

稻谷籽粒内部热湿传递三维适体数学模型研究

吴中华^{1,2} 李凯¹ 高敏¹ 赵丽娟^{1,2} 张忠杰³

(1. 天津科技大学机械工程学院, 天津 300222; 2. 天津市轻工与食品工程机械装备集成设计与在线监控重点实验室, 天津 300222;
3. 国家粮食局科学研究院, 北京 100037)

摘要: 针对稻谷热风干燥过程中出现爆腰, 而其机理又尚未明确的问题, 以图像法构建稻谷籽粒三维适体网格, TPS法测定导热系数, 逆推法计算水分有效扩散系数, 利用 COMSOL Multiphysics 软件模拟计算热风干燥过程中稻谷籽粒内部的温度和水分分布, 并与实验结果对比。结果表明: 三维适体数学模型具有较高的精度, 干燥过程中稻谷籽粒干基含水率模拟数据与实验数据最大误差低于 8%; 稻谷籽粒内部温度和水分分布梯度沿径向(短轴)比沿轴向(长轴)大, 且水分梯度维持时间远大于温度梯度; 沿籽粒径向由外表面至中心 1/3 长度内的水分梯度较径向其它部分的水分梯度大, 与实验观察的爆腰由籽粒表面向内扩展相吻合。研究结果为准确预测籽粒内部的干燥应力, 揭示稻谷爆腰机理提供了基础。

关键词: 稻谷; 热风干燥; 热质传递; 干燥应力; 数学模型

中图分类号: TQ028.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)01-0329-06

Three Dimensional Body-fitted Mathematical Model of Rice Kernel in Hot Air Drying Process

WU Zhonghua^{1,2} LI Kai¹ GAO Min¹ ZHAO Lijuan^{1,2} ZHANG Zhongjie³

(1. College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China
2. Tianjin Key Laboratory of Integrated Design and On-line Monitoring for Light Industry & Food Machinery and Equipment, Tianjin 300222, China
3. Academy of State Administration of Grain, Beijing 100037, China)

Abstract: Rice cracking occurring in the hot air drying of rice kernels reduced its quality and economic values. The reason for the rice cracking is due to the local drying stress of the kernel exceeds its resistance. The drying stress includes the stresses induced by temperature and water gradient, so the temperature and water gradient is basis for predicting drying stress. The purpose was to predict the heat and mass transfer process inside the rice kernel. The image processing technology was applied to construct a three-dimensional body-fitted grid for the rice kernel. The governing equations and relative boundary conditions were developed for the heat and mass transfer processes respectively. New measuring technology (TPS) was used to measure the properties of rice kernel such as the heat conduction and mass diffusion coefficient. Finally, the Comsol Multiphysics software was applied to solve the mathematical model. The simulation results were compared with the experimental data and the difference was less than 8%, indicating high model accuracy. The temperature and water distribution gradients in the rice kernel along the radial direction (short axis) were larger than those along the axial direction (long axis), and the duration time of water gradient existence was longer than temperature gradient existence. The moisture gradient in the radial direction from the outer surface to the one-third of center was larger than that in other parts of the radial direction, which was consistent with the cracking phenomena observed in experiments—the crack extended from the surface inward. The image processing technology was applied to construct three-dimensional body-fitted grid for the rice kernel. New measuring technology (TPS) was used to measure the properties of rice kernel.

Key words: rice; hot air drying; heat and mass transfer; drying stress; mathematical model

0 引言

水稻是我国重要的粮食作物,收获后稻谷需要及时干燥到安全含水率才能长期储藏。热风干燥是稻谷机械化干燥的一种主要形式,但不合理干燥条件易造成稻谷内部产生应力裂纹(也称爆腰)^[1-3]。实践表明,提高热风温度能大幅度提高稻谷干燥机生产效率,且具有良好的节能效果,但干燥后稻谷裂纹率上升明显,高裂纹率稻谷在后续输送和碾米过程中易破碎,产生碎米,降低其经济价值;有裂纹稻谷在储藏过程中易吸湿,发霉;作为种子,则发芽率降低^[4-6]。

