doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.04.025

扰流式碎后膜杂分离装置数值模拟与试验

冯　震[1,2]　坎　杂[1,3]　吴贵德[4]　彭慧杰[1,2]　蒙贺伟[1,3]　张炳成[1,2]

(1.石河子大学机械电气工程学院,石河子 832003;2.农业农村部西北农业装备重点实验室,石河子 832003;
3.现代农业机械兵团重点实验室,石河子 832003;4.新疆德农科技有限公司,双河 833408)

摘要:针对机收膜杂破碎后清选过程中存在除杂效率低和清选成本高等问题,提出了先扰流扩散再风重分离的膜杂分离方法,设计了一种扰流式碎后膜杂分离装置。通过对残膜扰流扩散、膜杂风重分离过程进行理论分析,确定了影响分离性能的关键因素为进气风速、扰流角度、扩散室出口高度和输送速度。构建了残膜、棉秸秆及土杂离散元模型,运用 EDEM - Fluent 耦合仿真技术对膜杂分离过程进行了数值模拟,揭示了分离装置内碎后膜杂物料的运动规律和分布情况,并为分离装置结构参数与工作参数范围提供了依据。以进气风速、扰流角度和扩散室出口高度为主要影响因素,以除杂率和风选损失率(漏膜率)为评价指标,对试制的扰流式碎后膜杂分离装置开展了三因素三水平试验,获取了不同影响因素对评价指标的影响规律,确定优化参数组合为:扰流角度 48°、进气风速 5.8 m/s、扩散室出口高度 178.5 mm,此时除杂率为 80.26%、漏膜率为 12.35%,能够满足后续资源化利用工艺要求。研究结果可为风选除杂技术在膜杂分离领域的研究应用提供参考。

关键词:扰流扩散;碎后膜杂分离装置;风重分离;数值模拟

中图分类号:S223.5　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)04-0257-11　　**OSID**:

Numerical Simulation and Experiment of Turbulent Flow Membrane Debris Separation Device

FENG Zhen[1,2]　KAN Za[1,3]　WU Guide[4]　PENG Huijie[1,2]　MENG Hewei[1,3]　ZHANG Bingcheng[1,2]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi*, 832003, *China*
2. *Key Laboratory of Northwest Agricultural Equipment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shihezi* 832003, *China*
3. *Xinjiang Production and Construction Corps Key Laboratory of Modern Agricultural Machinery, Shihezi* 832003, *China*
4. *Xingjiang Denong Technology Co., Ltd., Shuanghe*, 833408, *China*)

Abstract: In order to solve the problems of low impurity removal efficiency and high cleaning cost in the process of cleaning after machine harvesting of membrane impurities, a membrane impurity separation method was proposed, which was first turbulent diffusion and then air gravity separation, and a perturbative membrane impurity separation device was designed. Through the theoretical analysis of the process of residual membrane turbulent diffusion and membrane miscellaneous air separation, it was determined that the key factors affecting the separation performance were the inlet air velocity, turbulence angle, diffusion chamber outlet height and conveying speed. Based on the discrete element model of residual film, cotton straw and soil miscellaneous materials, the EDEM - Fluent coupling simulation was used to numerically simulate the separation process of membrane impurities, which revealed the movement law and distribution of membrane miscellaneous materials after crushing in the separation device, and provided a basis for the structural parameters and working parameters of the separation device. Experimental tests with the prototype device, using impurity removal rate and winnowing loss rate as evaluation indices, determined the influence of different factors on performance. Optimal parameters were found to be: a turbulence angle of 48°, inlet air velocity of 5.8 m/s, and diffusion chamber outlet height of 178.5 mm, achieving an 80.26% impurity removal rate and a 12.35% film leakage rate.

收稿日期:2024-10-19　修回日期:2024-12-12

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFD1701900)、国家自然科学基金项目(52360022)、兵团科技计划项目(2024YD014、2023ZD057)、兵团自然科学支持计划项目(2024DA016)和"天池英才"引进计划项目

作者简介:冯震(1998—),男,硕士生,主要从事碎后膜杂分离装备模拟仿真研究,E-mail:Zhens598@163.com

通信作者:张炳成(1992—),男,副教授,博士,主要从事机收膜杂资源化利用技术装备研究,E-mail:zbc0403@163.com

These results can meet subsequent resource utilization requirements and offer valuable guidance for advancing winnowing impurity removal technology in mulch film separation.

Key words: turbulent breakup; post-fragment membrane impurities separation device; air density separation; numerical simulation

0 引言

地膜覆盖技术作为现代农业提升棉花产量和品质的重要手段[1],其广泛应用虽显著提升了农业生产效益,但也引发了严重的环境污染问题[2]。残膜是可利用资源,但机械化回收过程易裹绕棉秸秆及土杂[3],形成复杂的膜杂捆料[4],增加了膜杂资源化利用难度,并可能会引发露天焚烧和就地填埋等问题[5]。因此,膜杂资源化利用前的膜杂初清理过程逐渐被重视[6]。目前,膜杂初清理过程主要包括膜杂捆料破碎和碎后膜杂分离环节,其中分离作为膜杂初清理中的关键环节,对提高残膜再生产品品质及拓展残膜资源利用途径具有决定性作用。现有膜杂分离装备通常采用水洗设施或滚筒筛进行膜杂分离,存在堵塞筛孔、除杂效率低、成本高以及造成水资源污染等问题[7-9],极大地限制了残膜再生利用。因此,迫切需要开发一种更为高效、经济且环保的膜杂分离设备,以突破当前技术瓶颈,推进残膜污染综合治理进程。

风选除杂是农业物料清选的常见手段[10],随着计算机辅助数值计算技术的发展,仿真计算被广泛应用于分析物料在气流场中的运动规律[11-12]。解臣硕等[13]采用 DEM - CFD 气固两相流耦合仿真证明了滚筒筛式膜杂分离装置流场分析方法的可行性。李凯凯[14]构建了不同物料的 CFD - DPM 耦合模型,对等效颗粒在试验台的运动进行了数值模拟计算,并通过试验验证了模拟结果。靳伟等[15]提出了一种基于 EDEM - Fluent 耦合的残膜与杂质悬浮分离方法,阐述了 3 种残膜与棉秸秆、土杂混合物悬浮分离速度测定方法。以上为开发高效、精准的膜杂物料清选技术提供了理论支撑和实践指导,凸显了数值模拟作为解决复杂农业工程问题的有效解决方法。

本文以碎后机收膜杂物料为研究对象,提出先扰流扩散再风重分离膜杂的方法,设计扰流式碎后膜杂分离装置,分析残膜扰流扩散、膜杂风重分离过程物料力学特性,获取影响分离指标的关键因素,采用 EDEM - Fluent 耦合方法对膜杂分离过程进行数值模拟,以期揭示膜杂物料在气流场中的运动规律与分布情况,同时确定装置结构参数、工作参数范围。在此基础上,开展正交试验,确定优化参数组合,并进行验证试验,以期为风选除杂技术在碎后膜杂分离领域的研究及应用提供参考。

1 结构与工作原理

1.1 整机结构

扰流式碎后膜杂分离装置结构如图 1 所示,主要由吸料口、送料风机、输送管道、扰流板、输送带、扩散室、聚拢挡板、高度调节板、风重分离部件、杂质收集箱和出膜口组成。整机参数如表 1 所示。

