doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.07.034

干燥机粮层通风阻力特性数值模拟与试验*

张　烨　李长友　马兴灶　李建民　邹湘军　王润发

(华南农业大学南方农业机械与装备关键技术省部共建教育部重点实验室,广州 510642)

摘要:粮层内部通风阻力特性是影响干燥均匀性和能量损耗的关键因素之一。针对传统的经验公式存在精度偏低、未考虑粮层多孔介质的复杂变化因素和非线性的不确定性问题,基于传统的 Ergun 模型进行了压力损失因素分析;在通风阻力试验平台测定试验数据,通过探索性分析方法对风速进行分段,引入误差影响因子 λ,导出了一种新的基于多孔介质 Ergun 的稻谷变层压力场模型;给出了优化阻力特性曲线,构建了变层阻力与层厚的数学关系。试验结果证实,风速小于 0.2 m/s 时,λ 取值为 1;风速在 0.2 ~ 0.4 m/s 范围内时,λ 取值为 0.89;风速在 0.4 ~ 0.6 m/s 范围内时,λ 取值为 0.79。

关键词:干燥机　粮层阻力　多孔介质　修正后 Ergun 模型

中图分类号:S226.6　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2014)07-0216-06

引言

稻谷在通风干燥过程中,必然会消耗风机风压产生粮层阻力[1-2]。粮层阻力不宜过大或过小,合理的粮层设计对干燥品质和风机匹配至关重要[3]。目前国内外学者大多用经验公式[4-6]或传统标准[7-8]研究和设计粮层。通过试验数据拟合 Shedd 经验公式,得出粮层阻力与风速的二次方程;通过文献[7-8]推荐的公式进行多元回归得出幂指数回归方程。但 Shedd 方程中,粮层阻力仅与风速的二次方有关,传统标准设计出的粮层阻力精度偏低,其理论并未考虑粮层结构为多孔介质和粮层阻力存在非线性的不确定性问题,风速较大情况下,传统标准与试验结果存在较大误差。

本文融合经验公式,用试验数据结合探索性分析方法得到误差影响因子 λ,导出新的基于 Ergun 模型的稻谷变层压力场模型,并构建变层阻力与层厚的数学关系。通过数值模拟与试验对比,定量分析层厚、风速、孔隙率与粮层阻力的变化规律,并验证变层阻力与层厚模型的数值规律。

1　数学建模及理论分析

1.1　数学模型

在稻谷热风干燥过程中,热风从进气角状盒到出气角状盒需经过一定粮层厚度的稻谷,如图 1 所示。热风通过稻谷粮层产生压力损失,其中粮层被看作一定厚度的多孔介质。在模型建立时,有如下假设:气体在入口处速度均匀分布;干燥层内的稻谷粮层被视为多孔介质,均匀且各向同性;在单次试验过程中,多孔介质孔隙率保持不变。

求解粮层压力场遵守 N-S 方程,其控制方程[9-10]为

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}+\mathrm{div}(\rho u\phi)=\mathrm{div}(\Gamma\mathrm{grad}\phi)+S_\phi \quad (1)$$

式中　ρ——流体密度　　u——风速

t——时间　　Γ——扩散系数

S_ϕ——源项　　ϕ——通用变量

ϕ 可以代表速度分量 x、y、z、温度 T 等求解变量。当 $\phi=1$ 时,该方程为连续性方程;ϕ 为速度分量 x、y、z 时,该方程为动量方程。

由于粮层被看作多孔介质,在考察多孔介质模型压力损失时,通过 N-S 方程中源项 S_ϕ 定义多孔介质对流体的流动阻力[11-14],即粮层压力损失。该源项 S_ϕ 由 Darcy 粘性阻力项和惯性损失项两部分组成,即

$$S_\phi=-\left(\frac{\mu}{\alpha}u+C_2\frac{1}{2}\rho|u|u\right) \quad (2)$$

式中　μ——粘度

α——模型的渗透率,也称为粘性阻力系数,表征流体层流状态

收稿日期:2014-02-09　修回日期:2014-03-08

*国家自然科学基金资助项目(31371871、31071583)和高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20114404110021、20060564003)

