

分流对冲与多级扩容组合式集沙仪内风沙分离规律研究

宋涛^{1,2} 商晓彬¹ 仇义¹ 陈智¹ 边炳传² 刘海洋¹

(1. 内蒙古农业大学机电工程学院, 呼和浩特 010018; 2. 泰山学院机械与工程学院, 泰安 271000)

摘要: 为揭示风沙在集沙仪内部的分离规律,以分流对冲与多级扩容组合式集沙仪风沙分离器为研究模型,通过Fluent数值模拟和微型风洞试验,对风沙分离器内单相流场和气固两相流场进行了分析。在阐释气流降速机理的基础上,进一步分析了气流降速和入口气流中沙尘所占体积分数对风沙分离的影响,并通过分析沙尘的运动规律,阐述了不同粒径沙尘受流场影响的情况。结果表明,气流大幅降速是实现风沙分离的最有效方法,而引起气流速度大幅降低的主要原因是较大值的湍动能场的大范围形成;对于风沙流,当沙尘含量增高时,降速效果变好,风沙分离效果也变好;当沙尘含量进一步增高时,降速及风沙分离效果则变化不大;对于分流对冲与多级扩容组合式集沙仪,当沙尘受强风以下风力影响时,粒径小于0.032 41 mm的沙尘较易受到流场的诱导,受惯性运动的影响较小,从排气口排出的可能性较大,是影响风沙分离效率和集沙效率的主要粒子。

关键词: 集沙仪; 集沙效率; 数值模拟; 流场

中图分类号: S237 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)03-0113-06

Wind – Sand Separation Rules in Shunt-hedging and Multi-stage Expansion Combined Sand Sampler

SONG Tao^{1,2} SHANG Xiaobin¹ QIU Yi¹ CHEN Zhi¹ BIAN Bingchuan² LIU Haiyang¹

(1. College of Machine and Electronics Engineering,

Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China

2. College of Machinery and Engineering, Taishan University, Taian 271000, China)

Abstract: When wind speed, soil particle size distribution, collection time and inlet collection efficiency etc. are certain, separation efficiency of sand sampler is the main factor affecting collection efficiency, which is often affected by wind – sand separation rules. In order to reveal wind – sand separation rules in the sand sampler, a sand separator in the shunt-hedging and multi-stage expansion combined sand sampler was took as a study model, a analysis of single-phase flow field and gas – solid two-phase flow field in the sand separator was made through Fluent numerical simulation and micro wind-tunnel test. On the base of explaining reducing velocity mechanism of airflow, a further analysis of airflow reducing velocity and sand volume fraction effect on wind – sand separation was done, and the influencing situation of different particle size of sand was expounded. The results showed that reducing velocity substantially was the most effective method that achieving wind – sand separation, the main reason caused by substantial airflow speed reduction was the formation of a large value of turbulent kinetic energy field; for wind – sand flow, when the sand content was high, the wind – sand separation effect was going to be good with good velocity reducing effect, when sand was affected by strong winds, sand with particle size less than 0.032 41 mm was easily induced by flow field, less affected by the motion of inertial, the possibility excreted from the exhaust port was large, which was the main part that affected sand separation efficiency and sand collection efficiency. The study provided a theoretical reference for the design of sand sampler, which had a good collection performance, and it further improved the theoretical system of sand sampler technology.

