

基于数值模拟与风洞试验的旋风分离式集沙仪优化设计

黄炎^{1,2}, 赵满全^{1*}

(1. 内蒙古农业大学机电工程学院, 呼和浩特 010018; 2. 北京工业大学机械工程与应用电子技术学院, 北京 100124)

摘要: 为了解风蚀风沙运动规律, 提高旋风分离式集沙仪集沙效率。该文在 Fluent 平台中建立了旋风分离式集沙仪有限元模型, 基于 RNG $k-\varepsilon$ 模型和雷诺应力模型对旋风分离式集沙仪进行数值分析, 并对 3 种不同结构参数旋风分离式集沙仪进行风洞试验。通过有限元分析, 得到了其内部气相运动规律, 观察到集沙仪升气管附近气流强度较大, 其内部有“短路流”存在。同时, 通过对 3 种不同结构参数旋风分离式集沙仪进行数值模拟, 得到结构参数为: 筒体直径 50 mm; 锥体段高度 125 mm 的旋风分离式集沙仪集沙盒底部具有较小的湍动能和向上轴向速度, 其大小分别为 $0.99 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 和 1.48 m/s 。另外, 分别对 3 种不同结构参数旋风分离式集沙仪进行风洞试验, 得到了改变筒体直径与锥体段高度引起集沙盒底部湍流强度的改变, 从而对集沙效率有一定影响, 相比较筒体直径而言, 锥体段高度对集沙效率影响更明显; 集沙盒底部湍动能和向上轴向速度较小的集沙仪, 集沙效率较高, 具有良好的分离性能。结合数值模拟和风洞试验确定了集沙盒底部湍动能、向上轴向速度为目标函数, 根据目标函数, 优化设计了集沙盒直管的长度, 确定了集沙盒直管长 16 mm 的旋风分离式集沙仪可以降低集沙盒底部湍动能和向上轴向速度, 理论上可以提高旋风分离式集沙仪集沙效率。该研究结果可为进一步提高旋风分离式集沙仪性能提供依据。

关键词: 有限元分析; 优化; 效率; 旋风分离式集沙仪; 风洞试验; 目标函数

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.16.008

中图分类号: S237

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-16-0050-07

黄炎, 赵满全. 基于数值模拟与风洞试验的旋风分离式集沙仪优化设计[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 50—56.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.16.008 <http://www.tcsae.org>

Huang Yan, Zhao Manquan. Optimization design of performance test of cyclone separator sand sampler based on numerical simulation and wind erosion tunnel experiment[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(16): 50—56. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.16.008 <http://www.tcsae.org>

0 引言

土壤风蚀是一个世界性的问题^[1-4], 一直困扰着人类。土壤风蚀会带来许多负面影响, 使得土壤中的肥力下降, 严重影响了农作物的生长, 降低了生产率。旋风分离式集沙仪是野外测量风蚀和风洞试验中常见的装置。该装置有助于了解风蚀等风沙运动规律, 其关键技术参数是等动力性, 高效率性和非选择性。

Wilson S J 和 Cooke R U^[5]基于原模型改进了沙尘采集器(modified wilson and cooke, MWAC), 该集沙仪由于其进沙口面积较小, 采集到的沙样较少。但该采集器能够保证进风管始终正对侵蚀风向, 能够在同一位置采集不同高度的沙样。Fryrear^[6]研制了单点由周围空气驱动的采集器(big spring number eight, BSNE)采集仪, 该集沙仪设计了尾翼, 能利用风力使得集沙口始终对准侵蚀风向, 适合于田间长期观测。Hall 等^[7-8]研制了楔形

粉尘流量计, 并对其设计进行了空气动力学讨论。Nickling 和 Neuman^[9]在风洞中对楔形沉积集沙仪(guelph-trent wedge trap, GTWT)进行了研究, 研究表明其具有较好的风向指向性和较高的集沙效率。中国农业大学研制了“中农”沙尘采集仪^[10], 符合采沙器等动力性基本原则, 采沙率为 85.6%。内蒙古农业大学设计了布袋式集沙仪, 该集沙仪属于旋转式集沙仪, 可以调整方向, 能收集不同方向的输沙量, 因此适用于野外观测。赵满全等^[11-12]分析了不同风速下, 集沙仪对 3 种不同土样的集沙量, 试验结果表明: 布袋式集沙仪集沙效率良好。

Fluent 平台提供了灵活的网格特性, 可以对几何体进行结构网格和非结构网格划分^[13]。同时, 其提供了雷诺应力模型、大涡模拟模型、标准 $k-\varepsilon$ 等湍流模型, 可用于二维平面和三维流动分析。侯建龙^[14]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。王灿星^[15]采用雷诺应力模型对螺旋型旋风分离器内部流场进行数值模拟。梁绍青等^[16]采用雷诺应力模型对旋风分离器流场进行了数值模拟, 并对其涡结构进行识别。刘淑艳等^[17]应用雷诺应力模型对旋风分离器不同截面上的切向速度和轴向速度进行分析。

