

双带揉搓式残膜打捆装置与载膜箱的 结构与试验

王 敏, 霍 尚, 曹肆林, 营雨琨, 何玉泽, 卢勇涛

(新疆农垦科学院 机械装备研究所, 新疆 石河子 832000)

摘 要:针对现有残膜打捆过程中存在的结构复杂、打捆皮带寿命低、膜捆直径不可调、卸膜位置不确定和与现有残膜回收机配套性差等问题,设计了一种双带揉搓式残膜打捆装置,介绍了配套整机工作流程、残膜打捆结构组成及工作过程,重点对双带揉搓式残膜打捆装置、张紧装置及载膜箱进行设计。通过对打捆作业过程进行力学分析,确定了各功能部件的结构参数和工作参数。为验证双带揉搓式残膜打捆装置的作业性能和效率,以打捆腔角度、打捆带摩擦因数和打捆带线速度为试验因素,在此基础上,以残膜成捆率、残膜捆密度和打捆效率为响应变量,设计三因素三水平的二次回归试验,建立回归模型,分析各因素对残膜成捆率和捆密度的影响,并进行参数优化与试验验证。试验结果表明:影响残膜成捆率的因素由大到小依次为:打捆腔角度>打捆带线速度>打捆带摩擦因数;影响残膜捆密度的因素依次为:打捆带线速度>打捆腔角度>打捆带摩擦因数;影响打捆效率的因素依次为:打捆带摩擦因数>打捆带线速度>打捆腔角度。理论最优的设计参数如下:打捆腔角度为 33° ,打捆带选草坪纹打捆带摩擦因数为 0.83,打捆带线速度为 1.03 m/s。研究结果可为残膜打捆装置设计与高质量作业提供参考。

关键词:残膜打捆;膜捆直径可调节;双带打捆装置;载膜箱;正交试验

中图分类号:S225 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2026)08-2260-19

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20250030

Structural design and testing of double belt residual film binding device and film carrying box

WANG Min, HUO Shang, CAO Si-lin, YING Yu-kun, HE Yu-ze, LU Yong-tao

(Institute of Mechanical Equipment, Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation Science, Shihezi 832000, China)

Abstract: A dual belt residual film bundling device has been designed to address the problems of complex structure, low service life of bundling belts, adjustable tightness of film bundling, uncertain unloading position, and poor compatibility with existing residual film recycling machines in the existing residual film bundling process. This article introduces the composition and working process of the residual film bundling

收稿日期:2025-01-02.

基金项目:“兵团英才”青年项目;兵团重点领域科技攻关计划项目(2022AB020);新疆农垦科学院院级创新团队建设(202302).

作者简介:王敏(1984-),女,研究员.研究方向:农田残膜污染治理装备的研发与应用.

E-mail: wangmin20120210@163.com

structure, with a focus on optimizing the design of the bundling device, tensioning device, and film carrying box. By conducting a dynamic analysis of the bundling process, the structural and operational parameters of each functional component were determined. To verify the operational performance and efficiency of the dual belt residual film bundling device, three factor three-level quadratic regression experiments were conducted with bundling chamber angle, bundling belt friction coefficient, and bundling belt linear speed as experimental factors, and residual film bundling rate, residual film bundling density, and bundling efficiency as response values. A regression model was established to analyze the effects of each factor on residual film bundling rate, residual film bundling density, and bundling efficiency, and parameter optimization and experimental verification were carried out. The experimental results show that the factors affecting the bundling rate of residual film are in descending order: bundling chamber angle > bundling belt linear velocity > bundling belt friction coefficient; The factors that affect the density of residual film bundling are in the following order: bundling belt line speed > bundling chamber angle > bundling belt friction coefficient; The factors that affect packaging efficiency are in the following order: the friction coefficient of the strapping belt > the angle of the strapping chamber > the linear velocity of the strapping belt. Theoretical optimal design parameters: bundling chamber angle is 33° , packing belt friction coefficient is 0.83, and packing belt linear velocity is 1.03 m/s. The research results provide reference for the design and high-quality operation of residual film bundling devices.

Key words: tying device; adjustable bale diameter; double-belt baling device; film magazine; orthogonal experiment

0 引 言

自20世纪70年代起,覆膜栽培技术因其实现保墒增产的显著效果,已被广泛采纳并应用于我国农业生产中^[1]。地膜使用量和地膜覆盖面积持续增长,目前中国连续多年位居世界第一^[2]。2022年,新疆农田地膜覆盖面积达到 $3.61 \times 10^6 \text{ hm}^2$,使用总量为 $2.41 \times 10^5 \text{ t}$,分别占全国农田地膜总面积21.44%和总使用量的19.48%,在全国范围内居首^[3,4]。随着地膜覆盖面积和使用量的逐年增加,残留在农田的地膜越来越多,导致严重的地膜污染,妨碍水肥的有效传输与土壤微生物的活力,造成土壤的硬化,进而严重影响作物的生长与产量^[5,6]。

当前,机械化回收成为应对地膜残留主要手段^[7,8]。国内广泛使用的残膜回收机型大多将回收上来的残膜直接抛送到集膜箱内,集膜箱装满后将收集好的残膜堆放到田间。未经打捆的残膜结构松散,一方面,单位体积内杂质含量较高,不仅影响其在运输与储存过程中的效率,还妨碍残膜的再回收利用;另一方面,堆放在田间的地膜随风飘散极易造成二次污染。将回收的残膜打捆成结构紧实、体积小且不易松散的残膜捆,可提高残膜处理的可持续性,并在经济效益方面展现出更

为显著的优势。因此,在残膜回收的作业过程中进行残膜打捆,是机械化回收残膜的发展方向:周金豹等^[9]研制的辊轴式残膜打捆装置,刘杰^[10]设计了卷膜式残膜打捆机,王征等^[11]设计揉搓式残膜打捆装置,张恒等^[12]设计了CMJD-1500型残膜捡拾打捆机。尽管残膜回收机械化的技术已取得显著进展,但仍存在带式残膜打捆装置膜捆直径不可调、自动化程度较低、机具结构复杂、作业连续性差、频繁停机影响效率等问题。为防止残膜污染,国外强制使用厚度为0.02 mm以上的地膜,其力学强度较高,且覆膜周期短,回收时地膜老化程度低、完整性好,可通过卷收方式直接成捆。现有国外残膜回收机多由起膜铲与卷膜辊构成核心部件。1998年PARISH团队研发的液压恒扭矩卷膜系统,可自适应拖拉机速度与卷轴直径变化,配合快卸结构实现自动化收卷^[13];澳大利亚Rocca公司设计的锥形卷膜装置,利用可开合锥尖完成膜卷田间卸载^[14];美国PS610机型采用人工辅助分切卷收,自动化水平较低^[15];日本依托短周期覆膜特性,开发简易卷膜机,但缺乏压缩功能^[16];2021年Khazimov^[17]团队改进的卷收机,通过摩擦离合器与液压系统调节卷膜转速,结合可分离辊结构提升卸膜效率。国外残膜回收技术

以卷收为核心,作业后膜捆直接堆放田间,无需额外打捆处理。这与其地膜材料特性密切相关,回收后仍保持较高强度,而我国棉田普遍使用0.01 mm地膜,覆盖周期长,受紫外线与机械作用导致残膜严重破碎,且秸秆、棉铃壳和土壤杂质较高。国外卷收技术在我国应用时易出现膜卷松散、杂质堵塞等问题。

市场上主流的残膜回收与秸秆粉碎联合作业机采用残膜打捆的方式主要为皮带打捆和多辊打捆^[18-20]。多辊打捆通过多个钢棍的旋转和压紧,将残膜进行打捆^[21]。其优点是多辊打捆技术源于牧草和作物秸秆圆捆机,技术较为成熟,但由于其结构复杂,易引起机具故障,其应用范围较窄^[22]。皮带打捆通过打捆皮带的揉搓作用形成膜捆,其结构简单、成本低可调等优点使其应用广泛^[23],但在实际工作中发现皮带由于自身寿命限制,如果直接进行张紧,会使得皮带在工作过程中受到突变的冲击载荷,其大大减少打捆皮带的寿命^[24],并且由于皮带受力不均匀,其打捆压力也在波动,影响打捆质量,并且更换打捆皮带装卸麻烦,耽误打捆效率。现有的打捆装置中膜捆大小和紧实度都不可调节,不利于满足膜捆再利用要求,并且多数残膜打捆装置打捆后即刻卸载,缺乏定点卸捆功能,给后续转运工作带来困难。

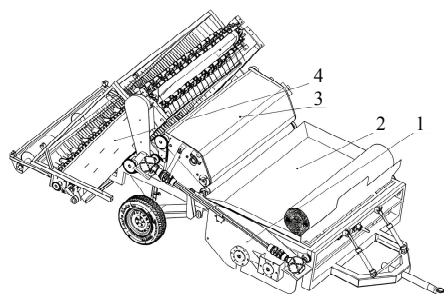
本文针对现有残膜打捆过程中存在的结构复杂、打捆皮带寿命低、膜捆紧实度不可调、卸膜位置不确定和与现有残膜回收机配套性差等问题,设计出一种可携捆作业的双带揉搓式残膜打捆装置。通过打捆作业过程进行动力学分析,确定各功能部件的结构和工作参数,进行关键结构设计,分析打捆腔角度、打捆带摩擦因数、打捆带线速度对残膜成捆率、残膜捆密度及打捆效率的影响,为农田残膜高质量作业提供参考。

1 双带揉搓式残膜打捆装置结构与工作原理

1.1 整机结构

配套整机结构示意图如图1所示,其联合作业工序为:秸秆粉碎还田、残膜捡拾、残膜打捆、膜捆自动输送至载膜箱、定点卸膜。

打捆工作流程如图2所示。残膜回收打捆工序为:残膜捡拾装置(捡拾残膜)、双带打捆装置(残膜通过脱膜装置从捡拾装置掉入到双带式打

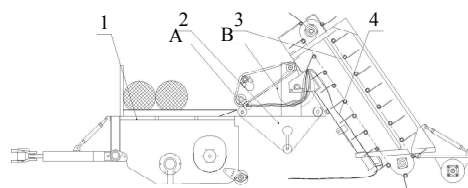


1-秸秆粉碎还田装置;2-载膜箱;3-双带式揉搓残膜打捆装置;4-地膜捡拾装置

图1 配套整机示意图

Fig. 1 Schematic diagram of whole machine

捆装置上)、载膜箱(打捆完成后,膜捆进入载膜箱)。其中,捆芯在打捆腔左端A区形成,成捆在



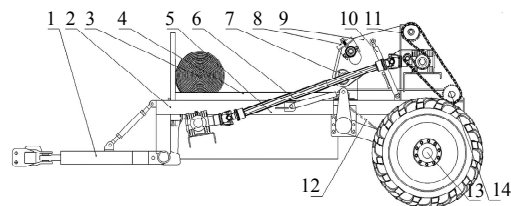
1-打秆装置;2-打捆装置;3-捡拾装置;4-地膜

图2 配套整机示意简图

Fig. 2 Schematic diagram of whole machine

打捆腔内部B区完成。

双带揉搓式残膜打捆装置的结构如图3所示,主要由牵引架、机架、传动系统、携捆装置、下打捆装置、上打捆装置、上打捆装置开合液压缸、固定张紧装置和浮动张紧装置等零部件组成。



