

自动测量式风蚀仪集沙效率影响因素数值模拟与试验

施继红¹ 刘贞彤¹ 孟宪章¹ 黄东岩¹ 关义新² 敖 曼²

(1. 吉林农业大学工程技术学院, 长春 130118; 2. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102)

摘要: 为提高风蚀仪集沙效率, 准确掌握风沙运动规律, 采用计算流体力学仿真方法并结合风洞试验分析风蚀仪内部风沙分离器结构参数对集沙效率的影响。在 Fluent 平台中建立风沙分离器模型, 基于 RNG $k-\varepsilon$ 模型进行数值分析, 并采用离散相模型 (DPM) 方法计算集沙效率, 完成风蚀仪内部相关颗粒动力学模拟。将风蚀仪从楔形改进为圆柱形, 优化了风蚀仪结构, 提高了集沙效率。研究了进气管入口风速、沙尘颗粒粒径与风沙分离器结构参数 (进气管长度、排气管内插深度、锥形导流板锥角、筒体长度) 对集沙效率的影响。仿真结果表明, 当风速为 13.8 m/s 时, 粒径小于 0.01 mm 沙尘是影响集沙效率的主要粒子。对风沙分离器结构参数进行单因素试验, 优选出试验因素范围, 开展 Box-Behnken 试验对参数进行优化取值, 得到最优参数组合: 进气管长度为 12 mm、排气管内插深度为 70 mm、锥形导流板锥角为 40°、筒体长度为 160 mm, 此时集沙效率为 77.05%。按最优参数组合加工风蚀仪模型并进行风洞试验, 得到集沙效率为 74.38%, 与仿真结果的误差为 3.47%, 相较常见楔形风沙分离器具有更好的集沙效果。

关键词: 风蚀仪; 风沙分离器; 数值模拟; 参数优化; 集沙效率

中图分类号: S237

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298 (2025) 04-0139-12

OSID:



Numerical Simulation and Test of Factors Affecting Sand Collection Efficiency of Automatic Measuring Wind Erosion Meter

SHI Jihong¹ LIU Zhentong¹ MENG Xianzhang¹ HUANG Dongyan¹ GUAN Yixin² AO Man²

(1. College of Engineering and Technology, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China

2. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China)

Abstract: In order to improve the sand collection efficiency of the wind erosion instrument and accurately grasp the sand movement law, the influence of structural parameters of the wind sand separator inside wind erosion instrument on the sand collection efficiency was analyzed by using computational fluid dynamics (CFD) simulation method and combined with the wind tunnel test. The wind-sand separator model was established in Fluent platform, numerical analysis was carried out based on RNG $k-\varepsilon$ model, and the discrete phase model (DPM) method was used to calculate the sand collection efficiency and complete the simulation of the related particle dynamics inside the wind erosion instrument. The wind erosion meter was improved from wedge shape to cylindrical shape, which optimized the structure of the wind erosion meter and improved the sand collection efficiency. The effects of the inlet wind speed of inlet pipe, the particle size of sand particles and structural parameters of wind-sand separator (length of the inlet pipe, depth of the exhaust pipe insertion, cone angle of the conical deflector plate, and the length of the cylinder) on the sand-collecting efficiency were investigated. The simulation results showed that when the wind speed was 13.8 m/s, the particle size less than 0.01 mm was the main particle that affected the sand collection efficiency. The structural parameters of the wind-sand separator were subjected to a single-factor test, the level range of the test factors was preferred, and the Box-Behnken test was carried out to optimize the values of the parameters to obtain the optimal parameter combinations: the length of the inlet pipe was 12 mm, the depth of the exhaust pipe insertion was 70 mm, the cone angle of the conical deflector plate was 40°, the length of the cylinder was 160 mm, and the sand-collecting

收稿日期: 2024-12-09 修回日期: 2025-01-13

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFD1500404)

作者简介: 施继红 (1971—), 女, 副教授, 主要从事黑土地保护性耕作技术与装备研究, E-mail: 1422069908@qq.com

通信作者: 孟宪章 (1970—), 男, 高级实验师, 主要从事农业智能装备工程研究, E-mail: jlnydx2009@163.com

efficiency was 77.05%. According to the optimal parameter combination, the wind erosion instrument model was processed and wind tunnel test was carried out, and the sand collection efficiency was 74.38%, and the error with the simulation results was 3.47%, which was better than the common wedge-shaped wind sand separator with better sand collection effect.

Key words: wind erosion meter; wind sand separator; numerical simulation; parameter optimization; sand collection efficiency

0 引言

风蚀是土地荒漠化的主要成因之一,也是人类所面临的重大环境问题^[1]。据第三次水土流失普查结果显示,中国风蚀总面积为 $1.957\,0 \times 10^6\text{ km}^2$, 占国土总面积的 20.6%^[2], 主要分布在内蒙古、吉林、西藏等 14 个省(自治区),风蚀面积合计 $1.655\,9 \times 10^6\text{ km}^2$ ^[3]。吉林省是我国荒漠化面积较大且受风沙灾害较重的省份之一^[4]。

风蚀研究的关键是风蚀量的收集测量,土壤风蚀量的野外测量方法有多种,但由于没有统一的标准,难以对风蚀的研究结果进行比较与集成^[5-6]。多年来,国内外学者致力于研究和设计新型风蚀采集仪器。BAGNOLD^[7]设计了首台集沙仪后,多种类型的集沙仪相继问世。GREELEY 等^[8]设计的楔形集沙仪可采集垂直面不同高度的土壤颗粒,但其未设旋转导向装置,仅适用于风洞试验。集沙效率是评估风蚀采集效果的关键指标,而提高集沙效率最有效的方法是保证风沙在集沙单元内部有效分离。随着流体动力学的发展,数值模拟技术已成为研究模型和结构优化的重要工具。Fluent 软件具有灵活的网格特性,可对几何体进行结构和非结构网格划分^[9]。侯建龙^[10]基于 Fluent 平台,采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型对高压系统中的旋风分离器进行了研究。赵立正等^[11]研究了排气管直径、插入深度对旋风分离器性能的影响,SUN 等^[12]采用响应面法对 Stairmand 型旋风分离器进行了结构优化。宋涛^[13]以强风作用时起沙的最大风速 13.8 m/s 作为模拟风速,研究了风力对测重传感器扰动和风沙内部高效分离问题。

综上,本文设计一种自动测量式风蚀仪,并在常见楔形结构基础上,建立一种圆柱形风蚀仪物理模型,采用数值模拟对比二者的集沙效率。针对改进后风蚀仪的流场分布规律及集沙效率影响因素不明确的问题,采用 CFD-DPM 方法对风蚀仪进气管入口风速、颗粒粒径范围进行优选。通过单因素及 Box-Behnken 试验对风沙分离器结构参数进行优化,得到最优参数组合。按最优参数组合加工模型并进行风洞试验,通过对比数值模拟与风洞试验结果检验结构优化设计效果,以提高集沙效率,为深入

研究风沙分离规律奠定基础。

1 数值计算模型与计算方法

1.1 风蚀仪整体结构与工作原理

风蚀仪整体结构主要由导向板、旋转轴、支撑柱、集沙单元固定杆、集沙单元和固定底座等部件构成。如图 1 所示,5 个集沙单元等间距地通过旋转轴转动安装在支撑柱上,且集沙单元的转动方向相同,导向板安装在支撑柱顶端,固定底座与预埋件相连并深埋于地下。

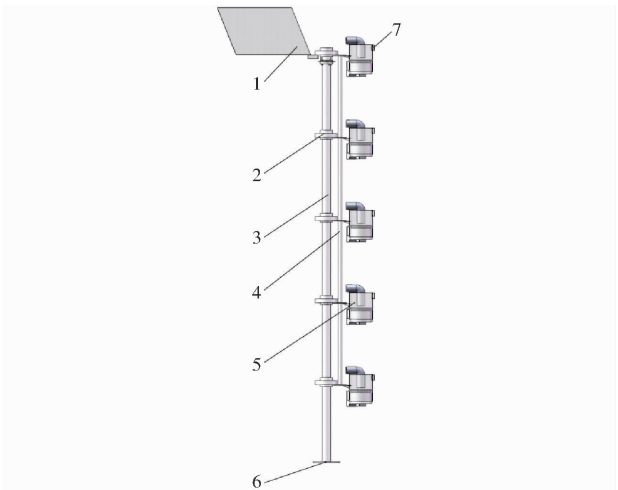


图 1 风蚀仪整体结构图

Fig. 1 Overall structure diagram of wind erosion meter

1. 导向板 2. 旋转轴 3. 支撑柱 4. 集沙单元固定杆 5. 集沙单元 6. 固定底座 7. 进沙口

当风蚀仪处于风沙流环境中,导向板会受风力吹动产生转动。在导向板、旋转轴以及集沙单元固定杆的共同作用下,各个高度的集沙单元同步同向旋转,使风蚀仪的各个进沙口始终对准来风方向。这可以在单点采集不同高度的沙样,减少排列不均的问题,提高风沙收集效率,满足风蚀仪在强风状态下工作的稳定需求。

