

文章编号:1671-5497(2006)Suppl.-0042-04

玉米干燥过程中颗粒内部应力分析与预测

刘雪强¹,陈晓光¹,吴文福¹,王永利²,王治刚¹

(1. 吉林大学 生物与农业工程学院,长春 130022; 2. 吉林大学 机械科学与工程学院,长春 130022)

摘要:通过对玉米干燥过程中应力裂纹产生机理的研究,分析了玉米在干燥过程中的热应力和湿应力,系统地分析了玉米颗粒内部应力的产生及分布状态,应用广义 Maxwell 模型建立了干燥过程中玉米颗粒内部应力模型;依据干燥应力模型,模拟了玉米颗粒内部各位置的径向应力和切向应力。结果表明:温度梯度和湿度梯度对内部应力影响显著,最大径向应力主要集中在角质胚乳中,最大切向应力主要集中在角质胚乳表面。

关键词:农业工程;应力裂纹;热应力;湿应力;广义 Maxwell 模型

中图分类号:S226.600.1 **文献标识码:**A

Stress analysis and prediction of maize kernel during drying

Liu Xue-qiang¹, Chen Xiao-guang¹, Wu Wen-fu¹, Wang Yong-li², Wang Zhi-gang¹

(1. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: In drying process of maize, the mechanism of crack generation was investigated, the distribution of thermo- and hydro-stresses inside maize kernel were studied. Employing the general Maxwell model a stress model was proposed, which was then used to simulate the distributions of principal stress and shear stress inside the maize kernel. Simulation results show that both temperature gradient and moisture gradient significantly influence the magnitude and distribution of the stresses. Either principal stress or shear stress which exceeds the yield stress will result in cracking. Results also show that the maximal principal stress occurs inside the cutin endosperm, while the maximal shear stress occurs on the surface of the cutin endosperm.

Key words: agricultural engineering; stress cracks; thermo-stress; hydro-stress; Maxwell model

0 引言

影响玉米干燥后品质的一个重要指标是裂纹率,而裂纹主要是由于干燥应力诱导而产生的。干燥、缓苏及冷却过程中由于籽粒内部存在温度梯度和水分梯度,形成热应力和湿应力,两种应力

总称为干燥应力。当干燥应力超过籽粒胚乳的破坏强度极限时,就会产生应力裂纹。干燥后带有应力裂纹的玉米机械强度降低,在加工、运输、储藏过程中若受到冲击,应力裂纹极易扩展,导致破碎率增加,等级降低。如果裂纹扩展到种皮,裸露的淀粉吸湿性强,这将使玉米籽粒更易受到病虫和霉菌的侵袭,从而缩短了存储期。另外,应力裂

收稿日期:2005-09-21.

基金项目:国家农业科技成果转化资金项目(03EFN212200075);吉林省科技发展计划基础项目(20030526).

作者简介:刘雪强(1976-),男,博士研究生. 研究方向:生物技术装备与控制. E-mail: xueqiang@jlu.edu.cn

通讯联系人:吴文福(1965-),男,教授. 研究方向:自动检测与品质分析技术. E-mail: wwf@email.jlu.edu.cn

纹损伤了种子的内部结构,使种子的发芽率和活力降低。

玉米干燥所产生的裂纹初期是从胚的反面观察到的从脐部到冠部的单一裂纹,随干燥工艺的进行,单一裂纹发展成龟裂(多于3条裂纹)^[1]。从微观看,由于玉米籽粒内部各种无序因素的影响,玉米应力裂纹是沿着不规则的曲折路径扩展的,所形成的断口常常是粗糙不平的,断裂面的截面(裂纹线)也是曲折的。

作者对玉米干燥过程颗粒内部应力进行了力学分析和预测,对于改进干燥工艺和过程控制,提高玉米的干燥品质,减少玉米干燥损失具有重要意义。

1 应力裂纹生成机理

干燥应力中的热应力是由籽粒内部的温度梯度诱导,湿应力是由籽粒内部的水分梯度诱导产生。Ekstrom研究了玉米的应力裂纹后指出,玉米的应力裂纹是由温度梯度和水分梯度共同作用的结果,并且水分梯度的作用更大些。籽粒干燥时产生的应力状态是内压外拉,吸湿时的应力状态是内拉外压,当内部的拉应力超过子粒的抗拉极限时即产生应力裂纹,所以应力裂纹首先发生在籽粒内部^[2]。