1-牵引架;2-机架;3-膜捆;4-载膜箱;5-卸膜液压杆;6-传动轴;7-上打捆装置支撑辊;8-上打捆固定支撑装置;9-上打捆装置;10-上打捆装置开合液压缸;11-上打捆装置主动链轮;12-下打捆装置;13-地轮;14-下打捆装置主动链轮

图3 双带打捆装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of double-belt tying device

其中,上打捆装置和下打捆装置由上下2组打捆皮带、主动辊、支撑辊、自重部件、张紧机构和液压缸组成,上打捆皮带绕在上主动支撑辊、上支撑辊和张紧辊上,下打捆皮带绕在下主动支撑辊、下支撑辊自重部件上。张紧机构将打捆皮带张紧后,在2条打捆皮带之间形成一个水平的V字打捆腔,打捆腔向右开启,捡拾装置捡拾后的残膜经

过脱模板脱离捡拾弹齿,然后进入打捆装置。残膜从打捆腔的右端进入,如图 2 所示。当膜捆直径达到预设大小时,上打捆装置液压缸进行伸缩使得打捆腔左端开启,打捆后的膜捆进入载膜箱。双带揉搓式残膜打捆装置主要技术参数如表 1 所示。

表 1 主要工作参数

Table 1 Main working parameters

参数	数值
配套动力/HP	≥35
整机尺寸/(mm×mm×mm)	4 000×2 800×1 700
膜捆直径(可调)/mm	≤350
膜捆箱装容量(膜捆装箱)/捆	3~5
打捆带幅宽/mm	2 000
残膜成捆率/%	100
工作率捆/h	10~16

1.2 工作原理

双带揉搓式残膜打捆装置采用半悬挂连接,由拖拉机牵引驱动。工作时,农田残膜被机具捡拾装置捡拾后运送至脱膜位置后,回收的残膜在经过脱膜后掉落在打捆装置上,并随打捆皮带向打捆腔方向运动。残膜进入上打捆装置与下打捆装置组成的打捆腔内,在上下打捆皮带的“搓压”作用下形成膜捆,三角形打捆腔前端有个比较小的缝隙,残膜上的杂质随下打捆皮带通过该缝隙掉落田间,完成除杂过程;固定张紧装置和浮动张紧装置保持上下打捆装置间的皮带的张紧力不变,形成的膜捆从中间到两端紧实度一致性好,实现对残膜进行“搓压”打捆。浮动装置随着膜捆的直径变化进行小范围上下浮动。浮动张紧装置下端设有行程开关,调节行程开关位置即可形成不同直径膜捆(≤350 mm)。当膜捆直径达到设置值大小时,浮动装置碰到行程开关,驾驶室内接收到报警信息,操作人员操控液压开合机构的操作杆会开启上打捆装置,将膜捆卸在载膜箱,然后关闭上打捆装置继续进行残膜打捆作业;当载膜箱装载量达到 3~5 个膜捆时,可在农田地头进行定点卸膜。设计的载膜箱减少停机卸膜的频次,从而提升打捆作业效能,并为回收残膜捆的后续转运提供便利条件,增强残膜打捆作业的连续性和提高了打捆效率。作业结束后,操控地轮液压缸将地轮调整至运输状态并锁好各部件的运输安全销,以便机具安全运输和存放。

1.3 废弃农田地膜与皮带摩擦特性

残留地膜与不同表面纹路的打包皮带间的摩擦性能直接影响地膜打捆时的稳定性及作业成功率。因此,系统研究残留地膜在真实农田环境下的摩擦性能变得极为重要。本研究结合了农田现场调研与实验室摩擦测试方法,分析了使用时长分别为 120 d 和 180 d、厚度为 0.01 mm 的地膜样本,这些样本源于 2023 年秋季回收的地膜。在地膜回收作业中,材料间的摩擦作用是决定作业难易度的主要因素。如表 2 所示,研究两种不同铺设时间的地膜摩擦特性。

表 2 地膜摩擦特性

Table 2 Friction characteristics of plastic film

编号	摩擦带类型	摩擦角/(°)
1	光带	38
2	草坪纹带	49
3	颗粒纹带	54
4	光带	37
5	草坪纹带	47
6	颗粒纹带	55

残膜与光带的平均摩擦角为 37.5°,残膜与草坪纹带的平均摩擦角度为 48°,残膜与粗糙带的平均摩擦角度为 54.5°。通过式(1)把摩擦角度转化为最大静摩擦因数:

$$\mu = \tan \theta \quad (1)$$

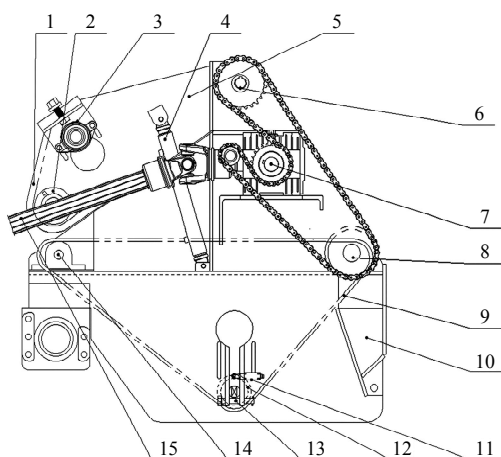
根据式(1)得出残膜与光带的摩擦因数约为 0.77,残膜与草坪纹带的摩擦因数约为 1.11,残膜与粗糙带的摩擦因数约为 1.40。研究打捆皮带的摩擦因数为后续摩擦因数确定提供试验的理论基础。

2 主要部件设计

2.1 打捆装置设计

打捆机构是双带揉搓式残膜打捆装置的核心部件。作业时,进入打捆腔的残膜在双带揉搓式残膜打捆装置作用下形成膜捆。该机构由上打捆带、下打捆带、上主动支撑辊、上支撑辊、下浮动支撑辊、下主动支撑辊、下支撑辊和液压开合机构组成。考虑到残膜后处理方面和再利用的要求,残膜捆最大直径为 350 mm,如图 4 所示。

打捆皮带的设计在技术上受到输送带技术的启发,但与输送带相比,打捆皮带的结构更为复杂。其作业长度较短,布局更为多样化,以适应残膜打捆作业中的较高负载需求和复杂操作环境,



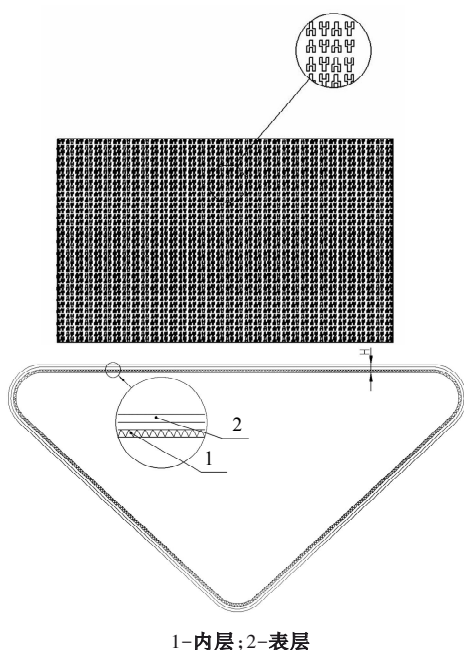
1-上打捆皮带;2-上支撑辊;3-固定张紧装置;4-开合液压缸;
5-上打捆装置;6-上主动支撑辊;7-齿轮箱链轮;8-下主动支撑
辊;9-下打捆皮带;10-机架;11-浮动张紧装置;12-行程开关;
13-运输安全销;14-下支撑辊;15-传动轴

图 4 双带打捆结构

Fig. 4 Double-belt baling structure

从而满足农业作业中更高的要求。常用的打捆皮带材料有橡胶、硅胶、聚氯乙烯(PVC)和金属等^[25],其中PVC带由于其良好的耐候性、耐磨性、柔韧性和经济性,常作为打捆皮带的材料。

打捆皮带采用聚氯乙烯(PVC),表面为草坪纹,厚度为5 mm(三布三胶),如图5所示。根据新疆地区棉花采用(66+10) cm的机采棉种植模式^[26],确定打捆皮带的工作宽度 $L=2\ 000$ mm。打捆皮带主要有两个作用:一是把回收的残膜运



1-内层;2-表层

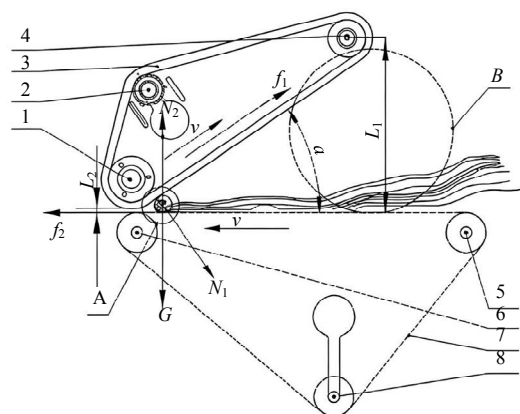
图 5 打捆皮带

Fig. 5 Baling belt

送到打捆腔内;二是对进入打捆腔体内的残膜进行打捆。其材料要具有耐磨性、耐候性以及经济性。打捆带的粗糙程度不仅影响运输效果,还影响打捆质量,对于打捆带表面的摩擦因数来说,在合理范围内摩擦因数越高,打捆带对残膜的运输效果越好,形成的膜捆密度越高。

打捆腔位于打捆装置内部。其有两个作用:一是容纳待打捆残膜物料;二是打捆过程中对残膜物料进行“搓压”作用,以便形成紧密、均匀的膜捆。

开始作业时,残膜在下打捆皮带的运输下进入开式V型打捆腔并堆积左端A处,此时掉落在打捆室的残膜质量与体积较小,上下打捆带形变可以忽略不计,残膜在打捆室底部受力如图6所示。



1-上主动支撑辊;2-固定张紧装置;3-上打捆皮带;4-上支撑辊;
5-下支撑辊;6-下主动支撑辊;7-下打捆皮带;8-浮动张紧装置

图 6 捆芯形成阶段残膜实际受力

Fig. 6 Actual force on residual film during formation stage of bundled core

μ_1 是上打捆皮带的滑动摩擦因数, μ_2 是下打捆皮带的滑动摩擦因数。由于两个打捆皮带材料都是聚氯乙烯(PVC),并且表面粗糙程度相同, $\mu_1=\mu_2=\mu$ 。

如图7所示,上下打捆带与残膜捆之间具有相互运动,两者相互间摩擦力是滑动摩擦力,则 $f_1=\mu_1 N_1, f_2=\mu_2 N_2$ 。

$$\begin{cases} N_1 = \frac{\mu G}{\sin \alpha + \mu^2 \sin \alpha} \\ N_2 = \left(\frac{G}{1 + \mu^2} \right) + \frac{\mu^2 G \cos \alpha}{\sin \alpha + \mu^2 \sin \alpha} \end{cases} \quad (1)$$

