

干燥和储藏过程中稻谷颗粒内部应力的有限元法分析^①

张 强^② 傅志一 华云龙 曹崇文
(中国农业大学工程基础科学部) (中国农业大学机械工程学院)

摘 要 以粘弹性材料的积分松弛型本构关系为基础,建立了粘弹性体的有限元分析模型,编制了热-湿应力计算的轴对称有限元程序。应用该程序研究了长粒稻谷在干燥和储藏过程中内部应力分布及其变化规律,并与实验结果进行了比较,分析了谷粒在储藏阶段出现裂纹的直接原因。

关键词 稻谷;干燥;有限元法;应力

分类号 S 226.600.1; O 343

Stress Analysis of Rough Rice Kernel in Drying and Storage With Finite Element Method

Zhang Qiang Fu Zhiyi Hua Yunlong Cao Chongwen
(College of Applied Engineering Sciences, CAU) (College of Machinery Engineering, CAU)

Abstract Based on the integral relaxation constitutive relation of viscoelastic material, the analysis model of finite element was suggested. The axisymmetric thermo-hydro program of finite element was developed to study the stress of rough rice kernel in drying and storage. Compared with the experimental result, the reasons of kernel cracks in storage were analysed.

Key words rough rice; drying; finite element method; stress

人们很早就发现玉米、稻米等谷物烘干后可能出现裂纹,从而降低品质。这些裂纹产生的原因是干燥过程中颗粒内部的热应力和湿应力太大,特别是湿应力太大。从70年代以来,国内外陆续在探求谷物颗粒内部的热-湿应力分布。由于谷物材料是粘弹性的,人们在研究这个问题时需要考虑其粘弹性性质。近年来,国内外都在试探应用粘弹性有限元法研究这一问题^[1,2]。笔者研制出适用于谷粒热-湿应力计算的轴对称粘弹性有限元程序,并应用所研制的程序研究长粒稻谷在干燥过程中的湿应力分布。

1 粘弹性松弛型增量本构方程

取所研究的轴对称形状物体的对称轴为柱坐标的 z 轴,轴对称情况下的应变和应力分量可以用以下列阵表示:

$$\{\epsilon\} = [\epsilon_r, \epsilon_\theta, \epsilon_z, \nu_{rz}]^T, \quad \{\sigma\} = [\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z, \tau_{rz}]^T$$

粘弹性和弹性力学问题的区别仅在于其本构关系不同。从已有的资料来看,谷物的本构关

收稿日期:1998-10-06

①国家自然科学基金资助项目

②张 强,北京清华东路17号 中国农业大学(东校区)213信箱,100083

系一般适于用 Maxwell 模型来表示。各向同性粘弹性松弛型本构关系需要由 2 个松弛模量表示,例如剪切松弛模量和体积松弛模量。对于谷物材料,由于实验条件困难,通常仅测定其拉压松弛模量,同时假定泊松比 ν 为常数。对于由 n 个 Maxwell 元件及 1 个弹簧并联而成的广义 Maxwell 模型,其松弛模量可以表示为

$$E(t) = E_0 + \sum_{i=1}^n E_i \exp(-t/\tau_i)$$

其中: t 为时间; τ_i 为各个 Maxwell 元件的松弛时间。

设 θ 为温度, w 为单位体积含水率(干基), α 和 β 分别为热膨胀系数和湿膨胀因数。当温度和湿度有增量 $\Delta\theta$ 和 Δw 时,有

$$\{\epsilon_\theta\} = \alpha \Delta\theta [1 \quad 1 \quad 1 \quad 0]^T, \quad \{\epsilon_w\} = \beta \Delta w [1 \quad 1 \quad 1 \quad 0]^T$$

这里在应力的计算中不考虑温度变化的影响,对于 Δw 的分布和变化,由另一温度湿度场分析的有限元程序计算得到,在这里作为已知量输入。

考虑了热、湿应变的粘弹性积分松弛型本构方程^[3]可以表示为

$$\{\sigma\} = F \int_{-\infty}^t E(t-\tau) \frac{\partial \{\epsilon_{ec}(\tau)\}}{\partial \tau} d\tau \quad (1)$$