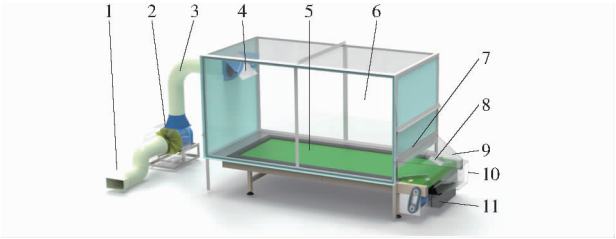

图 1 整机结构示意图

Fig. 1 Schematic of overall structure

1. 吸料口 2. 送料风机 3. 输送管道 4. 扰流板 5. 输送带 6. 扩散室 7. 高度调节板 8. 聚拢挡板 9. 风重分离部件 10. 出膜口 11. 杂质收集箱

表 1 设备主要参数

Tab. 1 Main parameters of equipment

参数	数值
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	4 200×1 700×1 660
整机质量/kg	497
风机转速/($r\cdot min^{-1}$)	0~2 930
风机通量/($m^3\cdot h^{-1}$)	1 762~4 809
配套功率/kW	11.5
管道口直径/mm	200

1.2 工作原理

扰流式碎后膜杂分离装置采用先扩散、再分离的技术方案,将膜杂分离过程分为 2 个阶段。第 1 阶段采用送料风机将破碎后的膜杂物料送入扩散室,在扰流板作用下将膜杂物料中残膜脱离并随气流扩散到整个密封扩散室中。第 2 阶段采用风重分离部件将残膜与杂质分离,比重较大棉秸秆及土杂落至输送带后被带入杂质收集箱,比重较小残膜受风力作用从出膜口排至集料袋中,从而完成膜杂分离过程。

2 分离过程分析

破碎后的膜杂物料呈现蓬松、松散的团状形态,

经扇叶的高速旋转打散后被气流输送至扩散室中，随后在扰流板作用下，残膜从膜杂物料中脱离。在此过程中，由于扰流板处气流速度较高，其中棉秸秆与土石杂质受气流作用影响小，且在与扰流板发生弹性碰撞后快速掉落，而残膜质地柔软且受气流影响大，会沿扰流板方向并随气流继续向前运动完成剥离。为明确影响残膜扩散运动的因素及其规律，对膜杂物料与扰流板间的互作特性进行研究，构建残膜扩散过程的力学模型，获取影响残膜扩散的因素。同时，分析棉秸秆及土杂在风重分离部件作用下的受力特性，获取影响杂质分离的因素。

2.1　残膜等效模型构建

由于残膜质地柔软且易变形，导致流场中残膜形状多变，为便于分析其受力特性，同时为实际残膜在气流场中的运动规律提供参照，采用等效粒径法建立残膜等效球形颗粒模型，将破碎后残膜物料尺度转换为球形当量直径[16]，计算式为

$$d_s = 1.24V^{\frac{1}{3}} \tag{1}$$

其中

$$V = \delta S$$

式中　V——残膜体积，mm^3

d_s——残膜等效颗粒当量直径，mm

δ——残膜厚度，mm

S——残膜展开面积，mm^2

残膜在气流场中的运动轨迹主要受浮力、气流曳力和自身重力影响，由于浮力与自身重力产生的加速度均为常量，因此仅需针对气流曳力加速度进行等效分析，为

$$m_r a = \frac{C\rho A_q v^2}{2} \tag{2}$$

式中　m_r——残膜质量，kg

a——残膜加速度，m/s^2

C——气流场空气阻力系数

ρ——空气密度，g/cm^3

A_q——残膜迎风面积，mm^2

v——残膜与气流相对速度，m/s

残膜在气流场中迎风面积与实际展开面积有差异，因此引入形变系数，则

$$A_q = bS \tag{3}$$

式中　b——形变系数

令残膜与残膜等效颗粒所受气流曳力加速度相等，可得

$$a = \frac{C\rho bSv^2}{2m_r} = \frac{C\rho A_s v^2}{2m_s} \tag{4}$$

式中　A_s——残膜等效球形颗粒迎风面积，mm^2

m_s——残膜等效颗粒质量，kg

代入等效球形颗粒质量与面积公式得

$$\rho_s = \frac{3\delta\rho_r}{2d_s b} \tag{5}$$

式中　ρ_r——残膜密度，g/cm^3

ρ_s——残膜等效球形颗粒密度，g/cm^3

在悬浮及分离试验，残膜均受重力、浮力和气流曳力，受力类型相同，此时处于悬浮状态的残膜受力平衡，得

$$\delta S\rho_r g = \frac{C_f bS\rho v^2}{2} - \delta S\rho g \tag{6}$$

式中　C_f——悬浮试验台中气流阻力系数

g——重力加速度，m/s^2

整理后可得

$$b = \frac{2\delta(\rho_r - \rho)g}{C_f \rho v^2} \tag{7}$$

将式(7)代入式(5)整理后得

$$\rho_s = \frac{3C_f \rho_r \rho v^2}{4d_s(\rho_r - \rho)g} \tag{8}$$

其中 C_f取决于悬浮试验台内流场雷诺数，计算式为

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \tag{9}$$

式中　L——特征长度，mm

μ——动力粘度，Pa·s

由此获得残膜等效颗粒模型密度与等效粒径之间的关系。

2.2　残膜扩散过程受力分析

送料风机输送的残膜在气力作用下与扰流板发生滑动摩擦。取残膜等效颗粒在扩散室进气口点 A 位置时进行分析(图 2)，受力为

$$\begin{cases} F_z = C\dfrac{\pi}{4}d_s\rho\dfrac{v^2}{2} \\ F_f = \dfrac{1}{6}\pi d_s^3\rho g \\ G = m_s g \\ F_n = \dfrac{1}{6}\pi d_s^3\rho g\sin\alpha \\ F_m = \mu_1\dfrac{1}{6}\pi d_s^3\rho g\sin\alpha \end{cases} \tag{10}$$

其中

$$m_s = \frac{1}{6}\pi d_s^3\rho_s$$

式中　F_z——气流曳力，N

F_f——空气浮力，N

G——重力，N

F_n——支持力，N

F_m——摩擦力，N

μ_1——残膜与壁面滑动摩擦因数

α——扰流板与竖直壁面夹角，(°)

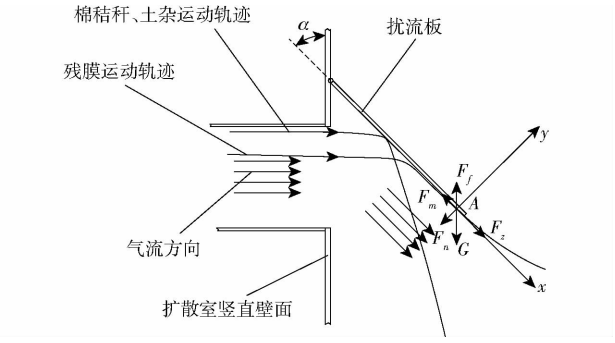

图 2 残膜受力分析

Fig. 2 Force analysis diagram of residual film

结合式(10),当量直径为 d_s 的残膜所受合力在沿 x 轴及 y 轴方向分力 F_x、F_y 为

$$F_x = C\frac{\pi}{4}d_s\rho\frac{v^2}{2} - \mu_1\frac{\pi}{6}d_s^3\rho g\sin\alpha + \frac{\pi}{6}d_s^3 g\cos\alpha(\rho_s - \rho) \tag{11}$$

$$F_y = \frac{\pi}{6}d_s^3\rho_s g\sin\alpha \tag{12}$$

由式(11)、(12)可知,残膜在扰流板点 A 处所受合力主要与气流场流速、扰流板与竖直壁面夹角(以下简称扰流角度)有关,气流场流速受进气口风速(以下简称进气风速)控制,可确定影响残膜扩散过程的主要因素为进气风速、扰流角度。