式中: M 为打捆装置中的作用力矩,N/mm; α 为上皮带与下皮带之间的夹角,(°); μ 为上下打捆皮

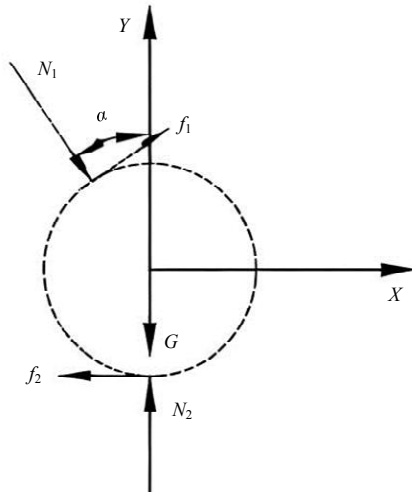


图7 捆芯形成阶段残膜捆受力分析

Fig. 7 Analysis of residual film bundle stress during formation stage of bundle core

带的摩擦因数。

打捆过程中,上下打捆皮带施加的力矩作用使得残膜被紧紧压缩,形成一个紧密而坚实的残膜捆。其力矩 M 为:

$$M = f_1 r_1 + f_2 r_2 \quad (2)$$

式中: r_1 为地膜捆中心到上打捆皮带的距离,mm; r_2 为地膜捆中心到下打捆皮带的距离,mm。

根据式(1)(2)可以推出:

$$M_1 = \frac{\mu Gr_1 + \mu^3 G \cos \alpha r_2}{\sin \alpha + \mu^2 \sin \alpha} + \frac{\mu Gr_2}{1 + \mu^2} \quad (3)$$

打捆过程中,残膜捆看作一个质地均一的物体,其到上打捆皮带的距离和到下打捆皮带的距离一样, $r_1 = r_2 = r$,简化 M 为:

$$M_1 = \frac{\mu Gr + \mu^3 G \cos \alpha r}{\sin \alpha + \mu^2 \sin \alpha} + \frac{\mu Gr}{1 + \mu^2} \quad (4)$$

由式(4)可知,摩擦因数 μ 、上打捆装置与水平的夹角 α 、打捆半径对打捆力矩影响较大。转动力矩的增大有利于膜捆芯的形成。式(4)对 μ 求偏导,可以看出摩擦因素 μ 减小会导致打捆力矩减小。打捆力矩减小造成捆率低,残膜捆密度低。但 μ 过大,则会造成在打捆初期残膜会紧贴打捆带,导致残膜难以形成捆芯,残膜被打捆带向后甩去。打捆力矩 M 随着膜捆直径的增大而增加,现有的很多非浮动式张紧结构会产生残膜捆紧实度不均问题。该打捆装置专门设计了浮动式支撑辊,当残膜捆出现紧实度不均问题较严重时,浮动式支撑辊会进行一定的倾斜,但是由于重力作用浮动机构又趋于平衡,促使残膜捆紧实度一

致。浮动式支撑辊避免打捆带的冲击载荷,使膜捆直径不一致时的冲击载荷变为一种缓慢变化的载荷,其大大延长了打捆带的寿命。

通过式(4)对 α 求偏导分析出, α 的大小影响打捆力矩的大小。残膜捆芯的紧实程度与上打捆装置相对于水平面的角度 α 之间存在关联。角度 α 逐渐减小时,打捆装置的打捆紧实效果呈现出增大的趋势;然而,若 α 值过小,则可能导致残膜堵塞在打捆腔等问题。 α 值过大,残膜捆紧实度可能过低,膜捆过于松弛,导致膜捆易于变形,占用空间增大。对于捆芯形成阶段考虑到右边进料口要能保证能顺利地进入残膜而不堵塞,设计进料口高度 $L_1 = 80$ cm,工作过程中考虑到小颗粒杂质和棉花落叶的影响,出料口保持 $L_2 = 2$ cm。选取上打捆带与水平之间的夹角 $\alpha = 30^\circ$ 。

在膜捆捆芯形成之后,膜捆进行“滑移”运动^[27],即同步进行滚动与相对打捆带的滑动。此时膜捆的打捆力矩 M 为:

$$M_2 = f'_1 r_2 + f'_2 r_2 - M_{f1} - M_{f2} \quad (5)$$

式中: M 为残膜捆受到的力矩,N/m; f'_1 、 f'_2 为滑动摩擦力; M_{f1} 、 M_{f2} 为滚动摩擦力偶矩($0 \leq M_f \leq M_{\max}$)。滚动摩擦力的摩擦因数 μ_2 小于滑动摩擦因数 μ_1 。

$$M_{\max} = \delta F_N = FR \quad (6)$$

式中: δ 是比例常数,称为滚动摩擦因数,滚动摩擦因数具有长度的量纲,mm。

根据图8分析出膜捆在水平和竖直方向上的受力:

$$\begin{cases} f'_2 + f_{m1} \cos \alpha = f'_1 \cos \alpha + f_{m2} + N_1 \sin \alpha \\ G + f_{m1} \sin \alpha + N_1 \cos \alpha = N_2 + f'_1 \sin \alpha \end{cases} \quad (7)$$

上打捆装置和下打捆装置对膜捆的压力为:

$$\begin{cases} N'_1 = \frac{\left(\mu - \frac{\delta}{R}\right) G}{\sin \alpha \left[\mu \left(-\frac{\delta}{R}\right)^2 + 1 \right]} \\ N'_2 = \frac{\left[\mu \left(-\frac{\delta}{R}\right) \cos \alpha + \sin \alpha \right] G}{\sin \alpha \left[\left(\mu - \frac{\delta}{R}\right)^2 + 1 \right]} \end{cases} \quad (8)$$

式(8)代入式(5)得:

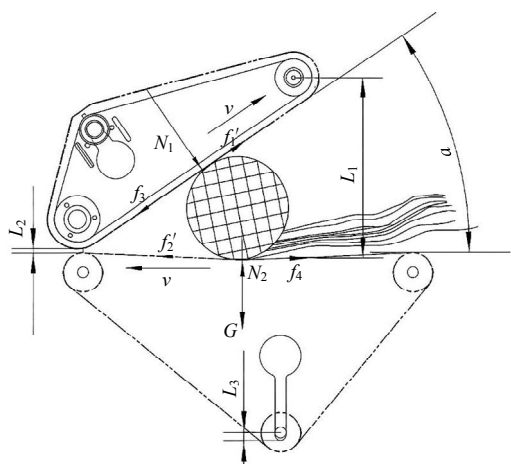


图 8 残膜捆完成阶段实际受力

Fig. 8 Actual force diagram during completion stage of residual film bundling

$$M_2 = \mu \frac{\left(\mu - \frac{\delta}{R} \right) + \left(\mu - \frac{\delta}{R} \right) \cos \alpha}{\sin \alpha \left[\left(\mu - \frac{\delta}{R} \right)^2 + 1 \right]} GR + \frac{\mu GR}{\left(\mu - \frac{\delta}{R} \right)^2 + 1} \quad (9)$$

由式(9)可知,在膜捆芯形成后,随着膜捆质量和半径的增加,膜捆受到的力矩越大($M_2 > M_1$),膜捆紧实度进一步提升。在分析膜捆芯形成阶段和打捆完成阶段的 M_1 和 M_2 可以看出,对打捆力矩影响较大的3个因素分别为: μ 、 α 和膜捆半径 R ,这3个因素对应的设计值分别为打捆带摩擦因数,上打捆皮带与水平夹角,打捆皮带的线速度。

由于打捆皮带线速度对膜捆直径的影响并没有直接体现,则通过理论分析计算得出打捆皮带线速度是如何影响膜捆直径的。为了剥离次要因素干扰,主要分析打捆带的线速度对膜捆半径的宏观影响,不考虑材料弹性、压缩性、张力和层间压缩间隙,简化这些影响因素,以便集中分析打捆带线速度对膜捆半径的直接影响(见图9)。

dt 时间内,新增膜的体积 dV 可以表示为:

$$dV = vTWdt \quad (10)$$

该体积 dV 形成一个圆环状的新层,假设形成新层的直径为 $R(t)$,则体积也可表示为:

$$dV = \pi(R(t) + dR)^2 dR - \pi(R(t))^2 dR \quad (11)$$

式中: dR 为半径的微小增量,在极小的时间间隔内,新增层的厚度远小于原有的半径,则:

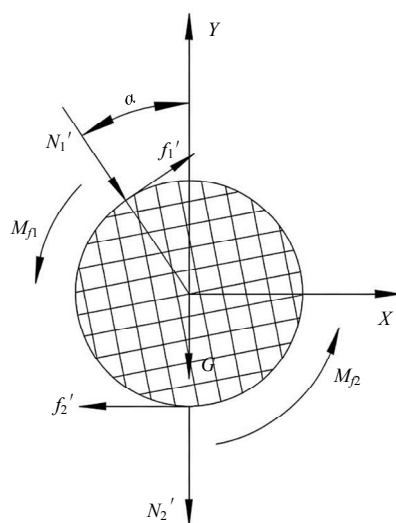


图 9 残膜捆完成阶段受力分析

Fig. 9 Stress analysis during completion stage of residual film bundling

$$dV = \pi R(t) dR \quad (12)$$

结合式(11)(12)得出:

$$vTWdt = \pi R(t) dR \quad (13)$$

式中: T 为地膜厚度,mm; W 为地膜宽度,mm; v 为打捆皮带的线速度,m/s; R 为膜捆半径,mm。

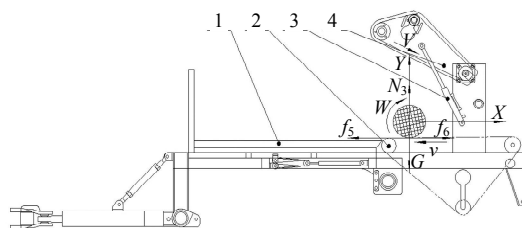
由式(13)可以看出,在相等的时间,在膜捆厚度和宽度不变的情况下,膜捆半径理论上主要受到打捆皮带线速度的影响。

如图10所示,残膜捆进入载膜箱阶段。

膜捆在 X 方向进行受力分析:

$$f_5 \gg f_6 \quad (14)$$

式中: f_5 为滑动摩擦力; f_6 为膜捆受到滚动摩擦力,由于滑动摩擦力远远大于滚动摩擦力,并且由于膜捆仍然是滚动状态具有惯性,可以直接进入载膜箱。



1-载膜箱;2-下主动支撑装置;3-开合液压缸;4-上打捆装置

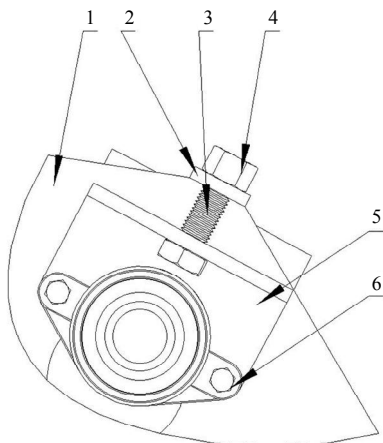
图 10 残膜捆进入载膜箱阶段实际受力图

Fig. 10 Actual force diagram of residual film bundle entering membrane box stage

2.2 固定张紧和浮动张紧机构

张紧机构的作用是使打捆带保持一定的张紧度,一方面防止打捆带打滑,另一方面使残膜捆持续受压,保证残膜捆的密实度。张紧机构分为固

定式张紧机构和浮动式张紧机构,固定张紧装置由上打捆装置上主动支撑辊、上支撑辊、上打捆装置侧板、张紧调节螺栓、张紧调整螺母、固定式张紧装置支撑座、支撑辊轴承等组成,其结构如图 11 所示。



