

农作物秸秆多级协同干燥系统设计及试验

丛宏斌^{1,2}, 赵立欣^{1,2}, 孟海波^{1,2}, 姚宗路^{1,2}, 吴 悠^{1,2}

(1. 农业部规划设计研究院, 北京 100125; 2. 农业部农业废弃物资源化利用重点实验室, 北京 100125)

摘 要: 在对农作物秸秆基本特性分析的基础上, 结合不同类型干燥技术的特点与适用性, 提出秸秆多级协同干燥工艺方案, 并分别对搅拌干燥、脉冲气流干燥、三回程转筒干燥装置和辅助系统进行设计与试验。以玉米秸秆为原料, 系统性能测试结果表明: 原料入机含水率为 29.5%, 出机含水率为 8.4%, 工作环境噪声为 75.6 dB, 原料处理能力为 3.92 t/h, 可满足后端生物质成型生产线要求。

关键词: 多级协同干燥; 搅拌干燥; 脉冲气流干燥; 三回程转筒干燥; 秸秆; 设计与实验

中图分类号: S216.2; TK6 **文献标识码:** A

0 引 言

新鲜农作物秸秆含水率一般在 45%~70% 之间, 需将含水率控制在 8%~20% 之间后才能满足压缩成型或高效热解要求^[1-3]。自然晾晒是秸秆干燥的重要手段之一, 拆垛后秸秆摊薄晾晒可去除原料中部分水分, 但自然晾晒受天气影响大, 尤其在冬季气温较低和夏季潮湿多雨时, 无法满足连续生产要求, 另外自然晾晒易造成秸秆含水率不均, 影响后续成型或热解质量^[4-6]。目前, 国内关于针对农作物秸秆快速干燥系统设计研究的相关报道较少, 国外定型的牧草或秸秆干燥机组价格昂贵^[7-9]。

为进一步提升能源利用效率和秸秆干燥品质, 需对目前热风干燥设备改进设计, 开发工艺先进、生产效率高、作业成本低的秸秆干燥系统。本文结合不同类型干燥技术装备特点与适用性, 提出秸秆多级协同干燥技术工艺方案, 并对搅拌干燥装置、脉冲气流干燥装置、三回程转筒干燥装置和其他辅助系统分别进行设计开发, 最后, 完成干燥系统的调试和运行试验。

1 多级协同干燥工艺

1.1 设计要求

针对玉米、小麦、水稻等大宗农作物秸秆的以

下特点:

- 1) 蜡质层阻水能力强, 水分扩散相对困难;
- 2) 粉碎后秸秆物料松散、堆积密度小, 气流对其输送能力较强。

本文开发的干燥系统应具备结构简单、运行可靠、生产连续等特点。采用余热回收和净化除尘技术, 使整个系统热效率高、污染物排放少, 符合节能环保要求。通过高温快速均匀干燥, 满足后端压缩成型或高效热解的生产需要, 同时, 秸秆处理量不小于 3 t/h。

1.2 工艺流程

根据上述设计要求, 结合不同干燥技术的特点与适用性, 开发农作物秸秆多级协同干燥工艺系统, 其大致流程如图 1 所示, 主要包括以下工艺过程:

1) 除铁布料: 采用强力电磁除铁器除去原料中夹带的铁块、铁钉和铁屑等杂质, 保障后端成型或热解等作业质量, 并避免对后端设备的损坏。均匀布料是提高系统干燥均匀性和工作稳定性的重要措施之一;

2) 搅拌干燥: 属三级协同干燥中的第一级, 针对初始物料含水率高、流动性相对较差的特点, 采用搅拌、气流组合输送以及热风顺流方式将粉碎的秸秆进行预干燥;

3)脉冲干燥:又称脉冲气流干燥,是三级干燥中的第二级,脉冲段干燥管直径变大,气流与物料在此减速,湿度相对较大的物料不断回落循环,从而达到均质干燥的目的;

4)转筒干燥:是最后一级干燥,属深度干燥阶段,物料主要通过顺流热风输送,采用多回程转筒可有效延长物料干燥时间,提高热能利用效率,使物料最终达到要求的含水率;