2.3 杂质分离过程动力学分析

掉落在输送带上的棉秸秆和土杂经过聚拢挡板汇聚在输送带中间部位,经过输送带抛送后落在辅助落料板上,并滑落至杂质收集箱。此时,残膜受气流裹挟经输送带上方,并沿风重分离部件上半部运动至出膜口处。在该过程中残膜主要受气流曳力、自身重力和空气浮力影响,残膜等效颗粒和棉秸秆土杂所受力如图 3 所示。

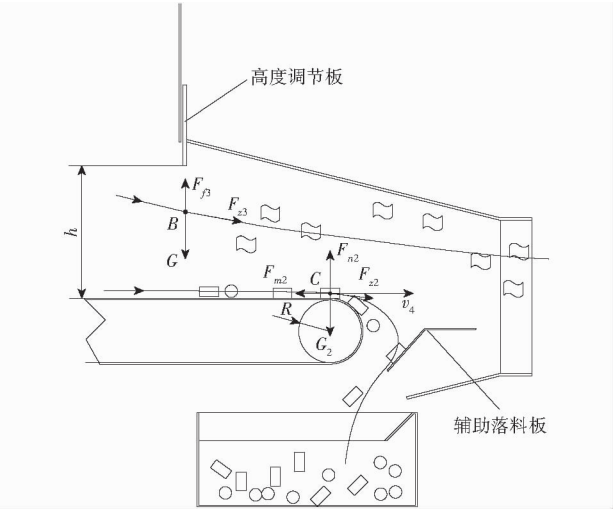

图 3 膜杂物料受力分析

Fig. 3 Force analysis diagram of film miscellaneous materials

针对残膜在点 B 受力进行分析,可得

$$\begin{cases} m_s a_1 = F_{z3} + F_{f3} + G \\ F_{z3} = C\dfrac{\pi}{4}d_s\rho\dfrac{v_3^2}{2} \end{cases} \tag{13}$$

式中 a_1——残膜加速度,m/s^2

F_{z3}——气流曳力,N

F_{f3}——空气浮力,N

v_3——扩散室出口所在截面平均风速,m/s

此处气流曳力取决于残膜所处流场风速,由于整个扩散室为封闭方形腔体,而其进气口为圆形,通过调整高度调节板可调节点 B 处残膜扩散室出口高度,用扩散室出口所在截面平均风速代替此处流场风速,可得

$$\begin{cases} S_2 v_2 = S_3 v_3 \\ S_3 = lh \end{cases} \tag{14}$$

式中 S_2——进气口面积,mm^2

v_2——进气风速,m/s

S_3——扩散室出口面积,mm^2

l——扩散室出口长度,mm

h——扩散室出口高度,mm

由式(14)可得,点 B 处残膜所在流场平均风速为

$$v_3 = \frac{S_2 v_2}{lh} \tag{15}$$

针对棉秸秆和土杂在输送带作用下运动至点 C 时的速度及受力进行分析,此时 2 种物料主要受力类型相同,其表达式为

$$\begin{cases} m_z a_2 = F_{z2} + F_{n2} + F_{m2} + G_2 \\ v_4 = \dfrac{2\pi Rn}{60} \end{cases} \tag{16}$$

式中 F_{z2}——棉秸秆和土杂所受气流曳力,N

F_{n2}——棉秸秆和土杂所受支持力,N

F_{m2}——棉秸秆和土杂所受摩擦力,N

G_2——棉秸秆和土杂自身重力,N

v_4——棉秸秆和土杂脱离输送带速度,m/s

R——输送带轴半径,mm

a_2——棉秸秆和土杂加速度,m/s^2

n——输送带电机转速,r/min

残膜出料时受力形式与残膜在点 B 时相同,由式(13)、(14)可知,残膜加速度受气流曳力影响较大,气流曳力随扩散室出口所在截面平均风速变化而改变;由式(14)可得扩散室出口所在截面平均风速取决于进气口面积、进气风速、扩散室出口面积,故影响残膜出料时加速度的因素包含扩散室高度。

3 数值模拟

碎后机收膜杂物料中残膜、棉秸秆和土杂在扩

散和分离过程中的分布状态及运动轨迹较复杂，为气-固两相流动系统。传统力学计算方法无法对复杂颗粒场进行准确分析，而 EDEM－Fluent 耦合分析可对 3 种颗粒在装置内的运动状态进行模拟，可为分离装置研究提供依据。

3.1　碎后膜杂物料基本成分与尺寸参数测定

试验材料来源于新疆维吾尔自治区塔城地区沙湾市棉田的膜杂捆料，采样时间为 2023 年 10 月中旬。采用膜杂捆料破碎机对膜杂捆料破碎并从中随机抽样 5 次，且每次用 ACS－30 型电子秤取样 5 kg。采用人工方式对抽样材料进行分拣并称量，获得残膜、棉秸秆、土杂等成分质量占比。同时，再从分选好的物料中随机选取残膜、棉秸秆、土杂样本各 50 个，采用游标卡尺等工具分别测量样本平均尺寸参数。测量结果表明：残膜长×宽×厚为 53.3 mm×31.5 mm×0.010 mm、棉秸秆长×直径为 39.2 mm×7.9 mm、土杂长×宽×高为 7.6 mm×6.3 mm×8.1 mm。利用 WKT－120A 型电子密度测量仪测量各样本密度，并选用 WXS－1 型气吸式悬浮速度测定试验台测量各成分物料悬浮速度[17－19]，所得数据如表 2 所示。

表 2　碎后膜杂基本成分与物理特性

Tab. 2　Basic physical properties of various types of particles

参数	残膜	棉秸秆	土杂
质量占比/%	16.0	32.2	51.8
悬浮速度/(m·s^{-1})	1.5～3.4	7.5～9.6	9.2～12.7
密度/(kg·m^{-3})	220～260	1 060～1 280	1 430～2 240

3.2　颗粒模型构建

将试验所得残膜平均尺寸代入式(1)计算出残膜等效球形直径 d_s 为 3.15 mm，空气密度 ρ 取 1.25 kg/m^3，动力粘度 μ 为 1.8×10^{-5} Pa·s，根据悬浮试验台管径可知特征长度 L 为 0.3 m，代入式(9)求得 Re 为 3×10^4～7×10^4，流动状态为湍流，C_f 取 0.44[20]。残膜实际密度取均值 240 kg/m^3。残膜悬浮速度取上限 3.4 m/s，根据式(8)求得残膜等效球形颗粒密度 ρ_s 为 0.16 kg/m^3。在 EDEM 软件中设置参数，构建残膜、棉秸秆、土杂离散元模型，其中残膜颗粒等效粒径为 3.2 mm(图 4a)，棉秸秆采用堆砌法构建平均尺寸(长×直径)为 39.2 mm×7.9 mm 的圆柱形颗粒(图 4b)，土杂为最大粒径 8 mm 椭圆形颗粒[21－22](图 4c)，基于文献[23－26]确定仿真参数(表 3)。

3.3　EDEM－Fluent 耦合仿真试验方法

采用Solidworks软件对扰流式碎后膜杂分离装置进行三维建模，采用 Space Claim 软件提取流场并建立流场模型，设置速度入口和压力出口，采用 ICEM 进行网格划分，网格类型为多面体结构，其网格数为 541 984，节点数为 2 773 234。最后将划分好的网格模型导入 Fluent 软件(图 4d)。由于扩散室内流场类型为湍流，因此采用 RNG k－epsilon 湍流模型，求解算法采用 Phase Coupled Simple，迭代次数设为 2 000，湍流强度设为 6%，压力梯度采用 Presto 格式，进行装置内部流场仿真[26]，流场计算结果导出为. cgns 格式文件。将流场仿真结果导入 EDEM 软件进行耦合仿真(图 4e)，分别设置进气风速 v_i、扰流角度 β、扩散室出口高度 h_0、输送带速度 v_s 进行试验。试验参数标记如图 5 所示。