1-上打捆装置侧板;2-上打捆调节支撑座;3-张紧调节螺栓;
4-张紧调整螺母;5-固定式张紧装置支撑座;6-支撑辊轴承

图 11 固定式张紧示意图

Fig. 11 Schematic diagram of fixed tensioning

支撑辊两端通过支撑辊轴承与上打捆装置侧板通过螺栓固定连接,上打捆装置侧板通过上打捆调节支撑座与固定式装置支撑座之间的距离进行张紧程度的调节,通过调节张紧螺母来调节上打捆调节支撑座与固定式装置支撑座之间的距离。

固定张紧装置的总张紧压力是支撑辊对打捆带的接触面施加的法向力,其公式为:

$$P = q \cdot A \quad (15)$$

式中: P 为总张紧压力,kN; q 为单位压力,MPa; A 为接触面积, mm^2 或 m^2 ,由打捆带宽度和支撑辊接触弧长决定。

$$A = b \cdot L \quad (16)$$

式中: b 为打捆带宽度,mm; L 为支撑辊与打捆带的接触弧长。

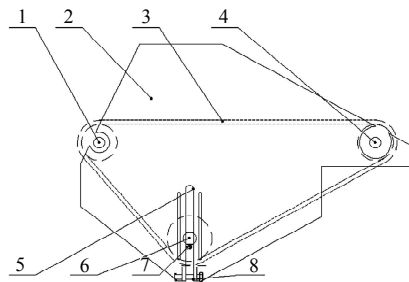
$$L = \frac{\theta}{360^\circ} \cdot \pi \cdot D \quad (17)$$

$$q = \frac{\eta \cdot F_0}{A} \quad (18)$$

$$P = \eta \cdot F_0 = q \cdot \left(b \cdot \frac{\theta}{360^\circ} \pi \cdot D \right) \quad (19)$$

式中: θ 为接触角度,取 80° ; F_0 为螺栓预紧力,取 $1\,600\text{ N}$; D 为支撑辊直径, $D=140\text{ mm}$ 。计算出张紧力为 1594.28 N 。

浮动式张紧装置由下支撑辊、下打捆皮带、主动支撑辊、浮动支撑辊等组成,其结构如图 12 所示。

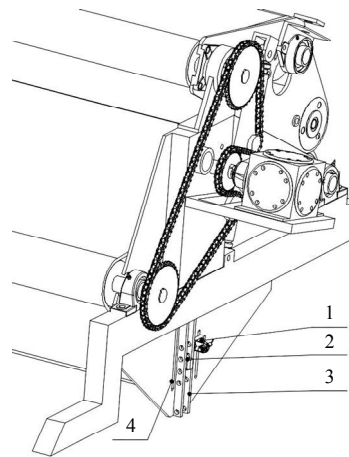


1-下主动支撑辊;2-下打捆装置侧板;3-下打捆皮带;4-下支撑辊;
5-浮动支撑辊卡槽;6-浮动支撑辊;7-行程开关;8-运输安全销

图 12 浮动式张紧机构示意图

Fig. 12 Schematic diagram of floating tensioning mechanism

浮动支撑辊的两端通过浮动支撑辊卡槽结构与下打捆装置机架实现滑动连接,限定其仅能在垂直方向上进行上下浮动活动,有效地防止在打捆过程中浮动支撑辊出现横向偏移的情况。同时,为避免打捆皮带对地轮轴运行产生阻碍,浮动支撑辊被配置在较靠后的水平位置。其安装位置如图 13 所示。



1-红外线传感器;2-浮动支撑辊;3-浮动打捆装置导向槽;
4-观察口

图 13 浮动式张紧装置安装示意图

Fig. 13 Installation diagram of floating tensioning device

浮动支撑辊在重力的作用下,能够对下部打捆皮带施加恒定且适宜的压力,实现动态对打捆皮带张紧。此种设计确保了打捆过程中皮带从中间到两端张紧状态的稳定性和一致性,进而提升整个打捆作业的可靠性和效率。通过动态恒定的张紧方式,浮动支撑辊不仅能够防止打捆皮带松

弛,还能够均衡各端压力,从而保证残膜捆具有较好的均一性和紧实度。

膜捆在打捆过程中处于均匀加载状态,即膜捆的直径变化与浮动张紧装置的高度变化是同步的,不考虑局部的应力集中特征。故在后面的数学模型中将皮带的应力-应变关系视为常规的线性关系,如图 14 所示,不考虑材料的塑性、屈服点的变化。

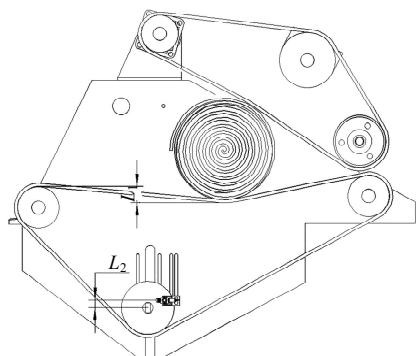


图 14 膜捆直径与浮动张紧装置高度的关系示意图

Fig. 14 Schematic diagram of relationship between diameter of membrane package and height of floating tensioning roller

膜捆直径与浮动张紧装置的高度之间的线性关系可以表示为:

$$L_2 = k \cdot L_1 \quad (20)$$

式中: L_2 为浮动张紧装置上升高度; L_1 为膜捆直径; k 为比例常数,在实际应用中通过台架试验数据获得。

在台架试验测得 L_1 和 L_2 的数值,如表 3 所示。

表 3 膜捆直径与张紧装置高度试验数据表

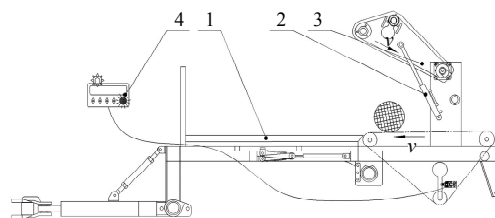
Table 3 Experimental data sheet of membrane package diameter and tensioner height

组数	L_1/mm	L_2/mm	k
1	313.4	4.3	0.014
2	204.4	2.1	0.010
3	345.9	5.2	0.015
4	303.2	2.8	0.010
5	295.4	2.6	0.009
6	294.6	2.5	0.008
平均值	292.8	3.3	0.011

由 L_1 和 L_2 建立的数学模型可知,当行程开关安装在浮动装置上方不同位置时,能报警的膜捆直径也不同,所以调整行程开关在浮动装置上方的高度差,即可形成不同直径的膜捆。

行程开关一旦被触发,系统会发送报警信号至驾驶室,通知拖拉机人员膜捆已达到卸载条件。

液压操作与卸膜:在接到报警后,操作人员通过控制液压杆来开启上打捆装置,使膜捆自动卸载。卸载完成后,打捆机继续进行下一轮打捆操作,如图 15 所示。



1-上载膜箱;2-上支撑辊;3-开合液压缸;4-警报装置

图 15 定点卸膜

Fig. 15 Fixed-point film unloading

增加浮动支撑辊的重量,会显著影响下打捆皮带的张紧效应。张紧程度的明显增大会使打捆皮带对残膜捆施加更大的作用力,并进一步增大其对膜捆的实际压力,从而有效提升残膜捆的紧实度。虽然增加浮动支撑辊的质量有助于提高紧实效果,但当其质量超过打捆皮带所能承受的极限值时,会加剧对皮带的损害,进而缩短打捆皮带的有效工作寿命。因此,在追求更高残膜捆紧实度的同时,要考虑浮动支撑重量与打捆皮带使用寿命之间的关系,以确保整体打捆作业效率及设备耐久性。

如图 16 所示,为防止打捆皮带在张紧辊上轴向方向跑动,在张紧辊两侧设置宽度为 30 mm 的 V 形槽用来在轴向方向固定打捆皮带。浮动支撑辊选用碳素钢材质^[28],密度为 $\rho = 7.85 \text{ g/cm}^3$,具体尺寸如下:总长 $L_1 = 3\,000 \text{ mm}$,支撑辊的直径 $D = 300 \text{ mm}$,内壁厚度 $T = 32.9 \text{ mm}$,槽宽 $L_2 = 30 \text{ mm}$,作业效果较好。

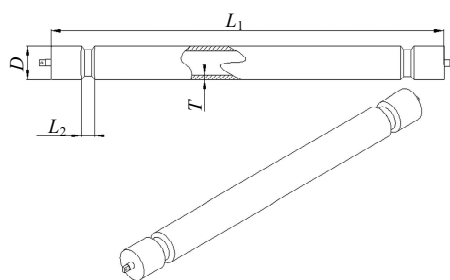


图 16 浮动支撑辊尺寸图

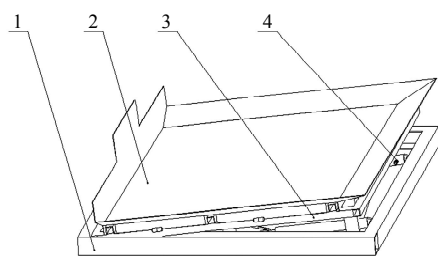
Fig. 16 Dimension diagram of floating support roller

2.3 载膜箱机构

2.3.1 载膜箱主体设计

载膜箱的设计主要考虑到工作过程中的稳定性,载膜箱要在跟机具前进中不能发生共振。依

根据地膜打捆后的标准尺寸,设计载膜箱的内部空间,确保膜捆能进入载膜箱子,避免空间浪费或膜捆放置不稳。打捆完成后的膜捆长度为 210 cm,膜捆直径为 35 cm,机具宽度为 310 cm,载膜箱总体尺寸如图 17 所示,箱体形状需与机具结构相匹配,确保安装稳固,不妨碍机具的其他功能部件。



1-机架;2-载膜底板;3-载膜箱架;4-液压系统

图 17 载膜箱示意图

Fig. 17 Schematic diagram of membrane carrier box

载膜箱尺寸如图 18 所示, $L_1 = 300$ cm、 $L_2 = 255$ cm、 $L_3 = 400$ cm、 $L_4 = 475$ cm、 $L_5 = 150$ cm、 $L_6 = 30$ cm、 $L_7 = 10$ cm、 $L_8 = 47$ cm。载膜箱材料选择在力学性能上具有良好的屈服强度和抗拉强度,加工性能上具有良好的焊接性能和冷、热成型性能,便于切割和焊接,满足载膜箱形状多样的设计要求,并且由于载膜箱需要频繁地转动承受动态载荷,选择具有良好延展性和韧性的 Q345 碳钢材料^[29]。由于碳钢材料本身耐腐蚀相对较差,需要增加耐磨性抵抗土壤颗粒的磨损,在容易磨损的部位通过表面喷涂进行防腐处理。

