doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.S1.004

秸秆粉碎集中全量深埋还田机设计与试验

袁兴茂[1,2]　李霄鹤[1]　焦海涛[1]　周顺利[3]　张俊杰[1]　吴海岩[1]

(1.河北省农业机械化研究所有限公司,石家庄 050051;2.农田环境修复河北省工程研究中心,石家庄 050051;
3.中国农业大学农学院,北京 100091)

摘要:针对我国玉米秸秆量大,生产应用的还田机具还田深度浅,存在影响后续播种、出苗质量、病虫害发生率高和深层土壤"碳饥饿"等问题,设计了一种秸秆粉碎集中全量深埋还田机,可一次完成秸秆捡拾、粉碎、输送、深松开沟、集中遁注掩埋和碎土镇压等作业,在有效减少土壤扰动下能够将多行站立或粉碎后秸秆集中埋入地表下一条深 380~400 mm 的沟内。阐述了秸秆粉碎集中全量深埋还田机整机结构及工作原理,对秸秆螺旋输送装置、抛压风机、深松开沟遁注装置和传动系统等关键部件进行了设计与计算,初步确定了螺旋输送装置与抛压风机转速、风机出料口尺寸和遁注体截面形状参数,并对抛压风机与遁注体腔体内部进行了流场模拟分析与验证。按照设计要求对秸秆粉碎集中全量深埋还田机进行了试制,并进行了机具性能与大田定位试验,结果表明:在作业速度 3 km/h 时,秸秆捡拾率为 90.8%,开沟深度与秸秆掩埋深度均值分别为 394 mm 与 200 mm,开沟深度与秸秆掩埋深度稳定性系数分别为 97.4% 和 92.5%,各项指标与设计值相符,且满足农艺要求。同时大田定位试验结果表明,秸秆集中深还田与传统还田相比,0~200 cm 土壤贮水量提高 29 mm,20~40 cm 土层有机碳、全氮和速效磷养分含量分别增加 7.14 g/kg、0.59 g/kg、1.53 mg/kg,有效增加了土壤养分含量,提高了深层土壤肥力与贮水能力。

关键词:秸秆;集中输送;全量深埋还田机;田间试验

中图分类号:X713;S224.4　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2023)S1-0027-09

Design and Experiment of Straw Chopping Centralized Full Depth and Returning Machine

YUAN Xingmao[1,2]　LI Xiaohe[1]　JIAO Haitao[1]　ZHOU Shunli[3]　ZHANG Junjie[1]　WU Haiyan[1]

(1. *Hebei Agricultural Mechanization Research Institute Co., Ltd.*, *Shijiazhuang* 050051, *China*
2. *Farmland Environmental Restoration of Hebei Engineering Research Center*, *Shijiazhuang* 050051, *China*
3. *College of Agriculture*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100091, *China*)

Abstract: In order to solve the problems of large quantity of corn stover and insufficient depth of returning machine and tools used in production in China, which affected subsequent sowing, emergence quality, high incidence of diseases and insect pests, and "carbon hunger" in deep soil, a kind of straw crushing centralized and full deep returning machine was designed. The machine can complete the operations of picking up, crushing, conveying, deep loosening of trenches, centralized escape and injection burying and crushing of crushed soil at one time. Under the effective reduction of soil disturbance, multiple rows of standing or crushed straw can be buried in a trench with depth of 380~400 mm below the surface. The overall structure and working principle of the straw crushing and centralized full quantity deep return machine were described, and key components such as the straw screw conveyor, the straw discharge fan, the deep loosening and trenching device, and the transmission device were designed and calculated. The rotational speed of the screw conveyor and the straw discharge fan, the size of the discharge port of the straw discharge fan, and the cross-sectional shape parameters of the injection device were preliminarily determined. The flow field inside the straw exhaust fan and the

收稿日期:2023-05-20　修回日期:2023-09-01

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD1500500-3)、河北省农林科学院科技创新专项(2022KJCXZX-NJS-3)和河北省重大科技成果转化专项(19057316Z)

作者简介:袁兴茂(1985—),男,副研究员,主要从事农业废弃物资源化利用技术与装备研究,E-mail:hsyuanxingmao@163.com

通信作者:吴海岩(1981—),女,副研究员,主要从事农业生产机械化自动化装备研究,E-mail:564810768@qq.com

injection chamber was simulated, analyzed and verified. According to the design requirements, the straw chopping centralized full depth return machine was trial-manufactured, and the machine performance and field positioning test were carried out. The results showed that at operation speed of 3 km/h, the straw stalk collecting rate was 90.8%, trenching depth and average straw buried depth was 394 mm and 200 mm, respectively, trenching depth and straw burying depth stability coefficient were 97.4% and 92.5%, respectively, the indicators were in conformity with design value, and satisfied the agricultural requirements. At the same time, the results of field positioning test showed that compared with traditional field, the water storage of 0 ~ 200 cm soil was increased by 29 mm, and the contents of organic carbon, total nitrogen and available phosphorus in 20 ~ 40 cm soil layer was increased by 7.14 g/kg, 0.59 g/kg and 1.53 mg/kg, respectively. The soil nutrient content and soil fertility and water storage capacity were increased effectively. The method results can provide a scheme and technical reference for the promotion of the technical model of centralized deep returning of straw to the field.

