doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.10.016

纤维基地膜侧开式滑切破膜播种单体设计与试验

侯守印　王升哲　竹筱歆　张继成　纪文义　陈海涛
(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 针对秸秆纤维基地膜覆膜播种时膜孔尺寸大、形状不规则、播种质量差等问题,设计了一种侧开式滑切破膜精量播种单体,通过对其作业过程的理论分析确定了破膜成穴器、强开凸轮和播种单体的结构和作业参数,建立了膜孔长度数学模型,明晰了相关因素与膜孔尺寸互作规律,确定了影响装置工作性能的主要参数及其取值范围。采用四因素五水平二次回归正交旋转中心组合试验方法,以作业速度、压膜弹簧刚度、破膜刀楔角、破膜刀开启相位角为试验因素,膜孔长度合格率、粒距合格指数、播种深度合格率为评价指标实施田间试验,应用 Design-Expert 8.0.6.1 软件进行试验数据处理,结果表明:各因素对膜孔长度合格率影响由大到小依次为破膜刀楔角、作业速度、破膜刀开启相位角、压膜弹簧刚度;各因素对粒距合格指数影响由大到小依次为作业速度、破膜刀开启相位角、破膜刀楔角、压膜弹簧刚度;各因素对播种深度合格率影响由大到小依次为作业速度、破膜刀开启相位角、破膜刀楔角、压膜弹簧刚度。当作业速度为 1.6~3.4 km/h,压膜弹簧刚度为 2 N/mm,破膜刀楔角为 30°,破膜刀开启相位角为 -2.4°~1.8°时,膜孔长度合格率大于 90%,粒距合格指数大于 90%,播种深度合格率大于 85%。

关键词: 秸秆纤维基地膜; 覆膜播种; 侧开式; 滑切破膜
中图分类号: S223.5　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2021)10-0155-11　　**OSID**:

Design and Experiment of Side-open Sliding Cutting Film Broken Seeding Unit Based on Straw Fiber Film

HOU Shouyin　WANG Shengzhe　ZHU Xiaoxin　ZHANG Jicheng　JI Wenyi　CHEN Haitao
(*College of Engineering*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*)

Abstract: Aiming at the problems of large size, irregular shape and poor seeding quality of film hole in straw fiber film mulching and seeding, a side-open sliding cutting film broken seeding unit was designed. Its working process was analyzed theoretically. The parameters of film hole forming device and forced opening cam were designed. The mathematical model of longitudinal length of film hole was established. The interaction law between related factors and film hole size was clarified, and the parameters of film hole forming device and forced opening cam were determined, and the main parameters that affected the performance of the device and the range of their values were discussed. Four factors and five levels of quadratic orthogonal rotation center combination test method was used to carry out the field test, with the operation speed, stiffness of pressed-film spring, wedge angle of film breaker, opening phase angle of film breaker as the test factors, and the film hole length qualified rate, grain spacing qualified index and sowing depth consistency as the evaluation indexes. Design-Expert 8.0.6.1 software was used to process the test data, and the results showed that the factors influencing the qualified rate of film hole length from large to small were the wedge angle of film breaker, operation speed, opening phase angle of film breaker and stiffness of pressed-film spring, the factors influencing the qualified index of grain distance from large to small were operation speed, opening phase angle of film breaker, wedge angle of film breaker and stiffness of pressed-film spring, and the factors influencing the consistency of sowing depth from large to small were operation speed, opening phase angle of film breaker, wedge angle of film breaker and

收稿日期: 2021-06-17　修回日期: 2021-07-10
基金项目: 财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(GARS-04)和黑龙江省"百千万"工程科技重大专项支撑行动计划项目(2020ZX17B01)
作者简介: 侯守印(1986—),男,高级工程师,博士,主要从事旱作农业装备研究,E-mail: houshouyin.cn@163.com
通信作者: 陈海涛(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械装备及生物质材料研究,E-mail: htchen@neau.edu.cn

stiffness of pressed-film spring. The results showed that the qualified rate of film hole length was more than 90%, the qualified index of grain spacing was more than 90%, and the uniformity of sowing depth was more than 85% under the conditions of operation speed of 1.6 ~ 3.4 km/h, stiffness of pressed-film spring of 2 N/mm, wedge angle of film breaker of 30°, and opening phase angle of film breaker of −2.4° ~ 1.8°. The research results can provide theoretical and technical support for precision sowing on straw fiber film.

Key words: straw fiber film; mulching sowing; side opening; sliding cutting and breaking film

0 引言

秸秆纤维基地膜以农作物秸秆为原料,通过挤压、揉搓、爆破等物理方式制取纤维,采用特殊造纸工艺制造成膜[1-2],其不仅具有节水保墒、抑草增温、提质增产等优点[3-5],且作物收获之前可被完全降解,既实现了地力培肥和秸秆高值利用,又解决了秸秆焚烧污染环境、塑料地膜残留破坏土壤结构、再处理增加成本等问题[6-7]。

机械化膜上播种是高质、高效覆膜播种技术的核心。目前,国内外膜上播种装置根据工作原理主要分为滚轮式和直插式[8-9]。滚轮式膜上播种装置作业时成穴器在自重、牵引力和土壤阻力共同作用下实现转动、破膜、成穴和播种,地膜受成穴器结构和运动规律的影响,易产生撕膜和挑膜,造成膜孔炸裂、土壤扰动大、种子着床位置不精准[10]。同时,由于塑料地膜韧性较高,成穴器与地膜作用时膜孔受力方向产生的塑性形变造成地膜受力错移,导致膜孔与穴孔地表不同位,作物出苗后会出现弱苗、伤苗和死苗等现象[11-13]。直插式膜上播种装置采用成穴器相对地表垂直插入和拔出的方式实现破膜和成穴,并通过创新机构实现零速投种,具有土壤扰动小、播种质量高等优势,避免了膜孔破损、膜孔与穴孔错位等问题[14-16],由于其机构设计与工作原理导致作业速度较低。上述两种膜上播种装置主要针对塑料地膜,而秸秆纤维基地膜为干湿抗张力强度及耐破度较高的脆性材料,在力学性能上表现为各项异性[17],存在抗拉强度与韧性较差等问题,通过预试验表明,采用上述方式进行秸秆纤维基地膜膜上播种会因执行部件对地膜冲击造成膜孔尺寸较大、形状不规则。

综上所述,本文针对水稻秸秆纤维基地膜设计一种侧开式滑切破膜精量播种单体。通过对其工作过程进行理论分析确定装置关键部件结构参数,通过构建膜孔长度数学模型,确定影响装置工作性能的主要参数及其取值范围,采用响应曲面法进行关键参数组合优化试验,以期为秸秆纤维基地膜覆膜播种技术提供理论与装备支持。

1 结构与工作原理

侧开式滑切破膜精量播种单体结构如图 1,主要由仿形轮总成、播深调节装置、破膜成穴舵轮总成、指夹式排种器、压膜弹簧、展膜轮总成、平行四杆机构、机架、同轴异速调比箱、凸轮支架、强开凸轮、清土毛刷等零部件组成。平行四杆机构、破膜成穴舵轮总成、展膜轮总成与机架铰接,其余零部件固装于机架。指夹式排种器与破膜成穴舵轮总成同轴布置。侧开式滑切破膜精量播种单体(简称播种单体)既可以单独作业,亦可与覆膜机联合作业。工作原理如图 2 所示,由动力机械牵引播种单体匀速运动,破膜成穴舵轮总成周向均匀布置若干破膜成穴器,在牵引力、播种单体重力和土壤阻力共同作用下绕中心逆时针旋转,并通过同轴异速调比箱驱动指夹式排种器排种。