5)气料分离与烟气除尘:经多级干燥后,一般通过旋风分离器将物料与尾气分离;分离后的尾气中仍含有一定的烟尘,因此,后端需安装烟气除尘系统使尾气达标排放;

6)余热回用与热风系统:通过高效换热器回收尾气中的部分余热,对热风炉鼓入空气预加热以提高系统热能利用效率。热风系统是由生物质热风炉、鼓风机、引风机等组成的热风供应系统。

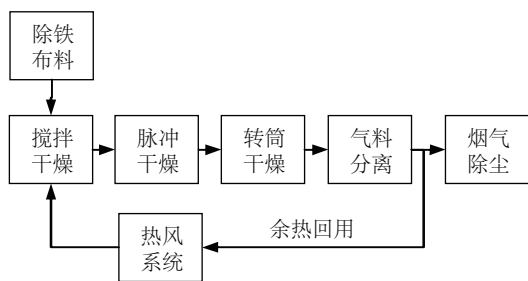


图1 农作物秸秆多级协同干燥工艺流程

Fig. 1 Technological process of multilevel collaborative drying system

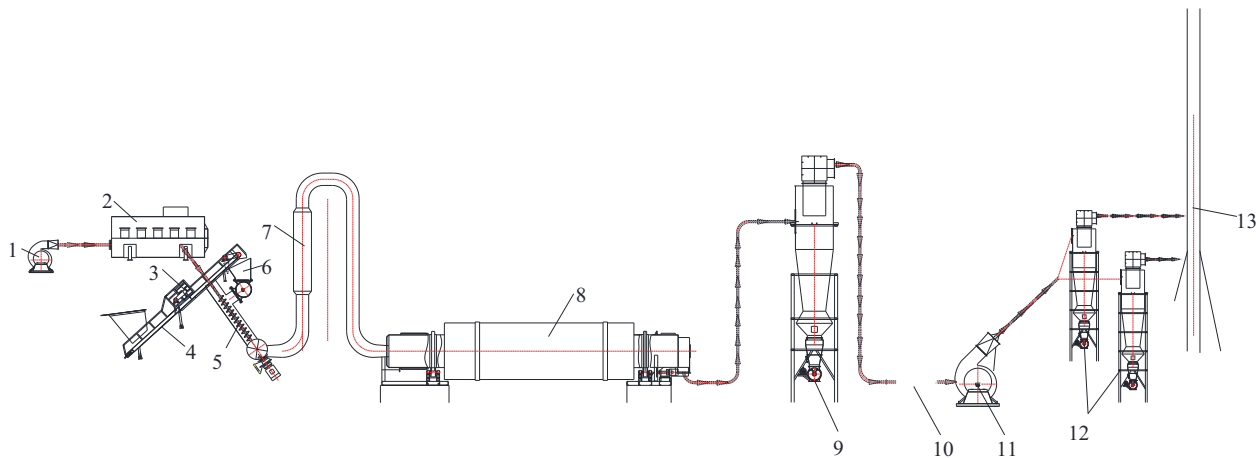
2 系统组成与技术指标

2.1 系统组成

秸秆多级协同干燥系统主要包括干燥系统、上料系统、热风系统、分离除尘系统、余热回用系统和控制系统等,其组成如图2所示。干燥系统是系统的核心,依次由搅拌干燥装置、脉冲气流干燥装置和三回程转筒式干燥装置组成。分别对秸秆进行预干燥、均质干燥和深度干燥,实现秸秆的连续、高效烘干。

热风系统主要由热风炉、鼓风机、引风机和通风道等组成,鼓风机安装在热风炉的前端,引风机安装在旋风分离器后端,鼓风机和引风机转速均可变频调节,即系统配风量依据生产需要连续可调。上料系统主要由布料器、除铁器和喂料关风器等组成,除铁器安装在布料器的上方,喂料关风器安装在布料器的后方。布料器用于提高系统上料的均匀性与稳定性,除铁器采用强力电磁体,用于清除原料中的含铁类杂质。