Key words: straw; centralized transportation; full depth buried field return machine; field experiment

0 引言

我国农作物秸秆资源量大面广,据农业农村部统计,2020 年全国秸秆资源总量约 8.56×10^8 t,约占全世界秸秆总量的 30%,位列世界之首,秸秆以水稻、小麦和玉米等为主,其中玉米秸秆总产量约为 2.46×10^8 t[1-4]。目前,我国玉米秸秆资源利用方式主要有秸秆还田、饲料化和工业化 3 种方式,其中秸秆机械化粉碎还田具有增加土壤有机质含量,改善土壤结构,减少化肥用量,提升土壤蓄水保墒能力等优势,是目前应用最广泛最快捷的大批量处理剩余秸秆的有效方式[5-12]。当前我国生产中应用的浅旋碎混、覆盖还田和深翻还田等秸秆还田方式,因玉米秸秆还田量大,表层秸秆含量过多,存在影响后续播种和出苗质量、易发病虫害和深层土壤“碳饥饿”等问题[13-14]。

目前国内已有学者对秸秆还田新型作业模式和机具开展相关研究,提出了“秸秆深埋还田”的作业模式,窦森[15-16]提出一种秸秆“富集深还”的轮作技术模式,在条带轮耕深松土壤的同时将秸秆富集深埋于指定条带的土壤亚表层。郑智旗等[17-18]设计的一种秸秆捡拾粉碎掩埋复式还田机可实现一次性完成秸秆捡拾、粉碎、输送和开沟掩埋等作业。王金峰等[19-20]设计了一种水稻秸秆全量深埋还田机,解决了水稻秸秆全量深埋还田机作业时刀辊缠草及前方壅土等问题。陈桂斌等[21]对秸秆条带捡拾粉碎深埋装置进行了设计研究,确定了粉碎刀结构、排列方式和输送器转速等关键参数。王瑞丽等[22]设计了一种秸秆直注深埋还田机,可将地表秸秆埋至地下 300 mm 土层中,满足打破犁底层和提高秸秆利用率的要求。林静等[23-24]研制了一种气力式秸秆深埋还田机,对该机螺旋开沟装置进行了优化设计,有效地降低粘土堵塞及阻力大等问题。上述研究为秸秆深埋提供了一定的理论和技术支撑。

为解决我国玉米秸秆量大,生产应用的还田机具还田深度浅,影响下茬播种和出苗质量、病虫害发生率高和深层土壤“碳饥饿”等问题,结合农艺要求,从提高秸秆还田质量、增加土壤有机质和培肥地力的角度出发,设计一种秸秆粉碎集中全量深还机,一次完成秸秆捡拾粉碎、输送、深松开沟和集中掩埋等作业,在有效减少土壤扰动下将多行站立或粉碎后秸秆集中埋入地表下深度为 400 mm 的一条沟内。

1 整机结构与工作原理

1.1 农艺设计要求

秸秆粉碎集中全量深还田是在减少耕作层土壤扰动要求下,第 1 年从种植区域一端起,将多行站立或粉碎后秸秆进行收集粉碎,集中埋入地表下深度 H 为 380 ~ 400 mm 的土壤亚表层一条沟内,并进行覆土镇压,秸秆覆土厚度 $h\geqslant180$ mm,次年错行依次深还,起始端单行玉米秸秆单独深还,当年小麦及次年玉米种植正常种植,无需避开秸秆还田层,还田模式如图 1 所示。

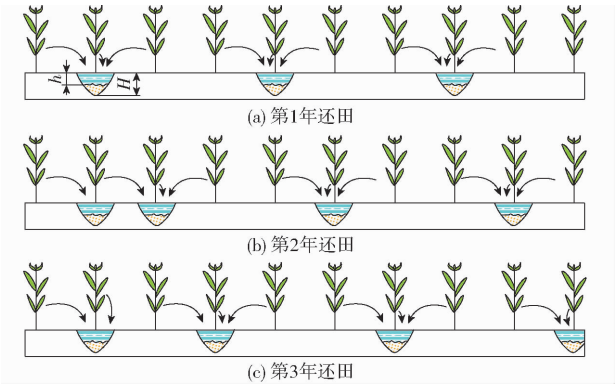


图 1 秸秆粉碎集中全量深还田示意图

Fig. 1 Structure sketches of chopping centralized and full deep returning of straw to field

1.2　机具工作原理

结合农艺要求，为实现秸秆集中全量深还田，机具采用三点悬挂与拖拉机联接进行作业的方式，其主要结构如图 2 所示，主要由三点悬挂装置、调节轮、机架、变速传动系统、液压升降装置、捡拾粉碎机构、秸秆导流机构、螺旋集中输送装置、抛压风机、深松开沟装置、覆土装置、碎土镇压装置等组成。

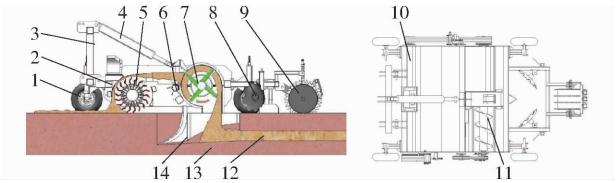


图 2　秸秆粉碎集中全量深埋还田机结构示意图

Fig. 2　Structure sketches of straw chopping centralized full depth and returning machine

1. 调节轮　2. 机架　3. 悬挂装置　4. 液压升降装置　5. 捡拾粉碎机构　6. 秸秆导流机构　7. 抛压风机　8. 覆土装置　9. 碎土镇压装置　10. 变速传动系统　11. 螺旋集中输送装置　12. 秸秆　13. 土壤　14. 深松开沟遁注装置

如图 2 所示，秸秆粉碎集中全量深埋还田机作业时，变速传动系统将拖拉机输出动力经变速后传递至秸秆捡拾粉碎机构、螺旋集中输送装置及秸秆导流机构，秸秆捡拾粉碎机构的捡拾粉碎刀轴做高速回转运动将地表秸秆和残茬进行捡拾粉碎处理，并把秸秆向后抛送经秸秆导流机构至螺旋集中输送装置内，此外秸秆导流机构除对秸秆进行导流外，还有防止秸秆脱落作用，秸秆在螺旋集中输送装置的推运作用下被输送至抛压风机内，通过风机叶片高速旋转及正压气流作用下，秸秆进入深松开沟遁注装置注入口向下运动，深松开沟遁注装置随着拖拉机行进开出预埋秸秆的深沟，向下运动的秸秆通过遁注体空腔进入到开好的沟中，完成秸秆抛送及压实。深松开沟遁注装置前端深松铲在开沟前对土进行深松易于减小开沟阻力，此外深松开沟遁注装置两侧土壤沿两异形板迅速回填，再经覆土装置二次覆土及碎土镇压装置碎土镇压后，完成秸秆粉碎集中全量深还作业。秸秆粉碎集中全量深埋还田机主要设计参数如表 1 所示。