本文主要基于 Fluent 平台对 3 种不同结构参数旋风分离式集沙仪分别进行数值模拟和风洞试验。通过试验与有限元方法的结合, 了解旋风分离式集沙仪内部气流

收稿日期: 2015-06-26 修订日期: 2015-07-27

基金项目: 内蒙古自然科学基金“播种作业方式对农田土壤风蚀影响的测试及其机理研究”项目(2012MS0307)

作者简介: 黄炎, 男(汉), 黑龙江大庆人, 博士生, 主要从事农业机械化新技术研究、现代测控技术与仪器, 北京 北京工业大学机械工程与应用电子技术学院, 100124。Email: hyanbjut@163.com

*通信作者: 赵满全, 男(汉), 内蒙古土右旗人, 教授, 博士生导师。主要从事农业机械化新技术研究, 呼和浩特 内蒙古农业大学机电工程学院, 010018。Email: nmgzhaomq@163.com

运动规律, 同时确定目标函数, 并对旋风分离式集沙仪集沙盒直管长度参数进行优化设计, 提高集沙仪集沙效率, 以期测量出更加准确真实的风蚀量。

1 旋风分离式集沙仪数值计算模型

1.1 工作原理

旋风分离式集沙仪具有结构简单、使用方便等特点。相比较其他分离器, 旋风分离式集沙仪进沙口方向能够始终指向侵蚀方向, 能够在同一位置同时采集不同高度的沙样, 适用于田间长期观测。

其工作原理: 当含有颗粒的气体通过矩形截面进气管进入到旋风分离器内部时, 气流形成的旋流产生离心力, 将颗粒沿着径向抛向壁面。随后气体沿着器壁呈螺旋线性向下流动。当气体接近圆锥段底部时向上折回, 在圆锥和圆筒的中部沿较小的螺旋线向上流动, 因此, 旋风分离器内出现两个旋流, 向上和向下旋流, 但旋转方向却是相同的。颗粒被抛向器壁, 碰到器壁后落下, 从圆锥底部的排尘口排出, 净化的气体从中央的升气管流出。直径很小的颗粒常在未达到器壁前即被卷入上旋气流而被气流带出。其中向下的旋流对于分离器的集沙效率至关重要, 而重力只起到辅助的作用。

1.2 数理模型

湍流流动是高度非线性、复杂的流动, 能否正确选取湍流模型对于模拟旋风分离式集沙仪有很大影响。旋风分离式集沙仪虽然体积小, 但其工作原理与化工常用的旋风分离器相同。许多学者应用 matlab 以及其他不同的数理模型, 研究了旋风分离器内部的规律。

1.2.1 RNG k - ε 模型

对于三维强旋涡而言, 常选用 Yokhot 和 Orszag 改进的 RNG k - ε 模型, k 和 ε 的方程分别为^[13]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + \rho \varepsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\varepsilon}^* \varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2)$$

其中:

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_l \quad (3)$$

$$\mu_l = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

$$C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - \frac{\eta(1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\eta^3} \quad (5)$$

$$\eta = (2E_{ij} \cdot E_{ij})^{1/2} \frac{k}{\varepsilon} \quad (6)$$

$$E_{ij} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (7)$$

$C_\mu=0.09$, $C_{1\varepsilon}=1.42$, $C_{2\varepsilon}=1.68$, $\eta_0=4.377$, $\beta=0.012$, $\alpha_k=1.39$, $\alpha_\varepsilon=1.39$ 。

式中: u 为 x 方向的速度, m/s; i, j 为指标符号; k 为湍

动能, m^2/s^2 ; ε 为湍动耗散率, m^2/s^3 ; ρ 为密度, kg/m^3 ; β 为热膨胀系数, 无量纲; μ 为层流黏度, $kg/(m \cdot s)$; μ_l 为湍动黏度 $kg/(m \cdot s)$, μ_{eff} 为有效黏度, $kg/(m \cdot s)$, G_k 为由于平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项, Pa/s; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 C_μ 、 α_k 、 α_ε 为模型常数; E_{ij} 为反映主流的时均应变率; t 为时间, s; η 为湍流与平均流时间尺度的比例; η_0 为 η 在均匀剪切流中的典型值。

1.2.2 雷诺应力模型

雷诺应力模型中要求解 6 个独立雷诺应力运输方程, 所以相比较 RNG k - ε 模型而言, 在计算时间上来讲, 是相当耗时的, 但特别适合旋风分离式集沙仪中三维强旋涡流动。雷诺应力方程中 k 和 ε 如下:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_l}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \frac{1}{2} (P_{ij} + G_{ij}) - \rho \varepsilon \quad (8)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_l}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{1}{2} (P_{ij} + C_3 G_{ij}) - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (9)$$

