

生物质固化燃料成型车输送系统的设计与研究

李有志, 郭俊先, 张丽, 张佳喜

(1.新疆农业大学机械交通学院, 乌鲁木齐市, 830052; 2.新疆农业科学院农业机械化研究所, 乌鲁木齐市, 830091; 3.新疆农业科学院农业工程公司, 乌鲁木齐市, 830091)

摘要: 针对4FY—0.8B型生物质固化燃料成型车输送系统中, 标准式旋风分离器占用空间大和输送管道等输送部件输送不畅通的问题, 分析生物质原料颗粒在气力输送过程中不同风量对输送效率的影响, 设计并改进其输送系统的结构和参数。通过试验仪器测定生物质原料的基本物理特性参数, 验证生物质原料气力输送的基本条件; 基于风机风量理论分析及

试验验证, 最终确定最

佳风量以及分离器等其他输送部件及参数。其

结果为最佳风量为 700m^3

/h左右时, 生物质固化燃料成型车输送系统的输送效果最佳; 生物质固化燃料成型车输送系统中分离器的设计尺寸为筒体直径350mm

、总高1130mm; 钢制输料管直径

为160mm; 配备功率2.2kw的离心风机, 提供 1264m^3

/h的风量, 3.596kPa的压力; 配备功率为0.75kW关风机, 容积为4L/r。

0引言

我国拥有丰富的生物质资源, 每年仅农作物秸秆数量就达7亿多吨, 扣除秸秆还田、饲料以及工业原料等资源量, 仍有3亿多吨秸秆闲置废弃^[1-2]

。通过对生物质固化燃料成型车输送系统的设计与关键参数的研究, 可以提高生物质秸秆的利用效率, 避免不当处理对环境造成破坏, 同时也能创造一定的经济效益。

欧美等国在生物质固化燃料方面的技术和应用水平都处于较高水平, 我国相对来说就不是很成熟, 从原料处理到制备机械都存在较大差距^[3-5]

。近年来, 我国生物质固化成型燃料技术发展迅猛, 有众多研究学者在该领域探索钻研, 如中国科学院广州能源研究所、华南理工大学以及河南省科学院河南能源研究所的李海兵研究员、马小茜教授以及袁振宏研究员在生物质原料的基本特性及成型机理等

方面做了大量研究, 为探究物料性能对成型燃

料的影响提供了参考依据^[6]

; 农业部规划设计研究院的田宜水研究员和联合国粮农组织气候、能源与权属司姚向君女士等在生物质固体成型燃料技术以

及生物质固体

成型燃料成型设备方面做了

大量研究, 并针对生物质能源的发展提出了一些建设性

的意见^[7]

; 北京工业大学梁文俊、刘佳和河北农业大学刘春敬等则针对农作物秸秆, 做了大量试验研究, 提出了生物质固化成型燃料的成型工艺以及发展中所面临的问题^[8]。

通过上述可以看出, 国内学者的研究重点大多都放在技术、成型装备以及工艺设计上, 体现的是一种整体化思想, 对于输送环节的研究相对较少。气力输送是一种广泛应用于粮食、锅炉、矿产以及医药等行业的输送方式, 到目前为止, 气力输送已经发展了近两百多年, 但仍然存有很多问题有待研究^[9-10]。本文重点开展气力输送系统的设计与研究。

1 生物质固化燃料成型车的组成结构及原理

1.1 生物质固化燃料成型车的组成结构

生物质固化燃料成型车由粉碎机、移动平台、输料管、分离器、关风器、风机以及螺旋输送机和压型机组成, 包括四大系统: 动力系统、传动系统、控制系统和输送系统。它将传统的生物质原料成型过程中的粉碎、干燥、压型等工

