

# 基于 CFD - DEM 的稻谷通风阻力数值模拟与试验\*

刘立意 郝世杨 张萌 刘冬梅 贾富国 权龙哲

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

**摘要:** 为探究稻谷通风中谷层阻力的变化规律, 基于离散元理论, 构建了2个品种稻谷颗粒的数值模型, 采用 CFD - DEM 耦合模拟了垂直圆管约束中的稻谷颗粒群在不同风速及谷层深度下通风阻力的变化规律。结果表明: 在表观风速一定时, 谷层阻力随谷层深度的增加而非线性增加 ( $R^2 > 0.99$ ); 当谷层深度一定时, 谷层阻力随表观风速的变化关系可表达为二次多项式形式 ( $R^2 > 0.98$ ); 不同品种的稻谷在相同条件下谷层阻力变化趋势相同, 数值不同, 长粒型较短粒型谷粒通风阻力小。通过搭建试验装置, 对模拟结果进行了试验验证, 成对  $t$  检验 ( $\alpha = 0.01$ ) 结果表明差异不显著, 数值模拟与试验结果吻合, 证明应用 CFD - DEM 方法数值模拟稻谷通风阻力是可行的, 获得的拟合方程可用于谷仓通风阻力计算, 指导就仓干燥系统管网设计及风机的选配。

**关键词:** 稻谷 通风阻力 离散单元法 数值模拟

中图分类号: S511; S226.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2015)08-0027-06

## Numerical Simulation and Experiment on Paddy Ventilation Resistance Based on CFD - DEM

Liu Liyi Hao Shiyang Zhang Meng Liu Dongmei Jia Fuguo Quan Longzhe

(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

**Abstract:** To explore the change rule of paddy layer ventilation resistance, guiding the tube network of ventilation drying warehouse design and fan selection, a numerical model of two varieties of paddy was constructed based on discrete element theory. The changing regulation of ventilation resistance of paddy at a series of wind velocities and paddy layer depths in a vertical tube was simulated by the coupled CFD - DEM model. The results showed that, when the apparent wind speed was constant, the resistance of paddy layer showed nonlinear increasing ( $R^2 > 0.99$ ) relationship with the increase paddy layer depth; when paddy layer depth was constant, the resistance of paddy layer showed a quadratic nonlinear increasing ( $R^2 > 0.98$ ) relationship with the increase of the apparent wind speed. Different varieties of paddy were under the same condition, and the layer resistance had the same change trend, but the numerical values was different, the ventilation resistance of long grain type was smaller than short grain type. By building test equipment, the simulation results of the experimental verification, paired  $t$  test results showed no significant difference was found, and the numerical simulation and experimental results agreed. The results testified that the numerical simulation of ventilation resistance in paddy was feasible by the method of CFD - DEM. The fitting equation obtained can be used for calculating barn ventilation resistance and guiding the tube network of in-store drying system design, fan selection, paddy ventilation resistance simulation and engineering practice. In the design and operation on barn drying system, the apparent wind speed is appropriate at 0.2 ~ 0.3 m/s, paddy layer depth is not more than 1.5 m, the difference of grain type should be considered when calculating the ventilation resistance.

**Key words:** Paddy Ventilation resistance DEM Numerical simulation

收稿日期: 2015-01-22 修回日期: 2015-02-18

\* 国家自然科学基金资助项目(51405078)、高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20132325120007)和黑龙江省自然科学基金资助项目(E201322)

作者简介: 刘立意, 高级工程师, 主要从事农业工程测控技术研究, E-mail: lyliu2468@sina.com

通讯作者: 权龙哲, 副教授, 主要从事农业智能装备研究, E-mail: quanlongzhe@163.com

## 引言

随着我国稻谷产量的增加,对其进行干燥、贮藏的问题日益受到重视<sup>[1]</sup>。稻谷收获时的含水率通常高于18%,而稻谷储藏的安全含水率为14.5%,若未及时地干燥将导致稻谷霉变和发芽变质,会造成不必要的浪费<sup>[2]</sup>。干燥降水是稻谷生产中的一个重要环节,干燥过程就是利用较干燥的温热空气穿入粮层与粮食颗粒产生热交换和水气交换,带走粮食中水分的过程。当空气穿过粮层时粮粒对气流形成的阻力在压力上表现为气流的静压降,称为粮层阻力<sup>[3]</sup>。粮层阻力是干燥设备管网设计和风机选配的关键参数。