分离除尘系统主要由旋风分离器、空气除尘器和烟囱等组成,安装干燥系统的后端,旋风分离器用于将干燥后的物料从气流中分离,空气除尘器通过旋风与布袋组合除尘,使尾气达标排放。余热回用系统通过间接换热的方式对热风炉鼓风机吸入的空气进行预热。控制系统用于监测数据的采集、分析以及干燥系统精确控制,并实时发出系统预警信息,提高系统的自动化水平和安全可靠性。



1. 鼓风机 2. 热风炉 3. 除铁器 4. 布料器 5. 搅拌干燥装置 6. 喂料关风器 7. 脉冲气流干燥装置 8. 转筒干燥装置
9. 旋风分离器 10. 空气换热器 11. 高压引风机 12. 空气除尘器 13. 烟囱

图2 农作物秸秆多级协同干燥系统组成

Fig. 2 Components of multilevel collaborative drying system for crop straws

2.2 主要技术指标

农作物秸秆多级协同干燥系统主要技术指标如表 1 所示,系统生产率达到 3 t/h 以上,主要用于与相当生产能力的秸秆成型或热解炭化生产线配套,实现连续生产。

表 1 干燥系统主要技术指标
Table 1 Technical indexes of drying system

指标	指标值	备注
生产能力/t·h ⁻¹	>3.0	不同秸秆略有差异
加热方式	热风顺流	采用生物质热风炉
配套动力/kW	96.95	电力设备
秸秆长度/mm	<10	—
控制方式	全自动	前端喂料为人工

3 主要工作单元

结合生产实际,物料入机含水率和出机含水率分别按 35%和 15%计算,依次经由搅拌干燥装置、脉冲气流干燥装置和三回程转筒式干燥装置后,设计物料含水率依次降低 4%、6%和 10%。

3.1 三回程转筒式干燥装置

三回程转筒式干燥装置主要由进料口、外层烘干筒、中层烘干筒、内层烘干筒、出料口、驱动轮和支撑轮等组成,其结构如图 3 所示。外形呈圆柱形,内部由 3 个直径不等的直筒套装而成,与物料接触的所有表面均设有弧形抄板。烘干过程中,物料经进料口进入外层烘干筒,折流后进入中层烘干筒,最后经二次折流从内层烘干筒中流出,全过程均采用热风顺流方式烘干物料。三层滚筒相互固结,以同一角速度回转,与传统转筒干燥相比,三回程转筒式干燥装置具有结构紧凑、热量损失小等优点^[10~12]。

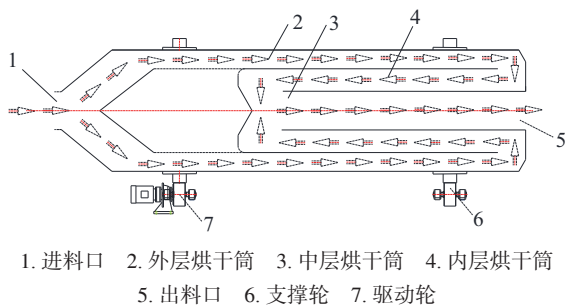


图3 三回程转筒式干燥装置结构示意图
Fig. 3 Structure schematic diagram of three cylinder rotary drying device

根据系统设计生产能力和各干燥段的设计水分脱除率,三回程转筒式干燥装置入机物料质量流量为^[10]:

$$G_2 = \frac{1 - w_1}{1 - w_2} \times G_1 \quad (1)$$

式中, G_1 ——转筒干燥出机原料质量流量, t/h; G_2 ——转筒干燥入机原料质量流量, t/h; w_1 ——转筒干燥出机原料含水率, 15%; w_2 ——转筒干燥入机原料含水率, 25%。