一般认为,稻谷爆腰的原因是籽粒局部干燥应力超过其抵抗能力造成裂纹。稻谷的干燥应力包括籽粒内部的温差应力和水分梯度引起的应力,难以利用实验手段测得,因而国内外学者多采用数学模型来预测干燥应力,如传统应力理论^[7-8]、玻璃化转变理论^[9-11]等。在干燥应力数学模型中,引起应力的温度和水分梯度分布是准确预测干燥应力的基础。由于稻谷籽粒太小,难以通过实验测定其内部的温度和含水率分布,前人多采用数值模拟方法来预测稻谷籽粒内部的温度和含水率分布,并取得良好的效果^[12-14],但数学模型仍存在较大误差,其原因在于:①籽粒外形上。为了简化计算,前人研究大多数基于简单的二维模型,即将稻谷籽粒简化成球形、扁片状、圆柱形、椭球形等简单几何形状,而建立二维网格,然后用有限体积法或者有限元法对其干燥过程进行模拟,得到稻谷内部温度和湿度分布^[14-16]。由于稻谷籽粒真实形状是不规则的,简化处理无法反映籽粒实体特征,给模拟结果带来误差^[17-18]。②物性参数上。对于模型中的物性参数值,前人多采用一些经验公式估算或假定,影响了模型精度。现代测量技术进步为精确测定稻谷一些物性参数值提供了手段。

本文目的在于进一步完善热风干燥过程中籽粒内部热湿传递数学模型,提供较为精确的温度和含水率梯度分布情况。首先采用信息采集和图像处理方法,构建稻谷籽粒三维几何模型;再采用瞬态平面热源法(TPS)测定模型中重要物性参数(如导热系数和扩散系数);最后,采用多物理场模拟软件对数学模型进行求解,并对稻谷籽粒内部热湿传递过程进行模拟分析。

1 数学模型

1.1 三维适体网格

本文采用图像处理方法构建稻谷籽粒三维适体

网格。实验材料为2016年7月湖南产稻谷(特优3301),带壳初始湿基含水率23.0%(干基含水率为29.87%),剥壳后初始湿基含水率22.0%(干基含水率28.21%)。首先挑选颗粒饱满的稻谷籽粒,利用OLYMPUS SZ-17型高倍数码相机对背景板上稻谷籽粒进行拍照,得到稻谷籽粒二维平面图片,然后将稻谷籽粒旋转15°再拍照,可得到下一幅图片;将稻谷籽粒旋转一周并重复上述操作,可得到单个稻谷籽粒的12幅二维平面图片。图1为通过数码相机获得的不同旋转角度下稻谷籽粒二维图片。

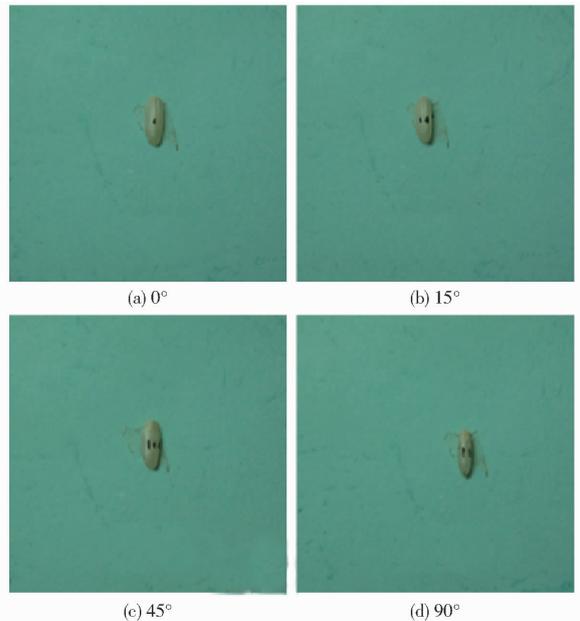


图1 不同旋转角度下稻谷籽粒二维图片

Fig. 1 Two-dimensional snapshots for rice kernel obtained from various angles

利用CAD软件对所获得的稻谷籽粒二维图片进行处理,提取籽粒外形轮廓尺寸数据。将不同旋转角度下稻谷籽粒外形轮廓数据导入三维建模软件并进行重构处理,即可将不同旋转角度下稻谷籽粒二维图片转化为三维实体,从而建立稻谷籽粒三维几何模型。然后,将三维几何模型导入多物理场耦合软件COMSOL Multiphysics 4.2并进行网格划分,可得到如图2所示的稻谷籽粒三维适体网格。图2中,将稻谷籽粒的几何模型划分为50 020个四面体单元,以满足计算精度要求。

