

风沙绕流运动对农业设施影响的数值模拟研究\*

刘博<sup>1,2</sup>, 黄新成<sup>1,2</sup>, 王旭峰<sup>1,2</sup>, 蒋建云<sup>1,2</sup>, 田建刚<sup>1,2</sup>

(1. 塔里木大学机械电气化工程学院,新疆阿拉尔,843300; 2. 南疆农业机械化研究中心,新疆阿拉尔,843300)

**摘要:**针对沙尘暴对南疆地区农业设施的影响现状,利用欧拉双流体模型,研究多相流动控制方程。采用有限元流体模拟软件 FLUENT,选用基于雷诺平均的标准  $k-\omega$  湍流模型,对风沙绕流农业设施进行数值模拟,并采用用户自定义函数(UDF)初始化风速。模拟结果与柱状图对照表明:农业设施迎风面、背风面和侧面最大风压分别为 308N、-251N 和 -251N;设施周围风速在垂直地面方向呈现分层结构、在背风面水平方向由内向外风速呈先增大后减少趋势;离散相模拟结果显示沙粒运动轨迹绕行农业设施呈抛物线下落,由设施在整个流体空间所占尺寸比例得出在 20m 后的区域形成堆积。模拟结果有助于预测农业设施周围风沙运动、沙粒堆积情况,可以为农业设施建设的优化设计和周围环境改善提供重要参考。

**关键词:**风沙绕流;多相流;FLUENT;数值模拟;农业设施

**中图分类号:**P931.3; O368   **文献标识码:**A   **文章编号:**2095-5553(2016) 03-0245-05

刘博,黄新成,王旭峰,蒋建云,田建刚. 风沙绕流运动对农业设施影响的数值模拟研究[J]. 中国农机化学报,2016,37(3): 245~249

Liu Bo, Huang Xincheng, Wang Xufeng, Jiang Jianyun, Tian Jiangang. Numerical simulation research on flow field of wind with sands around agricultural facilities [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(3): 245~249

0 引言

近年来,南疆地区沙尘暴与沙漠化对当地经济的可持续发展造成了严重威胁,影响了人类的生产活动。空气挟沙在地表和空中运动是春季沙尘暴形成的主要因素,也是沙漠化过程的主要表现形式<sup>[1]</sup>,而风沙两相流与外界环境的相互作用是风沙流动的非平衡性与结构的非均匀性研究的关键问题之一<sup>[2]</sup>。针对风沙运动机理的研究,黄宁,郑晓静在微观结构上分析风沙运动沙粒空中碰撞的力学模型以及风沙运动数值模拟<sup>[3]</sup>;张默在宏观上模拟风沙运动对城市高层建筑物的影响<sup>[4]</sup>;孙兰东,刘德祥在农业上主要研究沙尘暴对农业社会经济影响<sup>[5]</sup>。然而针对沙尘暴对农业设施影响的研究未见相关报道。新疆作为中国重要的农产品生产基地,沙尘暴严重制约着当地的农业经济发展,而粗放的农业设施建设对农业环境的影响比较深,因此合理的农业设施建设显得尤为重要。本文采用流体力学模拟软件 FLUENT,模拟风沙两相流对农业设施的影响,有助于设施建设的优化设计,为沙尘暴灾害预防工作提供

可行性参考,为更有效的农业生产提供了理论依据。

1 控制方程

1.1 多相流控制方程的通用形式

本文采用欧拉双流体模型进行计算,多相流控制方程的形式<sup>[6]</sup>

$$\frac{\partial}{\partial t}(\gamma_i \rho_i \phi_i) + \nabla \cdot (\gamma_i \rho_i u_i - \gamma_i \vec{\Gamma}_i \nabla \phi_i) = \gamma_i s_i \quad (1)$$

式中:  $\gamma_i$ ——各相体积含量;  
 $\rho_i$ ——各相密度;  
 $\phi_i$ ——任意的守恒特性;  
 $\Gamma_i$ ——交换系数;  
 $s_i$ ——源项。