设计值 G_2 为 3 t/h, 则三回程转筒式干燥装置入机原料质量流量为 3.4 t/h, 理论单位时间脱水量为:

$$w_{21} = G_2 - G_1 \quad (2)$$

式中, w_{21} ——转筒干燥装置理论脱水量, t/h。

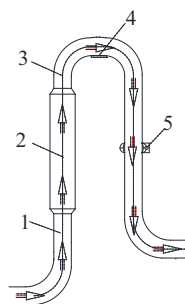
因此,转筒干燥段水分蒸发所需要热量为:

$$Q_{sz} = w_{21} \gamma \quad (3)$$

式中, Q_{sz} ——转筒干燥段水分蒸发所需热量, kJ/h; γ ——水分蒸发热, 取值范围为 2512.2~2595.9 kJ/kg。

3.2 脉冲气流干燥装置

脉冲气流干燥装置安装在搅拌干燥装置和三回程转筒式干燥装置之间。脉冲气流干燥装置主要由干燥直管、脉冲管、干燥 U 形管、观察口和流速传感器等组成,其结构如图 4 所示。脉冲管直径一般为其他干燥段直径的 1.1~1.3 倍,安装在脉冲气流干燥装置的气流上升端^[13],由于气流与物料在脉冲管中减速,可使湿度相对较大的物料回落循环反复干燥,达到均质干燥的目的。



1. 干燥直管 2. 脉冲管 3. 干燥 U 形管
4. 观察口 5. 流速传感器

图4 脉冲气流干燥装置结构示意图

Fig. 4 Structure schematic diagram of pulse air-streaming drying device

根据系统设计生产能力和各干燥段的设计水分脱除率,脉冲气流干燥装置入机物料质量流量为:

$$G_4 = \frac{1-w_3}{1-w_4} \cdot G_3 \quad (4)$$

式中, G_3 ——脉冲干燥出机原料质量流量, t/h;
 G_4 ——脉冲干燥入机原料质量流量, t/h; w_3 ——脉冲干燥出机原料含水率, $w_3=25\%$; w_4 ——脉冲干燥入机原料含水率, $w_4=31\%$ 。

不计连接管道烘干, G_3 与 G_2 相等为 3.4 t/h, 则脉冲气流干燥入机质量流量为 3.7 t。脉冲干燥装置单位时间脱水量为:

$$w_{43} = G_4 - G_3 \quad (5)$$

式中, w_{43} ——脉冲气流烘干装置理论脱水量, t/h。

因此, 脉冲干燥段水分蒸发所需要热量为:

$$Q_{sm} = w_{43} \gamma \quad (6)$$

式中, Q_{sm} ——脉冲干燥段水分蒸发所需热量, kJ/h。

干燥管直径由干燥气体流量与流速确定, 可由式(7)~式(9)确定^[12]:

$$m_2 = \frac{\Delta G}{d} \quad (7)$$

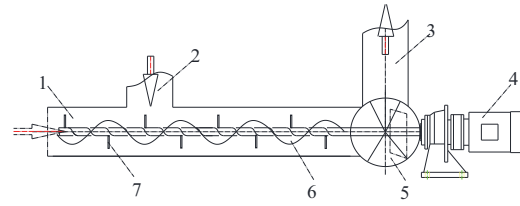
$$V_0 = \frac{m_2 R_a T_0}{p_0 - p_{0v}} \quad (8)$$

$$D = \sqrt{\frac{4V_0}{3600\pi v}} \quad (9)$$

式中, m_2 ——系统单位时间所需干空气质量, kg/h;
 ΔG ——单位时间脱水量, kg/h; d ——单位质量干空气携走水分能力, kg/kg; V_0 ——湿空气体积, m^3 ;
 R_a ——干空气的气体常数, $287 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$; T_0 ——湿空气的绝对温度, K; p_0 ——湿空气全压, 0.1 MPa;
 p_{0v} ——湿空气的水蒸气分压, MPa; D ——气流管道直径, mm; v ——设计气流流速, $v=22 \text{ m/s}$; 经理论计算, 脉冲气流干燥装置干燥管道直径为 580 mm。