序，集成到一个移动车载平台上，使其具有机动灵活特性，实现跨区作业。图1为生物质固化燃料成型车组件示意图，其输送系统设计为低压吸送式。

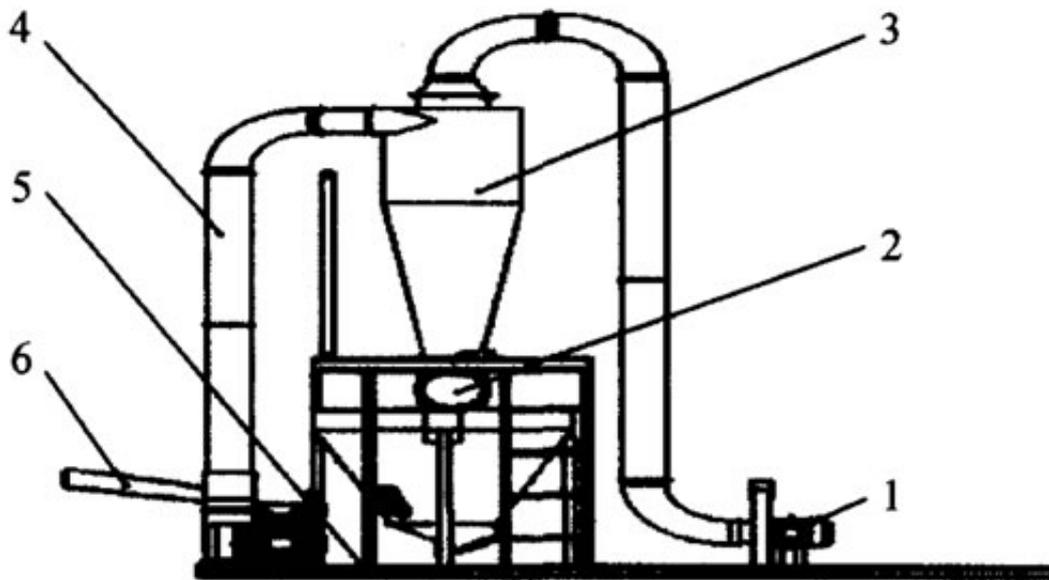


图 1 生物质固化燃料成型车组件示意图

Fig. 1 Sketch of component of mobile solidification molding vehicle

1. 风机 2. 关风器 3. 分离器 4. 输料管 5. 移动平台 6. 粉碎机

1.2 输送原理

生物质固化燃料成型车输送系统的输送通过压差原理实现。当粉碎机运转时，生物质原料被粉碎为细小颗粒，通过粉碎机高速运转的叶片或锤片，在粉碎机内部与出料口处形成一定的压差，使物料颗粒向粉碎机出料口处运动。同时，在旋风式分离器后方设置风机，将物料颗粒通过输料管吸送至分离器进行固气两相流分离，大部分粉碎颗粒在关风机位置沉积，上行气流携带细小尘埃以及少量粒径较小的生物质颗粒进入除尘器除尘，粉碎颗粒则由关风机口间歇式输出。

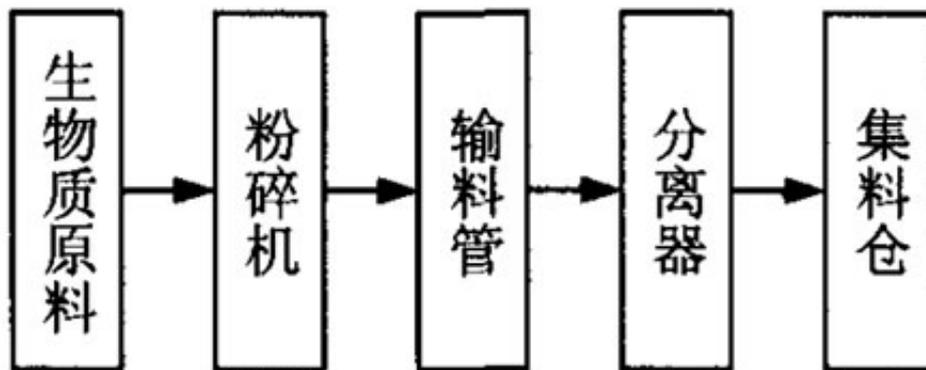


图 2 物料输送过程图

Fig. 2 Sketch of material conveying process

1.3设备与材料参数

主要设备：9FX-60型锤片式粉碎机，配套功率18.5kW，转子直径800mm，粉碎室宽度300mm，单位面积吸风量3000 m³/h，粉碎机压力损失1200Pa；处理能力1t/h。

输送材料：棉花秸秆粉碎颗粒，密度300kg/m³，平均含水量21.87%。

输送要求：输送系统的输送能力 800kg/h；输送方式为气力输送。

2气力输送设备的设计及其零部件选型

设计气力输送时，首先根据生产要求确定理论生产量；其次考虑气源设备布置，以此确定具体的输送方式；最后进行相关参数的计算，根据计算所得参数进行设备的选型。生物质固化燃料成型车输送系统气力输送设备主要包括粉碎机、输料管、分离器、风机以及关风机等，在此主要研究对象为分离器、输料管、风机和关风机，以下是基本参数的确定^[11]。

