

# 逆流钩拽式残膜混合物清洗分离装置设计与试验

谢建华<sup>1,2</sup> 刘旺<sup>1</sup> 曹肆林<sup>1,3</sup> 黄伟荣<sup>1</sup> 张佳<sup>1,4</sup> 李沅泽<sup>1</sup> 孟庆河<sup>1</sup>

(1. 新疆农业大学机电工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆智能农业装备重点实验室, 乌鲁木齐 830052;

3. 新疆农垦科学院机械装备研究所, 石河子 832000; 4. 新疆工程学院机电工程学院, 乌鲁木齐 830023)

**摘要:** 针对现有风选式膜杂分离装置分离出的残膜附土量较高, 而水洗式膜杂分离装置能耗较高且用水量较大等问题, 设计了一种逆流钩拽式残膜混合物清洗分离装置。通过对主要工作部件进行设计与动力学分析, 确定了钩膜齿链的作业条件、螺旋输送机转速范围、排杂电机转速范围以及水循环系统所需水泵型号。以钩膜齿链速度、平均流速以及出水口高度为试验因素, 以残膜分离率和残膜洁净率为试验指标进行了响应面试验。对试验结果进行了方差分析, 得出各试验因素对残膜分离率的影响由大到小为: 出水口高度、平均流速、钩膜齿链速度; 对残膜洁净率的影响由大到小为: 平均流速、钩膜齿链速度、出水口高度。对试验指标进行了参数优化, 得到最优参数组合为: 钩膜齿链速度 0.196 m/s、平均流速 1.51 m/s、出水口高度 457.0 mm, 此时残膜分离率和残膜洁净率分别为 89.95% 和 93.46%。对优化结果进行试验验证, 得到残膜分离率和残膜洁净率分别为 88.72% 和 92.35%。

**关键词:** 残膜混合物; 清洗分离; 水流扰动; 动力学分析; 逆流钩拽式

中图分类号: S226.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2025)06-0397-12

OSID:



## Design and Test of Countercurrent Hook-type Residual Film Mixture Cleaning and Separation Device

XIE Jianhua<sup>1,2</sup> LIU Wang<sup>1</sup> CAO Silin<sup>1,3</sup> HUANG Weirong<sup>1</sup> ZHANG Jia<sup>1,4</sup> LI Yuanze<sup>1</sup> MENG Qinghe<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China

2. Xinjiang Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment, Urumqi 830052, China

3. Mechanical Equipment Research Institute, Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation Sciences, Shihezi 832000, China

4. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi 830023, China)

**Abstract:** In view of the problems that the existing wind selection residual film impurity separation device separates the residual film with soil, while the water-washing residual film impurity separation device consumes lots of energy and water, a countercurrent hook-type residual film mixture cleaning and separation device was designed. Through the design and dynamic analysis of the main working components, the operating conditions of the hook film tooth chain, the spiral conveyor speed range, the impurity removal motor speed range, and the water pump model required for the water circulation system were determined. A response surface test was conducted with the hook residual film tooth chain speed, the average flow rate and the water outlet height as test factors, and the residual film separation rate and the residual film cleanliness rate as test indicators. A variance analysis was conducted on the test results, and it was concluded that the influence of each test factor on the residual film separation rate from large to small was the water outlet height, the average flow rate, the hook residual film tooth chain speed; the influence on the residual film cleanliness rate from large to small was the average flow rate, the hook residual film tooth chain speed, the water outlet height. The parameters of the test indicators were optimized, and the optimal parameter combination was obtained: the hook residual film tooth chain speed was 0.196 m/s, the average flow rate was 1.51 m/s, and the water outlet height was 457.0 mm. At this time, the residual film separation rate and the residual film cleanliness rate were 89.95% and 93.46%. The optimization results were experimentally verified, and the residual film separation rate and residual film cleanliness rate were obtained as 88.72% and 92.35%, respectively.

**Key words:** residual film mixture; cleaning and separation; water flow disturbance; kinetic analysis; countercurrent hook-type

收稿日期: 2024-03-26 修回日期: 2024-05-22

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发计划项目(2022B02033-2)和新疆农垦科学院创新团队项目(NCG202302)

作者简介: 谢建华(1975—),女,教授,博士生导师,主要从事农业和废弃物回收机械装备研究,E-mail: xjnydxjh@163.com

## 0 引言

覆膜种植技术具有增温、保墒等作用,对于我国贫瘠地区农作物的增产起到重要作用<sup>[1]</sup>。由于残膜在自然条件下极难降解,随着其使用量的逐年增加,对生态环境的污染也日益突出<sup>[2]</sup>。为有效治理残膜污染,我国已研制出多种残膜回收机具<sup>[3]</sup>,但其回收的残膜中往往夹杂着泥土以及秸秆等物料,导致回收后的残膜混合物无法二次利用,通常被焚烧或填埋,不仅造成了环境污染,还造成了资源浪费<sup>[4]</sup>。

膜杂分离对实现残膜混合物二次利用至关重要。国外为有效减少因地膜覆盖而引起的环境污染问题,其覆盖的地膜一般都具有较高的强度,使用后仍然能够保持较好的力学性能,所以有关膜杂分离装置的研究较少,大多致力于研究塑料块的分离<sup>[5]</sup>。相比之下,国内对膜杂分离的研究较为常见。石鑫等<sup>[6]</sup>设计了一种滚筒筛式膜杂风选装置,可以将质量较小的残膜从出料口处吹出,实现初次分离。彭强吉等<sup>[7]</sup>对滚筒筛进行了改进与优化,在原有装置的基础上改变了筛孔的大小和排布方式,有效提高了膜杂分离效果,但分离出的残膜表面泥土附着量较高。袁成林<sup>[8]</sup>设计了一种水介质为作业环境的膜杂分离装置,可实现秸秆、泥土和残膜的分离,但该装置分离腔较小,容易出现堵塞的情况。陈永等<sup>[9]</sup>以灌溉引水渠水流为介质,利用残膜与秸秆在水流中运动时,其悬浮特性存在较大差异而设计了一种膜秆分离装置,但引水渠的水流流速较小,导致残膜的清洁程度较低。何浩猛等<sup>[10]</sup>设计的叶轮驱动式残膜水洗分离设备,在分离残膜混合物的同时对残膜进行了清洗,但该装置主要依靠叶轮旋转时产生的螺旋推力清洗残膜,秸秆等物料容易与残膜搅和在一起,膜杂分离效果较差。钱晓科等<sup>[11]</sup>研发的多级水洗分离装置不仅需要建立多个连续作业的水洗池,而且还需要配备沉淀池,该装置能耗较高且用水量较大,不适于水资源缺乏的地区。

为解决现有风选式膜杂分离装置分离出的残膜附土量较高,而水洗式膜杂分离装置能耗较高且用水量较大等问题,本文设计一种基于水流循环扰动且具有持续清洗分离、排膜挤水、排杂滤水等功能的逆流钩拽式残膜混合物清洗分离装置。

## 1 整机结构与工作原理

### 1.1 整机结构

逆流钩拽式残膜混合物清洗分离装置主要由机架、水循环系统、进料斗、清洗箱、钩膜齿链

机、链传动系统、卸膜刮板、卸膜辊、排膜装置、配电箱、排杂装置等组成,其整机结构如图1所示。

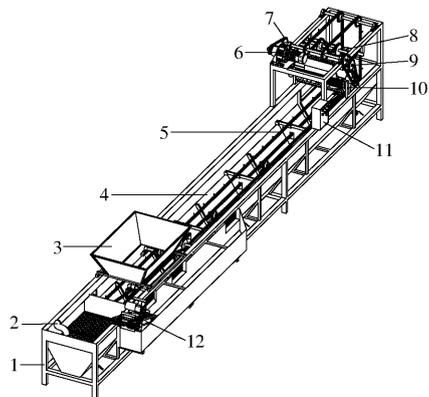


图1 整机结构图

Fig. 1 Structure diagram of whole machine

1. 机架 2. 水循环系统 3. 进料斗 4. 清洗箱 5. 钩膜齿链
6. 减速电机 7. 链传动系统 8. 卸膜刮板 9. 卸膜辊 10. 排膜装置
11. 配电箱 12. 排杂装置