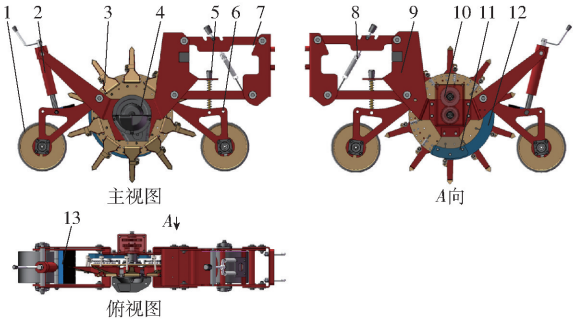


图 1 侧开式滑切破膜精量播种单体结构图

Fig. 1 Structure diagram of side-open sliding cutting film precision seeding unit

1. 仿形轮总成 2. 播深调节装置 3. 破膜成穴舵轮总成 4. 指夹式排种器 5. 压膜弹簧 6. 展膜轮总成 7. 平行四杆机构 8. 四杆仿形弹簧 9. 机架 10. 同轴异速调比箱 11. 凸轮支架 12. 强开凸轮 13. 清土毛刷

破膜成穴器上的破膜刀最先与地膜接触,由于破膜刀与地膜接触面积较小,并具有滑切效果,膜孔不会出现撕裂、炸裂现象。滑切破膜后随破膜成穴器继续旋转,在单体重力作用下贯入土壤中构建穴孔,当破膜成穴器接近垂直于地表时,指夹排种器将种子投入成穴器腔体内,同时,与破膜成穴器组配的推杆端部滚轮进入强开凸轮推程运动角范围,破膜刀逐渐侧向开启,进入远休止角范围时,破膜刀完全

开启，其内种子落入穴孔内。破膜成穴器继续旋转，经过仿形轮总成上装配的清土毛刷完成腔体内残留土壤清理，清理后滚轮依次进入回程运动角和近休止角范围，破膜刀闭合，至此，完成破膜、成穴和播种过程。

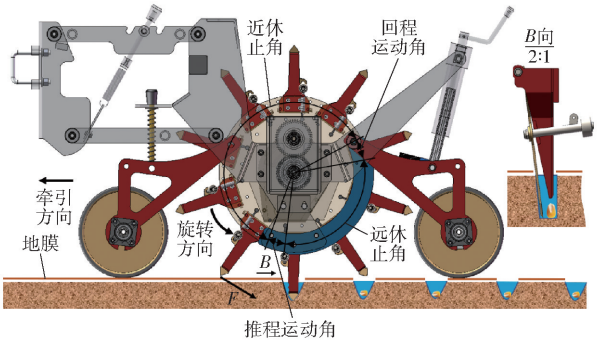


图 2　播种单体工作原理图

Fig. 2　Working principle diagram of seeding unit

工作过程中，展膜轮总成对地膜产生与牵引方向同向水平摩擦力，可平衡破膜成穴器破膜时对地膜产生的反向力，减小地膜纵向动态拉力不平衡导致的地膜错移，可解决膜孔与穴孔错移问题，同时，在展膜轮总成与仿形轮总成共同作用下，两轮之间地膜始终处于拉伸状态，破膜刀出土过程滑切亦可有效降低挑膜导致膜孔破坏或膜面错移。破膜成穴器为侧开式和后仿形结构，并且破膜刀侧开启推力减小，保证了精准、适时投种。前后双轮布置增大了单体与膜面接触面积，有效降低工作过程土壤下陷量，提高了播深精度和稳定性。

2　播种单体受力分析及参数确定

秸秆纤维基地膜韧性较差，易造成膜孔撕裂破损。因此，本文采用仿形轮结构控制播种深度。播种单体通过平行四杆机构和仿形轮总成配合，保证作业时仿形轮与破膜成穴器投种时竖直方向相对位置恒定不变以保证播深恒定。工作过程受力分析如图 3 所示，因破膜成穴器采用滑切方式破膜、作业土壤经过精细整地，且播种深度较浅，忽略破膜成穴器受力，通过建立 xoy 平面内力学平衡方程可得地表对仿形轮竖直方向支反力为

$$F_2=\frac{T\sin(\alpha+\beta)+G\cos\alpha-F_1(\mu\sin\alpha+\cos\alpha)}{\mu\sin\alpha+\cos\alpha} \tag{1}$$

其中

$$F_1=k(x+x_0)+G_0$$

$$T=K(X+X_0)$$

$$\beta=\arctan\frac{h-l_0\sin\alpha}{l_0\cos\alpha}$$

式中　F_2——地表对仿形轮竖直方向支反力，N

F_1——地表对展膜轮竖直方向支反力，N

G——播种单体总重，N

T——四杆仿形弹簧拉力，N

μ——仿形轮、展膜轮与地膜滑动摩擦因数

β——四杆仿形弹簧水平夹角，(°)

k——压膜弹簧刚度，N/mm

x——压膜弹簧压缩量，mm

x_0——压膜弹簧初始压缩量，mm

G_0——展膜轮总成总重，N

K——四杆仿形弹簧刚度，N/mm

X——四杆仿形弹簧伸长量，mm

X_0——四杆仿形弹簧初始伸长量，mm

h——四杆纵向高度，mm

l_0——四杆弹簧安装点到铰接点距离，mm

α——牵引角，(°)

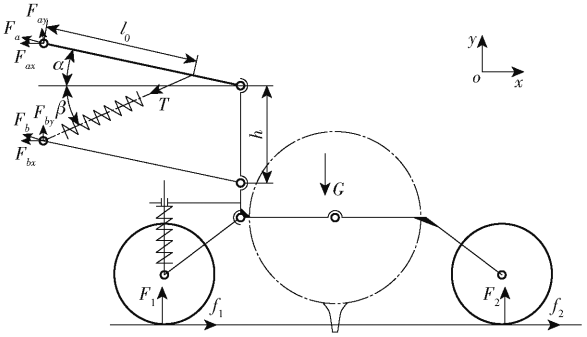


图 3　播种单体受力简图

Fig. 3　Force diagram of seeding unit

由式(1)可知，地表对仿形轮竖直方向的支反力主要与播种单体总重、弹簧刚度、弹簧初始增量、四杆结构参数、地表对展膜轮竖直方向支反力、牵引角有关。地表对仿形轮竖直方向支反力即仿形轮对地膜竖直方向反作用力，作用力过大会导致垄形变形严重与地膜破损，而作用力过小又会影响仿形效果，并且仿形轮易出现滑移，导致地膜错移，影响覆膜和播种质量。

仿形轮在四杆仿形弹簧拉力和播种单体重力作用下对覆膜后土壤竖直方向进行重塑，土壤会产生一定下陷量，当地表对仿形轮竖直方向支反力为最大值时，土壤下陷量为最大值，二者间关系为[18]

$$F_{\max}=\frac{5Z_{\max}\lambda bD^{1/2}}{6\times10^{3.5}} \tag{2}$$

其中

$$\lambda=(10+0.27b)\eta$$

式中　$F_{\max}$——地表对仿形轮竖直方向最大支反力，N

$Z_{\max}$——土壤最大下陷量，mm

λ——土壤特性相关因数

b——仿形轮宽度，mm

D——仿形轮直径，mm

η——土壤性质相关参数

仿形轮与地膜接触面积越大,相同受力条件下,地膜产生的拉应力越小,抗破坏能力越强[18],而接触面积由仿形轮宽度和直径决定。本次以玉米650 mm垄作栽培模式的垄上覆膜播种为研究对象,垄顶平面宽度260 mm[19],仿形轮宽度过大容易破坏垄形,考虑播种机作业时左右移动,设计最大60 mm余量[20],仿形轮宽度取值为200 mm。仿形轮直径越大,地膜对其水平摩擦力产生的转矩越大,有利于其实现纯滚动,但尺寸受单体结构限制不能过大,初步设计取值为300 mm。地膜受力时需满足

$$\sigma_{\max}=\frac{F_{\max}}{S}\leqslant[\sigma] \tag{3}$$

其中

$$S=\frac{1}{2}bD\arccos\frac{D-2Z_{\max}}{D}$$

式中 $\sigma_{\max}$——地膜所受最大应力,kPa

S——仿形轮与地膜接触面积,mm^2

$[\sigma]$——水稻秸秆纤维基地膜许用极限应力,kPa

参考相关资料,精细整地黑土土壤性质相关参数为1.01[18],为减小垄高损失量设计土壤最大下陷量为8 mm,将已知条件代入式(2)、(3),可得仿形轮所受最大力为472 N,水稻秸秆纤维基地膜许用极限应力为100 kPa[21],此时地膜应力为47.9 kPa,满足强度要求。