2　关键部件设计

2.1　传动系统设计

秸秆粉碎集中全量深埋还田机传动分两路进行，即秸秆捡拾粉碎机构传动与集中导流输送传动。拖拉机动力输出轴将动力传递给变速箱，一路经皮带传动将动力传递给捡拾粉碎机构，另一路经皮带传动传递给螺旋集中输送装置，同时经螺旋集中输送装置传递至秸秆导流装置，如图 3 所示。

表 1　秸秆粉碎集中全量深埋还田机主要设计参数

Tab. 1　Design parameters of straw chopping centralized full depth and returning machine

参数	数值
外形尺寸(长 × 宽 × 高)/(mm × mm × mm)	3 680 × 2 780 × 1 800
工作幅宽/mm	2 200
整机质量/kg	2 000
适应行数	3、4
开沟深度/mm	380 ~ 400
秸秆掩埋深度/mm	≥180
工作速度/(km·h^{-1})	3
配套动力/kW	≥110
秸秆捡拾率/%	≥90
开沟深度稳定性系数/%	≥90
秸秆掩埋深度稳定性系数/%	≥90

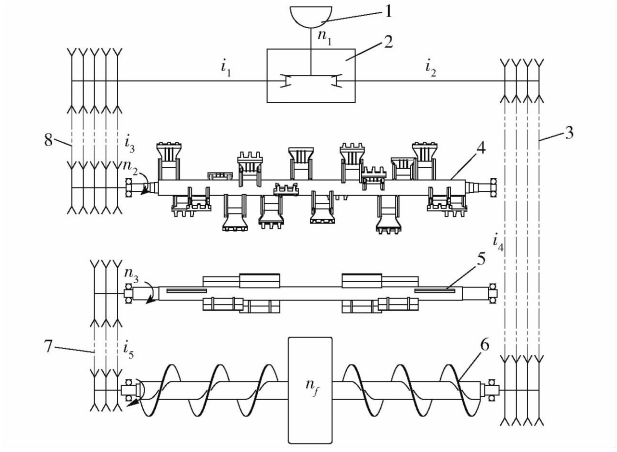


图 3　秸秆粉碎集中全量深埋还田机传动系统示意图

Fig. 3　Transmission sketch of straw chopping centralized full depth and returning machine

1. 拖拉机动力输出轴　2. 变速箱　3、7、8. 传动带　4. 捡拾粉碎轴　5. 秸秆导流轴　6. 螺旋集中输送装置

2.2　螺旋输送装置设计

物料螺旋输送装置主要由输送轴、左右螺旋叶片、抛压风机及壳体等组成，其中抛压风机主要由叶片、物料室组成，叶片与输送轴同轴居中布置，如图 4 所示。输送器将粉碎后的秸秆从两侧向中间聚拢并输送至抛压风机，秸秆在叶片高速旋转吸压下抛入遁注体内。

为了避免秸秆在输送过程中发生堵塞现象，设计输送器的排料能力大于秸秆输送能力，秸秆输送能力大于喂入量。东北地区及黄淮海麦玉区玉米秸秆量为 5.86 ~ 11.25 t/hm^2，按照工作幅宽 2.2 m，前进速度 3 km/h，所有秸秆全部喂入计算，还田机的喂入量为 7.43 t/h，秸秆从输送轴两侧向中间聚拢，单侧输送装置喂入量 $q = 3.72$ t/h。喂入量与输送器螺旋叶片直径、螺距的关系式为[25]

$$Q = 47D^2\varphi sn\gamma C \geq q \tag{1}$$

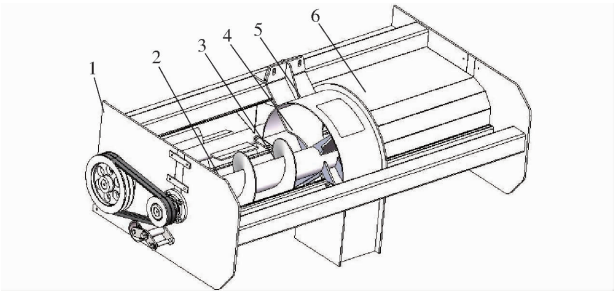


图 4 螺旋输送装置结构图

Fig. 4 Structural diagram of screw conveyer

1. 侧板 2. 输送轴 3. 螺旋叶片 4. 风机叶片 5. 风机壳体 6. 护罩

式中 Q——喂入量,t/h

D——螺旋叶片外直径,m

φ——填充系数

s——螺距,m

n——输送器主轴转速,r/min

γ——秸秆单位容积质量,t/m^3

C——倾料输送修正系数

因此输送轴转速为

$$n \geqslant \frac{q}{47D^2\varphi s\gamma C} \tag{2}$$

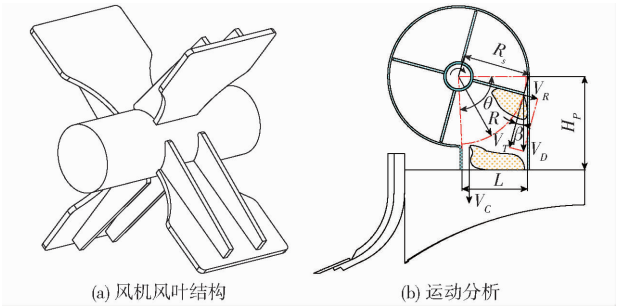
粉碎秸秆为散状物料,秸秆堆积密度为 0.05 t/m^3,玉米秸秆为散料,填充系数 φ 较小,取值为 0.2[18,26],本设计为水平输送,倾斜输送修正系数 C 取 1。本机设计的螺旋叶片直径为 300 mm,螺距 250 mm,计算得秸秆螺旋输送轴转速最小值为 352 r/min 时,粉碎秸秆基本不发生堵塞。