### 1.2 工作原理

装置工作前,先在清洗箱里面灌注清水,随后启动减速电机、水循环系统以及排杂装置。整机运行平稳之后,开始从进料斗处投入残膜混合物,在钩膜齿链转动下,残膜混合物在钉齿的钩拽与导向轮的变向作用下潜入水中,在水循环系统产生的循环水流的扰动作用下进行清洗分离作业。随着钩膜齿链的运动,清洗分离过后的残膜经输膜导向轮变向后被提升出水面,由卸膜刮板对其进行一次卸膜。卸膜辊以及排膜装置之间由链传动系统驱动,当卸膜辊转动时,可对残膜进行二次卸膜,由排膜装置将残膜单向排出。清洗分离出的秸秆等物料则在循环水流的扰动作用下漂浮至排杂装置处排出,泥沙等物料则沉降到清洗箱底部由排污阀排出。之后的钩膜齿链通过回程链轮变向后,再次循环至进料斗下方钩取残膜混合物,进行周而复始的工作。

## 2 关键部件设计

### 2.1 钩膜齿链设计与分析

钩膜齿链工作过程可划分为喂膜、清洗分离、输膜、卸膜以及回程几个阶段,如图2所示。

#### 2.1.1 喂膜阶段残膜受力分析

钩膜齿链的喂膜阶段位于进料斗下方,主要将投入清洗箱的残膜混合物持续钩拽至后续作业阶段。如图3所示,残膜在喂膜阶段存在两种不同的受力情况:钩膜齿链直接钩拽从进料斗喂入的残膜;钩膜齿链钩拽清洗箱中下层的残膜。在第1种情况下,由于投入清洗箱的残膜处于漂浮状态,且该阶段水流流速较小,所以水流对残膜的影响不大,主要为

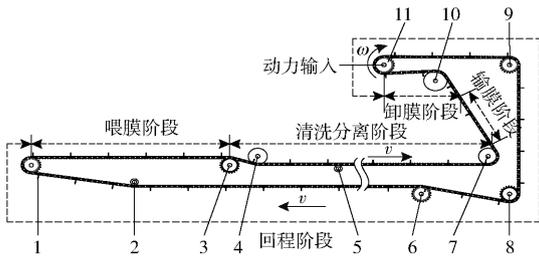


图2 钩膜齿链结构图

Fig. 2 Structure diagram of hook residual film tooth chain

1. 钉齿 2. 喂膜导向轮 3. 喂膜链轮 4. 洗膜导向轮 5. 支撑导向轮 6. 支撑链轮 7. 输膜导向轮 8. 回程导向链轮 9. 回程链轮 10. 卸膜导向轮 11. 动力输入链轮

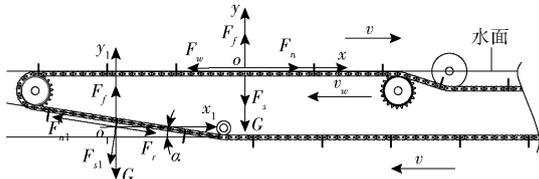


图3 喂膜阶段残膜受力分析

Fig. 3 Stress analysis of residual film during feeding stage

残膜相对于水面运动时产生的粘性力<sup>[12]</sup>。

当残膜匀速运动时,残膜受力满足

$$\begin{cases} F_n + F_w = 0 \\ F_f + F_s + G = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$\begin{cases} F_w = \mu_w A_w \frac{d(v+v_w)}{dh} \\ F_f = \rho_w g V_w \\ F_s = \mu F_n \\ G = m_c g \end{cases} \quad (2)$$

式中  $F_n$ ——钉齿对残膜的支持力,N  
 $F_w$ ——残膜相对于水面运动时产生的粘性力,N  
 $F_f$ ——残膜所受浮力,N  
 $F_s$ ——钉齿对残膜的摩擦力,N  
 $G$ ——残膜所受重力,N  
 $\mu_w$ ——水流粘度系数,Pa·s  
 $A_w$ ——残膜与水面的接触面积,m<sup>2</sup>  
 $v$ ——钩膜齿链速度,m/s  
 $v_w$ ——水流流速,m/s  
 $h$ ——残膜平铺在水面并相对运动时,运动水层的厚度,m  
 $\rho_w$ ——水密度,kg/m<sup>3</sup>  
 $g$ ——重力加速度,m/s<sup>2</sup>  
 $V_w$ ——残膜排水体积,m<sup>3</sup>  
 $\mu$ ——残膜摩擦因数  
 $m_c$ ——残膜质量,kg

由于残膜在水平方向上所受支持力等于残膜相对于水面运动时产生的粘性力,即  $F_n = F_w$ ,则残膜

所受摩擦力可表示为

$$F_{s1} = \mu \mu_w A_w \frac{d(v+v_w)}{dh} \quad (3)$$

当钉齿与水面之间存在相对运动,即  $v+v_w > 0$ 、 $v > 0$ 、 $v_w \geq 0$  时,水面与残膜之间产生粘性力,使钉齿对残膜沿运动方向产生支持力,从而产生摩擦力,且两者之间相对速度越大,残膜越不易脱离钉齿。

第2种情况为钩膜齿链钩拽清洗箱中下层的残膜的受力情况,在钩拽残膜的过程中,残膜受力分析如图3所示,可得到

$$\begin{cases} F_r \cos \alpha + F_{n1} \cos \alpha + F_{s1} \sin \alpha = 0 \\ F_f + G + F_r \sin \alpha + F_{n1} \sin \alpha + F_{s1} \cos \alpha = 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中

$$\begin{cases} F_r = \frac{1}{2} C_w A \rho_w (v - v_w \cos \alpha)^2 \\ F_{s1} = \mu_1 F_{n1} \end{cases} \quad (5)$$

式中  $F_r$ ——水流对残膜的阻力,N  
 $\alpha$ ——钩膜齿链在回程阶段与水平方向的夹角,(°)

$F_{n1}$ ——钉齿在水中对残膜的支持力,N

$F_{s1}$ ——钉齿在水中对残膜的摩擦力,N

$C_w$ ——水流阻力系数

$A$ ——残膜垂直于水流流动方向的投影面积,m<sup>2</sup>

$\mu_1$ ——钉齿对湿残膜的摩擦因数

联立式(4)、(5),得钉齿在水中对残膜的摩擦力为

$$F_{s1} = \frac{\mu_1}{2(\mu_1^2 + 1)} C_w A \rho_w (v - v_w \cos \alpha)^2 \quad (6)$$

由式(6)可知,当水流流速方向与钩膜齿链速度在水平方向上的投影相同时,钩膜齿链速度必须大于水流流速才会使得残膜被钉齿钩拽住,即  $v > v_w > 0$ ,且两者之间的差值越大,残膜越容易被钉齿钩拽住且不容易脱离钉齿。

### 2.1.2 清洗分离阶段残膜受力分析

残膜在刚进入清洗分离阶段时受循环水流的扰动作用较小,主要受重力、浮力、阻力<sup>[13]</sup>、支持力以及摩擦力作用,如图4所示。

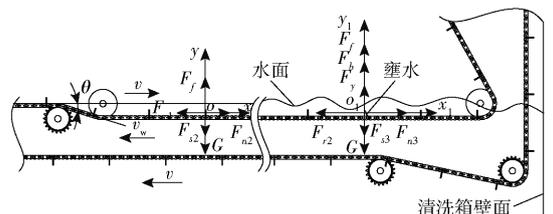


图4 清洗分离阶段残膜受力分析

Fig. 4 Stress analysis of residual film during cleaning and separation stage

当残膜匀速运动时,其受力情况满足

$$\begin{cases} F_{r1} + F_{n2} = 0 \\ F_f + G + F_{s2} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

其中

$$\begin{cases} F_{r1} = \frac{1}{2} C_w A \rho_w (v + v_w)^2 \\ F_{s2} = \mu_1 F_{n2} \end{cases} \quad (8)$$

式中  $F_{r1}$ ——水流对残膜的阻力, N

$F_{n2}$ ——钉齿在水中残膜的支持力, N

$F_{s2}$ ——钉齿在水中残膜的摩擦力, N

联立式(7)、(8), 得钉齿在水中残膜的摩擦力为

$$F_{s2} = \frac{1}{2} \mu_1 C_w A \rho_w (v + v_w)^2 \quad (9)$$

由式(9)可知, 残膜刚进入清洗分离阶段时, 摩擦力与钩膜齿链速度、水流流速有关。随着水流速度增加, 残膜前端出现壅水现象, 而尾部则形成“卡门涡街”效应, 如图5所示。在“卡门涡街”的影响下, 残膜尾部呈现规律性摆动, 增强了清洗分离效果; 然而, 前端的壅水现象也提高了残膜脱离钉齿的概率。