展膜轮需完成展膜,并施加张紧力避免破膜成穴器破膜过程的地膜错移。展膜轮对地膜竖直方向作用力需小于仿形轮对地膜竖直方向反作用力,依据前文分析设计土壤最大下陷量为1.5 mm,结构尺寸与仿形轮相同,将已知条件代入式(3),可得地表对展膜轮竖直支反力为89 N。压膜弹簧选用刚度1.97 N/mm,丝径1.5 mm,中径30 mm,自由长度230 mm的圆柱螺旋压缩弹簧,由式(1)可知压膜弹簧理论最大压缩量为38 mm,设计初始压缩量为15 mm。

为提高展膜轮和仿形轮作业时的水平摩擦力,选定展膜轮与仿形轮轮面材质为橡胶,整体结构1.5 kg,经测量可知与地膜滑动摩擦因数为0.1。将已知条件代入式(1),播种单体总重小于522 N,总重过小易造成破膜成穴器入土困难,参考常规滚轮式成穴机构考虑该播种单体膜上作业,取300 N。

平行四杆尺寸对播种单体工作性能具有重要影响。平行四杆越长仿形效果越好,四杆纵向尺寸越大,单体刚度和稳定性越好。受整机结构和质心影响,平行四杆结构不能过大,选取平行四杆长度为300 mm,四杆纵向高度为180 mm[22-24]。由于仿形轮在覆膜垄上作业,作业环境良好,平行四杆上下最大仿形量均取50 mm,可得牵引角工作范围为-9.6°~9.6°。四杆仿形弹簧安装点到铰接点距离越大稳定性越好,但距离过大易造成其伸长量过大,导致平行四杆上下仿形量减小,仿形能力减弱,参考相关资料对该机构进行动态模拟,本次设计为250 mm[25],将已知条件代入式(1)得四杆仿形弹簧拉力最大值为376 N。四杆仿形弹簧选用刚度2.13 N/mm,丝径5 mm,中径40 mm,自由长度为268 mm的圆柱螺旋拉伸弹簧,根据余弦定理可知四杆仿形弹簧理论最大拉伸量为64.5 mm,下仿形极限位置四杆仿形弹簧拉伸量为13.6 mm。

3 执行部件与控制机构设计

破膜成穴器是播种单体的重要执行部件之一,具有携种、破膜、成穴和投种功能,其结构及布置如图4所示,由成穴器腔体、破膜刀、转轴组成,通过调整螺钉固定在安装盘上,安装盘上的安装孔为径向可调长条孔,通过径向位置调整可改变成穴器回转直径,实现播种粒距微调,同时,安装盘周向均布若干安装孔,可根据农艺要求增加或减少成穴器数量,实现播种粒距粗调。

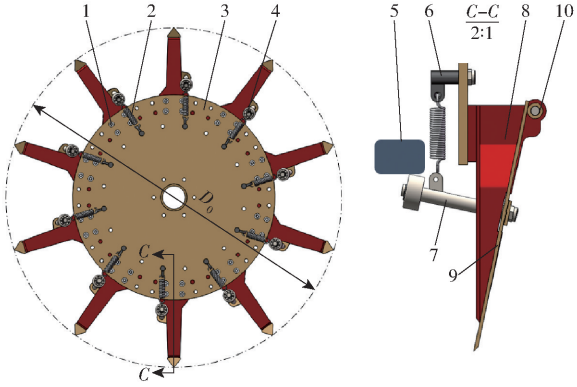


图4 执行部件与控制机构总体布置

Fig. 4 General layout of actuator and control mechanism

1. 调整螺钉 2. 复位弹簧 3. 安装盘 4. 滚轮 5. 强开凸轮 6. 拉杆 7. 推杆 8. 成穴器腔体 9. 破膜刀 10. 转轴

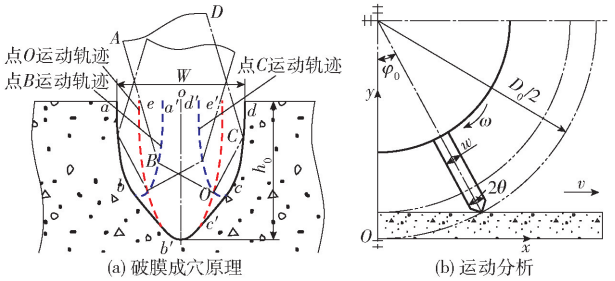
强开凸轮、推杆、滚轮与复位弹簧等零部件共同组成了破膜成穴器投种控制机构,推杆固定连接在破膜刀侧面,端部安装滚轮,复位弹簧使破膜刀与成穴器腔体保持常闭状态,当破膜成穴器投种时,强开凸轮通过滚轮对推杆施加作用力克服弹簧拉力和土壤侧向阻力,强制破膜刀开启,使位于成穴腔体内的种子投入种穴。

3.1 破膜成穴器设计

3.1.1 滑切破膜运动分析

破膜成穴器工作原理如图5,以单个破膜成穴器为研究对象。破膜刀端点 O 最先与地膜接触,以余摆线轨迹完成滑切破膜,破膜成穴器在直线和旋

转复合运动条件下向前下方运动贯入土壤，OC 面开始挤压土壤形成 de' 段膜孔并逐渐扩大膜孔尺寸，当点 C 位于地表下时，依次由点 C、面 OC、点 O 挤压土壤形成 cd 段、cc' 段、$b'c'$ 段穴孔轮廓。破膜成穴器拔出过程，依次由面 BO、点 B 挤压土壤形成 bb' 段、ab 段穴孔轮廓，由面 BO 完成出土滑切破膜。当破膜成穴器完全脱离土壤，破膜成穴过程结束。



(a) 破膜成穴原理　　(b) 运动分析

图 5　破膜成穴原理图

Fig. 5　Schematic of breaking film and building hole

膜孔长度是衡量破膜成穴器工作质量重要指标，穴孔可由 $abb'c'cd$ 轮廓曲线表示，而地表与穴孔轮廓曲线交点 a 和 d 之间距离即为理论膜孔长度，主要由成穴器点 B 和点 C 运动轨迹决定，建立如图 5b 所示直角坐标系，可得成穴器点 C 运动轨迹方程为

$$\begin{cases} x_c = \dfrac{D_0(\sin\varphi_0 - \sin(\varphi_0 - \varphi))}{2} - \dfrac{(D_0 - 2h_0)\varphi\pi}{360} + \dfrac{w\sin(\varphi_0 - \varphi + \theta)}{2\sin\theta} \\ y_c = \dfrac{D_0(1 - \cos(\varphi_0 - \varphi))}{2} - \dfrac{w\sin(\varphi_0 - \varphi + \theta)}{2\sin\theta} \end{cases} \tag{4}$$