其中:

$$C_1=1.44, C_2=1.92, \sigma_k=0.82, \sigma_\varepsilon=1.0$$

式中: P_{ij} 为剪应力产生项, Pa/s; G_{ij} 为浮力产生项, Pa/s, 对于不可压缩的流体, 其值为 0; σ_k 为湍动能对应的 Prandtl 数; σ_ε 为耗散率对应的 Prandtl 数; C_3 为对于可压流体的流动计算中与浮力相关的系数, 当主流方向与重力方向平行, 其值为 1, 主流方向与重力方向垂直, 其值为 0。

1.3 有限元模型边界条件的选定

旋风分离式集沙仪内部是两相运动, 包括空气和土壤颗粒, 旋风分离式集沙仪主要是把土壤颗粒从空气中分离出来, 土壤颗粒由于浓度不是过高, 故土壤颗粒在旋风分离式集沙仪中的运动主要取决于气相 (空气) 的运动情况, 绝大多数的土壤颗粒是伴随着空气一起流动的, 基于上述原因, 需要对空气在旋风分离式集沙仪内的流动做深入分析。

边界条件对于模拟旋风分离式集沙仪中气体流动有很重要的意义^[18-21], 同时对气相做一些简化处理:

1) 旋风分离式集沙仪内气体为空气, 密度 $1.225 kg/m^3$, 黏度为 18.1×10^{-6} , 视为不可压缩气体, 并将其流动视为稳态。

2) 出口设为自由出流。

3) 壁面设为无滑移壁面。

4) 升气管与集沙仪分离器筒体接触的两个重叠面, 分别设置为 Interface 面以便进行数据交换。

5) 旋风分离式集沙仪上半部分与集沙盒密封良好, 没有气体溢出, 其中锥体段与集沙盒连接的直管长度为 10 mm。

6) 计算水力直径 D_{HD} 、雷诺数 Re 以及湍流强度 I 。

水力直径:

$$D_{HD} = \frac{4ab}{2(a+b)} = 0.015 \text{ m} \quad (10)$$

式中: a 为入口截面宽度, m ; b 为入口截面长度, m 。

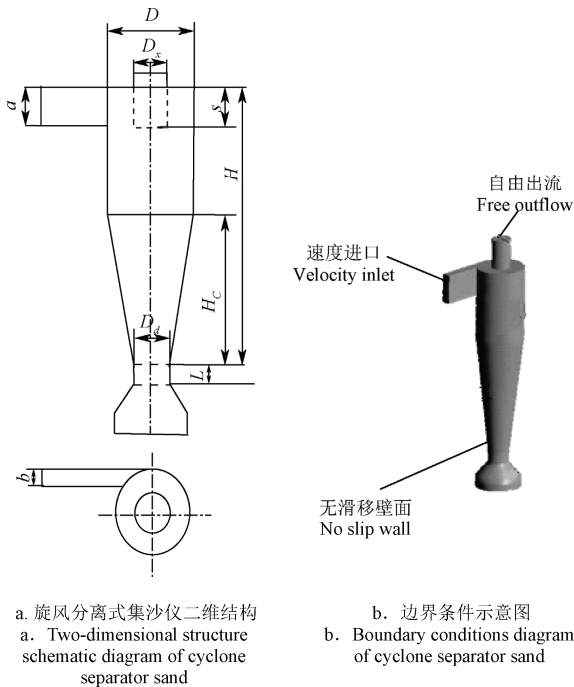
气流速度为 10m/s 时的气流雷诺数为:

$$Re = \frac{\rho v D_{HD}}{\mu} = \frac{1.225 \times 10 \times 0.015}{18 \times 10^{-6}} = 1.02 \times 10^4 \quad (11)$$

式中: ρ 为空气密度, kg/m^3 ; v 为气流速度, m/s ; D_{HD} 为水力直径, m ; μ 为空气黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$

湍流强度: $I = 0.16 \times (Re)^{-1/8} \times 100\% = 5.1\%$

旋风分离式集沙仪结构组成及边界如图 1 所示。



注: a 为入口截面高度, b 为入口截面宽度, D 为筒体直径, D_s 为升气管直径, H_c 为锥体段高度, s 为升气管插入深度, H 为总高度, D_d 为集沙口直径, L 为锥体段与集沙盒连接处直管的长度。
Note: a is inlet section height, b is inlet section width, D is cylinder diameter of the cylindrical section, D_s is riser diameter, H_c is the height of cone, s is insertion depth of riser, H is total height, D_d is diameter of the sand mouth, L is the length of the straight tube between cone and sandbox.

