

气力式杂交稻精量穴直播排种器设计与试验

翟建波¹ 夏俊芳² 周 勇²

(1. 武汉轻工大学机械工程学院, 武汉 430023; 2. 华中农业大学工学院, 武汉 430070)

摘要:为实现杂交稻大田精量穴直播,解决杂交稻直播时因芽种流动性差和细长形状造成种箱中芽种架空或堵塞的问题,设计了一种气力式杂交稻精量穴直播排种器。阐述了其基本结构和工作原理,分析了梳种条对芽种的助吸作用;研究了充种区芽种的受力情况,建立了芽种不同姿态被吸附时吸室真空度方程。试验研究了有无梳种装置、排种盘转速以及排种盘群组吸孔直径、排种盘转速、吸室真空度3因素综合作用对排种性能的影响。试验结果表明:梳种条对芽种起到搅动、梳理作用,有利于提高排种器的充种性能;当排种盘转速为15 r/min,吸室真空度为3.5 kPa,排种盘群组吸孔直径为1.6 mm时,气力式杂交稻排种器的排种性能最好,其合格率为86.5%。田间试验结果表明,排种器田间播种能够满足杂交稻大田精量旱穴直播的农艺要求。

关键词: 杂交稻芽种; 气力式排种器; 精量穴直播

中图分类号: S223.2⁺3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)01-0075-08

Design and Experiment of Pneumatic Precision Hill-drop Drilling Seed Metering Device for Hybrid Rice

Zhai Jianbo¹ Xia Junfang² Zhou Yong²

(1. School of Mechanical Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China

2. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: Paddy rice is one of the most important fine food crops that feed the largest proportion of the world's population. There are two planting patterns of paddy rice called direct seeding and transplanting. In order to realize precision hill direct seeding of hybrid rice in field and solve the problem of budded seed overhead and jamming in seeding box, a pneumatic seed metering device for hybrid rice budded seed was designed based on the seeding principle of air suction – air blowing. The seed metering device used cam, pushing rod and combing strips to solve the problem of rice budded seeds' mobility. The seeding plate which had groups of suction holes could absorb 2 ~ 4 rice budded seeds. The seed metering device was constituted by seed box, cam, push rod, seeding axis, seeding plate, air chamber, flange and so on, by which two to four bud seeds could be sucked and dropped at the same time. The adsorption mechanism of budded seed in seed filling area was analyzed in the paper theoretically. An equation of vacuum degree in suction chamber was built. The paper launched bench experiment of double-sided pneumatic seed metering device and studied the relationship between seeding performance and combing device, rotational speed of seeding plate. The orthogonal experiment was done which took the diameter of suction hole, rotational speed of seeding plate and vacuum degree of air chamber as factors. The experiment result showed that the combing strips could stir rice budded seeds. The orthogonal experiment indicated that the optimal condition for the seed metering device is as follows: when the rotational speed is 15 r/min, the vacuum degree is 3.5 kPa and the diameter of suction hole is 1.6 mm. And the experiment in field indicated that the device meets the agronomic requirement of planting rice budded seed.

Key words: hybrid rice budded seed; pneumatic seed metering device; precision hill-drop drilling

收稿日期: 2015-07-17 修回日期: 2015-08-17

基金项目: 公益性行业(农业)科技专项经费项目(201203059)和“十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAD06B01)

作者简介: 翟建波(1986—),男,讲师,博士,主要从事现代农业装备设计与测控研究,E-mail: zhai123456@163.com

通信作者: 夏俊芳(1963—),女,教授,博士生导师,主要从事现代农业装备设计及测控研究,E-mail: xjf@mail.hzau.edu.cn

引言

目前杂交稻种植面积约占全国水稻种植面积的60%,种植技术分为直播和移栽两种体系,移栽时穴苗数一般要求 (2 ± 1) 株^[1-3]。水稻直播是将水稻芽种直接播入土中的一种栽培方式,具有省水、省工、省秧田,提高生产率,减轻劳动强度等优点,是当前发展高产、优质、高效水稻生产的重要途径之一^[4-6]。

精量排种器是播种机的核心部件,其排种性能和高速作业的适应性成为水稻播种技术的关键。罗锡文等^[7]设计了一种机械型孔轮式排种器,其成穴性好,但容易伤种,播种量偏大。由于气力式排种器具有不伤种、对种子适应力强、通用性好等优点,目前国内对水稻排种器的研究多为气力式排种器^[8-10]。张晓慧等^[11]设计了一种针吸滚筒式水稻排种器,其伤种率低,但主要用于单粒播种,其吸孔容易被粉尘、杂质堵塞。针对这一问题,韩豹等^[12]设计了一种气吸滚筒式自动清堵排种器,利用弹齿清种机构与毛刷实现自动清堵,充种率高,但滚筒结构复杂,加工工艺要求较高。李耀明等^[13]提出一种气吸振动式排种器,其吸种率高,但工作效率低,仅适用于钵体穴盘育秧。为了缩短种苗生长期,防止病虫害,提高成活率,杂交稻直播多采用芽种直播^[14-17]。然而,芽种形状不规则、含水率高、流动性差,容易在种箱中出现架空现象,致使芽种难以顺畅流至充种室,排种器充种效果欠佳^[18-19]。

