

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.005

气力式秸秆深埋还田机输送装置设计与试验

田 阳 林 静 李宝筏
(沈阳农业大学工程学院, 沈阳 110866)

摘要: 针对合理耕层构建技术指标要求,设计了气力式秸秆深埋还田机输送装置。其主要结构参数为:输送管截面为0.2 m×0.2 m方形管;叶轮直径为0.55 m,叶轮宽度为0.17 m,进气口直径为0.26 m,风机壳宽度为0.2 m;螺旋轴直径为0.09 m,螺旋叶片外径为0.25 m,螺距为0.2 m,螺旋叶片厚度为0.003 m,螺旋外径与输送管内表面间隙为0.005 m。通过玉米悬浮速度试验测得,长度为10 cm玉米秸秆上、中、下部分悬浮速度分别为10.4、12.3、12.7 m/s,平均值为11.9 m/s,试验结果与仿真误差为7%。基于气固耦合理论,通过CFD-DEM气固耦合法对输送装置内的气固两相流模拟研究,表明弯角30°、转速为1 800 r/min时输送管道中,秸秆最小速度为5.21 m/s,所对应的气流速度为17~27 m/s,出口处玉米秸秆速度为6.06 m/s,气流速度为2~27 m/s,秸秆输送效果最佳。田间试验结果表明,气力输送装置性能参数最优组合为:风机转速1 800 r/min,秸秆覆盖量1.2 kg/m²,叶片弯角30°。田间验证试验得深埋合格率为93.2%,有效提高了深埋质量。

关键词: 秸秆深埋还田机; 输送装置; 气力式

中图分类号: S224.29 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)12-0036-09

Design and Test of Conveying Device of Pneumatic Straw Deep Burying and Returning Machine

TIAN Yang LIN Jing LI Baofa
(College of Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: The pneumatic style straw deep burying and returning machine enjoys comprehensive functions in the aspect of stubble breaking, straw picking and crushing, ditching and crushing, inter-row deep loosening, deep-buried straw, soil covering, and finally buries the straw below 20 cm between rows and at the same time constructs the furrow loose and ridge compaction plough layer structure. According to the technical requirements of reasonable tillage construction, the pneumatic conveying device was designed. The main structural parameters of the conveying device were as follows: the cross section of the conveying pipe was 0.2 m×0.2 m square pipe; the impeller diameter was 0.55 m; the width of impeller was 0.17 m; the inlet diameter was 0.26 m; the width of fan shell was 0.2 m; the outer diameter of screw blade was 0.25 m; the diameter of the screw shaft was 0.09 m; the screw pitch was 0.2 m; the thickness of the screw blade was 0.003 m; and the clearance between the outer diameter and the inner surface of the conveying pipe was 0.005 m. According to the test of suspended velocity for corn, the suspended velocity of upper, middle and lower parts of 10 cm corn stalk was 10.4 m/s, 12.3 m/s and 12.7 m/s, respectively, with an average of 11.9 m/s. The test results and simulation error was 7%. On the basis of gas-solid coupling theory, the CFD-DEM method was used to simulate the two-phase flow of gas-solid in the conveyor. When the angle was 30° and rotation speed was 1 800 r/min, the minimum velocity of straw in the conveying pipeline was 5.21 m/s. And the corresponding velocity of air flow was 17~27 m/s. At the outlet, the velocity of straw reached 6.06 m/s, and 2~27 m/s at the air flow rate. The number of straw inside the fan was 24 at 1.2 s, and then it had the most effective delivery. The results of field experiment showed that the optimum combination of performance parameters of pneumatic conveyor was as

收稿日期: 2018-09-04 修回日期: 2018-10-08

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503116-09)、辽宁省农村经济委员会与质量技术监督局地方标准项目(2016160-27)和国家自然科学基金项目(51275318)

作者简介: 田阳(1986—),男,博士生,主要从事旱作农业机械化及智能化装备研究,E-mail: tianyang86@qq.com

通信作者: 林静(1967—),女,教授,博士生导师,主要从事旱作农业机械化及智能化装备研究,E-mail: synydxlj69@163.com

follows: blade bending angle was 30° , straw coverage was 1.2 kg/m^2 , fan speed was $1\,800\text{ r/min}$ and the qualified rate of deep-buried was 93.2% . The research had effectively improved the deep-buried quality and also can provide reference on further study on performance improvement of pneumatic straw deep burying and returning machine as well as the promotion of agriculture mechanization level.

Key words: deep burying and returning machine of straw; conveying device; pneumatic

0 引言

秸秆还田有粉碎翻压、旋耕混拌和秸秆覆盖还田等形式^[1-5]。秸秆不易腐烂,留在地表影响播种质量和出苗率,还会导致土壤病菌增加,作物病害增加等不良现象。因此采取合理的秸秆还田措施,才能起到良好的还田效果。针对这种现象农学专家提出了秸秆深埋还田,构建合理耕层^[6-9]。秸秆深埋还田除了解决秸秆过剩问题外,还能给土壤表面提供良好的播种环境,打破犁底层,给种床提供“暖被”提高地表温度,增加土壤孔隙度,在雨季吸水、纳水还可防止来年春季干旱等。

王学农等^[10]应用计算流体力学技术对抛送式秸秆粉碎还田机风场进行了模拟研究。翟之平等^[11]应用 Mixture 模型,将玉米秸秆粉碎颗粒简化为球形颗粒后,模拟了叶片式抛送装置内气固两相流动。宋学锋等^[12]应用 CFD-DEM 气固耦合法模拟了揉丝机排料装置内丝状物料的运动。吴峰等^[13]优化设计了秸秆输送装置的抛送管道,提高了玉米秸秆的抛送速度。林静等^[14]根据滑道升运器式捡拾器设计了弹齿式秸秆输送装置。气力输送装置输送过程中玉米秸秆通过风机和输送管道落入深埋沟内,其主要问题是由于玉米秸秆产量大、含水率高、韧性高,导致秸秆输送装置易发生堵塞以及卸料口气流速度过大易将秸秆吹出掩埋沟,影响秸秆深埋质量。