1.2 热湿传递模型

为了模拟稻谷热风干燥过程中籽粒内部发生的热湿传递过程,在参考前人工作基础上,本文建立了籽粒内部热湿传递数学模型。模型基于以下假设:干燥过程中,稻谷籽粒体积收缩较小,因而假设干燥过程中稻谷外形和体积不变;假设稻谷物性为各向同性。数学模型包括传热传质控制方程,边界和初始条件:

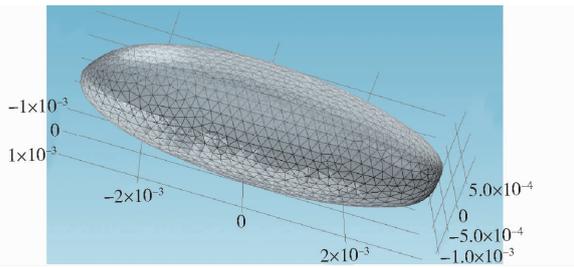


图 2 稻谷籽粒三维适体网格

Fig. 2 Three-dimensional body-fitted grid for rice kernel

(1) 传热控制方程为

$$\nabla(\lambda \cdot \nabla T) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - \rho h_t \frac{\partial M}{\partial t} \quad (1)$$

式中 λ ——稻谷导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ T ——稻谷籽粒内部温度, K M ——稻谷籽粒内部干基含水率, kg/kg t ——时间, s c_p ——稻谷比热容实测值, 取 $2\,272.14 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ρ ——稻谷籽粒密度实测值, 取 $1\,145.0655 \text{ kg}/\text{m}^3$ h_t ——水分蒸发焓, J/kg

传热控制方程的初始条件为

$$T|_{t=0} = T_0 \quad (2)$$

式中 T_0 ——环境温度, 取 20°C

边界条件

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_g) \quad (3)$$

式中 T_g ——干燥空气温度, 取 60°C h ——稻谷表面对流传热系数, 取 $48.313 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ n ——向量方向, 表示沿不同方向的温度传递

(2) 水分传递控制方程为

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla(D_{eff} \cdot \nabla M) \quad (4)$$

$$\text{其中 } D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (5)$$

式中 D_{eff} ——稻谷籽粒水分有效扩散系数, m^2/s D_0 ——有效扩散系数指前因子, m^2/s E_a ——扩散活化能, kJ/mol R ——理想气体常数, 取 $8.314 \times 10^{-3} \text{ kJ}/(\text{mol} \cdot \text{K})$

水分传递控制方程的初始条件为

$$M|_{t=0} = M_0 \quad (6)$$

式中 M_0 ——稻谷籽粒初始干基含水率, 取 28.21%

边界条件

$$-D_{eff} \frac{\partial M}{\partial n} = h_d(M - M_e) \quad (7)$$

$$\text{其中 } h_d = \frac{ShD_{eff}}{R_{eq}} \quad (8)$$

$$Sh = 2.0 + 0.552Re^{1/2}Sc^{1/3} \quad (9)$$

式中 M_e ——稻谷籽粒初始干基含水率 h_d ——稻谷籽粒对流传质系数 Sh ——舍伍德准数 R_{eq} ——稻谷的等效半径, 取 $3.98 \times 10^{-3} \text{ m}$ Sc ——施密特准数

通过式(8)和(9)得到, 稻谷籽粒对流传质系数计算公式为

$$h_d = D_{eff}(2.0 + 0.552Re^{1/2}Sc^{1/3})/R_{eq} \quad (10)$$

$$\text{其中 } Sc = \frac{\mu_a}{\rho_a D_{eff}} \quad (11)$$

式中 μ_a ——热风的粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ρ_a ——热空气的密度, kg/m^3