1) 输料管提升的物料量。生产要求每小时输送量大于 $\geq 800\text{kg}$,考虑余量设计处理量为 $G=1\text{t/h}$ 。取储备系数为1.1,则

$$G_a = \alpha \times G = 1.1 \times 1 = 1.1\text{t} \quad (1)$$

2) 输料口截面吸风量

$$Q' = 0.8 \times 0.3 \times 3000 = 720\text{m}^3/\text{h} \quad (2)$$

3) 输送管直径

$$D_s = \sqrt{\frac{4Q'}{3600\pi v_a}} = 0.0188 \sqrt{\frac{720}{9.8}} \approx 0.160\text{mm} \quad (3)$$

4) 气流输送速度

$$v_a = 0.01\alpha \sqrt{\gamma_s} + \beta L = 9.8\text{m/s} \quad (4)$$

式中: v_a ——气流输送速度, m/s ;

α ——与被输送物料粒度有关的系数,取18;

γ_s ——物料重度, N/m^3 ;

β ——与被输送物料特性有关的系数;

L ——输送距离, m 。

式4中, β 取值范围为 $(2 \sim 5) \times 10^{-5}$,对于干燥的粉状物料取较小的数值;对于 $L \leq 100\text{m}$ 的装置,式4中右边第二项值很小,可忽略不计

5) 物料的悬浮速度

$$v_t = \sqrt{\frac{3gd_a(\rho_s - \rho_a)}{\rho_a}} \approx 7.4\text{m/s} \quad (5)$$

式中: ρ_s ——物料密度, kg/m^3 ;

ρ_a ——空气密度, kg/m^3 ;

d_a ——物料颗粒的当量直径, m ;

g ——重力加速度, 9.81m/s^2 。

6) 单位面积吸风量

$$Q_a = \frac{3600\pi}{4} D_s^2 v \approx 708\text{m}^3/\text{h} \quad (6)$$

7) 混合比

$$m = \frac{G_a}{Q_a \rho_a} = \frac{1100}{708 \times 1.21} \approx 1.3 \quad (7)$$

2.1 旋风分离器的设计

旋风分离器的作用是分离气流中的含尘颗粒物，主要应用在粉体工程领域。因其应用领域较为广泛，故而产生了很多结构种类的分离器，根据不同结构分为短体、长体以及卧式；根据旋向分为下旋式、外旋式和内旋式。根据设计需求有多种不同形式的几何机构，而每一种形式都有大量的比例结构可供选择。设计分离器时需要考虑的因素有物料颗粒的物理特性、化学特性和空间布置等，对于生物质固化燃料成型车输送系统中分离器应考虑的因素主要是空间特性，对棉花秸秆的物理特性以及化学特性则无特别要求。

2.1.1 排气管(内筒)截面积 S_d 与直径 D_d

$$S_d = \frac{Q_a}{3600v_d} = \frac{708}{3600 \times 14} \approx 0.014\text{m}^2 \quad (8)$$

式中: v_d ——分离器进气口气流速度, 14~24m/s。

$$D_d = \sqrt{\frac{S_d}{0.785}} = 0.1355\text{m} \quad (9)$$

取 $D_d = 135\text{mm}$

2.1.2 圆筒空截面积 S_k

$$S_k = \frac{Q_a}{3600v_k} = \frac{708}{3600 \times 3} \approx 0.065\text{m}^2 \quad (10)$$

式中: v_k ——空截面上升速度, 2.5~4.0m/s。

2.1.3 圆筒全截面积 S_0

$$S_0 = S_d + S_k = 0.079\text{m}^2 \quad (11)$$

2.1.4 圆筒直径 D_0

$$D_0 = \sqrt{\frac{S_0}{0.785}} = \sqrt{\frac{0.079}{0.785}} \approx 0.317\text{m} \quad (12)$$