对两相紊流进行模拟时,必须引入  $\Gamma_i$ 、 $s_i$ ,并考虑密度、速度、 $\phi$  和其它量之间的关系,从而求解出各变量的时均值。

1.2 气相控制方程

钝体绕流问题的气体相控制方程采用粘性不可压缩气固耦合的 Navier-Stokes<sup>[7]</sup> 方程描述。

气相连续性方程

收稿日期:2014 年 9 月 15 日    修回日期:2014 年 10 月 16 日  
\* 基金项目:国家自然科学基金项目(11242013, 11162017)  
第一作者:刘博,男,1989 年生,山东菏泽人,硕士,助理研究员;研究方向为风沙运动对环境影响。E-mail: 596150756@qq.com  
通讯作者:黄新成,男,1983 年生,新疆阿拉尔人,硕士,讲师;研究方向为风沙运动对环境影响。E-mail: wildlilus@163.com

$$\frac{\partial(\alpha_G\rho_G)}{\partial t}+\nabla\cdot(\alpha_G\rho_Gv_G)=0\tag{2}$$

气相动量守恒方程

$$\begin{aligned}\frac{\partial(\alpha_G\rho_Gv_G)}{\partial t}+\nabla\cdot(\alpha_G\rho_Gv_G^2)\\=\nabla\cdot\tau_G-\alpha_G\nabla p+\alpha_G\rho_Gg-\beta(v_G-v_s)\end{aligned}\tag{3}$$

式中： $\alpha_G$ ——空气相体积分数；

$\alpha_s$ ——沙粒相体积分数；

$\rho_G$ ——某一特定时刻和位置处的空气相密度；

$\rho_s$ ——某一特定时刻和位置处的沙粒相密度；

$v_G$ ——空气的速度；

$v_s$ ——沙粒的速度。

两种流体相互作用，又分别按照自己的规律运动。

### 1.3 固相控制方程

把沙粒类比为气体分子，借助速度分布函数的 Boltzmann 方程推导出沙粒相的各种物理参数及守恒方程。

固体相连续性方程<sup>[8]</sup>

$$\frac{\partial(\alpha_s\rho_s)}{\partial t}+\nabla\cdot(\alpha_s\rho_sv_s)=0\tag{4}$$

固体相动量守恒方程

$$\begin{aligned}\frac{\partial(\alpha_s\rho_sv_s)}{\partial t}+\nabla\cdot(\alpha_s\rho_sv_s^2)\\=\nabla\cdot\tau_s-\alpha_s\nabla p-\nabla p_s^*+\alpha_s\rho_sg-\beta(v_s-v_G)\end{aligned}\tag{5}$$

式中： $\tau_s$ ——黏性应力；

$p$ ——气体压力；

$g$ ——重力加速度；

$\beta$ ——拖曳系数；

$p_s^*$ ——固体压力。

其中  $\beta$  是用来描述气固两相间动量交换的物理量<sup>[6]</sup>。

## 2 数值研究

### 2.1 物理建模

在数值模拟时，计算域的大小和仿真过程中的计算量以及仿真结果的精确度息息相关，本文在综合考虑各因素的条件下，设定计算域和农业设施模型的尺寸分别为 60m×30m×40m、2m×5m×8m，将模型放置在计算域入口 1/3 处，使计算域出口边界位于模型后约等于模型 8 倍高度处，以确保风沙流达到充分发展状态，建立计算域物理模型如图 1 所示。

### 2.2 网格划分

由于计算域对称分布，为了减少计算量，本文在  $xy$  面处将流域进行切割，仅对  $z>0$  部分进行网格划分。网格划分包括结构性网格划分和非结构性网格划分，非结构性网格具有网格自适应性，能够提高数值模拟的精确度。为了划分高质量网格，还需要用通过农业设施模型的 4 个平面对流域进行切割，将整个流域

切割成 11 个几何体。通过多次试划，最终将计算域划分为非结构性混合网格，其中节点数为 301 806，单元体个数为 287 500，计算域内网格布置如图 2 所示。