本文以气力式秸秆深埋还田机气力输送装置作为研究对象,以玉米秸秆作为输送物料,应用 CFD-DEM 气固耦合法对气力输送装置的输送过程进行数值模拟,初步揭示气力输送装置内气固两相流速度场分布和秸秆运动规律。在此基础上以深埋合格率为评价指标,采用正交试验设计方法对风机叶片弯角、秸秆覆盖量、风机转速进行试验,以期获得气力输送装置的最佳结构参数和性能参数,提高深埋质量,解决堵塞问题。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

气力式秸秆深埋还田机主要由机架、传动系统、破茬装置、捡拾粉碎装置、气力输送装置、开沟装置、覆土装置、镇压装置等组成,其结构如图 1 所示。机

具一次作业完成破茬、秸秆捡拾粉碎、开沟碎土、行间深松、秸秆深埋、覆土镇压等功能,最终将秸秆深埋于行间土壤深度 20 cm 以下,实现秸秆深埋还田的同时构建虚实并存耕层结构。

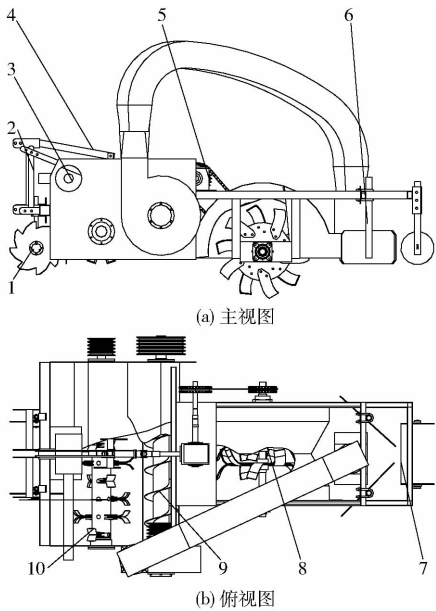


图 1 气力式秸秆深埋还田机结构图

Fig. 1 Structure diagrams of pneumatic straw deep burying and returning machine

1. 破茬装置 2. 机架 3. 前传动箱 4. 悬挂装置 5. 后传动箱
6. 覆土装置 7. 镇压装置 8. 开沟分土装置 9. 气力输送装置
10. 捡拾粉碎装置

1.2 工作机理

气力输送装置结构如图 2 所示,主要由风机叶轮、风机壳、输送管道、卸料管道、螺旋输送装置组成。其工作时捡拾粉碎装置将秸秆粉碎后抛送至螺旋输送装置,螺旋输送装置将碎秸秆推送至风机,秸秆在叶轮高速旋转产生的离心力和高速气流的综合作用下被送入开沟装置后方的掩埋沟内。

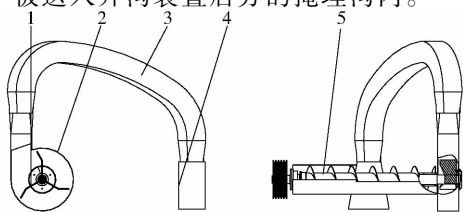


图 2 气力输送装置结构图

Fig. 2 Structure diagrams of pneumatic conveying device

1. 风机叶轮 2. 风机壳 3. 输送管道 4. 卸料管道 5. 螺旋输送装置

2 气力输送装置结构设计

2.1 玉米秸秆悬浮速度试验

为了研究气力输送装置的工作原理,确定气流输送速度,对玉米秸秆各部分进行空气动力特性试验研究,测试其悬浮速度。影响物料悬浮速度的主要参数有密度、质量、外形尺寸等。

试验仪器及材料:PS-20 型物料悬浮速度试验台、BL310 型电子天平、皮托管、微压计、游标卡尺等。

秸秆上、中、下 3 段物理特性有较大差异,所以将其分为 3 部分分别进行试验。随机选取 50 根玉米秸秆作为试验样本。捡拾粉碎装置将秸秆粉碎后,秸秆长度小于 10 cm,所以试验秸秆长度为 10 cm。测量每个样本的物理特性同时进行编号,每组试验重复 3 次,试验结果如表 1 所示。

表 1 玉米秸秆物理参数
Tab.1 Physical parameters of corn straw

秸秆部位	直径/ cm	质量/ g	密度/ (g·cm ⁻³)	悬浮速度/ (m·s ⁻¹)
上部	1.86	6.46	0.248 3	10.4
中部	2.39	12.05	0.285 1	12.3
下部	2.63	14.07	0.267 1	12.7
平均值	2.24	10.86	0.266 8	11.9
标准差	0.38	3.68	0.033 7	1.3
变异系数/%	17.1	33.9	12.5	10.9

2.2 气力输送装置参数计算

(1)为了保证玉米秸秆能在管道中顺利输送而不堵塞,输送装置的生产率和空气流量应有适当的比例关系,即秸秆在空气中的质量浓度不高于一定值^[15-16]。

$$m_c = \frac{Q_a}{Q_j} \tag{1}$$

式中 m_c ——混合浓度比
 Q_a ——单位时间内通过输送管道截面的空气质量,kg/s
 Q_j ——输送装置生产率,kg/s

玉米秸秆为长杆状颗粒且体积较大,输送装置的混合浓度比不宜过大,选择混合浓度比 m_c 为 1.3。

为了保证输送秸秆的流畅性,气流速度应该略大于秸秆悬浮速度。

$$v_a = k_a v_p \tag{2}$$

式中 v_a ——输送气流速度,m/s
 k_a ——输送气流系数,在 1.1~2.5 范围内变化,与输送物的浓度有关
 v_p ——输送物悬浮速度,m/s

输送物料为秸秆且混合浓度比 m_c 在 1.0~2.0 时选取 k_a 值为 2.2,秸秆的悬浮速度 v_p 选取 3 部分的平均值 11.9 m/s,则输送气流速度 v_a 为 26.2 m/s。