Thompson等^[3]通过研究玉米干燥过程中产生裂纹的原因指出,玉米干燥裂纹的生成与高温快速干燥密切相关。高温快速干燥引起玉米力学特性的较大变化,形成较大的干燥应力,造成大的应力裂纹。玉米籽粒内部干燥应力开始使玉米从脐部到冠部产生单一裂纹,随着应力增加,单一裂纹发展成复合裂纹,直至在玉米颗粒表面形成龟裂面。Gustafson等^[4]通过对受热籽粒的有限元分析得出,最大拉应力位置和观察到的裂纹位置密切相关。Balastreie等^[5]通过扫描电镜观察到,当裂纹接近籽粒表面时,其宽度变窄。由此认为,应力裂纹在籽粒的中心形成,然后沿淀粉颗粒边界向外围扩展。Song等^[6]采用核磁共振(MRI)技术研究分析发现,玉米水分沿胚芽的颗粒层和糊粉层向外传递,接近胚的顶端水分迅速减少,在该区域产生较大的湿度梯度,裂纹也发生在该区域,由此推断,温度梯度和湿度梯度所产生的干燥应力,使玉米籽粒内部淀粉颗粒产生收缩和膨胀,最终在粉质胚乳中产生裂纹,然后沿淀粉颗粒边

界扩展。应力裂纹一般只在籽粒内部扩展,当应力裂纹扩展到种皮时,应力很难使坚韧的种皮裂开。Gunasekaraan等^[7]对4个不同品种玉米干燥裂纹的测量发现,应力裂纹的最大宽度分布在35~90 mm,4种玉米的最大平均裂纹宽度为58 mm,应力裂纹宽度的不同可能是由于籽粒单个差别造成的。

2 干燥应力模型

籽粒的力学特性不同所建立的应力模型也不同。目前主要有弹性应力模型和黏弹性应力模型两种^[8]。假设籽粒为弹性体与实际情况差别很大,而认为籽粒是黏弹性体与籽粒实际的力学特性较为接近。

黏弹性体的力学特性不仅与加载时间有关,而且还依赖于玉米的温度和水分,即同时为时间、温度及水分的函数^[9]。因此,定义了无量纲时间-温度转换因子 α_T 及时间-水分转换因子 α_M :

$$\alpha_T = t/\xi_T \quad \alpha_M = t/\xi_M \quad (1)$$

式中:t为时间,s; ξ_T 为温度折算时间,s; ξ_M 为水分折算时间,s。

进一步,将总的转换因子 α 定义为:

$$\alpha = \alpha_T \alpha_M = t/\xi \quad (2)$$

式中: ξ 为总的折算时间,s。

根据黏弹性力学理论和黏弹性广义 Maxwell 模型,引入总折算时间 ξ ,基准温度、基准水分下黏弹性积分蠕变型本构方程为:

$$S_{ij}(r,t) = \int_0^\xi G_1(t-t') \frac{\partial e_{ij}(r,t')}{\partial t'} dt' \quad (3)$$

$$\sigma(r,t) = \int_0^\xi 3K(\xi-\xi') \frac{\partial}{\partial \xi} [\varepsilon(r,\xi) -$$

$$3\alpha_0 \Delta T(r,\xi') - 3\beta_0 \Delta M(r,\xi')] d\xi' \quad (4)$$

式中: α_0 为线热膨胀系数; β_0 为线湿膨胀系数; K 为材料体积模量; G 为松弛模量; ΔT 为温度变化值; ΔM 为水分变化值; $S_{ij}(r,t)$ 为偏应力; $\sigma(r,t)$ 为正应力; e_{ij} 为偏应变; r 为颗粒表面到球心的距离。

对式(3)和式(4)分别进行拉普拉斯变换和拉普拉斯逆变换,并将折算时间变成物理时间,则

$$S_{rr}(r,t) = \frac{12}{r^3} \int_0^t \int_0^t R(\xi-\xi') \frac{\partial^2}{\partial t' \partial r} [3\alpha_0 \Delta T(r,t') + 3\beta_0 \Delta M(r,t')] dt' dr \quad (5)$$

式中: R 为松弛函数。

根据球对称问题的应力平衡方程,针对Maxwell固体,可得到:

$$\begin{aligned}\sigma_{rr}(r,t) = & \sum_{i=1}^n 4E_i \int_0^R \frac{\exp(-t/\tau_i)}{\rho^4} \\ & \int_0^t \exp \frac{t'}{\tau_i} \int_0^R r^3 \frac{\partial^2}{\partial t' \partial r} [3\alpha_0 \Delta T(r,t') + \\ & 3\beta_0 \Delta M(r,t')] dt' dr d\rho\end{aligned}\quad (6)$$

式中: E 为材料弹性模量; τ 为松弛时间。

同时可得到切向应力:

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{r}{2} \frac{\partial}{\partial r} \sigma_{rr}(r,t) + \sigma_{rr}(r,t) \quad (7)$$

