doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.04.024

二次抛送式棉秆粉碎还田装置优化设计与试验

刘旋峰[1,2]　张学军[1]　周　欣[2]　王毅超[1]　杨豫新[2]　蒋永新[2]　张海春[2]
(1. 新疆农业大学机电工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆维吾尔自治区农业科学院农业装备研究所, 乌鲁木齐 830091)

摘要: 针对新疆棉秆粉碎还田过程中存在粉碎不均匀和秸秆掉落等问题,本文设计了一种二次抛送式棉秆粉碎还田装置。采用双螺旋线排布粉碎刀组与排风抛送刀组协同作业,结合导流风筒实现秸秆一级粉碎与二次抛送,通过理论分析确定关键部件结构形式与参数。为探明粉碎抛送过程工况参数对内部流场的影响,运用 CFD 模拟技术分析了粉碎刀轴转速、抛送刀轴转速和排风刀数量对内部流场影响。以粉碎刀轴转速、离地高度和抛送刀轴转速为试验因素,棉秆掉落率和棉秆粉碎合格率为评价指标,进行三因素三水平正交试验,获得参数优化组合:粉碎刀轴转速为 2 490 r/min、离地高度为 77 mm、抛送刀轴转速为 2 870 r/min,此时田间验证试验结果表明,棉秆掉落率为 3.41%,棉秆粉碎合格率为 97.85%,与优化预测值相对误差小于 5%,满足行业标准要求。研究结果为棉秆高效还田及装备性能提升提供了技术支撑。

关键词: 棉秆; 粉碎还田装置; 二次抛送; 参数优化
中图分类号: S223.5　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2026)04-0246-11　　**OSID**:

Optimized Design and Experiment of Secondary Tossing Cotton Stalk Crushing and Returning Device

LIU Xuanfeng[1,2]　ZHANG Xuejun[1]　ZHOU Xin[2]　WANG Yichao[1]　YANG Yuxin[2]
JIANG Yongxin[2]　ZHANG Haichun[2]
(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi* 830052, *China*
2. *Institute of Agricultural Mechanization, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi* 830091, *China*)

Abstract: Aiming to address the issues of uneven crushing and straw drop during the cotton stalk fragmentation and returning process in Xinjiang, the design of a secondary wind-assisted cotton stalk crushing and returning device was optimized. The device employed a dual-helix crushing blade set and a wind-assisted conveying blade set for collaborative operation, integrating a diversion air duct to achieve primary crushing and secondary conveying of stalks. The structural configuration and parameters of key components were determined through theoretical analysis. To investigate the influence of operational parameters on the internal flow field during the crushing and conveying process, CFD simulations were conducted to analyze the effects of crushing blade shaft speed, conveying blade shaft speed, and the number of wind-assisted blades. A three-factor three-level orthogonal experiment was performed with crushing blade shaft speed, ground clearance, and conveying blade shaft speed as experimental variables, and stalk drop rate and crushing qualification rate as evaluation metrics. Parameter optimization yielded the optimal combination: crushing blade shaft speed of 2 490 r/min, ground clearance of 77 mm, and conveying blade shaft speed of 2 870 r/min. Field validation tests under these conditions resulted in a stalk drop rate of 3.41% and a crushing qualification rate of 97.85%, with relative errors between experimental and theoretical values below 5%, meeting industry standards. This research can provide technical support for enhancing the efficiency of cotton stalk returning equipment.

Key words: cotton stalk; crushing and returning device; secondary tossing; parameter optimization

收稿日期: 2025-04-09　修回日期: 2025-09-02
基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发计划项目(2022B02022-3)、新疆农业科学院农业科技创新稳定支持专项课题(xinkywdzc-2025-31-03)、农业农村部西北绿洲农业环境重点实验室开放基金项目(XBLZ-20242)、新疆棉花产业技术体系项目(XJARS-03)和新疆维吾尔自治区"揭榜挂帅"项目
作者简介: 刘旋峰(1981—),男,博士生,新疆维吾尔自治区农业科学院副研究员,主要从事农业智能装备工程技术研究,E-mail: 52695694@qq.com
通信作者: 张学军(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械化装备研究,E-mail: tuec@163.com

0　引言

新疆维吾尔自治区位于我国西北内陆，属半干旱农业区，是我国最大的优质棉花生产基地[1-2]。在棉花生产过程，残膜回收与棉秆粉碎是棉花采收后废弃物资源化利用的两大核心环节[3-4]。新疆维吾尔自治区每年产生约 1×10^6 t 残膜和约 1.3×10^7 t 棉秆废弃物，棉秆堆积将导致资源浪费，而棉秆焚烧又将造成环境污染，为此，棉秆处理已成为新疆农业发展中的关键问题[5-6]。

棉秆中富含铁、锰等对土壤有益的微量元素[7-8]，因此采用秸秆粉碎还田的方式能有效增加土壤有机质含量，降低土壤容重，提升土壤孔隙度，丰富土壤微生物菌落结构，从而促进养分在田间的良性循环，具有显著的生态与农业价值[9-10]。目前，棉秆粉碎还田已成为新疆棉花产区最普遍的秸秆处理方式[11]。

国外发达国家较早开始对秸秆粉碎还田设备和还田技术进行研究，已形成适应各地区农业生产需求的技术与工艺。如美国万国公司在联合收获机上加装秸秆切碎机构从而实现秸秆粉碎作业；西班牙阿格里克公司立式秸秆粉碎机可与拖拉机配套使用，进而粉碎立于地面的玉米秸秆、高粱秸秆和棉秆等作物[12]。CHELPURI 等[13]设计的水稻秸秆粉碎与旋耕联合作业机，粉碎轴上安装有倒置 Y 形刀片，粉碎后的水稻秸秆由旋耕机上 L 形刀片旋耕入土，可使碎秸秆与土壤充分混合。针对新疆地区棉花覆膜种植及收获农艺，近年来国内诸多学者研制的棉秆粉碎还田及残膜回收装备也取得一定进展。何玉泽等[14]设计了一款秸秆粉碎与链耙式收膜一体作业机械；寇嘉乐等[15]设计了一种秸秆粉碎与夹指链式残膜回收一体作业机械。虽然秸秆粉碎与残膜回收一体作业技术取得较大进步，但相关研究较多关注于残膜回收装置改进设计，对棉秆粉碎还田装置研究相对较少。王毅超等[16]设计的抛送式棉秆粉碎还田及滚筒式残膜回收机可较好地完成棉秆粉碎还田与残膜回收作业，通过试验确定了最佳工况参数，但棉秆粉碎过程中存在粉碎合格率较低、秸秆掉落等现象，棉秆抛送过程中存在秸秆堵塞、秸秆集条等问题。

在分析新疆棉花种植特点的基础上，本文采用双螺旋线排布粉碎刀组与改进排风刀组相配合，完成棉秆一级粉碎与二次抛送工序，同时设置有导流风筒完成粉碎秸秆的远距离抛送。以期提高棉秆粉碎抛送作业效果，为残膜回收装备拾净率提升和膜面洁净度提供技术保障。

1　总体结构与工作原理

1.1　整体结构

新疆棉花种植采用“一膜三带六行”种植模式，即单层地膜覆盖下设 3 条滴灌带并种植 6 行棉花，棉花种植行间距为 660 mm，株间距 100 mm[17-18]。针对新疆地区棉花种植模式与棉秆粉碎、残膜回收工序要求，设计一款棉秆粉碎还田及残膜回收一体机，如图 1 所示。该机作业时，由前方棉秆粉碎还田装置进行棉秆粉碎、抛送还田作业，后方残膜回收装置进行残膜捡拾、回收作业。