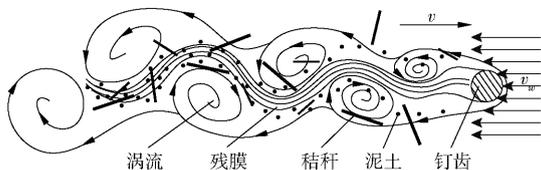


图5 卡门涡街对残膜清洗分离的影响

Fig.5 Effect of Karman vortex on cleaning and separation of residual film

当残膜接近输膜导向轮时, 由于水循环系统出水口的作用, 此处水流速度最高, 浪涌幅度最明显。残膜在此不仅受到壅水现象带来的附加浮力, 还受到浪涌产生的波浪力影响<sup>[14]</sup>, 使其整体运动更加不规则, 从而增加脱离钉齿的概率, 残膜的受力分析如图4所示, 可得关系式

$$\begin{cases} F_{n3} + F_{r2} = 0 \\ F_f + F_y + F_b + F_{s3} + G = 0 \end{cases} \quad (10)$$

其中

$$F_{s3} = \mu_1 F_{n3} \quad (11)$$

式中  $F_{n3}$ ——钉齿在水中残膜的支持力, N

$F_{r2}$ ——水流对残膜的阻力, N

$F_y$ ——壅水对残膜产生的附加浮力, N

$F_b$ ——浪涌对残膜产生的波浪力, N

$F_{s3}$ ——钉齿在水中残膜的摩擦力, N

考虑到钩膜齿链速度恒定, 但水循环系统出水口附近的水流流速存在变化, 则

$$F_{r2} = \frac{1}{2} C_w A \rho_w \left( v + \frac{\Delta v_w}{\Delta t_w} \right)^2 \quad (12)$$

式中  $\Delta v_w$ ——出水口附近水流速度变化量, m/s

$\Delta t_w$ ——出水口附近水流速度变化时间, s

联立式(10)~(12), 得

$$F_{s3} = F_y + F_b = \frac{1}{2} \mu_1 C_w A \rho_w \left( v + \frac{\Delta v_w}{\Delta t_w} \right)^2 \quad (13)$$

由式(13)可知, 残膜所受摩擦力与钩膜齿链速度及水流流速相关。当钩膜齿链速度恒定时, 出水口附近水流速度的变化会导致残膜所受附加浮力和波浪力的波动, 从而使摩擦力表现无规律。因此, 为防止残膜脱离钉齿, 钩膜齿链速度与水流流速需通过试验确定。

### 2.1.3 输膜阶段残膜受力分析

当残膜混合物完成清洗分离作业后, 需要及时将湿残膜通过钉齿提出水面, 经输膜阶段后对其进行卸膜以及排膜等后续作业。如图6所示, 钩膜齿链在输膜阶段与水平方向的夹角  $\varepsilon$  是决定湿残膜在输送时是否掉落的关键因素。

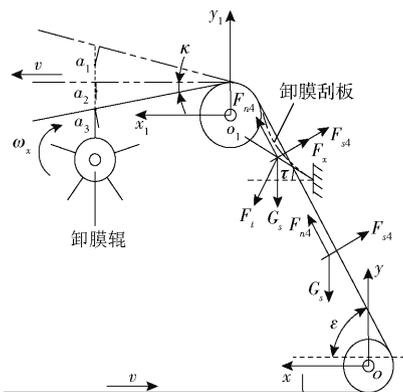


图6 输膜及卸膜阶段残膜受力分析

Fig.6 Residual film stress analysis during residual film transportation and unloading stage

残膜在输送过程中, 其受力满足

$$\begin{cases} F_{s4} \sin \varepsilon + F_{n4} \cos \varepsilon = 0 \\ F_{s4} \cos \varepsilon + F_{n4} \sin \varepsilon + G_s = 0 \end{cases} \quad (14)$$

其中

$$\begin{cases} F_{s4} = \mu_1 F_{n4} \\ G_s = m_s g \end{cases} \quad (15)$$

式中  $F_{s4}$ ——钉齿对湿残膜的摩擦力, N

$F_{n4}$ ——钉齿对湿残膜的支持力, N

$G_s$ ——湿残膜重力, N

$m_s$ ——湿残膜质量, kg

为防止湿残膜在输膜过程中掉落, 则湿残膜所受摩擦力需满足条件

$$F_{s4} \geq m_s g \cos \varepsilon \quad (16)$$

联立式(14)、(15)并代入式(16), 得钩膜齿链在输膜阶段与水平方向的夹角需满足

$$\varepsilon \geq \arctan \frac{1}{\mu_1} \quad (17)$$

经试验, 湿残膜与钉齿的摩擦因数  $\mu_1 = 0.61$ , 将其代入式(17), 得钩膜齿链在输膜阶段与水平方

向夹角的最小值为  $58.63^\circ$ , 为使整机结构紧凑, 钩膜齿链在输膜阶段与水平方向夹角选取  $60^\circ$ 。

### 2.1.4 卸膜阶段残膜受力分析

#### (1) 一次卸膜分析

经输膜阶段输送到卸膜刮板处的湿残膜大多钩挂在钉齿上, 经卸膜刮板后均可卸载, 但对于与钉齿接触处贴合紧密的湿残膜, 卸膜刮板卸膜时会存在接触不充分的情况, 为充分卸载剩余湿残膜, 设计了卸膜辊以提高卸膜率。如图 6 所示, 在卸膜过程中, 卸膜刮板对湿残膜的瞬时作用力需满足条件

$$F_l \cos(\varepsilon - \tau) + m_s g \cos \varepsilon \geq F_x + \mu_1 m_s g \sin \varepsilon \quad (18)$$

式中  $F_l$ ——卸膜刮板对湿残膜的瞬时作用力, N  
 $F_x$ ——卸膜刮板对湿残膜接触作用产生的摩擦力, N

$\tau$ ——卸膜刮板与水平方向的夹角, ( $^\circ$ )

当钉齿与卸膜刮板接触时, 摩擦力会导致卸膜刮板产生如图 7 所示的弹性变形, 使其具备弯曲势能<sup>[15]</sup>, 当其达到极限时, 其具备的能量会瞬间释放, 对湿残膜形成极大的瞬时作用力, 从而刮卸湿残膜。在此过程中, 卸膜刮板的尺寸需选择合理值。

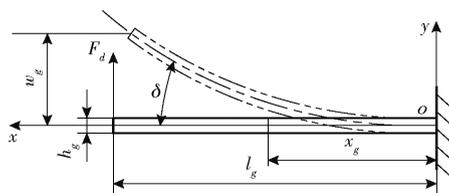


图 7 卸膜刮板变形示意图

Fig. 7 Schematic of bending deformation of residual film unloading scraper

卸膜刮板在微元长度上所具备的弯曲势能为

$$dv_g = \frac{1}{2} \delta M(x_g) dx_g \quad (19)$$

其中

$$\begin{cases} \delta = \frac{F_d l_g^2}{2E_t I} \\ M(x_g) = F_d(l_g - x_g) \\ w_g = \frac{F_d l_g^3}{3E_t I} \\ I = \frac{b_g h_g^3}{12} \end{cases} \quad (20)$$

式中  $\delta$ ——卸膜刮板变形角, ( $^\circ$ )

$M(x_g)$ ——卸膜刮板在任意截面上的弯矩, kN·m

$x_g$ ——在卸膜刮板上取的任意长度, m

$F_d$ ——钉齿对卸膜刮板的摩擦力, N

$l_g$ ——卸膜刮板长度, m

$E_t$ ——卸膜刮板的弹性模量, GPa

$I$ ——卸膜刮板极惯性矩,  $m^4$

$w_g$ ——卸膜刮板变形时的挠度, m

$b_g$ ——卸膜刮板宽度, m

$h_g$ ——卸膜刮板厚度, m

则卸膜刮板整体所具备的弯曲势能为

$$E = \int_0^{l_g} dv_g = \frac{3F_d l_g^4}{2E_t b_g h_g^3} \quad (21)$$

根据能量守恒定理, 卸膜刮板所具备的弯曲势能在极短的时间内会转换为冲量, 即

$$E = F_l t_s \quad (22)$$

式中  $t_s$ ——卸膜刮板的卸膜时间, s

在钉齿运动过程中, 卸膜刮板伸出端的速度将与钩膜齿链速度相等, 则卸膜刮板释放弯曲势能到恢复原状所需的卸膜时间为

$$t_s = \frac{l_d}{v} \quad (23)$$

为充分卸载湿残膜, 卸膜刮板的挠度需大于等于钉齿长度, 且卸膜刮板长度需满足

$$\begin{cases} w_g \geq l_d \\ g \geq \frac{l_d}{\sin(\varepsilon - \tau)} \end{cases} \quad (24)$$