3.3 搅拌干燥装置

搅拌干燥装置内部设置搅拌桨, 使湿物料在桨叶的低速搅动下, 与热载体或热表面充分接触, 从而达到干燥目的^[14]。多级协同干燥系统中搅拌干燥装置位于第一级, 其结构如图 5 所示, 主要由热风入口、进料口、出风口、驱动电机、导流器、导流螺旋和拨料杆等组成, 其中导流螺旋和拨料杆分别用于物料的辅助输送与搅拌。采用热风顺流搅拌干燥方式, 即粉碎的农作物秸秆在搅拌杆的作用下, 与热风充分接触, 完成湿度较大物料的预干燥。



1. 热风入口 2. 进料口 3. 出风口 4. 驱动电机
5. 导流器 6. 导流螺旋 7. 拨料杆

图5 搅拌干燥装置结构示意图

Fig. 5 Structure schematic diagram of agitation drying device

根据系统设计生产能力, 以及各干燥段的设计水分脱除率, 搅拌干燥装置入机物料质量流量为:

$$G_6 = \frac{1-w_5}{1-w_6} \times G_5 \quad (10)$$

式中, G_6 ——搅拌干燥入机原料质量流量, t/h;
 w_5 ——搅拌干燥出机原料含水率, $w_5=31\%$; w_6 ——搅拌干燥入机原料含水率, $w_6=35\%$; G_5 ——搅拌干燥出机原料质量流量, t/h。

不计连接管道烘干, $G_5 = G_4 = 3.7 \text{ t/h}$, 则搅拌干燥入机原料质量, 即干燥系统原料处理能力应为 3.9 t/h。搅拌干燥装置脱水量为:

$$w_{65} = G_6 - G_5 \quad (11)$$

式中, w_{65} ——搅拌干燥装置理论脱水量, t/h。

搅拌干燥段水分蒸发所需要热量为:

$$Q_{sj} = w_{65} \gamma \quad (12)$$

式中, Q_{sj} ——搅拌干燥段水分蒸发所需热量, kJ/h。

3.4 辅助系统

干燥段热量消耗量包括秸秆升温耗热量、水分蒸发耗热量、废气带走的显热, 以及炉和体管道散热 4 部分。由于炉体散热所占的比重很小, 可忽略不计^[15]:

$$Q = Q_1 + Q_s + Q_g \quad (13)$$

$$I_1 = (q - M_s)(T_{12} - T_{11})c \quad (14)$$

$$Q_s = Q_{sz} + Q_{sj} + Q_{sm} \quad (15)$$

$$I_g = G_g(T_{g2} - T_{g1})c_p \quad (16)$$

式中, Q_1 ——秸秆升温耗热量, kJ/h; Q_s ——水分蒸发耗热量, kJ/h; Q_g ——废气带出显热, kJ/h; q ——干燥系统原料处理能力, $q=3900 \text{ kg/h}$; M_s ——干燥段小时蒸发水量, $M_s=900 \text{ kg/h}$; T_{12} ——物料原始温度, $T_{12}=15 \text{ }^\circ\text{C}$; T_{12} ——物料升温后的最高温度, $T_{12}=75 \text{ }^\circ\text{C}$; c ——秸秆比热容, $c=1.5 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$;

G_g ——系统空气的质量流量, kg/h; T_{g2} ——废气排出的温度, °C; T_{g1} ——大气温度, °C; c_p ——空气的比热容, $c_p = 1 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

系统设计生产能力为 3 t/h 时, 大气温度、出口废气温度分别为 20、60 °C, 由式(13)~式(16)计算可得热风炉额定热功率为 3040 kW。其他辅助系统包括配风系统、余热回收系统、除尘分离系统、安全预警与防爆系统、自动控制系统等, 此处不再赘述。

4 调试运行与试验测试

4.1 调试运行

在对各功能单元设计计算与生产加工的基础上, 在生产现场对系统进行组装与调试, 安装后的农作物秸秆多级协同干燥系统如图 6 所示。在空载状态下系统软硬件运行平稳可靠, 各功能单元运转协调。