Key words: sand sampler; sand collection efficiency; numerical simulation; flow field

收稿日期: 2016-07-10 修回日期: 2016-10-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(41361058,41161045)

作者简介: 宋涛(1979—),男,博士生,泰山学院讲师,主要从事环境控制工程及其技术装备研究,E-mail: stsong925@163.com

通信作者: 陈智(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事环境控制工程及其技术装备研究,E-mail: sgchenzhi@imau.edu.cn

引言

集沙仪是观测风沙流结构 and 研究风沙运动规律的关键设备,对研究风沙运动的物理机制,揭示土壤风蚀的发生、发展和演化过程,有效防治土壤风蚀具有十分重要的作用^[1-3]。集沙效率是衡量集沙仪性能的关键指标,集沙仪受风沙分离效率的影响较大,而风沙分离效率又与风沙分离规律存在着必然联系。虽然集沙仪结构简单,但风沙在其内部的分离规律却很难通过试验方法预测,现有文献也鲜有涉及集沙仪内风沙分离规律的研究,这为设计更高集沙性能的集沙仪带来了困难。因此,深入研究风沙在集沙仪内部的分离规律很有必要。

本文以分流对冲与多级扩容组合式集沙仪的关键部件——风沙分离器为研究模型,利用数值模拟和试验验证相结合的方法,对其内部单相流场和气固两相流场进行分析,阐述气流降速机理和风沙分离规律。

1 研究模型

分流对冲与多级扩容组合式集沙仪是一种可实时、连续和远距离无线采集数据的新型集沙仪(图 1)。该集沙仪的进气口等动力性为 92.94%,风速 9~18 m/s 时平均集沙效率为 90.42%,可较好地满足土壤风蚀量的自动观测需求^[4]。

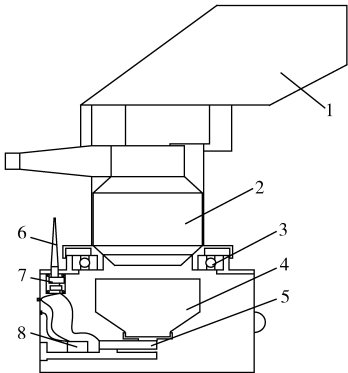


图 1 分流对冲与多级扩容组合式集沙仪结构简图

Fig.1 Structure diagram of shunt-hedging and multi-stage expansion combined sand sampler

1. 导向板 2. 风沙分离器 3. 球轴承 4. 集沙盒 5. 称量传感器 6. 数据传输天线 7. 数据采集系统 8. 蓄电池

风沙分离器是该集沙仪的关键部件(图 2),起到分离风沙和消除气流对集沙盒下称量传感器扰动的作用。利用 Gambit 软件建立风沙分离器几何模型,并将该模型划分为 3 个计算域:计算域 1 由进气管、分流对冲腔、扩容腔和上回流腔组成;计算域 2 由排气管和楔形体组成;计算域 3 由分离腔和下回流腔组成。体网格以四面体为主,尖端等边缘部位

包含六面体、锥体和楔形单元的非结构性网格,共生成网格 464 911 个。

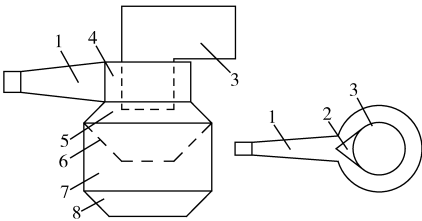


图 2 风沙分离器结构模型

Fig.2 Structure model of sand separator

1. 进气管 2. 楔形体 3. 排气管 4. 分流对冲腔 5. 扩容腔 6. 上回流腔 7. 分离腔 8. 下回流腔

根据试验装置的运行参数和工况调节方法,模型进气口采用速度入口边界条件,排气口和排沙口采用速度出口边界条件。计算域固体壁面采用无滑移边界条件(即湍动能 $k=0$,耗散率 $\epsilon=0$),近壁面区域流动则采用满足对数分布的标准壁面函数条件,其余计算设置如表 1 所示。

表 1 数值计算设置

Tab.1 Numerical calculation settings

项目	设置	项目	设置
进气口尺寸/(mm×mm)	15×22.5	空气粘度/(Pa·s)	1.8×10^{-5}
排沙口直径/mm	90	沙尘密度/(kg·m ⁻³)	2 650
排气口直径/mm	30	湍流模型	RNG $k-\epsilon$
入口速度/(m·s ⁻¹)	13.8	求解算法	SIMPLE
空气密度/(kg·m ⁻³)	1.205	收敛残差	0.000 1