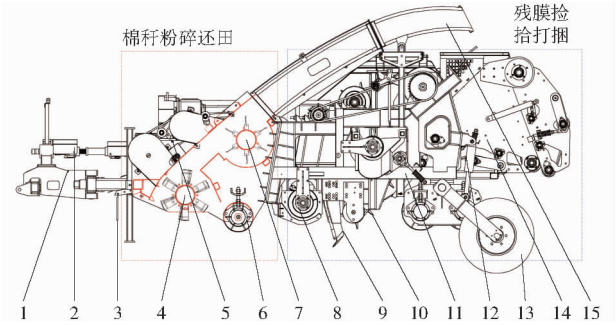


图 1　棉秆粉碎还田及残膜回收一体机

Fig. 1　Cotton straw crushing and returning machine with integrated residual film recycling

1. 牵引架　2. 传动轴　3. 安全挡板　4. 粉碎装置　5. 带传动　6. 仿形辊　7. 抛送装置　8. 排杂装置　9. 起边膜装置　10. 残膜捡拾装置　11. 机架　12. 液压升降系统　13. 行走轮　14. 残膜打捆装置　15. 导流风筒

1.2　总体结构

二次抛送式棉秆粉碎还田装置总体结构如图 2 所示，主要由一级粉碎模块、二级抛送模块与动力传输系统构成，其中一级粉碎模块主要包括粉碎刀轴、组合甩刀、定刀与壳体等，二级抛送模块主要包括抛送轴、排风刀片与导流风筒，动力传输系统主要包括变速器、万向传动轴与带传动装置等。

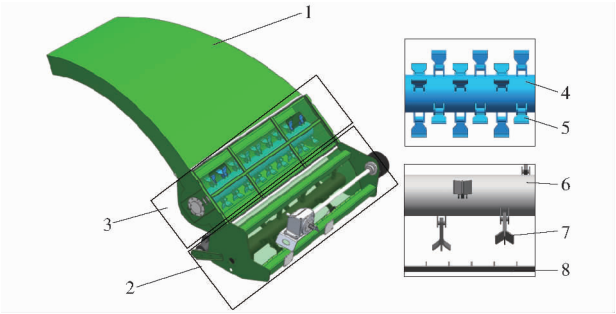


图 2　二次抛送式棉秆粉碎还田装置结构示意图

Fig. 2　Structural diagram of secondary throwing cotton straw crushing and returning machine

1. 导流风筒　2. 一级粉碎模块　3. 二级抛送模块　4. 抛送刀轴　5. 排风刀　6. 粉碎刀轴　7. 双 L 形粉碎刀　8. 定刀

1.3 工作原理

二次抛送式棉秆粉碎还田装置与残膜回收装置为一个牵引整体,采用三点悬挂方式与拖拉机挂接。棉秆粉碎还田装置工作时,通过拖拉机液压系统调整装置离地高度,拖拉机通过万向传动轴将后动力输出轴动力传递给变速器,再将动力依次传递给粉碎刀轴与抛送轴。机具前进时,粉碎刀轴高速旋转带动铰接的粉碎甩刀将立于地表的棉秆反复砍切、撕裂和揉搓直至棉秆成为碎段状和纤维状,破碎后的棉秆在粉碎腔内气流和粉碎甩刀的双重作用下被喂入抛送模块内,抛送模块内抛送轴高速旋转带动轴上排风刀将破碎棉秆沿导流风筒抛送至残膜回收装置工作过后的地面,实现棉秆粉碎还田,同时由于残膜回收装置位于一级粉碎模块后方,一级粉碎模块可为后续残膜回收装置创造洁净的工作条件。

2 关键部件设计优化

2.1 棉秆粉碎模块设计

2.1.1 粉碎刀

为提升棉秆粉碎质量,粉碎刀组设计为动、定刀支撑粉碎方式,粉碎动刀设计为双 L 形对称甩刀,由 2 把 L 形甩刀与直刀组合而成,如图 3 所示。粉碎刀厚度设计为 5 mm,材料选用 65Mn 钢,且在粉碎刀与棉秆接触部位开刃口并淬火处理以增强粉碎效果。在同等作业条件下,粉碎刀数量对棉秆粉碎质量具有决定性影响。若粉碎刀数量不足,棉秆受作用频次有限,易导致秸秆粉碎不充分,难以满足既定粉碎长度要求;反之,若粉碎刀数量冗余,会造成功耗上升,且阻碍棉秆被送入二级抛送模块内。粉碎刀数量计算式为[19-20]

$$N = CL \tag{1}$$

式中 N——甩刀数量,组

C——甩刀安装密度,取 0.02 组/mm[16]

L——机具作业幅宽,mm

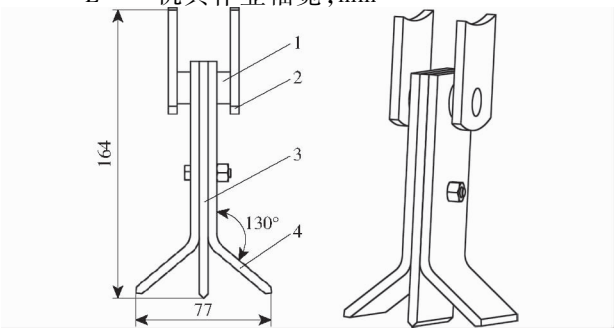


图 3 粉碎刀结构示意图

Fig. 3 Schematic of structure of crushing knife

1. 刀肩 2. 刀座 3. 直刀 4. L 形甩刀

由式(1)计算得粉碎刀数量为 42 组,因此确定 L 形甩刀为 84 把,直刀 42 把。

粉碎刀组优化采用双螺旋线排布形式,单螺旋线上 2 组粉碎刀间升角为 52°,间距 105 mm,与粉碎刀轴端面间距 150 mm,具体安装示意如图 4 所示。

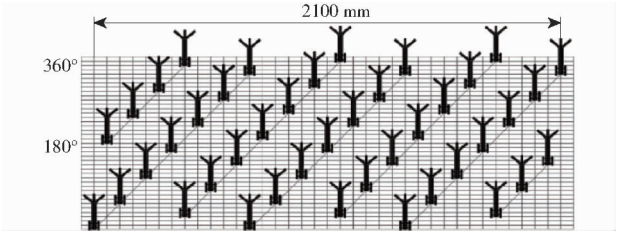


图 4 粉碎刀双螺旋线安装示意

Fig. 4 Installation diagram of double helix grinding knife

2.1.2 壳体线型

一级秸秆粉碎模块内部腔体主要由曲面前壳体、双侧侧板及后部可调挡板构成。机具工作时地表秸秆经组合式粉碎刀破碎后,在螺旋曲面引导下通过冲击-剪切复合作用完成粉碎作业。优化曲面前壳体线型采用对数螺旋线形式,如图 5 所示,且设计入口端间隙 E_1 小于出口端间隙 E_2,此时在入口处形成物料聚焦区,增强粉碎刀对秸秆的破碎效果。极坐标系下对数螺旋线方程为[21-22]

