

# 滚筒筛式膜杂风选机筛孔清堵装置设计与试验

康建明<sup>1,2</sup> 解臣硕<sup>1,3</sup> 王小瑜<sup>1,2</sup> 陈英凯<sup>1,2</sup> 王长伟<sup>4</sup> 彭强吉<sup>1,2</sup>

(1. 山东省农业机械科学研究院, 济南 250100; 2. 农业农村部黄淮海现代农业装备重点实验室, 济南 250100; 3. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 4. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京 100083)

**摘要:**为解决滚筒筛式膜杂风选机运行过程中易发生筛孔堵塞,导致筛分性能差、膜中含杂率高等问题,设计了一种通过喷头喷射气流扰动筛孔处流场、破坏堵塞物在筛孔处受力平衡的筛孔清堵装置。该装置包含对角安装在滚筒筛式膜杂风选机两侧的离心式鼓风机、稳压管、滚筒外缘的气流管道等。通过理论分析确定了筛孔清堵的临界气流速度为 1.151 m/s,采用计算流体力学仿真与曲线拟合的方法探明了风机风速与喷头喷射气流速度呈正相关关系,最终确定风机风速为 9.2 m/s。设计并搭建样机进行试验,结果表明:当风机风速为 9.2 m/s 时,筛孔堵塞率为 8.28%,膜中含杂率为 7.33%,较安装筛孔清堵装置前筛孔堵塞率、膜中含杂率分别降低 16.27、4.64 个百分点,其中各喷头喷射气流速度平均值为 3.81 m/s,最小值为 1.22 m/s,满足清堵要求,清堵装置持续工作过程中,筛孔堵塞率和膜中含杂率基本保持不变。

**关键词:**膜杂风选机;筛孔清堵装置;数值模拟

中图分类号: S223.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)09-0091-08

OSID:



## Design and Test of Screen Hole Clearing Device for Trommel Sieve Type Membrane Miscellaneous Wind Separator

KANG Jianming<sup>1,2</sup> XIE Chenshuo<sup>1,3</sup> WANG Xiaoyu<sup>1,2</sup> CHEN Yingkai<sup>1,2</sup> WANG Changwei<sup>4</sup> PENG Qiangji<sup>1,2</sup>

(1. Shandong Academy of Agricultural Machinery Sciences, Ji'nan 250100, China

2. Huang Huai Hai Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Ji'nan 250100, China

3. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China

4. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that the screen holes are prone to clogging during the operation of the drum screen type film and debris separator, resulting in poor screening performance and high debris content in the film, a screen hole clearing device was designed to disturb the flow field at the screen holes by spraying airflow from the nozzle and disrupt the balance of force of the clogged material at the screen holes. The device consisted of a centrifugal blower mounted diagonally on both sides of the drum screen type film separator, a pressure stabilizing pipe and an airflow duct on the outer edge of the drum. The critical air velocity for screen hole cleaning was determined to be 1.151 m/s by theoretical analysis, and a positive correlation between fan air velocity and nozzle jet air velocity was investigated by using computational fluid dynamics simulation and curve fitting to determine a final fan air velocity of 9.2 m/s. The prototype was designed and tested, and the results showed that 8.28% of the screen holes were clogged and the rate of debris in the film was 7.33%, which was 16.27 and 4.64 percentage points lower than before the installation of the screen hole clearing device. The average jet air velocity of each nozzle was 3.81 m/s and the minimum value was 1.22 m/s, which met the requirement of clearing the blockage, and the blockage rate of the screen pore and the rate of impurities in the film remained basically unchanged during the continuous operation of the clearing device. The research result can provide reference for the design of various forms of screen hole clearing devices.

**Key words:** membrane miscellaneous wind separator; screen hole clearing device; numerical simulation

收稿日期: 2022-05-19 修回日期: 2022-07-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(52175238)和山东省自然科学基金重点项目(ZR2020KE045)

作者简介: 康建明(1984—),男,副研究员,博士,主要从事农田残膜污染技术及装备研究,E-mail: kjm531@sina.com

通信作者: 彭强吉(1983—),男,高级工程师,主要从事残膜装备研究,E-mail: pengqiangji@shandong.cn

## 0 引言

地膜覆盖栽培技术在寒、旱农业区保粮增收的同时,也给农田土壤带来了严重的白色污染<sup>[1-2]</sup>,机械化回收并资源化利用是解决农田残膜污染的必由之路。国内学者研制了多种型式的农田残膜回收机械<sup>[3-5]</sup>,残膜机械化回收已初见成效。机械化回收后的残膜中混杂有秸秆、土块等杂质,只有去除杂质后残膜才可二次利用。滚筒筛式膜杂风选机(简称膜杂风选机)是除杂环节的关键装备,但是设备运行过程中,筛孔出现不同程度的堵塞,由于膜杂混合物具有复杂的机械物理特性,传统的振动、击打等方法难以清除筛孔处的堵塞,严重影响膜杂风选机筛分性能及整机的可靠性。