2 数值模拟

2.1 气流降速机理分析

当气流流动的雷诺数超过 2 300 时,流场就会出现大量小漩涡,流动的规律性遭到破坏,形成湍流。从物理结构上看,湍流由不同尺寸的涡叠合而成,大尺度涡破裂后形成小尺度涡,小尺度涡破裂后形成更小尺度涡^[5]。大尺度涡通过湍动能从时均主流中获取能量,再通过涡间作用将能量传递给小尺度涡,小尺度涡则将能量转化为内能^[6-7],从而实现气流速度的降低。

从图 3 看出,较大值的湍动能主要分布在进气管的 A 区域、分流对冲腔的 B 和 C 区域,以及扩散腔和上回流腔的 D 区域。研究^[8]表明,湍动能较大的地方湍动能耗散也较大,较大值的湍动能往往出现在流态变化复杂、涡旋活动剧烈的强湍流区。在强湍流区,分布着大量的湍动气流,这些湍动气流通过雷诺切应力做功从时均主流中提取了大量动能,表现为大脉动值、高紊乱度和很不稳定性。当这些湍动气流遭受外力、结构变化等因素影响时,就会产

生大量的小尺度涡,甚至还会伴随有能量的二次传递,加剧能量的耗散。如图 3 所示,在反向对冲和回流影响下,湍动能分布区域的后续流场均是大范围的涡流场。在涡流场内,气流质点间频繁作用,急剧耗散能量。因此,较大值的湍动能场的大范围形成是加剧气流动能耗散的关键因素,是引起气流速度大幅降低的主要原因。

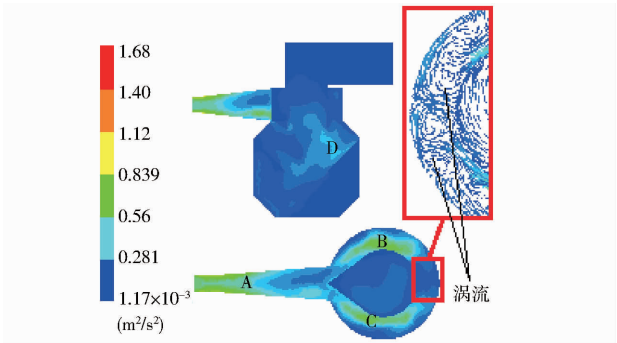


图 3 风沙分离器内气流湍动能云图
Fig. 3 Turbulent kinetic energy contour diagram of airflow in sand separator

2.2 气流降速对风沙分离的影响分析

风沙流是沙尘受风力影响而形成的移动现象。英国学者 BAGNOLD 发现,粒径为 0.10 ~ 0.15 mm 的沙尘易以跃移形式运动,小于 0.10 mm 的沙尘易以悬移形式运动,大于 0.15 mm 的沙尘易发生蠕移^[9]。文献[10]认为,小于 0.075 mm 的沙尘易脱离地表而悬浮在空中。文献[11]认为,悬移沙尘的粒径一般小于 0.05 mm,跃移沙尘的粒径多为 0.1 ~ 0.5 mm,而粒径大于 0.5 mm 的沙尘所受重力大于空气拖曳力,一般不离开地表。可见,风沙移动与气流速度、沙尘粒径存在着必然联系。

沙尘悬浮速度公式^[12-13]为

$$v_0 = 3.62 \sqrt{\frac{d_s(\rho_s - \rho)}{\rho}} \left\{ 1 - \left[\frac{1.24 \left(\frac{m}{\rho_s} \right)^{\frac{1}{3}}}{D} \right]^2 \right\} \quad (1)$$