国内外学者对粮层阻力的测定与模拟均进行了研究<sup>[4-10]</sup>。Gunasekaran等<sup>[9]</sup>对高粱的通风阻力进行了试验研究,得出了不同风速和含水率对粮层阻力的影响。朱英开等<sup>[11]</sup>对3种粮食不同粮层厚度下的压降损失进行了测试,并利用计算流体力学方法将静止粮层看作多孔介质区域进行模拟。赵学伟<sup>[12]</sup>总结了国内外粮层阻力主要经验公式的来源、相互关系、使用范围,并对计算值进行了比较,分析了各因素对粮层阻力的影响,指出计算粮层阻力时应注意的问题。上述研究多采用国外数据和经验公式,由于品种等差异,其结果不精确<sup>[13]</sup>,并且国内外多以试验研究方法为主。

本文选取2个品种的稻谷东农8006、糯418作为研究对象,利用离散元素法软件 EDEM 对稻谷颗粒进行建模,通过与计算流体力学软件 Fluent 耦合,对气流通过谷层产生的粮层阻力(下称谷层阻力)进行数值模拟,以得出2个稻谷品种的通风阻力计算公式,并通过试验对数值模拟的结果进行验证。

## 1 通风阻力的 CFD-DEM 数值模拟

离散元素法(Discrete element method, DEM)和计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)近年来已广泛应用于农业工程等诸多领域<sup>[14]</sup>,在稻谷通风阻力试验过程中,稻谷以颗粒体的形式密集堆积于物料筒中,气流经由物料筒下部以一定的速度穿过谷层,颗粒体对气流的阻碍作用(即谷层阻力)表现为静压损失。由于稻谷颗粒为非球形颗粒,在模拟区域中占有较大的体积分数,不可忽略颗粒形状对阻力的影响,因此采用 CFD-DEM 耦合方法进行分析,对稻谷颗粒建立颗粒相模型,在流体相(气流)的作用下对整个物料筒内的静压分布以及数值进行迭代计算。

### 1.1 数学模型

CFD-DEM 进行耦合模拟时,主要耦合模型包括 Lagrangian 模型和 Eulerian 模型,其中 Lagrangian 模型使用的是单相流框架,没有考虑颗粒相体积分,所以只适用于分析单相流或稀相流(颗粒相占总体积10%以内)。Eulerian 模型采用多相流框架求解,有体积分方程, Eulerian 模型与 Lagrangian 模型相比,考虑了颗粒对流场的影响,根据实际情况,稻谷通风试验颗粒相对流体相的作用明显,因此本文采用 Eulerian 模型对稻谷通风阻力试验进行模拟<sup>[15-16]</sup>。

在 Eulerian 模型中,根据实际颗粒体对流场的影响,在流体的连续方程中加入体积分项,即

$$\frac{\partial(\epsilon\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\epsilon\nu) = 0 \quad (1)$$

式中  $\rho$ ——气体密度, kg/m<sup>3</sup>

$t$ ——时间, s

$\nu$ ——气体流速, m/s

$\epsilon$ ——气体的体积分项

$\nabla$ ——哈密顿微分算子

流体的运动微分方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\epsilon\rho\nu)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\epsilon\nu^2) = \\ - \nabla P + \nabla \cdot (\mu\epsilon\nabla\nu) + \rho\epsilon g - S \end{aligned} \quad (2)$$

式中  $P$ ——气体微元体上的压力, Pa

$g$ ——重力加速度, m/s<sup>2</sup>

$\mu$ ——气体动力粘度, Pa·s

$S$ ——动量源项

其中,动力粘度为气流粘性大小的度量,取值随温度变化,根据试验中气流温度取  $\mu = 1.83 \times 10^{-5}$  Pa·s。

由于气流穿过稻谷颗粒时,颗粒对气流产生阻力,因此在上述方程中加入动量源相  $S$ ,通过对阻力动量源相的计算来实现流体相与颗粒相之间的耦合。动量源相  $S$  为作用在网格单元内气流阻力的总和,其表达式为

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n F_i}{V} \quad (3)$$

式中  $F_i$ ——第  $i$  颗粒对气流的阻力, N

$V$ ——网格单元的体积, m<sup>3</sup>

由于气流对稻谷颗粒的影响主要为曳力, Saffman 升力和 Basset 力可以忽略不计,因此选择 Free-stream 阻力模型,其计算方程为

$$F = 0.5 C_D \rho A |v| \cdot v \quad (4)$$

式中  $C_D$ ——单个稻谷颗粒的阻力系数

$A$ ——颗粒投影面积, m<sup>2</sup>

$v$ ——气体相对于颗粒体的流动速度, m/s

稻谷颗粒的阻力系数  $C_D$  取决于雷诺数  $Re$ , 其计算方程为

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re} & (Re \leq 0.5) \\ \frac{24(1 + 0.25Re^{0.687})}{Re} & (0.5 < Re \leq 1000) \\ 0.44 & (Re > 1000) \end{cases} \quad (5)$$

其中  $Re = \frac{\rho L |v|}{\mu}$  (6)