(2)输送管边长计算公式为

$$d_g = \sqrt{\frac{Q_j}{v_a \rho_a m_c}} \tag{3}$$

式中 d_g ——输送管边长,m
 ρ_a ——空气密度,kg/m³

当田间秸秆量为 16 000 kg/hm²^[17],机具作业速度为 0.83 m/s,工作幅宽为 1.3 m 时,输送装置的生产率 Q_j 约为 1.7 kg/s,混合浓度比 m_c 为 1.3,空气密度 ρ_a 为 1.25 kg/m³,计算得输送管边长 d_g 为 0.2 m。

(3)气力输送装置的全压 Δp 由静压 Δp_s 和动压 Δp_d 组成,其中静压主要由管道全程压力损失 Δp_q 、局部压力损失 Δp_b 、加速压力损失 Δp_j 等组成。其中局部压力损失 Δp_b 比较小,可以忽略不计。全程压力损失计算公式为

$$\Delta p_q = \alpha_q K_q \left(0.012 5 + \frac{0.001 1}{4 r_g} \right) \frac{L_q}{4 r_g} \frac{\rho_a v_a^2}{2} \tag{4}$$

其中 $\alpha_q = 1 + \lambda_q m_c \tag{5}$

式中 α_q ——压力损失比
 K_q ——管道粗糙度系数
 r_g ——水力半径,m
 L_q ——输送管道全长,m
 λ_q ——压力损失比系数

λ_q 与输送物料种类、气流速度、混合浓度比相关,其取值范围为 0.3~2.0,取 λ_q 为 0.5,计算得 α_q 为 1.65。

$$L_q = L_p + \varepsilon_c L_c + \varepsilon_\theta \sin \theta L_\theta + \varepsilon_w L_w \tag{6}$$

式中 L_p ——水平管道长度,m
 ε_c ——垂直管道系数
 L_c ——垂直管道长度,m
 ε_θ ——倾斜管道系数
 θ ——倾斜角,(°)
 L_θ ——倾斜管道长度,m
 ε_w ——弯曲管道系数
 L_w ——弯曲管道长度,m

其中 L_p 为 0,垂直管道系数 ε_c 取 1.8,垂直管道长度 L_c 为 0.4 m,倾斜管道系数 ε_θ 取 1,倾斜管道长度 L_θ 为 1.22 m,倾斜角 θ 为 71.2°,弯曲管道系数 ε_w 取 5,弯曲管道长度 L_w 为 1.17 m,计算得 L_q 为 7.72 m。

对于新焊接方管 K_q 取 1.2,对于正方形截面管 r_g 为 0.05 m,计算得全程压力损失为 590.2 Pa。

当玉米秸秆进入输送管道时,在运动方向上速度一般是零,要靠气流将它加速到一定速度才能实

现稳定输送,在加速段内玉米秸秆与气流有较大速度差,因而有一部分能量要消耗在秸秆的加速上,这就是加速压力损失,加速压力损失计算公式为

$$\Delta p_j = \lambda_j m_c \frac{\rho_a v_a^2}{2} \tag{7}$$

式中 λ_j ——加速压力损失系数
 λ_j 由输送气流和悬浮速度决定,取 0.41,则加速压力损失为 228.7 Pa。

动压计算公式为

$$\Delta p_d = \frac{\rho_a v_a^2}{2} \tag{8}$$

计算得动压 Δp_d 为 429 Pa,则全压 Δp 为 1 247.9 Pa,考虑其他损失将全压加大 10% 左右,取 1 373 Pa。

(4) 转速和叶轮直径的关系为

$$n_f = \frac{60}{\pi D_y \sqrt{\rho_a \varphi_f}} \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho_a \varphi_f}} \tag{9}$$

式中 D_y ——叶轮直径, m
 φ_f ——风机系数
 n_f ——转速, r/min

在满足气力输送装置生产率的前提下,理论上叶轮直径越大,所需要的转速越小。结合机具作业时风机壳体须有一定离地间隙的要求,设计叶轮直径为 0.55 m,农用风机 φ_f 一般取 0.3,则转速 n_f 为 2 101.2 r/min,风机转速取整为 2 100 r/min。

(5) 叶轮宽度计算公式为

$$b_y = \frac{480 Q_j}{n_f A_y \gamma \varphi_f D_y^2 \tan \beta_j} \tag{10}$$

式中 b_y ——叶轮宽度, m
 A_y ——叶轮数
 β_j ——输送物料自然休止角, (°)
 γ ——被输送物料的单位容积质量, t/m³

风机转速 n_f 为 2 100 r/min。机具工作时玉米秸秆通过风机内部,为防止堵塞且风机转速较高,叶轮数 A_y 为 3,叶片径向圆周均匀分布。 γ 为 0.02 t/m³。 φ_f 取 0.3, D_y 为 0.55 m, β_j 为 23°, 计算得 b_y 为 0.17 m。与风机壳保持 15 mm 的间隙,则壳体宽度 B_k 为 0.2 m。

(6) 壳体进气口直径计算公式为

$$D_k = 2 \sqrt{\frac{d_g^2}{\pi \lambda_k}} \tag{11}$$

式中 D_k ——壳体进气口直径, m
 λ_k ——壳体进气口直径系数

农业机械中 λ_k 取值范围为 0.5 ~ 1, 取 0.75, 计算得壳体进气口直径 D_k 为 0.26 m。

(7) 为了减少卸料口气流和秸秆的速度,防止秸秆被气流从掩埋沟内吹出,将卸料管道设计成梯

形体,使横截面逐渐增大,气流逐渐减小,卸料管道出口横截面尺寸为 390 mm × 250 mm。

2.3 螺旋参数

螺旋输送装置生产率计算公式为

$$Q_j = 4.17 \pi [(D_l + 2\lambda)^2 - d^2] K_d S n_l K_\beta \gamma \tag{12}$$

式中 D_l ——螺旋外径, m S ——螺距, m
 n_l ——螺旋转速, r/min
 λ ——螺旋外径与输送管内表面间隙, m
 d ——螺旋轴直径, m
 K_β ——倾斜输送系数
 K_d ——充满系数