2.3 抛压风机

抛压风机利用风机叶片将粉碎后的秸秆抛送至深松开沟通注装置所开沟中,风机叶片在做回转运动时形成正压气流,气流能够在螺旋输送器输送秸秆时起到一定的抽吸作用,同时在秸秆运动速度减小的过程中起到一定的吹送及秸秆进入沟内后的压实作用。当抛压风机叶片绕轴做高速旋转运动时,叶片将切碎的秸秆以一定速度进行抛掷,对秸秆抛掷过程进行分析可知,首先是使秸秆有一切线方向的速度 V_T,当叶片旋转至排出口一侧水平方向开始,切碎秸秆将有一径向速度 V_R,根据速度的矢量合成关系可知,切碎秸秆最后以初始速度 V_D 被排出,风机叶片结构与秸秆的运动分析如图 5 所示。

设点 L 为抛送叶片上的任一点,则秸秆被抛掷时的初速度 V_D、切线方向的速度 V_T 及排出速度 V_C 关系式为

$$V_T = \frac{\pi n_f R_s}{30} \tag{3}$$



(a) 风机风叶结构 (b) 运动分析

图 5 风机中秸秆抛送分析

Fig. 5 Analysis of straw throwing in fan

$$V_D = \frac{V_T}{\cos\beta} \tag{4}$$

$$\tan\beta = \frac{\sinh\theta}{\cosh\theta} \tag{5}$$

$$\frac{1}{2}mV_D^2 + mgH_P = mg\mu H_P + \frac{1}{2}mV_C^2 \tag{6}$$

式中 β——秸秆排出速度与切向速度夹角,rad

θ——排料口出口角,rad

n_f——抛压风机轴转速,r/min

H_P——秸秆抛送高度,m

μ——秸秆在抛送过程中与管壁碰撞及各组分之间相互碰撞造成的能量损失系数,取 0.82

R_s——叶片上的任一点与轴心距离,m

由式(3)~(6)可得

$$n_f = \frac{30\cos\beta}{\pi R_s}\sqrt{V_C^2 + 2gH_P(\mu - 1)} \tag{7}$$

为使粉碎秸秆顺利离开风机进入沟内并对秸秆产生一定压实作用,经测算其抛出速度应为 5~7 m/s,取 V_C 为 7 m/s,以抛送叶片中部位置来计,R_s 为 0.14 m,H_P 为 0.4 m,θ 为 1.5 rad,由式(6)求得抛压风机叶片转速 n_f 为 349 r/min。通过计算可知风机叶片与秸秆螺旋输送轴转速相差不大,因此将抛压风机与秸秆螺旋输送装置同轴设计,初步设计转速为 400 r/min。

抛压风机出口面积如果过小,在相同的生产条件下,物料间的摩擦损失会加大,物料与内壁之间的摩擦损失也随之增大,为保证秸秆顺利排出,在抛压风机出口处不发生堵塞,单位时间内排草口排出秸秆的体积应大于喂入风机两侧喂入量,则

$$3\,600V_C S\gamma\tau \geqslant 2q \tag{8}$$

其中

$$S = LW \tag{9}$$

式中 S——抛压风机出口面积,m^2

τ——抛压风机秸秆通道充满系数

L——排出口纵向长度,m

W——排出口横向长度,m

玉米秸秆为长杆状颗粒且体积较大,充满系数 τ

取 0.1。由式(8)得抛压风机出口面积 $S \geqslant 0.06\ m^2$，因此将抛压风机出口截面纵向和横向尺寸设计为 240 mm 与 260 mm，叶片数为 4。

2.4　深松开沟遁注装置

深松开沟遁注装置作为秸秆粉碎集中全量深埋还田机的关键零部件之一，开沟作业效果直接影响秸秆深埋质量。如图 6 所示，深松开沟遁注装置主要由深松铲、连接板、遁注体及防溅板组成，遁注体前端高度 H_C 为 400 mm，后端高度 H_D 为 175 mm，入土角 α 为 7°。深松开沟遁注装置前端深松铲在开沟前对土壤进行深松，达到减小开沟阻力的目的，遁注体将抛压风机输送的秸秆通过其腔体进入到开好的沟中，同时沟体两侧土壤能迅速回填至沟内。为达到开沟注入秸秆与回土同步进行，回土时间应尽量缩短，因此将遁注体外轮廓设计为鱼体流线型，其横向截面为两个对称的半弓形，如图 7 所示。

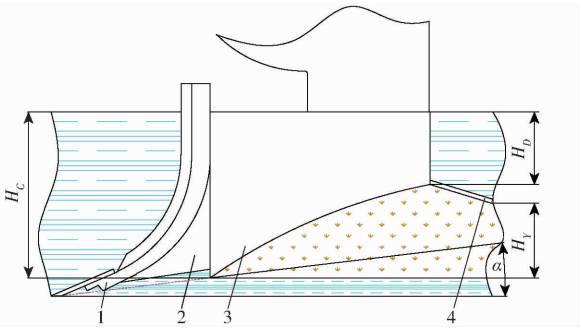


图 6　深松开沟遁注装置结构示意图

Fig. 6　Deep release ditch injection device

1. 深松铲　2. 连接板　3. 遁注体　4. 防溅板

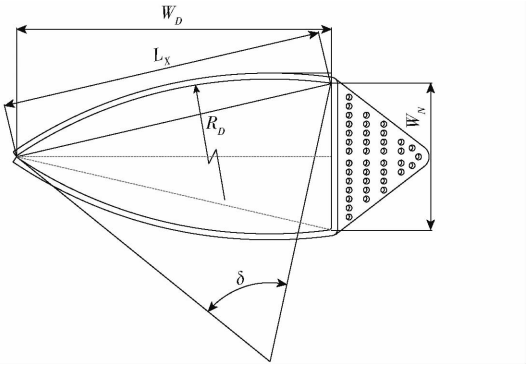


图 7　遁注体截面图

Fig. 7　Cross-section of the injection device

由于玉米秸秆松散、密度低、体积大，同时夹杂部分尘土，在深埋过程中需对沟中秸秆进行压实及防溅处理，为此在遁注体后下端设计了通风防溅板，在解决通风的同时可以防止秸秆及尘土飞溅造成环境污染，还可以对沟内秸秆进行二次压实，提升秸秆掩埋效果，防溅板后端底部距遁注体尖部 H_Y 为 180 mm。