式中  $L$ ——稻谷颗粒的直径, m

对于式(6), 气体相对于颗粒体的流动速度由 Fluent 根据给定的入口风速迭代确定, 空气密度根据试验中温、湿度及大气压力取初始值  $1.18 \text{ kg/m}^3$ , 动力粘度  $\mu$  取值同上。

在稻谷颗粒进入物料桶内时, 颗粒与颗粒、物料筒筒壁之间的接触模型采用 Hertz - Mindlin 非线性接触模型。当 2 个稻谷颗粒发生碰撞接触时, 其法向叠合量  $a$  的计算公式为<sup>[17]</sup>

$$a = R_1 + R_2 - |r_1 - r_2| \quad (7)$$

式中  $R_1, R_2$ ——稻谷颗粒的半径, m

$r_1, r_2$ ——稻谷颗粒球心位置矢量, m

颗粒接触时的法向力  $F_n$ 、切向力  $F_t$  的计算公式为

$$F_n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^* a^3} \quad (8)$$

$$F_t = -S_t \delta \quad (9)$$

其中  $\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2}$  (10)

$$\frac{1}{R^*} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \quad (11)$$

$$S_t = 8G^* \sqrt{R^* \alpha} \quad (12)$$

$$\frac{1}{G^*} = \frac{1 - \nu_1}{G_1} + \frac{1 - \nu_2}{G_2} \quad (13)$$

式中  $E^*$ ——等效弹性模量, Pa

$E_1, E_2$ ——两颗粒的弹性模量, Pa

$R^*$ ——等效颗粒半径, m

$\nu_1, \nu_2$ ——两颗粒的泊松比

$S_t$ ——切向刚度, N/m

$\delta$ ——切向叠合量, m

$G^*$ ——等效剪切模量, N/m

$G_1, G_2$ ——两颗粒的剪切模量, N/m

该模型利用相互接触的模型间相对位置与它们各自受力处的曲率半径进行对比来计算法向和切向受力, 能够更好地反映硬质刚性物体间的力学行为特点。

### 1.2 稻谷颗粒及数值模型构建

首先随机选取试验品种稻谷各 20 粒, 放置于扫描仪(型号: EPSON Perfection 1200U)从主、俯 2 个投影面进行扫描, 分辨率设置为 1 200 dpi(每像素单位约 0.021 mm)。通过 IPP(Image pro plus)软件对扫描后的图像进行分析, 采用标尺校正功能将像素值转化为长度尺寸单位, 对谷粒的几何尺寸进行测量, 如图 1 所示。对同一品种颗粒的测量结果取平均值, 得到 2 个品种谷粒的典型几何参数, 其中形状特征参数  $\lambda$ (长径与宽径比)值分别为 2.83(东农 8006)和 1.89(糯 418)。采用 EDEM 多面构型的方法创建椭球状稻谷颗粒三维模型, 如图 2 所示。

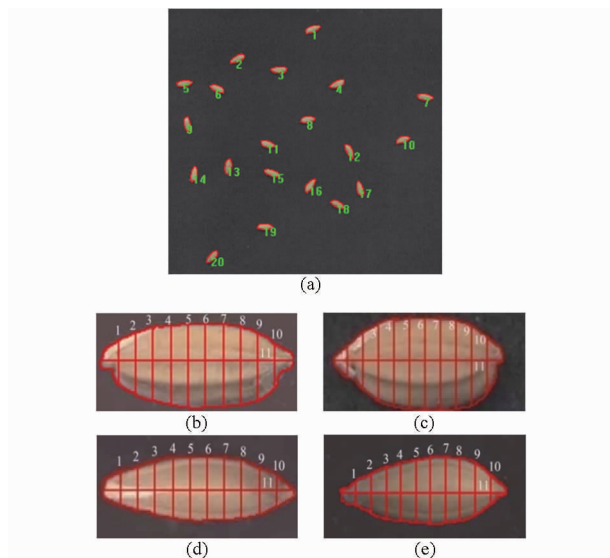


图 1 稻谷颗粒几何尺寸测量

Fig. 1 Measurement of geometric size of paddy

(a) 扫描测量示意图 (b) 东农 8006 主视图  
(c) 糯 418 主视图 (d) 东农 8006 俯视图  
(e) 糯 418 俯视图

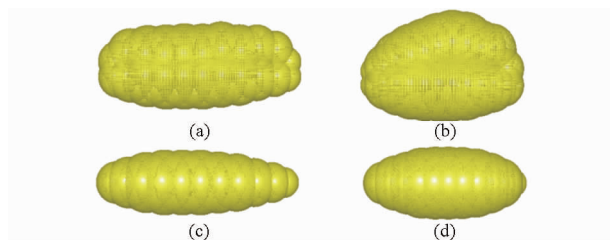


图 2 稻谷颗粒体模型

Fig. 2 Model of paddy particle body

(a) 东农 8006 正视图 (b) 糯 418 正视图  
(c) 东农 8006 侧视图 (d) 糯 418 侧视图

### 1.3 试验装置及数值模型构建

如图 3 所示, 试验装置主要由变频器、风机、送风管、物料筒、金属网、测压孔、测速孔等组成, 装置可用于模拟稻谷压入式通风方式试验。稻谷装在总长度为 2 m、直径 100 mm 的物料筒中, 管道竖直放置并固定在支架上, 送风管道与风机、物料筒间用法