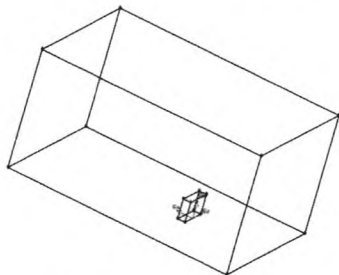


图 1 计算域物理模型

Fig. 1 Physical model of calculation domain

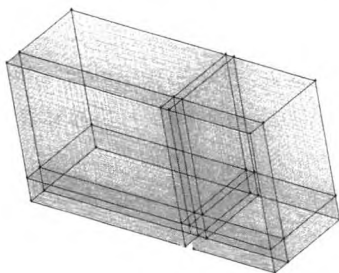


图 2 计算域网格布置图

Fig. 2 Grid arrangement drawing of calculation domain

### 2.3 设定边界条件

设置风流速度入口边界：根据著名的壁面定理，当高度不超过 450m 时，风沙沿高度呈指数分布<sup>[9]</sup>

$$U/U_{ref}=(y/y_{ref})^{\alpha}\tag{6}$$

式中： $U$ ——风速；

$U_{ref}$ ——参考速度(常数)；

$y$ ——高度值；

$y_{ref}$ ——参考高度(常数)；

$\alpha$ ——指数。

设定某一风场中  $U_{ref}=12.7$ 、 $y_{ref}=0.609\ 6$ 、 $\alpha=0.3$ 。根据上式选用宏 DEFINE\_PROFILE 来编写用户自定义入口速度函数 (User-Defined Functions, UDF)，将函数命名为 inlet\_x\_velocity。在 Define/ User-Define/ Functions/ Interpreted 模块中解释编写好的 UDF 函数。设置速度入口边界 (Velocity-Inlet) 时，在下拉菜单处选择 udf inlet\_x\_velocity，点击 OK 即可。另外，还需要设置压力出口边界条件、对称边界、顶部边界、底部固壁边界、侧面固壁边界。

## 3 模拟结果分析

### 3.1 流体相模拟结果分析

#### 3.1.1 压力分布云图

如图 3 所示，在设施模型迎风面形成一个正压区，且随着高度的增加压力逐渐增大，模拟结果与柱状图

对照显示农业设施迎风面、背风面和侧风面区域的最大风压分别为 308N、-251N 和 -251N。由于净空气流的风速随高度呈指数分布<sup>[10-14]</sup>，风速随高度的增加而增加，故在模型迎风面的顶部形成一个高压区。另外，在模型的背风面形成一个负压区，模型前后压力差导致风流产生分离、涡旋和涡转等现象。图 4 是  $y=2$  水平面处的压力分布云图，从图中可以更清晰的看到设施模型前后的压力分布规律，以及由于压力差而在背风面形成的两个涡旋。

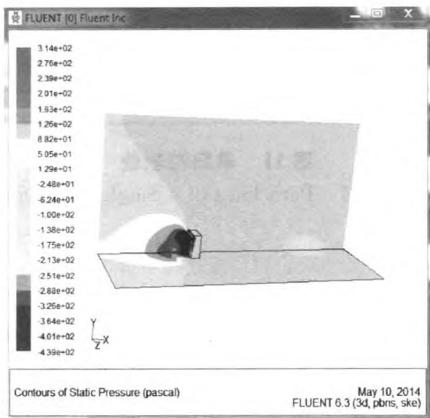


图 3 净空气压力分布云图  
Fig. 3 Air pressure distribution nephogram

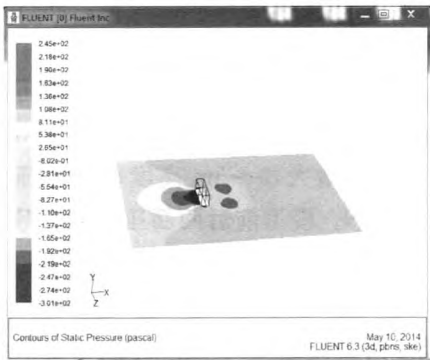


图 4  $y=2$  水平面处的压力分布云图  
Fig. 4 Horizontal pressure distribution nephogram for  $y=2$

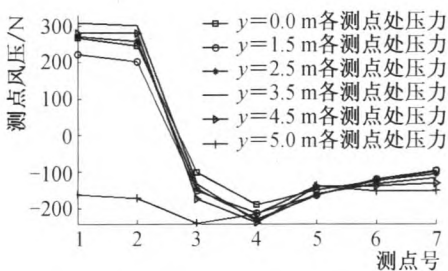


图 5 模型不同高度表面测点对比图  
Fig. 5 Surface measuring point comparison chart of Model at different height

设施模型不同环形等高线(因本农业设施模型为对称结构,所以仅对模型一半布置测点,测点水平间距

为 20m,由迎风面中轴线经侧风面逐渐扩展至被风面)测点压力如图 5 所示,迎风面(1—3 测点)正风压由中间向两侧减小,到达两侧时增长为负风压,且风压变化范围为 450N。侧风面(3—5 测点)与背风面(5—7 测点)负风压分别呈先增大后减少和逐渐减小的趋势,变化范围小于 150N;在模型垂直高度 0~5m 范围内,迎风面风压先减小后增大,侧风面及背风面负风压逐渐增大;在 5m 高度附近迎风面、侧风面背风面一直处于负风压且风压先增大后减小。迎风面受到风力撞击产生气流分离,离侧风面较远的区域风速高于离侧风面较近的区域,根据流体流速越大压力越小原理可知,压力方向由侧风面指向外,产生吸引力导致负压出现<sup>[15]</sup>。