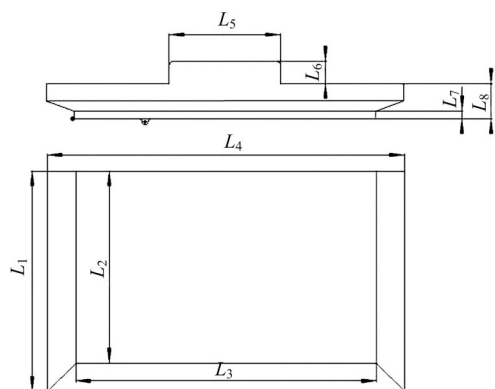


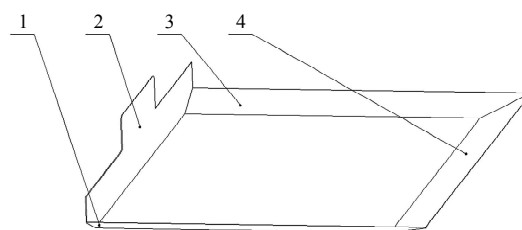
图 18 载膜箱尺寸图

Fig. 18 Dimensional diagram of membrane carrier box

2.3.2 载膜箱导向与定位设计

膜捆进入载膜箱时,需要载膜箱有一个导向结构,使得打捆后的膜捆能从载膜箱的前端走向载膜箱的后端。

如图 19 所示,导向左侧板,位于载膜箱左侧,其设计需确保与右侧板轴对称,形成一个限定膜



1-导向左侧板;2-前挡板;3-导向右侧板;4-导向前板

图 19 载膜箱导向结构

Fig. 19 Guiding structure of membrane carrier box

捆左右方向移动。导向右侧板,位于载膜箱右侧,其与左侧板共同约束膜捆的横向位置,确保膜捆沿着直线路径进入载膜箱内部。

如图 20 所示,左、右侧板与水平面夹角为 β 。导向前板的宽度与打捆装置一致,高度略低于打

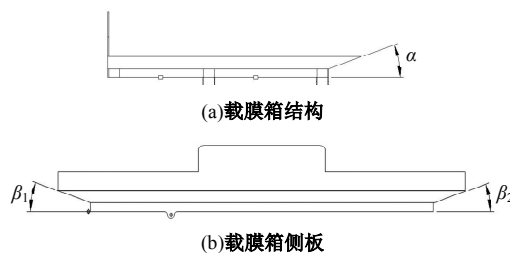


图 20 载膜箱结构与侧板 ($\alpha = 15^\circ; \beta_1 = \beta_2 = 20^\circ$)

Fig. 20 Film magazine structure and side plate ($\alpha = 15^\circ; \beta_1 = \beta_2 = 20^\circ$)

捆装置,起到引导膜捆进入箱内的作用。前挡板与水平面的夹角为 α ,在该角度下允许膜捆在较小的冲击力下开始进入导向通道,同时防止膜捆偏离轨道。

2.3.3 稳定性仿真

载膜箱在工作中需要承载膜捆,如图 21 所示。



图 21 载膜箱工作状态

Fig. 21 Working condition of membrane package storage box

为防止工作过程中残膜捆在载膜箱内受到较大外力而导致膜捆存放不稳的情况,对其进行模态分析,避免其因为共振而产生振幅值激变影响机具作业。载膜箱尺寸如图 18 所示,载膜箱体由

厚度为 3 mm 的钢板焊成,箱体下焊接截面尺寸长、宽、厚为 60 mm×40 mm×4 mm 的空心方管梁增加强度。机架材料为 Q345,密度为 7 850 kg/m³,弹性模量为 206 GPa,泊松比为 0.28^[30]。由分析过程可知,若仅考虑残膜捆存放是否稳定的问题,可忽略机具作业过程中受到的水平激振影响,结合机具作业实际情况,载膜箱所受到的激励主要由作业过程中土壤环境复杂程度以及发动机所产生的激励,结合机具本身装备的减震装置,相比于发动机所产生的激振力,可将土壤环境复杂程度忽略不计。

将三维模型导入 ANSYS Workbench 2022R2 中,网格划分无关性检验满足收敛条件如图 22 所示,分别求出 10 阶固有频率和对应的最大位移,如表 4 所示。载膜板模态分析如图 23 所示。

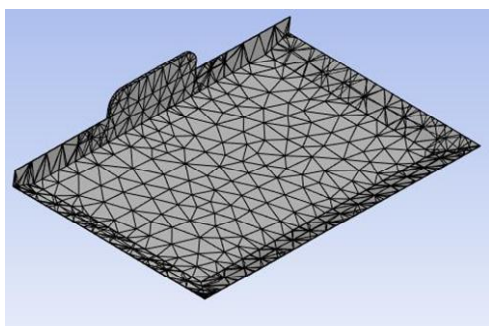


图 22 载膜箱网格划分

Fig.22 Load membrane box grid division

表 4 载膜箱的固有频率和位移

Table 4 Natural frequencies and displacements of membrane carriers

阶数	频率/Hz	位移/m	阶数	频率/Hz	位移/m
1	130.49	0.334	6	256.87	0.209
2	161.51	0.148	7	280.09	0.186
3	225.67	0.233	8	305.39	0.215
4	236.60	0.322	9	369.92	0.173
5	253.45	0.413	10	428.62	0.304

由表 4 和图 23 可以看出:该载膜箱固有频率特点是随着频率升高,共振区域由箱体尾部边缘向中部两侧转移趋势显著。第五阶模态展现出最大位移值,此阶振动主要表现为前挡板的显著扭转现象。该载膜箱振动特征为从广泛分布向局部集中转变的规律。

分析结果显示,载膜箱的固有频率范围为 130.49~428.62 Hz,与拖拉机发动机的激励频率区间 2.9~4 Hz 显著不匹配^[31]。载膜箱的固有频率和拖拉机的激励频率满足下式关系时,载膜箱

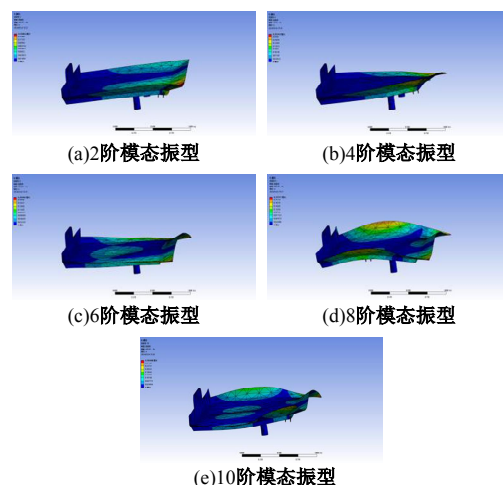


图 23 载膜箱模态分析振型图

Fig. 23 Modal analysis and vibration mode diagram of membrane box

不会发生共振^[32]。

$$0.75\omega_0 < \omega < 1.3\omega_0$$

式中: ω_0 为固有频率,Hz; ω 为激励频率,Hz。

载膜箱是由拖拉机牵引作业,其动力由拖拉机提供,拖拉机轮胎和打捆装置的轮胎对高频具有衰减作用。拖拉机发动机运行经过衰减产生的低频激振(2.9~4 Hz)条件下^[33],与载膜箱的固有频率(130.49~428.62 Hz)不在同一区间,故载膜箱作业过程中不会共振,载膜箱动态稳定性符合设计安全标准与性能要求。

3 试验和分析

3.1 试验条件

为验证双带揉搓式残膜打捆装置的设计合理性与作业性能,2023年10月在新疆维吾尔自治区商户地乡湖东村棉田开展田间试验,该打捆装置与弹齿链耙式残膜回收机^[34]配套使用,试验条件如表 5 所示。试验田地为棉田,土壤土质偏粘,地势平坦,收膜试验前滴灌带已回收。试验仪器包括:卷尺、电子秤、土壤水分测试仪、土壤紧实度测定仪、密封袋等。

3.2 试验方法

依据国家标准《圆草捆打捆机 GB/T14290—2021》^[35],对双带揉搓式残膜打捆装置进行试验检测。试验测定长度大于 100 m,宽度为 2.05 m,在试验区域内随机选择 5 个地点,按照随机分布的分布原则,综合 5 个采样点的数据以估算整个作业区域内的膜捆质量及成捆率^[36]。膜捆成捆率、膜捆密度性能评价指标的计算公式为:

表 5 试验条件
Table 5 Test conditions

参数	数值/描述
作物类型	棉花
土壤坚实度/MPa	0.45
土壤含水率/%	7.98
地膜宽度/mm	2 050
地膜厚度/mm	0.01
铺膜时间/d	185
棉花种植模式(机采棉种植模式)/cm	66+10

$$Y=\frac{I_c}{I_z}\times 100\%$$
 (21)

式中: Y_1 为残膜成捆率, %; I_c 为残膜成捆个数; I_z 为总捆数。

$$Y_2=\frac{4m_k}{\pi D^2W}$$
 (22)

式中: Y_2 为残膜捆的密度, kg/m^3 ; m_k 为膜捆质量, kg ; D 为膜捆直径, m ; W 为膜捆宽度, m 。

$$Y_3=\frac{E}{T}$$
 (23)

式中: Y_3 为打捆效率; 捆/h; E 为打捆个数; T 为作业时间, h。

3.3 单因素试验

根据前期试验测定及打捆装置的理论分析,并结合相关文献的深入查阅与分析,最终确定了各影响因素的运行参数取值范围,如表 6 所示。通过单因素试验确定打捆腔角度、打捆带摩擦因素和打捆带线速度这 3 个主要因素对残膜成捆率、残膜捆密度和打捆效率的影响。搭建台架装置(见图 24),在试验过程中通过更换上轴承支撑座的高度和调节液压油缸伸缩长度逐步调整打捆腔角度,通过调节皮带表面花纹更改打捆皮带和残膜之间的摩擦因数,通过调整变频器调节打捆皮带线速度,以残膜打捆作业中的残膜成捆率、膜捆密度和残膜打捆效率作为主要响应指标,针对双带式打捆装置的主要影响因素进行单因素试验研究,进一步优化双带式打捆装置设计参数,提高作业质量。

对图 25(a)分析可知:随着打捆腔体开合角度的增加,膜捆密度呈现出逐渐减小的趋势,而残

表 6 初步设计参数范围

Table 6 Preliminary design parameter ranges			
影响因素	打捆腔角度 $\alpha/(^{\circ})$	打捆带摩擦 因数	打捆带线速度 $/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
范围	30°~38°	0.69~0.96	0.4~1.8