作者简介:张烨,博士生,主要从事农业机械研究,E-mail:zy2009209011@163.com

通讯作者:李长友,教授,博士生导师,主要从事农业装备技术研究,E-mail:lichyx@scau.edu.cn

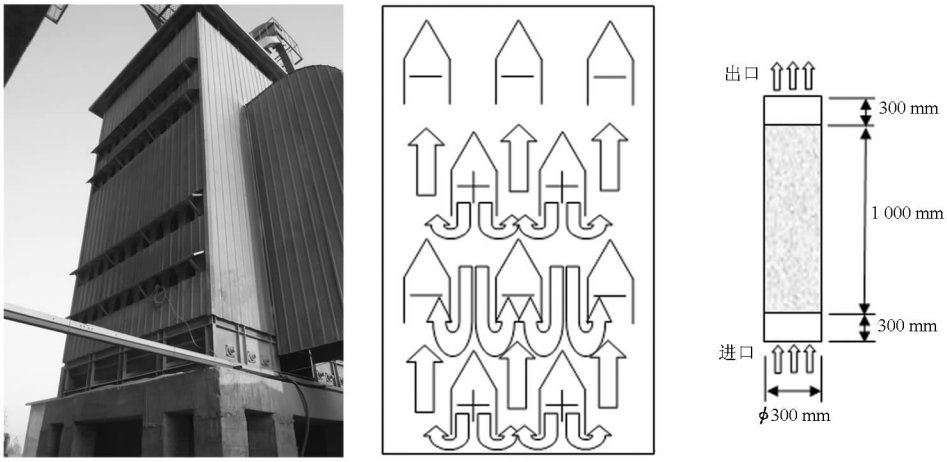

图 1　稻谷粮层阻力模型

Fig. 1　Paddy layer resistance model

（a）新疆奇台 100T 干燥机　（b）干燥段风道分布　（c）粮层通风阻力试验装置

C_2 是惯性阻力系数，表征流体湍流的脉动损失。当流体流速较低时，热风流过粮层多孔介质主要呈现层流形态，粘性力起主要作用，此时模型可忽略流速二次项；当流速逐渐增大时，则流体主要呈现湍流形态，惯性力起支配作用，此时流速二次项不可忽略[15]。

考察多孔介质压力损失，采用 Ergun 模型进行求解，即

$$-\frac{\Delta P}{L}=\frac{150\mu(1-\varepsilon)^2}{d_p^2\varepsilon^3}u+\frac{1.75\rho(1-\varepsilon)}{d_p\varepsilon^3}u^2 \tag{3}$$

式中　ΔP——粮层阻力

L——粮层厚度

d_p——多孔介质材料的特征长度

ε——多孔介质的孔隙率

当风速 u 较大（$u\geqslant 0.2$ m/s）时，Ergun 模型与试验结果存在一定误差[16]，本文通过试验方法结合探索性分析原理[17]，得出了试验误差影响因子 λ，导出新的粮层阻力表达式

$$-\frac{\Delta P}{L}=Au+\lambda Bu^2 \tag{4}$$

其中　$A=\dfrac{150\mu(1-\varepsilon)^2}{d_p^2\varepsilon^3}$　　$B=\dfrac{1.75\rho(1-\varepsilon)}{d_p\varepsilon^3}$

试验时温湿度一定，则空气密度和粘度可认为一定常值；稻谷品种和填充模式确定，则特征长度和孔隙率一定。引入 A、B 表征模型中速度一次项和二次项的系数[5]，由式（4）可知，ΔP 与 L 呈线性关系，与风速 u 存在二次多项式关系，孔隙率对模型参数存在影响。

1.2　变层阻力与粮层厚度关系

在风速恒定的稻谷粮层通风过程中，由于通过谷层的风量和干谷物质量基本不发生变化，由此定义无量纲风量谷物比 Q，其表示通风过程中流经谷层的风量与干谷物质量之比，公式为[18-19]

$$Q=\frac{\rho_1 ut}{\rho_2 L(1-M)} \tag{5}$$

式中　ρ_1——空气密度　　ρ_2——稻谷密度

M——稻谷含水率

由于风量谷物比 Q 一定，空气和稻谷密度在可控温度范围内为一定值，通风截面积 S 为常数，粮层厚度 L 增加一倍，则风速 u 也增加一倍，联立式（4）、式（5）可导出

$$\begin{cases}-\dfrac{\Delta P_1}{L_1}=Au_1+\lambda Bu_1^2\\[2ex]-\dfrac{\Delta P_2}{L_2}=Au_2+\lambda Bu_2^2\\[2ex]L_2=2L_1\\u_2=2u_1\end{cases} \tag{6}$$