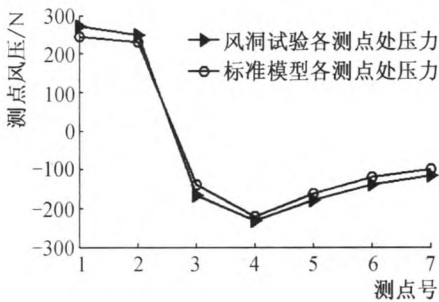


图 6  $y=2$  水平面处的压力测点  
Fig. 6 Pressure measurement points at the level  $y=2$

图 6 是风洞试验测点与  $y=2\text{m}$  模型测点风压数值。从图中可以看出试验值与模拟值变化趋势一致且误差较小。测点中风洞试验最大正压值为 270N,最大负压值为 -231N;数值模拟中,最大正压系数值为 244N,最大负压系数值为 -220N。最大正压模拟值与试验值相差 10.6%,最大负压值模拟误差为 5.0%。

3.1.2 速度分布云图

对称面处的速度分布云图如图 7 所示。

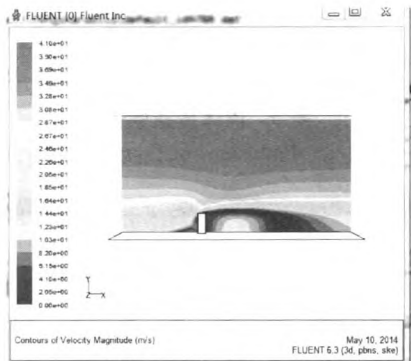


图 7 对称面速度分布云图  
Fig. 7 Velocity distribution nephogram of the symmetry plane

标准  $k-\omega$  模型模拟结果显示,整个计算域的速度随高度的增加呈增加趋势,由于农业设施模型的阻碍作用,在模型的迎风面形成一个滞留区,滞留区的气流缓慢地向右上方倾斜流动,与主流相汇合。由于模型

前后存在压力差,速度分布云图在模型的背风面形成一个涡旋,对比图 3 和图 7 可以看出设施模型前后风流压力和速度的对应关系,即速度大则压力小,速度小则压力大。图 8 为  $y=2$  处的水平面速度分布云图,从图可以看出,气流撞击模型时,受到模型的阻碍作用,经模型两侧向下游继续绕流,在模型后方一定距离,部分气流发生回流,形成一个较大的涡旋。

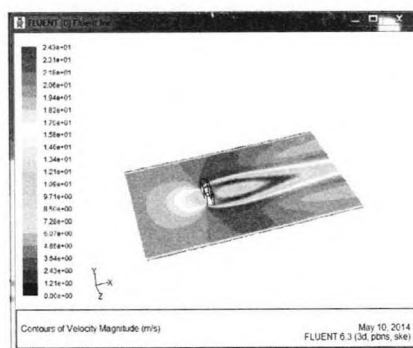


图 8  $y=2$  水平面处的速度分布云图

Fig. 8 Horizontal velocity distribution nephogram for  $y=2$

### 3.2 离散相模拟结果分析

在流体相中添加离散相,设置风沙两相入口速度为  $5\text{ m/s}$ 。离散相和流体相相互作用,存在着能量和动量的交换。图 9 和图 10 分别为流体质点轨迹和沙粒质点轨迹线图,比较两图可以看出,沙粒由于受到重力作用,近似呈抛物线方式下落,在设施模型的侧面形成两个大的涡旋,而流体质点则呈水平方式运动。