图6 农作物秸秆多级协同干燥系统

Fig. 6 Multilevel collaborative drying system for crop straws

4.2 试验测试

以生物质热风炉为热源, 开展农作物秸秆多级协同干燥系统运行性能试验。试验原料为粉碎长度小于 10 mm 的玉米秸秆, 试验现场环境温度为 21.5 °C, 空气相对湿度为 20.3%, 入机秸秆温度为 23.2 °C, 含水率为 29.5%, 含水不均匀度为 6.4%。

委托专业测试机构, 对系统干燥性能进行测试, 其中, 秸秆出机含水率为 8.4%, 出机含水不均匀度为 1.2%, 工作环境噪声为 75.6 dB, 原料处理能力为 3.92 t/h, 干燥系统热效率 64%。测试结果和秸秆干燥生产实践表明: 该干燥系统运行连续可靠, 生产稳定性好, 适用于玉米、棉花和小麦等农作物秸秆的干燥, 秸秆含水率能从 25%~30% 迅速降至 10%, 以自制生物质成型颗粒为燃料, 原料干燥本成为 50~80 元/t。与该生物质成型生产线先前配套的

转筒干燥器相比, 系统热效率提高 3%, 物料含水不均匀度降低 0.5%, 干燥成本也略有下降, 综合性能优于一般转筒干燥器^[16]。

5 结 论

1) 依据粉碎农作物秸秆的基本特性, 结合不同类型干燥技术装备特点与适用性, 研制了多级协同干燥工艺, 集成的搅拌干燥、脉冲气流干燥和转筒干燥技术, 分别用于秸秆预干燥、均质干燥和深度干燥, 为农作物秸秆干燥系统升级提供技术工艺支撑。

2) 以粉碎的玉米秸秆为原料, 系统性能试验测试结果表明: 原料入机含水率为 29.5%, 出机含水率为 8.4%, 工作环境噪声为 75.6 dB, 出机含水不均匀度为 1.2%, 原料处理能力 3.92 t/h, 干燥系统热效率 64%, 干燥成本为 50~80 元/t, 可满足后端生物质成型生产的要求。

3) 生产运行实践表明, 农作物秸秆多级协同干燥系统运行连续可靠、生产稳定性好, 适用于玉米、棉花和小麦等多种农作物秸秆的干燥。

[参考文献]

- [1] 赵建宁, 张贵龙, 杨殿林. 中国粮食作物秸秆焚烧碳排放量的估算[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(4): 812—816.
- [1] Zhao Jianning, Zhang Guilong, Yang Dianlin. Estimation of carbon emission from burning of grain crop residues in China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(4): 812—816.
- [2] 金 辉. 气流干燥技术研究现状与发展趋势[J]. 现代农业科技, 2010, (5): 31—35.
- [3] 丛宏斌, 赵立欣, 孟海波, 等. 立式环模秸秆压块机成型过程建模与参数优化[J]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 187—193.
- [3] Cong Hongbin, Zhao Lixin, Meng Haibo, et al. Process modeling and parameter optimization of straw briquetting machine with vertical circular mould[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 187—193.
- [4] 朱华炳, 胡孔元, 陈天虎, 等. 内燃加热式生物质气化炉设计[J]. 农业机械学报, 2009, 40(2): 96—101.
- [4] Zhu Huabing, Hu Kongyuan, Chen Tianhu, et al.

