

# 水稻吸湿过程的内部传质及裂纹机理研究<sup>3</sup>

刘 斌                      李业波                      毛志怀  
(中国农业大学)      (中国农业科学院饲料研究所)      (中国农业大学)

**摘 要:** 假定水稻为复合椭球体, 在圆柱坐标下, 利用有限元法, 通过改进的传质模型和粘弹性力学模型, 对吸湿环境下水稻颗粒内部水分分布和应力应变分布进行数学模拟。模拟结果表明: 水稻吸湿时, 表层含水率很快达到平衡水分, 中心含水率变化缓慢; 水稻颗粒中心所受拉应力最大, 表层所受压应力最大, 沿颗粒横向从内向外应力由受拉逐渐变为受压; 水稻颗粒中心首先形成应力裂纹的可能性最大。利用吸湿实验对模拟结果进行了间接验证。

**关键词:** 水稻; 吸湿; 应力裂纹; 有限元

整米率是评价水稻品质的重要指标之一, 影响水稻整米率的主要因素是水稻的裂纹率。水稻碾米前裂纹率越高, 碾米后碎米率越高, 整米率也会相应降低<sup>[1]</sup>。水稻颗粒是否产生裂纹与水稻品种、颗粒含水率及其内部温度梯度和水分梯度关系密切。研究表明, 水稻颗粒内部的水分梯度是导致应力裂纹的主要原因, 而由温度梯度产生的热应力只有与吸湿应力联合作用时, 才会对裂纹的形成产生影响<sup>[2]</sup>。

自 80 年代初期以来, 国内就开始对干燥过程中降水速率、热风温度以及干燥工艺对水稻裂纹影响进行研究<sup>[3-5]</sup>; 90 年代以来, 对水稻干燥传热传质过程的理论研究进一步深入<sup>[4-6]</sup>。然而, 在水稻应力裂纹方面的研究, 大都局限于干燥过程, 所利用的力学模型也大多简化为弹性模型<sup>[5]</sup>。实际上, 水稻并非单纯的弹性体, 而是具有流变特性的粘弹性体, 干燥后谷粒因吸湿而产生裂纹比干燥过程中产生裂纹要严重得多, 据 Shama 报道, 水稻颗粒的裂纹大都发生在干燥后存放的 48 小时内<sup>[7]</sup>。因此, 在水稻吸湿过程内部传热传质研究的基础上, 通过建立更符合实际的水稻粘弹性力学模型, 分析水稻颗粒内部应力应变的分布规律, 对于水稻应力裂纹机理的研究有重要意义。

## 1 理论分析

### 1.1 热质传递的有限元分析

谷物吸湿过程是一个复杂的传热传质过程, 通常认为, 谷物内部温度的变化是温度梯度作用下的导热过程引起的, 而水分的变化则是水分梯度作用下的液态扩散过程引起的。在圆柱坐标系下, 谷粒单位内部的传热传质模型可表示为<sup>[8]</sup>:

$$\begin{cases} \frac{\partial M}{\partial t} = D \left[ \frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial M}{\partial r} + \frac{\partial^2 M}{\partial z^2} \right] \\ \rho C \frac{\partial T}{\partial t} = K \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + Q_{ifg} \frac{M}{\partial t} \end{cases} \quad (1)$$

其中  $M$  ——水分, dB;  $T$  ——温度, K;  $D$  ——水分扩散系数,  $m^2 \cdot s^{-1}$ ;  $K$  ——导热系数,  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ;  $\rho$  ——密度,  $kg \cdot m^{-3}$ ;  $C$  ——比热,  $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ;  $h_{fg}$  ——水分蒸发潜热,  $J \cdot kg^{-1} \cdot H_2O$ ;  $t$  ——时间, s;  $r$  ——径向坐标, m;  $z$  ——轴向坐标, m。