根据除尘器手册, 选取分离器圆筒直径 $D_0 = 350\text{mm}$ 。

外旋型离心分离器参数如表 1^[12]。

表 1 外旋型离心分离器参数

Tab. 1 Parameters of outer rotation separator

项目	参数
进口风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	14
阻力系数	10.2
进口面积/ m^2	0.012 3
风量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	620
压损/Pa	1 220
筒体直径 D_0 /mm	350
筒体长度 L_1 /mm	$0.80D_0 = 280$
锥体长度 L_2 /mm	$2.0D_0 = 700$
进气口宽度 B /mm	$0.25D_0 = 87.5$
进气口高度 H /mm	$0.40D_0 = 140$
排灰口直径 d /mm	$0.50D_0 = 175$

根据上述参数确定生物质固化燃料成型车的分离器部件总体尺寸为筒体直径为350mm，总高为1130mm。

2.2 输送系统的风压

为了确定输送系统有关部件的合理参数并估算气源设备所需的容量和功率，必须计算输送系统的压力损失，其中影响压力损失的参数较多，主要有悬浮速度、气流输送速度以及混合比，这些参数已在上述计算中得出。

生物质固化燃料成型车输送系统的输送方式设计为气力输送中的低压吸送式，其压力损失主要由粉碎机压力损失 Δp_0 、输料管垂直管段加速压力损失 Δp_{j1} 、输料管垂直管段提升压力损失 Δp_{l1} 、输料管垂直管段沿程摩擦压力损失 Δp_{m1} 、输料管弯管处压力损失 Δp_w 、水平输料管加速压力损失 Δp_{j2} 、水平输料管摩擦压力损失 Δp_{m2} 以及旋风分离器压力损失 Δp_f ^[11]。总压力损失 Δp 为

$$\begin{aligned} \Delta p &= \Delta p_0 + \Delta p_{j1} + \Delta p_{l1} + \Delta p_{m1} + \Delta p_w + \Delta p_{j2} + \Delta p_{m2} + \Delta p_f \\ &= \Delta p_0 + \xi_{s0} m \frac{\rho_a v_1^2}{2} + m \rho_1 g h \frac{v_1}{v_s} + (1 + mK_1) + \\ &\quad \lambda_a \frac{L_0 \rho_1 v_1}{2D_s} + \xi_{s1} \frac{\rho_1 v_1^2}{2} + \xi_s m \frac{\rho_2 v_2^2}{2} + \\ &\quad (1 + mK_2) \lambda_a \frac{L_1 \rho_2 v_2^2}{2D_s} + \Delta p_f \end{aligned} \quad (13)$$

带入相关参数与已知数值得生物质固化燃料成型车输送系统的总压力损失为2953Pa。

2.3 风机的选型

由上述计算得出系统所需总风量为1328m³/h，风压为2953Pa。考虑一定余量，取余量系数为1.15，则风量为1460m³/h，风压为3248Pa。

风机的电动机功率计算

$$p = k \frac{QH}{\eta\eta_c} = 1.15 \times \frac{1\,464 \times 3\,248}{0.5 \times 1.0 \times 3\,600} \approx 0.22\text{kW} \quad (14)$$

式中： p ——电动机功率，kW；

Q ——通风量， m^3/s ；

H ——风机的风压，Pa；

η ——风机效率，约为 0.4~0.75，取 0.5；

η_c ——传动效率，直接传动时为 1；

k ——余量系数。

选用 9—19NO4.4A 型离心风机，其转速为 2 900 r/min，风量为 $1\,264\text{m}^3/\text{h}$ ，风压为 3 596Pa，配套功率为 $2.2\text{kW}^{[13]}$ 。

2.4 关风机的选型

关风机在气力输送中的作用是将分离器排卸的物料排到集料仓中，并隔绝外界空气进入气力输送系统中。常见的有叶轮式和门阀式结构的关风机，在生物质固化燃料成型车中设计为叶轮式关风机。这种关风机具有结构简单、性能稳定、体积较小、制造方便等优点，适用于物料流动性较好、磨削性较小的粉粒状和小块物料^[14]。

根据排料量选择关风机型号，按以下公式计算

$$G=0.06 \times V \times N \times Y \times R \times K \quad (15)$$

式中： G ——排料量，t/h；

V ——关风机容积，L/r；

N ——关风机转速，r/min；

Y ——关风机容积效率，颗粒状物料为 0.8，粉

状物料为 0.5~0.6；

R ——物料容量，t/m³；

K ——修正系数，一般为 0.7~0.8。

关风机转速一般取 15~50r/min，此处取 24r/min；关风机容积效率取 0.8，修正系数取 0.75。计算结果得关风机容积为 3.85L/r。因此，选择关风机的型号为 ZGFF—4 型关风机，其转速 24r/min，容积为 4L/r，配备功率为 0.75kW^[13]。