$$r = a\mathrm{e}^{b\beta} \tag{2}$$

式中 r——极径,m β——极角,rad

a——常数 b——系数

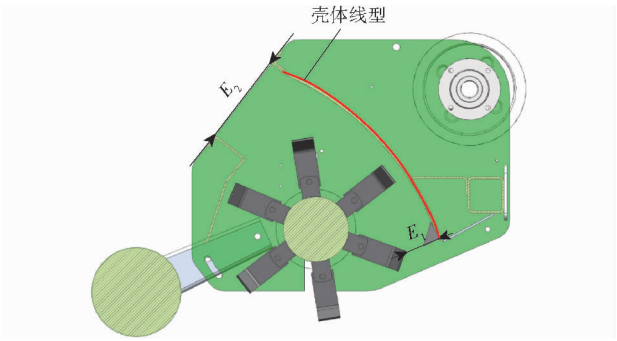


图 5 壳体线型示意

Fig. 5 Schematic of shell line type

其中参数 a 影响对数螺线开始位置,系数 b 影响对数螺线紧密程度,即决定螺线扩展速度。结合前期样机试验结果,最终确定壳体线型曲线模型为

$$r = 55\mathrm{e}^{1.8\beta} \tag{3}$$

考虑棉秆粉碎还田位置尺寸要求与工程经验,确定入口间隙 E_1 为 140 mm,出口间隙 E_2 为 260 mm。

2.1.3 离地高度

二次抛送式棉秆粉碎还田装置喂入口高度 h 对秸秆割茬高度以及一级粉碎性能有重要影响,降低 h 能显著减小割茬高度,但过小的 h 会使刀片与地

面过近而影响秸秆顺利喂入，减少刀片寿命，同时也对残膜回收装置捡拾效果造成影响，离地高度示意如图 6 所示。

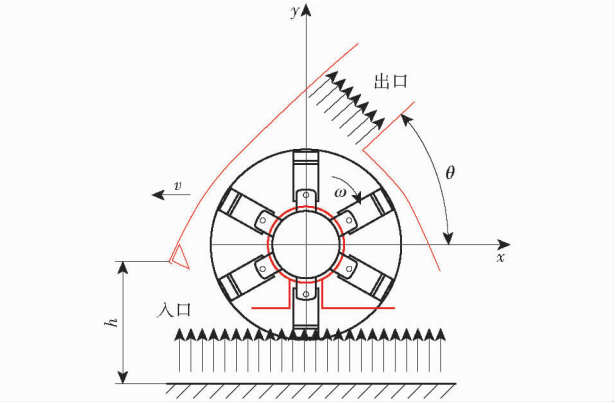


图 6　离地高度示意

Fig. 6　Ground clearance height indication

为满足秸秆顺利喂入的要求，喂入口高度 h 应满足[23-24]

$$\frac{D}{4}+t-50\leqslant h\leqslant\frac{D}{4}+t+50 \tag{4}$$

式中　D——粉碎刀轴旋转直径，mm

t——粉碎刀刀尖离地高度，mm

粉碎刀轴旋转直径设计为 400 mm，刀尖离地高度根据棉秆粉碎农艺要求最大不应超过 100 mm，最小不应低于 10 mm，据此确定离地高度满足：$60\leqslant h\leqslant 100$ mm。

2.1.4　粉碎刀轴转速

以粉碎刀轴中心为原点，机具前进速度方向为正向，建立直角坐标系，如图 7 所示。机具作业时，动刀顶端点绝对速度 V_a 由机具前进速度 V_e 和顶端点线速度 V_r 合成。取动刀的刀尖某点 $P(x,y)$，则点 P 运动轨迹方程为[25]

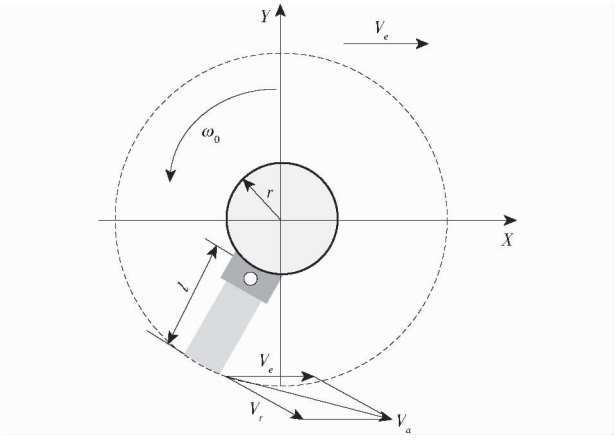


图 7　动刀运动分析

Fig. 7　Analysis of moving blade

$$x=\frac{V_e}{\omega_0}\arcsin\frac{y}{r+l}\sqrt{(r+l)^2-y^2} \tag{5}$$

式中　r——粉碎刀轴半径，mm

l——动刀长度，mm

ω_0——角速度

设动刀端点回转线速度与机具前进速度比值为 λ，则

$$\lambda=\frac{V_r}{V_e}=\frac{\omega_0(r+l)}{V_e} \tag{6}$$

将式(6)代入式(5)整理可得

$$x=\frac{r+l}{\lambda}\arcsin\frac{y}{r+l}+\sqrt{(r+l)^2-y^2} \tag{7}$$

由式(7)可知，粉碎动刀在作业过程中运动轨迹为摆线，因此当 $\lambda>1$ 时，运动轨迹为余摆线，此时不产生漏切现象。动刀刀片线速度与粉碎刀轴转速 n 直接相关，因此有

$$n=\frac{30(V_e+V_r)}{\pi(r+l)} \tag{8}$$

机具前进速度为 5～7 km/h，计算取均值 6 km/h，动刀刀片端点回转中心半径为 200 mm。根据无支撑切割理论，可知满足切割棉秆最低速度要求 48 m/s[16]，依据式(8)计算得粉碎刀轴转速大于等于 2 200 r/min。

2.2　抛送模块

抛送模块主要由排风刀组、刀组外壳和导流风筒组成，如图 8 所示。

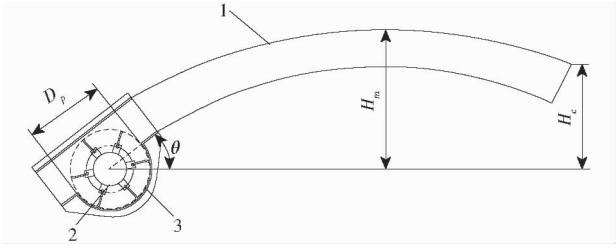


图 8　抛送模块结构图

Fig. 8　Structure of exhaust knife

1. 导流风筒　2. 排风刀组　3. 刀组外壳

2.2.1　排风刀组

棉秆粉碎还田装置前期试验中易发生破碎棉秆堵塞问题，导致功耗增加，影响秸秆顺畅抛送。为此，优化设计带有排风刀组的抛送模块进行抛送作业。排风刀安装于刀架上，排风刀套装于抛送刀轴上并可沿轴摆动，高速旋转排风刀与弧形出料腔壁相切。排风刀结构采用可更换的 J 形刀片，如图 9 所示。刀片铲型面作用面积大，可同时起到抛送与风送作用。刀片采用高锰钢制造，刀片与棉秆相接处部分开刃口，因此刀片可对粉碎甩刀抛送来的粉碎长度不合格的棉秆进行再次粉碎。

采用交错平衡方式安装排风刀，抛送轴圆周上均匀分布排风刀，相邻 2 条轴向排风刀呈交错平衡

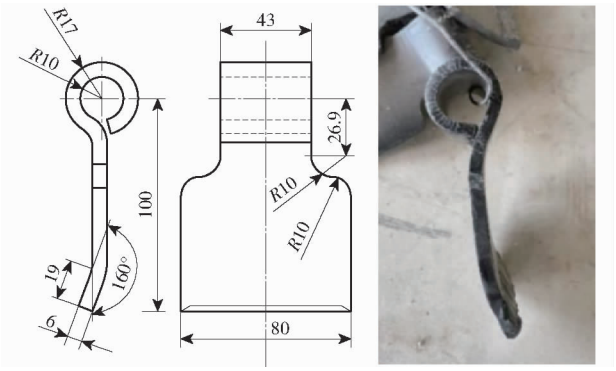


图 9 排风刀结构图

Fig. 9 Structure of exhaust knife

排列[25],以圆周方向均布 3 把排风刀为例,此时排风刀排布如图 10 所示。

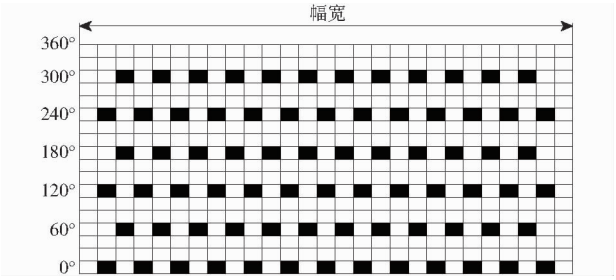


图 10 排风刀排布示意

Fig. 10 Installation diagram of exhaust knife

2.2.2 抛送高度

抛送装置理论抛送高度 H_l 计算式为

$$H_l = \eta v_p^2/(2g) \tag{9}$$

式中 η——棉秆与导流风筒内壁摩擦损失系数,取 0.22[25]

v_p——排风刀端点线速度,m/s

由于碎棉秆在导流风筒内运动过程存在相互碰撞摩擦等造成抛送高度降低的现象,因此抛送装置实际抛送最大高度 H_s 计算式为

$$H_s = \eta H_l \tag{10}$$

为防止秸秆堵塞,参照文献[16,25],设计排风刀轴转速为粉碎刀轴转速 1.2 倍,因此排风刀轴转速约为 2 600 r/min,排风刀回转半径 200 mm,得 v_p 为 54 m/s,因此计算可得 H_s 约为 7 m,根据结构限位要求实际设计抛送装置最大高度 H_m 为 1 m,抛送装置出口高度 H_c 为 0.8 m 满足抛送要求。