1.3 模型参数

在传热传质控制方程(1)和(4)中, 分别有 2 个重要模型参数, 稻谷导热系数(λ)和水分有效扩散系数(D_{eff})。精确的模型参数值对数学模型精度具有重要意义, 因此, 本文采用实验测量方法, 以获得上述 2 个模型参数精确值。

1.3.1 稻谷籽粒导热系数

材料导热系数测量方法有热阻法、热线法、瞬态热带法及瞬态平面热源法等。瞬态平面热源法(TPS)是目前较先进的一种包括导热系数的热物性参数测量方法, 其设备为热常数分析仪^[19]。本文采用 TPS1500 型 HOT DISK 热常数分析仪(瑞典 HOT DISK 公司)测定 11% ~ 23% 不同湿基含水率稻谷的导热系数。

图 3 为实验测得的稻谷导热系数与含水率的关系图。从图 3 中可以看出, 稻谷导热系数和含水率之间存在线性关系。通过实验数据, 拟合得到的线性函数关系式为

$$\lambda = 0.0086 + 0.0017x \quad (12)$$

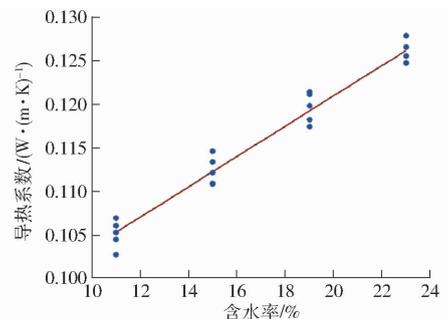
式中 x ——稻谷的湿基含水率, %

图 3 导热系数与湿基含水率关系图

Fig. 3 Relationship between rice thermal conductivity and its moisture content

图中相关系数 $R = 0.965$, 剩余标准偏差 $S = 0.0015$ 。

1.3.2 水分有效扩散系数

前期稻谷热风干燥实验表明,稻谷干燥是降速干燥;因此,可以采用逆推法计算稻谷水分有效扩散系数^[20]。根据逆推法原理,本文先进行剥壳稻谷籽粒在不同温度下干燥实验,并绘制干燥曲线(图4);根据干燥曲线,计算出该干燥温度下稻谷水分有效扩散系数。然后,对式(5)两端求对数,得到

$$\ln D_{eff} = \ln D_0 - \frac{E_a}{RT} \quad (13)$$

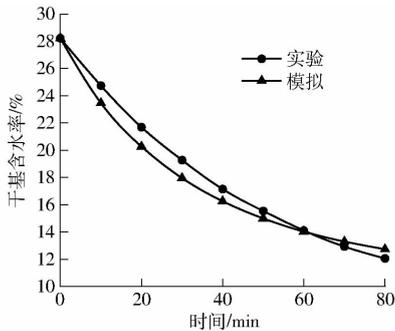


图4 模拟与实验稻谷干燥曲线

Fig.4 Drying curves obtained from experiment and simulation

利用实验测得的水分扩散系数,绘制 $\ln D_{eff} - 1/T$ 关系图,线性回归求得扩散活化能 E_a 和 D_0 。最后,将求得的两个数值代入式(5)中,可得到稻谷水分有效扩散系数与干燥温度的 Arrhenius 关系式。

采用逆推法,本文测得 $E_a = 27.72 \text{ kJ/mol}$, $D_0 = 2.28 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$,水分扩散系数与干燥温度表达式为

$$D_{eff} = 2.28 \times 10^{-6} \exp\left(\frac{-27.72}{8.314 \times 10^{-3} T}\right) \quad (14)$$

1.4 模型求解

本文采用多物理场 COMSOL Multiphysics 软件对上述稻谷籽粒热湿传递模型进行有限元迭代求

解。求解过程中,先进行网格验证,确定网格大小为 50 020 个四面体单元。时间步长为 1 min,采用 LENOVO G50 型计算机,一次工况计算时间约为 1 h。

1.5 模型验证

图4表示在热风干燥温度为 60°C 时,得到的稻谷实验和模拟干燥曲线。从图4中可看出,稻谷的干燥为降速干燥。模拟干燥曲线与实验曲线趋势一致,在同一干燥时间稻谷干基含水率两者之间最大误差为 8%,低于一般数值模拟的 15% 精度要求,因此,本模型精度满足数值模拟的要求。