由于螺旋输送物料为长度小于 10 cm 的碎秸秆,根据《农业机械设计手册》^[16] 及其设计需求,选取螺旋外径 D_l 为 0.25 m,螺距 S 为 0.2 m,螺旋轴直径 d 为 0.09 m,螺旋外径与输送管内表面的间隙 λ 为 0.005 m,倾斜输送系数 K_β 为 1,充满系数 K_d 为 0.4,玉米秸秆单位容积质量 0.02 t/m³,螺旋叶片厚度 δ 为 0.003 m,当螺旋转速 $n_l > 709$ r/min 时,其推进量可达到 1.7 kg/s。

3 仿真

3.1 计算模型

杆状颗粒的离散元模型^[18] 为

$$m_k \frac{dv_k}{dt} = \sum (F_c + m_k g + F_f) \tag{13}$$

$$\frac{d(I_k \omega_k)}{dt} = \sum (M_t + M_n + M_r) \tag{14}$$

式中 m_k ——质量, kg
 I_k ——转动惯量, kg·m²
 v_k ——线速度, m/s
 F_c ——周围颗粒碰撞力, N
 F_f ——周围颗粒摩擦力, N
 ω_k ——角速度, rad/s
 M_t ——切向碰撞力产生的力矩, N·m
 M_n ——法向碰撞力产生的力矩, N·m
 M_r ——滚动摩擦力矩, N·m
 g ——重力加速度, m/s²
 t ——时间, s

杆状颗粒和气相耦合作用的流体相控制方程为^[19]

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon \mathbf{u}) = 0 \tag{15}$$

$$\frac{\partial (\rho_f \varepsilon \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \varepsilon \mathbf{u}^2) = -\nabla p - \sum_{i=1}^{k_c} \frac{f_{pi}}{\nabla V} + \nabla \cdot (\varepsilon \boldsymbol{\tau}) + \rho_f \varepsilon g \tag{16}$$

其中

$$\varepsilon = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{k_c} V_i}{\nabla V} \quad (17)$$

- 式中 ρ_f ——流体密度, kg/m³
 u ——流体速度, m/s
 p ——流体压力, Pa
 f_{pi} ——流体和颗粒 i 间作用力, Pa
 ∇V ——流体计算单元体积, m³
 k_c ——计算单元内颗粒数量
 τ ——液体黏性应力张量, Pa
 ε ——局部孔隙率
 V_i ——颗粒 i 体积, m³

流体-颗粒作用力^[20]

$$f_p = -V_i \rho_g g + f_d \quad (18)$$

其中

$$f_d = 0.5 C_d \rho_f A_i |u_i - v_i| (u_i - v_i) \varepsilon_i^{1-x_i} \quad (19)$$

$$x_i = 3.7 - 0.65 \exp \left(-\frac{(1.5 - \ln Re_i)^2}{2} \right) \quad (20)$$

$$Re_i = \frac{\rho_f d_v \varepsilon_i |u_i - v_i|}{\mu_f} \quad (21)$$

$$C_d = \frac{8}{Re_i} \frac{1}{\sqrt{\varphi_c}} + \frac{16}{Re_i} \frac{1}{\sqrt{\varphi}} + \frac{3}{\sqrt{Re_i}} \frac{1}{\varphi^{\frac{3}{4}}} + 0.42 \times 10^{0.4(-\lg \varphi)^{0.2}} \frac{1}{\varphi_c} \quad (22)$$

- 式中 ρ_g ——颗粒密度, kg/m³
 f_d ——杆状颗粒 i 曳力, N
 A_i ——杆状颗粒等效体积球截面积, m²
 C_d ——杆状颗粒 i 阻力系数
 u_i ——颗粒 i 质心处虚拟气体速度, m/s
 v_i ——颗粒 i 速度, m/s
 ε_i ——颗粒 i 局部孔隙率
 x_i ——关于雷诺的系数
 Re_i ——颗粒 i 雷诺数
 d_v ——杆状颗粒 i 等效体积球直径, m
 μ_f ——流体黏度, Pa·s
 φ ——等效体积球与实际颗粒表面积比值
 φ_c ——等效体积球截面积与实际颗粒在垂直来流方向投影面积比值

3.2 建立仿真模型及其参数确定

EDEM 采用表面网格来描述边界表面,从而实现与 CFD 流体网格边界表面元素点对点耦合。首先使用三维建模软件 Pro/E 建立气力输送装置实体模型,然后将 Pro/E 所产生的实体模型导入到 CFD 前处理软件 ICEM 中,对其进行网格划分后分别导入到 Fluent 和 EDEM 中。在 EDEM 中采用多球面聚合法建立单个秸秆颗粒模型,由 14 个直径为 11.2 mm 圆球相互重叠构造而成的秸秆离散元模

型,长度为 10 cm。研究中涉及到的离散元参数主要分为材料参数和接触参数两类,材料参数包括秸秆和气力输送装置的密度、泊松比和剪切模量等,接触参数包括秸秆-秸秆、秸秆-气力输送装置静、滚动摩擦因数和恢复系数等。其中秸秆密度通过测量获得。秸秆-气力输送装置的静、动摩擦因数通过标定得到。其他参数则采用文献[21-23]中的参数。如表 2 所示。

表 2 仿真参数
Tab. 2 Parameters used in simulation

参数	秸秆	气力输送装置
泊松比	0.4	0.3
剪切模量/Pa	1 × 10 ⁶	7.91 × 10 ¹⁰
密度/(g·cm ⁻³)	0.266 8	7.865
碰撞恢复系数(与秸秆)	0.15	0.30
静摩擦因数(与秸秆)	0.45	0.35
动摩擦因数(与秸秆)	0.02	0.01

EDEM 中颗粒工厂每秒生成 1.7 kg 的秸秆。机具工作时由螺旋输送装置将秸秆输送至风机,则秸秆的初速度由螺旋的结构及转速确定^[24]。

$$v_h = \frac{S n_l}{60} \frac{1 - \frac{f_g S}{2 \pi r_l}}{1 + \left(\frac{S}{2 \pi r_l} \right)^2} \quad (23)$$