运用加权余数定理, 可得式(1)的余数函数:

$$\begin{aligned} (R_M) &= - \int_V [N]^T \left[ \frac{D}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial M}{\partial r} \right) + D \frac{\partial^2 M}{\partial z^2} - \frac{\partial M}{\partial t} \right] dV \\ (R_T) &= - \int_V [N]^T \left[ \frac{K}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + D \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q_{ifg} \frac{M}{\partial t} - \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \right] dV \end{aligned} \quad (2)$$

式中  $[N]^T$  为插值函数。

利用有限元方法, 将求解域离散为  $n$  个三角形单元,  $m$  个节点, 把谷粒内部水分分布离散为各瞬时节点的水分含量。根据变分原理, 对泛函求导, 建立各节点温度和水分离散方程, 联立求解, 就可得出谷粒内部各个节点的水分和温度值。

### 1.2 应力和应变的有限元分析

吸湿(干燥)过程中谷粒内部的水分变化会引起谷粒的膨胀或收缩, 由于谷粒内部存在水分梯度和

收稿日期: 1999-207-208

3 国家自然科学基金资助项目, 批准号, 59676013

刘 斌, 硕士研究生, 中国农业大学东区 209 信箱, 100083

温度梯度,因此谷粒内部将产生不均匀的膨胀或收缩,从而导致内部形成应力,当内应力超过谷粒的极限强度时,就会形成应力裂纹<sup>[9]</sup>。

水稻是一种具有粘弹性的生物物料,根据线型粘弹性应力-应变本构方程, $t$ 时刻水稻颗粒内部应力积分方程可表示为<sup>[10]</sup>:

$$\{R(r, H_z, t)\} = \int_0^t [V(r, H_z, t-S)] \cdot \int_{SS} \{E(r, H_z, S)\} v_i dS \quad (3)$$

式中  $R(r, H_z, t)$ ——总应力矢量,MPa;  $E(r, H_z, t)$ ——粘弹性应变矢量,总应变矢与热湿应变矢量的差值,män;  $V(r, H_z, t)$ ——线性粘弹性应力2应变本构矢量,MPa。

$[V(r, H_z, t)] =$

$$\begin{bmatrix} K + \frac{4}{3}G & K - \frac{2}{3}G & K - \frac{2}{3}G & 0 & 0 & 0 \\ K - \frac{2}{3}G & K + \frac{4}{3}G & K - \frac{2}{3}G & 0 & 0 & 0 \\ K - \frac{2}{3}G & K - \frac{2}{3}G & K + \frac{4}{3}G & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G \end{bmatrix}$$

其中  $K$ —— $K(r, H_z, t)$ , 体积松弛模量,MPa;  $G$ —— $G(r, H_z, t)$ , 剪切松弛模量,MPa。

由于吸湿(或干燥)过程中水稻的粘弹性力学特性将随着水分和温度的变化而发生改变,因此引入等效时间因子,就可通过等效时间描述水分和温度的影响<sup>[11]</sup>:

$$N = \frac{t}{A} \quad (4)$$

$$\frac{1}{A} = \frac{1}{A_M} + \frac{1}{A_T} \quad (5)$$

式中  $t$ ——实际时间,s;  $N$ ——等效时间,s;  $A$ ——总等效时间因子; $A_M$ ——水分等效因子; $A_T$ ——温度等效因子。

将式(4)代入式(3)得:

$$\{R(r, H_z, t)\} = \int_0^t [V(r, H_z, N-N)] \cdot \int_{SS} \{E(r, H_z, S)\} v_i dS \quad (6)$$

根据静虚功原理,在无内外载荷作用于水稻颗粒的情况下,有:

$$\int_D 2P \mathbf{k}_a \{R(r, H_z, t)\}^T \{E(r, H_z, t)\} r dr dz = 0 \quad (7)$$

通过有限单元方法离散求解域,结合有限元差分法,对式(7)进行简化,可得出应力应变本构关系的离散方程。只求得内部节点在任意 $t$ 时刻的位移,就可以根据应变和位移关系得出此时刻的应变,将应变代入式(7)就可求得水稻颗粒内部单元的应力值。