1.2 风蚀仪关键部件设计

1.2.1 旋转导向装置设计原理

为实现风蚀仪在野外试验中的应用,并使其能够实时对准风沙流方向,设计了如图 2 所示的旋转导向装置。该装置由导向板、方形连接架和旋转轴组成。三者通过紧固连接,将风给予导向板的作用力传递给旋转轴,各个高度旋转轴带动同高度的集

沙单元实现风蚀仪整体结构随风向同向转动,减少观测误差。

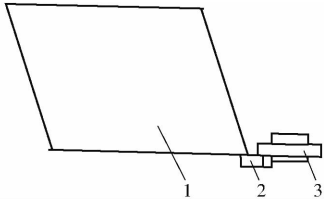


图 2 旋转导向装置结构示意图

Fig. 2 Schematic of structure of rotary guide

1. 导向板 2. 连接架 3. 旋转轴

导向板设计为平行四边形,当导向板未能正对气流方向时,会使得导向板上产生风压,垂直于导向板尾部的风压则会产生风压力矩使得导向板转动;当导向板正对风向时,其两侧的风压处于平衡状态则风蚀仪稳定下来并对准风沙流来流方向。

导向板两侧风压处于不平衡状态时的受力计算如下。

(1) 摩擦力矩

摩擦力矩计算式为

$$M = \mu P_2 d / 2 \tag{1}$$

式中 μ ——轴承摩擦因数,取 0.001 ~ 0.001 5

P_2 ——载荷, N

d ——轴承内径, mm

对加工好的风蚀仪进行称量,得到其总质量为 6.173 kg,轴承内径 $d = 21$ mm,代入式(1)得

$$M = 0.001\,5 \times 60.495\,4 \times 21 / 2 = 0.953\,\text{N} \cdot \text{mm}$$

因此,当导向板平板所受力矩达到 0.953 N·mm 时,风蚀仪才会转动。

(2) 风速与风压

通过伯努利方程得出风速-风压关系式为

$$P_1 = P_0 - P_3 = 0.5 r_1 v^2 / g \tag{2}$$

式中 r_1 ——空气重度,标准状态下取 12.25 N/m³

v ——风速, m/s

g ——重力加速度,取 9.8 m/s²

P_0 ——停滞点压力(总压), Pa

P_3 ——未受扰动的静压(通常为大气压), Pa

通过风压系数公式 $k_1 = 0.5 r_1 / g$ 可得

$$P_1 = k_1 v^2 \tag{3}$$

(3) 风蚀仪启动风速

我国风压系数 $k_1 = 1/16 \sim 1/26$,取 $k_1 = 1/16$,可得导向板平板受力为

$$F_1 = P_1 S_2 = \frac{1}{16} v^2 S_2 \tag{4}$$

式中, S_2 为导向板平板受力面积,约为 0.087 4 m²。实际测得导向板平板重心到旋转轴的距离 $L_2 = 115$ mm,只有满足 $F_1 L_2 > M$ 时,风蚀仪方能转动。

通过式(4)转换可得

$$v > \sqrt{\frac{0.953 \times 16}{115 \times 0.087\,4}} = 1.52\,\text{m/s}$$

由以上计算可知,理论上导向板平板所受风速超过 1.52 m/s 时,风蚀仪方能转动。风蚀仪转动风速远小于风蚀研究的起沙风速 6 m/s。因此,该风蚀仪启动风速满足试验要求。

1.2.2 集沙单元结构与工作原理

风蚀仪集沙单元包括上部风沙分离器和下部测量单元。风沙分离器形态和构造各不相同,但其基本原理一致^[14]。通过设计不同结构风沙分离器可以降低仪器内风沙流携沙能力,实现气固高效分离,提高集沙效率。

圆柱形风蚀仪突破了常见楔形集沙结构限制,创新设计了风沙分离器内部结构及自动测量系统,提高了风蚀仪集沙效率。风沙分离器由进气管、排气管、锥型导流板、外壳组成;测量单元包括收集盒、测量传感器和传感器固定支架,具体结构如图 3 所示。

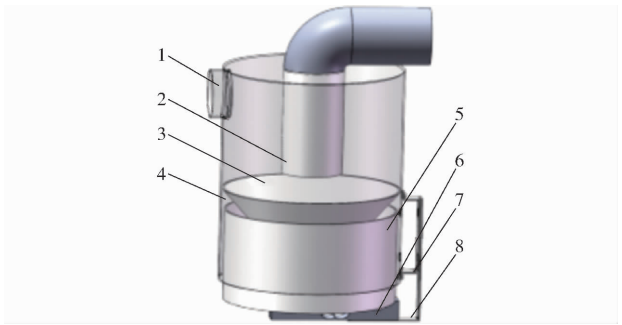


图 3 圆柱形风蚀仪集沙单元结构图

Fig. 3 Structure diagram of sand collection unit of cylindrical wind erosion meter

1. 进气管 2. 排气管 3. 锥型导流板 4. 外壳 5. 收集盒 6. 测量传感器 7. 传感器固定支架 I 8. 传感器固定支架 II

作业时,风沙流中的沙尘通过进气管入口进入集沙单元内,通过集沙单元内的风沙分离器将沙尘进行分离。当气流经过排气管外壁时被分成两股,进行圆柱绕流运动后下行至锥形导流板,受锥形特殊结构影响,沙尘较为集中地落入收集盒内,外壳用于防止沙尘外漏。气体从排气口排出,沙尘落入收集盒,由测量传感器对收集盒中的沙尘进行自动测量。

集沙单元能够根据需要调整收集位置,进行风蚀自动测量。测量传感器可实时监测同一地点不同高度的风蚀情况及沙尘含量,确保数据的准确性与可靠性,提高风蚀测定的范围和精度,避免了目前在风沙采集过程中需人工取下收集盒并称量,导致集沙效果不连续、不能完整表达风蚀过程的问题,节省

人力,提高收集效率,适合农田土壤风蚀长期监测。

1.3 数值模型

1.3.1 边界条件设置

边界条件对模拟风沙分离器中气体流动十分重要^[15-17]。数值模拟计算中选取的流体计算流域为集沙单元中的风沙分离器结构,风沙分离器内部是空气和沙尘颗粒的两相运动,而绝大部分沙尘在分离器内的运动依赖于气相运动^[18-19]。为此,需对其内部的气场流动进行更深层次的分析。在Solidworks内建立风沙分离器仿真模型,采用ICEM-CFD进行流体计算域非结构网格划分^[20]。

在Fluent环境中导入已划分好的模型进行边界条件设置,计算流体使用不可压缩空气,密度为 1.225 kg/m^3 ,粘度为 $1.8\times 10^{-5}\text{ Pa}\cdot\text{s}$,进沙口边界条件选择速度进口(velocity-inlet),排气口与出沙口边界条件选择自由流出(outflow),其余边界条件默认为壁面(wall),参考压力为标准大气压,采用RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型进行求解。水力直径 $d_1=4S_1/L_1$,其中 S_1 为进气管截面面积, L_1 为湿周。边界条件示意图如图4所示。