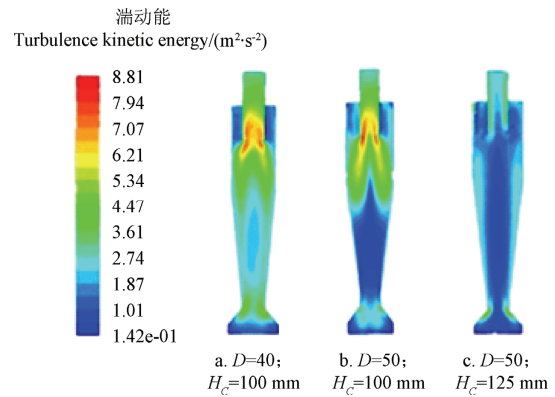
图 1 旋风分离式集沙仪结构及边界条件示意图

Fig.1 Structure and boundary conditions diagram of cyclone separator sand sampler

1.4 数值模拟与分析

通过图 2 可以看出, 结构参数 $D=40 \text{ mm}$; $H_c=100 \text{ mm}$ 旋风分离式集沙仪最大湍动能为 $8.61 \text{ m}^2/\text{s}^2$, 主要集中在升气管附近, 说明升气管附近气流强度大, 集沙盒底部最大湍动能为 $2.28 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 。结构参数 $D=50 \text{ mm}$; $H_c=100 \text{ mm}$ 旋风分离式集沙仪最大湍动能为 $8.81 \text{ m}^2/\text{s}^2$, 集沙盒底部最大湍动能为 $1.87 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 。结构参数 $D=50 \text{ mm}$; $H_c=125 \text{ mm}$ 旋风分离式集沙仪最大湍动能为 $7.17 \text{ m}^2/\text{s}^2$, 集沙盒底部最大湍动能为 $0.99 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 。

通过比较 3 种不同结构参数旋风分离式集沙仪可以看出, 筒体直径对集沙盒底部湍动能影响较小, 锥体段高度对集沙盒底部湍动能影响较大。



注: D 为筒体直径; H_c 为锥体段高度, 下同。

Note: D is cylinder diameter; H_c is cone segment height, same as below.

图 2 3 种结构旋风分离式集沙仪湍动能对比图

Fig.2 Comparison chart of turbulent kinetic energy of three structures sand trap separator

通过图 3 可以看出, 结构参数 $D=40 \text{ mm}$; $H_c=100 \text{ mm}$ 旋风分离式集沙仪集沙盒底部最大向上轴向速度为 2.36 m/s 。结构参数 $D=50 \text{ mm}$; $H_c=100 \text{ mm}$ 旋风分离式集沙仪集沙盒底部最大向上轴向速度为 1.92 m/s 。结构参数 $D=50 \text{ mm}$; $H_c=125 \text{ mm}$ 旋风分离式集沙仪集沙盒底部最大向上轴向速度为 1.48 m/s 。轴向速度主要有 2 个方向, 主要是由于旋风分离式集沙仪内部存在 2 个旋流, 外旋流的轴向速度向下, 这可以使得土壤颗粒随着外旋流向下运动, 有助于土壤颗粒的分离。同时, 旋风分离式集沙仪存在内旋流, 特别是集沙盒底部向上的轴向速度, 会使得已经被分离的土壤颗粒随着内旋流逃离集沙盒, 这对于提高集沙效率来说是不利的。故应该尽量减小集沙盒内向上的轴向速度。

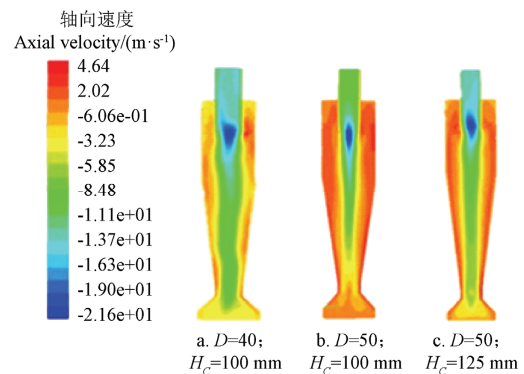


图 3 3 种结构旋风分离式集沙仪轴向速度对比图

Fig.3 Comparison chart of axial velocity of three structures sand trap separator

2 旋风分离式集沙仪试验

应用离散相模型 (discrete model, DEM), 模拟计算旋风分离式集沙仪集沙效率, 由于颗粒大小随机性较大, 相关参数较难确定。本文通过对 3 种不同结构参数旋风分离式集沙仪进行风洞试验, 检测其集沙效率, 相比较 DEM 模型更具有说服力。

2.1 试验设备与样品

采用内蒙古农业大学机电工程学院自行设计制造的

OFDY-1.2 移动式风蚀风洞^[22]，如图 4 所示，该设备具有操作性能好，模拟测试功能齐全等特点。OFDY-1.2 可移动式风洞性能参数如下：总长：11 800 mm，试验段：7 200 mm，截面：宽 1 000 mm，高 1 200 mm，收缩比：1.7，风机功率：30 kW，调速范围：0~20 m/s，连续可调。

试验土样为混合土样，通过电热鼓风干燥箱干燥测得含水率为 1.05%，取混合土壤 600 g，通过机械振动筛对混合土样进行筛选，得出混合土壤的粒径组成成分为：大于 0.3 mm 为 2.38 g，0.3~0.15 mm 为 128.06 g，0.15~0.1 mm 为 262.67 g，0.1~0.075 mm 为 3.91 g。