式中　x_c——点 C 在 x 方向上的位移，mm

y_c——点 C 在 y 方向上的位移，mm

D_0——成穴器回转直径，mm

h_0——成穴深度，mm

φ——点 O 旋转角，(°)

φ_0——点 O 初始角，(°)

θ——破膜刀楔角，(°)

w——成穴器投种口宽度，mm

同理，可建立成穴器点 B 运动轨迹方程，由点 B 和点 C 运动轨迹方程可得破膜成穴器入土过程点 B 和出土过程点 C 坐标，两点 x 轴坐标差的绝对值即为膜孔长度理论值，其数学表达式为

$$W = \frac{(D_0 - 2h_0)(\varphi_0 - \varphi)\pi}{180} - D_0\sin(\varphi_0 - \varphi) + \frac{w\sin(\varphi_0 - \varphi + \theta)}{\sin\theta} \tag{5}$$

其中

$$\varphi = \frac{1}{2}\arcsin\frac{D_0\cos\varphi_0\sin\theta}{\sqrt{(D_0\sin\theta)^2 + w^2 - 2D_0w(\sin\theta)^2}}$$

$$\varphi_0 = \arccos\frac{D_0 - 2h_0}{D_0}$$

式中　W——膜孔长度，mm

由式(5)可知，成穴深度恒定时，膜孔长度随成穴器回转直径、破膜刀楔角和成穴器投种口宽度的增大而增大。

3.1.2　成穴器结构设计

成穴器回转直径由播种粒距、播种深度、成穴器数量共同决定，可表示为

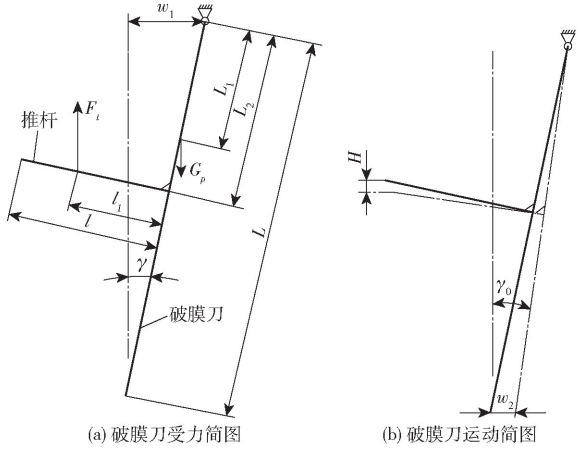
$$D_0 = \frac{ns_0}{\pi} + 2h_0 \tag{6}$$

式中　n——破膜成穴器数量

s_0——播种粒距，mm

破膜成穴器在牵引力和土壤阻力作用下滚动前进，为提高成穴、播种质量和作业速度，成穴器回转直径在结构和动力配置允许条件下选择较大值。参考相关农艺要求，玉米播种深度为 30 ~ 50 mm，侧开式破膜成穴器入土部分结构尺寸较小，投种过程易出现回土导致播种深度不稳定且随播种深度增加愈发严重，玉米播种深度选取最大值为 50 mm[26]。成穴器数量为 10，播种粒距 230 mm 条件下得成穴器回转直径为 832.1 mm，本次设计成穴器回转直径为 830 mm。不同栽培模式玉米播种量各异，在成穴器数量分别为 8 和 10 条件下，通过调整破膜成穴器径向尺寸，由式(6)可知，能够实现播种粒距 200、230、260、290、320 mm。

为了降低强开凸轮磨损、减小破膜成穴器闭合时产生冲击和振动，复位弹簧初始预紧力仅需平衡破膜刀重力，使其在近休止角范围保持常闭状态，闭合时破膜刀受力简图如图 6a 所示。



(a) 破膜刀受力简图　　(b) 破膜刀运动简图

图 6　破膜刀受力及运动简图

Fig. 6　Force and motion diagrams of film breaking knife

通过静力学平衡方程可得复位弹簧拉力为

$$F_t = \frac{\varepsilon G_p L_1 \sin\gamma\cos\gamma}{l_1 + (L_2 - l_1\tan\gamma)\sin\gamma\cos\gamma} \tag{7}$$

其中 $$\gamma = \arcsin\frac{w_1}{L}$$

式中 F_t——复位弹簧拉力,N

ε——安全系数

G_p——破膜刀重量,N

L_1——破膜刀质心到铰接点距离,mm

γ——破膜刀倾角,(°)

l_1——弹簧安装点到破膜刀距离,mm

L_2——推杆固定点到铰接点距离,mm

w_1——破膜成穴器入口宽度,mm

L——破膜刀长度,mm

破膜成穴器入口宽度由排种器投种口宽度决定,本文选用美国精密种植公司(Precision Planting)生产的指夹式排种器,其投种口宽度为 30 mm,破膜成穴器入口宽度设计为 35 mm。结构允许条件下,为减小复位弹簧所受拉力,破膜刀质心到铰接点距离选择较小值,弹簧安装点到破膜刀距离、推杆长度和推杆固定点到铰接点距离选择较大值,各设计值分别为 70、90、80、100 mm。破膜刀长度越大,破膜刀倾角就越小,可有效减小入土阻力和膜孔宽度,以安装 10 个破膜成穴器且播种粒距为 200 mm 所得成穴器回转直径最小时为极限条件,破膜刀长度设计为 200 mm,破膜刀宽度设计为 21 mm,破膜刀材料选取 3 mm 厚 65Mn 板材,焊接后整体调质 HRC 为 48~57,质量为 0.35 kg,安全系数选取 3[27]。成穴器投种口宽度和开口宽度受玉米籽粒几何尺寸限制,为避免投种过程卡种,宽度均需大于玉米籽粒长轴,对主栽玉米籽粒几何尺寸统计分析,玉米籽粒长轴尺寸小于 15 mm,成穴器腔体壁厚 2 mm,本次设计成穴器投种口宽度为 25 mm,开口宽度为 15 mm。将已知条件代入式(7)可得破膜成穴器闭合所需拉力为 1.2 N。根据复位弹簧安装空间结构,选取 HP140-040-1.0 型标准拉簧。

3.2 强开凸轮设计

滚轮、推杆、破膜刀、转轴、复位弹簧和强开凸轮共同构成了力锁紧空间摆动滚子主动件盘型凸轮机构,强开凸轮结构及组配关系如图 7 所示,强开凸轮固定在机架上,其它零部件与安装盘组配,并随其做旋转运动。当滚轮进入推程运动角范围时,推杆和破膜刀在强开凸轮作用下克服复位弹簧拉力绕转轴旋转,破膜刀逐渐开启,滚轮进入远休止角范围时,成穴器完全开启,滚轮进入回程运动角范围时,破膜刀逐渐闭合,进入近休止角范围时完全闭合,其中强开凸轮结构参数及轮廓曲线对成穴器工作性能具有重要影响。

由图 6b 可知,工作过程推杆端部竖直方向移动距离即为滚轮在安装盘径向位移,可得滚轮行程数学表达式为

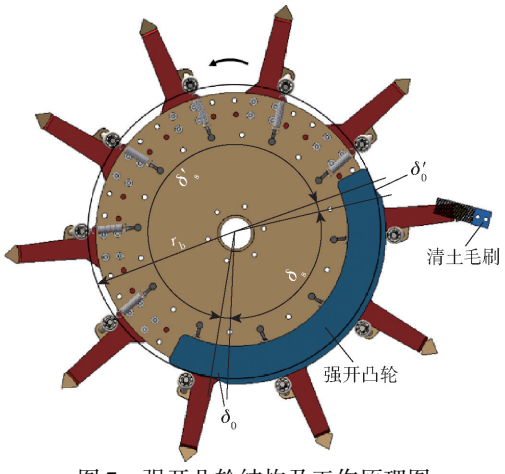


图 7 强开凸轮结构及工作原理图

Fig. 7 Forced opening cam structure and working principle diagram

$$H = \sqrt{L_2^2 + l^2}\left(\cos(\gamma_0 + \xi) - \cos(\gamma + \xi)\right) \quad (8)$$