国内外学者对传统农业物料筛孔堵塞问题进行了大量研究,ENGLISH等<sup>[6]</sup>分析了不同物料粒度与筛孔孔径关系时筛孔的堵塞情况;ASTROM<sup>[7]</sup>设计了旋转概率筛,并通过试验确定旋转概率筛开孔率比直线振动筛稳定;BELLOCQ等<sup>[8]</sup>通过研究在物料潮湿团聚、筛孔堵塞条件下物料透筛形态变化,获得了相关作业环节中必须达到的要素条件;杨会民等<sup>[9]</sup>提出用弹性筛面代替金属筛面,可以避免筛孔堵塞;李耀明等<sup>[10-11]</sup>针对油菜清选作业过程中出现的清选筛粘附、堵塞问题,提出非光滑筛面具有减粘脱附的作用;程超等<sup>[12]</sup>研究了不同堵塞失效状态下清选筛的作业性能变化。膜杂混合物在筛孔处大多是呈现缠绕、打结的堵塞状态,不同于传统颗粒状农业物料单纯的堵塞筛孔,因此采用传统方法难以实现清堵。

针对膜杂风选机筛孔堵塞的问题,本文设计一种通过喷头喷射气流扰动筛孔处流场、破坏堵塞物在筛孔处受力平衡的筛孔清堵装置。通过理论分析、计算流体力学仿真以及曲线拟合等方法,分析堵塞内在机理,计算满足清堵要求的气流速度;比较离心式鼓风机不同安装位置对应各喷头喷射气流速度,确定最佳结构方案;结合计算流体仿真与伯努利方程,求解筛孔清堵装置工作风速,为多种形式的筛孔清堵装置的设计提供参考。

## 1 总体结构与工作原理

### 1.1 总体结构

安装有筛孔清堵装置的膜杂风选机结构如图1所示,主要由风机、风管、滚筒筛、集膜箱、筛孔清堵装置等组成。筛孔清堵装置由离心式鼓风机、布置在密封罩外围沿滚筒轴向分布的气流管道组成,气流管道分别位于密封罩曲面0°、45°、90°、135°、180°

位置,通过安装在两端的电磁阀控制气流管道是否流通,每个气流管道上安装7个喷头,两喷头间距相等;分流管弯折成半圆弧,安装在气流管道两端,半圆弧可以减少气流在流动过程中的能量损失,并且有利于在不同位置安装气流管道。

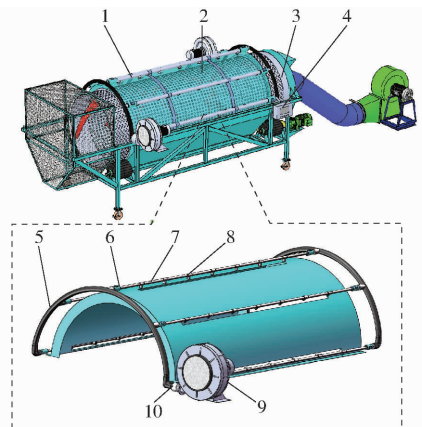


图1 膜杂风选机与筛孔清堵装置结构示意图  
Fig.1 Diagram of structure of screen hole clearing device of film miscellaneous wind separator

1. 筛孔清堵装置 2. 密封罩 3. 滚筒筛 4. 分流管 5. 控制器  
6. 电磁阀 7. 气流管道 8. 喷头 9. 离心式鼓风机 10. 稳压管

### 1.2 工作原理

膜杂风选机作业时,由于膜杂混合物比重不同,膜杂混合物在滚筒筛转动与气流吹动的共同作用下,实现膜杂分离,分离后的残膜在气流的作用下通过滚筒筛从装置后端进入集膜箱<sup>[13]</sup>。工作一段时间后,条状的秸秆等杂质交错支撑在筛孔处,片状的残膜缠绕贴附在秸秆上,最终导致筛孔堵塞。此时,离心式鼓风机向各气流管道输送一定速度的气流,气流由进气口进入稳压管,形成稳定、高速的气流,经过分流管和各个气流管道,最终通过喷头喷出,干扰筛孔处膜杂混合物的运动状态,打破其在筛孔处的受力平衡,从而实现筛孔清堵。

### 1.3 主要技术指标

膜杂风选机筛孔清堵装置主要技术参数如表1所示。

表1 主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters

参数	数值
整机尺寸(长×宽×高)/(m×m×m)	3.50×1.62×2.00
筛孔清堵装置尺寸(长×宽×高)/(m×m×m)	2.90×1.50×0.75
离心式鼓风机工作风速/(m·s <sup>-1</sup> )	5~30
气流管道数量	5
喷头数量	35

## 2 筛孔清堵装置设计

### 2.1 参数分析

筛孔清堵装置工作过程中,安装在密封罩外围

的喷头向筛孔喷射气流,气流方向与杂质从筛孔中排出的方向相反,其目的是干扰筛孔处膜杂混合物的运动状态。膜杂混合物主要由残膜、秸秆、土块等组成(经试验测得各物料悬浮速度范围分别为1.8~3.2 m/s,5.9~10.2 m/s,8.9~12.8 m/s),筛孔处的膜杂混合物受到重力 $mg$ 、滚筒筛内部气流阻力 $F_{i1}$ 、喷头喷射气流提供的气流阻力 $F_{i2}$ 、滚筒筛提供的支持力 $F_N$ 和摩擦力 $f$ 的作用,筛孔处物料受力如图2所示。