图 4 OFDY-1.2 可移动式风洞

Fig.4 OFDY-1.2 type of movable wind erosion tunnel

试验时，外部环境为零下 6℃。将旋风分离式集沙仪放在风洞轴线处，然后起动风机，调节变频器（L300-300HFE 型号）使得风洞内的风速稳定，接下来起动排沙器并开始计时。

在内蒙古农业大学机电工程学院风洞实验室内，对 3 种不同结构的集沙仪进行试验。旋风分离式集沙仪在 10 m/s 的风速下，旋风分离式集沙仪的土壤颗粒收集量与高度的关系，如表 1。

表 1 3 种集沙仪不同层土壤收集量
Table 1 Amount of soil collected in three different layers of sand trap

结构参数 Structure parameters/ mm	次数 Number	不同层数下集沙量 Amount of soil collected in different layers/g					
		1	2	3	4	5	6
$D=40$; $H_C=100$	1	6.80	0.77	0.02	0.01	0.01	0.01
	2	6.34	0.69	0.02	0.01	0.01	0.01
	3	7.11	0.86	0.02	0.01	0.01	0.01
	4	6.77	0.72	0.02	0.01	0.01	0.01
	5	6.58	0.83	0.02	0.01	0.01	0.01
$D=50$; $H_C=100$	1	8.21	0.86	0.02	0.01	0.01	0.01
	2	8.23	0.78	0.02	0.01	0.01	0.01
	3	7.96	0.74	0.02	0.01	0.01	0.01
	4	8.11	0.81	0.02	0.01	0.01	0.01
	5	8.26	0.88	0.02	0.01	0.01	0.01
$D=50$; $H_C=125$	1	12.51	0.92	0.03	0.01	0.01	0.01
	2	12.19	1.03	0.03	0.01	0.01	0.01
	3	12.35	1.00	0.03	0.01	0.01	0.01
	4	12.96	1.08	0.02	0.01	0.01	0.01
	5	12.81	0.97	0.03	0.01	0.01	0.01

注：D 为筒体直径； H_C 为锥体段高度。

Note: D is cylinder diameter; H_C is cone segment height.

2.2 结果与分析

用风洞实验室，对 3 种不同结构参数的旋风分离式

集沙仪进行试验，通过试验结果可以看出，集沙量与集沙高度呈幂函数规律变化。集沙仪不同层上的分离器收集到的土壤颗粒含量不同，第 1 层分离器收集到的土壤颗粒较多，第 2 层分离器收集土壤颗粒较少，第 3 层到第 6 层收集土壤颗粒则更少。故 3~6 层旋风分离器土壤颗粒采集量，随旋风分离式集沙仪结构参数的改变并没有显著变化。结构参数 $D=40$ mm； $H_C=100$ mm 旋风分离式集沙仪的第 1 层集沙量最少，结构参数 $D=50$ mm； $H_C=125$ mm 旋风分离式集沙仪的第 1 层集沙量最多。结构参数 $D=50$ mm； $H_C=100$ mm 旋风分离式集沙仪的第 1 层集沙量居中。说明筒体直径与锥体段高度对集沙效率有一定影响，锥体段高度影响集沙效率更大。

3 优化设计方案

3.1 目标函数与方案确定

旋风分离式集沙仪内部流场复杂，影响其集沙效率因素有很多：1）中国石油大学高翠芝等^[23]，通过研究旋风分离器内部压降来得出自然旋风长度。魏耀东，张静等^[24]采用激光多普勒测试系统（laser doppler velocimetry, LDV）定义了自然旋风长，钱付平，章名耀^[25-26]基于响应曲面法研究了自然旋风长。大量学者对自然旋风长进行了研究，自然旋风长对于旋风分离器分离效率及其他性能有很大的影响。2）“短路流”的存在，即部分气体并未沿着旋风分离器向下运动，而是沿着升气管的外壁，从升气管流出，带走部分颗粒，使得分离效率降低。3）“灰斗返尘”现象，即被旋风分离器分离落入到集沙盒内的土壤颗粒，由于气流的干扰，重新进入分离器，有的甚至随着内旋流，逃离分离器，造成集沙效率降低。

根据上文对 3 种不同结构参数旋风分离式集沙仪进行数值模拟和风洞试验，集沙盒底部湍动能较小的集沙量大，这是由于湍动能表示湍流强度，相关学者对分离器内部湍动能进行了分析，在本文旋风分离式集沙仪中，湍动能间接反映集沙盒底部气流稳定性，集沙盒底部气流越稳定越好。王乐勤^[27]的研究也表明，湍动能能够表征气流不稳定性。故说明集沙盒底部湍动能越小，集沙效率越高。另外，集沙盒底部向上轴向速度会使得已经被收集的土壤颗粒随着上升气流通过升气管流出集沙仪，从而影响集沙效率，故也应该作为目标函数进行考虑。