本文针对气力式杂交稻排种器充种效果欠佳的问题,基于气吸-气吹播种原理,设计一种气力式杂交稻精量穴直播排种器,利用凸轮推杆与梳种条解决芽种流动性差的架空问题,其排种盘上均布有群组吸孔,可同时吸附多粒(2~4粒)杂交稻芽种。

1 排种器工作原理与主要结构设计

1.1 排种器工作原理

气力式杂交稻精量穴直播排种器主要由种箱、凸轮、推杆、排种轴、排种盘、气室、罩壳等构成,如图1所示。

基于气吸-气吹播种原理,该排种器通过负压吸种、正压吹种实现播种过程。工作过程如下:①种箱中的芽种在自身重力和推杆往复直线运动作用下稳定、均匀流至充种室,在充种室内形成芽种堆。②排种盘回转运动过程中,梳种条对贴近盘面的芽种起搅动、梳理作用,降低芽种之间的摩擦力与粘附力,使贴近盘面的芽种不断往上涌动,从而提高排种盘群组吸孔的吸种概率。③排种盘上的群组吸孔在充

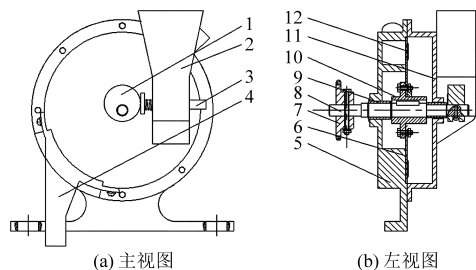


图1 排种器结构示意图

Fig.1 Structure diagram of device

1. 凸轮 2. 种箱 3. 推杆 4. 导种管 5. 气室壳体 6. 排种盘
7. 链轮 8. 排种轴 9. 轴套 10. 法兰 11. 罩壳 12. 梳种条

种区将涌动的芽种吸住,芽种随排种盘绕气室运动,运动到正压吹气口受重力和吹力作用,落入导种管中。④芽种通过导种管落入种沟,完成播种作业。

1.2 排种器主要部件设计

1.2.1 梳盘结构设计

梳盘由排种盘和梳种条构成,梳盘是气力式杂交稻精量穴直播排种器的关键工作部件,其结构如图2所示。综合考虑芽种尺寸、水稻直播农艺要求等因素,将排种盘直径 d_p 确定为210 mm,由2 mm厚的不锈钢制成,表面光滑平整。杂交稻直播时为了提高芽种田间出苗率,将每穴芽种数量确定为 (3 ± 1) 粒。为实现杂交稻精量穴直播,在排种盘上均布有10组群组吸孔,每组吸孔数目为3,吸孔直径根据芽种大小而定^[20],即

$$d = (0.64 \sim 0.66)b \quad (1)$$

式中 d ——排种盘吸孔直径

b ——种子的平均宽度

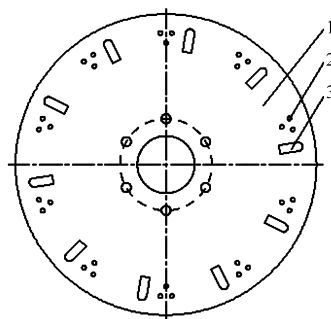


图2 梳盘结构示意图

Fig.2 Structure diagram of combing plate

1. 排种盘 2. 吸孔 3. 梳种条

选取华中地区常用优质杂交稻品种黄华占为试验测试对象。经测定,黄华占芽种细长,其平均宽度为2.41 mm,代入式(1)中,可得排种盘吸孔直径范围为1.54~1.59 mm,取吸孔直径为1.6 mm,孔间距8 mm。在每组吸孔附近固定有梳种条,沿排种盘圆周方向均匀分布。在排种盘回转过程中,梳种条对贴近盘面的芽种起到搅动、梳理和导向的作用。为了增强梳种条对水稻芽种的适应性,实现对芽种

的搅动、梳理作用,应根据水稻芽种的物理机械特性设计梳种条的工作参数。黄华占芽种的平均长度为 8.86 mm,为了实现对图 2 所示群组吸孔分布产生搅动作用,梳种条的长度应该满足

$$L_s \geq 2L \tag{2}$$

式中 L_s ——梳种条的长度

L ——芽种的平均长度,取 8.86 mm

最终确定 $L_s = 18$ mm。

为防止排种盘回转过程中梳种条将芽种从充种区带至投种区,梳种条的高度要小于芽种的厚度,取 2 mm,梳种条的宽度设置为 6 mm。结合排种器充种性能离散元仿真与高速摄像试验,发现排种盘在回转过程中,梳种条可以对贴近盘面的芽种起搅动、梳理作用,从而降低芽种之间的摩擦力和粘附力,使贴近盘面的杂交稻芽种不断往上涌动,吸孔借助两侧压力差便可将涌动的芽种吸附,有利于提高排种器的充种性能。