其中

$$F = \frac{1}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix}$$

$$\{\epsilon_{ec}\} = \{\epsilon\} - \{\epsilon_\theta\} - \{\epsilon_w\}$$

粘弹性体内的位移、应变和应力是随时间变化的,在烘干过程中, $\Delta\theta$ 和 Δw 也随时间变化;因此对于时间过程,要采用增量计算。首先将时间离散成若干个时刻,然后在每个时间步长内,应用有限元法计算物体内的位移、应变和应力的增量。当时间步长取得足够小时, t_k 时刻的应力由式(1)可以写为

$$\{\sigma\}_k = F \sum_{j=0}^{k-1} E(t_k - t_j) \{\Delta\epsilon_{ec}\}_j$$

其中 $\{\Delta\epsilon_{ec}\}_j$ 为从 t_j 到 t_{j+1} 期间 $\{\epsilon_{ec}\}$ 的增量。在 t_k 到 t_{k+1} 期间的应力增量为

$$\begin{aligned} \{\Delta\sigma\}_{k+1} &= \{\sigma\}_{k+1} - \{\sigma\}_k = \\ & F \sum_{j=0}^k E(t_{k+1} - t_j) \{\Delta\epsilon_{ec}\}_j - F \sum_{j=0}^{k-1} E(t_k - t_j) \{\Delta\epsilon_{ec}\}_j = \\ & FE(\Delta t_{k+1}) \{\Delta\epsilon_{ec}\}_k + F \sum_{j=0}^{k-1} [E(t_{k+1} - t_j) - E(t_k - t_j)] \{\Delta\epsilon_{ec}\}_j \end{aligned} \quad (2)$$

记

$$D \equiv E(\Delta t_{k+1}) F$$

$$\{\Delta\sigma_c\}_{k+1} \equiv D \{\Delta\epsilon_{ec}\}_k$$

$$\{\Delta\sigma_c\}_{k+1} = F \sum_{j=0}^{k-1} [E(t_{k+1} - t_j) - E(t_k - t_j)] \{\Delta\epsilon_{ec}\}_j$$

则式(2)可以写成

$$\{\Delta\sigma\}_{k+1} = \{\Delta\sigma_e\}_{k+1} + \{\Delta\sigma_c\}_{k+1} \tag{3}$$

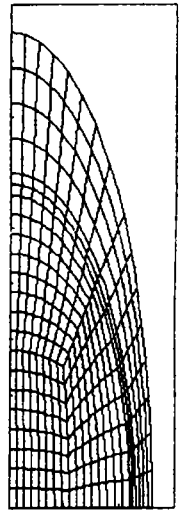
式(2)或式(3)即为由 t_k 到 t_{k+1} 这段时间内粘弹性增量形式的本构方程。若时间步长相同, 等式右边第 1 项仅与 t_k 时刻的应变有关, 而等式右边第 2 项涉及到直至 t_{k-1} 的所有的时间步长的有关应变增量; 因此, 为了计算第 2 项, 必须记录每一时间步所对应的应变增量, 从而要占用大量内存和计算时间, 限制了解题范围。

若材料的松弛时间是常数, 则可以导出有关的递推公式, 从而克服这一困难^[4]。对于谷物材料, 松弛时间是 θ 和 w 的函数, 而 θ 和 w 又是变化的, 因而松弛时间不是常数; 所以在计算时必须记下每一时间的有关应变值。

根据上述粘弹性增量形式本构方程, 应用虚功原理, 可以推出增量形式的有限元公式^[4]。依据这些公式编制了有限元计算程序, 并用某些解析解对程序进行了检查。验证算例之一是粘弹性厚壁筒受均布内压作用, 其数值计算结果与解析解符合得很好。验证算例之二是均匀粘弹性实心球, 在环境湿度有一阶跃变化下的应力。该问题的有限元结果与解析解也很一致^[4]。

2 稻谷干燥-储藏过程中颗粒内的应力分析

作为上述粘弹性热-湿应力的有限元程序应用的一个例子, 笔者对不同干燥温度下的长粒稻谷的内部应力进行了计算。长粒稻谷的几何形状可简化为 3 层椭球体。第 1 层为稻壳, 短轴方向厚度是 0.15 mm, 第 2 层为糠皮, 短轴方向厚度是 0.05 mm, 第 3 层为胚乳, 短轴长度是 1.1 mm。由于对称性, 可取其 1/4 进行分析, 数值计算网格剖分图如图 1 所示, 采用 925 个节点, 288 个轴对称 8 节点单元。当进行粘弹性应力计算时, 不考虑稻壳和糠皮, 即只研究胚乳的变形, 因为稻壳实际上并不与胚乳一起变形, 糠皮影响也很小。