2 模拟结果与讨论

2.1 谷粒内部温度分布

图5为干燥热风温度为 60°C 时,稻谷籽粒轴向截面(即 $x-z$ 平面)不同时刻 ($t = 2, 4, 6, 8, 10, 12 \text{ min}$) 温度分布云图。图6为稻谷籽粒内部不同位置点的温度变化曲线。从图5、6中可以看出,稻谷内部温度随干燥时间增加而升高,在干燥 4~6 min 内温度上升快,干燥 6~10 min 内温度缓慢上升,在 $t = 11 \text{ min}$ 后接近干燥介质(热风温度 60°C),之后保持在该值的附近。图6显示稻谷籽粒边界点较中心位置升温快,因而会造成稻谷籽粒内部存在温度梯度。边界点与中心点温度梯度随干燥时间先快速增加,在 $t = 3 \sim 4 \text{ min}$ 达到最大值约 15°C ,然后逐渐减小。相对于稻谷干燥时间(本实验条件下约为 200 min),稻谷内部温度梯度存在时间短,说明在稻谷干燥内部热湿传递过程中,传质过程占主导地位,稻谷热风干燥过程主要是受传质过程控制。另外,图5中显示等温线在径向比轴向分布密集,说明温度梯度在径向较大。

2.2 稻谷内部水分分布

图7为干燥温度 60°C 条件下,不同时刻 ($t = 20,$

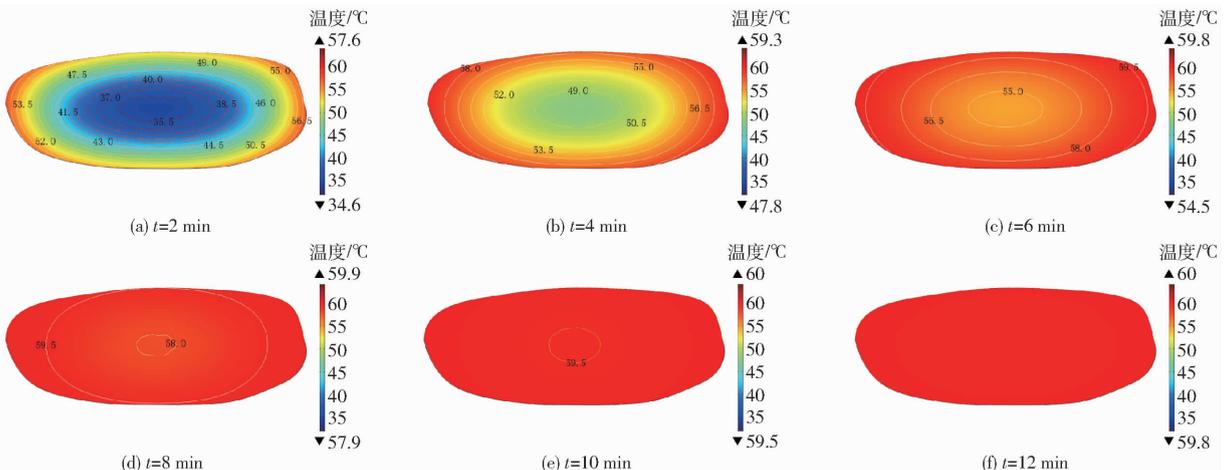


图5 不同时刻稻谷颗粒内部温度分布图

Fig.5 Transient temperature distributions inside rice kernel at $Z = 0$ plane

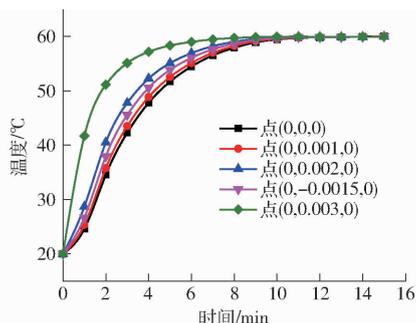


图 6 稻谷籽粒各内部点温度变化曲线