兰盘连接,连接处使用橡胶圈并加涂硅胶密封<sup>[18]</sup>。在物料筒上每隔 250 mm 开有测压孔,测压孔内径 6 mm,长 20 mm,用来测定不同谷层深度下的静压值。在距离物料筒出口 100 mm 处开有测速孔,用来测定谷层的表观风速。

为进行数值模拟,按照实际尺寸构建装置三维模型并将其转化为六面体网格化结构。气流入口边界条件定义为速度入口,根据流体力学理论计算确定在不同风速下的湍流强度、耗散率等参数。出口完全敞开,定义为压力出口,其他边界设定为壁面。

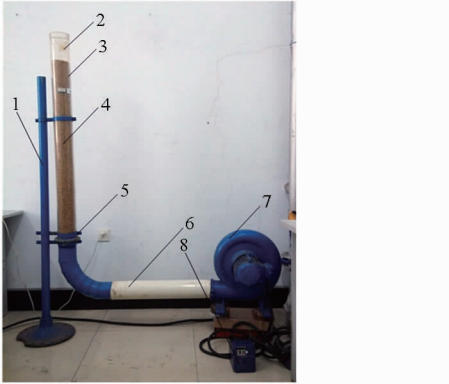


图3 稻谷通风阻力试验装置

Fig. 3 Test equipment of ventilation resistance

1. 固定支架 2. 测速孔 3. 测压孔 4. 物料筒 5. 金属圈
6. 送风管 7. 风机 8. 变频器

#### 1.4 模型参数确定

稻谷颗粒、管壁及相互作用参数如表 1 所示<sup>[19-20]</sup>。根据储粮机械通风技术规程<sup>[21]</sup>,选定表观风速 0.1~0.3 m/s,谷层深度 0.5~2 m。为确保 CFD 计算迭代收敛,准确获取颗粒相与气体相之间的接触行为以及力学行为<sup>[22]</sup>,Fluent 时间步长为 EDEM 时间步长的 1 000 倍,时间步长的设置如表 2 所示。

表 1 参数设定

Tab. 1 Parameter setting

项目	属性	数值
稻谷颗粒	泊松比	0.4
	剪切模量/Pa	$1.1 \times 10^7$
	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	670
壁面	泊松比	-0.3
	剪切模量/Pa	$7 \times 10^{10}$
	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	7 800
稻谷颗粒-颗粒	恢复系数	0.6
	静摩擦因数	0.5
	动摩擦因数	0.16
稻谷颗粒-壁面	恢复因数	0.6
	静摩擦因数	0.3
	动摩擦系数	0.01

表 2 时间步长的匹配

Tab. 2 Matching time steps

项目	糯 418		东农 8006	
	Fluent	EDEM	Fluent	EDEM
时间步长	$9 \times 10^{-3}$	$9 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{-3}$	$3 \times 10^{-6}$
保存时间点	0.45	0.01	0.15	0.01

#### 1.5 模拟结果分析

应用 CFD-DEM 耦合对网格化试验装置的气固混合相进行模拟,得到了稻谷通风时谷层阻力变化规律、静压分布以及回归方程。

##### 1.5.1 谷层深度对通风阻力的影响

由图 4 可知,当表观风速一定时,谷层阻力随谷层深度增加而逐渐增大,2 m 深谷层的平均阻力是 0.5 m 深谷层阻力的 5.15 倍;对模拟数据进行拟合分析,得到了不同表观风速时谷层阻力与谷层深度的关系式,由表 3 可知,在 2 m 谷层深度内,当表观风速一定时,通风阻力随谷层深度的增加呈非线性递增关系;对表 3 拟合方程求导得到谷层阻力变化率,显然谷层阻力变化率随深度增加逐渐增大(0~2 m 谷层深度),呈二次递增规律。这是因为稻谷粒子非刚体,具有一定的弹塑性,由于重力的作用,越靠近底部,谷层及谷粒间静压力越大,谷粒堆积得越密实,谷层的孔隙率越低,对气流的阻力越大。