其中 $$\xi = \arctan\frac{l}{L_2}$$

$$\gamma_0 = \arcsin\frac{w_1 - w_2}{L}$$

式中 H——滚轮行程,mm

l——推杆长度,mm

γ_0——破膜刀开启倾角,(°)

ξ——推杆压力角,(°)

w_2——成穴器开口宽度,mm

式(8)中各参数在破膜成穴器设计过程均已确定,将已知参数值代入得滚轮行程为 7 mm。根据破膜成穴器与安装盘组配关系,确定强开凸轮基圆半径为 260 mm。

由于破膜成穴器在土壤中工作时间较短,破膜刀在投种位置需要较短时间内开启保证适时投种,根据预试验确定本次设计推程运动角和回程运动角均为 5°,根据清土毛刷配置位置,远休止角为 107°,近休止角为 243°。滚轮行程相对于基圆半径较小,为避免强开凸轮轮廓曲线失真,同时,降低推程和回程过程滚轮与强开凸轮刚性冲击,本次设计滚轮径向运动学方程选取余弦加速度运动规律,可得推程运动滚轮中心径向位移、速度和加速度方程为

$$\begin{cases} s = \dfrac{H}{2}\left(1 - \cos\dfrac{\pi\delta}{\delta_0}\right) \\ v = \dfrac{90H\omega}{\delta_0}\sin\dfrac{\pi\delta}{\delta_0} \\ a = \dfrac{H(180\omega)^2}{2\delta_0^2}\cos\dfrac{\pi\delta}{\delta_0} \end{cases} \quad (9)$$

式中 s——推程运动滚轮中心径向位移,mm

v——推程运动滚轮速度，m/s

a——推程运动滚轮加速度，m/s^2

δ——滚轮转角，(°)

δ_0——推程运动角，(°)

ω——成穴器旋转角速度，rad/s

由式(9)可知推程运动最大速度为 0.43 m/s，最大加速度为 51.6 m/s^2，滚轮选用 GB/T 296—94 标准的 3200A 型双列角接触球轴承，质量为 0.05 kg，可得推程运动开始和结束时刻滚轮对强开凸轮最大冲击力为 2.58 N，满足设计要求。在确定了凸轮形式、结构尺寸、从动件运动规律基础上建立强开凸轮理论轮廓曲线方程为

$$\begin{cases} x_o = (r_b + s)\sin\delta \\ y_o = (r_b + s)\cos\delta \end{cases} \tag{10}$$

式中　x_o——滚轮中心点在 x 方向上的位移，mm

y_o——滚轮中心点在 y 方向上的位移，mm

r_b——强开凸轮基圆半径，mm

假设滚子外圆与强开凸轮实际轮廓任意接触点为 m，通过相关几何关系建立点 m 在 xoy 直角坐标系中坐标函数为

$$\begin{cases} x_m = x_o + r_0 \dfrac{\dfrac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}\delta}\cos\delta - x_o}{\sqrt{\left(\dfrac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}\delta}\right)^2 + (s + r_b)^2}} \\ y_m = y_o + r_0 \dfrac{\dfrac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}\delta}\sin\delta - y_o}{\sqrt{\left(\dfrac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}\delta}\right)^2 + (s + r_b)^2}} \end{cases} \tag{11}$$

式中　x_m——接触点 m 在 x 方向上的位移，mm

y_m——接触点 m 在 y 方向上的位移，mm

r_0——滚轮半径，mm

将式(9)、(10)代入式(11)中可构建强开凸轮轮廓，通过调整强开凸轮与机架相对转角实现破膜成穴器在不同位置开启，即破膜成穴器既可在竖直位置时开启，亦可提前或滞后开启，以适应不同作业条件，完成投种作业。

任意接触点 m 处强开凸轮压力角可表示为

$$\phi = \arctan\frac{\dfrac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}\delta}}{s + r_b} \tag{12}$$

式中　ϕ——任意接触点 m 处强开凸轮压力角，(°)

将式(9)代入式(12)中，求得压力角最大为 7.85°，小于许用压力角 30°[28]，满足设计要求。

4　参数试验优化

4.1　试验材料与仪器设备

以东北农业大学研制的水稻秸秆纤维地膜为研究对象，铺设宽度 1 200 mm，厚度(0.17 ± 0.02) mm，干抗张力大于 32 N、湿抗张力大于 12 N、耐破度大于 100 kPa；以“德美亚 1 号”玉米种子为播种试验样本，平均长 × 宽 × 高为 12.37 mm × 9.35 mm × 4.98 mm。试验于 2020 年 5 月 10—14 日在东北农业大学农学试验田实施，试验地垄顶、垄底和垄高尺寸分别为 260、420、100 mm，土壤湿度 21%，土壤坚实度 495 kPa。

试验仪器与装置：欧豹 704 型拖拉机、侧开式滑切破膜播种单体、SZ－3 型土壤硬度计、SU－LB 型土壤水分测定仪、数码摄像机、直尺、卷尺等。试验装置如图 8 所示。



图 8　田间试验

Fig. 8　Field test

4.2　试验方案

采用四因素五水平二次回归正交旋转中心组合试验方法，按照 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》、NY/T 1143—2006《播种机质量评价技术规范》和 NY/T 987—2006《铺膜穴播机作业质量》，以膜孔长度合格率 Y_1、粒距合格指数 Y_2、播种深度合格率 Y_3 为目标函数实施试验。通过预试验发现作业速度超过 5 km/h 时播种单体的破膜成穴器出土过程挑膜现象严重，选取作业速度范围为 1～5 km/h；根据式(1)确定压膜弹簧刚度取值范围为 1～3 N/mm；膜孔长度随破膜刀楔角减小而减小，受成穴器结构和破膜刀刚度限制，试验取值范围选取 15°～45°；破膜刀开启相位角决定投种时间，并对土壤扰动和膜孔形状具有一定影响，以破膜成穴器垂直地表时为破膜刀开启相位角零水平，提前开启为负值，滞后开启为正值，选取破膜刀开启相位角取值范围为 －5°～5°。试验因素编码如表 1 所示，试验方案如表 2 所示。

表 1　试验因素编码

Tab. 1　Factors and codes of test

编码	因素			
	作业速度 v/(km·h^{-1})	压膜弹簧刚度 k/(N·mm^{-1})	破膜刀楔角 θ/(°)	破膜刀开启相位角 τ/(°)
2	5	3.0	45.0	5.0
1	4	2.5	37.5	2.5
0	3	2.0	30.0	0
－1	2	1.5	22.5	－2.5
－2	1	1.0	15.0	－5.0