求解式（6）可得

$$\frac{\Delta P_2}{\Delta P_1}=\frac{4Au_1+8Bu_2^2}{Au_1+Bu_2^2}\in[4,8] \tag{7}$$

式（7）表明，在干燥过程中，干燥层内的变层阻力（不同粮层厚度、相同风量谷物比情况下的粮层阻力）与层厚增量存在 4 ~ 8 倍的递增关系，即随着层厚度增加一倍，变层阻力会以 4 ~ 8 倍的递增速率增加。

1.3　模拟边界条件设置

粮层阻力模型采用标准 $k-\varepsilon$ 方程模型求解，对稻谷粮层建立多孔介质区域，压力速度耦合采用 SIMPLE 算法，控制方程的离散采用有限体积法，动量离散方程采用一阶迎风格式，忽略流体与壁面摩擦力。进气入口为速度入口，出口为压力出口，由于出口与大气相连，故设置表压为 0 Pa。具体边界条件设置如表 1 所示。

表 1 模型初始参数及边界条件

Tab. 1 Initial and boundary conditions of the model

参数	数值
空气密度/(kg·m^{-3})	1.205
空气粘度/(Pa·s)	1.81×10^{-5}
稻谷密度/(kg·m^{-3})	1.25×10^{3}
进口风速/(m·s^{-1})	0.1 ~ 0.6
床深/mm	100 ~ 1 000
孔隙率	0.57, 0.64

2 试验材料与方法

试验于 2013 年 1 月在华南农业大学进行,试验品种为华南农业大学天优 998 号新鲜稻谷,含水率为 14.87%,成熟度良好,去除残芒[20]。试验装置如图 2 所示。通过变频器 1 控制离心风机 2 产生不同的风速风量,风流经过输送管道 3 和转向器 7,通过筛网 4 进入稻谷粮层测试段 5,最后穿过所有粮层从粮层上方进入大气。在装置 4 处安装有风速测试点,装置 6 处安装有各段粮层的压力测试点,测试仪器分别为 SUMMIT565 型热线式风速计(韩国森美特)及 TESTO510 型精密数字压力表(德国德图)。

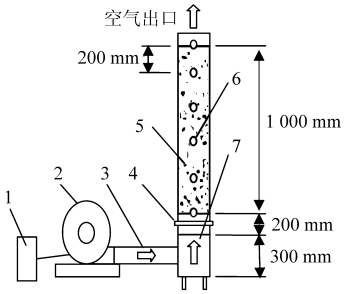

图 2 试验装置图

Fig. 2 Test equipment

1. 变频器 2. 离心风机 3. 输送管道 4. 风速测试点及筛网 5. 稻谷粮层测试段 6. 压力测试点 7. 气流转向器

粮层阻力是粮粒对通过粮层的气流形成的阻力,在压力上表现为气流的压力降。在试验中通过调节风机风速、改变粮层厚度及粮层孔隙率,获得不同风速、粮层厚度和孔隙率条件下的粮层阻力,从而获得粮层阻力与各因素之间关系,并进行分析。选取床深、风速和孔隙率作为试验因素,其中床深选取 10 个水平(100、200、300、400、500、600、700、800、900、1 000 mm),风速选取 6 个水平(0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 m/s),孔隙率选取 2 个水平(0.57、0.64)进行试验验证分析。

孔隙率通过测定稻谷堆积密度计算获得。在已知体积的试验圆管内,沿管口水平位置和高于水平位置 50 cm 处两种方式分别缓慢倒入稻谷,直至管口处水平,记录质量求得堆积密度,再求得孔隙率。沿管口水平位置落料时,孔隙率为 0.64;高于水平位置 50 cm 处落料时,孔隙率为 0.57。其中孔隙率计算公式为

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_t} \tag{8}$$

式中 ρ_b——稻谷堆积密度,kg/m^3

ρ_t——稻谷颗粒密度,kg/m^3

3 结果与讨论

3.1 粮层阻力理论分析

由式(3)可知,粮层阻力由风速一次项和二次项组成,即粘性力分量和惯性力分量,其两者之和为总的粮层阻力。随着风速的增加,粘性力分量和惯性力分量不断变化,定义粘性力分数表示粘性力分量占总粮层阻力的份额,惯性力分数表示惯性力分量占总粮层阻力的份额:

粘性力分数

$$n_1 = \frac{150(1-\varepsilon)^2\mu u}{d_p^2\varepsilon^3}\left(\frac{\Delta P}{L}\right)^{-1}\times100\% \tag{9}$$

惯性力分数

$$n_2 = \frac{1.75(1-\varepsilon)\rho u^2}{d_p\varepsilon^3}\left(\frac{\Delta P}{L}\right)^{-1}\times100\% \tag{10}$$

图 3 给出了粘性力分数和惯性力分数随风速增加的变化规律。从图 3 可知,当孔隙率为 0.64,粮层厚度为 1 000 mm,稻谷当量直径为 3.45 mm,空气粘度和密度为一定值时,随着风速的增加,粘性力分数从 92% 逐渐下降至 15%,惯性力分数从 8% 上升至 85%,交汇点风速为 0.13 m/s。图 3 说明,在低风速($u<0.13$ m/s)时,粘性力分数远大于惯性力分数,表明在低风速时粘性力占主导作用;随着风速增大($u>0.13$ m/s),惯性力分数大于粘性力分数,说明流体随着风速增加,流体主要受惯性力作用,这与文献[19]分析结果相吻合。

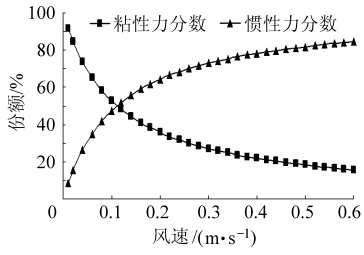

图 3 粘性力分数和惯性力分数变化规律

Fig. 3 Change rule of the viscous force and inertia force

3.2 误差影响因子的确定

当风速较大($u>0.2$ m/s)时,采用 Ergun 模型获得的粮层阻力结果与试验结果存在较大的误差[16],如图 4、表 2 所示。由图 3 可知,粘性力分量

和惯性力分量的交汇点风速为 0.13 m/s，当风速大于 0.13 m/s 时，惯性力起主要支配作用。由表 2 可发现，当风速大于 0.15 m/s 时，Ergun 模型计算值逐渐偏离试验值，风速为 0.15 m/s 时，误差为 8.28%；风速为 0.25 m/s 时，误差为 10.33%；风速为 0.4 m/s 时，误差为 20.85%；风速为 0.6 m/s 时，误差为 25.86%。随着风速的递增，误差显著增大，说明风速对误差具有显著影响。为了降低模型误差，设定模型允许误差范围在 10% 内，通过试验结果结合探索性分析原理[17]，把风速范围分为粘性力区

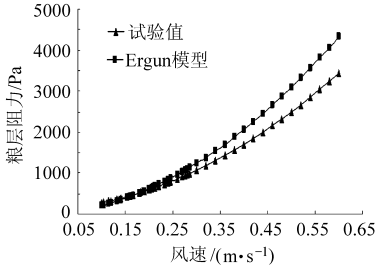

图 4　原 Ergun 模型与试验值对比

Fig. 4　Comparison between the original Ergun model and the test results

($u < 0.2$ m/s)、惯性力 1 区(0.2 m/s $< u < 0.4$ m/s)和惯性力 2 区(0.4 m/s $< u < 0.6$ m/s)3 段，在原 Ergun 模型基础上，分别对 3 段的二次项系数引入误差影响因子 λ_1、λ_2 和 λ_3。统计试验数据拟合得出，当$u < 0.2$ m/s时，模型呈层流状态，此时粮层阻力与风速呈线性关系，模型与试验结果高度吻合，误差影响因子 λ_1 取值为 1；当 0.2 m/s $< u < 0.4$ m/s 时，模型处于惯性力 1 区，风速的二次方对模型误差影响较小，误差影响因子 λ_2 取值为 0.89；当 0.4 m/s $< u < 0.6$ m/s时，模型处于惯性力 2 区，风速的二次方对模型误差影响较大，误差影响因子 λ_3 取值为 0.79。经引入误差影响因子，修正后的 Ergun 模型为

$$\begin{cases} -\dfrac{\Delta P}{L} = 1\,022u + 10\,322\lambda u^2 \\ u \in (0.1, 0.2) \quad (\lambda = 1) \\ u \in (0.2, 0.4) \quad (\lambda = 0.89) \\ u \in (0.4, 0.6) \quad (\lambda = 0.79) \end{cases} \tag{11}$$