## 2 结果分析

根据水稻的外形和结构,将水稻颗粒单体假定为一个具有三层结构的椭球体。以水稻颗粒的长度方向作为长轴方向( $z$ 轴),并将其宽度与厚度假定为相等,作为短轴方向( $r$ 轴)。根据有限单元划分的一般原则,对复合椭球体的1ö4剖面进行网格划分,如图1所示:

在求解水稻吸湿过程中的传热传质和应力应变模型时,进行了以下假设:

1. 水稻颗粒为复合三层椭球体;
2. 水稻颗粒由稻米、稻糠和稻壳三部分组成;
3. 水稻颗粒为各向同性且连续。

实验条件:

选择北京地区当年产的新鲜水稻颗粒在相对湿度为46%,温度21 条件下放置数小时达到平衡后,置于相对湿度为95%,温度为30 环境下进行吸湿。实验所需环境条件采用不同的饱和盐溶液来获得。

### 2.1 水分

在吸湿(干燥)过程中物料温度变化较快,较短时间内就达到平衡温度,因此可以认为质传递过程是在恒温状态下进行的。

吸湿率(单位时间内干基水分变化量)是衡量吸湿过程中水稻颗粒水分变化快慢的指标,也是影响水稻应力裂纹的重要因素,图2为水稻在环境条件下(相对湿度46%,温度21 )达到平衡后,置于相

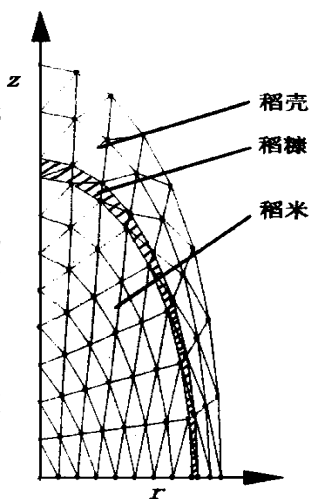


图1 单元网格划分  
Fig.1 Finite element grid

对湿度 95% , 温度为 30 条件下吸湿时, 水稻颗粒吸湿率的变化规律。可以看出: 随着水稻含水率的增加, 由于颗粒内外水分蒸汽压差逐渐减小, 吸湿率也相应减小。通过模拟结果与实验结果对比可以看出, 模拟结果与试验结果非常接近。

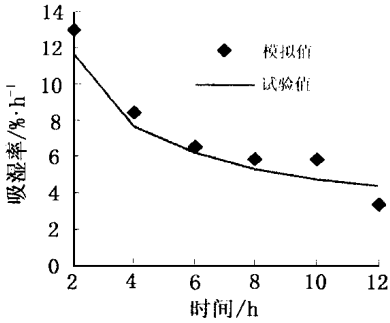


图 2 水稻吸湿率变化规律

Fig 2 Moisture absorption rates

图 3 为水稻在相对湿度 46% , 温度 21 的环境条件下达到平衡后, 置于相对湿度 95% , 温度为 30 环境条件下吸湿时, 不同时刻水稻颗粒内部的水分分布。可以看出, 吸湿开始时, 由于水稻颗粒内部水分低于周围环境平衡水分, 水稻颗粒表层(稻壳)与环境存在较大的水分梯度, 吸湿速度最快, 短时间内就达到平衡水分, 并由中间层(稻糠)逐渐向颗粒内部(稻米)扩散; 随着水分向中心扩散, 内层稻米逐渐增加。

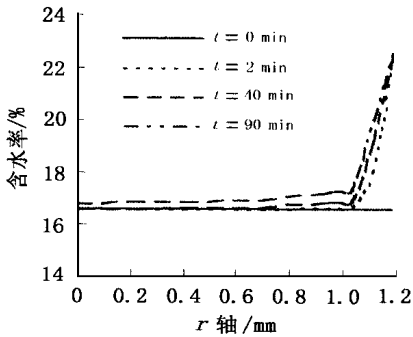


图 3 水稻颗粒内部的水分分布

Fig 3 Moisture distributions in the rice grain

## 2.2 应力应变

图 4 为水稻在初始环境相对湿度 46% , 温度 21 的条件下达到平衡后, 置于环境相对湿度 95% , 温度为 30 条件下吸湿时, 稻壳、稻糠、稻米中心的应变随时间的变化规律。可以看出, 稻壳表层由于吸湿开始后很快达到平衡水分, 迅速吸湿膨胀使得表层应变增加很快, 随后缓慢增加; 由于水稻具有粘弹