4.3 试验结果与分析

运用四因素五水平二次回归正交旋转中心组合试验设计方法[29],共实施 36 组处理,每组处理重复 3 次,取平均值,试验结果如表 2 所示。

表 2 试验方案与结果

Tab. 2 Test design and results

序号	因素				评价指标/%		
	v/(km·h^{-1})	k/(N·mm^{-1})	θ/(°)	τ/(°)	膜孔长度合格率 Y_1	粒距合格指数 Y_2	播种深度合格率 Y_3
1	2	1.5	22.5	-2.5	90.0	87.5	81.5
2	4	1.5	22.5	-2.5	86.7	84.0	75.5
3	2	2.5	22.5	-2.5	90.0	87.5	82.0
4	4	2.5	22.5	-2.5	86.7	84.5	76.5
5	2	1.5	37.5	-2.5	83.3	87.0	83.5
6	4	1.5	37.5	-2.5	76.7	83.0	77.5
7	2	2.5	37.5	-2.5	83.3	87.0	84.5
8	4	2.5	37.5	-2.5	73.3	85.0	85.5
9	2	1.5	22.5	2.5	86.7	90.0	85.5
10	4	1.5	22.5	2.5	83.3	87.5	79.5
11	2	2.5	22.5	2.5	86.7	90.0	85.0
12	4	2.5	22.5	2.5	80.0	89.5	80.0
13	2	1.5	37.5	2.5	80.0	88.5	86.5
14	4	1.5	37.5	2.5	73.3	87.5	80.0
15	2	2.5	37.5	2.5	80.0	89.0	88.0
16	4	2.5	37.5	2.5	70.0	87.0	87.5
17	1	2.0	30.0	0	86.7	94.5	90.0
18	5	2.0	30.0	0	73.3	79.5	74.0
19	3	1.0	30.0	0	90.0	91.0	91.5
20	3	3.0	30.0	0	90.0	91.0	91.5
21	3	2.0	15.0	0	96.7	93.5	87.5
22	3	2.0	45.0	0	66.7	92.0	91.0
23	3	2.0	30.0	-5.0	86.7	85.5	80.5
24	3	2.0	30.0	5.0	80.0	86.5	88.5
25	3	2.0	30.0	0	93.3	92.0	92.5
26	3	2.0	30.0	0	90.0	91.0	91.0
27	3	2.0	30.0	0	93.3	92.0	93.0
28	3	2.0	30.0	0	93.3	91.5	85.5
29	3	2.0	30.0	0	90.0	89.5	87.5
30	3	2.0	30.0	0	90.0	92.0	91.0
31	3	2.0	30.0	0	90.0	92.5	90.5
32	3	2.0	30.0	0	93.3	90.0	91.0
33	3	2.0	30.0	0	93.3	93.0	93.0
34	3	2.0	30.0	0	93.3	87.5	92.0
35	3	2.0	30.0	0	90.0	92.0	91.0
36	3	2.0	30.0	0	90.0	93.0	93.0

应用 Design-Expert 8.0.6.1 软件对试验结果进行方差分析,结果如表 3 所示。在置信度为 0.05 下进行 F 检验,剔除不显著项后得到回归模型为

$$\begin{cases} Y_1 = 50.25 + 16.16v + 1.32\theta - 0.72\tau - 3.22v^2 - \\ \quad 0.01\theta^2 - 0.38\tau^2 \\ Y_2 = 91.06 - 2.02v + 0.43\tau - 1.42v^2 - 0.27\tau^2 \\ Y_3 = 47.99 + 15.01v + 0.71\theta + 0.69\tau - 2.96v^2 - \\ \quad 0.01\theta^2 - 0.37\tau^2 \end{cases} \tag{13}$$

对于膜孔长度合格率,压膜弹簧刚度无显著性影响,其余因素均具有极显著性影响,影响由大到小为破膜刀楔角、作业速度、破膜刀开启相位角、压膜弹簧刚度;对于粒距合格指数,作业速度具有极显著性影响,破膜刀开启相位角具有显著性影响,其余因素无显著性影响,影响由大到小为作业速度、破膜刀开启相位角、破膜刀楔角、压膜弹簧刚度;对于播种深度合格率,作业速度具有极显著性影响,破膜刀楔角和破膜刀开启相位角具有显著性影响,压膜弹簧刚度无显著性影响,影响由大到小为作业速度、破膜刀开启相位角、破膜刀楔角、压膜弹簧刚度。

(1)因素对膜孔长度合格率影响分析

如图 9a 所示,压膜弹簧刚度与破膜刀楔角为设计中心点时,膜孔长度合格率随作业速度增大呈先增大后减小趋势,当作业速度较小时,通过对膜孔形状观察,膜孔尺寸增大造成破膜刀出土时挑膜,且由于破膜刀线速度较小,出土时对地膜滑切效果较差,挑膜现象明显,导致膜孔长度增大;当作业速度较大时,破膜刀运动余摆线纵向尺寸增大,导致膜孔长度增大;膜孔长度合格率随破膜刀开启相位角增大呈先增大后减小趋势,当破膜刀开启相位角较小或较大时,破膜刀提前开启或滞后关闭,成穴器入土和出土过程横向尺寸均为最大值,导致地膜横向变形出现撕裂现象,膜孔长度增大。

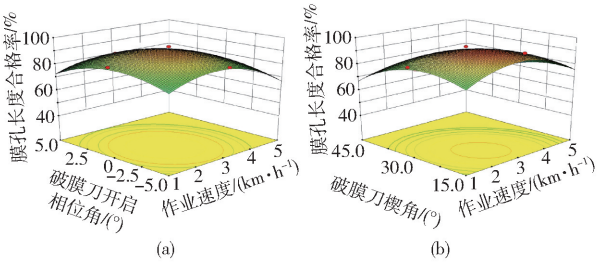


图 9 因素交互作用对膜孔长度合格率影响的响应曲面

Fig. 9 Response surfaces of influence of interaction of factors on film hole length qualified rate

如图 9b 所示,压膜弹簧刚度与破膜刀开启相位角为设计中心点时,膜孔长度合格率随破膜刀楔角增大呈先增大后减小趋势,主要是由于在破膜刀长度和宽度一定时,随破膜刀楔角减小滑切刃口长度增大,避免了成穴器出土时成穴器腔体与地膜接触出现撕裂现象,但当破膜刀楔角过小时,破膜刀出土

表 3　方差分析

Tab. 3　ANOVA

变异来源	膜孔长度合格率					粒距合格指数					播种深度合格率				
	平方和	自由度	均方	F	P	平方和	自由度	均方	F	P	平方和	自由度	均方	F	P
模型	1 845. 25	14	131. 80	25. 29	<0. 000 1	293. 77	14	20. 98	4. 53	0. 001 1	869. 08	14	62. 08	6. 48	<0. 000 1
v	245. 76	1	245. 76	47. 16	<0. 000 1	98. 01	1	98. 01	21. 17	0. 000 2	184. 26	1	184. 26	19. 24	0. 000 3
k	4. 17	1	4. 17	0. 80	0. 381 4	0. 84	1	0. 84	0. 18	0. 673 8	15. 84	1	15. 84	1. 65	0. 212 4
θ	706. 33	1	706. 33	135. 54	<0. 000 1	3. 76	1	3. 76	0. 81	0. 377 7	49. 59	1	49. 59	5. 18	0. 033 5
τ	78. 48	1	78. 48	15. 06	0. 000 9	27. 09	1	27. 09	5. 85	0. 024 7	71. 76	1	71. 76	7. 49	0. 012 3
残差	109. 44	21	5. 21			97. 23	21	4. 63			201. 15	21	9. 58		
失拟	76. 77	10	7. 68	2. 58	0. 067 5	68. 56	10	6. 86	2. 63	0. 064 0	143. 23	10	14. 32	2. 72	0. 057 9
误差	32. 67	11	2. 97			28. 67	11	2. 61			57. 92	11	5. 27		
总和	1 954. 69	35				391. 00	35				1 070. 22	35			

注：$P>0.05$ 表示无显著性差异，$0.01\leqslant P\leqslant 0.05$ 表示存在显著性差异，$P<0.01$ 表示存在极显著性差异。