从图 5 可看出，修正后的 Ergun 模型与试验结果的最大误差为 8.28%。

表 2　试验值与模型值的误差分析

Tab. 2　Error analyses of the test and simulation value

风速/(m·s⁻¹)	试验值/Pa	原模型值/Pa	原模型误差/%	修正模型值/Pa	修正模型误差/%
0.15	420.33	385.55	8.28	385.55	8.28
0.20	598.68	617.28	−3.11	571.86	4.48
0.25	816.31	900.63	−10.33	829.66	−1.64
0.30	1 073.23	1 235.58	−15.13	1 133.39	−5.61
0.35	1 369.43	1 622.15	−18.45	1 483.06	−8.30
0.40	1 704.92	2 060.32	−20.85	1 713.50	−0.50
0.45	2 079.69	2 550.11	−22.62	2 111.16	−1.51
0.50	2 493.75	3 091.50	−23.97	2 549.60	−2.24
0.55	2 947.09	3 684.51	−25.02	3 028.80	−2.77
0.60	3 439.72	4 329.12	−25.86	3 548.78	−3.17

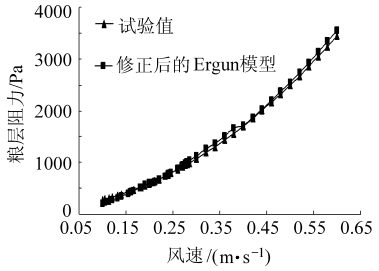

图 5　修正后的 Ergun 模型与试验值对比

Fig. 5　Comparison between the revised Ergun model and the test results

3.3　模型建立的可行性分析

分别对进口风速为 0.1、0.2、0.3 m/s 3 种情况的粮层阻力进行数值计算，得到与试验粮层阻力的对比曲线，如图 6 所示。比较模拟值与试验值可发现，模拟值与试验值具有较高的吻合度，但模拟值均略高于试验值，其误差范围为 1.17% ~ 6.71%，进口风速越高，误差越大，由此认为数值模拟结果是可靠的。

从图 6 曲线变化规律可以明显看出，当风速不变时，阻力与层厚间呈线性关系，层厚越大，阻力越大，这与式(4)分析吻合。

3.4　进口风速对粮层阻力的影响

图 7 是不同孔隙率下，粮层厚度为 200、500、1 000 mm的粮层阻力与进口风速的变化规律。从图中可以发现，在相同层厚和孔隙率条件下，粮层阻力随进口风速的增加呈二次关系递增；当粮层厚度递增时，粮层阻力随风速呈非线性递增。当风速为 0.25 m/s、孔隙率为 0.57 时，粮层厚度为 200 mm 的

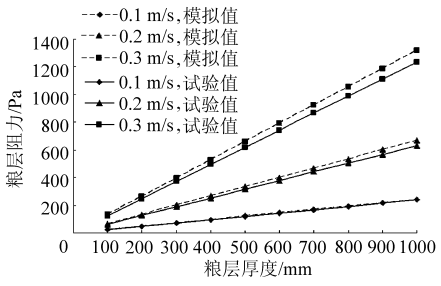

图 6 粮层阻力的试验值与模拟值

Fig. 6 Layer resistances of test and simulation

阻力为 193.47 Pa,500 mm 的阻力为 483.67 Pa,1 000 mm的阻力为 967.33 Pa,1 000 mm 的阻力远大于 200 mm 的阻力,说明层厚越大,其粮层阻力越大,风机消耗的能量也越大。所以干燥机粮层参数设计和风机选型是否匹配直接影响能耗大小。

