doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.07.024

气送式籽棉异纤除杂装置结构设计与流场特性优化

费叶琦[1]　陈东胜[2]　林　义[2]　周志鹏[3]　刘　英[1]　倪　超[1]

(1.南京林业大学机械电子工程学院,南京 210037;2.奎屯银力棉油机械有限公司,奎屯 833200;
3.南京理工大学紫金学院智能制造学院,南京 210023)

摘要:针对含杂籽棉在异纤(如薄膜)剔除过程中的气流调控问题,使用有限元软件对相关参数进行模拟计算,分析其对流场特性的影响,优化流场结构,提升除杂效率与输送稳定性。首先,构建包含籽棉入口、除杂口、出棉口、喷嘴与补风口的三维模型并完成网格划分,通过残差收敛、关键量验证与网格无关性验证确保计算结果可靠。其次,基于 SST $k-\omega$ 湍流模型,对补风口角度和补风速度进行系统仿真分析。结果表明,当入棉口速度为 9 m/s、除杂补风口风速为 1 m/s、出棉补风口风速为 6 m/s、出口压差约 400 Pa、补风角度取 15°时系统整体性能最优。在该组合下,管内仅在近壁存在轻微速度衰减,整体流场均匀、方向一致;回流与小尺度涡旋被有效抑制,剪切层边界清晰,输送连续性增强、堵塞风险降低。应用仿真结果设计制造了工业产线,验证了异纤剔除率大于等于 90%、连续处理能力约 4 t/h。

关键词:籽棉;除杂装置;数值模拟;流场优化

中图分类号:S226.7;TS112.7　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)07-0264-10　　**OSID**:

Design and Flow Field Optimization of Pneumatic Foreign Fiber Removal Device for Seed Cotton

FEI Yeqi[1]　CHEN Dongsheng[2]　LIN Yi[2]　ZHOU Zhipeng[3]　LIU Ying[1]　NI Chao[1]

(1. *College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Nanjing Forestry University*, *Nanjing* 210037, *China*
2. *Kuitun Yinli Cotton and Oil Machinery Co.*, *Ltd.*, *Kuitun* 833200, *China*
3. *School of Intelligent Manufacturing*, *Nanjing University of Science and Technology Zijin College*, *Nanjing* 210023, *China*)

Abstract: Aiming to address the airflow regulation challenges during visual detection and foreign fiber (e.g., film) removal in seed cotton, finite element software was used to simulate and calculate relevant parameters, analyze their impact on flow field characteristics, in order to optimize the flow field structure and improve impurity removal efficiency and conveying stability. A three-dimensional multiphysics geometric model was developed, incorporating key components such as the seed cotton inlet, impurity removal outlet, cotton outlet, nozzles, and auxiliary air inlets. Based on the SST $k-\omega$ turbulence model, the systematic simulation analysis was conducted on the angle and velocity of the auxiliary air inlets. The simulation results revealed that when the seed cotton inlet velocity was set as 9 m/s, the impurity removal air inlet velocity as 1 m/s, the cotton outlet auxiliary air inlet velocity as 6 m/s, and the auxiliary airflow angle as 15°, the airflow velocity distribution at both the impurity removal and cotton outlets was optimized, effectively meeting the operational requirements for foreign fiber separation and cotton discharge, while minimizing flow blockage and recirculation within the conveying pipeline. Prototype testing under the optimized simulation parameters confirmed that the integrated system, combined with machine vision-based recognition, achieved a foreign fiber removal rate of 90% and a processing capacity of 4 tons of seed cotton per hour.

Key words: seed cotton; impurity removal device; numerical simulation; flow field optimization

收稿日期:2025-08-12　修回日期:2025-10-22

基金项目:新疆 2022 年自治区重大科技专项(2022A01009)

作者简介:费叶琦(1985—),女,博士生,主要从事无损检测和智能制造等研究,E-mail:feiyeqi@njfu.edu.cn

通信作者:倪超(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事无损检测和智能制造等研究,E-mail:chaoni@njfu.edu.cn

0　引言

籽棉加工过程中，有效去除杂质是确保棉纤维品质和生产效率的关键环节[1]。传统籽棉除杂机多采用气流与机械筛分协同的方式，实现棉籽、纤维与杂质的分离[2]。然而，由于籽棉物理特性复杂，棉籽破碎率高、异纤杂质黏附性强[3]，现有设备普遍存在能耗高、杂质清除不彻底（尤其是微细尘土及轻小杂质）、除杂效率低且运行稳定性差等问题[4]，严重制约了籽棉加工的精细化发展。近年来，以气力分选原理为基础的喷气式除杂技术[5-6]，因其非接触、高效率、高精度的优势逐渐成为研究热点和产业应用的主流方向。该技术通过精确调控气流场的结构，实现杂质与棉纤维的高效动力学分离，其中补风口的角度和补风速度作为关键参数，直接决定了流场速度分布的均匀性与分离效果[7]。然而，在现有气力除杂装置中，这些参数的设定多依赖经验公式和局部实验结果，缺乏系统化的理论指导，导致流场分布不均、气流能量利用率不高等问题。随着计算流体力学（CFD）技术的不断成熟，以有限元计算软件为代表的数值模拟方法，为复杂流场的精准分析提供了有效手段[8]。通过多物理场耦合与湍流模型优化，数值模拟可在较低的实验成本下实现流场精细化预测[9]。因此，深入探究补风口角度和补风速度对流场特性的影响规律，对提高籽棉除杂设备中籽棉输送顺畅性及除杂效率、推动籽棉加工设备的智能化升级具有重要意义和工程应用价值。

目前，已有多位学者针对籽棉除杂过程的气流场特性与关键参数优化进行了相关研究[4,7,10-12]。然而，现有研究多集中于静态单一工况的分析，缺乏针对补风角度及各补风口速度动态调控机制的系统性、定量化研究，未能形成成熟的流场优化理论体系。

围绕籽棉异纤高效剔除需求，本文以气送式籽棉异纤除杂装置为研究对象，采用有限元计算软件进行三维流场数值模拟分析，实现除杂补风口、出棉补风口的风速配置及补风角度的优化设计。同时，基于 SST $k-\omega$ 湍流模型，对除杂补风口与出棉补风口风速参数配置及角度进行系统性优化分析。进一步结合补风角度变化规律，探讨管道内边界层效应与速度分布对籽棉运行路径的影响，实现对薄膜等异纤杂质的精准识别与高效剔除。

1　籽棉异纤除杂装置关键结构设计

1.1　籽棉除杂系统主要结构与工作原理

籽棉除杂系统（如图 1 所示）是一套针对机采含杂籽棉设计的集成化除杂预处理设备，在梳棉同时高效剔除籽棉原料中夹带的重杂与异纤，提升棉纤维纯净度。系统运行过程中，预处理后的含杂籽棉首先被投入至含杂籽棉储棉箱。在主风机产生的负压吸引作用下，籽棉沿输送通道进入除杂系统内部。首先籽棉经由含杂籽棉输棉装置中的刺辊均匀送棉，确保棉流连续稳定地进入后续除杂单元。通过滚筒式重杂清理装置中滚筒转动所产生的离心力与重力协同作用，实现对大颗粒杂质（如棉秆棉壳、石子等）的有效分离，并通过重杂口排入重杂收集箱。此阶段主要针对物理性质显著不同于棉纤维的重杂，保障后续异纤识别工序的稳定性。初步净化后的籽棉在气流输送作用下进入气送式籽棉异纤除杂装置。该装置集成有图像识别与多通道气流剔除系统，采用工业相机对异纤进行实时检测，并根据异纤的大小、位置和运动轨迹，智能控制喷嘴动作，剔除异纤。最终，经异纤剔除后的干净籽棉通过纯净籽棉输棉装置被输送至纯净籽棉储棉箱，实现纯净棉料的集中收集。