1.2.2 凸轮推杆结构设计

杂交稻芽种为散体物料,受品种、含水率、种箱材料以及形状等因素的影响,杂交稻芽种容易在种箱中因芽种之间以及芽种与种箱壁面之间的摩擦、粘附作用而产生结拱^[21-22]。芽种粒径越小,形状越复杂,千粒质量越小、含水率和内摩擦角越大,则结拱现象越严重。种箱壁面越粗糙,壁面倾角越小,种箱出种口越小,越容易造成结拱。为防止杂交稻芽种在种箱中产生结拱,在种箱上设置有凸轮推杆装置,通过凸轮带动推杆做往复直线运动,在推杆的摩擦与振动作用下芽种可顺畅落至充种区。

与现有垂直圆盘气力式排种器不同,该排种器的排种轴贯穿于气室和罩壳中,左端固定有链轮,右端与直径 50 mm、高 24 mm 凸轮配合(图 3)。凸轮圆心左部 10 mm 为一直径 16 mm 的通孔。凸轮通过阶梯孔用螺钉固定在排种轴上,凸轮右端的推杆固定在种箱下部两个端面中间的轴孔上,推杆外端套有不伤种的橡胶外壳。凸轮在排种轴的作用下做回转运动,推杆在凸轮和弹簧的作用下在种箱内做

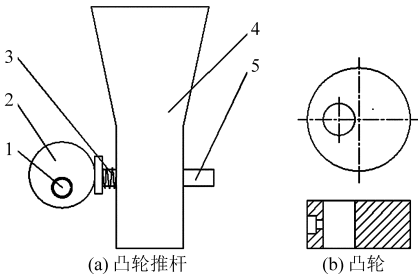


图 3 凸轮推杆结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of cam and push rod

1. 排种轴 2. 凸轮 3. 弹簧 4. 种箱 5. 推杆

往复直线运动,有利于解决芽种在种箱中的架空或堵塞的问题。

2 充种区芽种受力分析

气力式杂交稻精量穴直播排种器将涌动的芽种从芽种堆中分离出来,在负向吸力的作用下将芽种运送至投种口,在芽种自身重力和正压吹力的作用下落入输种管。充种过程是排种过程的关键环节,通过高速摄像技术观察排种器的工作过程发现,排种盘吸孔上芽种的吸附姿态主要有“芽种平躺”、“芽种侧立”和“芽种竖立”3 种姿态,大部分水稻芽种呈平躺状态,如图 4 所示。

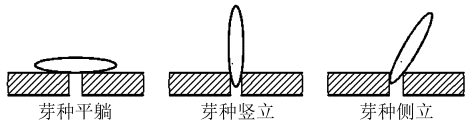


图 4 水稻芽种的吸附姿态

Fig. 4 State of absorbing rice-budded seeds

在充种区芽种的受力十分复杂,为了便于分析,本文只研究单个吸孔对芽种的吸附作用。排种器工作时,假设排种盘表面光滑,则充种区芽种脱离芽种堆后被吸附到排种盘吸孔上的受力分析如图 5 所示。

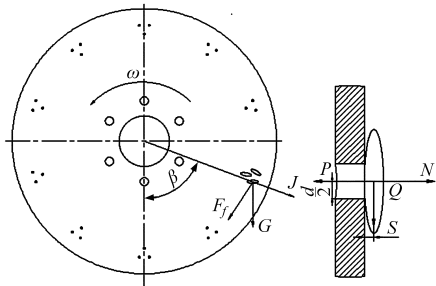


图 5 充种区芽种受力图

Fig. 5 Force diagram of bud seed in seed filling area

图 5 中, P 为单个吸孔的的吸力,由风机提供; G 为单粒芽种的重力; J 为芽种被吸附在吸孔上随排种盘旋转时的惯性力,方向随着角 β 的变化而变化; F_f 为芽种之间的摩擦力,当吸孔经过种子堆时 F_f 存在,芽种随吸孔离开芽种堆后 F_f 消失; N 为吸孔对芽种的支持力。单个吸孔要吸住一粒芽种,须满足

$$(P - N) \frac{d}{2} = QS \tag{3}$$

其中
$$P = p \frac{\pi d^2}{4} \tag{4}$$

$$Q = G + J + F_f \tag{5}$$

式中 p ——单个吸孔对一粒芽种吸附的真空度,Pa
 S ——种子重心与吸种盘之间距离,cm
 Q ——合力,N

据文献[23],单个吸孔吸住一粒芽种时, $N = 0$,

合力 Q 须满足

$$p = \frac{8mgK_1K_2S}{\pi d^3} \left(1 + \lambda + \frac{v^2}{gr} \right) \tag{6}$$