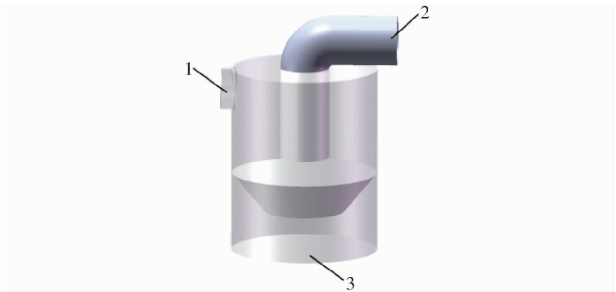


图4 边界条件示意图
Fig.4 Schematic of boundary conditions
1. 速度进口 2. 排气口 3. 排沙口

湍流强度为

$$I=0.16Re^{-\frac{1}{8}}\times 100\% \tag{5}$$

其中

$$Re=\frac{\rho vd_1}{\mu_1} \tag{6}$$

式中 Re ——雷诺数

ρ ——空气密度, kg/m^3

μ_1 ——空气粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$

由于后续风洞试验所取土样位于双辽市且春季发生风蚀的常见风速为6级风($10.8\sim 13.8\text{ m/s}$)以上,因此设置6级强风的风速极限值 13.8 m/s 作为进气管入口风速进行模拟比较合理。将各个参数代入式(5)、(6)得到湍流强度为4.45%,水力直径为 0.03 m 。

1.3.2 集沙效率对比

以捕获率来检验集沙效果,设置进气管入口风速为 13.8 m/s 进行模拟,并对模拟结果进行对比分

析。沙尘颗粒运动到排气口截面视为逃逸(escaped),运动到排沙口截面视为被收集盒捕获(trapped)。风蚀仪集沙效率 $Y^{[21]}$ 计算式为

$$Y=\frac{N_1}{N_2}\times 100\% \tag{7}$$

式中 N_1 ——排沙口捕获颗粒数量

N_2 ——进沙口跟踪颗粒数量

常见楔形风沙分离器与圆柱形风沙分离器的进沙口与排沙口形状虽有区别,但二者面积相差不大,其内流场数值模拟分布图如图5所示。由于二者水力直径基本一致,数值均为 0.03 m 左右,因此从进沙口进入的沙尘数量基本一致,具有可比性。沙尘颗粒受进沙口涡流影响,顺时针向下移动,到达分离器底部时被捕获。而未捕获的颗粒则受二次旋流影响,顺时针向上逃逸,集沙效率与一次旋流切向速度相关,速度越大,颗粒越易被捕获。

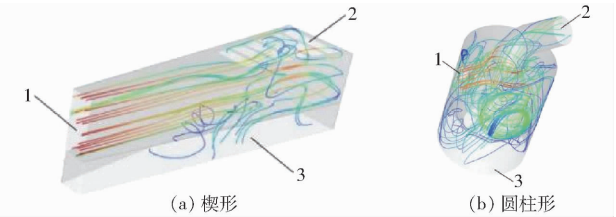


图5 风沙分离器内部流场数值模拟分布图
Fig.5 Distribution of numerical simulation of
flow field inside wind-sand separator
1. 跟踪颗粒 2. 逃逸颗粒 3. 捕获颗粒

仿真结果表明,圆柱形风沙分离器集沙效率(67.37%)高于楔形风沙分离器(48.68%)。因此,圆柱形风沙分离器分离性能更好,可在此结构基础上进行进一步研究。

2 风蚀仪集沙效率影响因素分析

风蚀仪进气管入口风速、沙尘颗粒粒径、风沙分离器结构参数均会影响风沙分离器的集沙效果。本文针对这些因素建立不同的数值模型,分析其对集沙效率的影响,进而改进风蚀仪性能,提高集沙效率。

2.1 进气管入口风速及颗粒粒径对集沙效率的影响

风力等级直接影响土壤风蚀强度^[22],根据风速与风力等级划分标准,当风速为 $5.5\sim 13.8\text{ m/s}$ (4~6级)时将产生弱沙尘暴;当风速为 $13.8\sim 20.7\text{ m/s}$ (6~8级)时为中等强度沙尘暴;当风速大于等于9级时为强沙尘暴。不同粒径的土壤颗粒在风力作用下以悬移、跃移和蠕移3种形式进行输送,造成地表细粒物质、土壤养分和有机质的大量流失^[23]。风蚀颗粒在自身重力作用下不能保持悬浮状态,在达到一定高度后会下降并返回地表。若风

力不足,颗粒会冲入地表,加剧土壤风蚀^[24]。

风沙分离器内的沙粒运动受入口风速的影响显著,但风速如何影响集沙效率还有待论证。中国科学院海陵黑土水土保持监测站近 10 年风沙监测数据显示,风速变幅为 0~24.5 m/s。研究表明^[25-26],农田临界起沙风速为 5 m/s,强风下最大起沙风速为 13.8 m/s。根据双辽当地气象条件并结合 GB/T 28591—2012《风力等级》中 3~8 级风的划分标准^[27],考虑到常见风洞试验的模拟风速和强有力的气流进入风蚀仪,不仅会干扰测量传感器,还会重新携带沙尘从排气口排出。因此,优选入口风速为 7.8、10.8、13.8、16.8、19.8 m/s,以探究不同风速下风沙分离器内流场分布规律及粒子轨迹变化。

此外,沙尘颗粒粒径对风沙分离的影响也不可忽视,比较不同粒径的沙尘颗粒在风沙分离器内的运动轨迹,有助于研究分离器的集沙效率和分离性能。英国学者 BAGNOLD^[28]发现粒径小于 0.10 mm 沙尘易以悬移形式运动,粒径为 0.10~0.15 mm 沙尘易以跃移形式运动,粒径 0.15 mm 以上沙尘易发生蠕移,文献^[29]认为,粒径 0.075 mm 以下沙尘很容易被吹离到大气中,悬移沙尘粒径一般小于 0.05 mm,跃移沙尘粒径多为 0.1~0.5 mm 且跃移颗粒为风蚀主要传输颗粒,而 0.5 mm 以上沙尘所受重力大于空气拖曳力,一般不飞离地表^[30]。文献^[31]认为,细颗粒是影响土壤风蚀的关键。结合上述研究结果及当地产生风蚀的沙尘颗粒范围,该区域最易风蚀粒径可划分为 4 个区间,分别为 0.001~0.01 mm、0.01~0.1 mm、0.1~0.5 mm、0.5~1.0 mm。

图 6 表明,入口风速相同的情况下,随着沙尘颗粒粒径增加,集沙效率也随之增大。当粒径为 0.01~0.1 mm 时,集沙效率达到最大值后减小;同一粒径范围内,随着入口风速增加,集沙效率也随之升高。当风速为 13.8 m/s 时,集沙效率达到最大值后减小。然而,当粒径为 0.5~1.0 mm 时,集沙效率随入口风速增加而减小,而粒径大于 0.5 mm 的沙尘一般不离开地表,可忽略不计。因此,综合考虑实际试验因素,仿真试验优选出进气管入口风速为 10.8~16.8 m/s,颗粒粒径为 0.001~0.5 mm,以进一步探究进气管入口风速、颗粒粒径及其他因素对集沙效率的影响。

2.1.1 不同进气管入口风速下颗粒轨迹变化

沙尘在风蚀仪内受向心力和重力影响做下旋运动,当出现碰壁现象后将不再受向心力影响,沙尘颗粒受重力影响向下坠落,一部分沙尘通过收集盒收集,一部分沙尘则继续随其他颗粒做下旋运动,直到

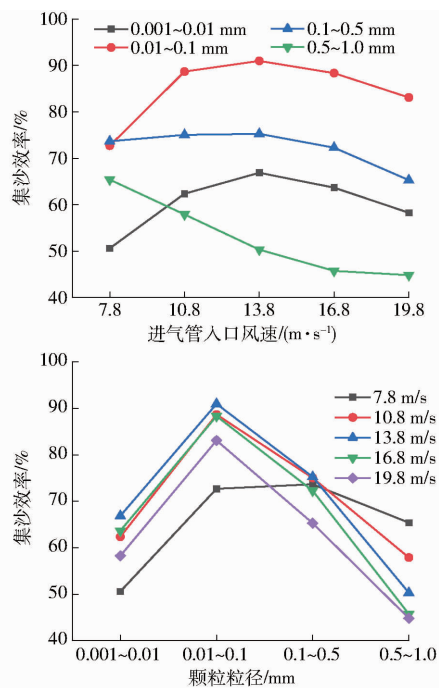


图 6 进气管入口风速及颗粒粒径对集沙效率的影响

Fig. 6 Influence of inlet wind speed and particle size on sand collection efficiency in inlet pipe

下一次碰壁现象发生。

由图 7 可知,当进气管入口风速为 10.8 m/s 时,拖曳力作用大于重力,沙粒扩散明显;当进气管入口风速为 13.8 m/s 时,沙粒在分离器内形成稳定流动的沙粒流且排气管内颗粒轨迹减少,集沙效率提高;当进气管入口风速为 16.8 m/s 时,颗粒在进气管与锥形导流板之间运动圈数明显增加,排气管内粒子轨迹再次增多,集沙效率降低。