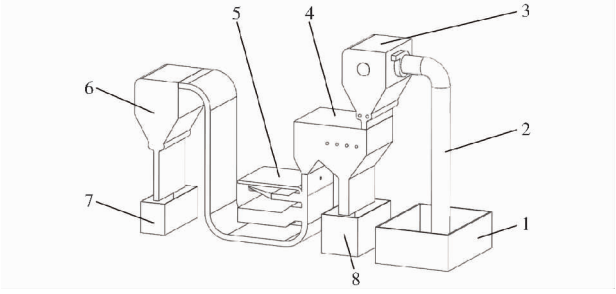


图 1　籽棉除杂系统结构示意图

Fig. 1　Schematic of seed cotton impurity removal system

1. 含杂籽棉储棉箱　2. 输送通道　3. 含杂籽棉输棉装置　4. 滚筒式籽棉重杂清理装置　5. 气送式籽棉异纤除杂装置　6. 纯净籽棉输棉装置　7. 纯净籽棉储棉箱　8. 重杂收集箱

1.2　籽棉异纤除杂装置几何模型构建

根据实际生产现场的工艺需求，构建了图 2 所示的气送式籽棉异纤除杂装置物理模型。该模型集成了多个关键功能部件及对应的进出口结构，以满足籽棉异纤高效剔除的设计目标。具体尺寸包括：含杂籽棉入口为截面 1 200 mm × 110 mm 的矩形管道，异纤除杂补风口为截面 1 200 mm × 56 mm 的矩形管道，异纤除杂口为截面直径 200 mm 的圆形管道，出棉补风口为截面 1 200 mm × 270 mm 的矩形管道，出棉口为截面 1 200 mm × 110 mm 的矩形管道。上述结构尺寸设计充分结合实际应用场景中籽棉输送与异纤剔除的工艺参数要求。

为提高异纤分离效率，异纤除杂口采用“方接圆”结构设计，通过平滑过渡减少气流扰动与压力损失[13]，提升流场均匀性和主流方向性。此外，接

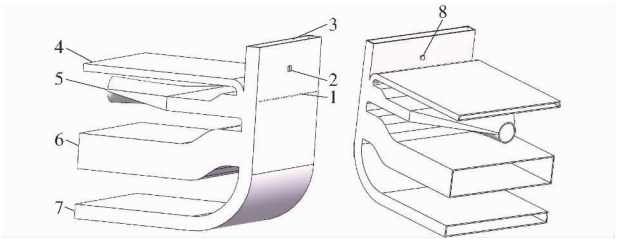


图 2 气送式籽棉异纤除杂装置物理模型

Fig. 2 Physical model of pneumatic foreign fiber removal device for seed cotton

1. 喷嘴 2. 1 号工业相机 3. 籽棉入口 4. 异纤除杂补风口 5. 异纤除杂口 6. 出棉补风口 7. 出棉口 8. 2 号工业相机

口部位通过机械法兰连接与高精度密封圈配合,系统漏风率控制在 1% 以内,保证装置的气密性。

考虑到工业相机的视场限制与成像死区问题,如图 2 所示,装置正面与背面分别设置 1 号与 2 号工业相机,实现对通道范围内含杂籽棉的双侧全覆盖监测。相机下方布置 22 个直径为 5 mm 的喷嘴,沿水平方向等间距排布,根据异纤位置支持单个或多个喷嘴联动喷吹,实现异纤精准、快速剔除。

系统运行过程中,含杂籽棉由自动喂料通道进入装置,经前段处理后通过图像采集区域。智能图像识别系统实时检测、定位异纤,并触发对应喷嘴进行定点气流喷吹,异纤随气流通过异纤除杂口排出,而籽棉则沿主气流方向继续输送至后续环节。为保障主气流均匀性与籽棉输送顺畅性,装置在异纤剔除与出棉段分别设置有辅助补风口(除杂补风口和出棉补风口),抑制气流紊乱与堵塞风险。

2 仿真模型建立与数值模拟方法

2.1 网格划分

为兼顾几何贴合能力与求解精度,本文采用混合网格策略[14],以非结构化网格为主、结构化网格为辅,并在关键部位实施局部加密[15]与分区建模。具体如下:①对形状规整、通道较直的矩形平面与直段通道优先布置四边形或六面体网格,使网格主方向与流向一致,降低数值耗散,提升速度梯度解析度。②针对喷嘴和侧壁连接、弯管以及收缩和扩张等几何突变、多分支汇合部位,采用四面体非结构化网格并进行关键区域的局部加密。表面采用三角形网格,提高对复杂边界的贴合度并降低单元畸变。该策略有助于解析近壁剪切层,并准确捕捉壁面边界层的分离与再附着,以及收缩、扩张与汇合区的局部流动细节。③针对 22 个圆孔喷嘴,在每个孔周围布置同心的面加密区,孔内沿轴向采用扫掠式细网以形成“近似结构化”的轴向单元序列;孔外喷出方向布置渐疏放大的网格带,重点提升喷嘴近场喷流核心与初始剪切层的分辨率。④在补风口入口、出口及过渡连接位置引入“三角形和四边形过渡”的混合网格,并通过体积分区进行多级加密,以精细解析喷流与主流的剪切层、回流或再附着及局部收缩到扩张等特征。⑤沿全部固体壁面生成多层棱柱边界层,保证近壁法向分辨率与层间平滑过渡,保证近壁法向分辨率处于 SST $k-\omega$ 模型的适用范围,准确捕捉壁面剪切与近壁湍流发展。

网格处理后生成的模型网格及细节如图 3,总节点数 1 289 863,单元数 872 484。为检验质量,对网格进行 Skewness[16](单元倾斜度)、Aspect Ratio(长宽比)与 Orthogonal Quality(正交质量)3 项指标评估。其中单元倾斜度主要集中在 0.25 ~ 0.65 之间,长宽比集中在 1.2 ~ 1.8 之间,正交质量主峰分布在 0.70 ~ 0.90 之间,结果表明网格畸变小、拉伸可控,在喷嘴、补风口与方接圆过渡等对结果敏感的区域实现了针对性的细化与各向对齐,同时保持了整体质量与正交性,满足工程级仿真计算要求,为后续流场的空间离散与数值求解提供了可靠且收敛性良好的网格基础。

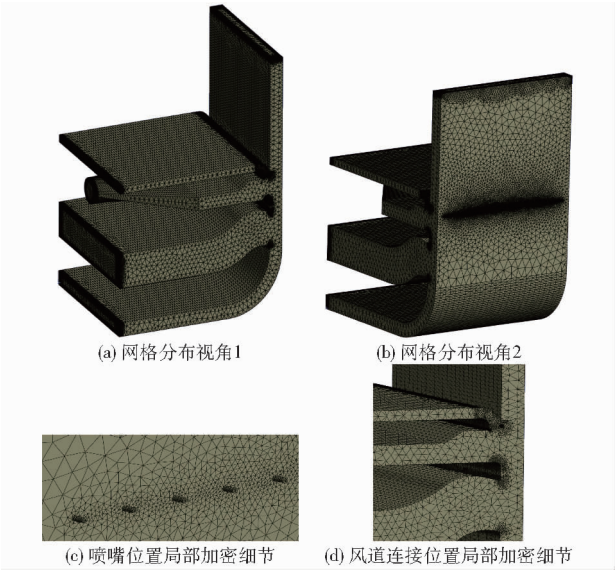


图 3 籽棉异纤除杂装置模型网格

Fig. 3 Mesh diagrams for physical model of pneumatic foreign fiber removal device for seed cotton