2.2.3 抛送倾角

经排风刀抛送出的破碎棉秆应满足能量守恒定律,即

$$\frac{1}{2}mv_1'^2 = mgH(1+\eta) + \frac{1}{2}mv_2'^2 \tag{11}$$

式中 v_2'——碎棉秆在导流风筒出口速度,取 20 ~ 25 m/s

v_1'——碎棉秆被排风刀抛出初速度,取 35 m/s

H——导流风筒高度,m

m——破碎棉秆质量,kg

由于排风刀圆周速度与碎棉秆圆周速度存在一定速度损失,因此,碎棉秆初速度满足

$$v_p\sin\theta = (1+\mu)v_1' = (1+\mu)\sqrt{2gH(1+\eta)+v_2'^2} \tag{12}$$

式中 θ——导流风筒倾角,(°)

μ——碎棉秆被甩刀抛出时初速度损失系数,取 0.55[25]

整理得

$$\theta = \arcsin\left((1+\mu)\frac{\sqrt{v_2'^2+2gH(1+\eta)}}{v_p}\right) \tag{13}$$

根据式(13)计算得 θ 为 35° ~ 46°,根据结构设计限位要求,最终取 38°。

3 内部流场仿真

二次抛送式棉秆粉碎还田装置在田间作业时,机壳内流体包括空气流和秸秆流,秸秆在机壳内运动时间短且与空气作用较弱,因此机壳内流动可看作是稳态、有粘性、不可压缩和绝热的单相湍流。为分析装置工况参数对内部流场的影响,采用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型进行稳态不可压缩流场仿真[25-26]。

3.1 粉碎刀轴转速

为探究粉碎刀辊转速对后抛式棉秆粉碎装置内部流场的影响,将粉碎刀辊转速设为 1 800、2 200、2 600 r/min 进行仿真,为了仿真准确性,将抛送装置抛送轴部分去除进行仿真。粉碎刀辊不同转速下速度云图如图 11a 所示。由图 11a 可知,随着粉碎刀辊转速增大,粉碎甩刀前端速度越来越大,有利于棉秆多次击打和粉碎;同时随着转速增大,粉碎刀辊高速旋转产生的气流对整个装置内部的辐射面积越大,尤其是对粉碎装置入口处辐射增大,有利于对棉秆捡拾;高速气流区域同步增大,有利于粉碎棉秆后对碎棉秆进行抛送。

粉碎装置出口处速度矢量图如图 11b 所示。由图 11b 可知,当粉碎刀辊转速为 1 800 r/min 时,粉碎装置出口处和抛送装置入口处下端气流产生涡流,气流有部分回流;随着粉碎刀辊转速增大,粉碎装置出口处和抛送装置入口处涡流消失;当粉碎刀辊转速过大时,气流方向又会发生改变。粉碎刀辊转速对抛送棉秆时的碎棉秆流产生影响,需确定适宜的粉碎刀辊转速。

3.2 抛送刀轴转速

抛送轴高速旋转带动排风刀产生的气流对能否

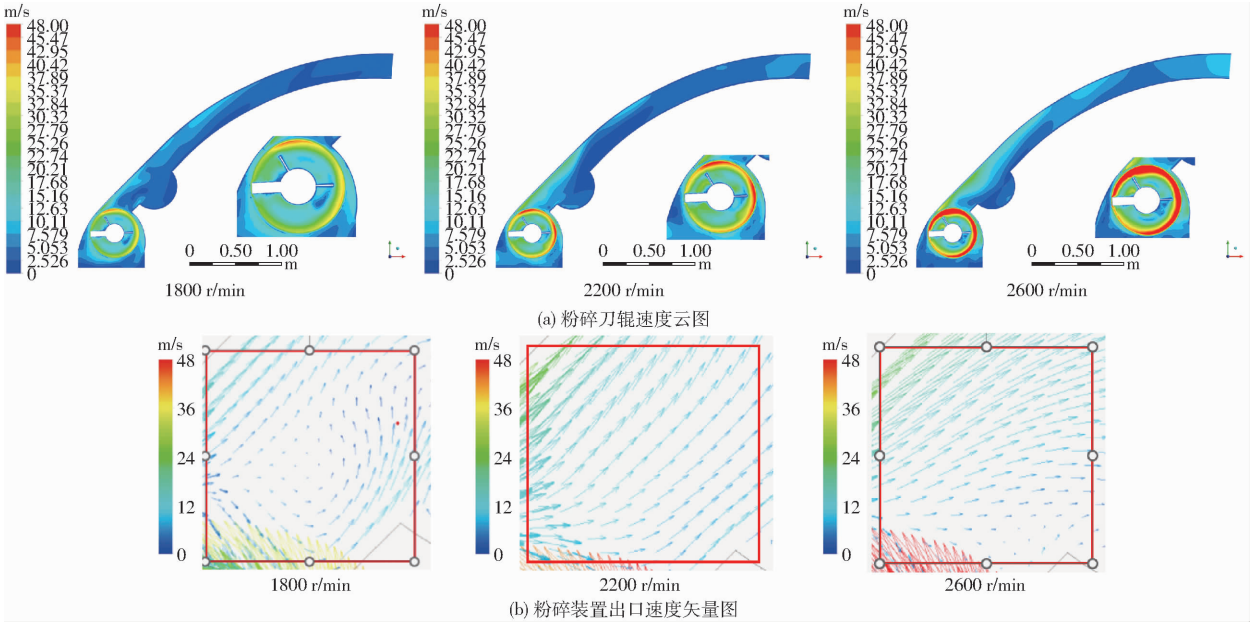


图 11　粉碎刀轴转速对内部流场的影响

Fig. 11　Simulation results of influence of grinding blade shaft speed on internal flow field

有效抛送棉秆产生至关重要的影响，因此去除粉碎刀辊机构，仅对抛送轴部分进行仿真，设抛送轴转速为 2 600、2 800、3 000 r/min 进行仿真。不同抛送轴转速下速度云图如图 12 所示。由图 12 可知，随着抛送轴转速增大，排风刀前端气流速度随着转速增大而变大，气流对整个装置内部的辐射区域越大，高流速气流区域也随之增大，抛送装置内部高风区产生在蜗壳底部，排出的气流速度在抛送装置出口处上端最大，气流分布在弧形抛送通道上端，且弧形抛送通道内部上端气流流速明显高于其他区域，易在抛送通道下端产生涡流，造成棉秆跌落。抛送刀轴转速对破碎棉秆流亦产生明显影响，因此需确定