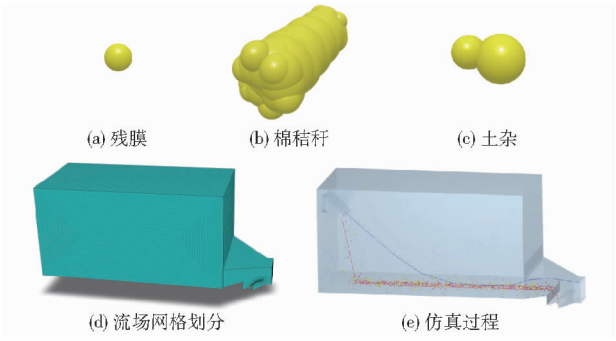

图 4　离散元模型与网格划分

Fig. 4　Discrete element model and meshing

表 3　仿真颗粒基本参数

Tab. 3　Basic physical properties of various types of particles

材料类别	泊松比	剪切模量/Pa	密度/(kg·m^{-3})
残膜	0.39～0.44	5.4×10^8～8.7×10^8	0.16(等效)
棉秆	0.35～0.38	6.0×10^8～2.1×10^9	1.28×10^3
土杂	0.15～0.44	1.2×10^5～5.1×10^6	2.24×10^3
接触类别	**静摩擦因数**	**动摩擦因数**	**碰撞恢复系数**
残膜-PVC	0.52	0.42	0.86
土杂-PVC	0.35	0.26	0.31
棉秆-PVC	0.43	0.31	0.36
棉秆-棉秆	0.48	0.15	0.32
土杂-土杂	0.43	0.32	0.21

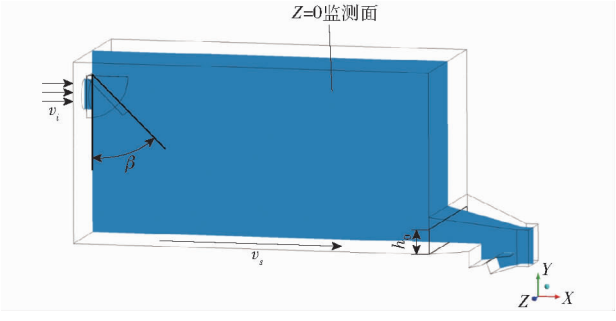

图 5　参数标记示意图

Fig. 5　Schematic of parameters

3.4 单因素仿真试验

在扩散室进气口处添加颗粒工厂，物料质量占比为残膜 16.0%、秸秆 32.2%、土杂 51.8%，喂入量设为 150 kg/h。EDEM 耦合仿真设置迭代时间步长为 4.3×10^{-6} s，计算总时长为 20 s。调节膜杂分离装置各试验因素至合理区间，开展单因素仿真试验，分析试验结果并确定结构及工作参数范围。

为方便统计结果，选取除杂率与残膜风选损失率（以下简称漏膜率）衡量膜杂分离效果。定义除杂率为试验前碎后膜杂物料中杂质（棉秸秆和土杂）质量与试验后从出膜口处分离出的杂质质量差值占试验前碎后膜杂物料中杂质质量百分比；漏膜率为试验前碎后膜杂物料中残膜质量与试验后杂质收集箱中的残膜质量差值占试验前碎后膜杂物料中残膜质量百分比。

3.4.1 扰流角度

设置进气风速为 8 m/s、输送带速度为 0.18 m/s、扩散室出口高度为 180 mm，扰流角度设 30°、45°、60°、75°、90°共 5 个水平进行耦合试验，仿真效果如图 6 所示，其中蓝色代表残膜、黄色代表棉秸秆、红色代表土杂。

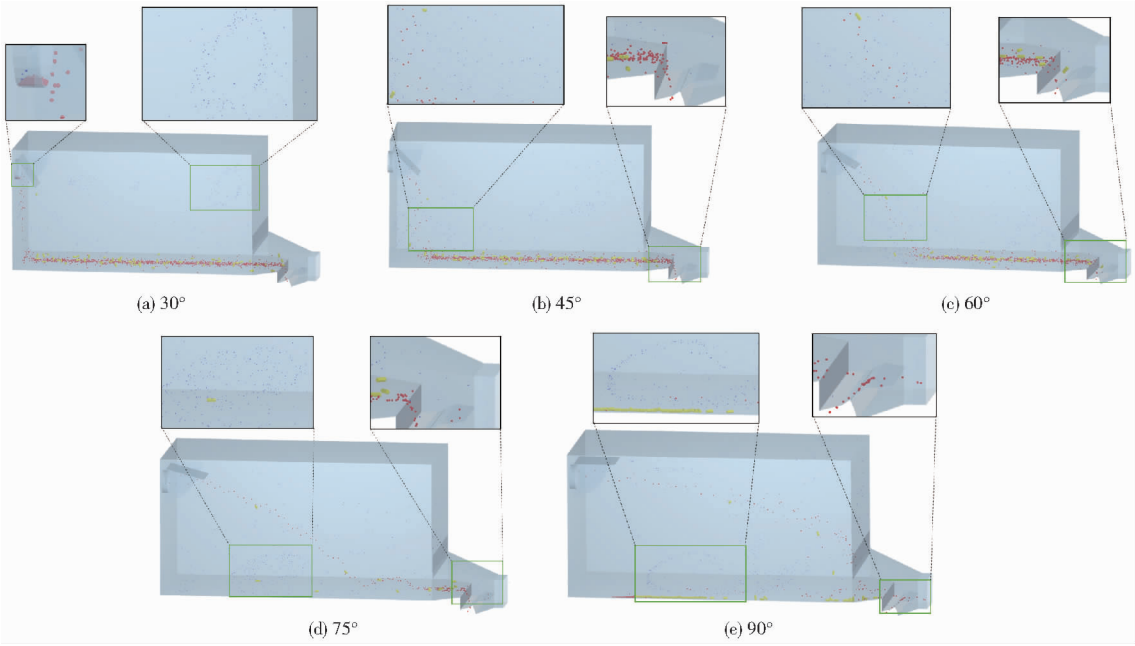

图 6 不同扰流角度耦合仿真试验效果

Fig. 6 Coupling simulation test effects of different turbulence angles

由图 6a 可知，当扰流角度为 30°时，膜杂物料与扰流板碰撞面积增大，一部分土杂、棉秸秆在碰撞后反弹至进气口处的管道中，出现一定堵塞；由图 6d、6e 可知，当扰流角度为 75°和 90°时，棉秸秆和土杂与扰流板碰撞面积减小，在气力作用下落点位置靠近扩散室出口，部分棉秸秆与土杂堆积在辅助落料板上，一部分土杂从出膜口飞出，除杂效果不理想；由图 6b、6c 可知，当扰流角度为 45°和 60°时，棉秸秆与土杂运动轨迹呈现明显抛物线趋势，且棉秸秆与土杂掉落在输送带时弹跳较小，残膜颗粒在扩散室内充分扩散，分布均匀，残膜能稳定从出膜口飞出。单因素耦合仿真结果如图 7 所示，由图 7a 确定扰流角度为 45°~60°较合理。