其中 $\lambda = (6 \sim 10) \tan \theta$

式中 K_1 ——吸种可靠性系数,取 1.8 ~ 2.0,芽种千粒质量小、形状近似球形时取小值
 K_2 ——工作稳定可靠性系数,取 1.6 ~ 2.0,芽种千粒质量大时取大值
 g ——重力加速度,9.8 m/s²
 v ——排种盘上吸孔中心处的线速度,m/s
 r ——排种圆盘吸孔处的转动半径,m
 λ ——种子的摩擦阻力综合系数
 θ ——种子的自然休止角

由于气力式杂交稻排种器的吸孔为群组吸孔,设距离排种盘回转中心较近的吸孔与排种盘回转中心之间的距离为 r_1 ,其余两个吸孔与排种盘回转中心之间的距离为 r_2 ,则公式(6)可表示为

$$p_i = \frac{8mgK_1K_2S}{\pi d^3} \left(1 + \lambda + \frac{v^2}{gr_i} \right) \quad (i = 1, 2) \tag{7}$$

当芽种以“芽种平躺”姿态被吸附时,芽种质心与排种盘盘面之间的距离 S 为芽种厚度 T 的一半,孔的真真空度可以表示为

$$p_i = \frac{4mgK_1K_2T}{\pi d^3} \left(1 + \lambda + \frac{v^2}{gr_i} \right) \quad (i = 1, 2) \tag{8}$$

当芽种以“芽种竖立”姿态吸附时,由于排种盘群组吸孔很小,芽种尖端被吸孔吸入的深度很小,芽种质心与排种盘盘面之间的距离 S 为芽种长度 L 的一半,则“芽种竖立”时吸孔的真真空度可以表示为

$$p_i = \frac{4mgK_1K_2L}{\pi d^3} \left(1 + \lambda + \frac{v^2}{gr_i} \right) \quad (i = 1, 2) \tag{9}$$

当芽种以“芽种侧立”姿态吸附时,芽种中心轴线与排种盘盘面之间的夹角为 δ 。则“芽种侧立”时吸孔的真真空度可以表示为

$$p_i = \frac{4mgK_1K_2L\sin\delta}{\pi d^3} \left(1 + \lambda + \frac{v^2}{gr_i} \right) \quad (i = 1, 2) \tag{10}$$

群组吸孔以不同姿态吸附芽种时,由于芽种长度明显大于芽种厚度,取最大极限条件,各吸孔均能稳定吸附芽种时,吸室真空度 p 的临界真空度最大值应满足公式(9)。芽种以平躺姿态被吸附时,所需吸室真空度最小,有利于提高排种器的充种性能。吸室真空度 p 与芽种质量 m 、吸孔直径 d 以及芽种所在吸孔处线速度 v 等有关。为使芽种能牢固地被吸附在吸孔上,吸室的实际真空度必须大于 p 。真空度越大,吸孔吸种的能力愈强,但真空度过大时,会使排种器的重播率增大,增加功率消耗。

3 试验

3.1 试验材料

试验材料选取华中地区优质杂交稻品种黄华占。黄华占晾晒一段时间后用清水浸泡,滤除表面杂质,然后进行催芽,待种子破胸露白,晾干表面水分后使用。芽种物料特性参数如表 1 所示。

表 1 芽种的物料特性参数

品种	含水率/%	千粒质量/g	滑动摩擦角/(°)	种子平均尺寸/mm		
				长度	宽度	厚度
黄华占	20.71	34.095	35.01	9.57	2.41	1.99

3.2 试验设计

试验时间为 2014 年 10 月 22—29 日。
试验地点为华中农业大学排种器性能实验室。
试验装置为黑龙江省农业机械工程科学研究院研制的 JPS-12 型计算机视觉排种器试验台。

本试验以杂交稻芽种为对象,首先分别对无梳种条(A)、有搅种轮(B)、有梳种条(C)3 种排种盘(图 6)进行排种性能试验,研究梳种装置对排种性能的影响。

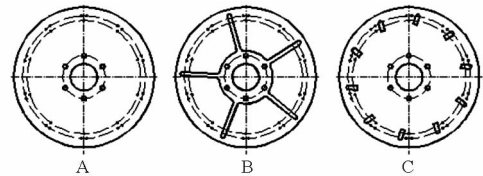


图 6 不同结构形式的排种盘

Fig. 6 Different structural seeding plates

其次参考前期单因素试验及理论计算结果,选取对排种性能起主要影响的因素:吸室真空度、排种盘转速和排种盘吸孔直径,每个因素选取 4 个水平的试验方法进行正交试验,因素水平如表 2 所示。

表 2 试验因素水平

水平	因素		
	转速 $A/(r \cdot \min^{-1})$	吸室真空度 B/kPa	吸孔直径 C/mm
1	10	2.0	1.8
2	15	2.5	1.2
3	20	3.0	1.4
4	25	3.5	1.6