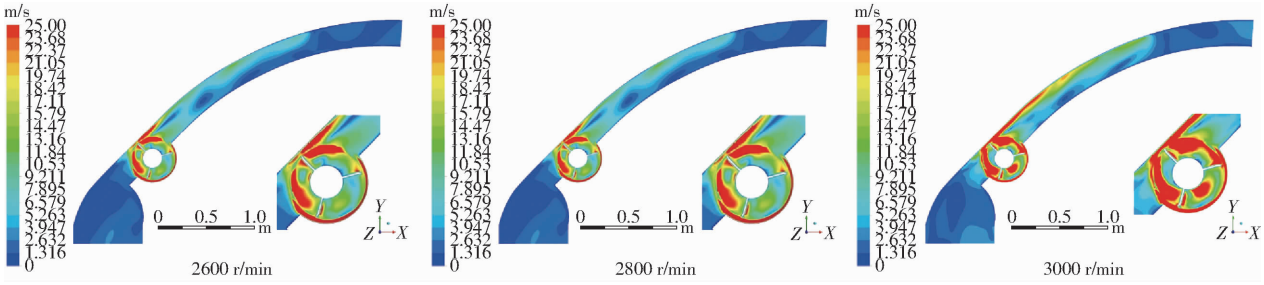


图 12　抛送轴转速对内部流场的影响

Fig. 12　Simulation results of influence of throwing shaft speed on internal flow field

适宜的抛送刀轴转速。

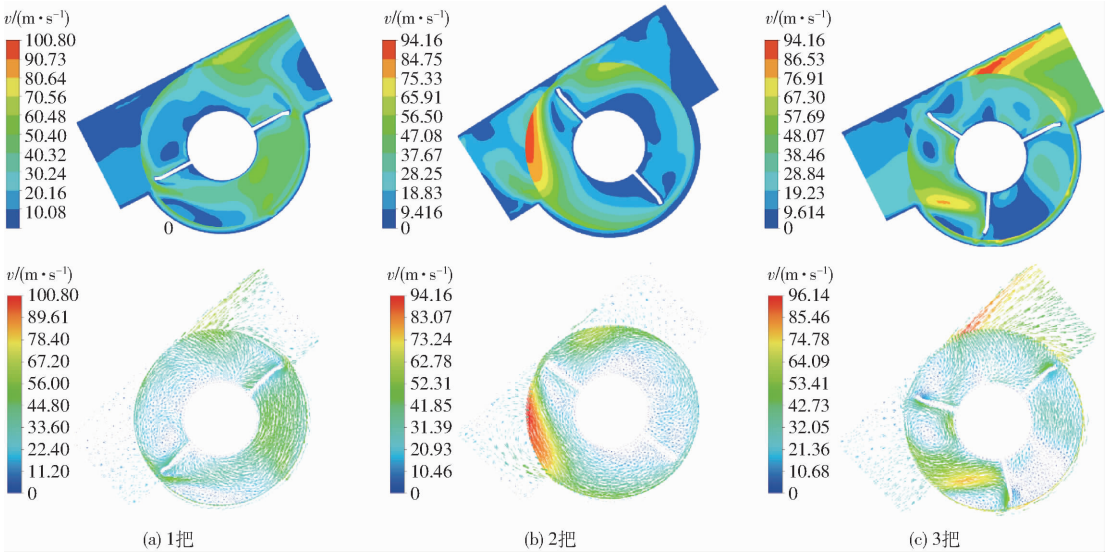
3.3　排风刀数量影响

为确定最佳排风刀数量，对抛送轴圆周上安装 1、2、3 把排风刀进行流场特性分析，结果如图 13 所示。由图 13 可知，圆周上布置 1 把排风刀，最大气流速度最大，原因为排风刀数量少，风量损失少，但其入口处靠近抛送轴部分产生了不利于抛送低风区；当圆周上布置 2 把排风刀时，入口处速度大、出口处速度小，出入口之间有较大的速度差，易造成棉秆回流和掉落，不利于棉秆抛送，且抛送轴中间部分产生大量涡流；当圆周上布置 3 把排风刀时，装置内部气流均匀，在蜗壳底部产生一片无风区，产生的无风区面积小于其他 2 种安装方式，且抛送装置入口处速度小、出口处速度大，速度分布均匀合理，有利于抛送。由速度矢量图可知，当排风刀圆周安装 1 把或者 2 把时，在入口处、出口处和抛送装置内部出现了大面积速度回流，破碎棉秆无法顺利抛出，易造成破碎棉秆堆积在抛送装置内；当排风刀圆周安装 3 把时，在入口处产生了一个涡流，气流没有出现大面积回流，有利于抛送碎秸秆。因此最终确定排风刀圆周安装数量为 3 把，由于排风刀呈交错平衡排列，根据排风刀轴长度确定一条轴线上安装 13 把排风刀，相邻轴线上安装 12 把，共计安装 75 把。

4　田间试验

4.1　试验条件

2024 年 10 月 12 日在尉犁县兴平镇孔雀村进行二次抛送式棉秆粉碎还田装置田间试验，试验田

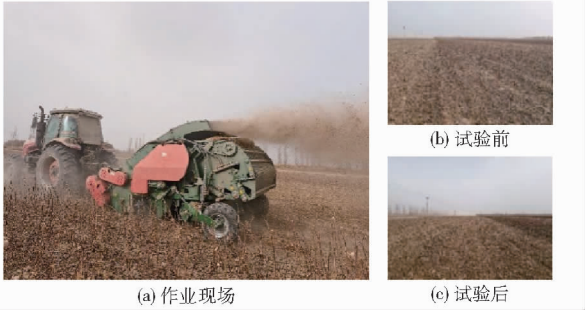


(a) 1把 (b) 2把 (c) 3把

图 13 排风刀数量对内部流场的影响

Fig. 13 Simulation results of influence of number of exhaust knives on internal flow field

土壤颗粒类型为砂质壤土,土壤含水率为 13.85%。试验田内棉花种植模式为“一膜三带六行”,试验棉秆平均含水率 21.5%,根部平均直径 16.2 mm。试验拖拉机为东风 1404 型,试验设备包括秒表、电子磅秤、转速表等,试验现场如图 14 所示。



(a) 作业现场 (b) 试验前 (c) 试验后

图 14 田间试验

Fig. 14 Field experiment

4.2 试验因素

根据前期棉秆粉碎还田作业预试验结果,在机具作业速度一定时,影响棉秆粉碎还田质量的主要因素为粉碎刀轴转速、离地高度和抛送轴转速。机具前进速度为 5 km/h,粉碎刀轴转速 n_1 为 2 200 ~ 2 600 r/min,离地高度 h 为 60 ~ 100 mm,抛送轴转速 n_2 为 2 600 ~ 3 000 r/min。采用 Box - Benhnken 试验设计方法,试验因素编码如表 1 所示。

表 1 试验因素编码

Tab. 1 Test factors and levels

编码	因素		
	n_1/(r·min^{-1})	h/mm	n_1/(r·min^{-1})
-1	2 200	60	2 600
0	2 400	80	2 800
1	2 600	100	3 000

4.3 试验指标

基于 GB/T 24675.6—2021《保护性耕作机械 第 6 部分:秸秆粉碎还田机》及 NY/T 1004—2020《秸秆粉碎还田机 质量评价技术规范》,以棉秆掉落率 S_1 和棉秆粉碎合格率 S_2 为评价指标。

(1)棉秆掉落率

在作业带内设置 3 个测试单元(1 m × 1 m),对测试单元内棉秆进行着色处理,试验后称取测试单元内掉落在原地的染色碎棉秆质量,再称取测试单元内总着色棉秆质量,计算棉秆掉落率 S_1,计算式为

$$S_1 = \frac{\sum_{i=1}^{3} g_i}{\sum_{i=1}^{3} G_i} \times 100\% \tag{14}$$

式中 g_i——第 i 个测试单元内掉落在原地的染色碎棉秆质量,kg

G_i——第 i 个测试单元内总着色棉秆质量,kg

(2)棉秆粉碎合格率

沿机具作业方向等间距选取 3 个测试单元(1 m × 1 m),捡拾测试单元内所有棉秆进行总量称量,同时挑选出粉碎长度大于 100 mm 的棉秆并称量,计算棉秆粉碎合格率 S_2,计算式为

$$S_2 = \left(\sum_{i=1}^{3} \frac{M_z(i) - M_b(i)}{M_z(i)} \times 100\% \right) \Big/ 3 \tag{15}$$