通常，现用旋风分离式集沙仪直管长度为 10 mm。本文对集沙盒上部直管长度参数进行改进，以降低集沙盒底部湍动能和向上轴向速度，尽量减少土壤颗粒重新进入旋风分离式集沙仪内部，从而达到提高集沙效率的目的，直管长度分别取 12、14、16、18、20、25、30 mm。

3.2 结果与分析

从集沙盒底部湍动能与直管长度参数的关系，如图 5a 所示，可以看出集沙盒底部湍动能随着直管长度的增加，先减少后增大，在直管长度为 14、16 mm 时，集沙盒底部湍动能较小，对已经落入到集沙盒底部的土壤颗粒搅动较小，可以有效减少已经被收集到的土壤颗粒重新进入旋风分离式集沙仪，从而提高旋风分离式集沙仪

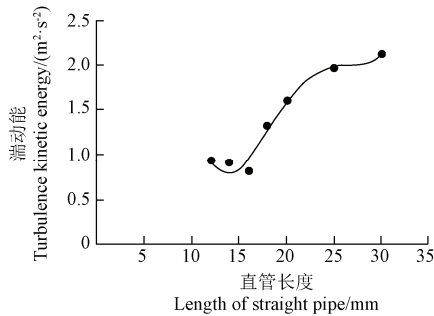
分离效率。其关系拟合方程如下:

$$y = 0.001x^4 - 0.0118x^3 + 0.379x^2 - 5.1264x + 25.478 \quad (10)$$

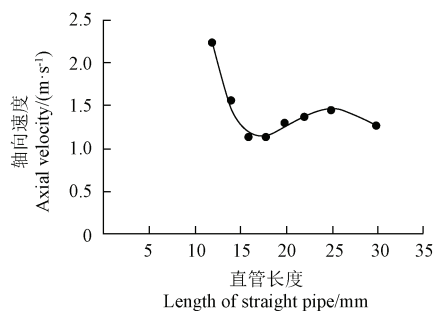
从集沙盒底部向上轴向速度与直管长度参数的关系,如图 5b 所示,可以看出集沙盒底部向上轴向速度随着直管长度的增加,先减少后增加,然后再减小。在直管长度为 16、18 mm 时,集沙盒底部向上轴向速度较小,这将使得土壤颗粒随着向上的气流而逃逸的数量减少,从而提高旋风分离式集沙仪的集沙效率。其关系拟合方程如下:

$$y = 0.0001x^4 - 0.0098x^3 + 0.35x^2 - 5.419x + 31.584 \quad (11)$$

通过改变集沙盒直管长度参数,对集沙盒底部湍动能、向上轴向速度进行分析,得出集沙盒直管为 16 mm 时,集沙盒底部湍动能和向上轴向速度较小,增加了集沙盒底部气流稳定性,降低了已经被集沙仪收集的土壤颗粒随着上升气流逃离集沙仪的几率,从而提高了旋风分离式集沙仪集沙效率。



a. 不同直管长度下集沙盒底部湍动能曲线拟合图
a. Fitting curves of turbulent kinetic energy of bottom sandbox of different structure



b. 不同直管长度下集沙盒底部向上轴线速度曲线拟合图
b. Fitting curves of upward axial velocity of bottom sandbox of different structure

图 5 不同直管长度下集沙盒底部湍动能和向上轴线速度曲线拟合图

Fig.5 Fitting curves of turbulent kinetic energy and upward axial velocity of bottom sandbox of different structure

4 结 论

本文基于 Fluent 平台,分析了旋风分离式集沙仪内部的流场,同时对 3 种不同结构参数的集沙仪进行数值模拟和风洞试验,确定了目标函数,对直管长度参数改进,得出主要结论如下:

1) 基于 RNG $k-\varepsilon$ 模型和雷诺应力模型分析了旋风分

离式集沙仪中气相运动规律,观察到升气管附近气流强度较大,其内部有“短路流”存在。

2) 通过对 3 种不同结构参数旋风分离式集沙仪进行有限元分析和风洞试验,得出了旋风分离式集沙仪锥体段高度、筒体直径对其集沙效率有一定的影响,其中前者对集沙效率更具有显著影响。

3) 结合对旋风分离式集沙仪进行有限元分析和风洞试验,确定了集沙盒底部湍动能、向上轴向速度为目标函数,优化设计了旋风分离式集沙仪直管长度参数,当直管长度为 16 mm 时,集沙盒底部湍动能和向上轴向速度较小,旋风分离式集沙仪集沙效率较高。

[参 考 文 献]