3 干燥应力预测

事实上,玉米是不规则颗粒,但为便于进行干燥过程中玉米颗粒内部应力变化的数值模拟,根据玉米形状特性,球对称方程可简化为二维方程,将三维问题简化为二维方程求解,故作如下假设:玉米颗粒视为平面上多个圆片的叠加,且各向同性。

弹性模量 $E(t)$ 与玉米颗粒的干燥时间及温度和水分的函数关系用下式表示^[2]:

$$E(t) = E_0 + \sum_{i=1}^n E_i \exp\left(\frac{-\xi}{\tau_i}\right) \quad (8)$$

对于玉米来说,其温度转换因子 α_T 及水分转换因子 α_M 存在如下关系^[2]:

$$\alpha_T(T) = \exp[-0.02 \times (T - T_0) - 6.67 \times 10^{-4} (T - T_0)^2] \quad (9)$$

$$\alpha_M(T) = \exp[-170(M - M_0)] \quad (10)$$

式中: $T_0 = 20^\circ\text{C}$; $M_0 = 0.14(\text{kg/kg})$, 分别为参考温度和水分。

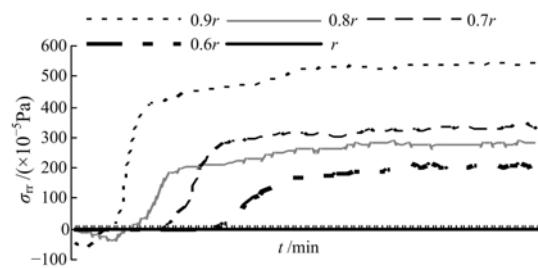
玉米的两个线性膨胀系数分别为:

$$\alpha_0 = \frac{1}{3} [0.0252 + 0.000515M/(1+M)] \quad (11)$$

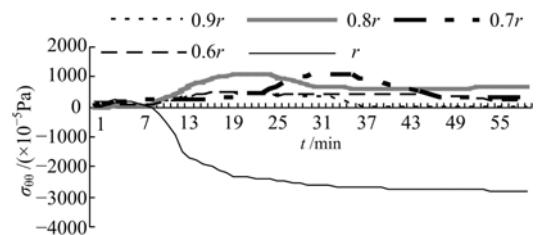
$$\beta_0 = 20.2 + 0.493(T - 35) \quad (12)$$

根据式(6)–(12)进行应力计算,模拟玉米在干燥、缓苏和冷却过程中颗粒内部应力变化,模拟结果如图1,图2所示。图中纵坐标正值代表压应力,负值代表拉应力。

图1(a)表示恒定干燥条件下(热风温 100°C)玉米颗粒内部径向应力分布,可以看出,随着干燥过程的进行,颗粒表面的径向应力为0,而颗粒内部受力为压应力,逐渐变大,在距表面为



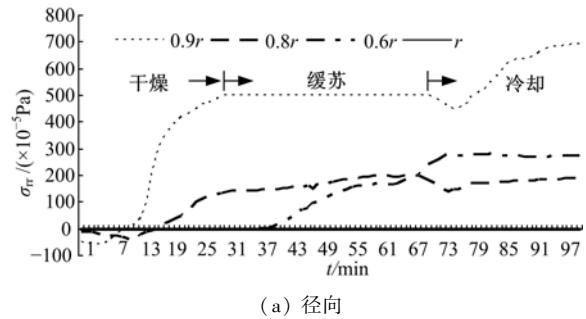
(a) 径向



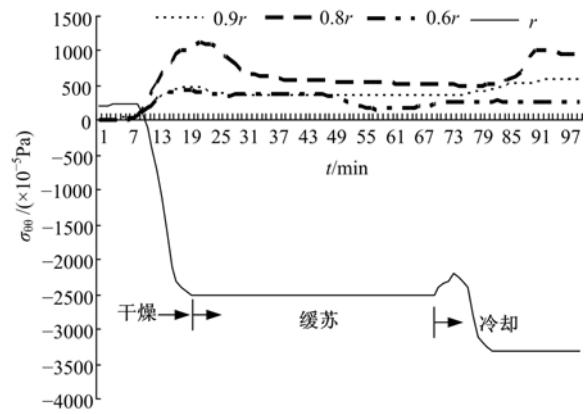
(b) 切向

图1 玉米颗粒内部应力分布

Fig.1 Distribution of the stresses in a maize kernel



(a) 径向



(b) 切向

图2 热风温 100°C 时干燥、缓苏和 5.2°C 冷却时玉米颗粒内部应力分布

Fig.2 Distribution of the stresses during drying, tempering and cooling of 5.2°C in a maize kernel with the temperature of drying air at 100°C