根据山口信吉等人的测定^[6], 稻米胚乳是各向同性的, 其拉压松弛模量可以表示为

$$E(t) = E_1 \exp(-t/\tau_1) + E_2 \exp(-t/\tau_2) \tag{4}$$

其中

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= 0.3 \times 10^5 / (wT), \quad E_2 = 0.7 \times 10^5 / (wT) \\ \tau_1 &= 1.81 \times 10^5 \exp(-A), \quad \tau_2 = 4.32 \times 10^6 \exp(-A) \\ A &= 0.02T + 11w \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

式中: T 为热力学温度; w 为干基含水率(用小数表示)。由式(4)和(5)可见, 胚乳材料的松弛时间与 T 和 w 有关, 并为热-湿流变简单。热-湿平移因子为 $\alpha = 2.278 \exp(-A)$, 材料的泊松比 $\nu = 0.25$, 湿膨胀因数^[7]为

图 1 有限元剖分网格

$$\beta_{\text{湿}} = \frac{0.3533 + 0.001967(T - 273)}{\{1 + [1.06 + 0.0059(T - 273)]w\}^{2/3}}$$

为了便于与实验结果对照, 计算时干燥参数的选取主要参考文献[6]。

在 3 种温度 (37.8, 48.9 和 60 °C) 条件下干燥, 谷粒初始干基含水率分别为 18.5%, 18.5% 和 20.0%, 材料的平衡含水率(干基)分别为 8.5%, 6.5% 和 6.0%。

在上述干燥条件下, 分别干燥 1, 2, 4 和 8 h, 然后将谷物置于储藏条件下。储藏环境的计算

中温度为 23 ℃,相对湿度为 50%。储藏时气流的流速为“0”,在水分迁移的计算中,运用第 3 类边界条件更为合适。

图 2 为 $\theta=48.9\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下干燥 12 h 过程中谷粒内沿短轴不同位置的 σ_z 的变化曲线。可以看出,在初始阶段(约 20 min),胚乳表面拉应力达到一最大值,同时,中心部分的压应力也达到其最大值。大约在 70 min 后,中心部分的应力由压变为拉,而表面处由拉变为压,并分别达到其峰值。

在 37.8,48.9 和 60 ℃ 条件下干燥的应力变化情况与图 2 类似,但应力数值随温度升高明显增大。图 3 示出在这 3 种温度条件下干燥,胚乳表面处的 σ_z 随时间变化的情况。

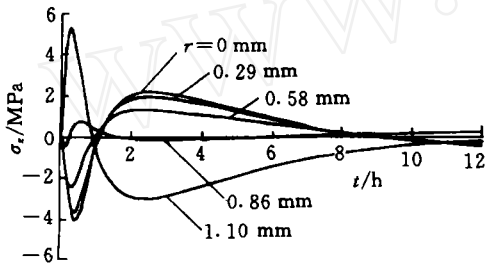


图 2 沿短轴 r 不同处 z 向应力 σ_z 随干燥时间 t 的变化

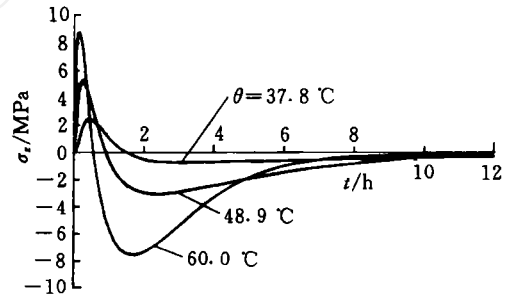
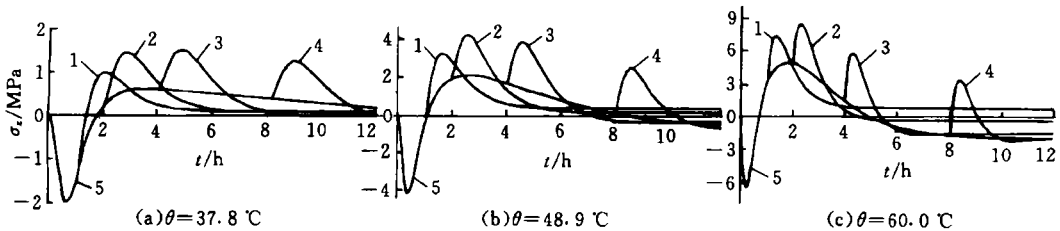