将气力式杂交稻排种器固定在 JPS-12 型计算机视觉排种器试验台上,排种器的动力由变频调速电动机提供;排种器吸室负压和投种口的正压均由风机提供,并将气压管连接到 U 型管测压计上。种床带的前进速度用来模拟播种机的工作速度,为了

精确控制芽种的穴距,种床带的前进速度和排种盘的转速需要满足

$$n = \frac{60V}{L_x Z} \tag{11}$$

式中 n ——排种盘转速, r/min
 V ——种床带的前进速度, m/s
 L_x ——穴距, 一般为 0.10 ~ 0.25 m, 本试验取 0.15 m
 Z ——排种盘吸孔组数

试验时参照 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》规定连续记录每穴芽种的数量和穴距,250 穴作为一个统计样本,进而计算出排种器的穴粒数合格率、重播率以及漏播率。

3.3 试验评价指标

按照杂交稻种植农艺要求,田间插秧时每穴需要(2±1)株秧苗,机械穴直播时为了提高其田间芽种出苗率,每穴需 2~4 粒芽种,即可满足杂交稻大田精量穴直播要求。因此本文参照 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》和 NY/T 987—2006《铺膜穴播机 作业质量》提出对气力式杂交稻精量穴直播排种器排种性能综合评价指标:

(1)每穴芽种数量小于(等于)1(当穴距大于 1.5L 时,穴粒数计为 0)时为漏播,则漏播率为

$$M = \frac{n_1}{250} \times 100\% \tag{12}$$

(2)每穴芽种数量为 2~4 时为合格,则合格率为

$$A = \frac{n_2}{250} \times 100\% \tag{13}$$

(3)每穴芽种数量大于(等于)5 时为重播,则重播率为

$$D = \frac{n_3}{250} \times 100\% \tag{14}$$

(4)将经过排种器导种管出口的芽种收集到一起称量,芽种收集时间为 1 min,人工挑拣出破碎损伤的芽种,则破损率为

$$P = \frac{m_1}{m} \times 100\% \tag{15}$$

式中 n_1 ——每穴小于(等于)1 粒芽种的总穴数
 n_2 ——每穴 2~4 粒芽种的总穴数
 n_3 ——每穴大于(等于)5 粒芽种的总穴数
 m_1 ——破损芽种的质量
 m ——收集芽种的质量

3.4 试验结果分析

3.4.1 梳种装置的影响

设定排种器转速为 25 r/min,吸室真空度为 4.5 kPa、投种口正压为 500 Pa,对图 8 所示 A、B、C

3 种形式的排种盘进行试验。根据气力式杂交稻排种器试验性能评价指标计算出穴粒数漏播率、合格率、重播率,计算处理结果见表 3。

表 3 排种盘对排种器排种性能的影响
Tab.3 Relationship between combing device and seeding performance %

排种盘	漏播率	合格率	重播率
A	42.6	48.8	8.6
B	20.8	56.8	22.4
C	9.7	87.1	3.2

由表 3 可以看出,排种器采用无梳种条排种盘时排种效果最差,其穴粒数漏播率高达 42.6%,合格率仅为 48.8%。这主要由于水稻流动性差,无梳种条排种盘转动时,充种区芽种受芽种之间的挤压力与排种盘摩擦力处于成堆的静止状态,静止的芽种很难被群组吸孔吸附,导致群组吸孔容易产生漏吸。采用搅种轮排种盘时,搅种轮虽可对芽种起搅动、梳理作用,但搅种轮辐条在转动过程中容易把芽种从充种区携带至投种区,导致排种器重播率增大。为解决这一问题,将搅种轮简化成梳种条。采用梳种条后,梳种条对芽种起到搅动、梳理作用,群组吸孔附近的芽种受梳种条作用不断往上涌动,涌动的芽种容易被群组吸孔吸住,此时排种器排种性能最好,其穴粒数合格率为 87.1%,重播率由 22.4% 下降至 3.2%。

3.4.2 排种轴转速

为研究排种盘转速对排种器的影响,对吸室真空度为 4.5 kPa、投种口正压为 500 Pa 时不同排种盘转速下排种器的排种性能进行了试验。试验过程中分别选取 10、20、25、35、40、50 r/min 6 个转速,根据气力式水稻精量排种器试验性能评价指标计算出穴粒数漏播率、合格率、重播率,计算处理结果见表 4,转速与破损率关系如图 7 所示。

表 4 排种盘转速对排种性能的影响
Tab.4 Impact of rotational speed on seed metering performance

转速/(r·min ⁻¹)	漏播率/%	合格率/%	重播率/%	破损率/%
10	6.0	86.0	8.0	0.48
20	8.8	86.8	4.4	0.51
25	9.7	87.1	3.2	0.53
35	16.0	81.2	2.8	0.58
40	20.0	76.4	3.6	0.71
50	30.4	69.2	0.4	0.84