- [1] 孙悦超, 麻硕士, 陈智, 等. 北方农牧交错区草原地表土壤风蚀原位测试技术[J]. 农业机械学报, 2010, 41(6): 49—52.
Sun Yuechao, Ma Shuoshi, Chen Zhi, et al. In situ testing on soil erosion of grassland surface in the northern farming-pastoral zone[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 49—52. (in Chinese with English abstract)
- [2] 冯晓静, 高焕文, 李洪文, 等. 北方农牧交错带风蚀对农田土壤特性的影响[J]. 农业机械学报, 2007, 38(5): 51—54.
Feng Xiaojing, Gao Huanwen, Li Hongwen, et al. Effect of wind erosion in agro-pastoral regions on soil characteristics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural, 2007, 38(5): 51—54. (in Chinese with English abstract)
- [3] 陈智. 阴山北麓农牧交错区地表土壤抗风蚀能力测试研究[D]. 内蒙古: 内蒙古农业大学机电工程学院, 2006.
Chen Zhi. Testing Study on Capability of Anti-wind Erosion of Land Surface Soil in the Cross Region Between Farmland and Grassland in Yinshan Mountain Area[D]. Inner Mongolia: College of Mechanical and Electrical Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, 2006. (in Chinese with English abstract)
- [4] 臧英, 高焕文. 国外农田风蚀发生机理与防治技术的研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(3): 195—198.
Zang Ying, Gao Huanwen. Research on occurrence mechanism and control technology of wind erosion in agricultural lands[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2002, 18(3): 195—198. (in Chinese with English abstract)
- [5] Goossens D, Offer Z Y. Wind tunnel and field calibration of six aeolian dust samplers[J]. Atmospheric Environment, 2000, 34(7): 1043—1057.
- [6] Fryrear D W. A field dust sampler[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1986, 41(2): 117—120.
- [7] Hall D J, Upton S L. A wind tunnel study of the particle collection efficiency of an inverted frisbee used as a dust deposition gauge[J]. Atmospheric Environment, 1988, 22(7): 1383—1394.
- [8] Hall D J, Waters R A. An improved, readily available dustfall gauge[J]. 1986, 20(1): 219—222.

- [9] Nickling W G, Neuman C. Wind tunnel evaluation of a wedge-shaped aeolian sediment trap[J]. *Geomorphology*, 1997, 18(3): 333—345.
- [10] 臧英, 高焕文. 土壤风蚀采沙器的结构设计性能试验研究[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(3): 46—50.
Zang Ying, Gao Huanwen. Structural design and performance test of dust sampler for wind erosion measurements[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2006, 22(3): 46—50. (in Chinese with English abstract)
- [11] 赵满全, 王金莲, 刘汉涛, 等. 集沙仪结构参数对集沙效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(3): 140—145.
Zhao Manquan, Wang Jinlian, Liu Hantao, et al. Effects of configuration parameters of sand sampler on sand collection efficiency[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2010, 26(3): 140—145. (in Chinese with English abstract)
- [12] 王金莲. 布袋式集沙仪结构参数对集沙效率影响的试验研究[D]. 内蒙古: 内蒙古农业大学机电工程学院, 2008.
Wang Jinlian. Experimental Study on Influence on Sand Collection Rate on Configuration Parameter of Hop-pocket Sand[D]. Inner Mongolia: College of Mechanical and Electrical Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [13] 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.
- [14] 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 with English abstract)
- [15] 王灿星. 螺旋型旋风分离器的减阻研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
Wang Canxing. The Study of Drag Reduction in the Spiral Cyclone[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [16] 梁绍青, 王铨健. 旋风分离器流场数值模拟及其涡结构识别[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(增刊 1): 262—266.
Liang Shaoqing, Wang Chengjian. Numerical simulation of the flow field in a cyclone separator and vortex identification[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(Sup.1): 262—266. (in Chinese with English abstract)
- [17] 刘淑艳, 张雅, 王保国. 用 RSM 模拟旋风分离器内的三维湍流流场[J]. *北京理工大学学报*, 2005, 25(2): 377—379.
Liu Shuyan, Zhang Ya, Wang Baoguo. Cyclone separator Three-dimensional turbulent flow-field simulation using the Reynolds stress model[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2005, 25(2): 377—379. (in Chinese with English abstract)
- [18] 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 with English abstract)
- [19] 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 with English abstract)
- [20] 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.
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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2010, 26(9): 171—175. (in Chinese with English abstract)
- [21] 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 with English abstract)
- [22] 范贵生. 可移动式风蚀风洞设计及其空气动力学性能研究[D]. 内蒙古: 内蒙古农业大学, 2005.
Fan Guisheng. Study on Design and Aerodynamic Performance of Movable Wind Erosion Tunnel[D]. Inner Mongolia: College of Mechanical and Electrical Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, 2005. (in Chinese with English abstract)
- [23] 高翠芝, 孙国刚, 董瑞倩. 旋风分离器旋风长度的分析计算[J]. *石油学报*: 石油加工, 2012, 28(1): 94—98.
Gao Cuizhi, Sun Guogang, Dong Ruiqian. Analysis calculation of the vortex length in a gas cyclone[J]. *Acta Petrolei Sinica: Petroleum Processing Section*, 2012, 28(1): 94—98. (in Chinese with English abstract)
- [24] 魏耀东, 张静, 宋健斐, 等. 旋风分离器自然旋风长的试验研究[J]. *热能动力工程*, 2010, 25(2): 206—210.
Wei Yaodong, Zhang Jing, Song Jianfei, et al. Experimental study of the natural cyclone length of a cyclone length of cyclone separator[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy&Power*, 2010, 25(2): 206—210. (in Chinese with English abstract)
- [25] 钱付平, 章名耀. 基于响应曲面法旋风分离器的自然旋风长[J]. *东南大学学报*: 自然科学版, 2006, 36(2): 247—251.
Qian Fuping, Zhang Mingrao. Natural vortex lengths of cyclone separators based on response surface methodology[J]. *Journal of Southeast University: Natural Science Edition*, 2006, 36(2): 247—251. (in Chinese with English abstract)
- [26] 钱付平. 不同排尘结构及操作条件旋风分离器分离特性的研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.
Qian Fuping. Study on the Separation Characteristic of a Cyclone Separator with Different Dust Outlet Geometries and Operating Conditions[D]. Nanjing: Southeast University, 2006. (in Chinese with English abstract)
- [27] 王乐勤, 郝宗睿, 王循明, 等. 筒体长度对旋风分离器内