性, 稻壳表层应变所产生的应力对稻米中心应变影响有滞后效果, 即应变的蠕变性, 使得稻米中心应变初始时增加较慢, 随后呈现较稳定的增长趋势; 稻糠内应变变化介于稻米中心应变和稻壳表层应变之间。吸湿过程开始时, 稻米中心的应变明显小于稻壳表层, 因此稻米中心有受拉的趋势, 由于稻壳表层为自由边界, 不受外力作用, 根据力平衡原理, 水稻颗粒的表层则会有受压的趋势; 当水稻含水率达到一定值时, 水稻颗粒中心应变逐渐超过表层, 表层的应力状态也相应会发生变化。

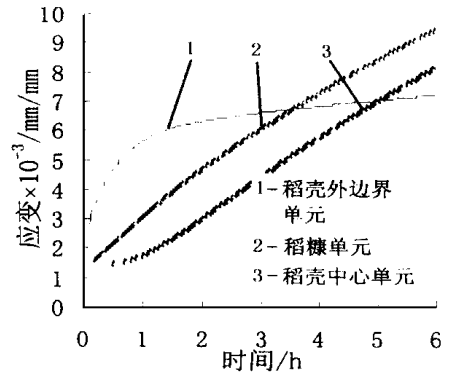


图 4 水稻颗粒应变曲线

Fig 4 Strain curves of the rice grain

图 5 为水稻在初始环境相对湿度为 46% , 温度 21 条件下达到平衡后, 置于环境相对湿度为 95% , 温度 30 条件下吸湿时, 水稻颗粒内部轴向应力分布随时间的变化规律。从图 5 可以看出, 水稻吸湿时内部受拉应力, 表层受压应力, 颗粒从稻米中心到稻壳表层, 应力逐渐由拉向压转变。随时间的增加, 水稻颗粒内部拉应力和外部压应力逐渐减小。

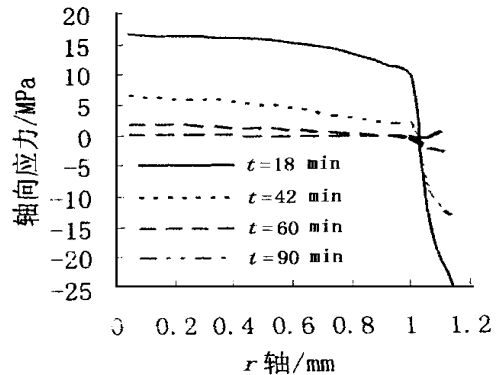


图 5 水稻颗粒内部应力分布

Fig 5 Stress distributions in the rice grain

图 6 为水稻在初始环境相对湿度为 46% , 温度 21 条件下达到平衡后, 置于环境相对湿度为 95% , 温度 30 条件下吸湿时, 水稻颗粒中心轴向

应力随时间的变化规律。随水稻颗粒吸湿时间的增加,中心轴向应力逐渐增加,吸湿到 15 min 后,其中心轴向应力达到最大值,随后中心轴向应力逐渐减小。从吸湿应力裂纹增加率的对照试验来看,吸湿过程开始的前 30 min 应力裂纹增加率较大,为 20% $\dot{\sigma}$  h,在此之后应力裂纹增加率逐渐减小,当吸湿过程进行 240 min 后水稻颗粒应力裂纹增加率变化非常缓慢,吸湿应力的模拟结果基本上反映了水稻颗粒吸湿过程中应力裂纹增加率的变化规律。