由表 4,随着排种盘转速的提高,漏播率呈上升趋势,排种盘转速由 10 r/min 上升至 50 r/min 时,其穴粒数漏播率由 6% 上升至 30.4%。随着排种盘转

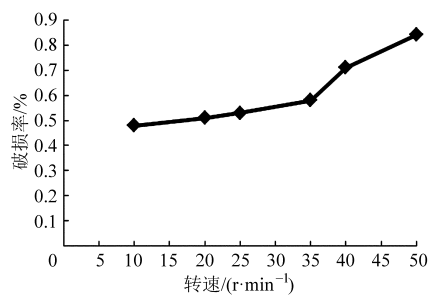


图 7 转速与破损率关系曲线

Fig. 7 Impact of rotational speed on damage rate

速的提高,排种器的重播率呈下降趋势,合格率呈先上升后下降的趋势。这是由于随着排种盘转速的提高,吸孔经过充种区的时间变短,充种区的芽种被吸附到排种盘上的几率减小;同时随着排种盘转速的提高,芽种受到的惯性力增大,由于吸室真空度不足,使芽种容易脱离排种盘,造成漏吸。当吸室真空度为 4.5 kPa,排种盘转速为 25 r/min 时,排种器的排种效果最好,合格率达到 87.1%。

图 7 是排种盘转速与杂交稻芽种破损率之间的关系曲线,从中可以看出:转速低于 35 r/min 时,芽种破损率随着转速的增加而略有增加,转速大于 35 r/min 时,芽种破损率增加较为明显,转速为 10 r/min 时,破损率最小,为 0.48%。

3.4.3 正交试验

排种器正交试验结果如表 5 所示,利用 DPS 软件将表 5 中试验因素对合格率的影响进行方差分析,得到各因素主次顺序等,方差分析如表 6 所示。

表 5 正交试验结果

Tab. 5 Results of orthogonal test

序号	A	空列	B	C	空列	漏播率/%	合格率/%	重播率/%
1	1	1	1	1	1	76.7	23.3	0
2	1	2	2	2	2	15.7	83.1	1.2
3	1	3	3	3	3	4.4	85.6	10
4	1	4	4	4	4	0	50.7	49.3
5	2	1	2	3	4	13.7	82.4	3.9
6	2	2	1	4	3	14.7	56.8	28.5
7	2	3	4	1	2	39.9	59	1.1
8	2	4	3	2	1	11.6	82.3	6.1
9	3	1	3	4	2	0.4	49.2	50.4
10	3	2	4	3	1	5.5	81.3	13.2
11	3	3	1	2	4	44.7	53.8	1.5
12	3	4	2	1	3	78.1	21.8	0.1
13	4	1	4	2	3	17.7	78	4.3
14	4	2	3	1	4	70.5	29.5	0
15	4	3	2	4	1	4	71.2	24.8
16	4	4	1	3	2	44.3	54.8	0.9

表 6 方差分析

Tab. 6 Variance analysis

指标	A	空列	B	C	空列
K_1	60.675	58.225	54.675	33.4	64.525
K_2	77.625	70.175	64.625	74.3	61.525
K_3	51.525	67.4	61.65	76.025	68.05
K_4	58.375	52.4	67.25	64.475	54.1
R	26.1	17.775	12.575	42.625	13.95
试验因素主次顺序			C	A	B
最优方案组合			$A_2B_4C_3$		

正交试验结果表明,排种盘转速、吸室真空度和排种盘群组吸孔直径 3 个因素对气力式杂交稻排种器排种性能影响的主次顺序是:排种盘群组吸孔直径、排种盘转速、吸室真空度。正交试验的最优方案组合为 $A_2B_4C_3$,即当排种盘转速为 15 r/min,吸室真空度为 3.5 kPa,排种盘群组吸孔直径为 1.6 mm 时,气力式杂交稻排种器的排种性能最好。但据表 5 分析可得正交试验中最优组合为 $A_1B_3C_3$,即排种盘转速为 10 r/min,吸室真空度为 3.0 kPa,排种盘群组吸孔直径为 1.6 mm。因此,需在试验方案组合 $A_2B_4C_3$ 工况下进行试验,试验结果得排种器的漏播率为 11.5%,合格率为 86.5%,重播率为 2%。此时气力式杂交稻排种器的合格率大于排种器在表 5 中的最优组合 $A_1B_3C_3$ 工况下的合格率,所以在排种盘转速为 15 r/min,吸室真空度为 3.5 kPa,排种盘群组吸孔直径为 1.6 mm 时,气力式水杂交稻精量穴直播排种器的排种性能最好,其合格率为 86.5%。