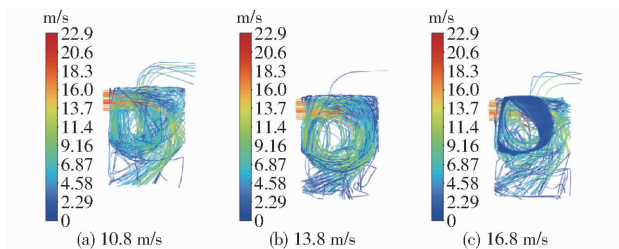


图 7 不同进气管入口速度下风沙分离器颗粒轨迹

Fig. 7 Particle trajectories of wind-sand separator at different inlet velocities of inlet pipe

由图 7 可知,随着入口风速增加,集沙效率呈先上升后下降的原因为:当入口风速增大,颗粒在旋流中受到的离心力越大,分离器内的运动圈数增多,产生的颗粒运动轨迹更加平稳,有利于气固分离。然而,当入口风速过大时,沙尘颗粒的非稳态响应将增强,从排沙口分离出来的沙粒又会被吸入分离器且难以再次分离,从而造成集沙效率下降。

2.1.2 风蚀仪内气流速度变化规律

在风沙分离器不同截面 ($z = 15\text{ mm}$ 、 $z = 70\text{ mm}$ 、

$z = 80\text{ mm}$ 、 $z = 110\text{ mm}$) 处获取数据,以探究风沙分离器内流场的分布和变化规律。

由图 8 可知,风沙分离过程中,离心力起主导作用。随着切向速度增加,颗粒所受离心力也增大,推动颗粒朝壁面运动,实现颗粒与气体的分离。在 $z = 15\text{ mm}$ 截面处切向速度变化最大,这是因为进沙口处不断有气流涌入分离器内部,气流经过排气管外壁进行圆柱绕流运动,达到速度最大值。当气流沿器壁向下移动时,切向速度随着截面位置下移而减小。由此可知,切向速度越大,集沙效率越高。

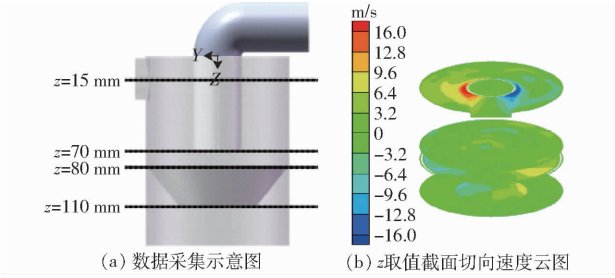


图 8 风沙分离器不同取值截面示意图及速度云图
Fig. 8 Schematic cross-section of different values of wind-sand separator and velocity clouds

图 9 为不同风速下各截面轴向速度,其横坐标为径向距离 r 与截面圆半径 R 比值。气流在 $z = 15\text{ mm}$ 截面处呈 W 形分布,轴向速度最大值在风速为 13.8 m/s 时。 $z = 70\text{ mm}$ 和 $z = 80\text{ mm}$ 截面处轴向速度呈波浪状,波谷值在中心轴处最大。在 $z = 110\text{ mm}$ 截面处,气流轴向速度呈 M 形非均匀分布,在中心轴附近出现了上行流,所有轴向速度方向均向上,这是由于高风速下气流涡旋现象明显。当风速为 13.8 m/s 时,靠近中心轴处轴向速度最大,这表明强风条件下,风沙分离器内短路流现象明显。

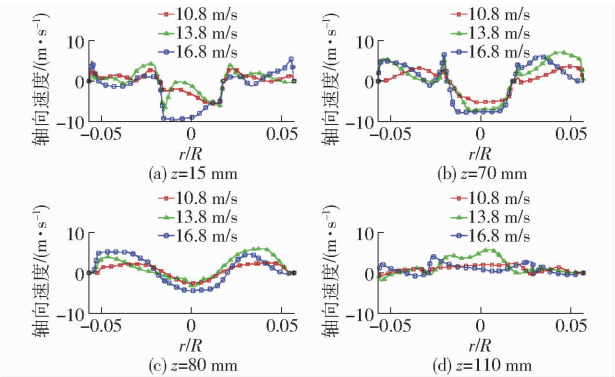


图 9 不同入口风速下各截面轴向速度变化曲线
Fig. 9 Axial velocity variation curves of each cross-section at different inlet wind speeds

总的来说,气流轴向速度变化复杂,而强风条件下 (13.8 m/s) 切向与轴向速度均有显著变化,短路流和涡流现象严重。因此,在后续仿真试验中选择 13.8 m/s 作为进气管入口风速来优化风沙分离器

结构,以提高强风条件下气流稳定性。

2.1.3 颗粒粒径对集沙效率的影响

相同风速下,不同粒径的土壤颗粒会导致集沙量产生显著差异。探究当进气管入口风速为 13.8 m/s ,粒径为 $0.001 \sim 0.01\text{ mm}$ 、 $0.01 \sim 0.1\text{ mm}$ 、 $0.1 \sim 0.5\text{ mm}$ 及固定粒径 0.01 、 0.1 、 0.5 mm 时,分离器内粒子运动轨迹变化。

由图 10 a、10 b 可知,当粒径为 $0.001 \sim 0.01\text{ mm}$ 、 $0.01 \sim 0.1\text{ mm}$ 时,颗粒运动轨迹平滑有序,与壁面的交点减少。当粒径为 $0.01 \sim 0.1\text{ mm}$ 时,排气管内出现一条轨迹,而当粒径为 $0.001 \sim 0.01\text{ mm}$ 时,粒子振荡时间增长,排气管排出的轨迹较多。这说明粒径越小,颗粒跟随能力越强,受惯性作用小,风沙分离越靠后,从排气管排出的机率越大。图 10c 表明,在进气管与排气管下端间,粒径 $0.1 \sim 0.5\text{ mm}$ 粒子运动轨迹较多,碰壁现象明显,风沙不易分离;粒子下行至锥形导流板后,粒子跟随性减弱,风沙分离;排气管内粒子轨迹再次增多,说明此时集沙效率降低。

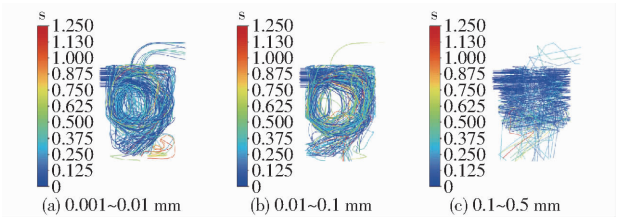


图 10 不同粒径颗粒范围跟踪轨迹

Fig. 10 Tracking trajectory over a range of particle sizes

将颗粒粒径设置为固定值,观察其在分离器中运动轨迹的变化。图 11 表明,粒径越小,振荡时间增长,排气管内粒子轨迹越多,集沙效率越低。当粒径为 0.01 mm 和 0.1 mm 时,轨迹集中在分离器上半部呈旋转运动;当粒径为 0.5 mm 时,轨迹在分离器内发生多次碰撞并向下运动,最后在排沙口排出。

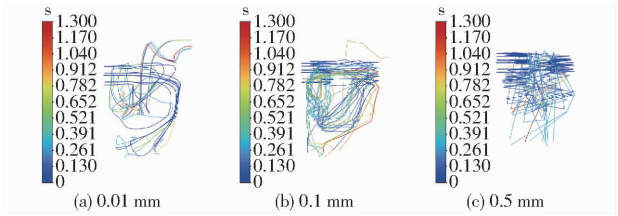


图 11 固定粒径颗粒跟踪轨迹

Fig. 11 Tracking trajectory of fixed-size particles

综上,粒子受自身惯性力和气流拖曳力影响。当风速小于 13.8 m/s (即风力低于强风) 时,粒径接近或大于 0.5 mm 粒子受流场变化影响较小,惯性运动起主要作用,易脱离气流。粒径接近或小于 0.01 mm 时,颗粒运动易受流场诱导,从排气管排出机率变大,分离效果不佳,是影响集沙效率的主要因

素。因此,后续仿真试验粒径应小于 0.01 mm。选取进气管入口风速为 13.8 m/s、颗粒粒径为 0.001 ~ 0.01 mm 进行仿真,优化风沙分离器结构,提高集沙效率。