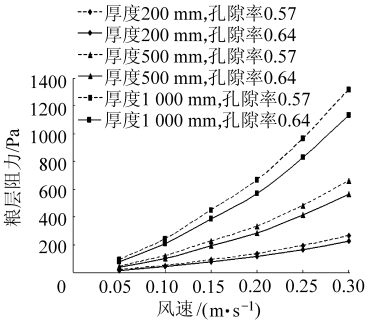

图 7 粮层阻力与进口风速的对应关系

Fig. 7 Relationship between layer resistance and air velocity

由图 7 可知,在相同风速和层厚条件下,粮层阻力随孔隙率的增高而降低。当风速为 $u=0.25$ m/s 时,孔隙率 0.57 的粮层阻力比孔隙率 0.64 的粮层阻力大 16.59%。由于流动粮层孔隙率均大于静止粮层,所以流动中的粮层阻力会比静止的粮层阻力小,当风量风速一定时,增大粮层孔隙率能有效降低粮层阻力,从而减小穿透粮层所需要的风压动能,降低干燥机能耗。

3.5 不同风量谷物比的变层阻力与层厚关系

根据式(5)选取了不同风量谷物比、不同层厚进行变层阻力试验和方差分析,数据如表 3、4 所示。表 3 结果表明,变层阻力比的组间方差存在显著差异(Sig. 值为 0),风量谷物比对变层阻力比存在显著影响。

表 3 变层阻力比 $\Delta P_2/\Delta P_1$ 方差分析

Tab. 3 ANOVA of $\Delta P_2/\Delta P_1$

	离差平方和	自由度	均方差	F	Sig. 值
组间差异	5.951	4	1.488	5 602.507	0
组内差异	0.005	20	0.000 1		
总数	5.956	24			

由表 4 可以看出,当风量谷物比一定时,随着层厚的增加,变层阻力比 $\Delta P_2/\Delta P_1$ 基本不发生太大的变化,当风量谷物比为 1.12 时,$\Delta P_2/\Delta P_1$ 的变化范围在 5.87 ~ 5.90,而平均值为 5.88,$\Delta P_2/\Delta P_1$ 变化范围小且趋于稳定。

表 4 变层阻力比和层厚数值分析

Tab. 4 Numerical analyses of the resistance ratio of changing layer and the layer thickness

风量谷物比	层厚 H/mm	层厚 H 的变层阻力 ΔP_1/Pa	层厚 $2H$ 的变层阻力 ΔP_2/Pa	$\Delta P_2/\Delta P_1$
1.12 (风速 $u=0.1$ m/s)	100	21.57	126.94	5.89
	200	43.00	252.24	5.87
	300	64.25	377.51	5.88
	400	85.51	502.80	5.88
	500	106.76	629.76	5.90
	平均值			5.88
2.24 (风速 $u=0.2$ m/s)	100	63.69	417.628	6.56
	200	126.94	829.424	6.53
	300	189.57	1 241.09	6.55
	400	252.24	1 652.83	6.55
	500	314.88	2 070.51	6.58
	平均值			6.55
3.36 (风速 $u=0.3$ m/s)	100	126.37	872.125	6.90
	200	251.82	1 731.65	6.88
	300	375.97	2 590.90	6.89
	400	500.22	3 450.31	6.90
	500	624.39	4 322.52	6.92
	平均值			6.90
4.48 (风速 $u=0.4$ m/s)	100	209.59	1 490.35	7.11
	200	417.63	2 958.76	7.08
	300	623.44	4 426.69	7.10
	400	829.42	5 894.87	7.11
	500	1 035.26	7 385.37	7.13
	平均值			7.11
5.60 (风速 $u=0.5$ m/s)	100	313.40	2 272.33	7.25
	200	624.41	4 510.82	7.22
	300	932.05	6 748.59	7.24
	400	1 239.93	8 986.74	7.25
	500	1 547.60	11 259.3	7.28
	平均值			7.25

当风量谷物比递增时,变层阻力比 $\Delta P_2/\Delta P_1$ 随层厚的增加而递增,其变化范围在 5.88 ~ 7.25,说明随着层厚的增加,变层阻力以 N 倍的速率递增,其中 $N\in[5.88,7.25]$,此区域与式(7)所得区间较为吻合。根据理论分析与试验结果对比,得出随着层厚度增加一倍,阻力会以 4 ~ 8 倍的递增速率增加。

4　结论

（1）基于粮层通风阻力特性建立了粮层压力场模型，对比分析试验与模拟结果，得出风速较高时粮层阻力模型计算误差较大。

（2）基于多孔介质 Ergun 引入误差影响因子 λ，导出了一种新的稻谷变层压力场模型，当风速 $u<0.2$ m/s 时，$\lambda=1$；当 0.2 m/s $<u<0.4$ m/s 时，$\lambda=0.89$；当 0.4 m/s $<u<0.6$ m/s 时，$\lambda=0.79$。

（3）引入稻谷风量谷物比，构建了变层阻力与层厚的数学关系，并通过数据验证了变层阻力与层厚增量存在 4～8 倍的递增关系。

参　考　文　献

1　Nalladurai K, Alagusundaram K, Gayathri P. Airflow resistance of paddy and its byproducts[J]. Biosystems Engineering, 2002, 83(1): 67 – 75.