联立式(20)~(24), 得卸膜刮板的宽度需满足

$$b_g \geq \frac{32(F_x + \mu_1 m_s g \sin \varepsilon - m_s g \cos \varepsilon) t_s^2 l_g^2}{3 \cos(\varepsilon - \tau) E_t l_d^2 h_g^3} \quad (25)$$

结合本装置试验, 当钩膜齿链速度  $v \geq 0.15$  m/s 时, 钉齿对残膜的钩拽效果较好, 钉齿能钩挂住的湿残膜质量  $m_s$  约为 0.05 kg, 将相关参数代入式(23), 得卸膜时间  $t_s \leq 0.4$  s; 由输膜阶段残膜受力分析可知,  $\varepsilon = 60^\circ$ ,  $\mu_1 = 0.61$ 。考虑到卸膜刮板工作过程中发生弯曲变形, 故卸膜刮板与水平面之间的初始夹角  $\tau$  取  $30^\circ$ 。将相关参数代入式(24), 得卸膜刮板的长度  $l_g \geq 0.12$  m; 为减少钉齿的磨损, 卸膜刮板选用厚度  $h_g$  为 0.01 m 橡胶板, 其弹性模量为 0.0035~0.005 GPa<sup>[15]</sup>, 将相关参数代入式(25), 得卸膜刮板宽度  $b_g \geq 0.07$  m。

#### (2) 二次卸膜分析

如图 6 所示, 钩膜齿链与水平方向的夹角  $\kappa$  影响钉齿与卸膜辊作用点的卸膜效果, 当  $\kappa > 0^\circ$  时, 两者的作用点为  $a_1$ , 卸膜效果较差; 当  $\kappa = 0^\circ$  时, 两者的作用点为  $a_2$ , 主要依靠两者之间产生的摩擦力卸膜, 效果不稳定; 当  $\kappa < 0^\circ$  时, 两者的作用点为  $a_3$ , 卸膜板从钉齿根部开始卸膜, 卸膜效果明显。考虑到本装置各部分的安装需求, 在卸膜阶段, 钩膜齿链与水平方向的夹角取  $-10^\circ$ 。如图 8 所示, 卸膜辊转速以及卸膜板数量应满足关系式

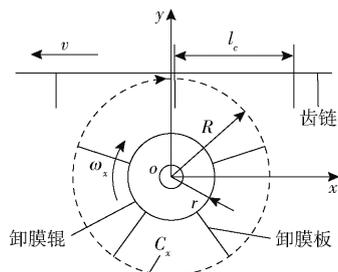


图8 卸膜辊卸膜过程示意图

Fig. 8 Schematic of unloading process of residual film roller

$$\begin{cases} t = \frac{l_c}{v} \\ C_x = zR\omega_x t = 2\pi R \\ \omega_x = \frac{\pi n_x}{30} \end{cases} \quad (26)$$

则卸膜辊转速需满足

$$n_x \geq 120 \frac{v}{z l_c} \quad (27)$$

式中  $l_c$ ——两相邻钉齿之间的距离, m

$z$ ——卸膜板数量

$R$ ——卸膜板顶端到卸膜辊回转中心的距离, m

$\omega_x$ ——卸膜辊角速度, rad/s

$n_x$ ——卸膜辊转速, r/min

现有残膜回收机卸膜辊卸膜板数量一般为4~8块<sup>[16]</sup>,本装置卸膜板数量 $z$ 设计为5块;将相关参数代入式(27),得卸膜辊的转速 $n_x \geq 10.3$  r/min。

## 2.2 排膜装置设计与分析

排膜装置主要用于排出湿残膜并过滤水分(图9a)。长短挡板防止湿残膜掉入清洗箱,弧形肋板避免筛网在湿残膜挤压下变形。刮板则刮卸随螺旋输送机转动的湿残膜,促使其沿螺旋叶片朝出口方向移动。考虑到湿残膜较大的摩擦因数和较小的厚度,排膜装置的螺旋输送机设计为浅深大螺距结构。

如图9b所示,根据达朗贝尔原理可知,当湿残膜随螺旋输送机匀速转动时,其受力公式为<sup>[17]</sup>

$$\begin{cases} F_{s5} + G_s \sin \sigma = 0 \\ F_\omega + F_{n5} + G_s \cos \sigma = 0 \end{cases} \quad (28)$$

其中

$$\begin{cases} F_{s5} = \mu_1 F_{n5} \\ F_\omega = m_s \frac{d}{2} \omega_p^2 = \frac{1}{7200} m_s n_p^2 \pi^2 d^3 \end{cases} \quad (29)$$

式中  $F_{s5}$ ——螺旋输送机对湿残膜的摩擦力, N

$\sigma$ ——卸膜挡板和螺旋输送机接触点到回转中心的连线与垂直方向的夹角, (°)

$F_\omega$ ——螺旋输送机对湿残膜惯性离心力, N

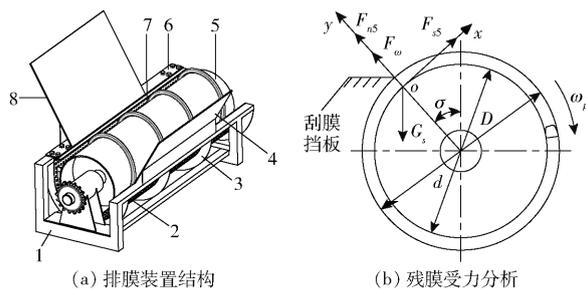


图9 排膜装置结构及残膜受力分析

Fig. 9 Structure diagrams of residual film discharge device and stress analysis of residual film

1. 螺旋输送机安装架 2. 筛网 3. 弧形肋板 4. 短挡板 5. 螺旋输送机 6. 刮板安装板 7. 刮板 8. 长挡板

$F_{s5}$ ——螺旋输送机对湿残膜的支持力, N

$d$ ——螺旋输送机主轴直径, m

$\omega_p$ ——螺旋输送机角速度, rad/s

$n_p$ ——螺旋输送机转速, r/min

由于卸膜辊处于长挡板上端,所以由卸膜辊卸载的湿残膜容易掉在靠近长挡板底端的螺旋输送机面上,即螺旋输送机还需将湿残膜向上输送一段弧长。为避免长挡板端湿残膜堆积,湿残膜所受摩擦力需满足

$$F_{s5} \geq m_s g \sin \sigma \quad (30)$$

将式(28)、(29)联立并代入式(30),得

$$\begin{cases} \sigma \leq \arctan \mu_1 \\ n_p \leq \sqrt{\frac{7200(\mu_1 g \cos \sigma - g \sin \sigma)}{\mu_1 \pi^2 d^3}} \end{cases} \quad (31)$$

衡量螺旋输送机输送性能的一个重要指标是单位时间的输送量<sup>[18]</sup>,要使落在螺旋输送机上的湿残膜在摩擦力作用下顺利通过最高点,且刮板与螺旋输送机接触处不堆积湿残膜,则螺旋输送器的理论输送量需大于等于实际输送量,即

$$Q = 60 \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \rho_c \Phi S_p n_p \geq q_c \quad (32)$$

式中  $Q$ ——螺旋输送机理论输送量, t/h

$D$ ——螺旋输送机直径, m

$\rho_c$ ——湿残膜堆积密度, t/m<sup>3</sup>

$\Phi$ ——湿残膜填充系数

$S_p$ ——螺旋输送机螺距, m

$q_c$ ——齿链实际输送量, t/h

则螺旋输送机转速为

$$n_p \geq \frac{q_c}{15\pi(D^2 - d^2)\rho_c\Phi S_p} \quad (33)$$

参考螺旋输送机行业标准并结合本装置设计特点,螺旋输送机直径 $D$ 设为0.4 m,螺距 $S_p$ 设为0.2 m;考虑到湿润残膜体积缩小及其挤压滤水功能,螺旋输送机主轴直径 $d$ 设计为0.34 m,物料填充系数 $\Phi$