式中 $M_z(i)$——第 i 个测试单元内棉秆总质量,kg

$M_b(i)$——第 i 个测试单元内粉碎不合格棉秆总质量,kg

4.4 试验方案与结果分析

试验方案与结果如表 2 所示,A、B、C 为因素编码值。

使用 Design-Expert 对试验结果进行回归拟合分析,得棉秆掉落率 S_1 和棉秆粉碎率 S_2 的二次项回

表 2　试验方案及结果

Tab. 2　Test design scheme and results

试验号	因素			S_1/%	S_2/%
	A	B	C		
1	0	0	0	2.49	95.39
2	1	0	1	10.05	88.96
3	−1	1	0	5.58	94.97
4	0	−1	1	8.04	90.43
5	−1	0	1	16.45	87.64
6	0	0	0	7.24	93.54
7	1	1	0	5.94	93.09
8	−1	−1	0	6.02	91.91
9	1	−1	0	4.86	98.48
10	1	0	−1	4.52	92.56
11	0	0	0	4.03	94.21
12	0	1	1	5.47	91.25
13	−1	0	−1	5.12	94.58
14	0	−1	−1	6.43	92.43
15	0	0	0	5.93	90.72
16	0	1	−1	13.29	86.85
17	0	0	0	14.13	90.07

归模型为

$$S_1 = 5.58 - 4.62A + 0.64B - 1.06C - 0.40AB + 0.42AC + 0.13BC + 2.72A^2 + 1.96B^2 - 0.83C^2 \tag{16}$$

$$S_2 = 91.91 + 3.69A - 1.40B + 0.79C - 0.27AB - 0.23AC + 0.24BC - 0.25A^2 + 1.18B^2 - 0.30C^2 \tag{17}$$

对回归模型影响试验指标 S_1 的 3 个因素进行显著性检验与方差分析，结果如表 3 所示。由表 3 可知，试验模型极显著，且失拟项 P 为 0.372 5，大于 0.05，表明无失拟因素存在；棉秆掉落率 S_1 的 R^2 为 0.976 6，因此可以用棉秆掉落率 S_1 的二次回归方程进行分析。

表 3　棉秆掉落率方差分析

Tab. 3　Variance analysis of cotton stalk drop rate

方差来源	平方和	自由度	均方差	F	P
模型	235.72	9	26.19	57.20	0.000 1 **
A	170.76	1	170.76	372.94	0.000 1 **
B	3.32	1	3.32	7.24	0.031 0 *
C	9.05	1	9.05	19.77	0.003 0 **
AB	0.64	1	0.64	1.40	0.275 7
AC	0.72	1	0.72	1.58	0.249 4
BC	0.065	1	0.065	0.14	0.717 4
A^2	31.11	1	31.11	67.95	0.000 1 **
B^2	16.19	1	16.19	35.35	0.000 6 *
C^2	2.90	1	2.90	6.32	0.040 1 *
残差	3.21	7	0.46		
失拟项	1.62	3	0.54	1.37	0.372 5
误差	1.58	4	0.40		
总和	238.59	16			

注：* 表示差异显著（$0.01 \leqslant P < 0.05$）；** 表示差异极显著（$P < 0.01$），下同。

由表 3 可知，粉碎刀轴转速 A、抛送刀轴转速 C、A^2 对秸秆掉落率影响极显著，离地高度 B、B^2、C^2 影响显著。秸秆掉落率主要因素影响顺序由大到小为：粉碎刀轴转速、抛送刀轴转速和离地高度。

对回归模型影响试验指标 S_2 的 3 个因素进行显著性检验与方差分析，结果如表 4 所示。由表 4 可知，粉碎刀轴转速、离地高度和抛送刀轴转速均有显著影响，且模型失拟项 P 为 0.893 6，大于 0.05，表明无失拟因素存在；棉秆粉碎合格率 S_2 的 R^2 为 0.986 1，因此可以用棉秆粉碎合格率 S_2 的二次回归方程进行分析。

表 4　棉秆粉碎合格率方差分析

Tab. 4　Variance analysis of qualified rate of cotton stalk crushing

方差来源	平方和	自由度	均方差	F	P
模型	136.31	9	15.15	25.20	0.000 2 **
A	109.00	1	109.00	181.35	0.000 1 **
B	15.68	1	15.68	26.09	0.001 4 **
C	5.01	1	5.01	8.33	0.023 4 *
AB	0.29	1	0.29	0.49	0.508 6
AC	0.22	1	0.22	0.36	0.567 6
BC	0.23	1	0.23	0.38	0.555 4
A^2	0.27	1	0.27	0.45	0.522 6
B^2	5.46	1	5.46	9.08	0.019 6 *
C^2	0.38	1	0.38	0.63	0.454 3
残差	4.21	7	0.60		
失拟项	0.54	3	0.18	0.20	0.893 6
误差	3.67	4	0.92		
总和	140.52	16			

由表 4 可知，粉碎刀轴转速 A 和离地高度 B 对秸秆掉落率影响极显著，抛送刀转速 C、B^2 影响显著。秸秆粉碎合格率主要因素影响由大到小为：粉碎刀轴转速、离地高度和抛送刀轴转速。

4.5　交互因素对性能影响效应

利用 Design-Expert 软件绘制响应云图，分析 A、B 和 C 因素之间交互作用对 S_1 和 S_2 的影响。由图 15 可知，粉碎刀轴转速 A 越高，B 与 C 适中时，棉秆掉落率 S_1 越低。粉碎刀轴转速 A 越高，碎棉秆获得线速度越大，被抛掷距离越远，更有机会进入抛送模块从而实现二次抛送。随着抛送刀轴转速 C 升高，棉秆掉落率呈现下降趋势，这是由于抛送刀轴转速升高时形成的抛送及风送作用增强，进一步降低了棉秆掉落率。离地高度 B 对棉秆掉落率无明显影响。

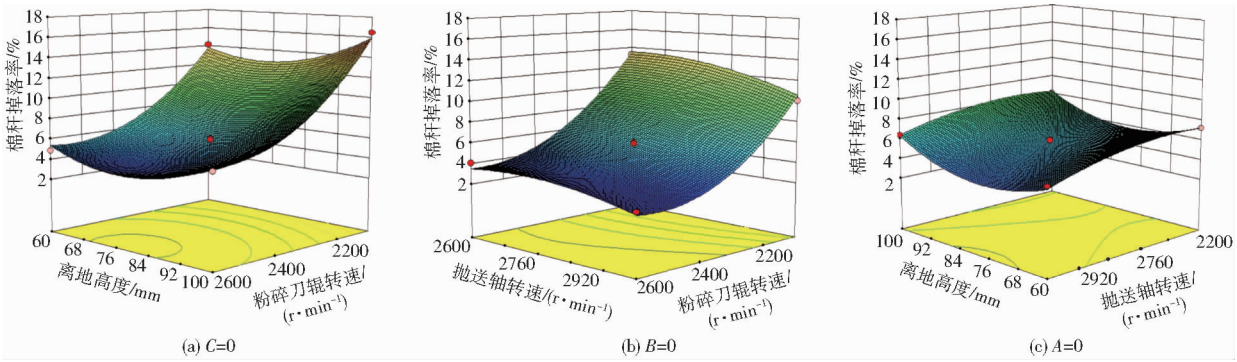


图 15 交互因素对棉秆掉落率的影响

Fig. 15 Influence of interaction factors on cotton stalk drop rate

由图 16 可知,粉碎刀轴转速 A 越高,B 与 C 适中时,棉秆粉碎合格率 S_2 越高。粉碎刀轴转速 A 越高,表明单位时间内棉秆受到的粉碎刀冲击次数越多,粉碎合格率越高。离地高度 B 越小,表明棉秆受到的打击范围越大,粉碎合格率越高。抛送刀轴转速 C 对粉碎合格率无明显影响。