- 式中 v_h ——秸秆初速度, m/s
 f_g ——秸秆与螺旋叶片间摩擦因数
 r_l ——螺旋半径, m

取螺距 S 为 0.2 m,螺旋转速 n_l 分别为 1 500、1 800、2 100 r/min,秸秆与叶片间的摩擦因数 f_g 为 0.12,螺旋半径 r_l 为 0.125 m。计算得秸秆初速度 v_h 分别为 4.09、4.56、5.17 m/s。气流入口边界条件设为速度入口,与秸秆的初速度相同,出口为 1 标准大气压。

3.3 计算结果分析

3.3.1 仿真结果与悬浮试验比较分析

为了验证 CFD-DEM 对秸秆在气流输送过程中仿真的可行性和秸秆模型在 EDEM 中参数的合理性,应用 CFD-DEM 计算秸秆的悬浮速度,并与试验结果进行比较。结果如表 3 所示。

由表 3 可知,仿真悬浮速度与试验悬浮速度误差小于 10%,说明秸秆参数设置合理,采用 CFD-DEM 模拟秸秆气固两相流计算结果可信。

3.3.2 颗粒在管道中的运动分析

在风机转速为 2 100 r/min,秸秆和气流以 5.17 m/s 初速度进入风机壳内时,对秸秆在气力输送装置内运动情况进行数值模拟。图 3a、3b 分别为

表 3 悬浮速度计算值与实测值比较

Tab.3 Comparison of measured and simulated suspension velocity

秸秆部位	试验悬浮速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	仿真悬浮速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	误差/ %
上部	10.4	11.1	6.7
中部	12.3	13.2	7.3
下部	12.7	13.6	7.1
平均值	11.9	12.6	7.0

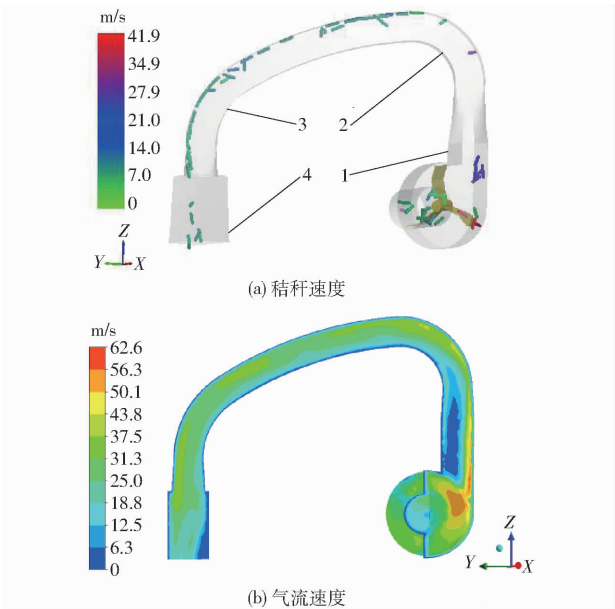


图 3 秸秆速度、气流速度分布图

Fig.3 Distribution diagrams of straw and air flow velocity

1. 风机壳出口 2. 拐点 1 3. 拐点 2 4. 卸料管道出口

仿真时间 $t = 1.2\text{ s}$ 时,气力输送装置内秸秆速度分布和气流场分布。0.3、0.45、0.6 s 时随机选取一个进入气力输送装置的秸秆,其速度随时间变化曲线如图 4 所示。

秸秆在给定初速度下,向风机壳内部运动,当秸秆进入风机壳的瞬间,受叶片和气流作用,其运动方向发生改变,速度会突然减小,然后逐渐增加到最

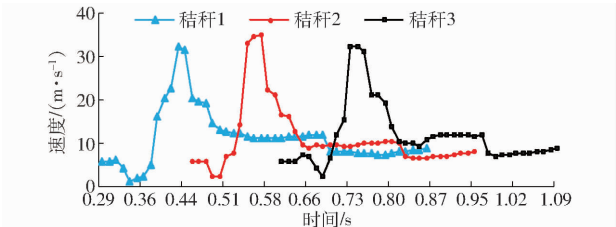


图 4 秸秆速度变化曲线

Fig.4 Changing curves of straw velocity

大。当其进入输送管道时,速度会逐渐减小,经过拐点 1 时速度会有较大的下降,在拐点 1 和拐点 2 中秸秆速度基本保持稳定。经过拐点 2 后速度再一次下降为进入输送管道后的最小速度。秸秆在拐点 2 和卸料管道出口间其运动方向和重力一致,使其速度会有小幅度的提升。从秸秆进入风机内部到被排入掩埋沟内需要 0.5 s 左右。将秸秆速度监测点设置在风机壳出口、拐点 1、拐点 2 和卸料管道出口处。

3.3.3 转速对秸秆输送的影响

根据 3.3.2 节,秸秆进入风机壳时在叶片和气流共同作用下,速度逐渐增加到最大值,而非气流单独作用,所以输送装置中加速压力损失小于计算值,即风机的实际转速也应小于计算值,叶轮实际转速应该不大于 2 100 r/min。以转速为 1 500、1 800、2 100 r/min 和 30° 叶片弯角进行仿真。3 种转速下 4 个区域的秸秆速度与气流速度见表 4。卸料管道将秸秆排出后直接送入掩埋沟内,气流和秸秆末速度不易过大,否则卸料管道出口气流会将秸秆吹出掩埋沟外,同时消耗功率。1 500、1 800 r/min 时秸秆和气流末速度较小,较为合适。为了保证秸秆输送的流畅性,秸秆在气力输送装置中应具有一定的速度,否则会导致管道堵塞。而 1 500 r/min 在拐点 2 处秸秆的速度仅为 3.65 m/s,当秸秆含水率或秸秆覆盖量较大时,可能会产生堵塞,综上所述,风机转速为 1 800 r/min 时秸秆和气流速度较为合适。