取0.1；经试验，湿残膜堆积密度 $\rho_c$ 为 $0.27\text{ t/m}^3$ ；将 $\mu_1$ 代入式(31)，得 $\sigma \leq 31.79^\circ$ ，本文取 $30^\circ$ ；钩膜齿链实际输送量 $q_c$ 的设计目标为 $0.24\text{ t/h}$ 。将参数代入式(31)，得螺旋输送机转速 $n_p \leq 101.5\text{ r/min}$ ，代入式(33)得 $n_p \geq 21.4\text{ r/min}$ ，为确保湿残膜在摩擦力作用下顺利通过最高点且不在刮板与螺旋输送机接触处堆积，螺旋输送机转速需满足 $21.4\text{ r/min} \leq n_p \leq 101.5\text{ r/min}$ 。

### 2.3 排杂装置设计与分析

排杂装置的主要作用是将在循环水流的扰动作用下漂浮至集杂箱中主要为秸秆的杂质排出。如图10a所示，本装置理论排杂量是主要设计目标。

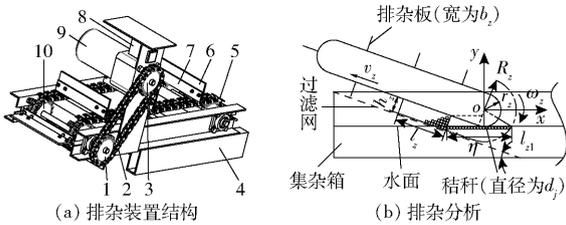


图10 排杂装置结构及排杂分析

Fig. 10 Structure and analysis of impurity removal device

1. 从动链轮 2. 传动链条 3. 主动链轮 4. 安装架 5. 排杂链条
6. 排杂板 7. 排杂板安装架 8. 变频器 9. 排杂电机
10. 传动链轮

由于残膜混合物清理分离后，漂浮到排杂装置处的物料主要为秸秆，故以秸秆为主要分析对象，将排杂装置进行如图10b所示的简化。参考波状挡板带式输送机输送量的分析<sup>[19]</sup>，定义本装置的理论排杂量为

$$Q_z = 3\ 600h_z b_z v_z \rho_z \psi \quad (34)$$

其中

$$\begin{cases} v_z = \omega_z R_z = \frac{\pi n_z}{30} R_z \\ \psi = \frac{d_j l_{z1}}{h_z l_z} \\ l_{z1} = \sqrt{R_z^2 - r_z^2} + r_z \tan \eta + [l_z - (\eta + \arctan(\sqrt{R_z^2 - r_z^2}/r_z)) r_z] / \cos \eta \end{cases} \quad (35)$$

式中  $Q_z$ ——排杂装置的理论排杂量，t/h

$h_z$ ——排杂板高度，m

$b_z$ ——排杂板宽度，m

$v_z$ ——排杂板线速度，m/s

$\rho_z$ ——湿秸秆堆积密度，t/m<sup>3</sup>

$\psi$ ——物料装满系数

$\omega_z$ ——排杂板做圆周运动时的角速度，rad/s

$R_z$ ——排杂板顶端到传动链轮中心距离，m

$n_z$ ——传动链轮转速，r/min

$d_j$ ——秸秆直径，m

$l_{z1}$ ——排杂板有效排杂距离，m

$l_z$ ——任意两排杂板之间的间距，m

$r_z$ ——传动链轮分度圆半径，m

$\eta$ ——过滤网与集杂箱底板夹角，( $^\circ$ )

为使本装置能够充分排杂，其理论排杂量需大于等于每小时投入的残膜混合物中秸秆质量，即

$$Q_z \geq q_z \quad (36)$$

联立式(34)、(35)，并代入式(36)，得

$$n_z \geq \frac{q_z l_z}{120 b_z \rho_z d_j \pi R_z l_{z1}} \quad (37)$$

式中  $q_z$ ——每小时投入清洗箱的残膜混合物中秸秆等物料质量，t/h

经试验测量，湿秸秆堆积密度 $\rho_z = 0.18\text{ t/m}^3$ ， $d_j = 0.005\text{ m}$ ；参考JB/T 8908—2013《波状挡板带式输送机标准》并结合本装置设计特点，取排杂板高度 $h_z$ 为 $0.08\text{ m}$ ，宽度 $b_z$ 为 $0.25\text{ m}$ ，相邻两排杂板之间的间距 $l_z$ 取 $0.30\text{ m}$ ；过滤网与集杂箱底板夹角 $\eta = 30^\circ$ 时，秸秆等物料的滤水时间合理；每小时投入清洗箱中的残膜混合物中秸秆质量 $q_z$ 设计目标为 $0.26\text{ t/h}$ 。将相关参数代入式(37)，得传动链轮转速 $n_z \geq 18.1\text{ r/min}$ 。由于本装置传动链轮与主动链轮齿数相同，则排杂电机转速需大于等于 $18.1\text{ r/min}$ 。

### 2.4 水循环系统设计与分析

水循环系统是实现残膜清洗分离的关键部件，如图11所示。水泵安装在循环箱中，无缝钢管进水口与水泵连接，出水口固定在清洗箱右端，靠近出水口前安装有恒流阀。水循环系统作业时，通过变频器调节水泵转速，改变其流量。

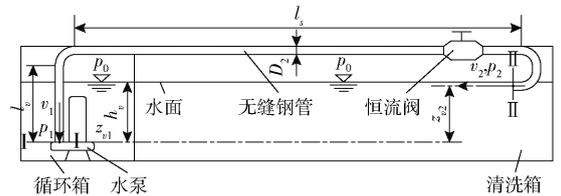


图11 水循环系统结构图

Fig. 11 Structure diagram of water circulation system

参考《工业泵选用手册》，流量是水泵选型重要的参数<sup>[20]</sup>，其计算式为

$$q_b = v_1 \pi \frac{D_2^2}{4} \quad (38)$$

式中  $q_b$ ——水泵流量，m<sup>3</sup>/h

$v_1$ ——水泵出水口平均速度，m/s

$D_2$ ——无缝钢管直径，m

由于水流在管道中流动时存在沿程损失以及局部损失<sup>[21]</sup>，水泵出水口 I—I 截面以及无缝钢管出

水口 II-II 截面满足能量方程

$$z_{v1} + \frac{p_1}{\rho_w g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_{v2} + \frac{p_2}{\rho_w g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_w \quad (39)$$

其中

$$\begin{cases} p_1 = p_0 + \rho_w g h_v \\ p_2 = p_0 + \rho_w g \frac{D_2}{2} \\ h_w = h_f + h_g = \lambda \frac{(l_v + l_s) v_2^2}{2g D_2} + \frac{\sum \zeta v_2^2}{2g} \\ h_v = z_{v2} + \frac{D_2}{2} \end{cases} \quad (40)$$

式中  $z_{v1}$ ——水泵出水口位置水头, m

$p_1$ ——水泵出水口压强, Pa

$z_{v2}$ ——无缝钢管出水口相对于水泵出水口位置水头, m

$p_2$ ——无缝钢管出水口压强, Pa

$\alpha_1, \alpha_2$ ——与流动状态有关动能修正系数

$v_2$ ——无缝钢管出水口平均速度, m/s

$h_w$ ——总水头能量损失, J

$p_0$ ——大气压强, Pa

$h_v$ ——水泵出水口到水面的垂直距离, m

$h_f$ ——沿程能量损失, J

$h_g$ ——局部能量损失, J

$\lambda$ ——沿程损失因数

$l_v$ ——无缝钢管垂直段距离, m

$l_s$ ——无缝钢管水平段距离, m

$\zeta$ ——局部损失因数

其中水泵出水口为基准面, 则  $z_{v1} = 0$ , 将其代入式(41)后联立式(38)~(40), 得

$$q_b = \frac{D_2^2}{4} \pi v_2 \sqrt{\frac{\alpha_2}{\alpha_1} + \frac{\lambda(l_v + l_s)}{D_2} + \frac{\sum \zeta}{\alpha_1}} \quad (41)$$