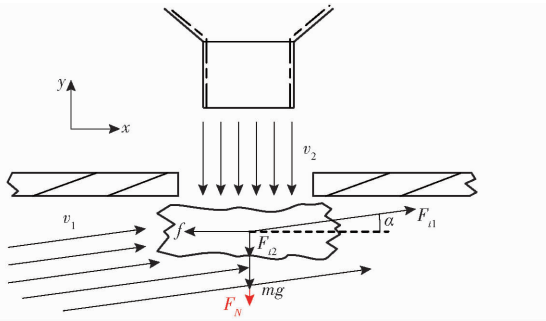


图2 物料运动分析

Fig.2 Material motion analysis

膜杂混合物受到滚筒筛内部流场的气流阻力 $F_{i1}$ 为

$$F_{i1} = \frac{1}{2}CA\rho_s v_1 \quad (1)$$

式中  $C$ ——物料阻力系数,结合物料等效直径所在范围确定 $C$ 为0.44

$A$ ——物料迎风面积,  $m^2$

$\rho_s$ ——物料密度,  $kg/m^3$

$v_1$ ——滚筒筛内部气流速度,  $m/s$

根据前期研究,取 $v_1 = 8.5 m/s$ ,与 $x$ 轴正方向夹角为 $\alpha = 8^\circ$ 。

膜杂混合物受到喷头喷射气流的气流阻力 $F_{i2}$ 为

$$F_{i2} = \frac{1}{2}CA\rho_s v_2 \quad (2)$$

式中  $v_2$ ——喷头喷射气流速度,方向朝向 $y$ 轴负方向,  $m/s$

膜杂混合物堵塞筛孔时,跟随滚筒做匀速圆周运动,由重力、滚筒筛内部流场作用在膜杂混合物上的气流阻力、气流发射器提供的气流阻力、滚筒筛提供的支持力的合力提供向心力,当堵塞的筛孔正对喷头,膜杂混合物恰好与滚筒分离的瞬间, $F_N = 0 N$ ,此时膜杂混合物受力关系式为

$$F_{i2} + mg - F_{i1} \sin\alpha = m\omega^2 r \quad (3)$$

式中  $m$ ——膜杂混合物质量,  $kg$

$\omega$ ——滚筒筛旋转角速度,  $rad/s$

$r$ ——滚筒筛半径,  $m$

$g$ ——重力加速度,取 $9.81 m/s^2$

为打破膜杂混合物在筛孔处的受力平衡,实现清堵,喷头喷射气流对膜杂混合物的气流阻力与膜杂混合物重力之和,应大于滚筒筛内部流场作用在膜杂混合物上的气流阻力在 $y$ 轴正方向上的分力与膜杂混合物跟随滚筒筛做圆周运动所需向心力之和,关系式为

$$F_{i2} + mg > F_{i1} \sin\alpha + m\omega^2 r \quad (4)$$

将式(1)、(2)代入式(4)化简可得喷头喷射气流速度 $v_2$ 的关系式为

$$v_2 > v_1 \sin\alpha + \frac{2m\omega^2 r}{CA\rho_s} - \frac{2mg}{CA\rho_s} \quad (5)$$

经试验,膜杂混合物质量平均值为 $1.03 g$ ,密度平均值为 $162.5 kg/m^3$ ,膜杂混合物迎风面积平均值为 $5.57 \times 10^{-3} m^2$ ,滚筒筛角速度为 $2.7 rad/s$ ,滚筒筛半径为 $0.5 m$ 。将各参数代入式(5)中可得喷头喷射气流速度 $v_2 > 1.151 m/s$ 。

## 2.2 筛孔清堵装置风机安装位置分析

为满足清堵要求,保证筛孔清堵装置有效工作,喷头喷射时速度应大于 $1.151 m/s$ 。由于气流管道较长且多管道同时工作,单方面提高风机风速并不能有效保证各喷头喷射气流速度满足清堵条件,若分流管内气流速度过高,部分气流管道出现负压,喷头处易形成向内流动气流,对筛孔处的残膜形成一定的吸附作用,导致筛孔堵塞情况更加严重。对此,为保证各喷头喷射气流速度满足清堵条件,探究风机布置形式对喷头喷射气流速度的影响,设计如图3所示3种离心式鼓风机安装方案,其中稳压管为安装在进气口处一较大直径的管道,对进入的高速气体具有稳压作用,避免气体直接进入分叉管道造成能量损失。

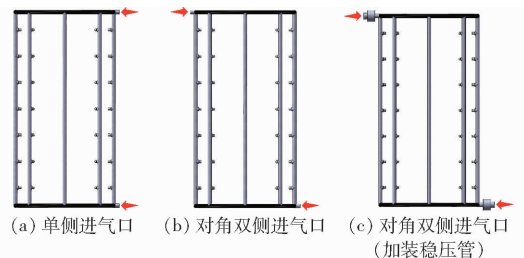


图3 3种离心式鼓风机安装位置示意图

Fig.3 Schematics of installation position of three kinds of centrifugal blower

借助Fluent软件对3种结构分别进行仿真,由于该试验目的在于比较不同离心式鼓风机安装方案中各喷头喷射气流速度大小,且风机风速暂未确定,仿真参数设定时,3种安装方案风机风速均随机设置为一较大值 $10 m/s$ ,统计各喷头喷射气流速度,绘制图4所示散点图,安装方案与喷头喷射气流速度

对应关系如图例所示,不同安装方案中各喷头按照相同命名顺序分别定为位置1~35,图中红线对应值为满足清堵要求的最低气流速度1.151 m/s,由散点图可知,相同工作参数下,对角安装离心式鼓风机且加装稳压管的喷头喷射气流速度明显大于其余两种方案,且最小值大于其余两种方案多数喷头喷射气流速度,故选取该方案安装离心式鼓风机。