3 移动式固化成型车输送系统的试验分析

3.1 试验目的

通过生物质固化燃料成型车输送系统试验装置，开展不同风量变化对棉秸秆物料颗粒输送效果影响的试验分析，最终确定输送系统部件的结构及参数。

3.2 实验设备

生物质固化燃料成型车输送系统的试验装置：锤片式粉碎机(型号9FX-60型，配备功率18.5kW)，离心风机(型号9-19 NO4.4A，配备功率2.2kW)，风机(型号ZGFF-4型，配备功率0.75kW)，直径为160mm的钢制输料管，筒体直径350mm、总高1130mm的旋风分离器。

力学万能试验机：CMT6000系列微机控制电子万能试验机，精度等级一级(CMT6013型)。

颗粒悬浮速度测量仪器与设备：空气颗粒物悬浮测试台。

颗粒度测量仪器和设备：颗粒分级振动筛(WP—1000型)、粉体堆积密度计(HYI—103型)。

含水率测定仪器：卤素快速水分测定仪(SFY—6型)；

3.3 实验过程和测量方法

1) 棉花秸秆基本物理特性的测定。

(1)含水率测定。棉花秸秆含水量是影响粉碎、输送和成型的重要因素，也影响到生物质燃料品质。含水率过低时，物料中的水分子间运动能力下降，水分扩散速率降低，使物料颗粒间摩擦性增大、流动性下降，从而导致固化燃料成型效果不佳；含水率过高时，水分环绕在物料颗粒之间，使得颗粒间结合不紧密，同时增加了物料的容重，加大输送难度，导致成型效果不佳。研究人员指出，生物质原料的含水率在16%~18%左右时为最佳[15]。

(2)棉秸秆物理性能测定。通过粉尘堆积密度计测量棉花秸秆粉碎颗粒的堆积密度，运用斜箱法测量棉秆粉碎颗粒的休止角，获得棉秆颗粒的流动性和摩擦性。

2)棉花秸秆粉碎颗粒的悬浮速度测量。棉秸秆物理性能测定完成后，通过空气颗粒物悬浮测试台测试棉秸秆粉碎颗粒的悬浮速度。悬浮速度是棉秸秆粉碎颗粒群在垂直输送过程中，棉秸秆颗粒达到悬浮状态时的最小气流速度，该速度能够反映出输送物料的主要物理特性，是气力输送中最为关键的原始参数。图3是生物质固化燃料成型车采用的原料棉花秸秆以及粉碎颗粒物悬浮速度测定设备图。实验所测棉花秸秆粉碎后颗粒的最小悬浮速度为8m/s，理论计算值为7.4m/s。与实测值相近。