3.4.4 田间试验及分析

为测试气力式杂交稻精量穴直播排种器田间实际播种情况,于 2015 年 4 月 22—23 日在华中农业大学试验田进行水稻田间旱穴直播试验。试验所用田块长 25.3 m,宽 8.3 m,旱直播试验前先用旋耕犁对田块进行翻耙,把土壤细碎平整,使田块高低处落差范围控制在 3~5 cm 之内。田间平均土壤坚实度为 416.8 kPa,平均耕深 43 mm,耕深稳定性系数 89.1%。将气力式杂交稻排种器固定在精量旱直播机上(图 8),其牵引动力由东方红-LX854 型拖拉机提供,试验时拖拉机的前进速度约为 2.1 km/h。排种器的正压、负压由风机提供,风机由拖拉机动力输出轴带动,排种器转动由地轮带动。

参照 NY/T 987—2006《铺膜穴播机 作业质量》和地膜棉联合播种机组试验大纲进行本次试验,测得气力式杂交稻精量穴直播排种器田间播种时其穴粒数合格率为 76.3%,漏播率为 21.4%,重播率为 2.3%,平均穴距为 151.7 mm,穴距均匀性变异系数为 16.71%。田间试验结果表明,气力式杂



图 8 田间试验

Fig. 8 Experiment in field

交稻排种器播种穴距均满足水稻大田株距范围 100 ~ 250 mm, 试验穴距均匀性变异系数均低于 25%, 能够满足杂交稻大田精量早穴直播的农艺要求。

4 结论

(1) 基于气吸-气吹播种原理设计了一种气力式杂交稻精量穴直播排种器, 利用凸轮推杆与梳种条可以解决芽种流动性差的架空问题, 其排种盘上

均布有群组吸孔, 可同时吸附多粒(2 ~ 4 粒)水稻芽种, 芽种破损率低, 满足杂交稻大田精量穴直播的需求。

(2) 从理论上分析了充种区芽种以不同姿态被吸附时的吸室真空度方程, 分析结果显示吸室真空度与水稻芽种的质量、排种盘的线速度、吸孔的大小等因素有关。

(3) 进行了排种性能试验, 试验结果表明: 梳种条对芽种起到搅动、梳理作用, 有利于提高排种器的充种性能; 当排种盘转速为 15 r/min, 吸室真空度为 3.5 kPa, 排种盘群组吸孔直径为 1.6 mm 时, 气力式杂交稻精量穴直播排种器的排种性能最好, 其合格率为 86.5%, 漏播率为 8.8%。

(4) 田间试验结果表明, 气力式杂交稻精量穴直播排种器田间播种时穴粒数合格率为 76.3%, 漏播率为 21.4%, 重播率为 2.3%, 平均穴距为 151.7 mm, 穴距均匀性变异系数为 16.71%, 能够满足杂交稻大田精量早穴直播的农艺要求。

参 考 文 献

- 1 青先国, 黄大金, 艾治勇. 中国杂交水稻产业经济发展战略[J]. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 2008, 34(6): 618 - 623.
Qing Xianguo, Huang Dajin, Ai Zhiyong. Developmental strategies for hybrid rice industrial economy in China [J]. Journal of Hunan Agricultural University: Natural Sciences, 2008, 34(6): 618 - 623. (in Chinese)
- 2 张国忠, 罗锡文, 臧英, 等. 水稻气力式排种器群布吸孔吸种盘吸种精度试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(6): 13 - 20.
Zhang Guozhong, Luo Xiwen, Zang Ying, et al. Experiment of sucking precision of sucking plate with group holes on rice pneumatic metering device [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(6): 13 - 20. (in Chinese)
- 3 王朝辉, 马旭, 贾瑞昌. 工作参数对超级稻育秧播种部件吸种性能的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 88 - 92.
Wang Zhaohui, Ma Xu, Jia Ruichang. Effects of working parameters on seed suction performance of seeder device for super hybrid rice seeds [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(8): 88 - 92. (in Chinese)
- 4 罗锡文, 蒋恩臣, 王在满, 等. 开沟起垄式水稻精量穴直播机的研制[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 52 - 56.
Luo Xiwen, Jiang Enchen, Wang Zaiman, et al. Precision rice hill-drop drilling machine [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(12): 52 - 56. (in Chinese)
- 5 夏俊芳, 许绮川, 王志山, 等. 2BFS-8 型水稻芽种播种施肥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(10): 44 - 47.
Xia Junfang, Xu Qichuan, Wang Zhishan, et al. Design of rice bud seed sowing and fertilizer machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 44 - 47. (in Chinese)
- 6 罗锡文, 谢方平, 区颖刚, 等. 水稻生产不同栽植方式的比较试验[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 136 - 139.
Luo Xiwen, Xie Fangping, Ou Yinggang, et al. Experimental investigation of different transplanting methods in paddy production [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(1): 136 - 139. (in Chinese)
- 7 罗锡文, 王在满, 蒋恩臣, 等. 型孔轮式排种器弹性随动护种带装置设计[J]. 农业机械学报, 2008, 39(12): 60 - 63.
Luo Xiwen, Wang Zaiman, Jiang Enchen, et al. Design of disassemble rubber guard device for cell wheel feed [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(12): 60 - 63. (in Chinese)
- 8 左彦军, 马旭, 玉大略, 等. 水稻芽种窝眼窄缝式气吸滚筒排种器流场模拟与试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(2): 58 - 62.
Zuo Yanjun, Ma Xu, Yu Dalu, et al. Flow field numerical simulation of suction cylinder-seeder for rice bud seed with socket slot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(2): 58 - 62. (in Chinese)
- 9 陈学庚, 卢勇涛. 气吸滚筒式棉花精量穴播器排种性能试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(8): 35 - 38.
Chen Xuegang, Lu Yongtao. Sowing-performance of air-suction cylindrical cotton precision dibbler [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(8): 35 - 38. (in Chinese)
- 10 赵湛, 李耀明, 陈进, 等. 气吸滚筒式排种器吸种过程的动力学分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 112 - 116.
Zhao Zhan, Li Yaoming, Chen Jin, et al. Dynamic analysis on seeds pick-up process for vacuum-cylinder seeder [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(7): 112 - 116. (in Chinese)
- 11 张晓慧, 宋建农. 针吸滚筒式水稻排种器设计[J]. 农业机械学报, 2009, 40(3): 69 - 71.