表 4 不同转速下的秸秆、气流速度

Tab.4 Straw and flow velocity at different fan speeds

转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	风机壳出口 秸秆速度	风机壳出口 气流速度	拐点 1 秸秆 速度	拐点 1 气流 速度	拐点 2 秸秆 速度	拐点 2 气流 速度	卸料管道出口 秸秆速度	卸料管道出口 气流速度
1 500	11.43	2 ~ 48	4.98	5 ~ 30	3.65	16 ~ 22	4.81	2 ~ 23
1 800	14.91	2 ~ 54	7.44	5 ~ 36	5.21	17 ~ 27	6.06	2 ~ 27
2 100	18.70	2 ~ 59	10.13	5 ~ 44	7.02	18 ~ 30	8.16	2 ~ 30

3.3.4 叶片弯角对秸秆输送的影响

叶片弯角会影响输送玉米秸秆初速度和风机排出物料能力。0°、30°、60° 弯角如图 5 所示。在上述流场中其他条件不变,以转速为 1 800 r/min 和 0°、30°、60° 弯角进行仿真,气力输送装置内 4 个监测点

的速度如表 5 所示。气力输送装置内秸秆数量如图 6 所示。根据表 5,0° 弯角时秸秆在各个监测点的速度最大,其次是 30° 和 60°,说明 0° 弯角时秸秆具有最大的输送速度。根据图 6,0° 弯角风机内的秸秆量最多,增幅也最大,说明秸秆随叶片转动的数

量最多。而 30°弯角和 60°弯角时风机内部秸秆数量相近。叶轮应尽快将秸秆送入输送管道减少秸秆在风机内部的停留时间,避免将上抛的秸秆带回风机,因此 0°弯角输送能力较差^[25]。0°弯角时因为秸秆随叶片运动时间长,秸秆得到充分加速致其输送速度最大,但是其输送能力较差,所以不能选择 0°弯角。30°弯角和 60°弯角时风机内秸秆数量相近,但 30°弯角时秸秆的输送速度更快,故应选择 30°弯角。

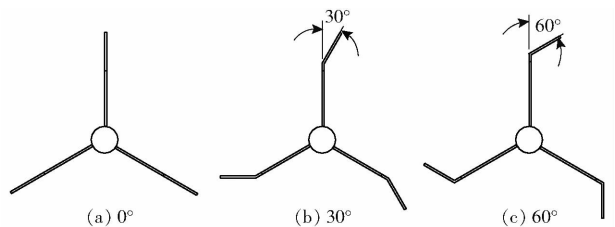


图 5 叶片弯角示意图
Fig. 5 Diagrams of blade bending angle

表 5 不同弯角下的秸秆速度

Tab. 5 Straw velocity at different blade bending angles				
弯角/(°)	风机壳出口	拐点 1	拐点 2	卸料管道出口
0	15.48	7.84	6.37	7.21
30	14.91	7.44	5.21	6.06
60	12.82	6.58	4.45	5.17

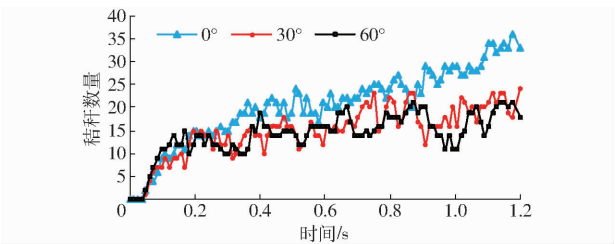


图 6 秸秆数量变化曲线
Fig. 6 Changing curves of straw numbers

4 田间试验

4.1 试验设备与方法

试验条件:田间试验在辽宁省铁岭市蔡牛镇张庄合作社进行,为春季玉米留茬地,留茬高度平均为 18 cm,玉米播种行距 58 cm,平均株距 35 cm。秸秆覆盖量平均为 1.3 kg/m²,土壤为棕壤土,含水率均值 17.5%。5 cm 深处土壤的平均含水率为 14.5%,土壤坚实度为 1 258 kPa;10 cm 深处土层土壤平均含水率为 16%,土壤坚实度为 1 294 kPa;20 cm 深处土壤平均含水率为 19.4%,土壤坚实度为 1 344 kPa;25 cm 深土壤平均含水率为 20%,土壤坚实度为 1 495 kPa;通过实地测量,土壤的内摩擦角为 36.90°。

试验主要仪器设备:东方红 LX1000 型拖拉机(100 kW);SM-2 型高精度土壤水分测量仪(澳作生态仪器有限公司),测量范围 0.05~0.6 m³/m³,0~40℃时精度为 0.05 m³/m³;SC900 型土壤紧实度测量仪(澳作生态仪器有限公司),量程 0~5 cm、0~7 000 kPa,最大加载 95 kg,分辨率 2.5 cm、35 kPa,质量 1.25 kg;皮尺、卷尺、直尺等。

试验方法:基于前述理论分析,叶片弯角和风机转速对输送装置的输送性能有较大影响,而秸秆覆盖量则直接影响风机的喂入量,所以试验的影响因素为叶片弯角、秸秆覆盖量和风机转速。因素水平值见表 6。田间秸秆覆盖量 1.2 kg/m²对应开沟宽度为 310 mm,1.4 kg/m²对应开沟宽度为 355 mm,1.6 kg/m²对应开沟宽度为 400 mm。试验指标为深埋合格率,指标越大越好。机具作业速度为 0.83 m/s。作业区域长 30 m、宽 1.8 m,将作业区域内的碎秸秆清理收集后,按试验所需的秸秆量将秸秆均匀铺撒在作业区域内,每组试验重复 3 次。将作业区域分为 5 个区,每个区域内随机选取 5 个点,以该点为中心画出 180 cm×60 cm 的矩形区域采集所需的试验数据。田间试验及作业效果如图 7 所示。