对于圆管紊流, 其不同截面的动能修正系数  $\alpha_1$  为 1.01~1.15 且  $\alpha_2$  为 1.01~1.15; 根据无缝钢管直径以及其内部的流动状态, 查阅穆迪(L. F. Moody)曲线可知, 沿程损失因数  $\lambda = 0.015$ ; 由文献[22]可知, 90°圆角弯管以及恒流阀的局部损失因数  $\zeta$  分别为 0.13 和 0.58; 以清洗箱尺寸为参考, 取  $l_v + l_s = 10$  m; 将上述相关参数代入式(41), 得水泵流量需满足  $35.1 \text{ m}^3/\text{h} \leq q_b \leq 52.3 \text{ m}^3/\text{h}$ , 参考现有型号, 本文选取功率为 4 kW、流量为  $50 \text{ m}^3/\text{h}$  且口径为 80 mm 的潜水排污泵, 为保障潜水排污泵运行平稳, 变频器功率需大于 4 kW。

## 3 试验

### 3.1 试验条件

为验证逆流钩拽式残膜混合物清洗分离装置的作业效果、寻求最佳试验因素, 于 2023 年 8—9 月对

样机进行试验。试验材料为机收残膜混合物, 其厚度为 0.01 mm; 所需试验设备和仪器包括逆流钩拽式残膜混合物清洗分离装置、流速仪、变频器、电子秤、试验袋、标签纸、记号笔、剪刀、A4 纸、书写板、卷尺、漏盆等, 如图 12 所示。



图 12 样机试验

Fig. 12 Prototype test

### 3.2 试验因素

根据逆流钩拽式残膜混合物清洗分离装置结构及工作原理, 选取影响残膜混合物清洗分离效果的钩膜齿链速度、无缝钢管出水口平均流速(后文简称平均流速)、无缝钢管出水口中心点距清洗箱底部的高度(后文简称出水口高度)3 个主要工作参数作为试验因素, 各因素编码如表 1 所示。

表 1 试验因素编码

Tab. 1 Test factors and codes

编码	钩膜齿链速度	平均流速	出水口高度
	$x_1 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$x_2 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$x_3 / \text{mm}$
-1	0.15	1.2	410
0	0.21	1.4	450
1	0.27	1.6	490

### 3.3 试验指标

采集若干机收残膜混合物, 对其进行适当的振动除土后, 将残膜混合物粗切为纵向尺寸约为 300 mm 的物料, 随机取 3 份 1 000 g 的残膜混合物为测量对象, 得出残膜的平均质量。从物料中任取一份 1 000 g 的残膜混合物均匀投入本装置中进行试验。为检验本装置的作业效果, 本文以残膜分离率以及残膜洁净率为试验指标<sup>[23]</sup>, 定义为

$$Y_1 = \frac{M_3}{M_1} \times 100\% \quad (42)$$

$$Y_2 = \frac{M_3}{M_2} \times 100\% \quad (43)$$

式中  $M_1$ ——残膜混合物中残膜的平均质量, kg  
 $M_2$ ——从排膜装置处收集并将其晾晒之后, 占比主要为残膜的混合物质量, kg  
 $M_3$ ——从  $M_2$  中挑选出来的残膜质量, kg  
 $Y_1$ ——残膜分离率, %  
 $Y_2$ ——残膜洁净率, %

### 3.4 结果与分析

应用 Design-Expert 12 试验设计软件的 Box -

Behnken 模块对本装置进行三因素三水平响应面试验,共进行 17 组试验,每组试验重复 3 次后取平均值。根据式(42)、(43)计算残膜分离率和残膜洁净率,试验方案及结果如表 2 所示, $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 为因素编码值。

表 2 试验方案与结果  
Tab.2 Test plan and result

试验序号	因素			残膜分离率 $Y_1/\%$	残膜洁净率 $Y_2/\%$
	$X_1$	$X_2$	$X_3$		
1	1	-1	0	91.51	91.04
2	0	0	0	87.66	88.23
3	0	-1	-1	90.85	91.91
4	-1	-1	0	86.55	92.38
5	0	1	-1	85.23	88.66
6	0	0	0	86.52	90.24
7	0	0	0	88.79	89.75
8	-1	0	-1	83.71	88.16
9	1	0	1	83.04	88.02
10	1	0	-1	90.88	91.73
11	0	-1	1	85.37	94.31
12	-1	1	0	85.86	96.08
13	0	0	0	85.48	92.45
14	1	1	0	91.49	91.42
15	0	0	0	90.11	90.34
16	0	1	1	86.25	87.86
17	-1	0	1	91.18	90.95

### 3.4.1 方差分析

利用 Design-Expert 12 软件对表 2 所示试验结果进行处理和分析,得残膜分离率与残膜洁净率的方差结果如表 3 所示。从方差分析可知,各试验因素对残膜分离率和残膜洁净率的影响均显著,且各试验因素对残膜分离率的影响主次顺序为:出水口高度  $X_3$ 、平均流速  $X_2$ 、钩膜齿链速度  $X_1$ ;对残膜洁净率的影响顺序为:平均流速  $X_2$ 、钩膜齿链速度  $X_1$ 、出水口高度  $X_3$ 。根据表 3 分析结果对残膜分离率及残膜洁净率进行多元回归拟合,得各因素对残膜分离率  $Y_1$ 及残膜洁净率  $Y_2$ 影响的回归方程为

$$Y_1 = 91.18 + 0.53X_1 + 0.63X_2 + 0.76X_3 - 0.64X_1X_2 + 0.05X_1X_3 - 0.93X_2X_3 - 1.74X_1^2 - 4.54X_2^2 - 1.17X_3^2 \quad (44)$$

$$Y_2 = 91.41 - 0.55X_1 + 2.82X_2 + 0.41X_3 - 1.07X_1X_2 + 0.65X_1X_3 + 0.56X_2X_3 - 0.57X_1^2 - 0.47X_2^2 - 1.20X_3^2 \quad (45)$$

### 3.4.2 响应曲面分析

为了解各试验因素的交互作用对残膜分离率以及残膜洁净率的影响,分别绘制残膜分离率以及残膜洁净率的响应面图,如图 13 所示。

表 3 回归模型方差分析

Tab.3 Regression model analysis of variance

指标	方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
残膜分离率 $Y_1$	模型	128.29	9	14.25	49.35	<0.0001**
	$X_1$	2.28	1	2.28	7.89	0.0262*
	$X_2$	3.16	1	3.16	10.95	0.0130*
	$X_3$	4.62	1	4.62	16.00	0.0052**
	$X_1X_2$	1.65	1	1.65	5.72	0.0481*
	$X_1X_3$	0.0081	1	0.0081	0.0280	0.8717
	$X_2X_3$	3.46	1	3.46	11.98	0.0105*
	$X_1^2$	12.74	1	12.74	44.12	0.0003**
	$X_2^2$	86.78	1	86.78	300.43	<0.0001**
	$X_3^2$	5.79	1	5.79	20.03	0.0029**
残差	2.02	7	0.2888			
失拟	1.62	3	0.5393	5.34	0.0696	
误差	0.4039	4	0.1010			
总和	130.31	16				
残膜洁净率 $Y_2$	模型	82.95	9	9.22	54.53	<0.0001**
	$X_1$	2.43	1	2.43	14.38	0.0068**
	$X_2$	63.39	1	63.39	375.06	<0.0001**
	$X_3$	1.32	1	1.32	7.81	0.0267*
	$X_1X_2$	4.56	1	4.56	26.97	0.0013**
	$X_1X_3$	1.69	1	1.69	10.00	0.0159*
	$X_2X_3$	1.24	1	1.24	7.36	0.0301*
	$X_1^2$	1.38	1	1.38	8.16	0.0244*
	$X_2^2$	0.9104	1	0.9104	5.39	0.0533
	$X_3^2$	6.04	1	6.04	35.72	0.0006**
残差	1.18	7	0.1690			
失拟	0.4822	3	0.1607	0.9171	0.5086	
误差	0.7010	4	0.1752			
总和	84.13	16				