2.2 不同结构参数对集沙效率的影响

由于风沙分离器结构参数较多且数值模拟计算耗时较长,难以在有限时间内对所有参数逐一研究。因此,根据前期预试验,选取进气管长度、排气管内插深度、锥形导流板锥度、筒体长度作为主要结构参数进行研究。风沙分离器结构如图 12 所示, a 为进气管直径(mm), b 为进气管长度(mm), L 为排气管内插深度(mm), S 为锥形导流板高度(mm), α 为锥形导流板锥角($^{\circ}$), D 为筒体长度(mm)。

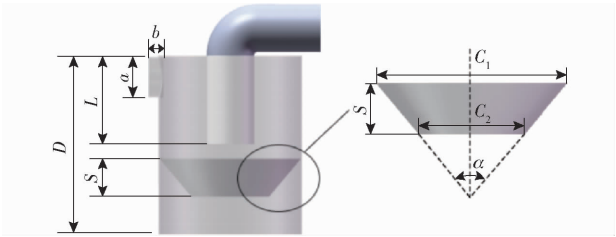


图 12 风沙分离器结构图

Fig. 12 Structural diagram of wind and sand separator

锥形导流板入口直径为 C_1 、出口直径为 C_2 、锥度为 k , α 与 k 关系为

$$k = 2 \tan \alpha = \frac{C_1 - C_2}{S} \tag{8}$$

则
$$\alpha = \arctan \frac{C_1 - C_2}{2S} \tag{9}$$

2.2.1 单因素试验

集沙效率影响因素大部分集中在风沙分离器结构上,不同的结构会改变进入内部的风沙流方向与速度,从而改变集沙效率。通过收集的沙尘量可了解不同区域风沙流中的沙尘含量,以达到减少土壤风蚀的目的。因此,风蚀仪集沙效率需达到一定要求,当进气管入口风速为 13.8 m/s 时,在确保各组集沙效率大于 50% 且排沙口气流速度对收集盒下方测量传感器扰动不大的前提下,初步确定风沙分离器进气管长度、排气管内插深度、锥形导流板锥角及筒体长度 4 个因素水平范围。通过单因素试验,初步筛选出各因素最佳水平区

间,因素水平见表 1。

表 1 单因素试验因素水平
Tab.1 One-way test factors and levels

水平	因素			
	进气管长度/ 度/mm	排气管内插 深度/mm	锥形导流板 锥角/($^{\circ}$)	筒体长度/ mm
1	4	50	30	125
2	8	60	35	140
3	12	70	40	155
4	16	80	45	170
5	20	90	50	185

2.2.2 试验结果与分析

各单因素对集沙效率的影响如图 13 所示。由图 13a 可知,当进气管长度为 12 mm 时,集沙效率达到最大值,这是因为此时沙尘在进气管中起到了气流过渡的作用。进气管长度不宜过长或过短,适当即可。过长的管道会导致气流在其中长时间滞留,增加气流阻力,降低气流速度;进气管过短且沙尘颗粒较大时,可能会导致沙尘堆积堵塞进沙口,影响集沙效率。因此,进气管长度最佳取值为 8 ~ 16 mm。

由图 13b 可知,当排气管内插深度为 70 mm,集沙效率达到最大值。这是因为通常情况下排气管插入深度应比进气管底部稍低一些,排气管插入过浅易造成进沙口含尘气流直接进入排气管,插入过深会使空气和壁面之间摩擦面积增大,增加阻力损失。因此确定排气管内插深度最佳取值为 60 ~ 80 mm。

由图 13c 可知,随着锥形导流板锥角增加,集沙效率呈先上升后下降趋势。其原因在于当锥角较小时,导流板作用效果有限,导致集沙效果不佳。适度增大锥角可有效提高集沙效率,但若锥角过大,沙尘容易在导流板处堆积,从而影响沙尘顺利落入收集盒,导致集沙效率下降。总高度固定时,排气管与锥体底面间距过小,会增加沙尘二次回流的可能性,集沙效率降低,适当增加锥体高度可提高集沙效率。因此确定锥形导流板锥角最佳取值为 35 $^{\circ}$ ~ 45 $^{\circ}$ 。

由图 13d 可知,随着筒体长度增加,集沙效率呈先上升后下降趋势,这是因为筒体长度不够长时会

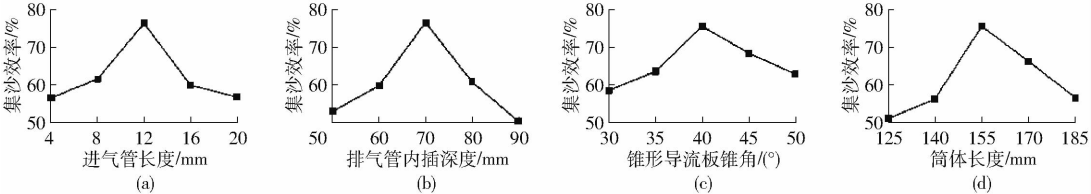


图 13 单因素对集沙效率的影响曲线

Fig. 13 Influence curves of single factor on sand collection efficiency

尘运动,集沙效率降低。因此确定筒体长度最佳取值为 140 ~ 170 mm。

3 Box – Behnken 仿真试验

基于单因素仿真试验优选出的因素范围设计二次回归正交试验,将集沙效率作为试验指标,建立风蚀仪集沙效率回归模型,以得到最优参数组合^[32]。选取对集沙效率影响最大的 4 个单因素进行响应面设计^[33–34],试验因素编码见表 2,Box – Behnken 试验设计及结果见表 3, *A*、*B*、*C*、*D* 为因素编码值。

表 2 响应面试验因素编码

编码	因素			
	进气管长	排气管内插	锥形导流板	筒体长度/
	度/mm	深度/mm	锥角/(°)	mm
– 1	8	60	35	140
0	12	70	40	155
1	16	80	45	170

表 3 试验设计与结果

Tab. 3 Trial design and results					
试验 编号	因素				集沙效率 <i>Y</i> /%
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	
1	– 1	– 1	0	0	69. 58
2	1	– 1	0	0	65. 14
3	– 1	1	0	0	65. 53
4	1	1	0	0	63. 29
5	0	0	– 1	– 1	58. 55
6	0	0	1	– 1	50. 79
7	0	0	– 1	1	60. 82
8	0	0	1	1	68. 06
9	– 1	0	0	– 1	61. 62
10	1	0	0	– 1	55. 95
11	– 1	0	0	1	69. 53
12	1	0	0	1	68. 96
13	0	– 1	– 1	0	65. 17
14	0	1	– 1	0	59. 69
15	0	– 1	1	0	59. 51
16	0	1	1	0	60. 24
17	– 1	0	– 1	0	67. 13
18	1	0	– 1	0	62. 68
19	– 1	0	1	0	64. 88
20	1	0	1	0	64. 01
21	0	– 1	0	– 1	59. 87
22	0	1	0	– 1	52. 77
23	0	– 1	0	1	65. 47
24	0	1	0	1	66. 96
25	0	0	0	0	75. 64
26	0	0	0	0	76. 79
27	0	0	0	0	75. 35
28	0	0	0	0	76. 56
29	0	0	0	0	76. 38

3. 1 模型建立与显著性分析

利用 Design-Expert 软件对集沙效率仿真试验结果进行分析,得到集沙效率 *Y* 与各因素间的二次多项式回归方程为

$$Y = 76. 14 - 1. 52A - 1. 36B - 0. 55C + 5. 02D + 0. 55AB + 0. 9AC + 1. 27AD + 1. 55BC + 2. 15BD + 3. 75CD - 3. 54A^2 - 6. 68B^2 - 8. 14C^2 - 8. 41D^2 \quad (10)$$

由表 4 可知,模型 $P < 0. 000\ 1$,此模型极其显著。模型失拟项 ($P = 0. 471\ 1 > 0. 05$) 不显著,方程拟合度较好,回归模型拟合度高。决定系数 $R^2 = 0. 995\ 4$,说明实际值和预测值相关性较高。因此,该模型可以较好地反映各因素与集沙效率的关系并预测最佳结构条件。