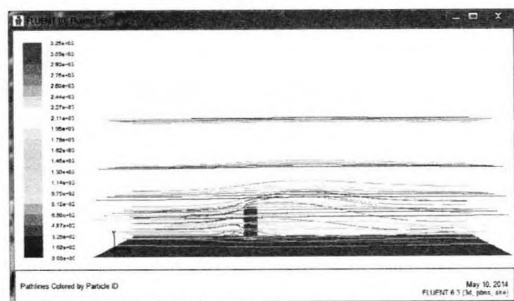


图 9 流体质点轨迹

Fig. 9 Path lines of flow particles

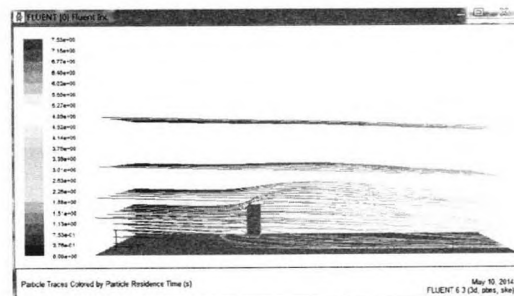


图 10 沙粒质点轨迹

Fig. 10 Path lines of sand particles

从射流源中选取编号为 2945 的单颗粒,图 11 为该

颗粒运动的轨迹线图。从图中可以看出,由于沙粒受重力和空气推力的作用,沿  $y$  轴负方向运动,由设施在整个流体空间所占比例知,沙粒运行距离  $20\text{ m}$ ,与实际情况相符。因此,计算结果中沙粒的扬起高度和运行距离等参数可以为沙尘暴的防治提供一定的理论依据。

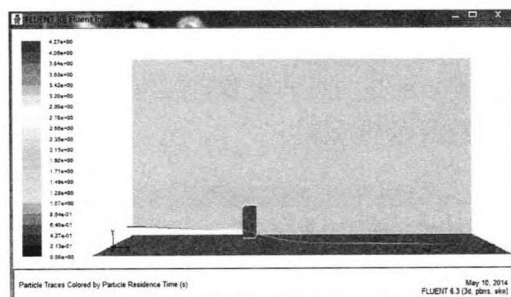


图 11 单颗粒轨迹

Fig. 11 Path lines of a Single particle

## 4 结论

本文根据欧拉多相流控制方程,采用 FLUENT 软件对风沙绕流农业设施进行了数值模拟。根据流体相模拟结果阐述了风沙两相运动中,农业设施模型前后及侧面风压、风速变化;风挟沙运动下颗粒流轨迹及下落堆积情况。研究结果有助于分析两相流动特征,为进行农业区环境试验提供参考。通过数值模拟主要得到了以下结论。

1) 农业设施模型迎风面受正压力,在迎风面的上边缘  $3.5\text{ m}$  处所受正压力达到最大值  $308\text{ N}$ ;模型的背风面受负压且依次增大, $0\sim 5\text{ m}$  高度范围内压力值由  $-96\text{ N}$  增至  $-192\text{ N}$ 。模型前后两面压力差导致在背风面出现风流的涡旋、汇合、分离等现象。造成设施模型迎风面压强较大的原因是颗粒沉积与气流冲击造成。

2) 风沙两相流速度为  $5\text{ m/s}$  时,模型两侧区域以及背风面气流漩涡导致农业生产环境不稳定,因此不适宜农业生产作业。

3) 另外,由于重力和风流推力的共同作用,沙粒沿  $y$  轴负方向运动,沙粒在运动过程中受模型阻挡,从两侧绕行运行一段距离后呈抛物线下落。根据离散相模拟结果显示,运行距离  $20\text{ m}$  以后区域形成沙粒堆积。模拟结果为农业设施建设选址及周围环境改善提供了重要参考。

## 参 考 文 献

- [1] 娜仁花,高润宏,张明铁. 沙尘暴生态效应与防治的探讨[J]. 中国沙漠,2007,27(1): 110~116.  
Na Renhua, Gao Ruihong, Zhang Mingtie. Discussion on ecological effect and reasonable control of sand-dust storm [J]. Journal of Desert Research, 2007, 27(1): 110~116.