3.4.2 进气风速

固定扰流角度为 60°、输送带速度为 0.18 m/s 和扩散室出口高度为 180 mm 进行试验。由图 7b 可知，进气风速越大，从出膜口飞出土杂、棉秸秆越多，进气风速越小，从落杂口掉出残膜越多，综合考虑除

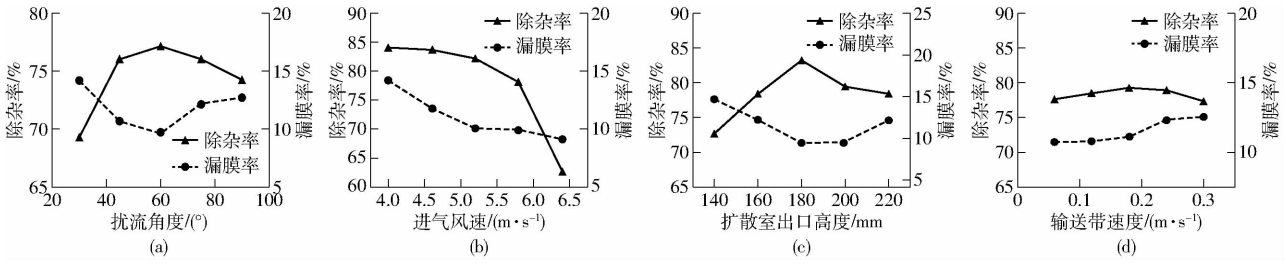

图 7 单因素试验结果

Fig. 7 Results of univariate test

杂效果与损失率，确定进气风速为 5.2 ~ 6.4 m/s。

3.4.3　扩散室出口高度

固定进气风速为 8 m/s、扰流角度为 60°和输送带速度为 0.18 m/s，调整扩散室出口高度进行试验。由图 7c 可知，扩散室出口高度越大，损失残膜越多，扩散室出口高度越小，除杂率变小并逐渐趋于稳定，确定较优扩散室出口高度为 160 ~ 200 mm。

3.4.4　输送速度

固定进气风速为 8 m/s、扰流角度为 60°和扩散室出口高度为 180 mm 进行试验，调整输送带速度进行试验，测得输送带速度改变对除杂率及漏膜率影响不显著，仿真结果如图 7d 所示，确定较合适的输送带速度为 0.18 m/s。

3.5　结果与分析

扩散室内气流分布决定残膜颗粒的运动状态，为对比不同扰流角度的区域流场分布特性，选取 $Z=0$ mm 处流场监测面（图 5）的速度流场进行分析，监测面时刻 t 速度云图如图 8 所示。

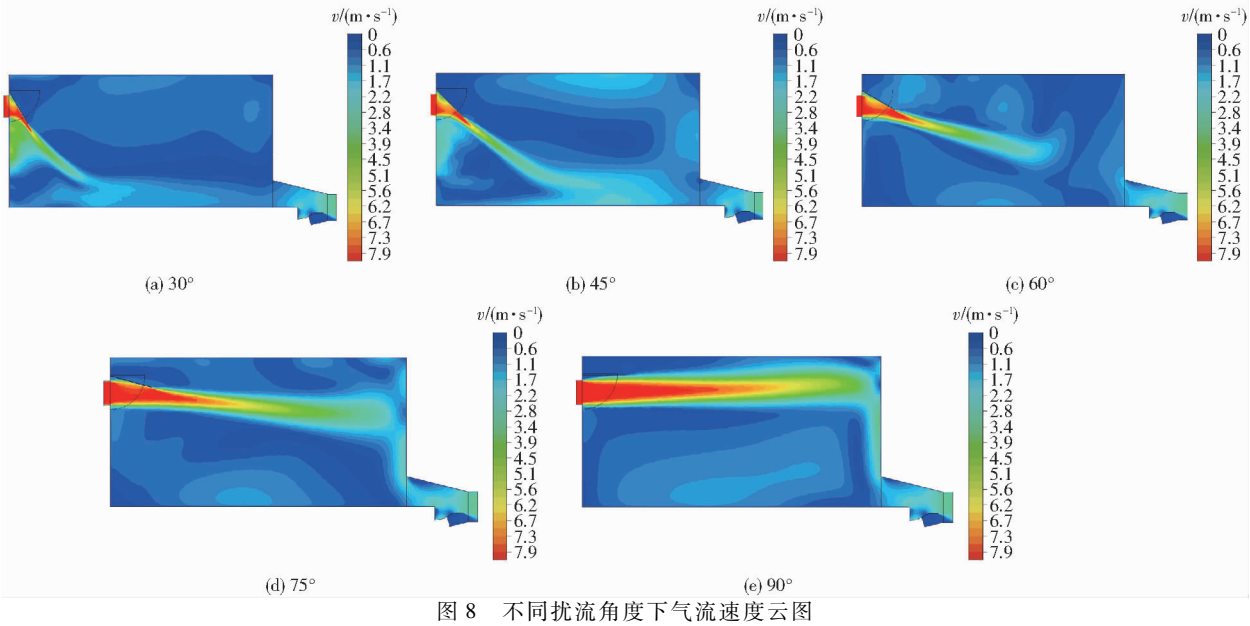

图 8　不同扰流角度下气流速度云图

Fig. 8　Airflow velocity contour plots under different turbulence angles

由图 6 可知，部分等效球形颗粒在扩散室呈集中悬浮状态分布，结合图 8 获得悬浮状态颗粒悬浮速度均值为 2.2 m/s，实际残膜悬浮试验获得速度均值为 2.45 m/s，悬浮速度仿真误差为 10% 左右，能为残膜在气流场中的运动规律提供一定借鉴，模型构建合理，符合仿真要求。

3.5.1　扰流角度对扩散室内流场的影响

由图 8a 可知，当扰流角度为 30°时，扩散室上方气流速度呈大面积椭圆形分布且中心区域风速为 2.8 ~ 3.3 m/s，从扰流板处分离出的部分残膜颗粒围绕在椭圆形边缘呈漩涡状悬浮分布，扩散室中悬浮状态的残膜导致残膜损失较高。

由图 8d 可知，当扰流角度为 75°时，扰流板处气流呈柱形分布，气流中心速度高于 6.0 m/s，增加了棉秸秆与土杂颗粒抛物运动时的水平速度，因此水平落点位置变远，导致杂质在与输送带碰撞弹跳后从出膜口飞出，降低了除杂效果。由图 8e 可知，当扰流角度为 90°时，扩散室下方形成团状气流，气流分层较少，速度为 2.0 ~ 3.4 m/s，大量残膜在团状气流内呈漩涡状悬浮分布，增加了残膜损失。

由图 8b、8c 可知，当扰流角度为 45°、60°时，扩散室内形成的团状气流速度分布呈波浪式由中心向四周递减趋势，中心气流速度为 3.3 ~ 3.9 m/s，高于残膜悬浮速度，残膜从团状气流中心向四周充分迁移扩散，膜杂物料的分离扩散效果明显。

3.5.2　颗粒速度变化及迁移轨迹

随机选择 3 种颗粒进入扩散室后随时间变化迁移轨迹简图（图 9）。运动初期，棉秸秆与土杂迁移轨迹相似，先与扰流板碰撞后掉落在输送带上，由于两物料受气流影响较小，在输送至风重分离区域时，在重力作用下通过落料口掉落在杂质收集箱中；残膜在气流作用下沿扰流板方向飘移，受涡流影响先上升后下降，最后通过出膜口飞出。