2.2 数值模拟方法

考虑到系统内部存在多处不同速度的入口与出口,为准确模拟其复杂流动行为(如涡旋、流动分离及再附着现象),选用 SST $k-\omega$ 为本研究的主要湍流模型[17]并进行求解。求解过程中的控制方程包括质量守恒方程(连续性方程)[18-19]、动量守恒方程(Navier - Stokes 方程)[20-21]和 SST $k-\omega$ 湍流模型方程[22-23]。

2.3 初始条件与边界条件设置

将图 2 模型导入数值分析环境后，完成必要的几何简化与网格划分，并在求解阶段配置物理模型与控制参数。为便于后续统一赋值、监控与后处理，对模型各边界实施规范化命名与功能分区，进而实现边界条件的精确设定与仿真控制。各表面名称及其功能划分见表 1。

表 1　边界条件设置

Tab. 1　Boundary-condition settings

边界位置	区域名称	边界类型
籽棉入口	Inlet1	速度入口
异纤除杂补风口	Inlet2	
出棉补风口	Inlet3	
喷嘴	Inlet4	
异纤除杂口	Outlet1	压力出口
出棉口	Outlet2	
其他表面	Wall	壁面

2.3.1 喷嘴速度设置

本研究中的喷嘴根据系统状态按需触发，具有关闭和喷射两种瞬时状态。电磁阀开启时间远小于喷射持续时间，且喷射雷诺数高，阀开启后喷流很快达到临界流；因此在数值建模时分别采用两组边界条件描述。

(1)喷嘴关闭

喷嘴未触发或阀门关闭，不向主流通道供气，同时防止主流倒灌进入喷嘴支路。此时将 Inlet4 设为 Wall(无滑移、绝热)，等效于阀门关闭，完全阻断通道。

(2)喷嘴喷射

识别到薄膜类异纤后，电磁阀开启，圆孔喷嘴喷射气流且气源压力足够高，迅速进入临界流状态，此时喷嘴处马赫数 $M=1$，即喷嘴出口速度接近当地声速。此时喷嘴出口处静温 T_e 计算式为

$$T_e = T_0 \frac{2}{\gamma+1} = 300 \times \frac{2}{2.4} = 250\ \text{K} \tag{1}$$

式中　T_0——总温(气流绝热等熵减速至静止时的温度)，设定为常温，则 $T_0 \approx 300$ K

γ——比热容比，空气取 1.4

单个喷嘴喷出速度 V_e 为

$$V_e \approx a_e = \sqrt{\gamma R T_e} \approx \sqrt{1.4 \times 287 \times 250} = 317\ \text{m/s} \tag{2}$$

式中　a_e——喷嘴出口处的局部声速，m/s

R——气体常数(空气取 287 J/(kg·K))

在临界流条件下，质量流率 $\dot{m}$ 可表示为

$$\dot{m} = C_d A P_0 \sqrt{\frac{\gamma}{RT_0}} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \tag{3}$$

式中　C_d——流量系数，常见范围为 0.8 ~ 0.85[24-25]

A——喷口面积，当喷嘴直径 $d=5$ mm，则 $A=\pi(d/2)^2=1.963\times10^{-5}$ m^2

P_0——气源绝对压力，MPa

对大气喷射时，喷嘴产生的推力 F 近似为

$$F \approx \dot{m} V_e \tag{4}$$

在现场气道中，选取单喷嘴工况多次测量喷出速度。喷嘴喷出时的气流速度位于 300 ~ 320 m/s 范围内，符合工程要求。给定气源绝对压力 0.5 MPa 下单嘴的 $\dot{m}$ 为 0.022 ~ 0.024 kg/s，则推力为 7.0 ~ 7.6 N。对比现场气源提供的等效喷射推力 8 N，该偏差处于工程可接受范围。

2.3.2 边界条件设置

为确保模拟精度，设置的边界条件主要包括流体入口、出口以及固体壁面等条件。

(1)入口条件：来流速度均匀分布，方向垂直于入口截面。籽棉入口(Inlet1)速度：9 m/s，湍流强度设定在 5% ~ 10%；除杂补风口(Inlet2)速度：1 ~ 2 m/s，湍流强度设定为 5%；出棉补风口(Inlet3)速度：5 ~ 7 m/s，湍流强度设定为 5%；喷嘴(Inlet4)设置两种工况：关闭，喷嘴口面按壁面处理，不参与进出流；喷射，按式(2)设定喷射瞬时等效速度约 317 m/s，用于表示单嘴开启时的局部喷流。

(2)出口条件：除杂口(Outlet1)和出棉口(Outlet2)均设置为压力出口，其中除杂口的工作压力设定高于出棉口 350 ~ 450 Pa，以增强异纤分离驱动力[26]。

(3)固体壁面条件：所有固体边界均设定为无滑移壁面[27]，即壁面速度分量为零。

3 仿真结果与讨论

3.1 数值结果有效性验证

3.1.1 网格无关性验证

为验证计算结果不受网格尺度影响，在相同边界条件下(异纤除杂补风口速度为 1 m/s、出棉补风口速度为 6 m/s、异纤除杂口 Outlet1 和出棉口 Outlet2 压差为 400 Pa)，按照同一划分策略依次加密，得到 5 组网格(A ~ E)，如表 2 所示。以异纤除杂口速度 V_{11} 与出棉口速度 V_{22} 为监控量，相邻两组网格加密后监控量相对变化小于 1% 即认为网格无关。由表 2 可见，A 组、B 组在异纤除杂口的速度偏差达 8% 左右，明显不能满足网格无关要求；C 组在异纤除杂口速度偏差仍有 1.91% 的变化，尚未达标；D 组与 E 组的速度差异在异纤除杂口为 0.11%、出棉口为 0.032%，两者均远小于 1%。说

明从 D 组起计算结果精度对进一步加密网格不再敏感,已满足网格无关性要求。计算成本上 E 组的网格节点和单元数较 D 组增加约 32% 和 30%,将增加计算时间与硬件资源需求,而精度提升较小可忽略,因此选取 D 组作为后续计算的标准网格。

表 2 网格无关性检验结果

Tab. 2 Results of mesh-independence verification

组别	节点数	单元数	V_{11}/(m·s^{-1})	V_{22}/(m·s^{-1})	相对 D 组误差/%	
					异纤除杂口	出棉口
A	229 543	150 044	10.920	21.717	8.02	0.872
B	352 870	229 188	10.968	21.704	8.50	0.931
C	660 220	452 792	10.302	21.858	1.91	0.228
D	1 289 863	872 484	10.109	21.908		
E	1 700 580	1 132 257	10.120	21.901	0.11	0.032