遁注体截面积计算公式为

$$S_S = 2\left(\frac{\delta\pi R_D^2}{360} - R_D^2 \sin\frac{\delta}{2}\cos\frac{\delta}{2}\right) + \frac{1}{2}W_N W_D \tag{10}$$

式中　S_S——遁注体截面积，m^2

R_D——扇形半径，m

δ——圆心角，(°)

W_D——遁注体内腔横向长度，m

W_N——遁注体后端纵向长度，m

抛压风机出口与遁注体开口刚性连接，为与抛压风机出口相匹配，将 W_N 设计为 0.24 m，W_D 设计为 0.52 m，圆心角 δ 设计为 42°，计算得扇形半径 R_D 为 0.74 m，遁注体截面积 S_S 为 0.1 m^2，满足排料要求。

2.5　抛压风机与遁注装置流场模拟

抛压风机腔体内含料(碎秸秆)气流的运动形式复杂，为气-固两相湍流运动，直接分析秸秆的运动形式难度较大。抛压风机腔内含料气流随风机轴及叶片的转动而运动，可利用流体分析软件对风机与遁注体腔内的气相流场进行数值模拟，通过分析腔内气相流场的特点可间接得到秸秆的运动状态。按照 2.2 节与 2.3 节计算结果，对抛压风机与遁注装置进行了三维建模，并利用流体力学分析软件 SolidWorks Flow Simulation 对排秸风机与遁注体腔内的气流流场特性进行三维数值模拟。流动介质为空气，温度 25℃，风机轴转速分别为 400 r/min 和 600 r/min，抛压风机两侧秸秆入口速度作为入口边界条件，不同转速下入口速度分别为 1.3 m/s 和 2.0 m/s，防溅板出口压力作为出口边界条件，将标准大气条件作为出口压力边界值，网格划分选择手动划分，X、Y、Z 方向网格大小设置为 0.04 m，跨通道网格特征数为 5，通道细化级别为 2 级，模拟结果如图 8、9 所示。

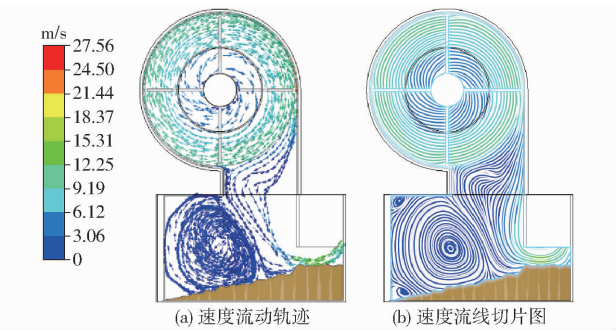
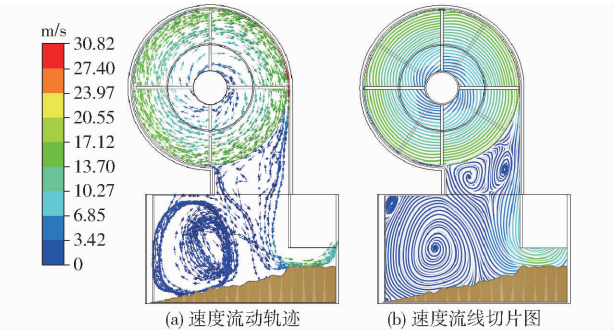


图 8　风机转速为 400 r/min 时流体模拟仿真

Fig. 8　Fluid simulation with fan speed of 400 r/min

由图 8 可以看出，当空气进入风机腔后在风机轴的高速旋转作用下开始围绕着风机轴和叶片旋转并形成高速气流，气流沿风机轴及壳体旋转至风机壳体水平与垂直位置交合处时，形成向下的高速气



(a) 速度流动轨迹 (b) 速度流线切片图

图 9 转速为 600 r/min 时流体模拟仿真

Fig. 9 Fluid simulation with fan speed of 600 r/min

流,且速度达到最大值,随后大部分气流沿风机轴切线方向经风机出口进入遁注体腔内,并在下部土壤的阻碍下发生涡旋,涡旋较为均匀,少数气流沿风机出口竖板经土壤与防溅板间间隙流出腔体外部。图 9 风机轴转速为 600 r/min 工况时风机与遁注体腔内速度流线分布与图 8 相对比看出,风机腔内气流速度最高值出现位置基本相同,且高速气流明显增多,在风机出口右下部出现 2 个微漩涡,遁注体腔体前部出现环形漩涡,漩涡不均匀且有中空部位,同时沿风机出口竖板经土壤与防溅板间间隙流出的气流明显增多,且遁注体腔内前端出现部分气流倒吸现象,加大了土壤与防溅板间间隙的气流量。通过对比图 8 与图 9,同时考虑到高转速对螺旋推送器推送效率的影响,将风机轴设计为 400 r/min,并在遁注体后端设计泄压孔,有利于秸秆输送。

2.6 传动参数设计

根据传动系统设计方案与传动比计算公式

$$\begin{cases} i = i_1 i_3 \dfrac{n_1}{n_2} \\ i_s = i_2 i_4 \dfrac{n_1}{n_f} \\ i_d = i_2 i_4 i_5 \dfrac{n_1}{n_3} \end{cases} \tag{11}$$

式中 i——秸秆捡拾粉碎机构总传动比

i_s——秸秆螺旋集中输送总传动比

i_d——秸秆导流装置总传动比

综合各关键部件速度要求、功率消耗及拖拉机后输出转速标准等因素,拖拉机动力输出轴转速取 760 r/min,捡拾粉碎轴转速为 2 200 r/min,即 n_1 = 760 r/min,n_2 = 2 200 r/min。根据 2.1 节和 2.2 节可知 n_f = 400 r/min,取秸秆导流轴转速 n_3 为 275 r/min,代入式(11)可得:i = 0.345,i_s = 1.9,i_d = 2.76。