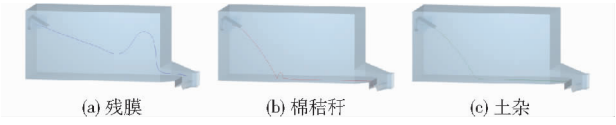

图 9　同一时段各颗粒迁移轨迹

Fig. 9　Migration of each particle at the same time

3 种颗粒平均速度变化如图 10a 所示，残膜速度起伏较大，原因为残膜悬浮速度相对较小，受扩散

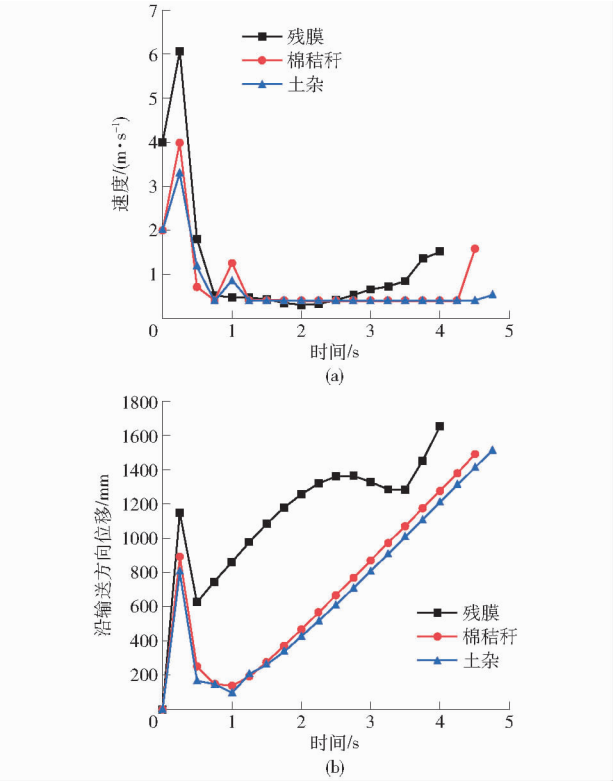

图 10 3 种颗粒速度及位移变化曲线

Fig. 10 Velocity and displacement curves of three types of particles

室内气流影响大,0.25 s 后脱离扰流板时,残膜速度达到最大,同时残膜与膜杂物料脱离,0.25 ~ 3.5 s 残膜在扩散室内随气流运动迁移,残膜速度变化先起伏后平稳,3.5 ~ 4.0 s 残膜随气流运移到扩散室出口,在气流作用下速度攀升直至从出膜口飞出;棉秸秆与土杂整体速度变化相近,0 ~ 1.25 s 棉秸秆与土杂速度起伏较大,与扰流板碰撞后掉落在输送带上,1.25 ~ 4.75 s 棉秸秆与土杂速度先稳定后起伏,随输送带稳步前进直至从落料口脱落。

3 种颗粒位移变化如图 10b 所示,0 ~ 0.5 s 3 种颗粒位移变化相近,表明其处于混合状态,1.0 s 后残膜在扩散室内充分扩散,4.0 s 后最先排出;1.0 ~ 4.5 s 棉秸秆及土杂沿输送带方向平稳移动,4.5 s 后棉秸秆与土杂排出,完成膜杂分离过程。

扰流式碎后膜杂分离装置中各颗粒速度及迁移轨迹表明,3 种颗粒分离相对平滑,分离时间短、效果好,未引起膜杂物料分离不清、相互混合等问题,数值模拟结果表明设计的分离装置进气风速、扰流角度、输送带速度及扩散室出口高度合理。

4 台架试验

由扰流式碎后膜杂分离装置的气流场数值模拟试验获取了不同扰流角度的气流分布规律,确定了能够产生理想流场的参数范围。由于在静止状态下分析扩散室内气流场具有一定局限性,为得到稳定数据,需进一步通过台架试验对前期研究进行补充。研究实际系统运行时膜杂分离效果,以获取扰流式碎后膜杂分离装置的较优工作参数组合。

4.1 试验条件与仪器

2023 年 10 月 17 日在石河子大学农业农村部西北农业装备重点实验室对试制加工的扰流式碎后膜杂分离装置进行台架试验。试验材料与前文取样材料为同一批次。通过在扩散室进气口处安装 AR866A 型热敏式风速仪获得实际风速,通过调节变频器改变风机转速。测试参照 GB/T 5667—2008《农业机械生产试验方法》。

4.2 正交试验设计

选取进气风速、扰流角度、扩散室出口高度为试验因素,以除杂率与漏膜率为响应指标。试验采用 Box - Behnken 中心组合试验方法[27],开展三因素三水平正交试验,试验因素编码如表 4 所示。

表 4 试验因素编码

Tab. 4 Experimental factors coding

编码	因素		
	进气风速/(m·s⁻¹)	扰流角度/(°)	扩散室出口高度/mm
1	6.4	60.0	200
0	5.8	52.5	180
-1	5.2	45.0	160

4.3 试验结果分析

采用 Design-Expert 软件对试验数据进行处理,试验方案及结果如表 5 所示,X_1、X_2、X_3为因素编码。

表 5 试验方案设计与结果

Tab. 5 Protocol design and results

序号	因素			除杂率	漏膜率
	X_1	X_2	X_3	Y_1/%	Y_2/%
1	0	1	-1	60.35	9.85
2	0	0	0	79.07	8.35
3	0	-1	1	85.92	14.06
4	0	-1	-1	56.97	8.38
5	1	0	-1	45.69	9.67
6	1	1	0	53.69	16.21
7	0	0	0	78.41	10.25
8	0	0	0	73.04	11.21
9	-1	0	1	69.08	21.29
10	0	0	0	71.85	13.12
11	0	1	1	50.82	19.17
12	-1	1	0	67.11	22.16
13	-1	0	-1	58.65	8.25
14	1	-1	0	73.93	15.15
15	0	0	0	79.57	11.25
16	-1	-1	0	83.86	18.34
17	1	0	1	48.04	13.03

4.3.1　回归分析

根据试验设计方案及结果，进行方差分析，结果如表 6 所示。方差分析表明除杂率和漏膜率模型极显著；失拟项不显著，其解析结果与实际试验匹配较好，回归模型能较为真实地反映试验值。各因素与除杂率 Y_1 和漏膜率 Y_2 间的回归模型为

$$Y_1 = 76.39 - 7.17X_1 - 8.59X_2 + 4.03X_3 - 9.62X_2X_3 - 7.45X_1^2 - 13.58X_3^2 \quad (17)$$

$$Y_2 = 10.84 - 2X_1 + 1.43X_2 + 3.93X_3 - 2.42X_1X_3 + 3.66X_1^2 + 3.47X_2^2 \quad (18)$$

表 6　方差分析

Tab. 6　Analysis of variance

指标	来源	平方和	自由度	均方	F	P
Y_1	模型	2 578.68	9	286.52	26.26	0.000 1 **
	X_1	411.13	1	411.13	37.68	0.000 5 **
	X_2	590.13	1	590.13	54.09	0.000 2 **
	X_3	129.61	1	129.61	11.88	0.010 7 *
	X_1X_2	3.05	1	3.05	0.28	0.613 6
	X_1X_3	16.32	1	16.32	1.50	0.260 9
	X_2X_3	370.18	1	370.18	33.93	0.000 6 **
	X_1^2	233.4	1	233.4	21.39	0.002 4 **
	X_2^2	2.09	1	2.09	0.19	0.674 7
	X_3^2	776.23	1	776.23	71.15	<0.000 1 **
	残差	76.37	7	10.91		
	失拟项	23.16	3	7.72	0.58	0.658 4
	纯误差	53.21	4	13.3		
	总变异	2 655.05	16			
Y_2	模型	317.84	9	35.32	18.56	0.000 4 **
	X_1	31.92	1	31.92	16.78	0.004 6 **
	X_2	16.42	1	16.42	8.63	0.021 8 *
	X_3	123.25	1	123.25	64.77	<0.000 1 **
	X_1X_2	1.90	1	1.90	1.00	0.350 4
	X_1X_3	23.43	1	23.43	12.31	0.009 9 **
	X_2X_3	3.31	1	3.31	1.74	0.228 5
	X_1^2	56.46	1	56.46	29.68	0.001 0 **
	X_2^2	50.61	1	50.61	26.6	0.001 3 **
	X_3^2	8.71	1	8.71	4.58	0.069 7
	残差	13.32	7	1.90		
	失拟项	1.27	3	0.42	0.14	0.930 8
	纯误差	12.05	4	3.01		
	总变异	331.16	16			