表 4 集沙效率回归模型方差分析

Tab. 4 Analysis of variance (ANOVA) of regression models for sand gathering efficiency					
方差源	平方和	自由度	均方和	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	1 312. 26	14	93. 73	216. 16	< 0. 000 1 **
<i>A</i>	27. 72	1	27. 72	63. 94	< 0. 000 1 **
<i>B</i>	22. 03	1	22. 03	50. 81	< 0. 000 1 **
<i>C</i>	3. 58	1	3. 58	8. 24	0. 012 3 *
<i>D</i>	302. 51	1	302. 51	697. 62	< 0. 000 1 **
<i>AB</i>	1. 21	1	1. 21	2. 79	0. 117
<i>AC</i>	3. 2	1	3. 2	7. 39	0. 016 6 *
<i>AD</i>	6. 5	1	6. 5	15	0. 001 7 **
<i>BC</i>	9. 64	1	9. 64	22. 23	0. 000 3 **
<i>BD</i>	18. 45	1	18. 45	42. 54	< 0. 000 1 **
<i>CD</i>	56. 25	1	56. 25	129. 72	< 0. 000 1 **
<i>A</i> ²	81. 42	1	81. 42	187. 76	< 0. 000 1 **
<i>B</i> ²	289. 25	1	289. 25	667. 06	< 0. 000 1 **
<i>C</i> ²	429. 7	1	429. 7	990. 94	< 0. 000 1 **
<i>D</i> ²	458. 95	1	458. 95	1 058. 4	< 0. 000 1 **
残差	6. 07	14	0. 43		
失拟项	4. 54	10	0. 45	1. 19	0. 471 1
纯误差	1. 53	4	0. 38		
总计	1 318. 33	28			

注:** 表示影响极显著 ($P < 0. 01$), * 表示影响显著 ($0. 01 \leq P < 0. 05$)。

由 *P* 值得, *A*、*B*、*D*、*BD*、*CD*、*AD*、*BC* 以及所有二次项对风蚀仪集沙效率的影响均为极显著 ($P < 0. 01$), *C*、*AC* 均显著 ($P < 0. 05$), 其余均不显著 ($P > 0. 05$)。由 *F* 值可知 4 个因素对集沙效率的影响由大到小为 *D*、*A*、*B*、*C*。

综上,该回归模型极显著,能可靠反映实际情况,可用于进一步预测。

3. 2 响应面分析

响应曲面图在水平方向落下的投影为等高线,当等高线为椭圆形时,表明这两个因素有极为显著的交互作用;为圆形则表示不显著^[35]。各因素响应曲面坡度的陡峭程度反映该因素对集沙效率的影响程度,越陡峭说明影响越大^[36]。

图 14 为各因素间交互作用对集沙效率影响的

响应面图。由图 14 可看出,当进气管长度为 10 ~ 14 mm、排气管内插深度为 65 ~ 75 mm、锥形导流板锥度为 35 ~ 45°、筒体长度为 152 ~ 164 mm 时,集沙效率较优。

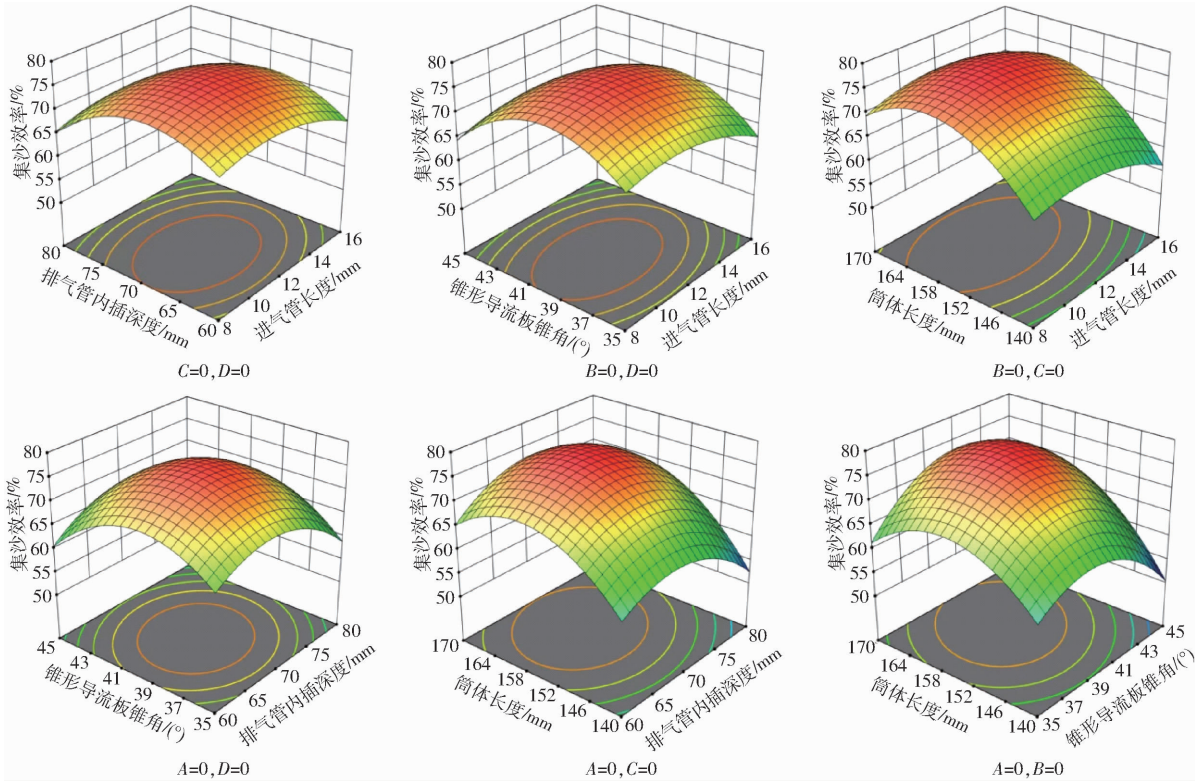


图 14 各因素交互作用对集沙效率影响的响应面

Fig. 14 Response surface plots of effect of interaction of factors on sand collection efficiency

3.3 参数优化试验

在 Design-Expert 软件的优化模块中对试验数据进行优化预测,以集沙效率最大值为优化目标值,求解出最优参数组合为进气管长度 11.81 mm、排气管内插深度 68.63 mm、锥形导流板锥角 39.89°和筒体长度 160.06 mm。结合实际加工条件,选取进气管长度 12 mm、排气管内插深度 70 mm、锥形导流板锥角 40°和筒体长度 160 mm 进行模拟及加工。

为验证仿真优化参数可靠性,在最优参数条件下进行 3 次 Fluent 仿真模拟,得到排沙口集沙效率为 76.88%、78.32%、75.95%,平均值为 77.05%。

4 试验验证

4.1 试验准备

在吉林农业大学交通运输工程实验室利用自制的微型风洞进行风沙分离器性能试验,验证其仿真结果的准确性。风洞试验无外界风力干扰,为常压。采用亚克力圆管与 3D 打印技术加工风沙分离器实物装置。进气管入口风速通过微型风洞内的风机与变频器共同控制,风沙流动情况及实物装置如图 15 所示。

4.2 集沙效率试验

考虑到土壤含水率是影响土壤风蚀的另一个重要因素^[37],故试验前在双辽市卧虎镇挖取试验土

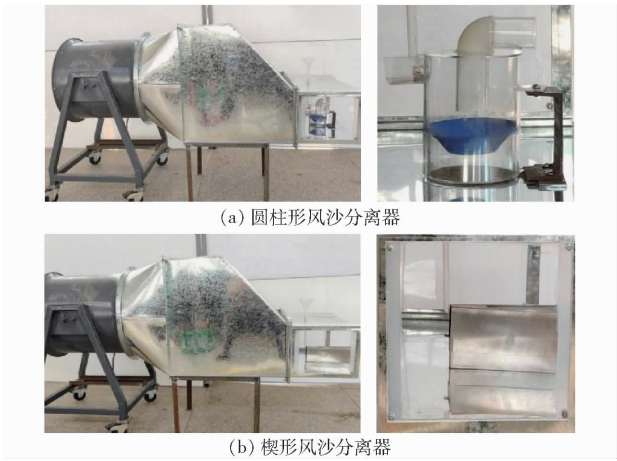


图 15 风沙分离器性能试验

Fig. 15 Wind sand separator performance tests

样,并放入 105℃ 恒温箱中干燥得到含水率约为 1.47% 的土壤样本。胡孟春等^[38]在风洞中模拟了启动风速与含水率的关系,其结果表明一定的土壤含水率具有相应的抗风蚀能力,含水率 2% 是风蚀能力变化的转折点。当含水率小于 2% 时,土壤抗风蚀能力变化大,大于 2% 时抗风蚀能力趋于稳定。当含水率达到 4.73% 时,抗风蚀极限风速稳定在 14 m/s(6 ~ 7 级风)左右^[39]。因此,确定本地区在强风(13.8 m/s 以上)条件下风蚀现象频发。由于跃移颗粒占风蚀移动颗粒的 50% ~ 80%,直径多为