3.1.2 收敛性验证

为验证数值结果的可靠性,针对单喷嘴稳态工况进行了缩放残差收敛性检查。图 4 展示了缩放残差曲线。各方程残差自初始值起快速衰减 4 ~ 6 个数量级,在约 180 次迭代后进入稳定状态;3 个方向的速度分量残差降至 1×10^{-5} 并保持平稳,湍动能方程 k 与比耗散率 ω 的残差稳定在 10^{-3} 量级,连续性残差维持在 10^{-2}。该收敛水平满足工程计算对稳态解的精度要求;后期的轻微起伏是湍流方程耦合下的正常数值波动,满足工程的收敛标准。

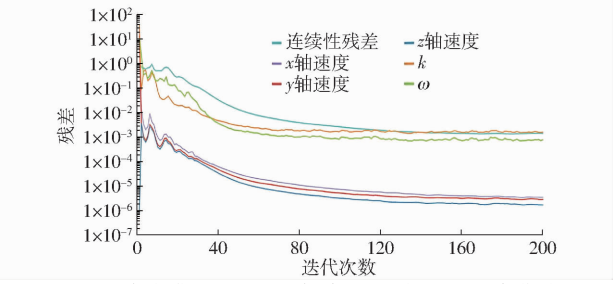


图 4 单喷嘴工况 CFD 仿真的缩放残差迭代曲线

Fig. 4 Scaled residual iteration curves for single-nozzle CFD simulation

3.1.3 仿真结果有效性验证

为检验数值模型有效性,在现场气道中选取出棉口进行重复测量。为保证与仿真响应量一致,测试位置设置在出棉口中心截面并沿法向进行多点测量后取平均速度,同时保持各入口风速与仿真边界条件一致。每次测试间隔大于等于 30 s 以削弱自相关影响,并在稳态段完成读数。10 次实测的出棉口速度为:20.8、21.3、21.5、21.6、21.7、21.8、22.0、22.1、22.2、21.0 m/s,均在 20 ~ 23 m/s 范围内。统计结果如下:样本均值 21.6 m/s,样本标准差 0.462 m/s。在网格无关性验证中选定 D 方案后,仿真给出的出棉口截面平均速度为 21.908 m/s,与实测均值相比,相对偏差约为 1.43%,在工程中常用的 ±5% 范围内,满足工程应用精度要求,验证了仿真结果的有效性。

3.2 流场模拟与分析

为保证后续识别与剔除环节的可用流场,模拟前对关键风速参数作如下功能性分析并制定仿真方案。

(1)籽棉入口(Inlet1)处的风速对后续异纤识别与剔除性能具有显著影响。若入棉风速设置过低,籽棉在输送过程中易发生堆积,影响整机的稳定运行与处理效率;反之,若风速过高,则会显著缩短籽棉通过成像区域的时间,造成图像曝光不足、亮度降低,进而影响异纤识别精度,增加识别定位误差。因此籽棉入口风速的选择需权衡顺畅输送性和识别准确率。

(2)除杂补风口(Inlet2)的风速设定应在提升剔除效率与维持主通道流场均匀性之间取得平衡。一方面,应为异纤剔除区域提供足够的辅助气流动能,以增强异纤的偏离能力;另一方面,需避免扰动主通道棉流,防止因局部扰动过强而影响籽棉的输送连续性,甚至引发棉流紊乱。

(3)对于出棉补风口(Inlet3),其风速设定主要用于补偿主通道可能出现的速度衰减,确保净化后的籽棉能够顺利输出,避免因流速不足而在出棉段发生滞留或堵塞。同时,合理控制补风强度,以防在除杂区域诱发紊流或局部回流现象,造成已剔除异纤被卷入主流路径,降低除杂效率。

(4)喷嘴口(Inlet4)用于异纤喷吹剔除,在仿真中按喷嘴关闭和喷射两种状态处理。

在后续仿真模拟中,将结合不同风速及角度组合开展多组工况分析,评估其对关键区域气流速度场的影响,以获取最佳运行参数并为装置结构优化提供理论依据。

3.2.1 单喷嘴工作流场特性

为了解单喷嘴喷流对棉流的影响,选取单喷嘴工作工况进行分析。图 5a 为整体速度云图,喷嘴轴线附近形成连续、狭窄的射流势核,其中心线速度在若干喷口尺度内近似保持出口值,随后沿下游逐步衰减并扩散。图 5b 为喷口近场细节图,可见两侧剪切层发展充分、速度梯度带边界清晰;喷口邻近壁面处出现小尺度回流,表明喷流与主流通道之间存在强烈的湍流混合特征。图 5c 为单喷嘴瞬时速度迹线分布,气流在喷嘴出口处迅速加速至约 317 m/s,沿喷射方向形成高速主流区,喷嘴两侧剪切层与下游回流涡结构清晰可辨。

3.2.2 除杂补风口及出棉补风口最优速度选择

根据实际生产经验及工艺需求,入棉口、异纤除

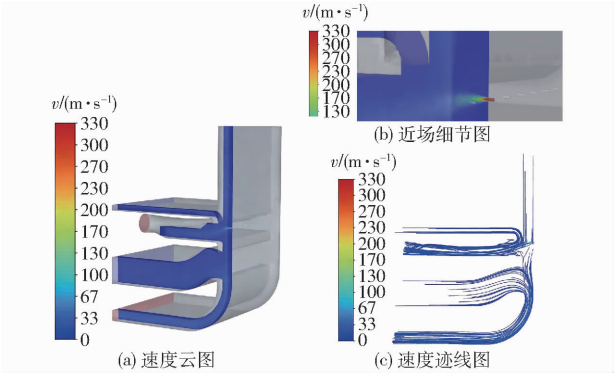


图 5　单个喷嘴工作状态下的速度场

Fig. 5　Velocity field of single nozzle in operation

杂口及出棉口的初始风速分别设定为 9、10、20 m/s。

在流场结果可视化与分析过程中，后续的速度云图与流线分布均基于方接圆过渡段的中间截面（图 6 所示位置）进行截取与分析。该位置位于方形截面过渡至圆形截面的中段，正好覆盖入棉口、异纤除杂口与出棉口三者交汇的主要流动区域，是影响整体流场分布与除杂性能的关键部位；能够同时捕捉主流区、补风区及喷吹通道的速度变化与相互作用，便于全面反映不同工况下流场速度分布的特征与差异；相比其他位置，该位置受局部边界条件影响较小，更能准确反映管道内部的真实气流状态。

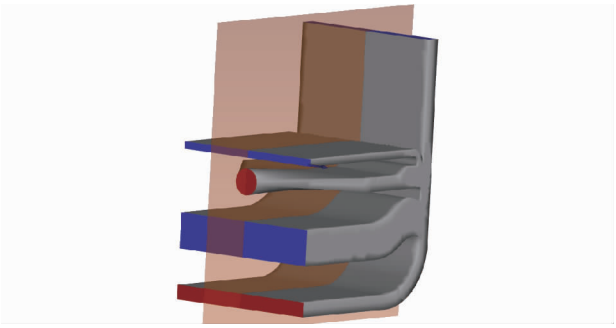


图 6　速度云图与流线分布提取参考截面

Fig. 6　Reference cross-section for extracting velocity contours and streamline distributions

为进一步提升系统能效与除杂性能，结合数值仿真与实验测试，得到不同补风速度与压差组合下的异纤除杂口速度 V_{11} 和出棉口速度 V_{22}。结果如表 3 所示，异纤除杂补风口速度 V_1 为 1 m/s、出棉补风口速度 V_2 为 6 m/s，且除杂口和出棉口的压力差 Δp 为 400 Pa 工况下，可获得最优流动状态，实现可控、高效的除杂过程，对应的速度云图如图 7 所示。