- Design of an internal combustion type heating biomass gasifier [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(2): 96—101.
- [5] 丛宏斌, 赵立欣, 姚宗路, 等. 生物质环模制粒机产能与能耗分析[J]. 农业机械学报, 2013, 44(11): 144—149.
- [5] Cong Hongbin, Zhao Lixin, Yao Zonglu, et al. Analysis on capacity and energy consumption of biomass circular mould granulator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11): 144—149.
- [6] 丛宏斌, 赵立欣, 姚宗路, 等. 内加热连续式生物质炭化设备的研制[J]. 太阳能学报, 2014, 35(8): 1529—1535.
- [6] Cong Hongbin, Zhao Lixin, Yao Zonglu, et al. Development of internal heating continuous type biomass carbonization equipment[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2014, 35(8): 1529—1535.
- [7] 雷廷宙, 沈胜强, 吴创之, 等. 玉米秸秆干燥特性的试验研究[J]. 太阳能学报, 2005, 26(2): 224—227.
- [7] Lei Tingzhou, Shen Shengqiang, Li Zaifeng, et al. Experimental research on drying characteristics of maize straw[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2005, 26(2): 224—227.
- [8] Meeso N, Nathakaranakule A, Madhiyanon T, et al. Modelling of far-infrared irradiation in paddy drying process[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 78(4): 1248—1258.
- [9] 李 斌, 陈汉平, 鞠付栋, 等. 生物质流化床热风干燥特性研究[J]. 太阳能学报, 2011, 32(6): 782—786.
- [9] Li Bin, Chen Hanping, Ju Fudong, et al. Study on hot-air characteristics of biomass in fluidized bed [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2011, 32(6): 782—786.
- [10] 王冬梅, 李 龙, 高鹏飞. 气流干燥系统主要参数的选择和设计计算[J]. 木材加工机械, 2014, (2): 18—20.
- [10] Wang Dongmei, Li Long, Gao Pengfei. Design and calculation of the flue gases dry system[J]. Wood Producing Machinery, 2014, (2): 18—20.
- [11] 关志强, 王秀芝, 李 敏, 等. 荔枝果肉热风干燥薄层模型[J]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 151—158.
- [11] Guan Zhiqiang, Wang Xiuzhi, Li Min, et al. Mathematical modeling of hot air drying of thin layer litchi flesh[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 151—158.
- [12] 高振江, 吴定伟, 张树阁, 等. 滚筒式真空脉动干燥机设计[J]. 农业机械学报, 2010, 41(3): 113—116.
- [12] Gao Zhenjiang, Wu Dingwei, Zhang Shuge, et al. Design of pulsed vacuum drum dryer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(3): 113—116.
- [13] 任景春, 刘东玲, 李延国, 等. 直通热风顺流式双轴搅拌干燥机的研究[J]. 农机化研究, 2010, 32(7): 124—126.
- [13] Ren Jingchun, Liu Dongling, Li Yanguo, et al. The research on drying machine of straight-through hot air and biaxial mixing [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(7): 124—126.
- [14] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(下) [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- [15] 曹崇文. 干燥机单位热耗和干燥能力折算的研究[J]. 干燥技术与设备, 2008, 6(1): 9—12.
- [15] Cao Chongwen. Study on conversion between unit heat consumption and drying capacity of a grain dryer [J]. Drying Technology & Equipment, 2008, 6(1): 9—12.
- [16] 张 琪, 史勇春, 李选友, 等. 转筒干燥机热效率研究现状与趋势[J]. 干燥技术与设备, 2013, 11(5): 3—11.
- [16] Zhang Qi, Shi Yongchun, Li Xuanyou, et al. Research and discussion of the rotary dryer efficiency [J]. Drying Technology & Equipment, 2013, 11(5): 3—11.

DESIGN AND TEST OF MULTILEVEL COLLABORATIVE DRYING SYSTEM FOR CROP STRAWS

Cong Hongbin^{1,2}, Zhao Lixin^{1,2}, Meng Haibo^{1,2}, Yao Zonglu^{1,2}, Wu You^{1,2}

(1. *Chinese Academy of Agricultural Engineering, Beijing 100125, China;*

2. *Chinese Academy of Agricultural Engineering, Key Laboratory of Energy Resource Utilization from Agriculture Residue, Ministry of Agriculture, Beijing 100125, China*)

Abstract: Based on the analysis of the basic feature of the crop straw, and combining with the characteristics and applicability of the different types of drying technology, the multi-stage coordinated drying process of straw was put forward. Agitation drying, pulse air-streaming drying, three cylinder rotary drying and auxiliary system are designed and tested. The testing results with corn straw showed that the moisture content of raw materials is 29.5%, the water content of the material out the machine is 8.4%, the working environment noise is 75.6 dB, and the raw material processing capacity is 3.92 t/h, which could meet the requirements of biomass compression molding.

Keywords: multilevel collaboration drying; agitation drying; pulse air-streaming drying; three cylinder rotary drying; straws; design and test