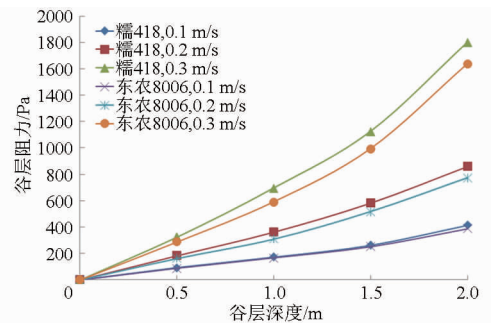


图 4 谷层阻力随谷层深度的变化曲线

Fig. 4 Paddy layer resistance changing with paddy depth

表 3 不同表观风速下谷层阻力  $\Delta Q$  与谷层深度  $h$  的拟合方程

Tab. 3 Fitting equation of paddy resistance with thickness at different wind speeds

表观风速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	品种	关系式	决定 系数 $R^2$
0.1	糯 418	$\Delta Q = 37.14h^2 + 126.5h + 6.771$	0.99
	东农 8006	$\Delta Q = 30h^2 + 128.6h + 5.6$	0.99
0.2	糯 418	$\Delta Q = 65.42h^2 + 293.7h + 6.314$	0.99
	东农 8006	$\Delta Q = 72.28h^2 + 236.4h + 8.342$	0.99
0.3	糯 418	$\Delta Q = 218h^2 + 445h + 18.2$	0.99
	东农 8006	$\Delta Q = 234.2h^2 + 329.4h + 22.148$	0.99



### 1.5.2 品种对通风阻力的影响

由图 4、图 5 可知,在相同条件下,2 个品种稻谷的气流阻力变化趋势相同,但对气流的阻力值不同。东农 8006( $\lambda$  值大)的谷层阻力整体小于糯 418( $\lambda$  值小),两者平均相差 11.5%。这是由于两者的粒型不同,从而导致堆积的孔隙率和体积分数不同,因此,品种差异在进行通风设计以及风机的选用时应加以考虑。

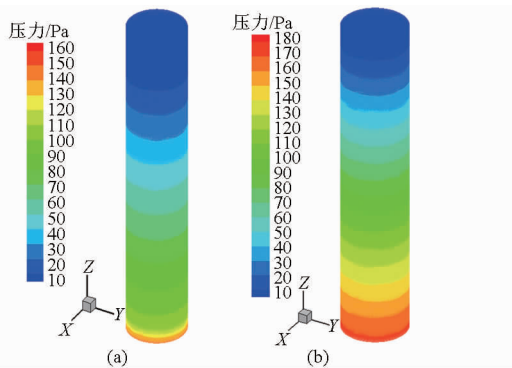


图 5 不同品种稻谷的气体静压分布图

Fig. 5 Static pressure distribution of different paddy cultivars

(a) 东农 8006 (b) 糯 418

### 1.5.3 表观风速对通风阻力的影响

由图 6 可知,在谷层深度一定时,谷层阻力随着风速的增加而不断增大,在风速较小时,阻力随谷层深度增加的趋势较为平缓,随着表观风速的增大,谷层阻力变化趋势越陡;因此在进行通风设计时,如果为降水而选用较大的风速时,那么谷层深度就要适当减小,以降低风阻,减少能耗,以本文试验对象为例,当表观风速变化范围在 0.2 ~ 0.3 m/s 时,谷层深度为 1 m 左右较为合适,当谷层深度超过 1.5 m 后,风阻显著增加,配备风机压力将迅速增加,对于大型通风粮仓,须合理设计通风管网,减小谷层深度,降低通风阻力,降低动力需求;由表 4 可知,谷层阻力随表观风速的增加而非线性增大,其关系可表达为二次多项式形式( $R^2 > 0.98$ )。

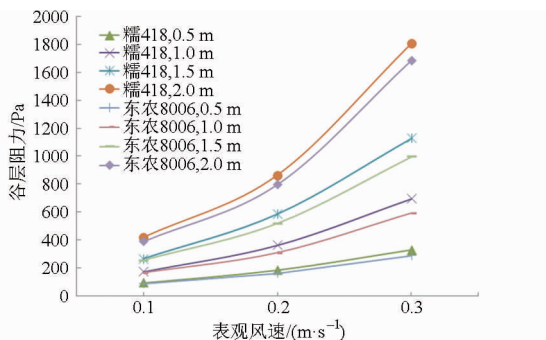


图 6 谷层阻力随表观风速变化曲线

Fig. 6 Paddy layer resistance changing with apparent wind speed

表 4 不同谷层深度下谷层阻力  $\Delta Q$  与表观风速  $v$  的拟合方程

Tab. 4 Fitting equation of paddy resistance with wind speed in different thicknesses