注：** 表示极显著（$P<0.01$），* 表示显著（$0.01 \leq P<0.05$）。

4.3.2　响应面分析

根据表 6 可知，X_2X_3 和 X_1X_3 交互作用对膜杂分离效果的影响极显著。运用 Design-Expert 软件绘制响应曲面，如图 11 所示。

由图 11a 可知，固定进气风速为 5.8 m/s，扰流角度固定时，除杂率随扩散室出口高度增大而逐渐升高。这是因为扩散室出口高度增高时，出口截面积增大导致流经扩散室出口的气流速度降低，棉秸秆、土杂受到的气流加速度减小，杂质受重力作用明显，降低了集料带中杂质质量，因此除杂率较高。当扩散室出口高度固定时，除杂率随扰流角度增大而降低。这是因为扰流角度增高时，提高了杂质在扩散室中的平抛距离，部分杂质在落地后产生碰撞弹跳，导致部分杂质从出膜口飞出，降低了集料带中杂质质量，因此除杂率较高，所以扰流角度与扩散室出口高度交互作用显著。

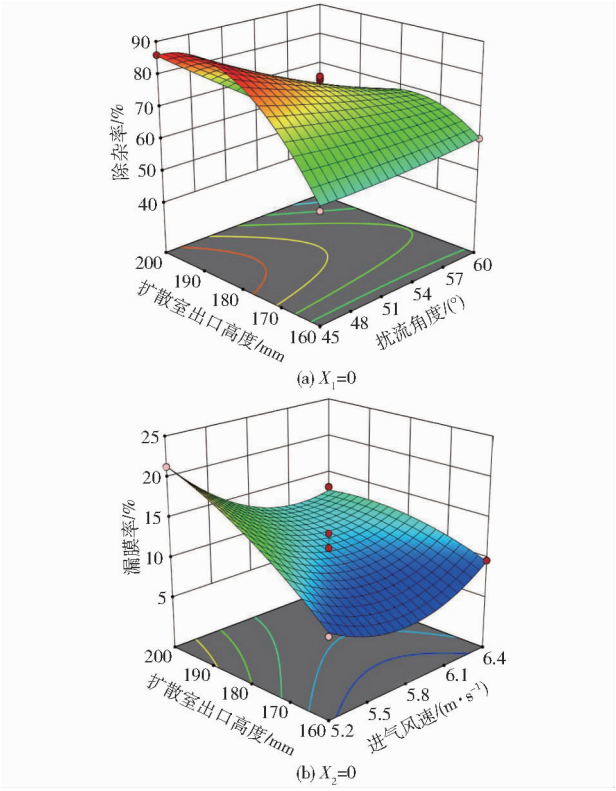

图 11　因素交互作用响应曲面

Fig. 11　Response surfaces of factor interaction

由图 11b 可知，固定扰流板角度为 52.5°，进气风速固定时，漏膜率随扩散室出口高度增大而增大。这是因为扩散室出口高度增高，扩散室出口截面积增大导致流经扩散室出口的气流速度适当降低，残膜受到的气流加速度变小，此时残膜所受重力作用明显，下落趋势增加，增大了杂质收集盒中的残膜质量，因此漏膜率较高。固定扩散室出口高度时，漏膜率随进气风速的增大而降低。这是因为当扩散室出口高度固定，进气风速增高提高了残膜在气流场沿水平方向的速度，降低了集料带中残膜质量，故漏膜率较低。所以扩散室出口高度与进气风速交互作用显著。

4.4　参数优化与验证

4.4.1　参数优化

为得到较优试验因素水平，对试验因素进行优化。根据扰流式碎后膜杂分离装置工作条件和上述相关模型分析结果，利用 Design-Expert 中

Optimization 进行寻优，目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \max Y_1 \\ \min Y_2 \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant X_1 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_2 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_3 \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \tag{19}$$

优化结果为扰流角度 48°、进气风速 5.8 m/s、扩散室出口高度 178.5 mm，此时除杂率达到 81.2%，漏膜率达到 11.0%。

4.4.2 试验验证

为验证模型预测准确性，2023 年 11 月 2 日在石河子大学农业农村部西北农业装备重点实验室进行试验（图 12），试验材料与前文均为同一批次物料，在扰流角度 48°、进气风速 5.8 m/s、扩散室出口高度 178.5 mm 组合参数下进行 3 次验证试验。

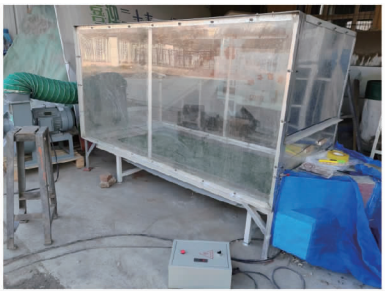

图 12 验证试验

Fig. 12 Certification test

验证试验结果除杂率为 80.26%，漏膜率为 12.35%，除杂率与理论预测值相差 0.96 个百分点，漏膜率与理论预测值相差 1.35 个百分点。验证试验与响应面试验虽为同一批物料，但机收膜杂物料本身构成极为复杂，且人工分选具有一定差异性，可能导致部分误差产生，但该误差较小且基本达到目标要求，说明参数优化模型合理，可满足后续膜杂资源化利用要求。

5 结论

（1）针对机收膜杂破碎后清选过程中分离效率低、清选成本高等问题，采用先残膜扰流扩散再膜杂风重分离的方法，设计了扰流式碎后膜杂分离装置，对残膜扩散与杂质分离过程进行力学分析，确定了影响分离性能的因素包括进气风速、扰流角度、扩散室出口高度和输送速度。

（2）构建残膜等效颗粒模型，并通过 EDEM - Fluent 耦合仿真方法对膜杂分离过程进行了数值模拟与模型验证。获取了分离装置内 3 种颗粒在气流作用下的运动规律和分布情况。

（3）开展响应面试验，建立了 3 个因素对除杂率与漏膜率影响模型；基于 Box - Behnken 组合试验法对扰流式碎后膜杂分离装置工作参数与结构参数进行了优化分析，最优组合为：扰流角度 48°、进气风速 5.8 m/s、扩散室出口高度 178.5 mm，此时除杂率为 80.26%，漏膜率为 12.35%。

参 考 文 献

[1] 梁荣庆，陈学庚，张炳成，等. 新疆棉田残膜回收方式及资源化再利用现状问题与对策[J]. 农业工程学报，2019，35(16)：1 - 13.
LIANG Rongqing, CHEN Xuegeng, ZHANG Bingcheng, et al. Problems and countermeasures of recycling methods and resource reuse of residual film in cotton fields of Xinjiang[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(16): 1 - 13. (in Chinese)

[2] 严昌荣，梅旭荣，何文清，等. 农用地膜残留污染的现状与防治[J]. 农业工程学报，2006，22(11)：269 - 272.
YAN Changrong, MEI Xurong, HE Wenqing, et al. Present situation of residue pollution of mulching plastic film and controlling measures[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(11): 269 - 272. (in Chinese)

[3] 蒋德莉，陈学庚，颜利民，等. 农田残膜资源化利用技术与装备研究[J]. 中国农机化学报，2020，41(1)：179 - 190.
JIANG Deli, CHEN Xuegeng, YAN Limin, et al. Research on technology and equipment for utilization of residual film in farmland[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(1): 179 - 190. (in Chinese)

[4] ZHANG J, XIE J, DU Y, et al. Discrete element modeling and experimental study of biomechanical properties of cotton stalks in machine-harvested film-stalk mixtures[J]. Sci. Rep., 2024, 14(1): 12933.