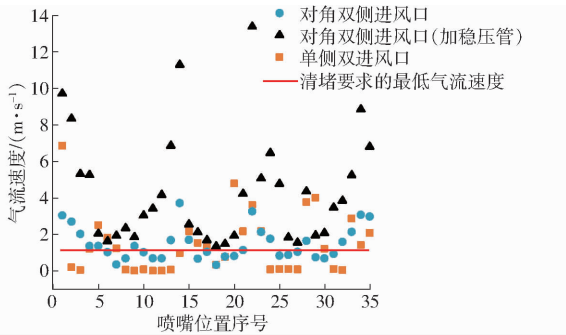


图4 不同位置喷头喷射气流速度散点图

Fig. 4 Scatter diagram of airflow velocity of nozzles at different positions

### 2.3 筛孔清堵装置风机风速确定

为确定风机风速,对管道中的能量损失进行分析,气流由进气口进入,经分管、气流管道到达距离该进气口最远的喷头,其中能量损失包括沿程损失和局部损失<sup>[14-15]</sup>,关系式为

$$\begin{cases} h_{f1} = \lambda \frac{L}{d} \frac{v^2}{2g} \\ h_{f2} = \zeta \frac{v^2}{2g} \end{cases} \quad (6)$$

其中  $\lambda = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} = 0.038$

式中  $h_{f1}$ 、 $h_{f2}$ ——沿程损失和局部损失, m

$L$ ——等截面圆管长度, m

$d$ ——圆管直径, m

$v$ ——气流速度, m/s

$\lambda$ ——沿程损失系数

$\zeta$ ——局部损失系数,根据90°弯管弯曲半径与圆管直径关系,当比值为0.5时, $\zeta$ 取1.2

考虑气流在流动过程中的能量损失,沿流动方向从进气口流入到喷头喷射的伯努利方程为

$$\frac{p_1}{\rho g} + z_1 + \frac{\delta_1 v_3^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + z_2 + \frac{\delta_2 v_4^2}{2g} + \sum h_f \quad (7)$$

式中  $p_1$ 、 $p_2$ ——进气口和喷头出口处静压强, N/m<sup>2</sup>

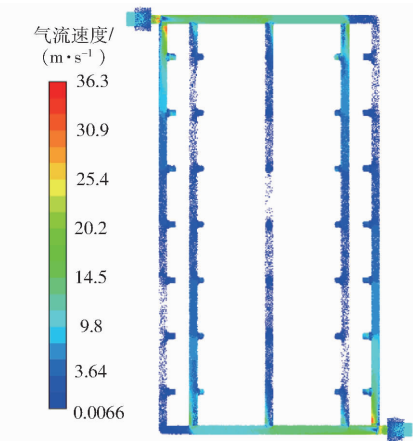
$\delta_1$ 、 $\delta_2$ ——进气口截面与喷头出口截面的动能修正系数,对于湍流取1

$z_1$ 、 $z_2$ ——进气口处和喷头喷射处位置水头, m

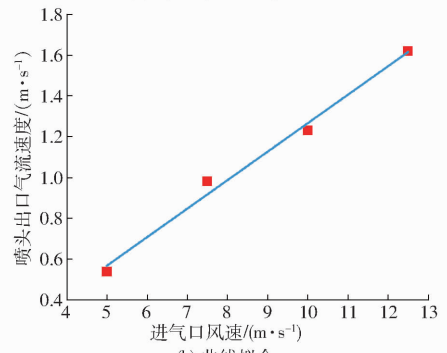
$\rho$ ——空气密度, kg/m<sup>3</sup>

$v_3$ 、 $v_4$ ——进气口处和喷头喷射处气流速度, 其中  $v_4$ 取1.151 m/s

通过Fluent软件,筛孔清堵装置以对角安装离心式鼓风机且加装稳压管的结构形式,设置不同风机风速,分别统计喷头喷射气流速度最小值,利用Origin软件对得到的数据进行曲线拟合<sup>[16-18]</sup>,仿真以及曲线拟合如图5所示。



(a) 筛孔清堵装置仿真图



(b) 曲线拟合

图5 仿真图与统计数据曲线拟合图

Fig. 5 Simulation schematics and statistical data curve fitting diagram

根据导入数据设置拟合方程式为一元一次方程  $y = ax + b$ ,当Reduced Chi-sqr不变时为最佳拟合效果,此时  $a = 0.13992$ ,  $b = -0.1323$ ,标准误差分别为0.0101和0.09276,拟合曲线方程为

$$y = 0.13992x - 0.1323 \quad (8)$$

将理论喷头喷射最小气流速度1.151 m/s代入式(8),并根据式(7)伯努利方程中风机风速与喷头喷射气流速度之间关系,选择风机风速为9.2 m/s。通过仿真验证可得,该风机风速工况下,筛孔清堵装置各喷头喷射气流速度平均值为4.35 m/s,最小值为1.34 m/s,符合筛孔清堵要求。