- [2] 亢力强, 郭烈锦. 风沙运动的 DPM 数值模拟[J]. 工程热物理学学报, 2006, 27(3): 441~444.
- [3] 黄宁, 郑晓静. 风沙运动力学机理研究的历史、进展与趋势[J]. 力学与实践, 2007, 29(4): 9~16.  
Huang Ning, Zheng Xiaojing. Research history achievements and trend on mechanism of aeolian transport [J]. Mechanics and Practice, 2007, 29(4): 9~16.
- [4] 张默. 基于 Fluent 的建筑物风沙两相流场数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.  
Zhang Mo. Numerical Simulation of wind-blown-sand two phase flow field around the building based on Fluent [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
- [5] 孙兰东, 刘德祥. 甘肃沙尘暴变化特征及其对农业生产的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(6): 212~216.  
Sun Landong, Liu Dexiang. Change characteristics of sand-storm in Gansu Province and its impacts to agriculture [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2008, 26(6): 212~216.
- [6] 孙其诚, 王光谦. 模拟风沙运动的离散颗粒动力学模型[J]. 泥沙研究, 2001, (4): 12~18.  
Sun Qicheng, Wang Guangqian. Discrete particle dynamics model for simulating sediment transport by wind [J]. Journal of Sediment Research, 2001, (4): 12~18.
- [7] 武生智, 任春勇. 基于欧拉双流体模型的风沙运动模拟[J]. 兰州大学学报, 2012, 48(1): 104~108.  
Wu Shengzhi, Ren Chunyong. Numerical simulation of wind blown sand based on the Eulerian model [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2012, 48(1): 104~108.
- [8] 张利珍, 李运泽, 王浚. 气固两相流风洞内颗粒运动特性研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(14): 3200~3202.  
Zhang Zhenli, Li Yunze, Wang Jun. Study on particle flow character in gas/solid two-phase wind tunnel [J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(14): 3200~3202.
- [9] 侯倩倩, 韩致文, 杜鹤强, 等. 中国沙尘暴源区及其治理研究述评[J]. 中国沙漠, 2012, 32(6): 1559~1564.  
Gou Qianqian, Han Zhiwen, Du Heqiang, et al. Review on sandstorm sources and its control measures in China [J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(6): 1559~1564.
- [10] 李朝妹, 袁树杰, 张振彬. 风沙绕流建筑物流场的数值模拟研究[J]. 建筑热能通风空调, 2012, 31(2): 66~69.  
Li Zhaomei, Yuan Shujie, Zhang Zhenbin. Numerical simulation of flow field of wind with sands around buildings [J]. Building Energy & Environment, 2012, 31(2): 66~69.
- [11] 周炬毅, 顾明, 李雪峰. 大跨度屋盖表面风致雪压分布规律研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(2): 7~12.  
Zhou Xuanyi, Gu Ming, Li Xuefeng. Study on wind-induced snow pressure on large-span roof [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(2): 7~12.
- [12] 王小玲, 翟盘茂. 中国春季沙尘天气频数的时空变化及其与地面风压场的关系[J]. 气象学报, 2004, 62(1): 96~103.  
Wang Xiaoling, Zhai Panmao. The spatial and temporal variations of spring dust storms in China and its associations with surface winds and sea level pressures [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2004, 62(1): 96~103.
- [13] 杨东贞, 颜鹏, 徐祥德. 北京风沙天气的气溶胶特征[J]. 应用气象学报, 2002, 13(S1): 185~194.
- [14] 姚林. 小区建筑风环境数值模拟研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2012.  
Yao Lin. Numerical research on residential construction wind environment[D]. Hengyang: University of South China, 2012.
- [15] 李朝妹, 袁树杰, 张振彬. 风沙绕流建筑物流场的数值模拟研究[J]. 建筑热能通风空调, 2012, 31(2): 66~69.  
Li Zhaomei, Yuan Shujie, Zhang Zhenbin. Numerical simulation of flow field of wind with sands around buildings [J]. Building Energy & Environment, 2012, 31(2): 66~69.

## Numerical simulation research on flow field of wind with sands around agricultural facilities

Liu Bo<sup>1,2</sup>, Huang Xincheng<sup>1,2</sup>, Wang Xufeng<sup>1,2</sup>, Jiang Jianyun<sup>1,2</sup>, Tian Jiangang<sup>1,2</sup>

(1. College of Mechanic and Electronic Engineering, Alar, 843300, China;

2. Southern Agricultural Mechanization Research Center, Tarim University, Alar, 843300, China)

**Abstract:** Southern storms affect the status for agricultural facilities, based on Euler-euler Two-fluid Flow Model, multiphase flow control equations are researched. By using the finite element fluid simulation software FLUENT and the standard k-w model, the flow field of wind with sands around agricultural facilities is numerically simulated, and also the air speed is initialized by UDF. According to fluid phase simulation results the control histogram; agricultural facilities windward, leeward and maximum crosswind surface pressure were 308N, -251N and -251N; The wind surrounding facilities presents a hierarchical structure in the direction perpendicular to the ground and the trend of crosswind surface of wind speed increases first and then just started there decreases; In addition, the discrete phase simulation results show that trajectories of sand bypass agricultural facilities parabolic whereabouts, accumulation in the region after the formation of 20m. The simulation results help to predict the movement of sand around the agricultural facilities and sand buildup. The simulation results can provide important reference for the optimal design of agricultural facilities construction and improved facilities of surrounding environment.

**Keywords:** sand-flow; multi-phase flow; FLUENT; numerical simulation; agricultural facilities