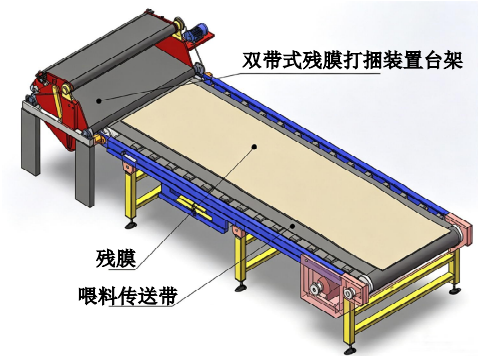


图 24 双带式残膜打捆装置试验台架与三维模型

Fig. 24 Dual-belt film baler test rig and 3D model

膜成捆率和打捆效率则表现出先升后降的变化趋势。其中,开合角度为 32°时,打捆效率达到峰值,角度为 34°时,残膜成捆率达到最大值。考虑到膜捆密度、成捆率及打捆效率的综合影响分析,打捆腔体开合角度在 32°~36°范围内能够实现较优的综合性能,从而提升残膜打捆作业质量。

对图 25(b)分析可知:打捆皮带摩擦因数对打捆性能的影响具有显著性。当摩擦因数增加时,残膜成捆率、膜捆密度及打捆效率均呈现先升后降的变化趋势。当摩擦因数处于 0.69~0.96 范围内,成捆率、膜捆密度和打捆效率均处于较高水平,表明该范围内的打捆皮带摩擦因数能够有效提升打捆作业质量。

对图 25(c)分析可知:打捆皮带线速度对成捆率、膜捆密度和打捆效率的影响呈现相似的变化趋势,即随着线速度的增加,这三项指标均表现为先增加后下降。当线速度位于 0.8~1.4 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 区间时,成捆率、膜捆密度和打捆效率均处于较高水平,说明该速度范围内的打捆作业具有较高的作业效率和作业质量。

3.4 响应面试验设计

根据前期理论分析和试验研究,选择打捆腔角度 $\alpha(X_1)$ 、打捆带摩擦因素 (X_2) 、打捆带线速度 (X_3) 为试验因素,残膜成捆率 (Y_1) 、残膜捆密度

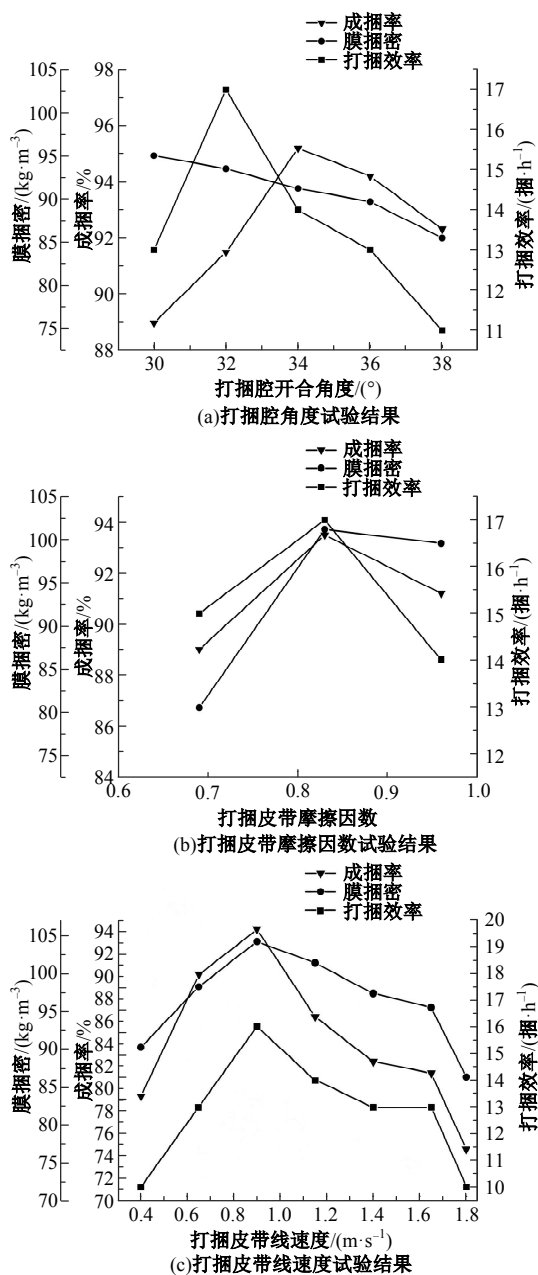


图 25 单因素试验结果

Fig. 25 Single factor experimental results

(Y_2)、打捆效率(Y_3)为响应值。试验采用三因素三水平正交试验,利用响应曲面法(Response surface method, RSM)^[37]分析 Y_1 残膜成捆率、 Y_2 残膜捆密度、 Y_3 残膜捆密度与试验因素的关系。试验因素编码如表 7 所示,通过理论分析和单因素试验,确定打捆腔角度 α 范围为 32°~36°,打捆带摩擦因数范围为 0.69~0.96,打捆带线速度范围为 0.8~1.4 m/s。正交试验方案如表 8 所示,每组试验重复 5 次,取 5 次试验结果的平均值作为试验结果,软件使用 Design Expert 13 进行分析处理。

试验过程中机具正常运行,其成捆率为

93.6%~100%,残膜捆密度为 86.7~106.3 kg/m³,打捆效率为 9~16 捆·h⁻¹。

表 7 试验因素编码

Table 7 Encoding of experimental factors

水平	打捆腔角度/(°)	打捆带摩擦因数	打捆带线速度/(m·s ⁻¹)
-1	32	0.69	0.8
0	34	0.825	1.1
1	36	0.96	1.4

表 8 试验方案与结果

Table 8 Experimental plan and results

Run	X_1 :打捆腔角度 α	X_2 :打捆带摩擦因数	X_3 :打捆带线速度/(m·s ⁻¹)	残膜成捆率/%	残膜捆密度/(kg·m ⁻³)	打捆效率/(捆·h ⁻¹)
1	36	0.825	0.8	93.93	87.67	9
2	32	0.825	0.8	97.64	94.34	12
3	34	0.96	0.8	98.21	92.45	14
4	34	0.69	1.4	99.32	104.27	12
5	34	0.825	1.1	99.64	101.59	13
6	32	0.96	1.1	94.64	104.32	15
7	34	0.825	1.1	99.75	101.87	14
8	34	0.96	1.4	96.91	105.98	16
9	34	0.825	1.1	100	102.86	13
10	36	0.825	1.4	97.32	103.96	14
11	34	0.825	1.1	100	102.32	13
12	36	0.69	1.1	93.63	99.32	10
13	32	0.825	1.4	95.18	106.32	13
14	36	0.96	1.1	94.86	98.32	15
15	34	0.69	0.8	97.31	90.48	8
16	32	0.69	1.1	96.44	101.45	11
17	34	0.825	1.1	100	102.32	13

3.5 试验结果分析

由表 9 方差分析结果显示,试验因素 X_1 、 X_2 、 X_3 与 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 所建立二次回归模型的 P 值均小于 0.000 1,三个值均远远小于 0.01,表明回归模型极其显著;失拟项 P 值均大于 0.05,即失拟不显著,说明模型所拟合的二次回归方程与实际相符合,能正确反映 Y_1 残膜成捆率、 Y_2 残膜捆密度、 Y_3 残膜捆密度和 X_1 打捆腔角度 α 、 X_2 打捆带摩擦因数、 X_3 打捆带线速度之间的关系,回归模型在性能试验中能够有效预测各种试验结果。

由表 9 方差分析和图 26 可知, X_1 打捆腔角度 α 对残膜成捆率、打捆带摩擦因数和打捆带线速度影响均极显著,且打捆腔角度 > 打捆带摩擦因数 > 打捆带线速度。

打捆初期,在合理的角度内随着打捆腔角度

表 9 方差分析
Table 9 Analysis of variance

变异来源	残膜成捆率 Y_1				残膜捆密度 Y_2				打捆效率 Y_3			
	自由度	均方	F_1	P_1	自由度	均方	F_2	P_2	自由度	均方	F_3	P_3
回归	9	9.02	173.44	0.000 1**	9	54.31	242.34	0.000 1**	9	8.09	53.95	0.000 1**
X_1	1	2.16	41.57	0.000 4**	1	36.81	164.25	0.000 1**	1	1.13	7.5	0.02 9*
X_2	1	0.54	10.39	0.014 6**	1	3.85	17.18	0.004 3**	1	45.13	300.83	0.000 1**
X_3	1	0.34	6.46	0.038 6*	1	386.28	1723.75	0.000 1**	1	18	120	0.000 1**
X_1X_2	1	2.30	44.11	0.000 3**	1	3.74	16.71	0.004 6**	1	0.25	1.67	0.237 7
X_1X_3	1	8.56	164.43	0.000 1**	1	4.64	20.72	0.002 6**	1	4	26.67	0.001 3**
X_2X_3	1	2.74	52.64	0.000 2**	1	0.02	0.0754	0.791 5	1	1	6.67	0.036 4*
X_1^2	1	50.20	964.69	0.000 1**	1	2.57	11.46	0.011 7*	1	0.95	6.33	0.04
X_2^2	1	9.89	190.11	0.000 1**	1	1.31	5.86	0.046 0*	1	0.002 6	0.0175	0.898 4
X_3^2	1	0.70	13.45	0.008 0	1	46.93	209.42	0.000 1**	1	2.21	14.75	0.006 4
残差	7	0.0520			7	0.224 1			7	0.15		
失拟	3	0.0822	2.79	0.173 2	3	0.207 9	0.879 7	0.522 9	3	0.083 3	0.416 7	0.751
误差	4	0.0294			4	0.236 3			4	0.2		

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

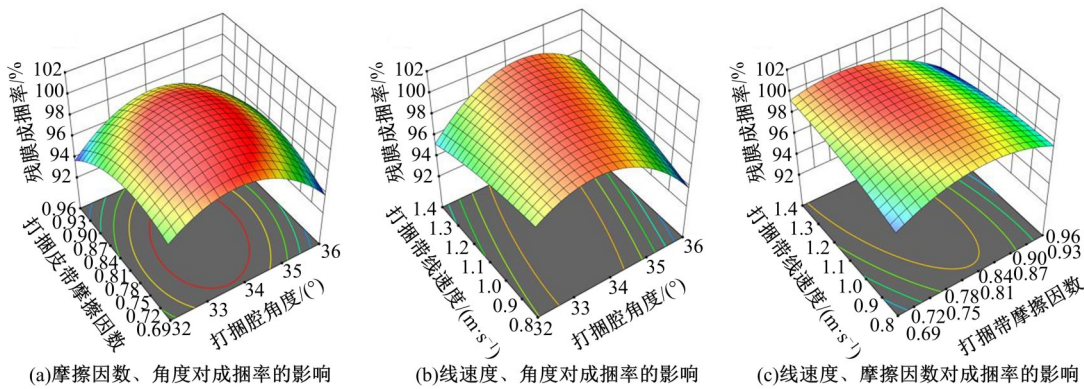


图 26 各因素对成捆率的影响

Fig. 26 Influence of various factors on bundling

的增大,膜材料更容易进入打包腔,减少材料堵塞的风险,从而提高成捆率。随着打包腔角度开始增加,增大打包腔尺寸,使地膜更充分地与打捆带进行接触和挤压,同时大的打包腔有助于地膜均匀分布在膜捆腔内,从而提高成捆率。角度过大时,膜材料可能在打包腔内分布不均,特别是打包腔边缘的材料可能因为接触面积减少而得不到有效的揉搓和压缩,导致成捆率降低。