- Zhang Xiaohui, Song Jiannong. Design and research on rice precision needle-like vacuum seeder [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3): 69–71. (in Chinese)
- 12 韩豹, 吴文福, 王宏业. 水稻机摆钵育苗气吸滚筒式自动清堵排种器[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 96–99.
Han Bao, Wu Wenfu, Wang Hongye. Suction drum-type seed metering device with auto-cleaning block of transplanter for tray grown rice seedling [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(9): 96–99. (in Chinese)
- 13 李耀明, 赵湛, 陈进. 气吸振动式排种器吸种性能数值模拟与试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(10): 95–99.
Li Yaoming, Zhao Zhan, Chen Jin. Numerical simulation and experiment on the seeds pickup performance of precision air-suction seeder [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(10): 95–99. (in Chinese)
- 14 王树才, 许绮川. 气吹式排种器气流推种的研究与试验[J]. 农业机械学报, 1998, 29(增刊): 55–57.
Wang Shucai, Xu Qichuan. Airstream upon seeds in a pneumatic feed [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1998, 29(Supp.): 55–57. (in Chinese)
- 15 陶桂香, 衣淑娟, 李佐同, 等. 水浸控温式水稻种子浸种催芽设备温度场分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(10): 90–94.
Tao Guixiang, Yi Shujuan, Li Zuotong, et al. Temperature field analysis of water immersion temperature rice seed soaking germination equipment [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10): 90–94. (in Chinese)
- 16 袁月明, 吴明, 于恩中, 等. 水稻芽种物料特性的研究[J]. 吉林农业大学学报, 2003, 25(6): 682–684.
Yuan Yueming, Wu ming, Yu Enzhong, et al. A study on material characteristics of rice budded seeds [J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2003, 25(6): 682–684. (in Chinese)
- 17 李志伟, 李就好, 王付勇, 等. 水稻芽种拌干土粉处理对机播性能的影响[J]. 农业工程学报, 2001, 17(6): 73–76.
Li Zhiwei, Li Jiuhao, Wang Fuyong, et al. Influence of rice bud seed mixed with dry soil power on seeding performance [J]. Transactions of CSAE, 2001, 17(6): 73–76. (in Chinese)
- 18 张国忠, 臧英, 罗锡文, 等. 水稻气力式排种器导向型搅种装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(12): 1–8.
Zhang Guozhong, Zang Ying, Luo Xiwen, et al. Design and experiment of oriented seed churning device on pneumatic seed metering device for rice [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(12): 1–8. (in Chinese)
- 19 汤楚宙, 向卫兵, 谢方平. 气吹式杂交水稻精播排种器型孔型式的试验研究[J]. 农业工程学报, 1999, 15(1): 241–243.
Tang Chuzhou, Xiang Weibing, Xie Fangping. Experimental study on joles style of air-blowing precision seed-metering device [J]. Transactions of the CSAE, 1999, 15(1): 241–243. (in Chinese)
- 20 丛锦玲, 余佳佳, 曹秀英, 等. 油菜小麦兼用型气力式精量排种器[J]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 46–52.
Cong Jinling, Yu Jiajia, Cao Xiuying, et al. Design of dual-purpose pneumatic precision metering device for rape and wheat [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 46–52. (in Chinese)
- 21 左彦军, 马旭, 齐龙, 等. 窝眼窄缝式气吸滚筒排种装置的试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 141–144.
Zuo Yanjun, Ma Xu, Qi Long, et al. Seeding experiments of suction cylinder-seeder with socket-slot [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(11): 141–144. (in Chinese)
- 22 杨明韶. 农业物料流变学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- 23 李林. 气吸式排种器理论及试验的初步研究[J]. 农业机械学报, 1979, 10(3): 56–63.
Li Lin. A preliminary study on the theory and experimentation of the suction-type metering device for precision drill [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1979, 10(3): 56–63. (in Chinese)