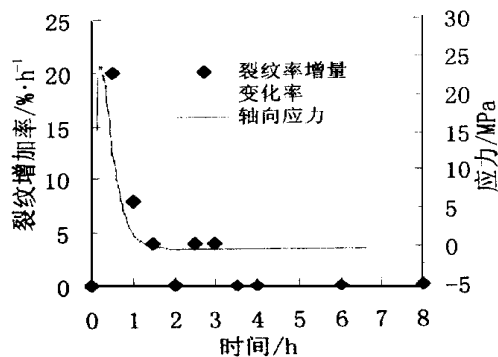


图 6 水稻颗粒中心轴向应力

Fig. 6 Radial stress in the central part of the rice grain

### 3 结 论

1) 通过对水稻颗粒在吸湿环境中传热传质的有限元分析发现: 吸湿过程中, 水稻的升温过程要比水分的增加过程快得多, 水稻颗粒表层会很快达到平衡水分, 但内部水分的增加非常缓慢; 水稻吸湿率随吸湿时间的增加逐渐减小, 吸湿初期其吸湿率最大, 应力裂纹的可能性也较大。

2) 通过用粘弹性力学模型对水稻颗粒吸湿应力-应变的数学模拟发现, 在吸湿过程中, 水稻颗粒内部受拉应力, 外部受压应力; 水稻颗粒中心首先形成应力裂纹的可能性较大。在吸湿环境条件下, 水稻颗粒中心轴向应力在较短的时间内达到峰值, 此时水稻裂纹的可能性最大。

3) 水稻颗粒在吸湿过程中比在干燥过程中更易出现应力裂纹。因此, 选择合适的干燥贮存工艺, 减少谷物干燥后重新吸湿的可能性, 对提高水稻收获后加工品质有重要意义。

#### [参 考 文 献]

- [1] Indudhra Swamy Y M, Bhattacharya K R. Breakage of rice during milling, effect of kernel defects and grain dimensions J. Food Proc Engng, 1980, (3); 29~ 42
- [2] Kunze O R, Hall C W. Moisture absorption characteristics of brown rice Trans of the A S A E, 1967, 10(4); 448~ 450, 453
- [3] 曹崇文 农产品干燥机理、工艺与技术 北京: 中国农业大学出版社, 1998
- [4] 李业波 谷物间歇干燥工艺的模拟和实验研究: [学位论文] 北京: 北京农业工程大学, 1993
- [5] 贾灿纯 谷粒内部传热传质及筒仓内谷物温度场的研究: [学位论文] 北京: 北京农业工程大学, 1995
- [6] 朱文学 干燥过程中谷物应力裂纹和发芽率的模拟与实验研究: [学位论文] 北京: 中国农业大学, 1997
- [7] Shama A D, Kunze O R. Post-drying fissure developments in rough rice Trans of the A S A E, 1982, 25 (2): 465~ 468, 474
- [8] Crank, J. The mathematics of diffusion New York: Oxford University Press, 1964
- [9] Kunze O R. Fissuring of the rice grain after heated air drying Trans of the A S A E, 1979, 22(5); 1197 ~ 1201, 1207
- [10] Christensen, R M. Theory of viscoelasticity: An introduction New York: Academic Press, Inc 1982
- [11] Hammerle, J R. Theoretical analysis of failure in a viscoelastic slab subjected to temperature and moisture gradients Trans of the A S A E, 1972, 15 (5): 960~ 965

## Study on Mass Transfer and Cracking Mechanism in a Rice Grain During Moisture Absorption

Liu Bin

(China Agricultural University, Beijing 100083)

Li Yebo

(Feed Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081)

Mao Zhihua

(China Agricultural University, Beijing 100083)

**Abstract:** The shape of the rice grain was assumed as an ellipsoid. In a cylindrical coordinate system, finite element simulations of the transient moisture distribution and stresses distribution in the rice grain during the moisture absorption were carried out. The results indicated that, during the moisture absorption, the outer portion of the grain was equilibrated rapidly, but the moisture content in the central portion increased slowly. The moisture absorption induced compressive stresses in the outer portion and tensile stresses in the inner portion of the grain. The fissuring of rice is more likely to be initiated at the center of the grain. The similar results were obtained in the experiments.

**Key words:** rice grain; moisture absorption; stress fissure; finite element