注: \* 表示影响显著 ( $0.01 < P < 0.05$ ); \*\* 表示影响极显著 ( $P \leq 0.01$ )。

#### (1) 交互作用对残膜分离率的影响

由图 13a 可知,当出水口高度  $X_3$  固定在中心水平 450 mm 时,钩膜齿链速度和平均流速的交互作用对残膜分离率的影响总体表现出先增后减的趋势,由 83.04% 增加至 91.51% 后降低为 85.48%;由图 13b 可知,当钩膜齿链速度  $X_1$  固定在中心水平 0.21 m/s 时,平均流速和出水口高度的交互作用对残膜分离率的影响总体表现出先增后减的趋势,由 83.71% 增加至 91.51% 后降低为 85.37%。分析其主要原因为:当钩膜齿链速度较小时,残膜混合物相对于循环扰动水流运动时受到的阻力较小,各物料之间的清洗分离效果较差,导致残膜容易在秸秆等物料残余的影响下脱离钉齿。当钩膜齿链速度较大时,残膜易在输膜阶段因振动而掉落,再次与其他物料混合;平均流速主要影响残膜混合物的运动状态,流速较小时,残膜混合物在循环扰动水流中所受阻力较小,导致残膜与钉齿接触处的摩擦力减小,更易

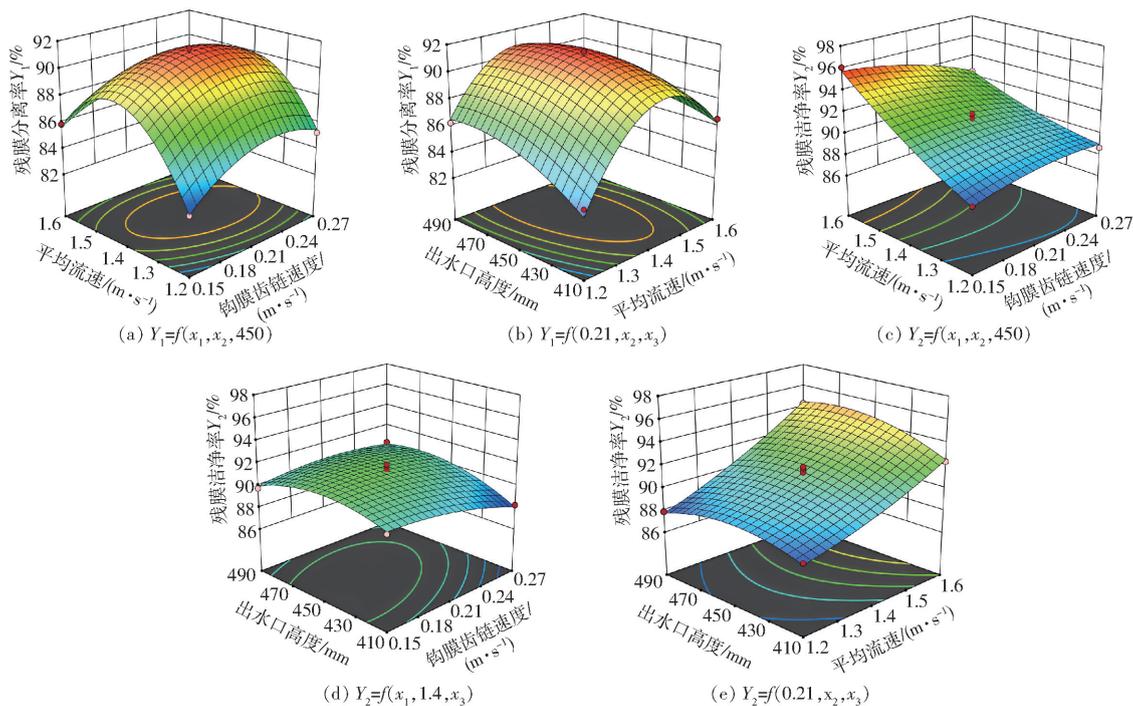


图13 试验因素交互作用对指标影响的响应曲面

Fig. 13 Response surfaces of influence of experimental factor interaction on indicators

脱离钉齿随水流运动。流速较大时,循环水流的壅水和浪涌加剧了不规则运动,促使残膜脱离钉齿;当出水口高度较低时,射流主要作用于清洗箱下层,因隔板出现回流,导致残膜易脱离钉齿。当出水口高度较高时,射流主要作用于表层水流,由于射流半径小且流速大,残膜更易在压强差作用下脱离钉齿,降低分离率。

### (2) 交互作用对残膜洁净率的影响

由图13c可知,当出水口高度 $X_3$ 固定在中心水平450 mm时,钩膜齿链速度和平均流速的交互作用对残膜洁净率的影响总体表现出持续增加的趋势,由88.02%增加至92.45%;由图13d可知,当平均流速 $X_2$ 固定在中心水平1.4 m/s时,钩膜齿链速度和出水口高度的交互作用对残膜洁净率的影响总体表现出先增后减的趋势,由90.24%增加至91.42%后降低为90.34%;由图13e可知,当钩膜齿链速度 $X_1$ 固定在中心水平0.21 m/s时,平均流速和出水口高度的交互作用对残膜洁净率的影响总体表现出持续增加的趋势,由88.16%持续增加为94.31%。分析其主要原因为:当钩膜齿链速度较小时,循环扰动水流对残膜混合物的阻力较小,导致清洗分离效果不佳、残膜洁净率较低。随着钩膜齿链速度增加,水流的扰动作用显著提升,残膜洁净率随之提高。平均流速越大,扰动作用越强,残膜洁净率也越高。当出水口高度较低时,其射流主要作用于清洗箱下层水流,对原有水流的扰动效果减弱,从而导致残膜洁净率降低。当出水口高度较高时,射流

主要影响清洗箱表层水流,尽管射流距离较大,但由于射流半径小,扰动面积有限,使残膜混合物大多处于缓慢流动区域,从而导致洁净率较低。

### 3.5 参数优化与验证试验

为寻求逆流钩拽式残膜混合物清洗分离装置的最优工作状态,利用 Design-Expert 12 Optimization 模块对残膜分离率和残膜洁净率进行寻优处理,其优化目标为寻求试验指标的最大值,优化模型为

$$\begin{cases} \max Y_1 \\ \max Y_2 \\ \text{s. t.} \begin{cases} 0.15 \text{ m/s} \leq x_1 \leq 0.27 \text{ m/s} \\ 1.2 \text{ m/s} \leq x_2 \leq 1.6 \text{ m/s} \\ 410 \text{ mm} \leq x_3 \leq 490 \text{ mm} \end{cases} \end{cases} \quad (46)$$

将相关参数代入软件,得最佳因素组合为:钩膜齿链速度0.196 m/s、平均流速1.51 m/s、出水口高度457.0 mm,此时残膜分离率和残膜洁净率分别为89.95%和93.46%。

为验证优化结果的可靠性,于2023年8月25日进行试验验证,依据实际试验条件,圆整钩膜齿链速度为0.20 m/s、平均流速为1.5 m/s、出水口高度为457.0 mm,重复试验3次后取其平均值作为实际试验结果,理论优化结果以及验证试验结果如表4所示。由表4可知,残膜分离率以及残膜洁净率的理论值与试验值相对误差均小于5%,优化结果可靠。

表4 理论优化与验证试验结果对比

Tab.4 Comparison of theoretical optimization and verification test results

参数	残膜分离率 $Y_1/\%$	残膜洁净率 $Y_2/\%$
理论值	89.95	93.46
试验值	88.72	92.35
相对误差	1.39	1.20

## 4 结论

(1)为解决现有风选式膜杂分离装置分离出的残膜附土量较高,而水洗式膜杂分离装置能耗较高且用水量较大等问题,设计了一种基于水流循环扰动且具有持续清洗分离、排膜挤水、排杂滤水功能的逆流钩拽式残膜混合物清洗分离装置。

(2)对关键部件进行了分析,得钩膜齿链的钩

膜条件是钩膜齿链速度大于水流流速,钩膜齿链在输膜阶段与水平方向夹角为 $60^\circ$ ,卸膜刮板的尺寸需求,卸膜辊的转速为 $n_x \geq 10.3 \text{ r/min}$ ,螺旋输送器的转速为 $21.4 \text{ r/min} \leq n_p \leq 101.5 \text{ r/min}$ ,排杂电机的转速需大于等于 $18.1 \text{ r/min}$ ,水泵流量为 $35.1 \text{ m}^3/\text{h} \leq q_b \leq 52.3 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

