{n-1}) > 0$、$(T_n - T_{n-1}) = 0$、$(T_n - T_{n-1}) < 0$($T_n$ 为本次采样测得的干球温度，$T_{n-1}$ 为上次采样测得的干球温度)。设 $C_t$ 为加热输出，将其分为 3 个模糊子集 $B'$(风量和进料加档)、$M'$(风量和进料保持)、$S'$(风量和进料减档)。颗粒燃烧机进料和风量模糊控制规则如表 1。

表 1　进料和风量模糊控制规则

Tab. 1　Fuzzy control rules for feed and air volume

| $E_t$ | $E_t'$ | | |
|---|---|---|---|
| | $P$ | $Z$ | $N$ |
| $B$ | $B'$ | $B'$ | $B'$ |
| $M$ | $S'$ | $M'$ | $B'$ |
| $S$ | $S'$ | $S'$ | $S'$ |

2.3.2风量和进料档位

燃烧机供料是进料、停料工作循环，供料档位参数是每个循环中的进料时间和停料时间。对于进料最高档，在每个循环中进料和停料时间越短，对燃烧越有利，绞龙的运转次数越多；在每个循环中进料和停料时间越长，单次进料量

越多，越容易冒烟，但绞龙的运转次数越少。进料和风量档位参数如表2。这些参数可以进行实时调整。

表 2　进料和风量档位参数表

Tab. 2　Feed volume and air supply parameter table

| 档位号 | 进料档位 | | 风量档位 |
|---|---|---|---|
| | 进料时间/s | 停料时间/s | 工作电压/V |
| 1 | 1 | 36 | 130 |
| 2 | 1 | 32 | 135 |
| 3 | 1 | 28 | 140 |
| 4 | 1 | 24 | 145 |
| 5 | 1 | 20 | 150 |
| 6 | 1 | 18 | 155 |
| 7 | 2 | 26 | 160 |
| 8 | 2 | 18 | 165 |
| 9 | 2 | 10 | 170 |
| 10 | 3 | 5 | 180 |
| 11 | 4 | 4 | 220 |

实际中采用的策略是在不积料不冒烟的前提下，加长每个循环中的进料和停料时间，多次试验证明进料最高档参数取4：4是合适的。进料的最低档是不熄火的最小进料量，实践证明最低进料档位参数取1：36能满足不熄火的要求。

燃烧风机的风量档位理论上应该按实际出风量分档，但作为控制装置上能够实现控制的是对燃烧风机的工作电压分档代替风量分档。燃烧风机的电压低，风量就小，电压高风量就大。为了保证燃烧风机的使用寿命，取燃烧风机的工作电压不低于130V。

2.3.3除渣特征时间

实践证明，除渣间隔时间应随进料量的多少而变化。对于给定的颗粒燃料而言，累计进料达到一定数额时，就需要除渣一次。因此定义一个时间参数：除渣特征时间Tc，表征累计进料时间达到除渣特征时间Tc时，除渣一次。Tc值由人工针对颗粒燃料的结渣特性进行设定，易结渣的颗粒燃料Tc值小些，不易结渣的颗粒燃料Tc值大些。

**3应用情况**

该颗粒燃烧机研究成功后，于2017年7~11月在四川凉山州会理、会东、冕宁和普格县共投放了336台，在烟叶烘烤、茶籽烘烤方面进行长时间的运行试用，取得良好效果。应用于烤烟的生物质热源烤房，颗粒燃料的燃烧效率在95%以上；干球温度实际控制精度在目标干球温度±0.5°C以内；采用本文的控制方法与其他的控制方法对比，配风、供

料更加科学合理，平均每烤能节省生物质颗粒燃料80~100kg。

参考文献

[1]杨飞，张霞，刘芮，等.生物质颗粒燃料燃烧机的烟草烘烤试验研究[J].云南农业大学学报，2017，(5):912~919.

[2]兰树斌，马莹，陈维林，等.生物质智能烤房在烟叶烘烤中的应用研究[J].机电技术，2016，(5):115~117.

[3]肖志新，刘芮，彭坚强，等.生物质颗粒燃料密集烤房节能减排效果研究[J].现代农业科技，2016，(24):177~179.

[4]蒋笃忠，陈洪浪，何阳，等.生物质颗粒燃烧炉在密集烤房上的应用[J].农学学报，2017，7(8):82~86.

[5]兰树斌，张大斌，曹阳.生物质能源炉具替代密集烤房煤炭供热系统研究[J].现代农业科技，2016，(18):140~141，143.

[6]潘新民，王燕芳.微型计算机控制技术[M].北京:电子工业出版社，2003.

[7]中国烟叶公司.密集烤房生物质颗粒成型燃料燃烧机技术规范(试行)[S].中烟办〔2018〕30号.

[8]李世军，王昭三，周文虎，等.生物质颗粒燃烧机以及全自动生物质燃烧设备[P].CN:201720479407.6，2017.

[9]李世军，王昭三，翟红程，等.生物质烤烟炉燃烧机控制器及生物质烤烟炉控制系统[P].CN:206433752U，2017.

[10]林伟，王鹏，陈贤龙，等.智能生物颗粒燃料燃烧机在烟叶烘烤中的应用效果研究[J].中国农学通报，2016，32(25):170~174.

[11]王月乔，田宜水，侯书林，等.生物质颗粒燃烧器燃料适应性试验[J].农业工程学报，2014，30(7):197~205.

[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.

[13]孙云娟，蒋剑春.生物质气化过程中焦油的去除方法综述[J].生物质化学工程，2006，40(2):31~35.

[14]刘巍.生物质热风炉的设计与应用[J].工业锅炉，2010，(6):6~8.

原文地址：http://www.china-nengyuan.com/tech/156142.html