[5] 王志超. 农膜残留对土壤水分运移的影响及模拟研究[D]. 呼和浩特：内蒙古农业大学，2017.
WANG Zhichao. Effect and simulation of soil moisture migration with residual plastic film[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2017. (in Chinese)

[6] CABRERA G, LI J, MAAZOUZ A, et al. A journey from processing to recycling of multilayer waste films: a review of main challenges and prospects[J]. Polymers, 2022, 14(12): 2319.

[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 on pneumatic cylinder sieve film hybrid separator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 126 - 135. (in Chinese)

[8] 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 experiment of the machine collecting residual film in the impeller-driven washing separation device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(9): 151 - 155. (in Chinese)

[9] 康建明，解臣硕，王小瑜，等. 滚筒筛式膜杂风选机筛孔清堵装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2022，53(9)：91 - 98.

KANG Jianming, XIE Chenshuo, WANG Xiaoyu, et al. Design and test of screen hole clearing device for trommel sieve type membrane miscellaneous wind separator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 91 - 98. (in Chinese)

[10] 王学农,边博,吐鲁洪·吐尔迪,等. 巴旦木物料壳仁风选装置试验及参数优化[J]. 农业工程学报,2021,37(12):299 - 306.
WANG Xuenong, BIAN Bo, TULUHONG Turdi, et al. Experiments and parameter optimization of almond shell and kernel air separation device[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(12): 299 - 306. (in Chinese)

[11] 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 roller sieve waste plastic film and trash winnowing machine[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(18): 19 - 26. (in Chinese)

[12] 王伯凯,于昭洋,胡志超,等. 花生捡拾收获机三风系风选系统流场数值模拟与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(11): 103 - 114.
WANG Bokai, YU Zhaoyang, HU Zhichao, et al. Numerical simulation and experiment of flow field in three air systems of air separation system of peanut pickup harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 103 - 114. (in Chinese)

[13] 解臣硕,康建明,彭强吉,等. 滚筒筛式膜杂分离装置数值模拟与参数优化[J]. 中国农机化学报,2024,45(4):1 - 11.
XIE Chenshuo, KANG Jianming, PENG Qiangji, et al. Numerical simulation and parameter optimization of tormmel screen type membrane and impurity separation device[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(4): 1 - 11. (in Chinese)

[14] 李凯凯. 弹齿式残膜回收机脱膜除杂装置理论分析与试验研究[D]. 淄博:山东理工大学,2023.
LI Kaikai. Theoretical analysis and experimental research on the stripping and impurity removal device for spring-tooth residual plastic film collector[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2023. (in Chinese)

[15] 靳伟,张学军,丁幼春,等. 基于 EDEM - Fluent 的残膜与杂质悬浮分离仿真与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(4): 89 - 98.
JIN Wei, ZHANG Xuejun, DING Youchun, et al. Experiment on suspension separation of residual film and impurity based on EDEM - Fluent coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(4): 89 - 98. (in Chinese)

[16] 李革,赵匀,俞高红. 倾斜气流清选装置中物料的动力学特性、轨迹和分离研究[J]. 农业工程学报,2001,17(6):22 - 25.
LI Ge, ZHAO Yun, YU Gaohong, et al. Dynamical property, loci and separating of materials in inclined airflow device[J]. Transactions of the CSAE, 2001, 17(6): 22 - 25. (in Chinese)

[17] 温翔宇,贾洪雷,张胜伟,等. 基于 EDEM - Fluent 耦合的颗粒肥料悬浮速度测定试验[J]. 农业机械学报,2020,51(3): 69 - 77.
WEN Xiangyu, JIA Honglei, ZHANG Shengwei, et al. Test of suspension velocity of granular fertilizer based on EDEM - Fluent coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 69 - 77. (in Chinese)

[18] 于福锋,李平,张凤奎,等. 红枣悬浮速度特性试验测定与分析[J]. 中国农机化学报,2020,41(6):99 - 105.
YU Fufeng, LI Ping, ZHANG Fengkui, et al. Experimental determination and analysis of suspension velocity characteristics for red jujube[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(6): 99 - 105. (in Chinese)

[19] 马秋成,卢安舸,高连兴,等. 莲子物料空气动力学特性与壳仁分离装置试验[J]. 农业工程学报,2015,31(6):297 - 303.
MA Qiucheng, LU Ange, GAO Lianxing, et al. Aerodynamic characteristics of lotus seed mixtures and test on pneumatic separating device for lotus seed kernel and contaminants[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(6): 297 - 303. (in Chinese)

[20] 马云海. 农业物料学[M]. 北京:化学工业出版社,2015:38 - 39.

[21] 叶大鹏,青家兴,林志强,等. 类芦茎秆离散元模型建立与参数标定[J]. 农业机械学报,2025,56(7):139 - 149.
YE Dapeng, QING Jiaxing, LIN Zhiqiang, et al. Establishment and parameter calibration of discrete element model for *Neyraudia reynaudiana* stalk[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(7): 139 - 149. (in Chinese)

[22] 赵吉喆. 基于离散元法的马铃薯挖掘铲工作阻力仿真与试验研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2017.
ZHAO Jizhe. Simulation and experimental investigation of potato digging shovel working resistance based on discrete element method[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2017. (in Chinese)

[23] JIANG D, CHEN X, YAN L, et al. Mechanical and friction properties of agricultural plastic film during autumn harvest period of cotton in Xinjiang, China[J]. Environ Sci Pollut Res 30, 89238 - 89252(2023).

[24] 康建明,张恒,张国海,等. 残膜物料空气动力学特性与膜杂分离装置试验[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(1): 167 - 172.
KANG Jianming, ZHANG Heng, ZHANG Guohai, et al. Aerodynamic characteristics of residual film materials and test of membrane separation device[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(1): 167 - 172. (in Chinese)

[25] WANG Lijun, ZHOU Wenxiu, DING Zhejun. Experimental determination of parameter effects on the coefficient of restitution of differently shaped maize in three-dimensions[J]. Powder Technology, 2015, 284: 187 - 194.

[26] 廖庆喜,杨波,李旭,等. 内充气吹式油菜精量排种器气室流场仿真与试验[J]. 农业机械学报,2012,43(4): 51 - 54.
LIAO Qingxi, YANG Bo, LI Xu, et al. Simulation and experiment of inside-filling air-blow precision metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 51 - 54. (in Chinese)

[27] 严义其,坎杂,王吉亮,等. 膜杂捆料多级破碎机设计与试验[J]. 农业工程学报,2024,40(2):187 - 195.
YAN Yiqi, KAN Za, WANG Jiliang, et al. Design and experiment of multi-stage crusher for film and miscellaneous bundle materials[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(2): 187 - 195. (in Chinese)