谷层深度/m	品种	关系式	决定系数 $R^2$
0.5	糯 418	$\Delta Q = 1\ 300v^2 + 682v + 3$	0.99
	东农 8006	$\Delta Q = 900v^2 + 670v + 3$	0.99
1.0	糯 418	$\Delta Q = 3\ 975v^2 + 1\ 083v + 6$	0.99
	东农 8006	$\Delta Q = 2\ 900v^2 + 1\ 046v + 8$	0.98
1.5	糯 418	$\Delta Q = 6\ 950v^2 + 1\ 613v + 8$	0.99
	东农 8006	$\Delta Q = 5\ 600v^2 + 1\ 566v + 10$	0.99
2.0	糯 418	$\Delta Q = 13\ 150v^2 + 1\ 909v + 23$	0.98
	东农 8006	$\Delta Q = 11\ 925v^2 + 1\ 736v + 24$	0.98

### 1.5.4 稻谷通风阻力方程

进一步对模拟数据进行多元回归分析,得到了这 2 个品种稻谷的气流阻力方程如下:

糯 418

$$\Delta Q = 242.66vh^3 + 6169.25hv^2 + 62.3 \quad (14)$$

东农 8006

$$\Delta Q = 247.18vh^3 + 5181.1hv^2 + 58 \quad (15)$$

在 0 ~ 2 m 谷层深度和 0 ~ 0.3 m/s 表观风速下,2 个方程的拟合度均较好( $R^2 > 0.99$ )。

## 2 稻谷通风阻力试验验证

用 1.3 节的试验装置对上述模拟结果进行检验。试验选用 6MC-3 型三相离心式风机(额定功率 1.1 kW)。由于试验要求不同的表观风速,因此通过变频器来调节风机的输出流量。选用美国 Alnor 热线式风速仪,测量范围 0 ~ 3 m/s,分辨率 0.01 m/s。选用日本加野 KANOMAX KA31 型风压测定仪测量静压,测量范围  $\pm 5$  kPa,分辨率 0.01 kPa。试验稻谷品种为东农 8006 和糯 418,含水率为 18.2%,含水率按 GB 5497—1985 105℃ 恒重法测量<sup>[23]</sup>。试验时室内温度为 22℃,相对湿度为 45%,模拟时设定参数与试验相同。首先调试风机,检查试验装置的密闭性,确保各个连接处不漏风。将人工去杂后的稻谷缓慢装入 2 m 高的物料筒,轻拍物料筒壁,形成轻微振动,使稻谷自然下沉密实。调节离心风机的输出风量送入物料筒内,待风速稳定后读取风速数值,由于风管内速度分布具有不均匀性,本文采用等面积同心环法在同一断面上取 6 点进行测量并取平均值<sup>[24]</sup>。

分别在表观风速为 0.1、0.2、0.3 m/s 的情况下重复 3 次测量不同谷层深度下的静压,取平均值。试验结果与模拟数据对比如图 7 所示。

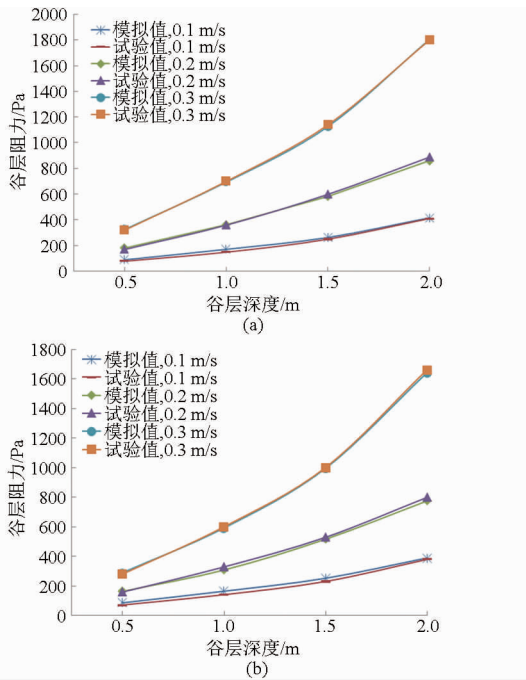


图7 模拟结果与试验数据对比

Fig. 7 Simulation results compared with experimental data

(a) 糯418 (b) 东农8006

由图可知,随着谷层深度以及表观风速的增加,试验结果与模拟结果的谷层阻力变化趋势相同,对

模拟与试验数据进行成对数据的  $t$  检验 ( $\alpha = 0.01$ ), 结果表明两组数据决定系数大于 0.99; 显著性水平  $\alpha = 0.86 > 0.01$ , 说明差异不显著, 模拟结果得到的谷层阻力值与试验结果基本一致, 验证了上述 CFD-DEM 数值模拟方法的可行性。

### 3 结论

(1) 在 2 m 谷层深度内, 当表观风速一定时, 谷层阻力随谷层深度的增加呈非线性递增; 当谷层深度一定时, 谷层阻力随表观风速的增加亦呈非线性递增, 两者关系可表达为二次多项式形式。