0.9r 处产生最大径向应力。图 1(b)表明,随着干燥过程的进行,颗粒表面和内部的切向应力增加,但表面切向应力为拉应力,内部则受压应力。图 2 表示热风温 100 ℃时干燥、缓苏和 5.2 ℃冷却时玉米颗粒内部的应力分布。从图 2(a)可以看出,干燥过程中颗粒内部最大径向应力急剧增大,而缓苏阶段所受应力不变,到冷却阶段时,应力又急剧增大,到一定值后略微变化,这是由于在干燥和冷却阶段温度梯度和水分梯度值逐渐增大的缘故。同样,图 2(b)所示的切向应力也呈现相应状态。

模拟结果表明,温度梯度和湿度梯度对玉米内部应力影响显著,最大径向应力主要集中在角质胚乳内,而且颗粒内外的最大径向应力的峰值的差值较大,随着干燥过程的进行,角质胚乳的主应力集中区域将向内层移动,最大径向应力的峰值(压应力)也随之增大,颗粒内外的最大径向应力的峰值将有所减小,但其内层最大径向应力的峰值将有所增大,这是由于颗粒内层温度梯度和水分梯度的值逐渐增大的缘故;而最大切向应力主要集中在角质胚乳表面,但随着干燥时间的增加,切向应力集中区域将会缓慢向内层迁移,颗粒内外的最大切向应力的峰值的差值将有所减小,但其内层最大切向应力的峰值将有所增大,这是由于颗粒内层温度梯度和水分梯度的值逐渐增大的缘故,温度越高,最大切向应力的峰值也相应增大,但不会改变最大切向应力的峰值总的分布区域。

4 结 论

(1)采用给出的干燥应力模型进行模拟,较为准确地预测出干燥过程中玉米颗粒内部最大应力位置:最大径向应力主要集中在角质胚乳中,最大切向应力主要集中在角质胚乳表面。影响玉米干燥过程内部应力分布和大小并导致裂纹产生的主要因素是温度梯度和湿度梯度。

(2)不同时刻,玉米颗粒内部的最大应力峰值大都位于颗粒角质胚乳内或表层,粉质胚乳和胚内的应力较小,随着干燥过程的继续,角质胚乳

内应力的波动较大;而且随着干燥时间的增加,颗粒内外的最大应力峰值的差值减小,但内层最大应力的峰值将有所增大;干燥时间的变化对最大应力的分布区域没有明显的影响。

(3)通过对干燥过程中玉米颗粒内部应力的模拟,明确了干燥时间对玉米颗粒各组成部分应力的影响规律,了解了最大应力的分布区域和应力场的变化状况,为定量阐述玉米颗粒的应力裂纹现象提供了有效的手段,对制定合理的干燥工艺,提高玉米的烘后品质具有重要意义。

参考文献:

- [1] 朱文学,曹崇文.玉米应力裂纹的生成和发展过程研究[J].农业工程学报,1996,12(2):177-181.
Zhu Wen-xue, Cao Chong-wen. Study on formation and development of stress cracks in corn during high temperature drying[J]. Transactions of the CSAE, 1996, 12(2):177-181.
- [2] 曹崇文,朱文学.农产品干燥工艺过程的计算机模拟[M].北京:中国农业出版社,2001.
- [3] Thompson R A, Foster G H. Stress cracks and breakage in artificially dried corn[Z]. Marketing Research Bulletin, No. 631, TFRD, AMS, USDA, 1963.
- [4] Gustafson R J, Thompson D R, Sokhansanj S. Temperature and stress analysis of corn kernel - finite element analysis[J]. Trans of the ASAE, 1979, 22(4): 955-960.
- [5] Balastreire L A, Herum F L, Blaisdell J L. Fracture of corn endosperm in bending part II: Fracture analysis by fractography and optical microscopy[J]. Trans of the ASAE, 1982, 25(4): 1062-1065.
- [6] Song H P, Litchfield J B. Measurement of stress cracking in maize kernels by magnetic resonance imaging [J]. JAER, 1994, 57: 109-118.
- [7] Gunzsekkarau S, Deshpande S, Paulse M R, et al. Size characterization of stress cracks in corn kernels[J]. Trans of the ASAE, 1985, 28(5): 1668-1672.
- [8] White G M, Ross I J. Stress cracking development in popcorn as influenced by drying and rehydration processes[J]. Trans of the ASAE, 1982, 25(3): 768-772.
- [9] Sarwar G, Kunze O R. Relative humidity increases that cause stress cracks in corn[J]. Trans of the ASAE, 1989, 32(5): 1737-1743.

(责任编辑 程仲基)