0.1~0.5 mm,因此将干燥后的试验土样筛出粒径 0.5 mm 以下的混合土样作试验备用。在风沙分离器进气管前端设计进沙口,将输沙漏斗固定在进沙口处。根据文献[40]的试验方法开启风机,将风速稳定在强风 13.8 m/s 左右开始输送土样,每次试验取 50 g 土样,待土样输送完毕后关闭风机,对收集盒内的土样称量并记录数据。按以上步骤,在最优参数组合下重复试验 3 次,取其平均值,以观察圆柱形风沙分离器的集沙效率。

将楔形风沙分离器和圆柱形风沙分离器放入微型风洞中,将进沙口与风洞出风口中心轴线对齐,开启风机调节风速稳定在 7.8、10.8、13.8、16.8、19.8 m/s,重复上述步骤进行输沙及称量,在不同风速条件下,观察二者集沙效率变化。

4.3 试验结果与分析

以气固分离效率 η 作为集沙效率,即收集盒收集到的沙尘质量占进入风沙分离器中的沙尘质量百分比。

在最优参数组合下,计算当进气管入口风速为 13.8 m/s、粒径为 0.001~0.01 mm 时,风蚀仪风沙分离器集沙效率分别为 72.88%、74.79%、75.47%,平均值为 74.38%。与仿真结果相比,平均误差为 3.47%。由图 16 可知,圆柱形风沙分离器集沙效率高于楔形风沙分离器集沙效率,改进后的模型较为可靠。其结果与模拟结果误差较小,证明了数值模拟的可靠性,检验了风蚀仪结构优化设

计的效果。

分析集沙效率试验值与数值模拟值存在误差的原因是试验加工精度不够,如 3D 打印部件的表面及拼接处较粗糙,装配尺寸也会存在较大误差,影响仿真结果。如批量生产,应合理采用注塑工艺,误差可能会减小。

5 结论

(1)以常见的楔形风蚀仪为基础,建立了一种能够自动测量的圆柱形风蚀仪物理模型。采用 Fluent 软件,基于 RNG $k-\varepsilon$ 模型分析了风蚀仪风沙分离器内流场和颗粒运动变化轨迹。以排沙口收集的捕获颗粒数量与进入风沙分离器的跟踪颗粒总数量比值作为集沙效率,对楔形风沙分离器与圆柱形风沙分离器集沙效率进行对比,结果表明圆柱形风沙分离器集沙效率更高,风沙分离性能较好。

(2)研究了进气管入口风速和颗粒粒径对风沙分离器内流场的影响,并进一步研究了风沙分离器结构参数对集沙效率的影响。结果表明,随着进气管入口风速与颗粒粒径范围增大,集沙效率呈先增大后减小趋势;切向速度越大,轴向速度越小,集沙效率越高。适当改变结构参数会引起其轴向速度改变,有利于沙尘颗粒在风沙分离器内的运动。当风速小于 13.8 m/s 时,粒径接近或大于 0.5 mm 的颗粒集沙效果更好。而粒径接近或小于 0.01 mm 的集沙效果较差,是影响集沙效率的主要部分。因此,试验选择风速 13.8 m/s 和颗粒粒径 0.001~0.01 mm,以优化结构并提高集沙效率。

(3)采用单因素仿真试验对 4 个试验因素进行初步优选。利用 Design-Expert 软件对模拟结果进行分析,得到最优参数组合为进气管长度 12 mm、排气管内插深度 70 mm、锥形导流板锥角 40°和筒体长度 160 mm。对集沙效率影响由大到小依次为筒体长度、进气管长度、排气管内插深度、锥形导流板锥角。在最优参数组合下,通过仿真模拟和风洞试验得出平均集沙效率分别为 77.05% 和 74.38%,误差为 3.47%。试验结果与仿真结果误差较小,圆柱形风沙分离器集沙效率更高,验证了仿真结果的可靠性,同时检验了结构优化设计效果,为进一步提高风蚀仪性能提供了依据。

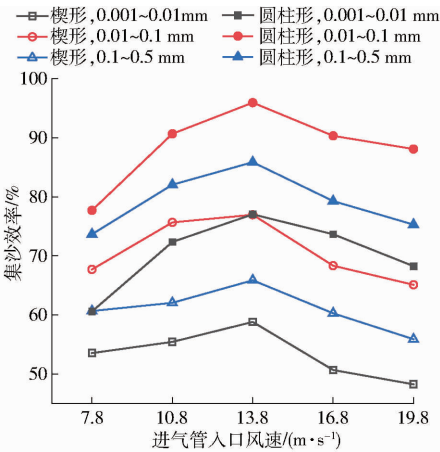


图 16 圆柱形与楔形风沙分离器集沙效率变化曲线
Fig. 16 Variation curves of sand collection efficiency of cylindrical and wedge-shaped sand separator

参 考 文 献

[1] 南岭,董治宝,肖锋军. 农牧交错带农田土壤风蚀 PM10 释放特征[J]. 中国沙漠,2017,37(6):1079-1084.
NAN Ling,DONG Zhibao,XIAO Fengjun. Characteristic of PM10 emission of cultivated soil in ecotone between agriculture and animal husbandry[J]. Journal of Desert Research,2017,37(6):1079-1084. (in Chinese)
[2] 南岭,杜灵通,展秀丽. 土壤风蚀可蚀性研究进展[J]. 土壤,2014,46(2):204-211.
NAN Ling,DU Lingtong,ZHAN Xiuli. Advances in study on soil erodibility for wind erosion[J]. Soils,2014,46(2):204-