从图 7 可见，在最优工况下，籽棉主流区内气流速度分布较为均匀，整体维持在约 9 m/s，呈浅蓝至绿色过渡，表明籽棉可顺畅进入主通道。异纤除杂口区域气流明显加速，形成可控的高速喷吹通道，局部速度达 10.109 m/s，且无明显回流或强紊流现象，

表 3　不同参数下除杂口速度及出棉口速度

Tab. 3　Outlet velocities under different parameters

V_1/(m·s^{-1})	V_2/(m·s^{-1})	Δp/Pa	V_{11}/(m·s^{-1})	V_{22}/(m·s^{-1})
1	5	350	6.809	20.229
		400	3.465	20.988
		450	0.739	21.953
	6	350	12.126	21.470
		400	10.109	21.908
		450	7.339	22.561
	7	350	16.320	22.968
		400	14.596	23.361
		450	12.719	23.790
2	5	350	7.830	20.505
		400	4.867	21.180
		450	1.320	21.993
	6	350	12.860	21.810
		400	10.764	22.289
		450	8.385	22.831
	7	350	16.956	23.336
		400	15.296	23.711
		450	13.519	22.099

有利于轻质异纤的有效剔除。出棉口底部呈连续橙红色带状分布，峰值速度达到 21.908 m/s，说明主气流与补风充分耦合，形成连续、高速、方向一致的输送通道，从而提高籽棉输送效率。近壁区域仅呈现正常的速度梯度，未出现回流、涡旋或低压区，速度矢量与通道轮廓贴合良好，流动一致性与指向性突出，剪切层与近壁加速区边界清晰。相比其他角度组合，该参数配置最接近理论工艺要求，兼顾除杂效率与流场稳定性。

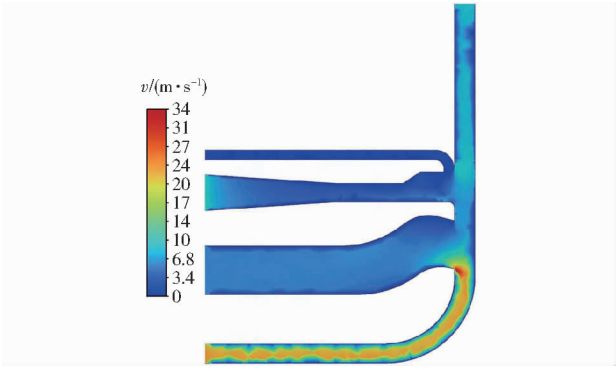


图 7　除杂补风口及出棉补风口最优速度下的速度云图

Fig. 7　Velocity contour of impurity removal auxiliary tuyere and cotton outlet auxiliary tuyere at optimal velocity

3.2.3　出棉补风口角度对出棉口速度的影响

出棉补风口的角度 α（如图 8 所示）对出棉口区域的气流速度分布具有显著影响。为探究其最优角度设置，在保持补风速度和出口压差恒定的条件下，将角度 α 设定为 0°～40°，以 5°为步长设计 9 组工况。借助有限元计算软件对各工况下的流场特性进

行数值仿真,分析补风口角度变化对出棉口区域气流速度分布的影响规律,寻求最优角度。

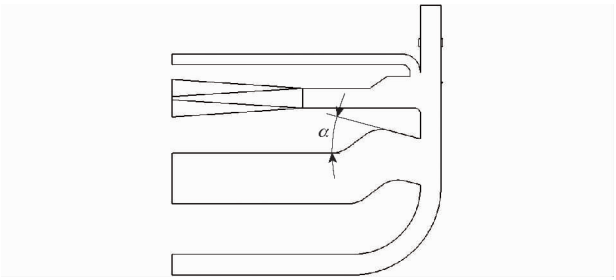


图 8 出棉补风口角度 α 设定

Fig. 8 Definition of auxiliary tuyere angle for cotton discharge inlet

图 9 为气送式籽棉异纤除杂装置出棉补风口角度为 0°~40°时的流场速度迹线分布。由图可知,不同补风角度下的气流分布特性存在明显差异。0°时,气流主要贴附通道下壁和补风口区域流动,上壁附近气流动能不足,形成明显的回流区和涡旋;角度增加至 5°时,气流整体有所上移,上壁涡旋区域略有减小,但改善有限;当角度继续增大至 10°时,气流进一步向通道中部偏移,上壁回流范围减小,流速分布趋于均匀,但下壁区域仍存在较明显的气流集中现象。角度增至 15°时,通道截面内气流分布趋于上下均衡,上壁区域涡旋和回流显著减弱,流动阻力明显降低,流线平滑、能量损失较小,通道内整体呈连续、方向性良好的输送形态。角度增至 20°时,气流明显偏向通道上壁区域,尽管上壁区域流速提升,但通道下壁与补风口区域的气流供给明显不足,局部回流现象复现,均匀性下降;角度达到 25°时,上壁区域气流集中程度进一步加剧,下壁区域供风严重不足,导致上部回流范围扩大,流场均匀性明显下降。当角度达到 30°及以上时,通道内流场分布进一步恶化。30°时,上壁回流区明显扩大,下壁区域有效气流急剧减少,流场整体紊乱程度明显增加;35°时,上壁区域涡旋与回流进一步增强,下壁气流趋于停滞状态,气流阻力急剧增大;而在 40°条件下,上壁区域回流和涡旋现象最为严重,通道主流区气流组织完全被破坏,流动性能最差。综合分析得出补风口角度为 15°时流场特性最佳,能够实现籽棉输送过程的顺畅性和高效性。后续工作以补风口角度取 15°为基础展开。