时滑切刃与地膜夹角增大，导致出现挑膜现象，膜孔长度增大。

（2）因素对粒距合格指数影响分析

如图 10 所示，压膜弹簧刚度与破膜刀楔角为设计中心点时，粒距合格指数随作业速度增大呈先增大后减小趋势，增大趋势不显著，主要是由于作业速度较大时，播种单体滑移率升高，播种粒距合格指数降低；粒距合格指数随破膜刀开启相位角增大呈先增大后减小趋势，当破膜刀开启相位角较小时，破膜刀提前开启，旋转方向的土壤受挤压进入破膜成穴器内，导致投种口堵塞，出现漏播，当破膜刀开启相位角较大时，部分种子随破膜成穴器回代至地表，导致种子分布均匀度降低，粒距合格指数减小。

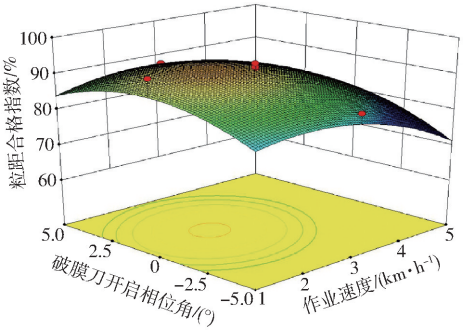


图 10　因素交互作用对粒距合格指数影响的响应曲面

Fig. 10　Response surface of influence of interaction of factors on grain spacing qualified index

（3）因素对播种深度合格率影响分析

如图 11a 所示，压膜弹簧刚度与破膜刀楔角为设计中心点时，播种深度合格率随作业速度增大呈先增大后减小趋势，是由于当作业速度较小时，破膜成穴器在土壤中停留时间增加，回土量随之增大，导致播深变化较大，当作业速度较大时，破膜成穴器投种口处线速度增加，投种后种子在竖直方向向上继续运动一定距离，同时，部分土壤进入破膜成穴器内，造成投种口处堵塞，增加了投种时间，导致播深变化较大，播种深度合格率减小；播种深度合格率随破膜刀开启相位角增大呈先增大后减小趋势，当破膜刀开启相位角较小时，破膜刀提前开启，完成投种，投种后成穴器继续向后下方运动挤压土壤，种子在穴孔内位置持续变化，导致播种深度一致性较差，当破膜刀开启相位角较大时，破膜刀滞后开启，受成穴器结构及工作原理影响，破膜成穴器出土过程穴孔回土较快，导致播深变化较大，播种深度一致性减小。

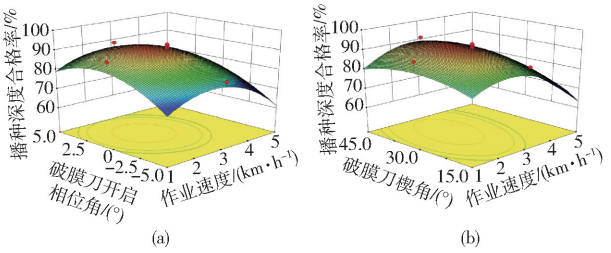


图 11　因素交互作用对播种深度合格率影响的响应曲面

Fig. 11　Response surfaces of influence of interaction of factors on qualified rate of seeding depth

如图 11b 所示，压膜弹簧刚度与破膜刀开启相位角为设计中心点时，播种深度合格率随破膜刀楔角增大呈先增大后减小趋势，当破膜刀楔角较小时，破膜刀开启过程由于侧向与土壤接触面积较小，成穴与回土同时进行，导致投种后种子播深变化较大，当破膜刀楔角较大时，穴孔纵向尺寸增大，土壤扰动量增加，穴孔纵向回土量较大，导致投种后播深变化较大，播种深度合格率减小。

4.4　参数优化与验证试验

4.4.1　参数优化

优化原则为保证播种单体工作性能前提下，提高作业效率。以各因素水平区间为约束条件，运用 Design-Expert 8. 0. 6. 1 软件 Optimization 模块的多目标变量优化算法进行优化。考虑到加工和实际工作要求，选取压膜弹簧刚度 2 N/mm，破膜刀楔角 30°条件进行优化，优化结果如图 12 所示。图中阴影区

域为最佳工作区域,当作业速度 1.6 ~ 3.4 km/h、破膜刀开启相位角 -2.4° ~ 1.8°时,膜孔长度合格率大于 90%,粒距合格指数大于 90%,播种深度合格率大于 85%,优化结果满足覆膜与播种相关农艺要求。

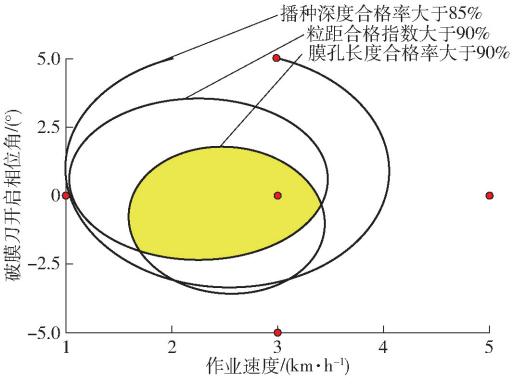


图 12 优化结果

Fig. 12 Optimization result

4.4.2 验证试验

为验证参数组合优化正确性,在作业速度 3.4 km/h,压膜弹簧刚度为 2 N/mm,破膜刀楔角为 30°条件下,测试播种单体破膜刀开启相位角为 -2.4° ~ 1.8°范围内工作性能。选取破膜刀开启相位角 -2°、-1°、0°、1°进行验证试验,每组试验重复 5 次取平均值为最终结果,试验效果如图 13 所示。验证试验结果表明,膜孔长度合格率大于 90%,粒距合格指数大于 90%,播种深度合格率大于 85%,播种单体工作性能评价指标结果均在优化区间范围内,优化组合结果可信。

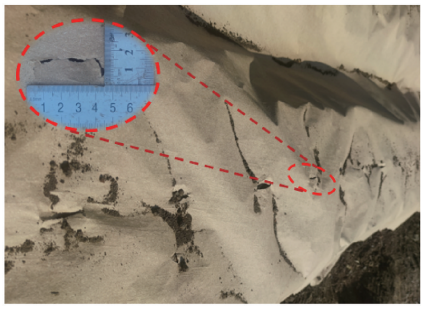


图 13 播种单体破膜效果

Fig. 13 Seeding unit membrane rupturing effect

5 结论

(1)设计了一种侧开式滑切破膜精量播种单体,解决了秸秆纤维基地膜膜上精量播种过程膜孔尺寸大、形状不规则、播种质量差等问题。

(2)各因素对膜孔长度合格率影响由大到小依次为破膜刀楔角、作业速度、破膜刀开启相位角、压膜弹簧刚度;各因素对粒距合格指数影响由大到小依次为作业速度、破膜刀开启相位角、破膜刀楔角、压膜弹簧刚度;各因素对播种深度合格率影响由大到小依次为作业速度、破膜刀开启相位角、破膜刀楔角、压膜弹簧刚度。

(3)在作业速度 1.6 ~ 3.4 km/h,压膜弹簧刚度为 2 N/mm,破膜刀楔角为 30°,破膜刀开启相位角 -2.4° ~ 1.8° 的条件下,膜孔长度合格率大于 90%,粒距合格指数大于 90%,播种深度合格率大于 85%。

参 考 文 献

[1] SU Tongfu, ZHAO Guozhong, REN Tianbao, et al. Characterizations of physico-chemical changes of corn biomass by steam explosion [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(6): 253 - 256.

[2] 陈海涛,苗乃彪,董冰哲,等. D200 型秸秆纤维制取机结构优化试验研究[J]. 东北农业大学学报,2015,26(7):90 - 94.
CHEN Haitao, MIAO Naibiao, DONG Bingzhe, et al. Structural optimization experimental study on D200 crop straw fiber extruder [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2015, 26(7): 90 - 94. (in Chinese)

[3] MING Xianglan, CHEN Haitao, JU Dianming. Performance and environmental impact of rice straw fiber mulching films manufactured with a warming agent[J]. Transactions of the ASABE, 2019, 62: 315 - 320.