211. (in Chinese)
- [3] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报[J]. 中国水土保持,2013(10):2-3,11.
- [4] 芦贵君,杨兴浪. 吉林省西部沙地挟沙风对土壤风蚀的影响[J]. 吉林水利,2010(2):57-59,64.
LU Guijun, YANG Xinglang. The impact of sandy wind on soil erosion in western Jilin Province[J]. Jilin Water Resources, 2010(2):57-59,64. (in Chinese)
- [5] 赵沛义,妥德宝,郑大玮,等. 野外土壤风蚀定量观测方法的研究[J]. 安徽农业科学,2008,36(29):12810-12812.
ZHAO Peiyi, TUO Debao, ZHENG Dawei, et al. Study on the method of quantitative observation on soil wind erosion in field [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(29):12810-12812. (in Chinese)
- [6] 王仁德,李庆,常春平,等. 土壤风蚀野外测量技术研究进展[J]. 中国沙漠,2019,39(4):113-128.
WANG Rende, LI Qing, CHANG Chunpin, et al. Review of field measurement technologies in soil wind erosion[J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(4):113-128. (in Chinese)
- [7] BAGNOLD R A. The physics of blown sand and desert dunes[M]. Springer Netherlands, 1942.
- [8] GREELEY R, LEACH R N, WILLIAMS S H, et al. Rate of wind abrasion on mars[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1982, 87(B12):10009-10024.
- [9] 王福军. 计算流体动力学分析:CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [10] 侯建龙. 高压系统旋风分离器的研究[D]. 天津:天津大学,2012.
HOU Jianlong. Study on cyclone separator of high pressure system [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese)
- [11] 赵立正,原奇鑫,康志忠,等. 超临界循环流化床旋风分离器结构优化数值模拟[J]. 锅炉技术,2016,47(3):31-37,44.
ZHAO Lizheng, YUAN Qixin, KANG Zhizhong, et al. Numerical simulation and structure optimization of cyclone separator in supercritical circulating fluidized bed [J]. Boiler Technology, 2016, 47(3):31-37,44. (in Chinese)
- [12] SUN X, KIM S, YANG S D, et al. Multi-objective optimization of a stairmand cyclone separator using response surface methodology and computational fluid dynamics[J]. Powder Technology, 2017, 320:51-65.
- [13] 宋涛. 分流对冲与多级扩容组合式自动集沙仪及其内流场特性研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2016.
SONG Tao. Study on inner flow-field characteristics and shunt-hedging and multi-stage expansion combined automatic sand sampler[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [14] 杨帆,王顺胜,郑新倩,等. CWHF 型全自动集沙仪设计及应用性能野外验证[J]. 沙漠与绿洲气象,2017,11(2):66-73.
YANG Fan, WANG Shunsheng, ZHENG Xinqian, et al. The design and application performance in field of CWHF sand trap [J]. Desert and Oasis Meteorology, 2017, 11(2):66-73. (in Chinese)
- [15] 谷吨. 旋风分离器内流场及性能参数影响研究[D]. 沈阳:东北大学,2008.
GU Dun. Study of flow field in cyclone separator and influence of performance parameters [D]. Shenyang: Northeastern University, 2008. (in Chinese)
- [16] 汪林. 旋风分离器气固两相流数值模拟及性能分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
WANG Lin. Numerical simulation and performance analysis of gas-solid two phase flow in cyclone separator[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. (in Chinese)
- [17] 董玉平,董磊,强宁,等. 旋风分离器内生物质焦油湍流特性的数值模拟[J]. 农业工程学报,2010,26(9):171-175,385.
DONG Yuping, DONG Lei, QIANG Ning, et al. Numerical simulation of biomass gas and tar torrential flow characteristics in cyclone separator[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9):171-175,385. (in Chinese)
- [18] 周韬. 旋风分离器的气固两相特性研究与数值模拟[D]. 上海:上海交通大学,2007.
ZHOU Tao. Study and numerical simulation on gas-solid two-phase characteristic of cyclone separator[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007. (in Chinese)
- [19] 商晓彬,陈智,宋涛,等. 基于数值模拟和风洞试验的分流对冲式集沙仪结构优化设计[J]. 农业工程学报,2017, 33(16):80-87.
SHANG Xiaobin, CHEN Zhi, SONG Tao, et al. Optimization design of shunt-hedging sand sampler based on numerical simulation and wind tunnel experiment[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(16):80-87. (in Chinese)
- [20] 翁晓星,陈长卿,王刚,等. 基于 CFD-DEM 的机采鲜叶管道集叶过程数值模拟研究[J]. 农业机械学报,2022, 53(11):424-432.
WENG Xiaoxing, CHEN Changqing, WANG Gang, et al. Numerical simulation of leaf gathering process of fresh leaf collecting pipeline based on CFD-DEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11):424-432. (in Chinese)
- [21] 谭礼斌,袁越锦,黄灿,等. 旋风分离器流场分析与结构优化的数值模拟[J]. 陕西科技大学学报,2018,36(3):152-159.
TAN Libin, YUAN Yuejin, HUANG Can, et al. Numerical simulation on flow field analysis and structural optimization of cyclone separator[J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology, 2018, 36(3):152-159. (in Chinese)
- [22] 张莉,李继峰,常春平,等. 风速分辨率对土壤风蚀模数计算结果的影响[J]. 中国沙漠,2022,42(3):21-30.
ZHANG Li, LI Jifeng, CHANG Chunping, et al. Influence of spatial-temporal resolution of wind speed data on calculation result of soil wind erosion modulus[J]. Journal of Desert Research, 2022, 42(3):21-30. (in Chinese)
- [23] 孟庆鹏,陈智,豪宝尔,等. 分流对冲式与循环摩擦式农田风沙分离器性能对比试验[J]. 农机化研究,2020,42(3):

- 169 – 174.
- MENG Qingpeng, CHEN Zhi, HAO Baoer, et al. Performance comparison test of split-flow hedging and cyclic friction farm sand separator[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(3): 169 – 174. (in Chinese)
- [24] 孟庆鹏. 双柱扰流式自动集沙仪设计与试验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- MENG Qingpeng. Design and experimental study of automatic sand collector based on double-column disturbed flow characteristic[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [25] 庞立铁, 荣建东, 刘丙友. 黑龙江省西部土壤风蚀风洞试验研究[J]. 防护林科技, 2017(9): 9 – 13, 20.
- PANG Litie, RONG Jiandong, LIU Bingyou. Experiments on wind erosion and wind tunnel in western Heilongjiang Province[J]. Protection Forest Science and Technology, 2017(9): 9 – 13, 20. (in Chinese)
- [26] 林艺, 李和平, 肖波. 东北黑土区农田土壤风蚀的影响因素及其数量关系[J]. 水土保持学报, 2017, 31(4): 44 – 50.
- LIN Yi, LI Heping, XIAO Bo. Influencing factors of wind erosion and their quantitative relationships with erosion rate in black soil area of northeast China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(4): 44 – 50. (in Chinese)
- [27] 中国气象局. 风力等级: GB/T 28591—2012[S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2012.
- [28] BAGNOLD R A. 风沙荒漠沙丘物理学[M]. 北京: 科学出版社, 1959.
- [29] 李晓丽, 申向东, 解卫东. 土壤风蚀物中沙粒的动力学特性分析[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 71 – 75.
- LI Xiaoli, SHEN Xiangdong, XIE Weidong. Analysis of dynamic characteristics of sand grains in wind erosion soil[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(6): 71 – 75. (in Chinese)
- [30] 麻硕士, 陈智. 土壤风蚀测试与控制技术[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [31] 袁竹林, 朱立平, 耿凡, 等. 气固两相流动与数值模拟[M]. 南京: 东南大学出版社, 2013.
- [32] 沈中华, 程虎强, 董志康, 等. 整秆式蔗种剥叶系统仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(12): 33 – 43.
- SHEN Zhonghua, CHENG Huqiang, DONG Zhikang, et al. Simulation and experiment on whole-stem sugarcane seed stripping system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(12): 33 – 43. (in Chinese)
- [33] 陈立平, 欧鸿, 张瑞瑞, 等. 制种玉米去雄无人机旋切装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(4): 53 – 63.
- CHEN Liping, OU Hong, ZHANG Ruirui, et al. Design and experiment of rotary-cutting device for corn seed production detasseling UAV[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(4): 53 – 63. (in Chinese)
- [34] SUN Q, CHENG Y, YANG G, et al. Stability and sensory analysis of walnut polypeptide liquid: response surface optimization[J]. International Journal of Food Properties, 2019, 22(1): 853 – 862.
- [35] 李云嵌, 杨曦, 刘江, 等. 超声波辅助碱法提取美藤果分离蛋白及其加工性质研究[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(9): 128 – 135.
- LI Yunqian, YANG Xi, LIU Jiang, et al. Ultrasonic-assisted alkaline extraction of *Plukenetia volubilis* protein isolate and its processing properties[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(9): 128 – 135. (in Chinese)
- [36] 叶学林, 程水明, 温露文, 等. 响应面法优化桑葚果酒发酵工艺[J]. 中国酿造, 2017, 36(12): 105 – 109.
- YE Xuelin, CHENG Shuiming, WEN Luwen, et al. Optimization of fermentation technology for mulberry wine by response surface methodology[J]. China Brewing, 2017, 36(12): 105 – 109. (in Chinese)
- [37] 段学友. 可移动式风蚀风洞流场空气动力学特性的测试与评价[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2005.
- DUAN Xueyou. The test and evaluation of characteristic of aerodynamics on portable erosion wind tunnel[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2005. (in Chinese)
- [38] 胡孟春, 刘玉璋, 乌兰, 等. 科尔沁沙地土壤风蚀的风洞实验研究[J]. 中国沙漠, 1991, 11(1): 22 – 29.
- HU Mengchun, LIU Yuzhang, WU Lan, et al. A experimental study in wind tunnel on wind erosion of soil in Korqin sandy land[J]. Journal of Desert Research, 1991, 11(1): 22 – 29. (in Chinese)
- [39] 董治宝, 钱广强. 关于土壤水分对风蚀起动风速影响研究的现状与问题[J]. 土壤学报, 2007, 44(5): 934 – 942.
- DONG Zhibao, QIAN Guangqiang. A review on effect of soil moisture on wind erosion threshold velocity[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(5): 934 – 942. (in Chinese)
- [40] 宋涛, 商晓彬, 仇义, 等. 分流对冲与多级扩容组合式集沙仪内风沙分离规律研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 113 – 118.
- SONG Tao, SHANG Xiaobin, QIU Yi, et al. Wind-sand separation rules in shunt-hedging and multi-stage expansion combined sand sampler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 113 – 118. (in Chinese)