流场影响的数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(2): 223—226.
Wang Leqin, Hao Zongrui, Wang Xunming, et al. Numerical

simulation of flow field in cyclone of different height[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30(2): 223—226. (in Chinese with English abstract)

Optimization design of performance test of cyclone separator sand sampler based on numerical simulation and wind erosion tunnel experiment

Huang Yan^{1,2}, Zhao Manquan^{1*}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering of Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;

2. College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology of Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: For the purpose of knowing the motion law of sand erosion and improving the efficiency of cyclone separation sand sampler, the finite element model of cyclone separation sand sampler is built by using the software of Fluent. There is a two-phase movement inside the cyclone separation sand sampler, including air and soil particles. The cyclone separation sand sampler mainly separates the soil particles from the air. Since the concentration of the soil particles is not too high, its movement inside the sand sampler depends largely on the gas phase (air) movement, and a majority of the particles flow with the air. Due to the above-mentioned reasons, it is necessary to make further analysis on the air flow inside the cyclone separation sand sampler. Boundary conditions are of great importance to the simulation of the gas flow inside the cyclone separation sand sampler, and the gas phase has been simplified: the gas in the sand sampler is air, with a density of 1.225 kg/m^3 and a viscosity of 18.1×10^{-6} ; it is treated as incompressible gas, and its flow is treated as in steady state; the exit is set for free outflow; the wall surface is set as no skidding and no moving surface; the 2 surfaces overlapped by the ascension pipe and the barrel of the sand sampler are set respectively as Interface for data exchange; the upper part of the sand sampler and the sandbox are sealed well, without gas flowing out; the straight pipe connecting the cone-shaped part and the sandbox is 10 mm long; the hydraulic diameter is 0.015 mm, the Reynolds number is 1.02×10^4 and the turbulent intensity is 5.1%. Based on the RNG $k-\varepsilon$ model and the Reynolds stress model, numerical analysis is carried out for the cyclone separation sand sampler. Besides, some wind tunnel tests are made for 3 cyclone separation sand samplers with different structure parameters. The internal motion law of the gas phase is found through the finite element analysis; current field intensity near the gas exit tube of the sand sampler is stronger and the “shunting flow” exist inside. At the same time, by the numerical simulation of 3 cyclone separation sand samplers with different structure parameters, the results show that the sand sampler with cylinder diameter of 50 mm, and cone height of 125 mm has the smaller turbulent kinetic energy $0.99 \text{ m}^2/\text{s}^2$ and the maximum upward axial velocity 1.48 m/s in sandbox bottom. In addition, the wind tunnel test is done with 3 different structural parameters of the cyclone separation sand sampler, and the experimental results show the turbulent kinetic energy of sandbox bottom which has certain impact on the trapping efficiency is changed with cylinder diameter and cone segment height. Compared to cylinder diameter, cone segment height has greater influence on the efficiency of the cyclone separation sand sampler. The cyclone separation sand sampler has better separation performance and higher trapping efficiency when the turbulent kinetic energy and the upward axial velocity of sandbox bottom are lesser. Through numerical simulation and wind tunnel test, the objective function is determined by the turbulent kinetic energy and the upwards axial velocity of the bottom of sandbox. The length of the straight tube of sandbox is optimally designed through the objective function. The efficiency of cyclone separation sand sampler can be improved while the straight pipe of sandbox is 16 mm. The results can provide the basis for further enhancing the performance of cyclone separation sand sampler.

Key words: finite element analysis; optimization; efficiency; cyclone separator sand sampler; wind tunnel test; objective function