(2) 不同品种的稻谷在相同条件下谷层阻力变化趋势相同, 但数值不同, 长粒型较短粒型谷粒有较小的通风阻力。

(3) 对模拟与试验数据成对  $t$  检验 ( $\alpha = 0.01$ ) 结果差异不显著, 数值模拟与试验结果吻合, 证明应用数值模拟稻谷通风阻力是可行的, 获得的拟合方程可用于稻谷通风阻力模拟计算, 指导工程实践。

(4) 在就仓干燥系统设计和运行时, 表观风速取 0.2 ~ 0.3 m/s 为宜, 谷层深度则不宜大于 1.5 m; 在计算通风阻力时需考虑粒型差异。

### 参 考 文 献

- 董铁有, 朱文学, 张仲欣, 等. 我国水稻干燥机械化存在的问题及对策研究[J]. 食品科学, 2005, 26(增刊1): 92-98.  
Dong Tieyou, Zhu Wenxue, Zhang Zhongxin, et al. Study on issue and solution for mechanization of rice drying in China[J]. Food Science, 2005, 26(Supp. 1): 92-98. (in Chinese)
- 彭彦昆. 我国粮食干燥技术的发展状况和趋势[J]. 农产品加工, 2013(5): 6-7.
- 张来林, 赵思孟. 机械通风粮层阻力测定[J]. 粮食储藏, 1993(5): 6-10.  
Zhang Lailin, Zhao Simeng. Measure of grain resistance in mechanical ventilation[J]. Grain Storage, 1993(5): 6-10. (in Chinese)
- 张烨, 李长友, 马兴灶, 等. 干燥机粮层通风阻力特性数值模拟与试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 216-221.  
Zhang Ye, Li Changyou, Ma Xingzao, et al. Experiment and numerical simulation of layer resistance parameters in dryer [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 216-221. (in Chinese)
- 杨英强, 俞忠. 粮食物性和粮层阻力实验研究[J]. 实验室研究与探索, 2008, 27(8): 32-34.  
Yang Yingqiang, Yu Zhong. Experimental study of grain physics and grain bulk resistance [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2008, 27(8): 32-34. (in Chinese)
- 杨进, 杨国峰, 万忠民. 粮堆高度对机械通风粮层阻力的影响[J]. 粮食储藏, 1998(6): 44-48.  
Yang Jin, Yang Guofeng, Wan Zhongmin. Influence of grain bulk height on grain resistance in mechanic ventilation [J]. Grain Storage, 1998(6): 44-48. (in Chinese)
- Sokhansanj S, Falacinski A A, Sosulski F W, et al. Resistance of bulk lentils to airflow [J]. Transactions of the ASAE, 1990, 33(4): 1281-1285.
- 杨洲, 罗锡文, 李长友. 稻谷干燥风量与谷物质量比的优化研究[J]. 农业机械学报, 2007, 38(5): 122-125.  
Yang Zhou, Luo Xiwen, Li Changyou. Study on optimal ratio of air flux to grain mass for rough rice drying [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(5): 122-125. (in Chinese)
- Gunasekaran S, Cynthia Y Jackson. Resistance to airflow of grain sorghum [J]. Transactions of the ASAE, 1988, 31(4): 1237-1240.
- Kashaninejad M, Maghsoudlou Y, Khomeiri M, et al. Resistance to airflow through bulk pistachio nuts (*Kalleghochi variety*) as affected by moisture content, airflow rate, bed depth and fill method [J]. Powder Technology, 2010, 203(2): 359-364.
- 朱英开, 塔娜, 五十六. 基于多孔介质理论的粮层阻力数值模拟[J]. 中国农机化学报, 2013, 34(6): 112-114.  
Zhu Yingkai, Ta Na, Wu Shiliu. Test and simulation of grain layer resistance based on the theory of porous media [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2013, 34(6): 112-114. (in Chinese)

(下转第 158 页)