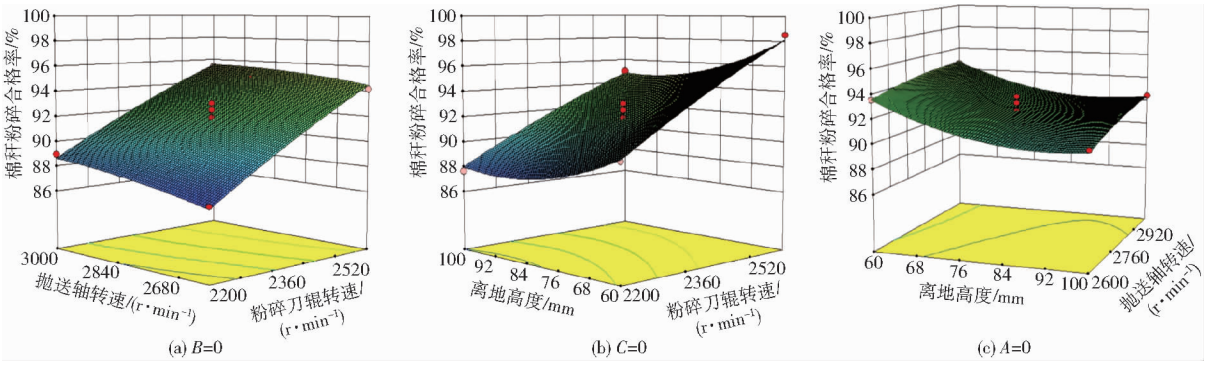


图 16 交互因素对棉秆粉碎合格率的影响

Fig. 16 Influence of interaction factors on cotton stalk crushing qualification rate

4.6 参数优化与验证

为获得二次抛送式棉秆粉碎还田装置最优工作参数,利用 Design-Expert 软件优化模块,对试验因素参数进行优选,遵循保证提高棉秆粉碎合格率、降低棉秆掉落率的原则,确定目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \min S_1(A,B,C) \\ \max S_2(A,B,C) \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant A \leqslant 1 \\ -1 \leqslant B \leqslant 1 \\ -1 \leqslant C \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \tag{18}$$

根据目标函数和约束条件,由 Design-Expert 软件可得最优参数组合为:粉碎刀轴转速 2 490 r/min、离地高度 77 mm、抛送刀轴转速 2 870 r/min,此时棉秆掉落率和棉秆粉碎合格率分别为 3.53% 和 98.55%。采用上述优化参数进行田间试验验证,试验结果表明棉秆掉落率为 3.41%,棉秆粉碎合格率为 97.85%,试验值与预测值相对误差不超过 5%,表明优化所得试验参数准确有效。

5 结论

(1)设计了二次抛送式棉秆粉碎还田装置,由一级粉碎模块与二次抛送模块组成。阐述了该装置工作原理,确定了粉碎刀与排风刀结构形式、壳体线型、离地高度等结构参数。

(2)建立了二次抛送式棉秆粉碎还田装置 CFD 内部流场仿真模型,分析了粉碎刀轴转速、抛送刀轴转速和排风刀数量对内部流场的影响,并确定了排风刀数量。

(3)以粉碎刀轴转速、离地高度和抛送刀轴转速为试验因素,棉秆掉落率和棉秆粉碎合格率为评价指标,进行了响应面试验,试验结果表明试验因素对作业效果影响显著。采用目标优化法得出,当机具粉碎刀轴转速为 2 490 r/min、离地高度为 77 mm、抛送刀轴转速为 2 870 r/min 时,作业效果最优。

(4)样机最优工作参数田间试验结果表明,粉碎还田装置棉秆掉落率为 3.41%,棉秆粉碎合格率为 97.85%,理论优化预测值与试验值相吻合,相对误差小于 5%,满足行业标准要求。

参 考 文 献

[1] 周欣,刘旋峰,姜羽晗,等. 新疆棉田废旧地膜机械化回收及资源化利用现状及发展趋势[J]. 新疆农业科学,2024,61(增刊 1):131 – 141.
ZHOU Xin, LIU Xuanfeng, JIANG Yuhan, et al. Current situation and development proposal of mechanized recovery and resource utilization of used mulch film in cotton fields in Xinjiang[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2024, 61(Supp. 1): 131 – 141. (in Chinese)

[2] 买买提·莫明,艾先涛,艾海提·阿木提,等. 对我国棉花主要产区产业兴旺的思考[J]. 棉花科学,2022,44(3):3 – 8.
MAIMAITI Moming, AI Xiantao, AIHAITI Amuti, et al. Considerations on the prosperity of the industry in the main cotton producing areas in China[J]. Cotton Sciences, 2022, 44(3): 3 – 8. (in Chinese)

[3] 谢建华,张凤贤,陈学庚,等. 弧形齿滚扎式残膜回收机的设计与参数优化[J]. 农业工程学报,2019,35(11):26 – 37.
XIE Jianhua, ZHANG Fengxian, CHEN Xuegeng, et al. Design and parameter optimization of arc tooth and rolling bundle type plastic film residue collector[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(11): 26 – 37. (in Chinese)

[4] 张慧明,陈学庚,颜利民,等. 随动式秸秆还田与残膜回收联合作业机设计与试验[J]. 农业工程学报,2019,35(19):11 – 19.
ZHANG Huiming, CHEN Xuegeng, YAN Limin, et al. Design and test of master-slave straw returning and residual film recycling combine machine[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(19): 11 – 19. (in Chinese)

[5] 白志刚,刘帅,胡启星,等. 棉花秸秆利用的主要途径及存在的问题[J]. 棉花科学,2021,43(5):11 – 15.
BAI Zhigang, LIU Shuai, HU Qixing, et al. Main ways and problems of cotton straw utilization[J]. Cotton Sciences, 2021, 43(5): 11 – 15. (in Chinese)

[6] WANG Lin, LI Xiaogang, LU Jieting, et al. Continuous plastic-film mulching increases soil aggregation but decreases soil pH in semiarid areas of China[J]. Soil & Tillage Research, 2017, 167:46 – 53.

[7] 刘艳慧,王双磊,李金埔,等. 棉花秸秆还田对土壤速效养分及微生物特性的影响[J]. 作物学报,2016,42(7):1037 – 1046.
LIU Yanhui, WANG Shuanglei, LI Jinbu, et al. Effects of cotton straw returning on soil available nutrients and microbial characteristics[J]. Acta Agronomica Sinica, 2016, 42(7): 1037 – 1046. (in Chinese)

[8] 路海洋,陈伟明,王方永,等. 棉花秸秆还田现状及其对棉花生长和土壤理化性状影响研究进展[J]. 中国棉花,2025,52(1):8 – 12.
LU Haiyang, CHEN Weiming, WANG Fangyong, et al. A review:current situation of cotton staw returning and its innuence on cotton owm and soil physical and chemical properties[J]. China Cotton, 2025, 52(1):8 – 12. (in Chinese)

[9] 秦新政,王玉苗,王志慧,等. 秸秆还田对棉田土壤养分和微生物多样性的影响[J]. 新疆农业科学,2022,59(5):1236 – 1244.
QIN Xinzheng, WANG Yumiao, WANG Zhihui, et al. Effects of straw returning on soil nutrients and microbial diversity in cotton field[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2022, 59(5): 1236 – 1244. (in Chinese)

[10] 王广栋. 秸秆还田方式对腐解特征及微生物群落功能多样性研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2019.
WANG Guangdong. Study on characteristics of soil decomposition and functional diversity of microbial communities using straw returning method[D]. Harbin: Northeast Agricultural University,2019. (in Chinese)

[11] 于云海,陈学庚,温浩军. 秸秆粉碎与残膜集条联合作业机的研制与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(24):1 – 8.
YU Yunhai, CHEN Xuegeng, WEN Haojun. Development and experiment of straw chopping and plastic film strip-collection combined machine[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(24): 1 – 8. (in Chinese)

[12] 蒋永新. 新疆棉田耕前残膜回收关键技术与装备研究[D]. 北京:中国农业大学,2023.
JIANG Yongxin. Research on the key technology and equipment of pre-tillage residual film recovery in Xinjiang cotton field [D]. Beijing: China Agricultural University, 2023. (in Chinese)

[13] CHELPURI R, NARAYAN R P, ARJUN M N, et al. A residue management machine for chopping paddy resid ues in combine harvested paddy field[J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): 5077 – 5083.