为获得各角度下的定量分析结果,利用有限元计算软件的表面积分功能分别计算除杂口与出棉口

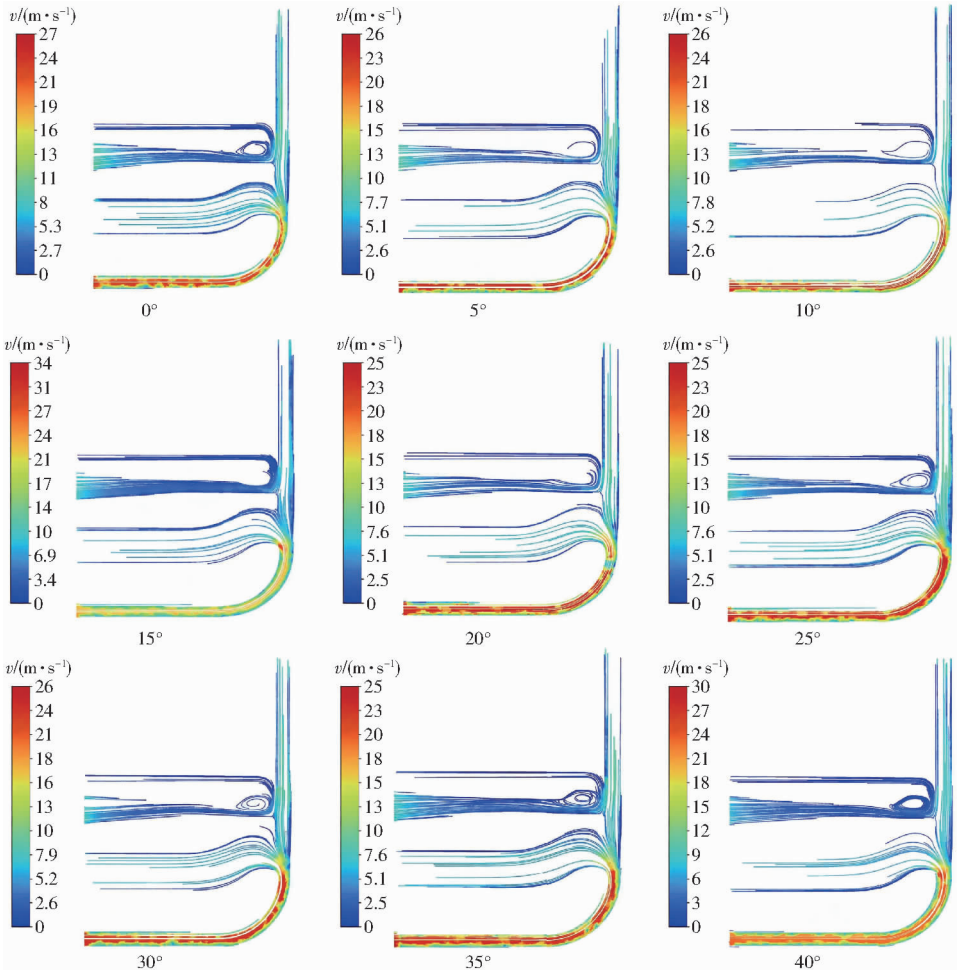


图 9 不同出棉补风口角度下流场速度迹线图

Fig. 9 Velocity streamline diagrams at different angles of cotton outlet auxiliary tuyere

截面的平均速度，图 10 显示不同补风角度对气流速度分布的影响规律。当补风口角度从 0°增加到 15°时，出棉口平均速度从 21.908 m/s 逐步升高到最高值 22.442 m/s，而除杂口速度则从 10.109 m/s 持续降低至最低值 7.868 m/s。15°工况下，出棉口速度达到峰值，有效提升籽棉输送能力并降低了堵塞风险；同时，除杂口速度达到最低值，能有效抑制杂质回流。随着角度进一步增大（超过 15°），出棉口速度有所下降并逐渐收敛约 22.274 m/s 左右，而除杂口速度则小幅回升后收敛至约 8.6 m/s 左右。通过图 10 的数据量化分析进一步验证了补风口角度为 15°时系统整体性能最优，能够在确保籽棉高效输送的同时显著提高除杂效果，作为系统后续研究的最佳运行角度配置。

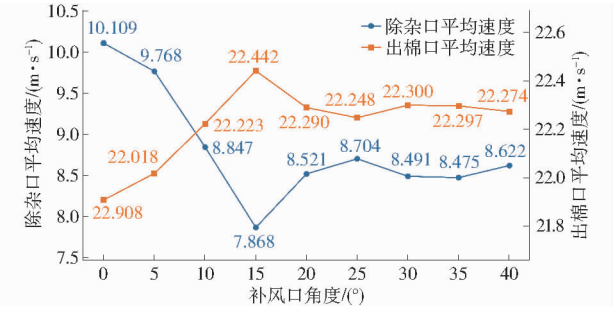


图 10　不同补风角度下出口速度变化曲线

Fig. 10　Outlet velocity at different auxiliary tuyere angles

3.2.4　方形管道内气流的速度分布

考虑到边界层效应[28]对气流分布的影响，本研究在距异纤除杂口（方接圆圆面端部）约 650 mm 处设置测量截面 plane01，并划分为靠近左壁区域（plane011）、管道中心区域（plane013）及中间过渡区域（plane012），提取截面不同区域的气流平均速度，相关位置见图 11，速度分布结果见表 4。

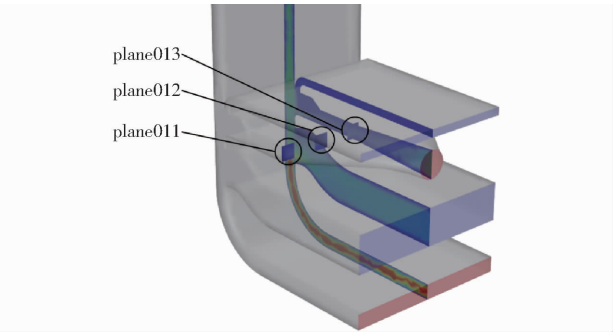


图 11　速度截面位置图

Fig. 11　Velocity cross-section locations

从表 4 可知，在相同除杂口速度条件下，管道中心区域（plane013）与中部区域（plane012）的气流速度整体较高，且数值接近，波动较小，而靠近管壁的 plane011 区域气流速度明显偏低，显示出显著的边界层影响。例如，在最大出口速度为 10.109 m/s 的

表 4　除杂口前端速度分布

Tab. 4　Velocity distribution in front of impurity removal outlet

除杂口速度/(m·s⁻¹)(outlet1)	除杂口前端速度/(m·s⁻¹)		
	plane011	plane012	plane013
10.109	1.899	2.618	2.532
9.768	1.862	2.815	2.801
8.847	1.634	2.480	2.515
7.868	1.459	2.124	2.140
8.521	1.378	2.172	2.185
8.704	1.494	2.544	2.371
8.491	1.689	2.193	2.367
8.475	1.204	2.311	2.354
8.622	1.606	2.195	2.299

工况下，中心区域（plane013）气流速度达 2.532 m/s，而靠近管壁的 plane011 仅为 1.899 m/s，速度衰减幅度超过 33%，表明壁面黏性效应显著削弱了局部动能，造成能量损耗并加剧流场的非均匀性。随着除杂口速度的变化，3 个截面区域的速度呈现出一致的变化趋势，流动响应稳定，具备一定的抗扰性能，体现了设计结构的稳态适应能力。另外，中心区域的气流动能更为充沛，有利于异纤的连续输送与集中剔除，而靠近管壁的区域因气流速度不足，异纤驱动能力下降，存在一定滞留和剔除效率降低的风险。

4　籽棉异纤除杂系统性能验证

在完成对除杂补风口与出棉补风口风速参数优化、补风角度影响分析以及方形管道内气流分布特性的研究后，将上述仿真分析成果应用于实际设备的设计与制造过程。通过结构优化与参数集成，完成了气送式籽棉除杂装置结构设计与制造。

图 12 所示为籽棉除杂系统整体实物图，籽棉除杂系统的滚筒式籽棉重杂清理装置兼具籽棉打散功能，有利于籽棉在进入异纤识别环节前实现均匀铺展，提高了后续异纤检测与剔除的准确性与效率。本研究设计优化的核心部分——气送式籽棉异纤除杂装置，是异纤精准高效分离的关键装置。

图 13 展示了气送式籽棉异纤除杂装置的结构细节。该装置主体为矩形截面管道结构。设备顶部设置籽棉入口（Inlet1），与下方除杂补风口（Inlet2）和出棉补风口（Inlet3）构成阶梯式流道结构，以有效实现气流与棉流的分层引导。除杂口（Outlet1）设置于设备左侧，通过直径为 200 mm 的圆形管道连接外部杂质收集系统，实现异纤的高效排出；出棉口（Outlet2）位于设备底部末端，与主气流通道相连，形成顺畅的籽棉输送路径；补风口倾角设为 15°，以