传动比的合理分配尤为重要,综合考虑机具整体结构、传动系统轮廓尺寸、摩擦、平衡、润滑、作业环境等因素,传动比设计为 i_1 = i_2 = 0.46、i_3 = 0.75、i_4 = 4.13、i_5 = 1.45。

3 田间试验

按照设计方案研制了秸秆粉碎集中全量深埋还田机,如图 10 所示,并进行了田间试验。试验以开沟深度、开沟深度稳定性系数、秸秆掩埋深度、秸秆掩埋深度稳定性系数和秸秆捡拾率为主要指标,同时对秸秆深埋还田与传统还田不同作业方式下土壤贮水能力与土壤有机质含量变化进行了对比试验,对秸秆粉碎集中全量深埋还田机作业性能以及采用秸秆深还作业方式下土壤改良效果进行综合评价。



图 10 机具实物图

Fig. 10 Photos of machine

3.1 试验条件与方法

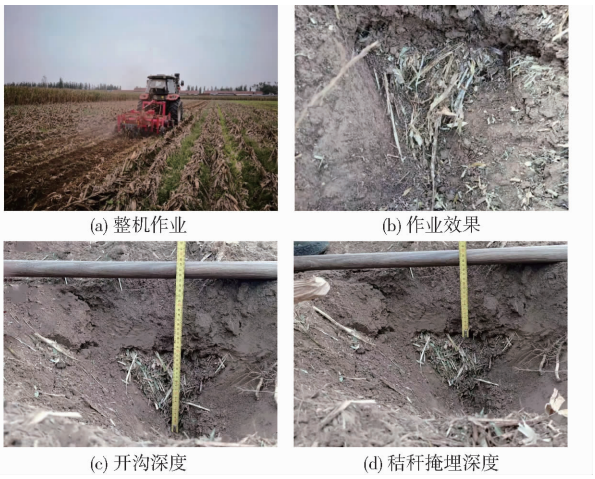
田间试验在中国农业大学吴桥实验站实验基地进行,为玉米联合收获后未粉碎的秸秆地,试验地长度为 100 m,宽度为 80 m。玉米秸秆量为 9 750 kg/hm^2,秸秆含水率 20.18%,土壤类型为轻土壤,0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm、20 ~ 30 cm 和 30 ~ 40 cm 深度处土壤的含水率分别为 24.38%、22.16%、18.57% 和 15.32%,土壤紧实度分别为 0.87、2.86、3.73、4.52 MPa。试验设备主要包括东方红 LX1504 型拖拉机、钢卷尺、钢板尺、电子秒表、电热恒温干燥箱、电子天平等。试验方法及指标参照国家标准 GB/T 24675.6—2009《保护性耕作机械 秸秆粉碎还田机》和行业标准 NY/T 740—2003《田间开沟机械作业质量》进行。试验时拖拉机作业速度为 3 km/h,实际作业距离为 50 m,每组分别进行 5 次重复。作业效果如图 11 所示。

(1)秸秆捡拾率

将联合收获后未粉碎玉米秸秆进行收集,按秸秆量 9 750 kg/hm^2 布置 5 个长 10 m、宽 2.2 m 的测试区,并把周围的秸秆及杂物清理干净,记录每个测试区秸秆质量。机具在测试区完成作业后,将每个测试区内剩余秸秆进行收集并称量记录,分别计算秸秆捡拾率,并求出 5 个测试区的平均值,秸秆捡拾率公式为

$$Y_j = \frac{X - X_0}{X} \times 100\% \tag{12}$$

式中 Y_j——秸秆捡拾率,%



(a) 整机作业　(b) 作业效果　(c) 开沟深度　(d) 秸秆掩埋深度

图 11　作业效果图

Fig. 11　Machine operation effects

X——作业前测量点秸秆覆盖量，g

X_0——作业后测量点秸秆剩余量，g

(2)开沟与秸秆掩埋深度

在不同作业行程内，选取 5 条不同机具稳定作业后的秸秆深埋沟，并在每条深埋沟等间距选取 5 个点作为测量点，共测点 25 处。用铁锹挖取沟形截面，测试前清除沟底及滑落到沟壁上的土块及杂物，用卷尺及钢板尺分别测出深埋沟截面的开沟深度和秸秆掩埋深度，并记录数据。根据测得的数据，分别计算各指标的平均值及稳定性系数。

(3)机具工作稳定性

机具在按规定的作业速度前进时，观察机具在连续正常作业过程中各部件运转是否稳定，记录试验过程中机具发生故障部位及堵塞的次数。

3.2　试验结果与分析

试验完成后，按照所述试验方法分别对秸秆捡拾率、开沟深度、秸秆掩埋深度、开沟深度稳定性系数和秸秆掩埋深度稳定性系数进行了测试计算，结果如表 2 ~ 4 所示。

表 2　秸秆捡拾率试验结果

Tab. 2　Testing result of rate of straw collecting

测试区序号	秸秆覆盖量/g	秸秆剩余量/g	秸秆捡拾率/%
1	2 145	175	91.8
2	2 145	213	90.1
3	2 145	198	90.8
4	2 145	247	88.5
5	2 145	153	92.9
均值	2 145	197.2	90.8
变异系数/%			1.7

由表 2 ~ 4 可知，在 5 次秸秆捡拾粉碎集中全量深还作业测定中，秸秆捡拾率的平均值为 90.8%，开沟深度平均值为 394 mm，秸秆掩埋深度平均值为 200 mm，开沟深度稳定性系数为 97.4%，秸秆掩埋深度稳定性系数为 92.5%，受地面平整度影响各开沟深度与秸秆掩埋深度在个测试区域上均值相对较大，但稳定性系数均大于 90%，同时机具田间试验过程中，各关键部件工作稳定，秸秆通过性能好，没有发生堵塞现象，各项技术指标基本满足技术要求。