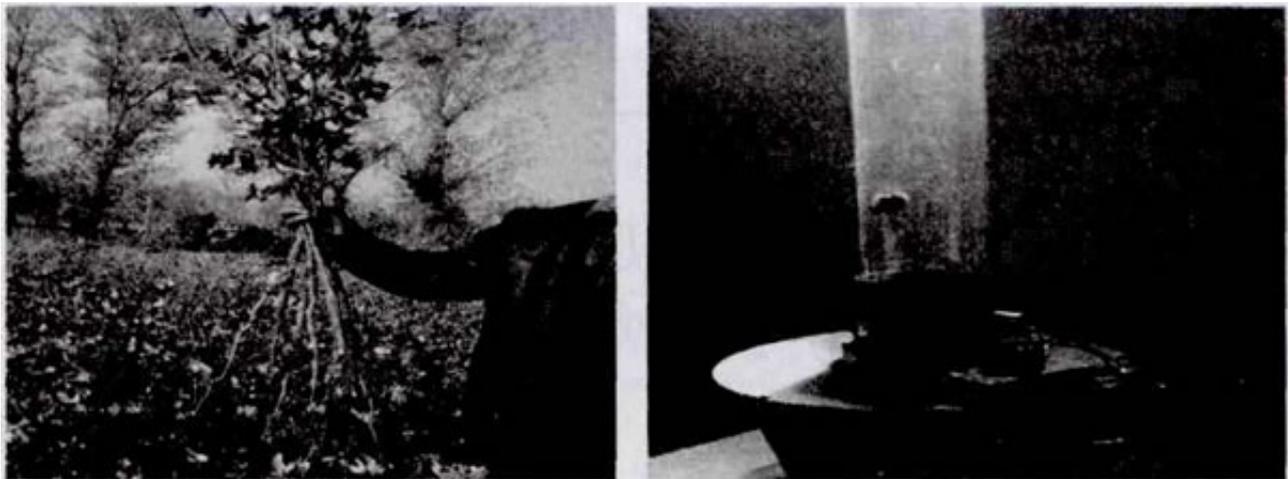


图 3 棉花秸秆粉碎前样本和粉碎后悬浮速度测定图

Fig. 3 Cotton straw sample and smash particle floating velocity test equipment

3)生物质固化燃料成型车性能测试实验。性能测试实验分为两个部分。首先进行棉秸秆粉碎、粉碎后颗粒输送、分离和压型四个阶段的部件性能测试实验。在实验过程中，通过控制风机风量大小，分析风量与物料输送量之间的关系，实验过程中风量范围为300~1100m³/h，每次增加风量为初始值的50%；最后做整机性能测试实验。图4是部件性能测试和整机性能测试实验现场图。

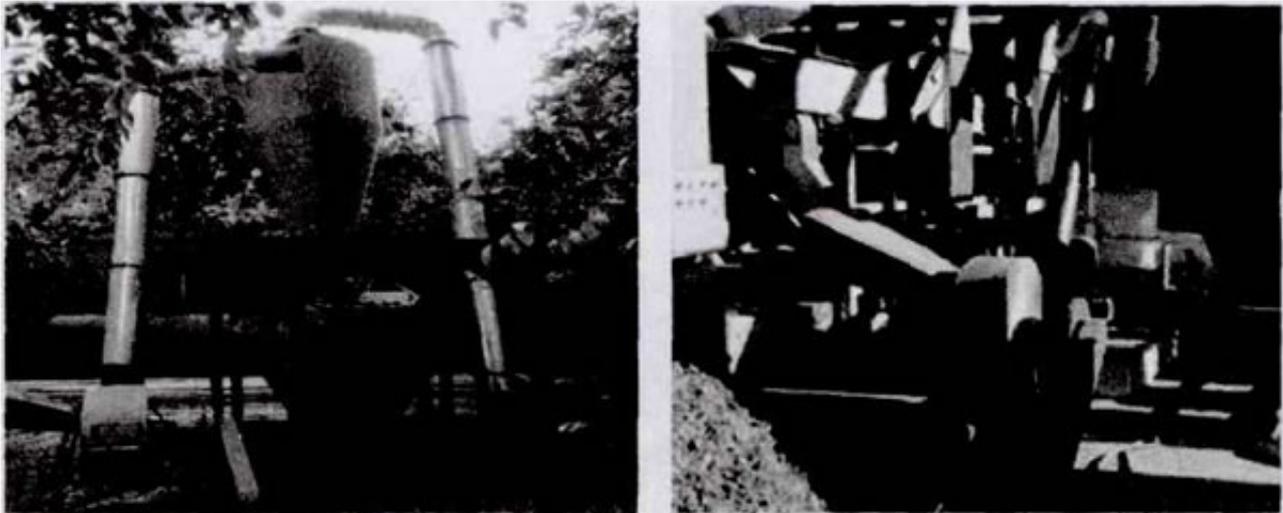


图 4 部件性能实验和整机性能实验现场图

Fig. 4 Picture of parts performance test and complete appliance performance test

3.4实验结果及分析

3.4.1棉秸秆物料物理特性

粉碎后测得棉花秸秆粉碎颗粒的堆积密度为 300kg/m^3 ，棉花秸秆粉碎颗粒的休止角为 71° ，平均含水量 21.87% 。从所测得的棉花秸秆物理特性中可以看出含水量略高于最佳范围，因而对于棉花秸秆颗粒物的输送会产生一定影响。棉花秸秆粉碎颗粒的休止角度较大，因而在输送过程中会增大颗粒之间的摩擦，降低其流动性。