Fig. 6 Variation curves of local temperature inside rice kernel

40、60、80、100、120 min) 时稻谷颗粒内部干基含水率分布。图 8 为稻谷颗粒内部选定位置点水分随时间变化图。从图 7、8 可以看出, 稻谷籽粒热风干燥过程中, 与热量传递过程相反, 稻谷水分由内部向表面传递。籽粒表面附近水分扩散明显, 越接近中心部位, 水分迁移扩散相对迟缓; 因而在籽粒内部形成水分梯度。图 8 中, 稻谷内部水分梯度随干燥时间先增大后减小, 在 $t = 35 \sim 40$ min 时达到峰值。与温度梯度类似, 水分梯度在径向较大。另外, 由表面向内 1/3 径向长度内的水分梯度远大于中和内 1/3 长

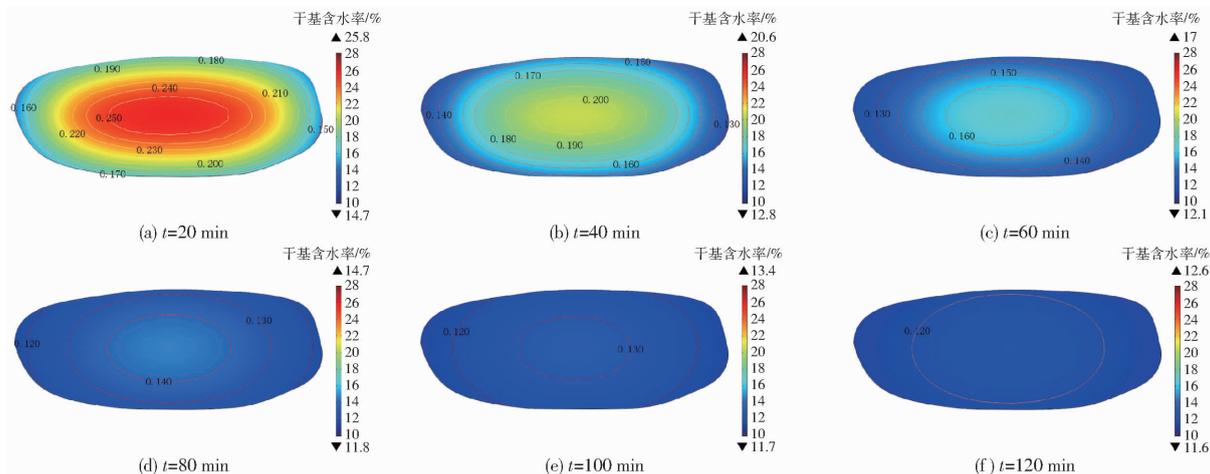


图 7 不同时刻稻谷颗粒内部水分分布云图

Fig. 7 Contours of transient moisture contents inside rice kernel at $Z = 0$ plane

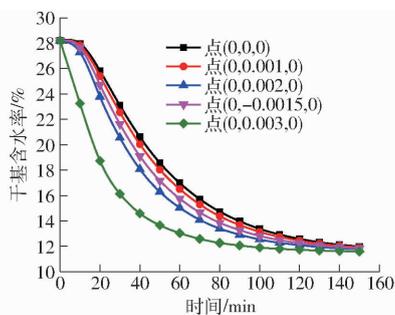


图 8 稻谷籽粒各内部点干基含水率变化曲线

Fig. 8 Variations of local moisture contents inside rice kernel during air drying process

产生裂纹, 裂纹进一步发展将导致稻谷爆腰, 从而降低稻谷品质。从图 6、8 中可以看出, 稻谷温度和水分分布梯度在径向分布比轴向较大; 另外径向外 1/3 处远比中和内 1/3 大。上述模拟结果较好地解释了实验和实践生产的现象: 稻谷裂纹多出现在籽粒长轴中间处, 由表面沿径向向内延伸^[6]。