表 3　开沟深度试验结果

Tab. 3　Test results of ditching depth　mm

测试区序号	测试点序号					平均值
	1	2	3	4	5	
1	390	395	380	392	383	388
2	393	401	406	384	383	393
3	407	418	405	415	408	411
4	381	385	375	382	383	381
5	382	398	412	400	403	399
均值	397	403	403	411	406	394
变异系数/%						2.6

表 4　秸秆掩埋深度试验结果

Tab. 4　Results of straw burial depth test　mm

测试区序号	测试点序号					平均值
	1	2	3	4	5	
1	203	182	195	186	213	196
2	181	195	187	175	183	184
3	207	212	198	216	235	214
4	187	183	179	184	188	184
5	202	219	224	238	216	220
均值	196	198	197	200	207	200
变异系数/%						7.5

3.3　土壤贮水能力与有机质含量测试

为掌握秸秆集中深还对土壤改良效果，对秸秆集中深还试验田进行了两年定位试验，传统秸秆还田对比区除秸秆还田方式不同外，其他种植及管理条件相同。在第 2 年玉米收获前对秸秆深还和传统还田作业地块分别进行 0 ~ 200 cm 土体贮水量及 20 ~ 40 cm 土壤有机质含量测试，测试结果见表 5。

表 5　土壤贮水量与有机质含量测试结果

Tab. 5　Test results of soil water storage and organic matter content

测试区类型	土壤贮水量/mm	有机碳质量比/($g \cdot kg^{-1}$)	全氮质量比/($g \cdot kg^{-1}$)	速效磷质量比/($mg \cdot kg^{-1}$)
秸秆集中深还田	643	10.11	0.90	2.73
秸秆传统还田	614	2.97	0.31	1.20
差值	29	7.14	0.59	1.53

由表 5 可知，秸秆集中深还田与传统还田相比，0 ~ 200 cm 土体贮水量增加 29 mm，20 ~ 40 cm 土层有

机碳、全氮和速效磷养分含量分别增加了 7.14 g/kg、0.59 g/kg、1.53 mg/kg。由此可见,秸秆集中深还田可以有效增加土壤养分含量,提高深层土壤肥力与贮水能力。

4 结论

(1)针对目前传统还田存在病虫害发病率高、深层土壤“碳饥饿”、影响下茬作物播种和出苗质量等问题,设计了秸秆粉碎集中全量深埋还田机,该机具可一次完成秸秆捡拾、粉碎、输送、深松开沟和集中通注掩埋等作业,在有效减少土壤扰动下能够将多行站立或粉碎后秸秆集中埋入地表下深度为 400 mm的一条沟内。

(2)对秸秆粉碎集中全量深埋还田机螺旋输送装置、抛压风机和深松开沟通注装置等关键部件进行了设计与计算,通过理论分析确定了集秆螺旋输送装置和抛压风机转速、风机出口尺寸及深松开沟通注装置形状参数,并通过风机与通注体内部流场模拟分析进行了验证。

(3)田间试验与大田定位试验结果表明,在作业速度 3 km/h 时,秸秆捡拾率为 90.8%,开沟深度均值为 394 mm,秸秆掩埋深度均值为 200 mm,开沟深度稳定性系数为 97.4%,秸秆掩埋深度稳定性系数为 92.5%,各项指标与设计值相符,且满足农艺要求。同时大田定位试验结果表明,秸秆集中深还田与传统还田相比,0 ~ 200 cm 土体贮水量提高 29 mm,20 ~ 40 cm 土层有机碳、全氮和速效磷养分含量分别增加了 7.14 g/kg、0.59 g/kg、1.53 mg/kg,有效增加土壤养分含量,提高深层土壤肥力与贮水能力。

参 考 文 献

[1] 霍丽丽,姚宗路,赵立欣,等. 秸秆综合利用减排固碳贡献与潜力研究[J]. 农业机械学报,2022,53(1):349 - 359.
HUO Lili,YAO Zonglu,ZHAO Lixin,et al. Contribution and potential of comprehensive utilization of straw in GHG emission reduction and carbon sequestration[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(1):349 - 359. (in Chinese)

[2] 中国农业绿色发展研究会,中国农业科学院农业资源与农业区划研究所. 中国农业绿色发展报告(2020)[M]. 北京: 中国农业出版社,2020.

[3] 章志强,何进,李洪文,等. 可调节式秸秆粉碎抛撒还田机设计与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(9):76 - 87.
ZHANG Zhiqiang,HE Jin,LI Hongwen,et al. Design and experiment on straw chopper cum spreader with adjustable spreading device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(9):76 - 87. (in Chinese)

[4] 赵立欣,田利伟,贾吉秀,等. 移动式玉米秸秆热解炭化原位还田设备研究[J]. 农业机械学报,2023,54(1):357 - 363.
ZHAO Lixin,TIAN Liwei,JIA Jixiu,et al. Mobile equipment study of corn stalk in-situ returning carbonization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(1):357 - 363. (in Chinese)

[5] 杨庆璐,陈桂斌,谢立娟,等. 伸缩指杆式玉米秸秆旋耕掩埋机设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(12):35 - 43.
YANG Qinglu,CHEN Guibin,XIE Lijuan,et al. Design and experiment of telescopic finger stalk of maize straw burying machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(12):35 - 43. (in Chinese)

[6] LI Hongwen,GAO Huanwen,WU Hongdan,et al. Effects of 15 years of conservation tillage on soil structure and productivity of wheat cultivation in northern China[J]. Australian Journal of Soil Research,2007,45(5): 344 - 350.

[7] PRASAD R,GANGAIAH B,AIPE K. Effect of crop residue management in a rice-wheat cropping systems on growth and yield of crops and on soil fertility[J]. Experimental Agriculture,1999,35(4): 427 - 435.