### 3 膜杂风选机流场仿真分析

将筛孔清堵装置仿真得到各喷头喷射气流速度按照对应位置绘制如图6所示矩阵图,图中红色箭头为风机对应位置。由矩阵图可得,对角方向上各

喷头喷射气流速度大致相等,对于整体而言,90°位置气流管道上的各喷头喷射气流速度小于其他位置喷射气流速度,但各位置气流速度均满足清堵要求,证明结构设计合理。

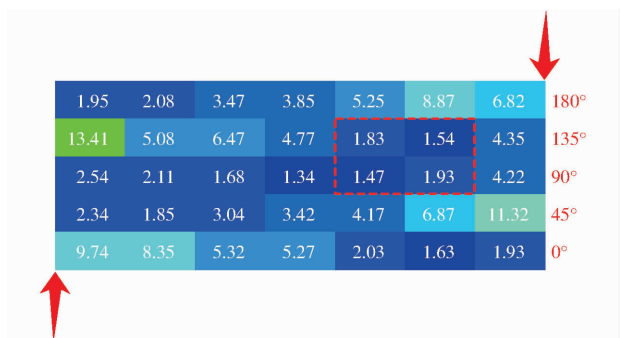
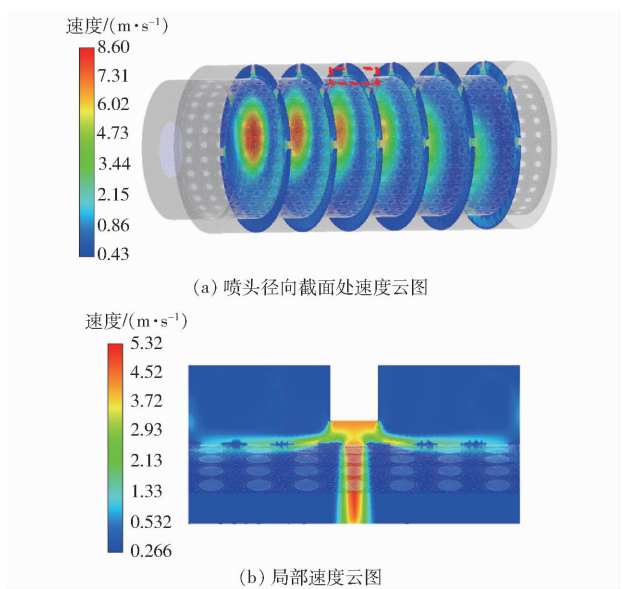


图 6 喷头对应位置喷射气流速度矩阵图

Fig. 6 Matrix diagram of jetting airflow velocity at corresponding position of nozzle

对膜杂风选机以及筛孔清堵装置进行整体仿真试验,根据原膜杂风选机最优工作参数,设置进风口速度为 8.5 m/s、气流角度为 8°、滚筒转速为 26 r/min,按照图 6 中所示气流速度设置各对应位置喷头喷射气流速度,分别导出各喷头截面处速度云图以及局部速度矢量图,如图 7 所示。



(a) 喷头径向截面处速度云图

(b) 局部速度云图

图 7 喷头径向截面处速度云图和局部速度云图

Fig. 7 Velocity nephograms at radial section of nozzle and local velocity nephogram

图 7b 为沿滚筒筛轴向位置截取的一段,目的在于观察喷头喷射气体的扩散效果,测量作用在筛孔处气流速度,判断喷头数量及轴向布置是否合理。图 7b 讨论单个喷头时,喷头正对筛孔处气流速度为 3.72 ~ 5.32 m/s,满足清堵要求;由于气流的扩散,筛孔截面左右两侧第 1 列、第 2 列、第 3 列筛孔处气流速度递减,两侧第 3 列筛孔处气流速度最小,为 1.33 ~ 1.60 m/s,满足清堵要求。故喷头数量及轴

向布置合理,在滚筒筛面上,能够对当前轴向位置所有筛孔提供满足清堵要求速度的气流。

为验证喷头喷射气流对滚筒筛面的覆盖能力,如图 6 红色虚线框所示,对应位置喷头喷射气流速度为图中所示能够框选的最小值,Fluent 软件中,在 4 个喷头中心位置分别设置随滚筒转动监测点以及固定监测点,通过 Monitors 功能<sup>[19]</sup>,导出相应位置速度随时间变化值,利用 Origin 软件绘制如图 8 所示速度随时间变化曲线<sup>[20-21]</sup>。由图 8 可得,仿真开始瞬间,由于流场尚不稳定,两监测点速度均出现大幅度波动;待膜杂风选机内部以及筛孔清堵装置流场稳定后,固定监测点处速度逐渐趋于稳定,随滚筒转动的监测点在一个转动周期中经过无喷头区域,导致该点处速度出现较长时间的波动,当滚筒转速趋于稳定后,监测点经过无喷头区域的时间较短,监测点处速度波动不明显,最终两监测点处速度分别稳定在 1.75、1.45 m/s 左右,大于筛孔清堵要求的 1.151 m/s,满足清堵要求。

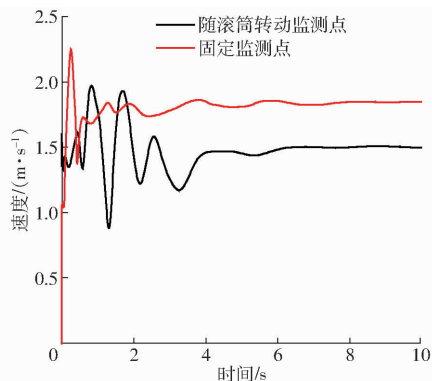


图 8 监测点速度随时间变化曲线

Fig. 8 Curves of monitoring point speed with time

通过对膜杂风选机以及筛孔清堵装置进行整体仿真试验可得,筛孔清堵装置工作过程中,在保证为喷头正对位置筛孔提供满足清堵要求气流的同时,喷头喷射气流对滚筒筛面具有一定的覆盖能力,能够为各个位置的筛孔提供满足清堵要求的气流,证明筛孔清堵装置结构设计、工作参数选择均合理。