式中 v_0 ——沙尘悬浮速度, m/s
 d_s ——沙尘粒径, m ρ_s ——沙尘密度, kg/m³
 ρ ——空气密度, kg/m³
 c ——系数, 取 0.4 m ——沙尘质量, kg
 D ——流通管道的当量直径, m

将常参量 $\lambda = (\rho_s - \rho) / (c\rho)$ 代入式(1), 得 $d_s \approx \lambda v_0^2$, 故悬浮沙尘的粒径与气流速度的平方成正比。

从图 4 看出, 当进气口气流速度为 13.8 m/s 时, 排沙口和排气口气流速度降至 1.11 m/s。将 $v_0 = 1.11$ m/s 代入式(1), 得 $d_s = 0.017$ mm。这说明由经验公式推算, 当入口气流受强风影响时, 粒径

大于 0.017 mm 的沙尘在风沙分离器内可被完全分离和收集。若将风沙分离器内气流速度降至更低, 则被分离沙尘的粒径范围将会更大。因此, 气流大幅降速是实现风沙分离的最有效方法。

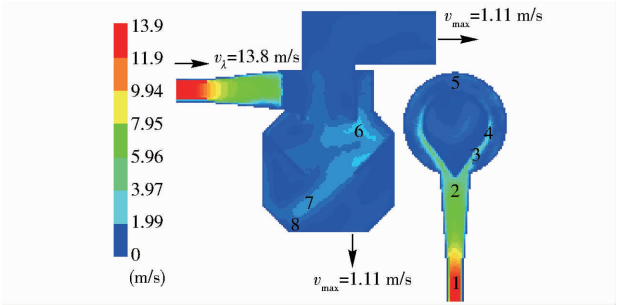


图 4 风沙分离器内气流速度云图
Fig. 4 Airflow velocity contour diagram in sand separator

2.3 沙尘体积分数对风沙分离的影响分析

假设空气为气相, 沙尘为固相。两相流系统比单相流系统复杂得多, 但它们在本质上都遵循着质量、动量和能量传递的基本物理规律^[14]。求解时, 通常认为固相呈均匀的球形, 初始径向和轴向速度为零, 切向速度为入口气流速度, 空间各处气固两相共存, 相互渗透, 两相具有不同的群体速度及体积分数, 但同一半径面上同一尺寸组的颗粒有相同速度。在图 4 中取 8 个位置点, 数值计算出入口气流中固相所占体积分数为 0%、5%、10%、15%、20% 时的气流速度, 如图 5 所示。

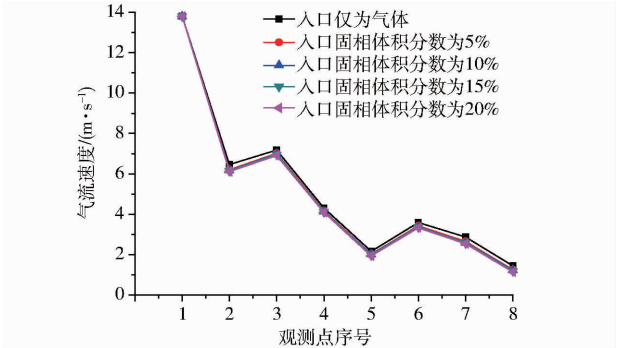


图 5 不同固相体积分数时气流速度变化曲线
Fig. 5 Variation curves of airflow velocity at different solid volume fractions

从图 5 看出, 掺杂固相的气流在风沙分离器内的降速效果明显好于纯气体, 但随着固相体积分数的增大, 气流速度的降幅变化却逐渐不明显。这说明当沙尘含量增高时, 降速效果变好, 风沙分离效果也变好; 当沙尘含量进一步增高时, 降速及风沙分离效果则变化不大。