[8] 齐智娟,宋芳,张忠学,等. 保护性耕作对寒地黑土土壤水热效应与玉米产量的影响[J]. 农业机械学报,2022,53(12): 380 - 389.
QI Zhijuan,SONG Fang,ZHANG Zhongxue,et al. Effects of different conservation tillage methods on soil hydrothermal condition as well as maize yield in cold black soil region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(12):380 - 389. (in Chinese)

[9] 李荣,侯贤清,吴鹏年,等. 秸秆还田配施氮肥对土壤性状与水分利用效率的影响[J]. 农业机械学报,2019,50(8):289 - 298.
LI Rong,HOU Xianqing,WU Pengnian,et al. Effect of straw returning with nitrogen application on soil properties and water use efficiency[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(8): 289 - 298. (in Chinese)

[10] YEBOAH S,LAMPTEY S,ZHANG R,et al. Conservation tillage practices optimizes root distribution and straw yield of spring wheat and field pea in dry areas[J]. Journal of Agricultural Science,2017,9(6): 37 - 48.

[11] 张忠学,李铁成,齐智娟,等. 控制灌溉下秸秆还田对稻田土壤氮素组成的影响[J]. 农业机械学报,2019,50(11): 229 - 238.
ZHANG Zhongxue,LI Tiecheng,QI Zhijuan,et al. Effects of straw returning on nitrogen composition in paddy soil under controlled irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(11): 229 - 238. (in Chinese)

[12] 马永财,滕达,衣淑娟,等. 秸秆覆盖还田及腐解率对土壤温湿度与玉米产量的影响[J]. 农业机械学报,2021,52(10): 90 - 99.

MA Yongcai, TENG Da, YI Shujuan, et al. Effects of straw mulching and decomposition rate on soil temperature and humidity and maize yield[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 90 - 99. (in Chinese)

[13] 刘鹏,何进,章志强,等. 基于 CFD - DEM 的秸秆还田机碎秆运动特性分析与试验[J]. 农业机械学报,2021,51(增刊):244 - 252.
LIU Peng, HE Jin, ZHANG Zhiqiang, et al. Kinematic characteristic analysis and field test of chopped stalk in straw retention machine based on CFD - DEM coupling simulation method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 51(Supp.): 244 - 252. (in Chinese)

[14] 张姬,于泳涛,杨启勇,等. 高留茬玉米秸秆复式割台粉碎还田装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(增刊):42 - 49.
ZHANG Ji, YU Yongtao, YANG Qiyong, et al. Design and experiment of smashed straw unit for high stubble maize double header[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 42 - 49. (in Chinese)

[15] 窦森. 秸秆"富集深还"新模式及工程技术[J]. 土壤学报,2019,56(3): 553 - 560.
DOU Sen. New model of "straw enrichment and deep incorporation" and engineering[J]. Journal of Soil, 2019, 56(3): 553 - 560. (in Chinese)

[16] 窦森. 玉米秸秆"富集深还"与土壤亚表层培肥[J]. 植物营养与肥料学报,2017,23(6): 1670 - 1675.
DOU Sen. Improving subsoil fertility through a new technology of continuous in belt and deep incorporation of corn stover[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23(6): 1670 - 1675. (in Chinese)

[17] 郑智旗,何进,王庆杰,等. 秸秆捡拾粉碎掩埋复式还田机设计与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(7):87 - 96.
ZHENG Zhiqi, HE Jin, WANG Qingjie, et al. Design and experiment on straw pickup-chopping and ditch-burying integrated machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 87 - 96. (in Chinese)

[18] 郑智旗. 玉米秸秆捡拾粉碎沟埋还田机研究[D]. 北京: 中国农业大学,2017.
ZHENG Zhiqi. Study on corn straw pickup-chopping and ditch-burying returning field machine[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)

[19] 王金峰,陈博闻,姜岩,等. 水稻秸秆全量深埋还田机设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(1): 84 - 93.
WANG Jinfeng, CHEN Bowen, JIANG Yan, et al. Design and experiment on machine for rice straw full quantity deep buried into field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 84 - 93. (in Chinese)

[20] 王金武,王奇,唐汉,等. 水稻秸秆深埋整秆还田装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2015,46(9): 112 - 117.
WANG Jinwu, WANG Qi, TANG Han, et al. Design and experiment of rice straw deep buried and whole straw returning device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 112 - 117. (in Chinese)

[21] 陈桂斌,卢彩云,何进,等. 秸秆条带捡拾粉碎深埋装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(10):16 - 27.
CHEN Guibin, LU Caiyun, HE Jin, et al. Design and experiment of straw pickup-crushed and deep buried device under strip-tillage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 16 - 27. (in Chinese)

[22] 王瑞丽,柴佳佳,许方剑,等. 秸秆直注深埋还田机设计与试验[J]. 沈阳农业大学学报,2019,50(5):634 - 640.
WANG Ruili, CHAI Jiajia, XU Fangjian, et al. Design and experiment of direct injection straw deep bury and returning machine[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2019, 50(5):634 - 640. (in Chinese)

[23] 林静,张桐嘉,田阳,等. 秸秆深埋还田仿生开沟装置优化与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(增刊):50 - 59,67.
LIN Jing, ZHANG Tongjia, TIAN Yang, et al. Optimization and experiment on bionic deep-buried device for returning straw in field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 50 - 59, 67. (in Chinese)

[24] 高文英, 林静, 李宝筏,等. 玉米秸秆深埋还田机螺旋开沟装置参数优化与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(9):45 - 54.
GAO Wenying, LIN Jing, LI Baofa, et al. Parameter optimization and experiment for spiral type opener device of maize straw deep bury and returning machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 45 - 54. (in Chinese)

[25] 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:中国农业科学出版社,2007.

[26] 田宜水, 姚宗路,欧阳双平,等. 切碎农作物秸秆理化特性试验[J]. 农业机械学报,2011,42(9):124 - 128.
TIAN Yishui, YAO Zonglu, OUYANG Shuangping, et al. Physical and chemical characterization of biomass crushed straw[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(9): 124 - 128. (in Chinese)