## 4 试验

### 4.1 试验设备

为验证安装与未安装筛孔清堵装置对膜杂风选机筛孔堵塞情况的影响,在山东省农业机械科学研究院试制工厂对两种情况分别进行实机试验,对比两者筛孔堵塞情况,实机试验如图 9 所示。

图 9 中包括膜杂风选机、筛孔清堵装置,清选后的残膜以及筛孔堵塞情况。试验仪器与设备包括滚筒筛式膜杂风选机、筛孔清堵装置、手持热敏式风速

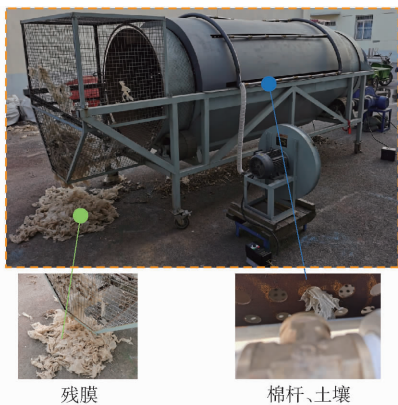


图9 筛孔清堵装置实机试验场景

Fig. 9 Diagram of actual screen hole clearing device

仪、电子秤、高速摄像机等<sup>[3,22-24]</sup>。

## 4.2 试验方案与评价指标

### 4.2.1 试验方案

试验对象为膜杂风选机,试验过程中,除是否安装筛孔清堵装置外,其他结构、工作参数均保持一致。将风选机各工作参数设置为最优,在此工况下,启动装置直到装置内部流场稳定,由喂料口持续投入膜杂混合物,膜杂分离风选机在两种情况下分别运行30 min,通过手持热敏式风速仪(测量范围:0~30 m/s,误差:±1%)确定进气口及各喷头处气流速度,并用高速摄像机记录装置运行30 min时装置内部情况,安装筛孔清堵装置与未安装该装置的膜杂风选机各进行5次重复试验。

### 4.2.2 评价指标

以筛孔堵塞率、膜中含杂率为评价指标,通过对装置运行30 min后装置内部堵塞情况进行统计,得到筛孔堵塞率为

$$Y_1 = \frac{n_2}{n_1} \times 100\% \quad (9)$$

式中  $Y_1$ ——筛孔堵塞率, %

$n_1$ ——滚筒筛筛孔总数, 个

$n_2$ ——堵塞的筛孔数量, 个

膜杂风选机清选的残膜质量与其中的杂质质量比值为膜中含杂率,计算式为

$$Y_2 = \frac{m_2}{m_1} \times 100\% \quad (10)$$

式中  $Y_2$ ——膜中含杂率, %

$m_1$ ——集膜箱中残膜质量, kg

$m_2$ ——集膜箱中杂质质量, kg

### 4.3 试验结果与分析

根据制定的试验方案,通过高速摄像机拍摄画面,对筛孔堵塞以及膜中含杂情况进行分析,求5次试验筛孔堵塞率、膜中含杂率的平均值,试验结果如表2所示。

表2 对比试验结果

Tab. 2 Comparative test results

试验组别	各喷头喷	各喷头喷	筛孔	膜中
	射气流速	射气流速	堵塞	含杂
	度平均值/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	度最小值/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	率/ %	率/ %
仿真试验	4.35	1.34		
安装筛孔清堵装置试验	3.81	1.22	8.28	7.33
未安装筛孔清堵装置试验			24.55	11.97

试验结果表明,在相同工况下整机运行30 min,增加筛孔清堵装置能够明显降低筛孔堵塞情况,且筛孔清堵装置与膜杂风选机工作配合性好、相应速度快,筛孔清堵装置各喷头喷射气流速度平均值为3.81 m/s,气流速度最小值为1.22 m/s,均满足清堵要求,其中8.28%的筛孔发生堵塞,膜中含杂率为7.33%,试验结果与仿真试验相对误差分别为14.2%、9.8%,相较于未安装筛孔清堵装置的膜杂风选机,筛孔堵塞率、膜中含杂率分别降低16.27、4.64个百分点。安装筛孔清堵装置前后残膜产出量分别为1972、1956 g/min,综合考虑膜中含杂率、残膜产出量,说明筛孔清堵装置对膜杂风选机内部流场以及杂质的分离影响较小。装置继续工作一段时间,分别统计运行1、3、5 h后筛孔堵塞情况以及膜中含杂率,结果在误差范围内发生波动,但基本与试验结果一致。表明筛孔清堵装置工作性能稳定,可有效降低膜杂风选机筛孔堵塞率,提高筛分性能及装置可靠性。

综上所述,膜杂风选机中筛孔堵塞对整个装置的清选性能影响较大,不仅膜中含杂率增加,而且大量残膜堵塞在滚筒筛内,无法保证筛分质量。筛孔清堵装置结构合理,工作过程中能有效降低膜杂风选机筛孔堵塞率,从而降低膜中含杂率、提高筛分质量,在一定程度上提高了膜杂风选机筛分性能及机构可靠性。