2.4 沙尘运动规律分析

将气相视为连续相, 固相视为离散相, 在欧拉坐标系下利用 N-S 方程组求解气相的流动特性, 再在拉格朗日坐标系下应用牛顿第二定律求解气相流

场中离散相的运动轨迹来反映整个固相流场,从而揭示每个粒子的运动规律^[15]。假设固相与气相同时等速进入风沙分离器,气相作为主相,固相作为离散的第二相,粒径分别取 0.5、0.1、0.01 mm。首先对气相流场进行数值计算,待计算完毕后再添加入口的粒子喷射流,质量流量取 0.015 2 kg/s。

从图 6a 看出:①在进气管和分流对冲腔内,粒径 0.5 mm 粒子的运动轨迹较多,碰触壁面现象较明显,振荡时间约 1 s,说明此阶段粒子对气流具有较好的跟随性,风沙不易分离。②当粒子下行至扩容腔和反向对冲腔后,振荡时间增至 10 s 以上,下

行至分离腔后仍继续振荡,说明此阶段粒子的自身惯性力已经破坏了流场的诱导,对气流的跟随性大幅减弱,风沙开始分离。③排气管内出现了一条粒子轨迹,在碰触壁面后又返回了分离器,说明当风速小于 13.8 m/s(即风力低于强风)时,粒径 0.5 mm 粒子从排气口排出的可能性不大。

从图 6b、6c 看出,粒径 0.1 mm 和 0.01 mm 粒子的运动轨迹变得平滑有序,振荡时间增长,与壁面的交点减少,说明随着粒径的减小,粒子对气流的跟随性变得更好,受惯性运动的影响变小,发生风沙分离的位置逐渐靠后,从排气口排出的可能性变大。

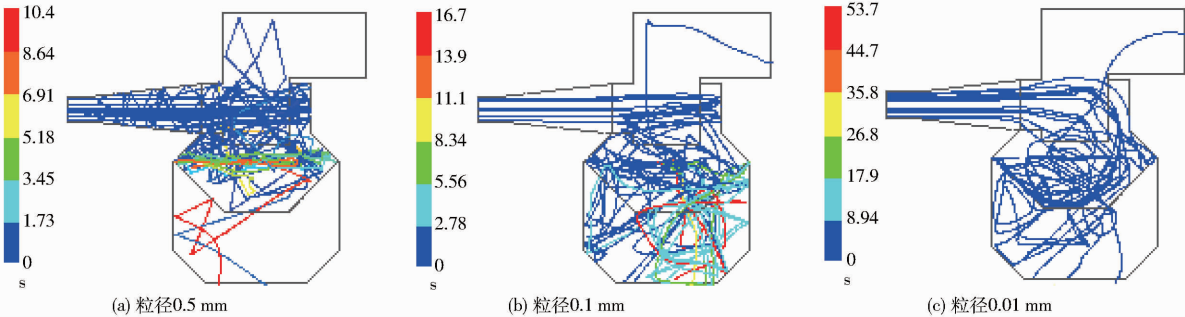


图 6 粒子的运动轨迹
Fig. 6 Trajectories of particles

综上所述,粒子会受到自身惯性力和气流曳力的综合影响。当风力低于强风时,粒径接近或大于 0.5 mm 的粒子受流场变化的影响较小,惯性运动起主要作用,较易脱离气流,从排气口排出的可能性不大;粒径接近或小于 0.1 mm 的粒子容易受到流场的诱导,风沙分离的位置较靠后,从排气口排出的可能性变大,是影响风沙分离效率和集沙效率的主要部分。

3 试验验证

3.1 试验设备

室内微型风洞 1 台,Testo 425 型热敏风速仪 1 部,胶带 1 捆,风沙分离器 1 个,电子秤(精度 0.01 g)1 台,BT2001 型激光粒度分布仪 1 台,土样收集袋 1 个,集沙盒 1 个,输沙漏斗 1 个,计时器 1 个,试验架 1 个,32 目标准筛 1 个,调整板若干。