- 29 周蕾,王绍强,陈镜明,等. 1991年至2000年中国陆地生态系统蒸散时空分布特征[J]. 资源科学,2009,31(6):962-972.  
Zhou Lei, Wang Shaoqiang, Chen Jingming, et al. The spatial-temporal characteristics of evapotranspiration of China's terrestrial ecosystems during 1991—2000[J]. Resources Science,2009, 31(6):962-972. (in Chinese)
- 30 Yao Y, Liang S, Cheng J, et al. MODIS-driven estimation of terrestrial latent heat flux in China based on a modified Priestley-Taylor algorithm[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013,171-172:187-202.
- 31 高歌,陈德亮,任国玉,等. 1956—2000年中国潜在蒸散量变化趋势[J]. 地理研究,2006,25(3):378-387.  
Gao Ge, Chen Deliang, Ren Guoyu, et al. Trend of potential evapotranspiration over China during 1956 to 2000[J]. Geographical Research,2006,25(3):378-387. (in Chinese)
- 32 李修仓,姜彤,温姗姗,等. 珠江流域实际蒸散的时空变化及影响要素分析[J]. 热带气象学报,2014,30(3):483-494.  
Li Xiucang, Jiang Tong, Wen Shanshan, et al. Spatial-temporal variation of actual evapotranspiration and its impact factors in the pearl basin, China[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2014, 30(3):483-494. (in Chinese)
- 33 张翀,任志远. 黄土高原地区植被覆盖变化的时空差异及未来趋势[J]. 资源科学,2011,33(11):2143-2149.  
Zhang Chong, Ren Zhiyuan. Temporal and spatial differences and its trends in vegetation cover change over the Loess Plateau [J]. Resources Science, 2011, 33(11):2143-2149. (in Chinese)
- 34 李双双,延军平,万佳. 近10年陕甘宁黄土高原区植被覆盖时空变化特征[J]. 地理学报,2012,67(7):960-970.  
Li Shuangshuang, Yan Junping, Wan Jia. The spatial-temporal changes of vegetation restoration on Loess Plateau in Shaanxi-Gansu-Ningxia region[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(7):960-970. (in Chinese)
- 35 刘宪锋,任志远,林志慧,等. 2000—2011年三江源区植被覆盖时空变化特征[J]. 地理学报,2013,68(7):897-908.  
Liu Xianfeng, Ren Zhiyuan, Lin Zhihui, et al. The spatial-temporal changes of vegetation coverage in the Three-River Headwater Region in recent 12 years[J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(7):897-908. (in Chinese)
- 36 苏伟,刘睿,孙中平,等. 基于SEBAL模型的农作物NPP反演[J]. 农业机械学报,2014,45(11):272-279.  
Su Wei, Liu Rui, Sun Zhongping, et al. Crop NPP inversion using surface energy balance algorithm for land model [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(11):272-279. (in Chinese)

(上接第32页)

- 12 赵学伟. 粮层阻力计算公式的分析比较[J]. 粮食储藏,2001,30(2):20-24.  
Zhao Xuewei. Analysis and comparison on resistance formulas of air-flow through grain layer[J]. Grain Storage, 2001,30(2):20-24. (in Chinese)
- 13 李健民,李长友,马兴灶. 稻谷通风阻力特性试验[J]. 广东农业科学,2012(11):191-193.  
Li Jianmin, Li Changyou, Ma Xingzao. Experimental study on ventilation resistance of paddy [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2012(11):191-193. (in Chinese)
- 14 王国强,郝万军. 离散单元法及其在EDEM上的实践[M]. 西安:西北工业大学出版社,2010.
- 15 DEM-Solutions. EDEM 2.4 User Guide[M]. 北京:海基科技,2012.
- 16 刘向军,石磊,徐旭常. 稠密气固两相流欧拉-拉格朗日法的研究现状[J]. 计算力学学报,2007,2(2):166-172.  
Liu Xiangjun, Shi Lei, Xu Xuchang. Activities of dense particle-gas two-phase flow modeling in Eulerian-Lagrangian approach [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2007, 2(2):166-172. (in Chinese)
- 17 心男. 基于EDEM-Fluent耦合的气吹式排种器工作过程仿真分析[D]. 长春:吉林大学,2013.  
Xin Nan. Simulation analysis of working process of air-blowing seed-metering device based on coupled EDEM-Fluent [D]. Changchun:Jilin University, 2013. (in Chinese)
- 18 李其铎,胡天群,俞忠,等. 颗粒物(粮食)的通风阻力试验研究[J]. 水动力学研究与进展:A辑,2006,21(4):473-478.  
Li Qitao, Hu Tianqun, Yu Zhong, et al. Experimental study of fluid drag in granary ventilation [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics A, 2006,21(4):473-478. (in Chinese)
- 19 周祖铎. 农业物料学[M]. 北京:农业出版社,1995.
- 20 王福林,尚家杰,刘宏新,等. EDEM颗粒体仿真技术在排种机构研究上的应用[J]. 东北农业大学学报,2013,44(2):110-114.  
Wang Fulin, Shang Jiajie, Liu Hongxin, et al. Application of EDEM particles simulation technology on seed-metering device research[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2013, 44(2):110-114. (in Chinese)
- 21 LS/T 1202—2002 储粮机械通风技术规程[S]. 2002.
- 22 胡国明. 颗粒系统的离散元素法分析仿真[M]. 武汉:武汉理工大学出版社,2010.
- 23 GB 5497—1985 粮食、油料检验 水分测定法[S]. 1985.
- 24 周西华,孟乐,李诚玉,等. 圆形管道风速测定与校正方法实验[J]. 辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2012,31(6):801-804.  
Zhou Xihua, Meng Le, Li Chengyu, et al. Experimental study on determination and correction method of wind speed in circular pipe[J]. Journal of Liaoning Technical University:Natural Science, 2012, 31(6):801-804. (in Chinese)