## 5 结论

(1)设计了一种通过喷头喷射气流扰动筛孔处流场、破坏堵塞物在筛孔处受力平衡的筛孔清堵装置,解决膜杂风选机运行一段时间后筛孔堵塞导致膜中含杂率高的问题。

(2)通过理论分析、计算流体力学仿真以及曲线拟合等方法,分别对筛孔清堵装置的离心式鼓风机安装方案、风机风速进行确定,最终选择对角安装离心式鼓风机且加装稳压管的结构形式,风机风速为9.2 m/s,此时各喷头喷射气流速度平均值为4.35 m/s,最小值为1.34 m/s,符合筛孔清堵要求。

(3)对设计的筛孔清堵装置进行实机试验,试验结果表明:筛孔清堵装置各喷头喷射气流速度平均值为3.81 m/s,气流速度最小值为1.22 m/s,均满足清堵要求,其中8.28%的筛孔发生堵塞,膜中含杂率为7.33%,试验结果与仿真试验相对误差为

14.2%、9.8%,相较于未安装筛孔清堵装置的膜杂风选机,筛孔堵塞率、膜中含杂率分别降低16.27、4.64个百分点,表明安装筛孔清堵装置可有效降低膜杂风选机筛孔堵塞率,提高筛分性能及装置可靠性。

#### 参 考 文 献

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [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 prospect of control technology for residual plastic film pollution in farmland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 1-14. (in Chinese)
- [3] 康建明, 彭强吉, 王士国, 等. 弹齿式残膜回收机捡拾装置改进设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 295-303.  
KANG Jianming, PENG Qiangji, WANG Shiguo, et al. Improved design and experiment on pickup unit of spring-tooth residual plastic film collector[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 295-303. (in Chinese)
- [4] 徐弘博, 胡志超, 吴峰, 等. 网链式花生地残膜回收机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(17): 1-9.  
XU Hongbo, HU Zhichao, WU Feng, et al. Design and experiment of network chain type residual plastic film collector for peanut field[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(17): 1-9. (in Chinese)
- [5] 刘旋峰, 石鑫, 郭兆峰, 等. 滚筒式残膜回收机的性能试验研究[J]. 农业工程学报, 2017, 33(16): 26-31.  
LIU Xuanfeng, SHI Xin, GUO Zhaofeng, et al. Performance test on roller type residual film recycling machine[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(16): 26-31. (in Chinese)
- [6] ENGLISH J E, ROSE H E. A new approach to the theoretical treatment of the mechanics of sieving and screening[J]. Filtration and Separation, 1974(3): 195-203.
- [7] ASTROM M S. Trantant velocity of a crushed rock material bed on a screen[J]. Minerals Engineering, 2002, 15(1): 7-17.
- [8] BELLOCQ B, RUIZ T, DELAPLACE G. Screening efficiency and rolling effects of a rotating screen drum used to process wet soft agglomerates[J]. Journal of Food Engineering, 2017, 195: 235-246.
- [9] 杨会民, 马华麟. 聚氨酯弹性体筛板在圆振动筛的应用试验[J]. 金属矿山, 2003(1): 51-53.  
YANG Huimin, MA Hualin. Test on the application of polyurethane elastomer screen deck in circular vibrating screen[J]. Metal Mine, 2003(1): 51-53. (in Chinese)
- [10] 李耀明, 马征, 徐立章. 油菜联合收获机筛面粘附物摩擦特性[J]. 农业机械学报, 2010, 41(12): 54-57.  
LI Yaoming, MA Zheng, XU Lizhang. Tribological characteristics of adhesive materials on cleaning sieve of rape combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12): 54-57. (in Chinese)
- [11] 李耀明, 马征, 徐立章. 油菜混合物与仿生筛面基体间的黏附特性[J]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 75-78.  
LI Yaoming, MA Zheng, XU Lizhang. Adhesion property between rape mixture and bionic screen matrix[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 75-78. (in Chinese)
- [12] 程超, 付君, 陈志, 等. 玉米籽粒收获机清选筛堵塞规律及脱附试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2021, 51(2): 761-771.  
CHENG Chao, FU Jun, CHEN Zhi, et al. Sieve blocking laws and stripping test of corn grain harvester[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2021, 51(2): 761-771. (in Chinese)
- [13] 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 on pneumatic cylinder sieve film hybrid separator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 126-135. (in Chinese)
- [14] 朱德兰, 王蓉, 阮汉铖. Y型网式过滤器堵塞过程对有机肥浓度的响应研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(7): 332-337.  
ZHU Delan, WANG Rong, RUAN Hancheng. Response of process of Y-net filter clogging to organic fertilizer concentration[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 332-337. (in Chinese)
- [15] 韩占忠, 王敬, 兰小平. FLUENT——流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2010.
- [16] 王志超, 李仙岳, 史海滨, 等. 含残膜土壤水分特征曲线模型构建[J]. 农业工程学报, 2016, 32(14): 103-109.  
WANG Zhichao, LI Xianyue, SHI Haibin, et al. Water characteristic curve model for soil with residual plastic film[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(14): 103-109. (in Chinese)
- [17] 马莉, 王全九. 不同灌溉定额下春小麦光合光响应特征研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(6): 271-277.  
MA Li, WANG Quanjiu. Photosynthetic and light response characteristics of spring wheat under different irrigation schedules[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 271-277. (in Chinese)
- [18] QI Wei, WANG Ce, ZHANG Zhanyu, et al. Experimental investigation on the impact of drying-wetting cycles on the shrink-swell behavior of clay loam in farmland[J]. Agriculture, 2022, 12(2): 245.
- [19] 袁建平, 张克玉, 司乔瑞, 等. 基于非均相流模型的离心泵气液两相流动数值研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(1): 89-95.  
YUAN Jianping, ZHANG Keyu, SI Qiaorui, et al. Numerical investigation of gas-liquid two-phase flow in centrifugal pumps based on inhomogeneous model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1): 89-95. (in Chinese)
- [20] 赖庆辉, 高筱钧, 张智泓. 三七气吸滚筒式排种器充种性能模拟与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 27-37.