3.2 试验方法

3.2.1 测试湍动能场分布区域

试验前,在风沙分离器上设计 17 个测孔,如图 7 所示。测孔 1 和 2 分别位于进气管等容段中部和扩容段末端的中心位置,测孔 3~5 位于分流对冲腔中部,测孔 6~8 位于分流对冲腔下端、测孔 3~5 正下方,测孔 9~11 位于扩容腔中部,测孔 12~15 位于上回流腔中部,测孔 3、6、9、12 中心轴线与进气管中心轴线呈 45°,测孔 4、7、10、13 中心轴线与进气管中心轴线呈 90°,测孔 5、8、11、15 中心轴

线与进气管中心轴线呈 135°,测孔 14 中心轴线与进气管中心轴线呈 120°,测孔 16 位于分离腔下端,其中心轴线与进气管中心轴线呈 60°,测孔 17 位于排沙口左下端位置,测速方向与进气管中心轴线呈 0°。

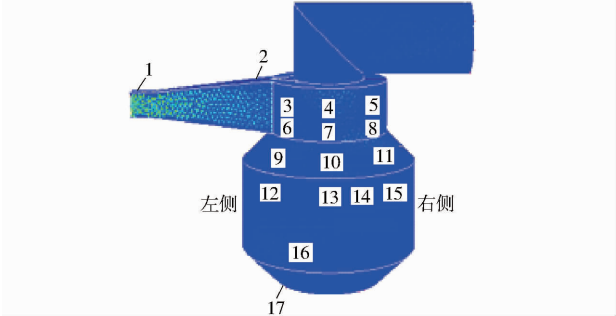


图 7 测孔设计位置示意图
Fig. 7 Design position schematic of measuring hole

试验时,预先将所有测孔密封,固定在试验架上,调整进气口正对微型风洞试验段中心轴线。将 Testo 425 型热敏风速仪探头从微型风洞试验段测速孔伸入,置于中心轴线位置,对准来流方向,开启风机,待风速稳定至 13.8 m/s 时,取出风速仪,密封测速孔。再将风速仪依次伸入测孔 1~17,考虑到测孔内空间狭小,测孔 1、3~8 各取 3 个测点,测孔 2 取 8 个测点,测孔 9~17 各取 10 个测点。将风速仪探头从测孔口沿气流流动的垂直方向缓慢行进,气流的流动方向参照图 3,测点间距为 5 mm,探头在不同方向上可作微调,尽量保证探头正对气流的流

动方向,随机读取 10 个数据。

3.2.2 测试土样体积分数对分离效率的影响

试验土样取自内蒙古农业大学科技园试验田,试验前对土样进行自然干燥,通过恒温箱烘干法,在 105℃ 的烘干箱内将土样干燥 6~8 h 至恒质量,测得自然干燥后土样的含水率为 1.48%。再将自然干燥后的土样,用 32 目标标准筛筛出粒径 0.5 mm 以下的混合土样,取 18 份,每份 1 kg。

试验时,土样添加时间预定为 300、250、200、150、100、50 s 左右,可根据实测添加时间推算出土样所占体积分数。风速取 13.8 m/s,试验完毕后,将集沙盒收集的土样进行称量,采用图 8 所示试验装置。