[14] 何玉泽,卢勇涛,王敏,等. 4MKJ 残膜回收打捆与秸秆粉碎联合作业机的研制与试验[J]. 新疆农机化,2023(2):7 – 8,22.
HE Yuze, LU Yongtao, WANG Min, et al. Development and test of 4MKJ residual film recycling and straw crushing integrated machine[J]. Xinjiang Agricultural Mechanization, 2023(2): 7 – 8,22. (in Chinese)

[15] 寇嘉乐,王吉奎,王磊,等. 夹指链式棉田残膜回收秸秆粉碎还田一体机设计与试验[J]. 农业工程学报,2023,39(23):14 – 22.
KOU Jiale, WANG Jikui, WANG Lei, et al. Integrating clamping finger-chain residual film recycling and straw crushing return to cotton field[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(23): 14 – 22. (in Chinese)

[16] 王毅超,蒋永新,张佳喜,等. 二次抛送式棉秸秆粉碎还田机的设计与试验研究[J]. 农机化研究,2021,43(11):78 – 82.
WANG Yichao, JIANG Yongxin, ZHANG Jiaxi, et al. Design and experimental study of the secondary toss cotton straw pulverizing and returning machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(11): 78 – 82. (in Chinese)

[17] 杨松梅,陈学庚,颜利民,等. 残膜回收机带式卷膜装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(2):135 – 144.
YANG Songmei, CHEN Xuegeng, YAN Limin, et al. Design and experiment on belt-type curl-up film device for residual plastic film recycling machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 135 – 144. (in Chinese)

[18] 贺小伟,刘金秀,徐杨,等. 4MB－6 型密植棉秆对行铲拔铺放机改进设计[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊 2):21－30.
HE Xiaowei, LIU Jinxiu, XU Yang, et al. Improvement design of 4MB－6 row-controlled shoveling and drawing placement machine for cotton-stalks in close planting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 21－30. (in Chinese)
[19] 贺小伟,刘金秀,王旭峰,等. 密植棉秆对行铲拔铺放机设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(10):142－151.
HE Xiaowei, LIU Jinxiu, WANG Xufeng, et al. Design and experiment of row-controlled shoveling and drawing placement machine for cotton-stalks based on agronomy of close planting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 142－151. (in Chinese)
[20] 颜利民,吴涛,蒋德莉,等. 侧抛式棉秆粉碎还田装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(3): 216－226.
YAN Limin, WU Tao, JIANG Deli, et al. Design and experiment of side-throwing cotton stalk crushing and returning device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(3): 216－226. (in Chinese)
[21] 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,2007:1050－1051.
[22] 刘彩玲,张福印,都欣,等. 水平涡轮叶片式精量排肥器设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊 1): 165－174.
LIU Cailing, ZHANG Fuyin, DU Xin, et al. Design and experiment of precision fertilizer distribution mechanism with horizontal turbine blades[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1): 165－174. (in Chinese)
[23] 蒲平. 图像中对数螺旋线的拟合[J]. 微型机与应用,2011(12):44－46.
PU Ping. Fitting logarithmic spiral in image[J]. Microcomputer and Application, 2011(12): 44－46. (in Chinese)
[24] 章志强. 玉米秸秆粉碎抛撒还田机的设计与秸秆运动特性研究[D]. 北京:中国农业大学, 2018.
ZHANG Zhiqiang. Research on corn straw chopping and spreading machine design and dynamic characteristic of straw[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
[25] 毛罕平,陈翠英. 秸秆还田机工作机理与参数分析[J]. 农业工程学报, 1995, 11(4): 62－66.
MAO Hanping, CHEN Cuiying. Working mechanism and parameters determination of field straw chopper[J]. Transactions of the CSAE, 1995, 11(4): 62－66. (in Chinese)
[26] 陈伟,刘旋峰,蒋永新. 后抛式棉秸秆粉碎抛送装置设计与试验[J]. 中国农机化学报,2025,46(8):192－201.
CHEN Wei, LIU Xuanfeng, JIANG Yongxin, et al. Design and experiment of a rear-throwing cotton straw crushing and conveying device[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(8): 192－201. (in Chinese)
[27] 罗文杰,张海春,刘旋峰,等. 二次抛送式秸秆粉碎还田及残膜回收联合作业机的研制[J]. 新疆农业科学,2024,61(增刊 1):142－146.
LUO Wenjie, ZHANG Haichun, LIU Xuanfeng, et al. Development of a combined operation machine for secondary conveying straw crushing and returning to field and residual film recovery[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2024, 61(Supp. 1): 142－146. (in Chinese)
[28] SHUAI Zhijun, JIANG Chenxing, WANG Donghua, et al. Numerical simulation of dynamic flow characteristics in a centrifugal water pump with three-vaned diffuser[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2015, 7(8): 1－12.

(上接第 245 页)

[22] 袁海阔. 玉米脱粒降损增效机理与仿生关键技术研究[D]. 长春:吉林大学,2022.
YUAN Haikuo. Research on the mechanism and bionic key technology of corn mechanical threshing to reduce losses and increase efficiency[D]. Changchun: Jilin University, 2022. (in Chinese)
[23] ZHOU D, HOU P, ZHANG J, et al. Mechanism of low damage rate maize ear pre-threshing based on cob internal expansion cracking[J]. Biosystems Engineering, 2025, 255: 104157.
[24] 邹久群. 深井复杂条件下镶齿滚刀破岩规律研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2020.
ZOU Jiuqun. Research on the law of rock fragmentation with inserted tooth hob under complicated conditions in deep shafts [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020. (in Chinese)
[25] JIANG H, CAI Z, WANG O, et al. Experimental and numerical investigation of hard rock breakage by indenter impact[J]. Shock and Vibration, 2020, 2020: 1－12.
[26] 付永领,德力根. 新型液压式岩石分裂器的研制[J]. 机床与液压,2008(5):65－67.
FU Yongling, DE Ligen. The development of novel rock knapper of hydraulic pattern[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2008 (5): 65－67. (in Chinese)
[27] 虞顺成. 玉米脱粒过程中的籽粒破损试验与分析[D]. 镇江:江苏大学,2019.
YU Shuncheng. Corn kernel damage test and analysis of corn threshing process[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019. (in Chinese)
[28] 全国农业机械标准化技术委员会. 玉米收获机械:GB/T 21962—2020[S]. 北京:中国标准出版社,2020.
[29] 全国农业机械标准化技术委员会. 脱粒机试验方法:GB/T 5982—2017[S]. 北京:中国标准出版社,2017.
[30] 高连兴,李飞,张新伟,等. 含水率对种子玉米脱粒性能的影响机理[J]. 农业机械学报,2011,42(12):92－96,42.
GAO Lianxing, LI Fei, ZHANG Xinwei, et al. Mechanism of moisture content affect on corn seed threshing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(12): 92－96, 42. (in Chinese)