3.4.2风量与物料颗粒输送量实验

结果如表2和图5所示，随着风量的增加，输送量第11期李有志等：生物质固化燃料成型车输送系统的设计与研究呈现先上升后下降状态，依据风机额定功率，确定风机的最大风量为 $1260\text{m}^3/\text{h}$ ，移动式固化成型车输送系统的最佳风量在 $700\text{m}^3/\text{h}$ 左右。

表 2 风量与输送量关系

Tab. 2 Relationship of blast capacity and delivery values

风量 $/(m^3 \cdot h^{-1})$	理论输送量 $/(kg \cdot h^{-1})$	输送量 $/(kg \cdot h^{-1})$
300	472	457
500	787	682
700	1 101	975
900	1 416	891
1 100	1 730	844

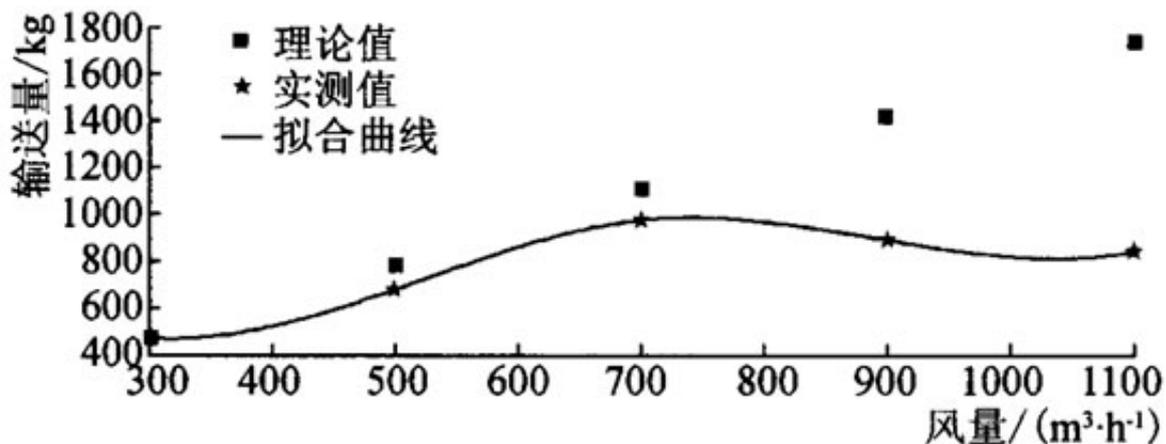


图 5 数据对比图

Fig. 5 Picture of data contrast

从图5中可以看出，风量与输送量在理论值下的关系几乎成线性增长关系，即输送量会随着风压的不断增大而增大；但在试验测试中却表现为另一种关系，即输送量开始随风量的增大而增加，当输送量后达最大值后，将不再继续增加，而是略有所下降。分析其原因有以下几点：(1)风量与输送量在理论计算时，是成正比关系的，这是一种理想状态下的关系；(2)物料含水率过高，使物料的输送能力下降；(3)多因素交互影响，使输送系统输送效率降低。由此可以得出：风量过大会导致输送效果下降，加快输送管内壁的磨损使输送物料颗粒的能力下降；风量过小则会使输送过程中出现物料颗粒滞留在输送管中，造成输送不畅的问题；合适的风量可以使物料颗粒在输料管中平稳顺畅的输送，从而获得最佳的输送效果；输送系统的输送效率，对生物质固化燃料成型车的性能起到关键性作用。

3.4.3 部件性能测试实验

部件性能测试实验结果见表3、表4。从表3可见，粉碎机粉碎颗粒的粒度主要集中在5~10mm，占总体的86.2%。从表4可见，粉碎机生产率0.98t/h以上，分离器的分离效率约为0.95t/h，成型机生产效率约为0.97t/h，也就是单位小时生产970kg固化成型燃料。

理论上分级部件的效率应该是逐级增加的，否则系统就会在输送过程中发生堵塞、堆积等不良状况，分析试验中出

现的情况为:当单独试验时,各部件均能保持较高处理能力,而当将这些部件组成一个系统时,各个部件之间会产生联动现象。如单独依靠粉碎机的风量是无法将棉花秸秆颗粒顺利输送至分离器进行分离的,只有将粉碎机和气源风机组成一个输送系统时,其风量才能将棉花秸秆粉碎颗粒顺利输送至分离器分离,同时,单机单位时间处理量比系统单位时间处理量大,故此现象为正常情况。