- LAI Qinghui, GAO Xiaojun, ZHANG Zhihong. Simulation and experiment of seed-filling performance of pneumatic cylinder seed-metering device for *Panax notoginseng* [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 27–37. (in Chinese)
- [21] 王相友, 王荣铭, 李学强, 等. 马铃薯通风储藏库加湿系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(7): 358–366. WANG Xiangyou, WANG Rongming, LI Xueqiang, et al. Design and test of humidification system for potato ventilated storage [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 358–366. (in Chinese)
- [22] 李成松, 坎杂, 谭洪洋, 等. 加工番茄果秧分离装置运动过程分析[J]. 农业机械学报, 2012, 43(4): 66–69. LI Chengsong, KAN Za, TAN Hongyang, et al. Movement process analysis on processing tomato fruit separation device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 66–69. (in Chinese)
- [23] 谢胜仕, 王春光, 邓伟刚, 等. 摆动分离筛薯土分离机理分析与参数优化试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 156–164. XIE Shengshi, WANG Chunguang, DENG Weigang, et al. Separating mechanism analysis and parameter optimization experiment of swing separation sieve for potato and soil mixture [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 156–164. (in Chinese)
- [24] 王立军, 崔友强, 郑招辉, 等. 振动筛不同运动形式对颗粒群筛分的影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50(6): 119–129. WANG Lijun, CUI Youqiang, ZHENG Zhaohui, et al. Effect of different motion forms of vibrating screen on screening of particle group [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 119–129. (in Chinese)

(上接第 82 页)

- [19] 吕金庆, 王英博, 李紫辉, 等. 加装导流板的舀勺式马铃薯播种机排种器性能分析与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(9): 19–28. LÜ Jinqing, WANG Yingbo, LI Zihui, et al. Performance analysis and experience of cup-belt type potato seed-metering device with flow deflector [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(9): 19–28. (in Chinese)
- [20] 鹿瑶, 吕钊钦, 鹿英哲, 等. 链式玉米精量播种机的设计与试验[J]. 农机化研究, 2019, 41(2): 145–149. LU Yao, LÜ Zhaoqin, LU Yingzhe, et al. Design and experiment of chain corn precision seeder [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(2): 145–149. (in Chinese)
- [21] 段宏兵, 陈志鹏, 宋波涛, 等. 三角链半杯勺式丘陵山区马铃薯精密播种机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 96–104. DUAN Hongbing, CHEN Zhipeng, SONG Botao, et al. Design and experiment of triangular chain half cup spoon-shaped potato precision planter in hilly mountainous [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 96–104. (in Chinese)
- [22] 曹秀龙. 三七压穴精密播种机设计与试验[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2018. CAO Xiulong. Design and experiment of precision feeding machine for hill-drop planter for panax notoginseng [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [23] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(上册)[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- [24] WANG Z, WEI Z, GANG C. Studies on double-disc ditching examination engineering research based on virtual instrumentation [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(3): 104–106.
- [25] 卢彩云, 李洪文, 何进, 等. 小麦免耕播种机浮动支撑式防堵装置[J]. 农业机械学报, 2013, 44(12): 52–55. LÜ Caiyun, LI Hongwen, HE Jin, et al. Floated support anti-blocking device of wheat no-till seeder [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12): 52–55. (in Chinese)
- [26] 赵艳忠, 王运兴, 禹栋栋. 双圆盘开沟器结构参数对作业性能影响研究[J]. 农机化研究, 2018, 40(11): 44–50. ZHAO Yanzhong, WANG Yunxing, YU Dongdong. Study on the effect of double discs opener structural parameters on the working performance [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(11): 44–50. (in Chinese)
- [27] 冯慧敏, 高娜娜, 孟志军, 等. 基于自动导航的小麦精准对行深施追肥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 60–67. FENG Huimin, GAO Nana, MENG Zhijun, et al. Design and experiment of deep fertilizer applicator based on autonomous navigation for precise row-following [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 60–67. (in Chinese)
- [28] 游兆延, 吴惠昌, 彭宝良, 等. 机收水稻留茬地紫云英双圆盘开沟撒播组合作业机设计[J]. 农业工程学报, 2019, 35(6): 26–36. YOU Zhaoyan, WU Huichang, PENG Baoliang, et al. Design of double disc ditching and sowing combined working machine of *Astragalus smicus* for machine-harvested rice stubble field [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(6): 26–36. (in Chinese)