(3)通过响应面试验得出各试验因素对残膜分离率的影响由大到小为:出水口高度、平均流速、钩膜齿链速度;对残膜洁净率的影响由大到小为:平均流速、钩膜齿链速度、出水口高度。对试验指标进行了参数优化,得到最优参数组合为:钩膜齿链速度 $0.196 \text{ m/s}$ 、平均流速 $1.51 \text{ m/s}$ 、出水口高度 $457.0 \text{ mm}$ ,此时残膜分离率和残膜洁净率分别为 $89.95\%$ 和 $93.46\%$ 。对优化结果进行试验验证,得残膜分离率和残膜洁净率分别为 $88.72\%$ 和 $92.35\%$ ,优化结果可靠。

## 参 考 文 献

- [1] 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): 213-224. HU Can, WANG Xufeng, CHEN Xuegeng, et al. Current status and prevention and control strategies of residual film pollution in farmland in Xinjiang[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(24): 213-224. (in Chinese)
- [2] 赵岩,陈学庚,温浩军,等. 农田残膜污染治理技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 1-14. ZHAO Yan, CHEN Xuegeng, WEN Haojun, et al. Research status and prospects of farmland residual film pollution control technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 1-14. (in Chinese)
- [3] 孙岳,简建明,田玉泰,等. 残膜回收机旋转式起膜装置起膜机理分析与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 304-310. SUN Yue, JIAN Jianming, TIAN Yutai, et al. Analysis and test of film forming mechanism of rotary film forming device of residual film recovery machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 304-310. (in Chinese)
- [4] 程方平,庾洪章,易文裕,等. 棉田残膜回收机械研究现状及发展趋势[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(2): 200-207. CHENG Fangping, TUO Hongzhang, YI Wenyu, et al. Research status and development trends of residual film recovery machinery in cotton fields[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(2): 200-207. (in Chinese)
- [5] LUPO E, MORONI M, LA MARCA F, et al. Investigation on an innovative technology for wet separation of plastic wastes[J]. Waste Management, 2016, 51: 3-12.
- [6] 石鑫,牛长河,王学农,等. 滚筒筛式废旧地膜与杂质风选装置设计[J]. 农业工程学报, 2017, 33(18): 19-26. SHI Xin, NIU Changhe, WANG Xuenong, et al. Design of drum screen type waste mulch film and impurity air separation device[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(18): 19-26. (in Chinese)
- [7] 彭强吉,李成松,康建明,等. 气力式圆筒筛膜杂分离机改进设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(8): 126-135. PENG Qiangji, LI Chengsong, KANG Jianming, et al. Improved design and test of pneumatic cylindrical membrane impurity separator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 126-135. (in Chinese)
- [8] 袁成林. 基于水介质输送的膜杂剪切分离装置设计与试验[D]. 石河子: 石河子大学, 2023. YUAN Chenglin. Design and experiment of membrane hybrid shear separation device based on water medium transportation [D]. Shihezi: Shihezi University, 2023. (in Chinese)
- [9] 陈永,陈学庚,何浩猛,等. 基于灌溉引水渠介质的膜秆分离装置设计与试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2023, 53(4): 1245-1256. CHEN Yong, CHEN Xuegeng, HE Haomeng, et al. Design and experiment of membrane straw separation device based on irrigation diversion canal medium[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023, 53(4): 1245-1256. (in Chinese)
- [10] 何浩猛,胡斌,李俊虹,等. 叶轮驱动式机收残膜水洗分离设备研究与试验[J]. 农机化研究, 2020, 42(9): 151-155. HE Haomeng, HU Bin, LI Junhong, et al. Research and test on impeller-driven mechanical residual film collection and washing and separation equipment[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(9): 151-155. (in Chinese)
- [11] 钱晓科,郑红卫,杨生严. 塑料清洗分选生产线: CN202223115834.6[P]. 2023-08-04.
- [12] 陈卓如. 工程流体力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013.

- [13] 武娟娟. 输水渠道桥梁墩柱绕流特性及减阻技术研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2022.  
WU Juanjuan. Research on flow characteristics and drag reduction technology around bridge piers in water conveyance channels [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2022. (in Chinese)
- [14] 鲁胜龙, 朱金, 蒋尚君, 等. 孤立波作用下圆柱桩波浪力计算方法研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(14): 11-19.  
LU Shenglong, ZHU Jin, JIANG Shangjun, et al. Research on wave force calculation method of cylindrical piles under the action of solitary waves[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(14): 11-19. (in Chinese)
- [15] 刘鸿文. 材料力学 II [M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [16] 由佳翰. 4JSM-2000型棉秆粉碎与残膜回收联合作业机的设计与试验[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019.  
YOU Jiahao. Design and test of 4JSM-2000 cotton stalk crushing and residual film recovery combined machine [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [17] 梁荣庆. 多刃齿刀式棉田机收膜杂切碎特性研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2022.  
LIANG Rongqing. Research on the characteristics of film harvesting and shredding of multi-blade toothed cotton field machines [D]. Shihezi: Shihezi University, 2022. (in Chinese)
- [18] 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 Silin, XIE Jianhua, YANG Yuxin, et al. Design and test of side-discharge cotton straw returning and residual mulch film recycling combined operation machine[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023, 53(5): 1514-1528. (in Chinese)
- [19] 殷仁强. S型波状挡边带式输送机关键部件设计及改进研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2017.  
YIN Renqiang. Research on the design and improvement of key components of S-shaped corrugated side belt conveyor [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2017. (in Chinese)
- [20] 吴燕. 涡旋水流清洗技术的机理与实验研究[D]. 无锡: 江南大学, 2015.  
WU Yan. Mechanism and experimental study of vortex flow cleaning technology [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015. (in Chinese)
- [21] 王启才. 离心式水泵计算机辅助选型与能效计算研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2018.  
WANG Qicai. Research on computer-aided selection and energy efficiency calculation of centrifugal water pumps [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2018. (in Chinese)
- [22] 周恩涛. 液压系统设计元器件选型手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [23] 张佳, 王宏, 尹君驰, 等. 铲筛式残膜回收机分离机构的设计及试验[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(12): 184-189.  
ZHANG Jia, WANG Hong, YIN Junchi, et al. Design and test of separation mechanism of shovel-type residual film recovery machine [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(12): 184-189. (in Chinese)

(上接第 396 页)

- [23] LI C Y, JIA H L, ZHANG Z H, et al. Bionic sawblade based on grasshopper incisor for corn stalk cutting [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 461: 491-498.
- [24] TANG H, JIANG Y, WANG J, et al. Bionic design and parameter optimization of rotating and fixed stem- and leaf-cutting devices for carrot combine harvesters [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2021, 2021(2): 1-14.
- [25] XIE F, ZHAO J W, JU F. The point cloud collection of the incisor teeth of beaver and re-construction of its curved surface [J]. Advanced Materials Research, 2012, 426: 387-390.
- [26] CHANG Z, LIU W, TONG J, et al. Design and experiments of biomimetic stubble cutter [J]. Journal of Bionic Engineering, 2016, 13(2): 335-343.
- [27] 陈涛, 宋立星, 李素燕, 等. 渐变强化刃刀具硬切削过程切屑流动和刀具磨损研究 [J]. 机械工程学报, 2019, 55(19): 195-200.  
CHEN Tao, SONG Lixing, LI Suyan, et al. Research into chip flow and tool wear in hard cutting using tool with variable strengthening edge [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(19): 195-200. (in Chinese)
- [28] 王宏立, 王文春, 杨天维, 等. 青饲机平板刀式滚筒切碎器的设计研究 [J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2004, 16(3): 49-52.  
WANG Hongli, WANG Wenchun, YANG Tianwei, et al. Design on plane table-knife drum cutter of the verdant forage harvester [J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2004, 16(3): 49-52. (in Chinese)
- [29] 庞声海, 王乃信. 直刀刃滚刀式切碎器的分析与设计 [J]. 农业机械学报, 1983, 14(2): 46-54.  
PANG Shenghai, WANG Naixin. Analysis and design on the cylinder-type forage cutterhead with straight knife edge [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1983, 14(2): 46-54. (in Chinese)
- [30] 刘志刚. 典型沙生灌木平茬技术与机具研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2013.  
LIU Zhigang. Study on typical sandy shrub stumping technology and equipment [D]. Beijing: China Agricultural University, 2013. (in Chinese)