残膜成捆率随着打捆带线速度的增加先快速增加后减小。打捆皮带线速度的增加会促进膜捆动能的增加,其动能可以影响膜捆的打捆力矩,动能增加打捆力矩增大,残膜成捆率提高。打捆带线速度过大,会急剧减少膜捆与打捆带的接触时间,会导致摩擦时间不足,打捆力矩过小,造成捆率降低。

残膜成捆率随着打捆带摩擦因素的增加先快

速增加后减小。初期,随着打捆带对地膜的摩擦因素增大,打包力矩也随之提升,使得打捆带更有效地抓住并揉搓地膜,从而显著提高了残膜的成捆率。打捆皮带摩擦因素过大,导致地膜不能及时脱落,黏附在打捆带上,阻碍膜捆的正常形成,因为地膜未能在打包过程中脱离打捆带,形成独立的膜捆。

由表 9 方差分析和图 27 可知, X_1 打捆腔角度 α 、 X_2 打捆带摩擦因数和 X_3 打捆带线速度对残膜捆密度影响均极显著,且打捆腔角度 $>$ 打捆带线速度 $>$ 打捆带摩擦因数。

残膜捆密度随着打捆腔角度 α 的增加会逐渐减小。打捆腔角度增加会减小膜捆在竖直方向的压力,打捆带对残膜捆的压缩作用减小,同时打捆腔角度增大,膜捆每层之间的间隙增大,单位体积内膜捆质量减小,残膜捆密度减小。

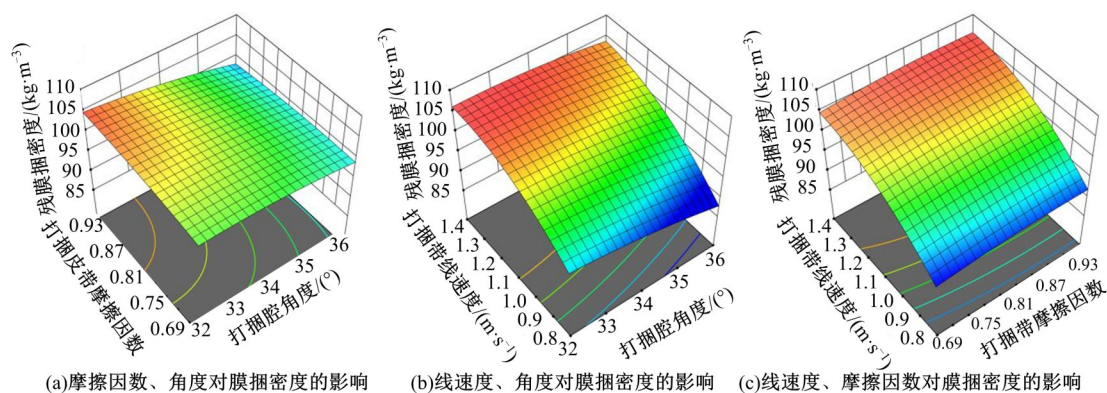


图 27 各因素对残膜捆密度的影响

Fig. 27 Influence of various factors on density of residual film bundles

打捆带线速度增加使得残膜捆密度先是增长然后缓慢增长。打捆带线速度增加,膜捆受到的打捆力矩增大,残膜捆密度随着打捆力矩的增大而增大。打捆带线速度继续增加,膜捆与打捆带接触时间减小,摩擦和揉搓过程不够充分,膜捆密度仍会增加,但是趋势减缓。

残膜捆密度随着摩擦因数的逐步提高,残膜捆密度呈现出一种逐渐递增但增速平缓的趋势。

随着摩擦因数的增加,打捆皮带与残膜之间的摩擦力增强,打捆力矩增加,残膜捆密度增加,但由于摩擦因数变化范围小其引起的增长较为平稳。

由表 9 方差分析和图 28 可知, X_2 打捆带摩擦因数和 X_3 打捆带线速度对打捆效率影响均极显著, X_1 打捆腔角度 α 对打捆效率影响不显著,但 X_1 打捆腔角度 α 和 X_3 打捆带线速度的交互因素对打捆效率影响显著。

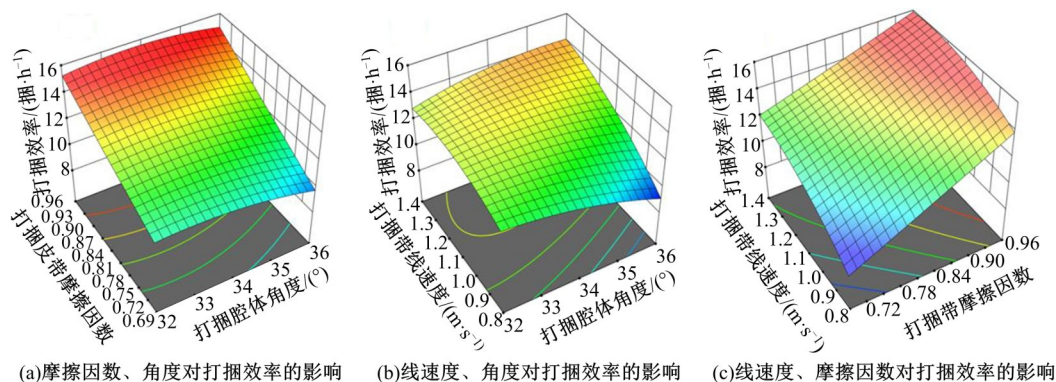


图 28 各因素对打捆效率的影响

Fig. 28 Influence of various factors on bundling efficiency

打捆带线速度的增加使得残膜打捆效率增加,同时使得膜捆单位时间内的揉搓次数增加,加快膜捆形成过程。此外,打捆带线速度增加还缩短了单个捆扎作业时间,使打捆效率整体显著提升。

打捆带摩擦因数与残膜打捆效率之间存在非线性关系,即打捆效率随着摩擦因数的初增而显著提升,但随着摩擦因数的进一步增加,打捆效率的增长趋势逐渐减弱。摩擦因数的增加有效提高了打捆皮带对膜捆的摩擦,减少膜捆滑脱,提高打捆过程的稳定性和效率。但摩擦因数的过大可能导致残膜被打捆带向后甩去,减小打捆稳定性,降低打捆效率。

打捆腔角度不直接影响残膜打捆效率,但打捆

腔角度和打捆带线速度的交互因素对打捆效率影响显著。由于膜捆是在行程设定直径后进入膜捆箱,所以膜捆腔自身的大小并不直接影响打捆效率,但是如果膜捆腔过小,打捆带线速度过大,残膜就会堵塞在膜捆腔中,从而造成打捆效率减小。

在去除不显著影响因素后,拟合的回归方程如下:

$$Y_1 = 99.88 - 0.52X_1 - 0.2675X_2 + 0.2050X_3 + 0.76X_1X_2 - 0.83X_1X_3 - 3.45X_1^2 - 1.53X_2^2 \quad (24)$$

$$Y_2 = 102.19 - 2.15X_1 + 0.69X_2 + 6.95X_3 - 0.97X_1X_2 + 1.08X_1X_3 - 0.78X_1^2 - 3.34X_3^2 \quad (25)$$

$$Y_3 = 13.20 - 0.3750X_1 + 2.38X_2 + 1.50X_3 - 1.00X_1X_3 - 0.5X_2X_3 - 0.475X_1^2 - 0.725X_3^2 \quad (26)$$

以残膜成捆率、残膜捆密度和打捆效率的最大化为优化目标,选取打捆腔角度 α 、打捆带摩擦因数以及打捆带线速度作为优化变量,借助 Design-Expert 13 软件对构建的线性回归模型进行多目标优化分析,优化目标函数和约束条件为:

$$\begin{cases} \max Y_1 \\ \max Y_2 \\ \max Y_3 \\ \text{s.t.} \begin{cases} 32^\circ \leq x_1 \leq 36^\circ \\ 0.69 \leq x_1 \leq 96 \\ 0.8 \text{ m/s} \leq x_1 \leq 1.4 \text{ m/s} \end{cases} \end{cases} \quad (27)$$

在打捆作业过程中,为了优化打捆作业质量和作业效率,采用 Design-Expert 13 软件中的优化功能,针对打捆腔体角度、打捆带摩擦因数和打捆带线速度这3个设计变量进行优化。优化目标为最大化残膜成捆率 Y_1 、残膜捆密度 Y_2 、打捆效率 Y_3 。通过分析计算,得到最佳设计参数组合如下:打捆腔角度 α 为 32.98° ,打捆带摩擦因数为0.794,打捆带线速度为1.03 m/s。为了便于生产和制造,将最佳作业参数组合调整如下:打捆腔角度 α 为 33° ,打捆带摩擦因数为0.83(草坪纹),打捆带线速度为1.03 m/s。

4 田间验证

为验证双带揉搓式残膜打捆装置的作业性能,于2023年10月底在选择新疆生产建设兵团第六师芳草湖农场开展验证试验,用1354轮式拖拉机进行牵引作业,按照圆整的最优作业参数进行田间验证,进行三次验证取平均值,试验结果如表10所示,现场照片如图29所示,卸膜过程如图30所示,打捆后的膜捆如图31所示。

由上述试验得出,田间环境不同对残膜成包率、膜捆密度有一定影响。

表10 试验结果

Table 10 Test results

试验 序号	残膜成捆 率/%	残膜捆密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	打捆效率/ (捆 $\cdot \text{h}^{-1}$)
1	100	104.25	15
2	100	106.53	13
3	100	107.89	16
平均值	100	106.23	14.67



图29 田间试验

Fig. 29 Field experiment



图30 卸膜过程

Fig. 30 Unloading process



图31 膜捆

Fig. 31 Film bundle

5 结论

(1)对双带揉搓式残膜打捆装置进行设计,通过对打捆结构、张紧机构、载膜箱机构等关键部件进行力学分析,采用浮动张紧装置实现了膜捆直径可调,双带揉搓式残膜打捆装置通过上下打捆皮带对残膜的“搓压”使得残膜成捆。对捆芯形成阶段、残膜捆完成阶段、残膜捆进入载膜箱阶段3个阶段进行了分析,确定了影响残膜成捆率和残膜捆密度的相关试验因素及其取值范围。

(2)通过单因素台架试验,各影响因素的初步确定如下:打捆腔角度 α 范围为 $32^\circ \sim 36^\circ$;打捆带摩擦因数为0.69~0.96;打捆带线速度为