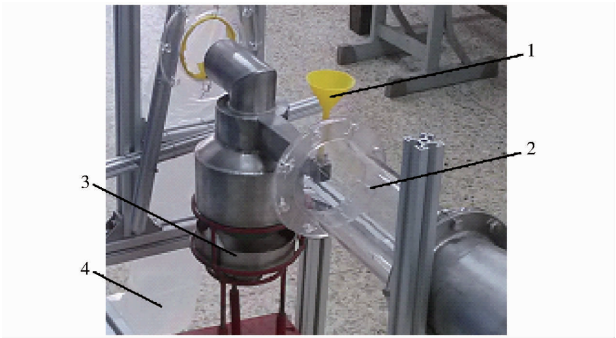


图 8 气固分离试验装置

Fig. 8 Gas - solid separation test device

1. 输沙漏斗 2. 风洞试验段 3. 集沙盒 4. 土样收集袋

3.2.3 测试强风时粒径收集范围

试验土样取 3 份,每份 1 kg。试验装置如图 8 所示,试验时,先将微型风洞试验段风速稳定至 13.8 m/s,再往输沙漏斗内添加土样,添加时间不少于 5 min,重复做 3 次,采用同一个土样收集袋。试验完毕后,利用 BT2001 型激光粒度分布仪的湿法测试系统分析土样收集袋内土样的粒径分布范围。

3.3 试验结果与分析

3.3.1 湍动能场分布区域分析

试验给出了 119 个测点的速度瞬态值,如图 9 所示,较大的脉动值主要分布在测点 1~3、12~17、21~23、30~35、43~46、72~75、81~86 和 102~105。由湍动能公式 $k = 1.5 (\bar{v}I)^2$ 可知,速度均值和湍流强度是影响湍动能的两个主要因素,故在相同速度均值下,脉动值可较好地表征湍动能的大小。由于图 9 中较大脉动值的分布区域与图 4 的湍动能场分布区域基本相符,故可认为湍动能场的数值模拟结果是可靠的。

3.3.2 土样体积分数对分离效率的影响分析

由表 2 可知,随着入口气流中土样所占体积分数的增大,风沙分离器的风沙分离效率也逐渐增大,当体积分数进一步增大时,分离效率的增大趋势减缓,这与数值模拟结果基本相符。

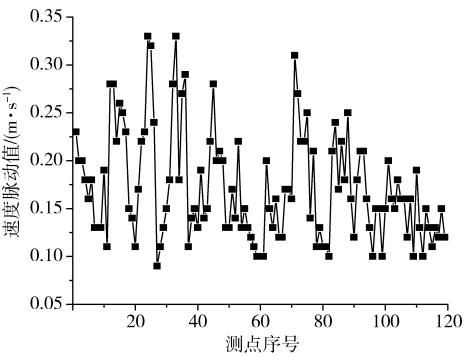


图 9 气流速度的脉动值

Fig. 9 Fluctuation value of airflow velocity

表 2 不同土样体积分数时的分离效率

Tab.2 Separation efficiency at different volume fractions

输沙时间 均值/s	体积分数/ %	集沙质量 均值/g	分离效率/ %
312	0.02	996.83	99.58
265	0.02	997.25	99.73
208	0.03	997.43	99.74
153	0.041	997.52	99.75
117	0.053	997.59	99.76
75	0.053	997.67	99.77

3.3.3 强风时粒径收集范围分析

从激光粒度分布仪的分析数据看,土样收集袋内粒径 0.498~1.453 μm 的土样占 4.18%,粒径 1.453~3.809 μm 的土样占 17.75%,粒径 3.809~9.983 μm 的土样占 36.61%,粒径 9.983~32.41 μm 的土样占 41.46%。可见,当风沙流受强风以下风力(风速小于 13.8 m/s)作用时,粒径大于 0.032 41 mm 的土样可完全被收集,大于经验公式推算的 0.017 mm,小于沙尘运动规律分析的 0.1 mm,这可能归因于数值模拟结果的边界条件、计算设置均是理想化,而试验模型的实际制约条件(如模型不对称度、壁厚、修正等)很难在数值模拟中体现与约束。

4 结论

- (1)气流大幅降速是实现风沙分离的最有效方法,而引起气流速度大幅降低的主要原因是较大值的湍动能场的大范围形成。
- (2)对于风沙流,当沙尘含量增高时,降速效果变好,风沙分离效果也变好;当沙尘含量进一步增高时,降速及风沙分离效果则变化不大。
- (3)对于分流对冲与多级扩容组合式集沙仪,当沙尘受强风以下风力影响时,粒径小于 0.032 41 mm 的沙尘较易受到流场的诱导,受惯性运动的影响较小,从排气口排出的可能性较大,是影响风沙分离效率和集沙效率的主要粒子。