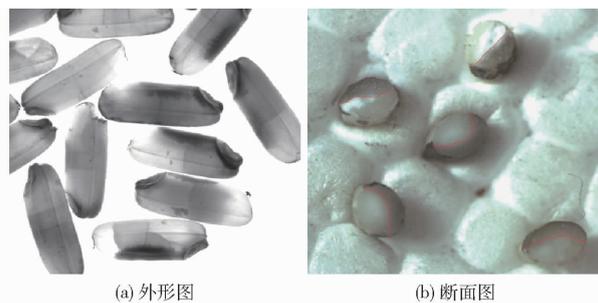


图 9 稻谷籽粒爆腰的位置

Fig. 9 Positions of fissure in rice kernel

度内的水分梯度。

随机抽取有裂纹的稻谷籽粒 10 粒左右置于毛玻璃板上, 由下向上在强光照下拍得图 9a; 取裂纹的籽粒若干, 用细棉棒蘸蓝黑色墨水在表面裂纹处轻涂 2 min, 使墨水沿裂纹缝隙渗入, 静置 30 min 后沿裂纹将籽粒轻轻掰开, 墨水覆盖的部分即为出现裂纹的地方, 用相机拍照得图 9b, 用细线画出裂纹区和非裂纹区。由图 9a 可知, 裂纹通常出现在垂直于籽粒长轴的位置, 最先出现的裂纹一般在长轴中部, 由图 9b 可知, 裂纹沿径向由外向内。

温度和水分梯度是导致稻谷干燥应力的主要因素。当稻谷干燥应力大于稻谷屈服应力时, 稻谷将

2.3 热风温度的影响

图 10 显示了不同热风干燥温度 (40、50、60℃) 下稻谷颗粒干燥曲线。从图 10 中可以看出, 不同温度下, 模拟曲线与实验曲线吻合较好, 说明数学模型精度较高。随着热风温度降低, 稻谷干燥时间增加; 60℃ 时干燥到干基含水率 14% 需时 60 min, 40℃ 时需时 180 min。可见, 热风温度是稻谷干燥一个重要影响因素。

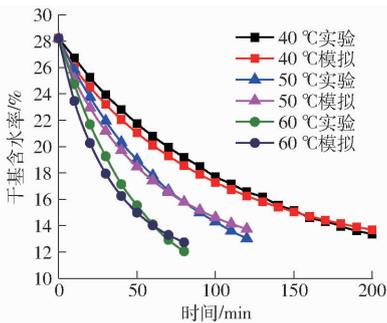


图10 不同温度下整体含水率随时间变化曲线

Fig. 10 Changing curves of total water content vs time at different temperatures

3 结论

(1) 基于图像处理技术和先进参数测量计算方

法的三维适体数学模型具有较高的精度,干燥过程中稻谷籽粒干基含水率模拟数据与实验数据最大误差低于8%。

(2) 稻谷热风干燥是一个由籽粒内部传质控制的过程。模拟结果表明稻谷籽粒内部温度和水分分布梯度沿径向(短轴)比沿轴向(长轴)大,且水分梯度维持时间远大于温度梯度。

(3) 稻谷籽粒内部最大的水分梯度出现在长轴中部,沿径向由外表面至中心1/3长度内,与实验过程中观察到的裂纹由籽粒表面向内扩展吻合。研究结果为准确预测籽粒内部的干燥应力,揭示稻谷爆腰机理提供了基础。