2　Sacilik K. Resistance of bulk poppy seeds to airflow[J]. Biosystems Engineering, 2004, 89(4): 435 – 443.

3　杨英强，俞忠. 粮层深度与粮层阻力关系的试验分析[J]. 实验室研究与探索，2008(8)：32 – 34.
Yang Yingqiang, Yu Zhong. Expermiental study of grain physics and grain bulk resistance[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2008(8): 32 – 34. (in Chinese)

4　Brzinski T A, Mayou P, Durian D J. Depth-dependent resistance of granular media to vertical penetration[J]. Physical Review Letters, 2013, 111: 168002 – 5.

5　Kashaninejad M, Tabil L G. Resistance of bulk pistachio nuts (Ohadi variety) to airflow[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 90(1): 104 – 109.

6　Yazdanpanah F, Sokhansanj S, Lau A K, et al. Airflow versus pressure drop for bulk wood pellets[J]. Biomass and Bioenergy, 2011, 35(5): 1960 – 1966.

7　LS/T1202—2002 储粮机械通风技术规程[S]. 2002.

8　李其弢，胡天群，俞忠，等. 颗粒物质(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]. Journal of Hydrodynamics, Ser. A, 2006, 21(4): 473 – 478. (in Chinese)

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　吴沿友，郭晓君，付为国，等. 红树林多孔介质阻力模型与消波效果仿真分析[J]. 农业工程学报，2012，28(23)：92 – 97.
Wu Yanyou, Guo Xiaojun, Fu Weiguo, et al. Porous medium resistance model and simulation on effect of wave dissipation of mangrove forest[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(23): 92 – 97. (in Chinese)

11　李鹏飞，徐敏义，王飞飞. 精通 CFD 工程仿真与案例实战[M]. 北京：人民邮电出版社，2011.

12　于立章，孙立成，孙中宁. 多孔介质通道中单相流动压降预测模型[J]. 核动力工程，2010，31(5)：63 – 67.
Yu Lizhang, Sun Licheng, Sun Zhongning. Prediction model for pressure drop of single-phase flows in porous media channel[J]. Nuclear Power Engineering, 2010, 31(5): 63 – 67. (in Chinese)

13　Petre C F, Larachi F, Iliuta I, et al. Pressure drop through structured packings: breakdown into the contributing mechanisms by CFD modeling[J]. Chemical Engineering Science, 2003, 58(1): 163 – 177.

14　Khatchatourian O A, Toniazzo N A, Gortyshov Y F. Simulation of airflow in grain bulks under anisotropic conditions[J]. Biosystems Engineering, 2009, 104(2): 205 – 215.

15　孔珑. 两相流体力学[M]. 北京：高等教育出版社，2005.

16　毛迪凡. 孔隙介质渗流基本方程的改进[D]. 北京：中国地质大学，2012.

17　邹湘军，顾邦军，张平，等. 分布式虚拟环境下不确定性问题的探索性分析[J]. 系统仿真学报，2007，19(3)：687 – 690.
Zou Xiangjun, Gu Bangjun, Zhang Ping, et al. Collaborative exploratory analysis of uncertainty problem based on distributed virtual environments[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(3): 687 – 690. (in Chinese)

18　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)

19　马兴灶，李长友，张晓立. 玉米深床干燥静压损失与风量谷物比变化特性试验研究[C]. 中国机械工程学会包装与食品工程分会 2010 年学术年会论文集，2010.