图 12 籽棉除杂系统整体实物图

Fig. 12 Overall physical view of seed cotton impurity removal system

1. 滚筒式籽棉重杂清理装置 2. 气送式籽棉异纤除杂装置

强化主通道内气流的有序分布与流动一致性,提升异纤分离与输送效果。

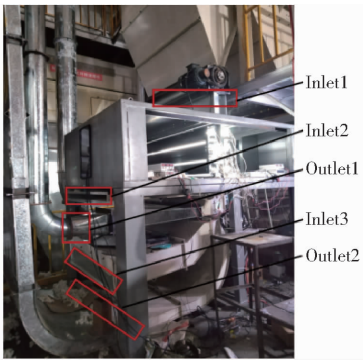


图 13 气送式籽棉异纤除杂装置

Fig. 13 Pneumatic foreign fiber removal device for seed cotton

图 14 进一步展示了喷嘴组件和工业相机的布置细节。共设置了 22 个直径为 5 mm 的圆柱形喷嘴,沿管道横向等距排列,确保精准覆盖目标区域。在实际运行中,工业相机实时拍摄棉流图像,系统利用内置的图像处理算法对异纤进行精确识别与定位,随后控制相应位置的喷嘴,通过高速气流将异纤从棉流中分离。喷嘴的直径及间距设计则充分考虑了气流扩散规律和杂质受力特性,防止喷吹重叠干扰及异纤遗漏。

设计中充分考虑气流与棉流的动态耦合关系,通过仿真分析优化了气流控制与流道通畅性,合理配置入棉口、除杂补风口、出棉补风口的速度参数与补风口角度,为设备构建中关键结构设计与运行参数选择提供了有力支持。采用本研究优化后的参数设置,在新疆奎屯银力棉油机械有限公司的籽棉加工产线完成验证,设备可处理含杂籽棉约 4 t/h,异纤剔除效率达 90% 以上。该结果为关键结构尺度与运行参数的确定提供了量化依据。

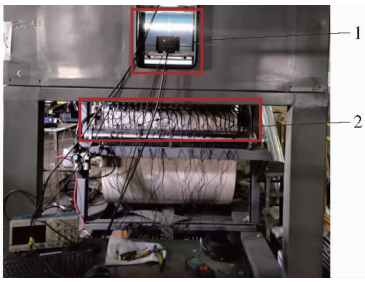


图 14 喷嘴和工业相机布置

Fig. 14 Arrangement of nozzle and industrial camera

1. 工业相机 2. 喷嘴组件

5 结论

(1)围绕气送式籽棉异纤除杂装置的结构参数,系统开展了建模、仿真与样机验证工作。结果表明,设定除杂补风口风速为 1 m/s、出棉补风口风速为 6 m/s、出口压差约 400 Pa、补风角度取 15°时系统综合性能最优。管道内部仅在靠近壁面区域存在轻微速度衰减,整体流场均匀性和方向性良好。在此参数组合下,回流与小尺度涡旋被有效抑制,剪切层边界清晰、沿程压降较小,速度矢量与通道轴向高度一致,使主通道流动更为平顺、输送连续性更强、堵塞风险显著降低。

(2)流场中,同一水平截面上,除杂口前方中心与近壁速度存在明显差异,核心区动量充足,异纤可随主流稳定穿越识别与喷吹窗口;近壁区速度偏低,易发生滞留或拖曳,削弱局部剔除效率。中心到近壁的速度梯度构成相对稳定的剪切层;若补风量或出棉补风口角度处理不当,易在近壁诱发二次回流。因而应优先针对近壁区域优化补风与导流设计(如方接圆过渡、圆角或倒角、边界层网格与表面光顺),抑制边界层增厚降低近壁分离风险。

(3)基于仿真优化结果研制的样机,在新疆奎屯银力棉油机械有限公司的籽棉加工产线完成验证;运行时设备状态(流场连续性、无异常回流与堵塞)与预测一致。在处理含杂籽棉条件过程中,设备处理能力约 4 t/h、异纤剔除率大于等于 90%,满足生产要求,进一步证明了本研究的有效性。

参 考 文 献

[1] PIRNAZAROV A. Design and development of seed cotton pre-cleaner machinery[J]. Engineering, 2021, 13(12): 656 - 666.

[2] SUI R. Use of pressured-air for cotton lint cleaning[J]. Journal of Agricultural Science, 2024, 12(1): 1 - 31.

[3] FEI Y, LI Z, WANG D, et al. The rapid detection of foreign fibers in seed cotton based on hyperspectral band selection and a

lightweight neural network[J]. Agriculture, 2025, 15(10): 1088.
[4] 张成梁,李蕾,董全成,等.机采棉加工过程智能控制与试验优化[J].农业机械学报,2017,48(4):73-81.
ZHANG Chengliang, LI Lei, DONG Quancheng, et al. Intelligent control and optimization experiment of machine-harvested cotton processing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(4):73-81. (in Chinese)
[5] HU M J, XIA J F, ZHOU M K, et al. Design and experiment of seedcleaning mechanism for insidefilling pneumatic cotton precision seedmetering device[J]. Agriculture, 2022, 12(8): 1217.
[6] MAKHLIYO S, RUSTAM M. Methods for increasing the efficiency of cleaning the transfer device[J]. Engineering, 2022, 14(1): 54-61.
[7] 王兆国,冯显英,王昊鹏.籽棉清理漏斗形重杂分离器的参数优化与试验[J].农业工程学报,2016,32(21):30-36.
WANG Zhaoguo, FENG Xianying, WANG Haopeng. Parameter optimization and experiment of funnel-shaped heavy impurity separator in seed cotton cleaning process[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(21): 30-36. (in Chinese)
[8] WANG P, WANG H, ZHANG R, et al. Numerical simulation of an online cotton lint sampling device using coupled CFD-DEM analysis[J]. Agriculture, 2024, 14(1): 127.
[9] GROSSHANS H, JANTAC S. Recent progress in CFD modeling of powder flow charging during pneumatic conveying[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 455: 140918.
[10] 吴杰,梅卫江,毕新胜,等.提净式机采长绒棉清理机设计与试验[J].农业工程学报, 2025,41(7):407-416.
WU Jie, MEI Weijiang, BI Xinsheng, et al. Design and experiment of the stripper and stick cleaner for machine-harvested sea island cotton[J]. Transactions of the CSAE, 2025,41(7):407-416. (in Chinese)
[11] 钱成.集聚纺集聚区内流场分布及纤维运动轨迹模拟分析[D].无锡:江南大学,2020.
QIAN Cheng. Simulation and analysis of flow field distribution and fiber trajectory in aggregation region of compact spinning [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020. (in Chinese)
[12] 董全成,冯显英.基于 CFD 离散相模型的气流式皮棉清理机参数优化[J].农业工程学报,2014,30(2):9-16.
DONG Quancheng, FENG Xianying. Parameters optimization of flow-through air lint cleaner based on CFD discrete phase model[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(2): 9-16. (in Chinese)
[13] VISHWANATH N, SARAVANAKUMAR A K, DWIVEDI K, et al. A 3D numerical investigation into the effect of rounded corner radii on the wind loading of a square cylinder subjected to supercritical flow[J]. Wind and Structures, 2022, 35(1): 55-66.
[14] 米百刚.基于 CFD 的动导数计算及非线性气动力建模技术[D].西安:西北工业大学,2018.
MI Baigang. Calculating dynamic derivative and modeling nonlinear unsteady aerodynamics based on CFD[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2018. (in Chinese)
[15] 宗超勇.基于流固耦合分析的弹簧式安全阀动态非稳定性研究[D].大连:大连理工大学,2021.
ZONG Chaoyong. Research on dynamic instabilities of spring-loaded pressure safety valves based on fluid-structure interaction analysis[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021. (in Chinese)
[16] 黄炎,赵满全,黄鹏飞.前置式双圆盘割草机主轴有限元分析——基于 ANSYS Workbench[J].农机化研究,2013,35(8):26-29,34.
HUANG Yan, ZHAO Manquan, HUANG Pengfei. Finite element analysis of main shaft of front dual disc mower—based on ANSYS Workbench[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013,35(8):26-29,34. (in Chinese)
[17] 李萍南.机采棉清杂场棉杂运动特性与可视化研究[D].塔里木:塔里木大学,2024.
LI Pingnan. Research on the movement characteristics and visualization of cotton impurities in machine picking and cleaning field[D]. Tarim: Tarim University, 2024. (in Chinese)
[18] 田虎楠,王春耀,王学农,等.采棉机气力输棉系统内部流场的数值模拟研究[J].农机化研究,2011,33(12):28-31.
TIAN Hunan, WANG Chunyao, WANG Xuenong, et al. Cotton-picking machine pneumatic conveyance cotton system of internal flow field numerical simulation[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011,33(12):28-31. (in Chinese)
[19] 刘冠华,王国权.基于 Fluent 的脚制动阀流场仿真分析[J].计算机仿真,2024, 41(12): 214-221.
LIU Guanhua, WANG Guoquan. Flow field simulation analysis of foot brake valve based on Fluent[J]. Computer Simulation, 2024, 41(12): 214-221. (in Chinese)
[20] NOGUCHI H. Angular-momentum conservation in discretization of the Navier-Stokes equation for viscous fluids[J]. Physical Review E, 2019, 99(2): 023307.
[21] ZHANG Yichi, DING Yangyao, CHRISTOFIDES D P. Multiscale computational fluid dynamics modeling of thermal atomic layer deposition with application to chamber design[J]. Chemical Engineering Research & Design, 2019, 147:529-544.
[22] 屈春叶,张乾,何小强.基于 CFD 的超高压喷油嘴空化特性正交优化研究[J].现代制造工程,2025(2):151-160.
QU Chunye, ZHANG Qian, HE Xiaoqiang. Orthogonal optimization study on cavitation characteristics of ultra-high pressure fuel injectors based on CFD[J]. Modern Manufacturing Engineering,2025(2):151-160. (in Chinese)