参 考 文 献

- 徐凤英,陈震,李长友,等. 稻谷热风、微波干燥品质与玻璃化转变研究[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(2):187-192. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150228&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.028.
- XU Fengying, CHEN Zhen, LI Changyou, et al. Effect of drying methods on quality and glass transition temperature of rice[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2):187-192. (in Chinese)
- 刘兵,仇红娟,刘强,等. 真空干燥-常压缓苏后稻米品质指标的相关性研究[J]. 食品工业科技,2016,37(1):121-125,179.
- LIU Bing, QIU Hongjuan, LIU Qiang, et al. Correlational research of rice qualities after vacuum drying-atmosphere pressure tempering[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(1):121-125, 179. (in Chinese)
- 马荐,李成华,王丹阳. 干燥工艺参数对稻谷爆腰率增值的影响[J]. 沈阳农业大学学报,2009,40(1):114-117.
- MA Jian, LI Chenghua, WANG Danyang. Experiment study on influence of drying parameters on additional crack percentage of rice in a deep fixed-bed[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2009, 40(1):114-117. (in Chinese)
- 刘木华,曹崇文. 稻谷种子安全干燥温度模型研究[J]. 农业工程学报,2003,19(3):174-177.
- LIU Muhua, CAO Chongwen. Model of safe drying temperature for paddy rice seed[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(3):174-177. (in Chinese)
- 李娟玲,陈坤杰,杨明毅,等. 固定床深层干燥稻谷爆腰率及发芽率试验研究[J]. 粮食与饲料工业,2001(12):9-11.
- LI Juanling, CHEN Kunjie, YANG Mingyi, et al. Studies of paddy's increased crack percentage and sprouting percentage after being dried in a fixed deep bed[J]. Feed and Feed Industry, 2001(12):9-11. (in Chinese)
- 曹崇文. 玉米干燥中应力裂纹的生成、扩展、检测和预防分析[J]. 干燥技术与设备,2009,7(4):153-158.
- CAO Chongwen. Formation, expansion, analysis of detection and prevention of corn stress cracks during drying[J]. Drying Technology & Equipment, 2009, 7(4):153-158. (in Chinese)
- T J, Z T, ARCHER T R. A mechanical method to determine fissures in milled rice kernels[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1997, 13(5):637-639.
- STERMER R A. Environmental conditions and stress cracks in milled rice [J]. Cereal Chemistry, 1968, 45:365-373.
- YANG W, JIA C C, HOWELL T A. Relationship of moisture content gradients and glass transition temperatures to head rice yield during cross-flow drying [J]. Biosystems Engineering, 2003, 86(2):199-206.
- CNOSSEN A G, SIEBENMORGEN T J, YANG W, et al. An application of glass transition temperature to explain rice kernel fissure occurrence during the drying process[J]. Drying Technology, 2001, 19(8):1661-1682.
- 刘木华,吴颜红,曾一凡,等. 基于玻璃化转变的稻谷爆腰产生机理分析[J]. 农业工程学报,2004,20(1):30-34.
- LIU Muhua, WU Yanhong, ZENG Yifan, et al. Fissure formation in rice kernel based on glass transition theory[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(1):30-34. (in Chinese)
- 黄小丽. 稻谷过热蒸汽干燥过程中的力学及干燥动力学特性研究[D]. 北京:中国农业大学,2014.
- HUANG Xiaoli. Mechanical characteristics and drying kinetics during superheated steam drying of rice kernel[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- 刘相东,杨彬彬. 多孔介质干燥理论的回顾与展望[J]. 中国农业大学学报,2005,10(4):81-92.
- LIU Xiangdong, YANG Binbin. Review and vista on drying theories of porous medium [J]. Journal of China Agricultural University, 2005, 10(4):81-92. (in Chinese)
- PEREZ J H, TANAKA F, UCHINO T. Modeling of mass transfer and initiation of hygroscopically induced cracks in rice grains in a thermally controlled soaking condition; with dependency of diffusion coefficient to moisture content and temperature—a 3D finite element approach[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 111(3):519-527.
- DONG R J, LU Z H, LIU Z Q, et al. Moisture distribution in a rice kernel during tempering drying [J]. Journal of Food Engineering, 2009, 91(1):126-132.
- YANG W, JIA C C, SIEBENMORGEN T J, et al. Intra-kernel moisture responses of rice to drying and tempering treatments by finite element simulation[J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45(4):1037-1044.
- PRAKASH B, PAN Zhongli. Effect of geometry of rice kernels on drying modeling results [J]. Drying Technology, 2012, 30(8):801-807.
- WU B, YANG W, JIA C. A three-dimensional numerical simulation of transient heat and mass transfer inside a single rice kernel during the drying process [J]. Biosystems Engineering, 2004, 87(2):191-200.
- AI-AJIAN S A. Measurements of thermal properties of insulation materials by using transient plane source technique [J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26(17-18):2184-2191.
- 张龙,吕建华,李兴军,等. 稻谷籽粒水分有效扩散系数的研究[J]. 河南工业大学学报:自然科学版,2015,36(4):26-33.
- ZHANG Long, LU Jianhua, LI Xingjun, et al. Study on the effective moisture diffusion coefficient in paddy kernels during adsorption [J]. Journal of Henan University of Technology: Natural Science Edition, 2015, 36(4):26-33. (in Chinese)