0.8~1.4 m·s⁻¹。考虑到交互作用的影响,结合Box-Behnken响应曲面设计,采用3因素3水平响应面分析方法,对改进后的弹齿式地膜回收机进行打捆装置性能试验,通过响应曲面分析得到影响残膜成捆率的因素由大到小依次为:打捆腔角度 α >打捆带线速度>打捆带摩擦因数;影响残膜捆密度的因素由大到小依次为:打捆带线速度>打捆腔角度>打捆带摩擦因数;影响打捆效率的因素由大到小依次为:打捆带摩擦因数>打捆带线速度>打捆腔角度 α 。

(3)建立了残膜成捆率和残膜捆密度与打捆腔角度 α 、打捆带摩擦因数、打捆带线速度的二次多项式回归模型。获得改进后打捆装置最佳设计参数如下:打捆腔角度 α 为33°,打捆带摩擦因数为0.83(草坪纹),打捆带线速度为1.03 m/s。田间验证试验表明,在圆整后的最佳设计参数条件下,残膜成包率均值为100%,残膜捆密度均值为106.23 kg·m⁻³。整机性能较优化前有明显提升,各项作业指标均达到国家和行业标准要求。

参考文献:

- [1] 曹肆林, 谢建华, 杨豫新, 等. 侧排式棉秸秆还田及残地膜回收联合作业机的设计与试验[J]. 吉林大学学报:工学版, 2023, 53(5): 1514-1528.
Cao Si-lin, Xie Jian-hua, Yang Yu-xin, et al. Design and experiment of side row cotton straw returning and residual film recycling joint operating machine[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2023, 53(5): 1514-1528.
- [2] 刘勤, 严昌荣, 薛颖昊, 等. 中国地膜覆盖技术应用与发展趋势[M]. 北京: 科学出版社, 2021: 98-105.
- [3] 杨崇科, 张炳成, 王新忠, 等. 单辊方刀式机收膜杂圆捆料破碎装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 41(2): 1-12.
Yang Chong-ke, Zhang Bing-cheng, Wang Xin-zhong, et al. Design and test of single roll square knife machine for crushing film and miscellaneous round bundles[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2024, 41(2): 1-12.
- [4] 国家统计局农村社会经济调查司. 中国农村统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
- [5] 于永刚, 孙池涛, 程金杰, 等. 残留地膜对粉壤土水盐氮运移与再分布的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2024, 42(2): 170-178.
Yu Yong-gang, Sun Chi-tao, Cheng Jin-jie, et al. Effects of residual plastic film on water, salt and nitrogen transport and redistribution in loam soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage Machinery Engineering, 2024, 42(2): 170-178.
- [6] 温嘉佳, 陈梓仪, 苏丹, 等. 地膜残留微塑料对土壤性质及微生物的影响研究进展[J]. 山东化工, 2024(3): 95-97, 100.
Wen Jia-jia, Chen Zi-yi, Su Dan, et al. Research progress on the effects of residual microplastics in plastic film on soil properties and microorganisms[J]. Shandong Chemical Industry, 2024(3): 95-97, 100.
- [7] 裴新民, 金晓青. 新疆残膜回收机械化技术推广应用研究[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(5): 275-279.
Pei Xin-min, Jin Xiao-qing. Research on the promotion and application of mechanized technology for residual film recycling in Xinjiang[J]. China Agricultural Machinery Chemistry Journal, 2014, 35(5): 275-279.
- [8] 胡灿, 王旭峰, 陈学庚, 等. 新疆农田残膜污染现状及防控策略[J]. 农业工程学报, 2019, 35(24): 223-234.
Hu Can, Wang Xu-feng, Chen Xue-geng, et al. Current situation and prevention and control strategies of residual film pollution in farmland in Xinjiang[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2019, 35(24): 223-234.
- [9] 周金豹, 谢建华, 曹肆林, 等. 辊轴式残膜打捆装置的设计与试验[J]. 华南农业大学学报, 2024, 45(1): 148-158.
Zhou Jin-bao, Xie Jian-hua, Cao Si-lin, et al. Design and experiment of roller type residual film packaging device[J]. Journal of South China Agricultural University, 2024, 45(1): 148-158.
- [10] 刘杰. 卷膜式残膜打捆机的设计与试验[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学机电工程学院, 2023.
Liu Jie. Design and testing of a roll film residual film packaging machine[D]. Urumqi: College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Agricultural University, 2023.
- [11] 王征, 王吉奎, 唐永飞, 等. 带式残膜揉搓打捆机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(19): 11-18.
Wang Zheng, Wang Ji-kui, Tang Yong-fei, et al. Design and experiment of belt type residual film rubbing and packaging machine[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2020, 36(19): 11-18.
- [12] 张恒, 康建明, 蒋平, 等. CMJD-1500型残膜捡拾

- 打捆机作业参数优化[J]. 农机化研究, 2021(8): 99-105, 112.
- Zhang Heng, Kang Jian-ming, Jiang Ping, et al. Optimization of operating parameters for CMJD-1500 residual film picking and packaging machine[J]. Agricultural Mechanization Research, 2021(8): 99-105, 112.
- [13] Parish R L. An automated machine for removal of plastic mulch[J]. Transactions of the ASAE, 1999, 42(1): 49-51.
- [14] Rocca A R. Plastic Mulch Retriever: US20110000687 [P]. USA: US20110000687, 2011-01-06.
- [15] Kimball J. Agricultural implement for recovery of plastic mulch and processing of the same: US10285330 [P]. USA: US10285330, 2019-05-14.
- [16] Liu Yan-ping. Integrated plastic mulch layer and planter for growing peanuts[P]. WIPO: WO2017136987, 2017-08-17.
- [17] Khazimov K M, Niyazbayev A K, Shekerbekova Z S, et al. A novel method and device for plastic mulch retriever[J]. Journal of Water & Land Development, 2021, 49: 85-94.
- [18] 王学农, 刘杰, 刘旋峰, 等. 无芯卷膜式残膜打捆装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(5): 28-35.
- Wang Xue-nong, Liu Jie, Liu Xuan-feng, et al. Design and experiment of coreless roll film residual film packaging device[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2022, 38(5): 28-35.
- [19] 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 Song-mei, Chen Xue-geng, Yan Li-min, et al. Design and experiment of belt type film rolling device for residual film recycling machine[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 135-144.
- [20] 张培坤, 王又沐, 叶昌显, 等. 一种残膜打捆机及打捆方法[P]. 中国: CN109168346A, 2022-02-18.
- [21] 刘晶. 国内打捆机技术进展[J]. 农业工程, 2023, 13(12): 27-30.
- Liu Jing. Technical progress of balers in China[J]. Agricultural Engineering, 2023, 13(12): 27-30.
- [22] 贺占清, 郭志平, 李瑞平, 等. 9YG-1.2型圆捆机捡拾装置参数优化研究[J]. 饲料工业, 2019, 40(15): 9-15.
- He Zhan-qing, Guo Zhi-ping, Li Rui-ping, et al. Optimization study on picking device parameters of 9YG-1.2 circular baler[J]. Feed Industry, 2019, 40(15): 9-15.
- [23] 张红艳, 王征, 王吉奎. 新型圆捆打包机[P]. 中国: CN210959534U, 2020-10-27.
- [24] 李敏, 高文亭, 张贝贝. 皮带机关键部件寿命可靠性分析及提升对策研究[J]. 产品可靠性报告, 2023(8): 130-131.
- Li Min, Gao Wen-ting, Zhang Bei-bei. Study on the reliability analysis and improvement strategies of key components of belt conveyor[J]. Product Reliability Report, 2023(8): 130-131.
- [25] 贾利晓, 宋联美, 崔琦. 聚合物材料的滑动摩擦特性研究[J]. 润滑与密封, 2013, 38(1): 35-38.
- Jia Li-xiao, Song Lian-mei, Cui Qi. Study on the sliding friction characteristics of polymer materials [J]. Lubrication and Sealing, 2013, 38(1): 35-38.
- [26] 李健伟, 肖绍伟, 夏冬, 等. 机采种植模式对不同株型棉花生长及产量的影响[J]. 新疆农业大学学报, 2017, 40(6): 391-396.
- Li Jian-wei, Xiao Shao-wei, Xia Dong, et al. Effects of mechanized harvesting planting mode on the growth and yield of different plant types of cotton[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2017, 40(6): 391-396.
- [27] Langer T H, Ebbesen M K, Kordestani A. Experimental analysis of occupational whole-body vibration exposure of agricultural tractor with large square baler[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2015, 47: 79-83.
- [28] 丁发兴, 余志武, 温海林. 高温后Q235钢材力学性能试验研究[J]. 建筑材料学报, 2006, 9(2): 245-249.
- Ding Fa-xing, Yu Zhi-wu, Wen Hai-lin. Experimental study on mechanical properties of Q235 steel after high temperature[J]. Journal of Building Materials, 2006, 9(2): 245-249.
- [29] 于文静, 史健勇, 赵金城. Q345钢材动态力学性能研究[J]. 建筑结构, 2011, 41(3): 28-30, 63.
- Yu Wen-jing, Shi Jian-yong, Zhao Jin-cheng. Research on dynamic mechanical properties of Q345 steel[J]. Building Structures, 2011, 41(3): 28-30, 63.
- [30] 徐刚, 朱思洪, 聂信天, 等. 国产拖拉机振动系统固有频率研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(15): 157-161.
- Xu Gang, Zhu Si-hong, Nie Xin-tian, et al. Study on the natural frequency of the vibration system of domestic tractors[J]. Vibration and Shock, 2014, 33(15): 157-161.

- [31] 汤健,田福庆,余博,等. 基于机械振动的旋转供弹机构故障诊断综述[J]. 控制工程, 2018, 25(10):1777-1784
Tang Jian, Tian Fu-qing, She Bo, et al. Review on fault diagnosis of rotary ammunition feeding mechanism based on mechanical vibration[J]. Control Engineering of China, 2018, 25(10):1777-1784.
- [32] 张茂健,金敬福,陈奕颖,等. 轮式拖拉机对称结构的振动特性[J]. 吉林大学学报:工学版, 2023, 53(7): 2136-2142.
Zhang Mao-jian, Jin Jing-fu, Chen Yi-ying, et al. Vibration characteristics of symmetrical structures of wheeled tractors[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2023, 53(7): 2136-2142.
- [33] 张涛,廖敏,张小军,等. 轮式拖拉机悬挂农具机组动态纵向稳定性研究[J]. 农机化研究, 2022, 44(5): 238-244.
Zhang Tao, Liao Min, Zhang Xiao-jun, et al. Research on dynamic longitudinal stability of wheeled tractor hanging agricultural tool unit[J]. Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(5): 238-244.
- [34] 王海基,王敏,卢勇涛,等. 弹齿链耙式残膜回收机链耙装置的设计与试验[J]. 浙江农业学报, 2023, 35(10):2465-2476.
Wang Hai-ji, Wang Min, Lu Yong-tao, et al. Design and testing of chain rake device for elastic tooth chain scraper residual film recycling machine[J]. Zhejiang Agricultural Journal, 2023, 35(10): 2465-2476.
- [35] GB/T 14290—2021. 圆草捆打捆机[S].
- [36] 杜子芳. 抽样技术及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 67-85.
- [37] 徐向宏,何明珠. 试验设计与 Design-Expert、SPSS 应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 32-54.