(下转第 316 页)

54(10): 348 - 355.
LI Tiecheng, ZHANG Zhongxue, ZHANG Zuohe, et al. Effects of nitrogen fertilizer reduction under water-saving irrigation on NH_3, N_2O emissions and absorption of nitrogen fertilizer in black soil paddy fields[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 348 - 355. (in Chinese)
[17] 陈宇,程瑞锋,柯昊纯,等. 苗期供液模式对植物工厂水培生菜生长的影响[J]. 农业工程学报, 2025, 41(9): 183 - 190.
CHEN Yu, CHENG Ruifeng, KE Haochun, et al. Effects of irrigation mode on the growth of hydroponic lettuce in plantfactory [J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(9): 183 - 190. (in Chinese)
[18] 赵霞,徐春梅,王丹英,等. 根际溶氧量对分蘖期水稻生长特性及其氮素代谢的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(18): 3733 - 3742.
ZHAO Xia, XU Chunmei, WANG Danying, et al. Effect of rhizosphere oxygen on the growth characteristics of rice and its nitrogen metabolism at tillering stage[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(18): 3733 - 3742. (in Chinese)
[19] KUMAR K. Competitive adaptive reweighted sampling assisted partial least square analysis of excitation-emission matrix fluorescence spectroscopic data sets of certain polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2021, 244: 118874.
[20] JIANG H, XU W, DING Y, et al. Quantitative analysis of yeast fermentation process using Raman spectroscopy: comparison of CARS and VCPA for variable selection[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2020, 228: 117781.
[21] 张雨晴,王克俭,司永胜,等. 基于 Si - VISSA 特征波长选择的羊肉掺假检测方法[J]. 河北农业大学学报, 2024, 47(5): 109 - 115.
ZHANG Yuqing, WANG Kejian, SI Yongsheng, et al. Detection method of mutton adulteration based on Si - VISSA characteristic wavelength selection[J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2024, 47(5): 109 - 115. (in Chinese)
[22] 常洪娟,蒙庆华,吴哲锋,等. 基于反向传播神经网络和高光谱成像的芒果可溶性固形物含量检测[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(2): 141 - 148.
CHANG Hongjuan, MENG Qinghua, WU Zhefeng, et al. Detection of soluble solids content in mango based on backpropagation algorithm neural network and hyperspectral imaging[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(2): 141 - 148. (in Chinese)
[23] FU Y, HONG Y, CHEN L, et al. LE - GAN: unsupervised low-light image enhancement network using attention module and identity invariant loss[J]. Knowledge-Based Systems, 2022, 240: 108010.
[24] WOO S, PARK J, LEE J Y, et al. Cbam: convolutional block attention module[C]// Proceedings of the Proceedings of the European Conference on Computer Vision(ECCV), 2018: 3 - 19.
[25] HU J, SHEN L, SUN G. Squeeze-and-excitation networks[C]// Proceedings of the Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2018: 7132.

(上接第 273 页)

[23] 胡博,刘尧,张勇军,等. 基于 EDEM - FLUENT 耦合的脱水蔬菜烘干机内部风道仿真设计[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(12): 116 - 126, 147.
HU Bo, LIU Yao, ZHANG Yongjun, et al. Simulation design of internal air duct of dehydrated vegetable dryer based on EDEM - FLUENT coupling[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(12): 116 - 126, 147. (in Chinese)
[24] BOLOBOV V, MARTYNENKO Y, YURTAEV S. Experimental determination of the flow coefficient for a constrictor nozzle with a critical outflow of gas[J]. Fluids, 2023(8): 169.
[25] WEISS S, MICKAN B, POLANSKY J, et al. Improved prediction of the flow in cylindrical critical flow venturi nozzles using a transitional model[J]. Flow, Turbulence and Combustion, 2024, 113(2): 363 - 389.
[26] 孙戬,姜博艺,张守京,等. 棉纺异纤分拣机废棉通道结构的优化仿真[J]. 棉纺织技术, 2022, 50(11): 28 - 31.
SUN Jian, JIANG Boyi, ZHANG Shoujing, et al. Optimization and simulation of waste cotton channel structure in cotton spinning foreign fiber sorter[J]. Cotton Textile Technology, 2022, 50(11): 28 - 31. (in Chinese)
[27] 刘重晓,王江峰. 滑移流区化学非平衡流中气动热环境的数值模拟[J]. 航空学报, 2023, 44(16): 106 - 119.
LIU Chongxiao, WANG Jiangfeng. Numerical simulation of aero-heating in slip flow regime with chemical non-equilibrium[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(16): 106 - 119. (in Chinese)
[28] 聂雪媛,刘中玉,黄程德,等. CFD/CSD 方法分析动力效应对民机气动特性影响[J]. 航空动力学报, 2017, 32(7): 1631 - 1638.
NIE Xueyuan, LIU Zhongyu, HUANG Chengde, et al. Analysis of civil aircraft aerodynamic characteristics with powered effects based on CFD/CSD method[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(7): 1631 - 1638. (in Chinese)