图 3 温度 θ 不同时沿短轴胚乳表面 z 向应力 σ_z 随干燥时间 t 的变化

干燥-储藏过程中,谷粒中心处轴向应力 σ_z 随时间变化情况由图 4 给出。由干燥转为储藏,边界条件发生了变化, σ_z 曲线也有 1 次波动,并出现 1 个峰值。此峰值应力出现的时间和大小都与干燥温度有关。



干燥时间:1-1 h;2-2 h;3-4 h;4-8 h;5-12 h

图 4 干燥温度对干燥-储藏过程中应力变化的影响

3 分析与讨论

Kunze 曾做过有关实验研究^[6]。下面将笔者用有限元法计算得到的 σ_z 与 Kunze 的实验结果作一分析比较。

1)由计算结果可知,在干燥初始阶段胚乳表面有正的 σ_z 极值。如果此应力引起裂纹,则裂纹应首先出现在表面;但实验结果都是干燥结束时谷粒基本上完好。这表明计算给出的表面 σ_z 偏大,这可能是干燥阶段温度场计算时,谷粒表面初始时刻的含水率 w 有一阶跃变化,使表面的 w 梯度很大,因而有很大的表层拉应力。如果用渐变代替这种阶跃变化可能更合理。另外,干燥初始表面温度升高会引起表层压应力,计算中未考虑这种温度应力,也使初始表层拉应力

偏大。

2) 储藏期间谷粒中心有一 σ_z 拉应力的峰值。储藏期间谷粒裂纹应当与这一应力峰值有关,而且应首先出现在谷粒中心。从计算结果来看:当 $\theta=37.8^\circ\text{C}$, 中心的 $\sigma_z < 1.5\text{ MPa}$; 当 $\theta=48.9^\circ\text{C}$ 时, 该应力峰值在 $2.6\sim 4.2\text{ MPa}$ 之间; 当 $\theta=60^\circ\text{C}$ 时, 该应力峰值在 $3.5\sim 8.2\text{ MPa}$ 之间。对照实验结果, 有裂纹谷粒数与上述 σ_z 的峰值间存在明显的关系, 特别是当 $\theta=48.9^\circ\text{C}$ 时, 干燥 2 h 和 4 h 的应力峰值最大, 实验得到的有裂纹的颗粒数也最多。

3) 谷粒内部总是存在着缺陷或微裂纹。根据断裂力学理论, 随着应力增大, 这些缺陷或微裂纹处的应力强度因子将达到其临界值, 这时裂纹就会快速扩大, 从而形成横贯整个谷粒的裂纹。对照实验与计算结果, 估计谷粒应力 σ_z 达到 2.5 MPa 左右时, 谷粒裂纹即快速扩展。这种估计能够解释大多数实验结果, 但是从图 4(c) 可见, 干燥 2 h 时, 中心部分应力即已达 4.8 MPa , 却没有发现有裂纹的谷粒, 这种现象无法解释。显然稻谷裂纹产生的原因是很复杂的。稻谷胚乳是粘弹性材料, 其断裂问题涉及到多种因素, 还有待进一步研究。

4 结束语

应用粘弹性有限元法可以计算并分析出稻谷干燥和储藏过程中谷粒内部应力的分布及其变化规律。由干燥到储藏, 外界条件的变化引起谷粒中心部分出现大的轴向拉应力峰值, 这一应力峰值是谷粒在储藏阶段出现裂纹的直接原因。裂纹应首先出现在稻谷颗粒中心。应当进一步研究谷物材料粘弹性性质对裂纹产生的影响。

参 考 文 献

- 1 Irudayaraj J, Haghighi K. Stress analysis of viscoelastic materials during drying: 1. Theory and finite element formulation. *Drying Technology*, 1993, 11(5): 901~927
- 2 贾灿纯, 曹崇文. 干燥过程中玉米颗粒内部应力的有限元分析. *农业机械学报*, 1996, 27(1): 57~62
- 3 杨挺青. 粘弹性力学. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990. 33
- 4 张 强. 轴对称粘弹性体热-湿应力的有限元法研究; [学位论文]. 北京: 中国农业大学, 1998
- 5 Yamaguchi S, Kawasaki H, Yamamoto T, et al. Calculation of stresses in brown rice kernel during drying process and moisture adsorption processes. In: *Drying '96 - Proceedings of the 10th International Drying Symposium (IDS'96)*. Krakow: [s. n.], 1996. 957~964
- 6 Kunze O R, Prasad S. Grain fissuring potentials in harvesting and drying of rice. *Trans of the ASAE*, 1978, 21(2): 361~366