表 3 棉花秸秆粉碎粒度测试结果

Tab. 3 Test results of particle size of cotton straw

尺寸/mm	质量/g	百分比/%
<1	1.4	2.8
1~5	1.8	3.6
5~10	43.1	86.2
10 以上	3.7	7.4

表 4 部件实验效率结果

Tab. 4 Results of test efficiency of single phase

项目	数据
质量/kg	100
粉碎机生产效率/(t·h ⁻¹)	0.98
分离器分离效率/(t·h ⁻¹)	0.95
成型机生产效率/(t·h ⁻¹)	0.97

3.4.4 整机性能测试实验

整机性能测试实验结果表明,移动式固化成型车输送系统试验装置单位小时生产固化成型燃料930kg以上,高出4FY—0.8B型成型车的800kg/h,满足生物质固化燃料成型车的生产要求。分析其低于单阶段生产效率的原因为整机在各个阶段中均有不同程度的损耗。

4 讨论

1)在试验中,含水率的指标与最佳范围存在一定差异,表现为较高的含水率,因而对物料颗粒输送的影响程度无法评估,若要探究其影响,则需要设计新的实验,分析不同含水量下,输送系统的输送效率。

2)对于输送系统中关键参数的研究中,虽然能得到一般性结论,即风量与输送量之间的变化规律,但是由于试验次数较少,不能作为普遍规律。

3)在生物质颗粒的输送过程中，影响因素较多，需要从多方面综合考虑。在上述的研究中，还存在一些不足之处，需在今后进一步探究。

5结论

通过对生物质固化燃料成型车输送系统关键部件的设计选型以及试验测试，确定的设备及参数如下：

输料管：直径160mm的钢制输料管。

旋风分离器：筒体直径350mm，总高1130mm。

离心风机：风量为1264m³/h，压力为3596Pa，配备功率为2.2kW。

关风机：容积为4L/r，配备功为0.75kw。

设计的生物质固化燃料成型车输送系统，有效解决了输送系统中分离器占据空间大以及物料输送不畅的问题，并得出物料输送的最佳风量为700m³/h左右时，输送系统的输送效果最佳。通过试验与理论对比分析，得出了风量与物料输送量的关系，表现为：输送量与风量在初始阶段呈递增关系，当输送量达到最大值时，输送量随风量的继续增加，呈下降趋势。

参考文献

- [1]刘延春，张英楠，刘明，等.生物质固化成型技术研究进展[J].世界林业研究，2008，21(4)：41～48.
- [2]吴创之，周肇秋，阴秀丽，等.我国生物质能源发展现状与思考[J].农业机械学报，2009，40(1)：92～99.
- [3]Pirraglia A，Gonzalez R，Denig J，et al.Technical and eco-nomic modeling for the production of torrefied lignocellulos-ic biomass for the US densified fuel industry[J].Bioenergy Research，2013，6(1)：263～275.
- [4]Sanna A.Advanced biofuels from thermochemical process-ing of sustainable biomass in Europe[J].Bioenergy Re-search，2014，7(1)：36～47.
- [5]郝永俊，张曙光，王刚，等.生物质固化成型设备的最新研究进展[J].环境卫生工程，2011，19(4)：44～46.
- [6]李海滨，袁振宏，马晓茜.现代生物质能利用技术[M].化学工业出版社，2012.
- [7]田宜水，姚向军.生物质能资源清洁转化利用技术(第二版)[M].化学工业出版社，2014.
- [8]梁文俊，刘佳，刘春敬.农作物秸秆综合利用技术[M].化学工业出版社，2015.
- [9]李洪江.气力输送系统经济性能分析[D].青岛科技大学，2013.
- [10]楼建勇，林江.气力输送系统的研究现状及发展趋势[J].轻工机械，2008，26(3)：4～7.
- [11]黄学群.运输机械选型设计手册(第二版)[M].化学工业出版社，2011.
- [12]张殿印，王纯.除尘器手册(第二版)[M].化学工业出版社，2014.
- [13]闻邦椿.机械设计手册(第五版)[M].机械工业出版社，2010.
- [14]杨伦，谢一华.气力输送工程[M].机械工业出版社，2007.
- [15]程备久，卢向阳，蒋立科，等.生物质能学[M].化学工业出版社，2008.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/129304.html>