表 6 因素水平

Tab. 6 Factors and levels			
水平	因素		
	叶片弯角/ (°)	秸秆覆盖量/ (kg·m ⁻²)	风机转速/ (r·min ⁻¹)
1	0	1.2	1 500
2	30	1.4	1 800
3	60	1.6	2 100



图 7 田间试验及作业效果图
Fig. 7 Photos of field experiment and its operation effect

4.2 试验指标

该机具主要目的是将秸秆深埋,因此深埋合格率是该机具试验主要指标。其计算公式为

$$Y = \frac{m_1}{m_2} \times 100\%$$

(24)

式中 Y ——深埋合格率, %
 m_1 ——掩埋深度大于 20 cm 的秸秆质量, kg
 m_2 ——测试区域秸秆质量, kg

4.3 试验结果分析

试验方案和结果如表 7 所示(A 、 B 、 C 为因素水平值, E 为误差项), 试验结果方差分析如表 8 所示。

表 7 试验方案和结果
Tab.7 Test scheme and result

试验号	因素				深埋合格率 $Y/\%$
	A	B	C	E	
1	1	1	1	1	82.8
2	1	2	2	2	88.7
3	1	3	3	3	87.4
4	2	1	2	3	93.6
5	2	2	3	1	90.9
6	2	2	1	2	84.8
7	3	1	3	2	90.1
8	3	1	1	3	83.8
9	3	3	2	1	91.7
K_1	258.9	266.5	251.4	265.4	
K_2	269.3	263.4	274.0	263.6	
K_3	265.6	263.9	268.4	264.8	
极差 R_j	9.9	2.6	23.5	1.8	
较优方案	$A_2B_1C_2$				
主次顺序	C 、 A 、 B				

表 8 正交试验方差分析

Tab.8 Variance analysis result of orthogonal test

方差来源	偏差平方和	自由度	均方和	F	P	显著性
A	18.53	2	8.51	33.08	<0.05	**
B	1.85	2	0.63	3.30	<0.25	
C	92.3	2	44.63	164.9	<0.01	**
误差	0.56	2	0.36			
总和	114.77	8				

注: **表示差异高度显著($P < 0.01$)。

根据表 8 可知, 对深埋合格率影响因素的主次顺序为 C 、 A 、 B , 较优方案为 $A_2B_1C_2$ 。其中叶片弯角和风机转速对深埋合格率的影响较大。因为机具为全量秸秆还田, 秸秆覆盖量是不可控因素, 所以深埋合格率不应受到地表秸秆覆盖量的影响。本试验中秸秆覆盖量对试验结果影响显著性不明显, 符合机具的作业要求。

4.4 试验验证

在叶片弯角 30° 、转速 1 800 r/min、秸秆覆盖量分别为 1.2、1.4、1.6 kg/m² 条件下进行试验, 深埋合

格率为 93.2%。改进后的气力输送装置提高了深埋质量, 作业流畅, 解决了秸秆堵塞问题。试验结果满足行业技术要求, 能够实现秸秆深埋还田技术要求。相对于秸秆地表还田深度大, 更能够改善深层土壤结构剖面, 如图 8 所示, 对合理耕层构建有一定意义。

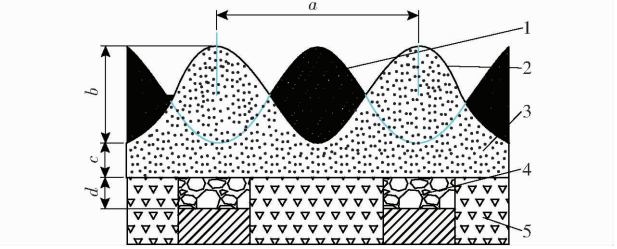


图 8 耕层结构剖面

Fig.8 Structural profile of construction of plough layer

1. 新垄 2. 原垄 3. 耕层 4. 犁底层 5. 秸秆层

5 结论

(1) 通过对气力输送装置结构设计, 得到主要结构参数为: 输送管截面为 0.2 m × 0.2 m (方形管); 叶轮直径为 0.55 m, 叶轮宽度为 0.17 m, 进气口直径为 0.26 m, 风机壳宽度为 0.2 m; 螺旋轴直径为 0.09 m, 螺旋叶片外径为 0.25 m, 螺距为 0.2 m, 螺旋叶片厚度为 0.003 m, 螺旋外径与输送管内表面间隙为 0.005 m。

(2) 通过玉米秸秆悬浮速度试验测得, 长度为 10 cm 玉米秸秆上、中、下部分的悬浮速度分别为 10.4、12.3、12.7 m/s, 平均值为 11.9 m/s, 试验结果与仿真误差为 7%。

(3) 通过 CFD-DEM 气固耦合方法建立秸秆离散元模型, 对不同叶片弯角和转速对比, 研究气力输送装置内气固两相流动。研究表明叶片弯角 30° 、转速为 1 800 r/min 时秸秆输送效果最佳。输送管道中秸秆最小速度为 5.21 m/s, 所对应的气流速度为 17 ~ 27 m/s; 出口处玉米秸秆速度为 6.06 m/s, 所对应的气流速度为 2 ~ 27 m/s。

(4) 田间试验结果表明, 机具作业速度为 0.83 m/s 时, 气力输送装置性能参数最优组合为叶片弯角 30° , 秸秆覆盖量 1.2 kg/m², 风机转速 1 800 r/min。在弯角 30° , 转速 1 800 r/min, 秸秆覆盖量分别为 1.2、1.4、1.6 kg/m² 条件进行验证试验, 深埋合格率为 93.2%。通过改进输送装置结构参数和风机转速可以有效提高深埋质量, 并解决秸秆堵塞问题。

参 考 文 献

1 王庆杰, 刘正道, 何进, 等. 砍切式玉米秸秆还田机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(2): 10-17.
WANG Qingjie, LIU Zhengdao, HE Jin, et al. Design and experiment of chopping-type maize straw returning machine[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(2): 10-17. (in Chinese)