[4] 陈海涛,陈双超,刘爽,等. 杀菌型水稻秸秆纤维基地膜制造工艺参数优化研究[J]. 农业工程学报,2019,35(11):306 - 314.
CHEN Haitao, CHEN Shuangchao, LIU Shuang, et al. Optimization of manufacturing parameters for sterilizing functional straw fiber mulch[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(11): 306 - 314. (in Chinese)

[5] 陈海涛,竹筱歆,刘爽,等. 水稻秸秆纤维基绿色地膜制造工艺参数优化[J]. 农业工程学报,2018,34(7):271 - 279.
CHEN Haitao, ZHU Xiaoxin, LIU Shuang, et al. Optimization of technical parameters for rice straw fiber-based mulch [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(7): 271 - 279. (in Chinese)

[6] ZHANG Ying, JU Dianming, XING Zhenlei, et al. Optimization of wheat straw pretreatment process parameters fo straw mulch mat [J]. Bioresources, 2021, 16(2): 3827 - 3839.

[7] 韩永俊,陈海涛,刘丽雪,等. 水稻秸秆纤维地膜制造工艺参数优化[J]. 农业工程学报,2011,27(3):242 - 247.
HAN Yongjun, CHEN Haitao, LIU Lixue, et al. Optimization of technical parameters for making mulch from rice straw fiber[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 242 - 247. (in Chinese)

[8] 张春雷. 扎穴式玉米精播机研制与试验[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2016.
ZHANG Chunlei. Research and experiment on precision pricking hole planter of corn[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016. (in Chinese)

[9] 顾玲丽. 花生穴播器关键部件设计与试验研究[D]. 南京:南京农业大学,2016.
GU Lingli. Design and experimental research on peanut dibbling machine[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016. (in Chinese)

[10] DOUGLAS R F, RICAEDO C R, DANIEL M Q, et al. Development and evaluation performance of a punch planter for direct

sowing of corn[J]. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,2011,15(2):199 - 204.
[11] 李复辉,杜瑞成,刁培松,等. 舵轮式玉米免耕精量施肥播种机设计与试验[J]. 农业机械学报,2013,44(增刊1):33 - 38.
LI Fuhui,DU Ruicheng,DIAO Peisong,et al. Design and experiment of helm-shaped no-tillage precision fertilization planter for corn[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(Supp. 1):33 - 38. (in Chinese)
[12] 刁培松,杜瑞成. 集成式舵轮槽轮穴播器的研制[J]. 农机化研究,2009,31(10):82 - 84.
DIAO Peisong,DU Ruicheng. Development of the integrated dibbler with fluted seed roller and steering wheel[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2009,31(10):82 - 84. (in Chinese)
[13] LAWRENCE M J, BUCKMASTER D R, LAMONT W J. A pneumatic dibbling machine for plastic mulch[J]. Applied Engineering in Agriculture,2007,23(4):419 - 424.
[14] 石林榕,赵武云,孙伟,等. 电驱式玉米膜上直插穴播机前进速度补偿机构参数优化[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(8):87 - 94.
SHI Linrong,ZHAO Wuyun,SUN Wei,et al. Parameters optimization of speed compensation mechanism of electric driving maize planter with dibbling on membrane[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(8):87 - 94. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20170809&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.009. (in Chinese)
[15] 戴飞,赵武云,石林榕,等. 基于近等速机构的玉米全膜双垄沟穴播机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(11):74 - 81.
DAI Fei,ZHAO Wuyun,SHI Linrong,et al. Design and experiment of hill-seeder with whole plastic-film mulching on double ridges for corn based on mechanism with approximate constant speed[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(11):74 - 81. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20161110&flag=1 . DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.010. (in Chinese)
[16] 赵武云,戴飞,杨杰,等. 玉米全膜双垄沟直插式精量穴播机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(11):91 - 97.
ZHAO Wuyun,DAI Fei,YANG Jie,et al. Design and experiment of direct insert precision hill-seeder with corn whole plastic-film mulching on double ridges[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(11):91 - 97. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20131117&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.11.017. (in Chinese)
[17] 陈海涛,明向兰,刘爽,等. 废旧棉与水稻秸秆纤维混合地膜制造工艺参数优化[J]. 农业工程学报,2015,31(13):292 - 300.
CHEN Haitao,MING Xianglan,LIU Shuang,et al. Optimization of technical parameters for making mulch from waste cotton and rice straw fiber[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(13):292 - 300. (in Chinese)
[18] 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京:中国农业出版社,2003.
[19] 付乾坤,荐世春,贾洪雷,等. 玉米灭茬起垄施肥播种机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(4):9 - 16.
FU Qiankun,JIAN Shichun,JIA Honglei,et al. Design and experiment on maize stubble cleaning fertilization ridging seeder[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(4):9 - 16. (in Chinese)
[20] 赵淑红,蒋恩臣,闫以勋,等. 小麦播种机开沟器双向平行四杆仿形机构的设计及运动仿真[J]. 农业工程学报,2013,29(14):26 - 32.
ZHAO Shuhong,JIANG Enchen,YAN Yixun,et al. Design and motion simulation of opener with bidirectional parallelogram linkage profiling mechanism on wheat seeder[J]. Transactions of the CSAE,2013,29(14):26 - 32. (in Chinese)
[21] 明向兰,陈海涛,魏志鹏. 低定量环保型水稻秸秆纤维地膜制造工艺参数优化[J]. 农业工程学报,2019,35(19):259 - 266.
MING Xianglan, CHEN Haitao, WEI Zhipeng. Optimization of technical parameters for making light-basis-weight and environment-friendly rice straw fiber film[J]. Transactions of the CSAE,2019,35(19):259 - 266. (in Chinese)
[22] 侯守印,陈海涛,史乃煜,等. 双自由度多铰接仿形免耕精量播种单体设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(4):92 - 101.
HOU Shouyin,CHEN Haitao,SHI Naiyu,et al. Design and experiment of two-degree-of-freedom multi-articulated profiling no-tillage precision drill unit[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(4):92 - 101. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20190411&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.011. (in Chinese)
[23] 胡军. 精密播种单体播深控制的理论与试验研究[D]. 长春:吉林大学,2012.
HU Jun. Theory and experimental research of sowing depth control for precision seeder unit[D]. Changchun:Jilin University,2012. (in Chinese)
[24] 许光彬,史颖杰. 旋播一体机弹-液双位仿形机构创新设计[J]. 四川理工学院学报(自然科学版),2016,29(6):26 - 32.
XU Guangbin,SHI Yingjie. Rotary tillage fertilization seeder spring - hydraulic double profiling wheel profiling mechanism innovative design[J]. Journal of Sichuan University of Science and Engineering(Natural Science Edition),2016,29(6):26 - 32. (in Chinese)
[25] 钱巍. 玉米垄作免耕播种机的动态模拟与关键部件的参数优化[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2016.
QIAN Wei. Dynamic simulation of ridege-till and no-till planter and parameter optimization about key parts[D]. Shenyang:Shenyang Agricultural University,2016. (in Chinese)
[26] 付卫强,董建军,梅鹤波,等. 玉米播种单体下压力控制系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(6):68 - 77.
FU Weiqiang,DONG Jianjun,MEI Hebo,et al. Design and test of maize seeding unit downforce control system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(6):68 - 77. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20180608&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.008. (in Chinese)
[27] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007.
[28] 邓宗全,于红英,王知行,等. 机械原理[M]. 北京:高等教育出版社,2015.
[29] 何为,薛卫东,唐斌. 优化试验设计方法与数据处理[M]. 北京:化学工业出版社,2012.