参 考 文 献

- 1 王涛,陈广庭,赵哈林,等.中国北方沙漠化过程及其防治研究的新进展[J].中国沙漠,2006,26(4):507-516.
WANG Tao, CHEN Guangting, ZHAO Halin, et al. Research progress on aeolian desertification process and controlling in north of China[J]. Journal of Desert Research, 2006, 26(4): 507-516. (in Chinese)
- 2 张正偲,董志宝,赵爱国.人工模拟戈壁风沙流与风程效应观测[J].中国科学:地球科学,2011,41(10):1505-1510.
ZHANG Zhengsi, DONG Zhibao, ZHAO Aiguo. Observations of gobi aeolian transport and wind fetch effect[J]. Science China: Earth Sciences, 2011, 41(10): 1505-1510. (in Chinese)
- 3 丁国栋.风沙物理学[M].北京:中国林业出版社,2010.
- 4 宋涛,陈智,边炳传,等.分流对冲与多级扩容组合式自动集沙仪设计与试验[J/OL].农业机械学报,2016,47(11):134-141. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161118&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.018.
SONG Tao, CHEN Zhi, BIAN Bingchuan, et al. Design and experiment of shunt-hedging and multi-stage expansion combined automatic sand sampler[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 134-141. (in Chinese)
- 5 陈宝阔.剪切流传感器结构优化与性能测试[D].天津:天津大学,2012.
CHEN Baokuo. Structural optimization and performance test of shear probe sensor[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese)
- 6 吴翠平.SLG型粉体表面改性机流场特性与数值模拟研究[D].北京:中国矿业大学,2013.
WU Cuiping. Flow field characteristics and CFD simulation of SLG continuous power surface modifying machine[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2013. (in Chinese)
- 7 王升贵.水力旋流器分离过程随机特性的研究[D].成都:四川大学,2006.
WANG Shenggui. Study on the stochastic characteristics of the separation process in hydrocyclones[D]. Chengdu: Sichuan University, 2006. (in Chinese)
- 8 王振波,马艺,金有海.切流式旋流器内两相流场的模拟[J].中国石油大学学报:自然科学版,2010,34(4):136-140.
WANG Zhenbo, MA Yi, JIN Youhai. Simulation of two-phase flow field in tangential hydrocyclone[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2010, 34(4): 136-140. (in Chinese)
- 9 BAGNOLD R A. 风沙荒漠沙丘物理学[M].北京:科学出版社,1954.
- 10 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)
- 11 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.
- 12 宋涛,陈智,麻乾,等.分流对冲式集沙仪设计及性能试验[J/OL].农业机械学报,2015,46(9):173-177. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150925&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.025.
SONG Tao, CHEN Zhi, MA Qian, et al. Design and performance experiment of shunt-hedging sand sampler[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 173-177. (in Chinese)
- 13 吕子剑,曹文仲,刘今,等.不同粒径固体颗粒的悬浮速度计算及测试[J].化学工程,1997,25(5):42-46.
LV Zijian, CAO Wenzhong, LIU Jin, et al. Research of suspension of particle in reactor[J]. Chemical Engineering(China), 1997, 25(5): 42-46. (in Chinese)
- 14 张扬.多孔介质内汽液相变传递的非均匀性效应[D].北京:清华大学,2008.
ZHANG Yang. Nonuniformity effects on transport phenomena in porous media with liquid-vapor phase change[D]. Beijing: Tsinghua University, 2008. (in Chinese)
- 15 黄飞.袋式除尘器内气固两相流动的数值模拟及优化研究[D].南京:东南大学,2012.
HUANG Fei. Numerical simulation and study of airflow uniformity and optimization in bag filter[D]. Nanjing: Southeast University, 2012. (in Chinese)