- 2 吕秋立,林静,马铁,等. 辽西褐土区灭茬深松起垄联合作业机的设计[J]. 农机化研究,2018,40(3):74-78.
LÜ Qiuli, LIN Jing, MA Tie, et al. Design of stubble subsoiling ridge combined working machine in cinnamon soil zone of western [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(3):74-78. (in Chinese)
- 3 方会敏. 基于离散元法的秸秆-土壤-旋耕刀相互作用机理研究[D]. 南京:南京农业大学,2016.
FANG Huimin. Research on the straw-soil-rotary blade interaction using discrete element method[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- 4 陈黎卿,梁修天,曹成茂. 基于多体动力学的秸秆还田机虚拟仿真与功耗测试[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(3):106-111. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160315&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.015.
CHEN Liqing, LIANG Xiutian, CAO Chengmao. Virtual simulation and test of straw counters-field based on multi-body dynamics [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3):106-111. (in Chinese)
- 5 薄鸿明. 1GTJH-3 玉米条带秸秆混拌还田机的设计与试验研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2017.
BO Hongming. Research and design on soil disk corn stubble cutting characteristics testing device[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- 6 张久明,迟凤琴,宿庆瑞,等. 不同耕作方式对瘠薄型黑土区土壤结构的影响[J]. 玉米科学,2013,21(5):104-108.
ZHANG Jiuming, CHI Fengqin, SU Qingrui, et al. Influence of different tillage modes on the structure of dystrophic[J]. Journal of Maize Sciences, 2013, 21(5):104-108. (in Chinese)
- 7 白伟,孙占祥,郑家明,等. 耕层构造对春玉米产量形成及生长发育特征的影响[J]. 华北农学报,2015,30(5):205-213.
BAI Wei, SUN Zhanxiang, ZHENG Jiaming, et al. Effect of plough layer constructions on maize growth and yield in western Liaoning Province[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2015, 30(5):205-213. (in Chinese)
- 8 宫亮,邢月华,刘艳,等. 棕壤土合理耕层标准调查研究[J]. 玉米科学,2016,24(5):94-99,104.
GONG Liang, XING Yuehua, LIU Yan, et al. Investigation on standards of the rational plough layer of brow soil[J]. Journal of Maize Sciences, 2016, 24(5):94-99, 104. (in Chinese)
- 9 路怡青,朱安宁,张佳宝,等. 免耕和秸秆还田对土壤酶活性和微生物群落的影响[J]. 土壤通报,2014,45(1):85-90.
LU Yiqing, ZHU Anning, ZHANG Jiabao, et al. Effects of no-tillage and returning straw to soil on soil enzymatic activities and microbial population[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45(1):85-90. (in Chinese)
- 10 王学农,李从权,史建新,等. 抛送式秸秆粉碎还田机风场模拟[J]. 农业机械学报,2007,38(8):67-69.
WANG Xuenong, LI Congquan, SHI Jianxin, et al. Research on simulating the wind field of the field straw chopper with throwing cotton stalk[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(8):67-69. (in Chinese)
- 11 翟之平,杨忠义,高博,等. 基于 Mixture 模型的叶片式抛送装置内气固两相流模拟[J]. 农业工程学报,2013,29(22):50-58.
ZHAI Zhiping, YANG Zhongyi, GAO Bo, et al. Simulation of solid-gas two-phase flow in an impeller blower based on Mixture model[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(22):50-58. (in Chinese)
- 12 宋学锋,戴飞,张雪坤,等. 基于 CFD-DEM 耦合的揉丝机排料装置内物料运动模拟与试验[J]. 中国农业大学学报,2017,22(5):99-107.
SONG Xuefeng, DAI Fei, ZHANG Xuekun, et al. Numerical simulation and experiment of materials movement based on CFD-DEM coupling method in the discharging device of kneading machine[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(5):99-107. (in Chinese)
- 13 吴峰,徐弘博,顾峰玮,等. 秸秆粉碎后抛式多功能免耕播种机秸秆输送装置改进[J]. 农业工程学报,2017,33(24):18-26.
WU Feng, XU Hongbo, GU Fengwei, et al. Improvement of straw transport device for straw-smashing back-throwing type multi-function no-tillage planter[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(24):18-26. (in Chinese)
- 14 林静,马铁,李宝筏. 1JHL-2 型秸秆深埋还田机设计[J]. 农业工程学报,2017,33(20):32-40.
LIN Jing, MA Tie, LI Baofa. Design of 1JHL-2 type straw deep bury and returning machine[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(20):32-40. (in Chinese)
- 15 杨伦,谢一华. 气力输送工程[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
- 16 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册:下册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007.
- 17 中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业年鉴 2014[M]. 北京:中国农业出版社,2015.
- 18 UCGUL M, JOHN M F, CHRIS S. Three dimensional discrete element modeling (DEM) of tillage: accounting for soil cohesion and adhesion[J]. Biosystem Engineering, 2015, 129:298-306.
- 19 FENG Y Q, YU A B. Assessment of model formulations in the discrete particle simulation of gas-solid flow[J]. Industrial and Engineering Chemistry, 2004, 43(26):8378-8390.
- 20 FELICE R D. The voidage function for fluid-particle interaction systems[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1994, 20(1):153-159.
- 21 UCGUL M, JOHN M F, CHRIS S. Three dimensional discrete element modeling of tillage: determination of a suitable contact model and parameters for a cohesionless soil[J]. Biosystems Engineering, 2014, 121:105-117.
- 22 LENAERTS B, AERTSEN T, TIJSKENS E, et al. Simulation of grain-straw separation by discrete element modeling with bendable straw particles[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 101:24-33.
- 23 KORN L T, ISTV N J J, ABDUL M M. Modelling soil-sweep interaction with discrete element method[J]. Soil & Tillage Research, 2013, 134:223-231.
- 24 向冬枝,徐余伟. 螺旋输送机设计参数的选择和确定[J]. 水泥技术,2010(1):29-33.
- 25 马玉娥. 风机参数化设计数据库系统的研制与开发[D]. 西安:西北工业大学,2002.
MA Yu'e. Research and development of database system for fan parametric design[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2002. (in Chinese)