20　张烨，李长友，李建民，等. 稻谷摩擦特性研究[J]. 广东农业科学，2011(13)：15 – 17.
Zhang Ye, Li Changyou, Li Jianmin, et al. Experimental study on frictional characteristic of grain[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2011(13): 15 – 17. (in Chinese)

21　李长友，方壮东. 高湿稻谷多段逆流干燥缓苏解析模型研究[J]. 农业机械学报，2014，45(5)：179 – 184.
Li Changyou, Fang Zhuangdong. Analytical models of multistage counter flow drying and tempering process of grain[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 179 – 184. (in Chinese)

（下转第 208 页）

2012,33(1):51 - 54.
Peng Yiqiang, Deng Feng, Liu Yu, et al. Researches on essential groups of enzyme active site and inhibition kinetics of polyphenol oxidase from Fuji apple[J]. Journal of Huaqiao University:Natural Science, 2012, 33(1): 51 - 54. (in Chinese)
21 Kumar V B, Mohan T C, Murugan K. Purification and kinetic characterization of polyphenol oxidase from Barbados cherry (*Malpighia glabra* L.)[J]. Food Chemistry, 2008, 110(2): 328 - 333.
22 Guerrero-Beltrán J A, Swanson B G, Barbosa-Cánovas G V. Inhibition of polyphenoloxidase in mango puree with 4-hexylresorcinol, cysteine and ascorbic acid[J]. LWT-Food Science and Technology, 2005, 38(6): 625 - 630.
23 Iyidogan N F, Bayindirh A. Effect of L L-cysteine, kojic acid and 4-hexylresorcinol combination on inhibition of enzymatic browning in Amasya apple juice[J]. Journal of Food Engineering, 2004, 62(3): 299 - 304.
24 Jiang Y M. Purification and some properties of polyphenol oxidase of longan fruit[J]. Food Chemistry, 1999, 66(1): 75 - 79.

Specificity and Inhibition Kinetics of Polyphenol Oxidase from Honeysuckle

Luo Lei Zhou Yanyan Zhu Wenxue Yang Bin Qu Zheng Kang Xinyan
(*College of Food and Biological Engineering*, *Henan University of Science and Technology*, *Luoyang* 471023, *China*)

Abstract: The aim of this work was to study substrate speciflcity and inhibition kinetics of ascorbic acid, 4-hexylresorcinol, L-cysteine and citric acid on PPO obtained from honeysuckle. The results show that the best substrate is chlorogenic acid because of the lowest K_m value 0.0059 mmol/L; ascorbic acid, 4-hexylresorcinol and L-cysteine demonstrate reversible inhibition, and their IC_{50} values are 0.062, 0.053, 0.140 mmol/L. Citric acid shows irreversible inhibition to PPO with IC_{50} value of 0.048 mmol/L. Lineweaver - Burk plotting show that ascorbic acid, 4-hexylresorcinol and L-cysteine are mixed-type, non-competitive and anti-competitive inhibitors, with the inhibition constants K_I of 1.620, 4.587, 0 mmol/L, and K_{IS} of 1.995, 0, 3.780 mmol/L, respectively.

Key words: Honeysuckle Polyphenol oxidase Substrate specificity Inhibitor Kinetic

(上接第 221 页)

Experiment and Numerical Simulation of Layer Resistance Parameters in Dryer

Zhang Ye Li Changyou Ma Xingzao Li Jianmin Zou Xiangjun Wang Runfa
(*Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment*, *Ministry of Education*, *South China Agricultural University*, *Guangzhou* 510642, *China*)

Abstract: Ventilation resistance characteristic of grain layer is the key influence factor to the drying uniformity and energy consumption, is also the theoretical foundation parameter for layer design and fan selection. The traditional empirical formulas of ventilation resistance of grain layer are low precision and ignore the complicated changes and nonlinear uncertainty problems of grain layer porous media. The pressure loss factors were discussed based on the traditional Ergun model. By testing the airflow resistance on test platform, dividing the air velocity into subsections by the exploratory analysis method, and introducing an error influence factor λ, a new pressure field model of variable layer was derived based on the Ergun model. The optimal resistance characteristic curve was given, and the relationship between the ventilation resistance and layer thickness was built. The results show that when the air velocity is less than 0.2 m/s, the λ is 1; when the velocity is between 0.2 m/s and 0.4 m/s, the λ is 0.89; and when the velocity is between 0.4 m/s and 0.6 m/s, the λ is 0.79.

Key words: Dryer Layer resistance Porous media Revised Ergun model