

## 大米内水应力和热应力的有限元研究

S. Sokhansanj R. J. Gustafson

**引言** 谷粒受到环境变化的影响时,内部会产生裂缝,谷壳会破裂。场上变干,运输,以及人工干燥时发生的气温和空气相对湿度条件的变化,都会导致谷粒的物理损伤。可以推测,由于温度梯度和水分梯度,在谷粒各部分引起程度不同的膨胀和收缩,将在谷粒内部产生应力。因为热传递速率比水分传递的速率高得多,温度梯度和水分梯度的综合效应不好确定。Henderson<sup>[3]</sup>观察了大米内部的裂痕沿短轴从中心向边上扩展的过程。他指出,在变干的早期阶段,其内应力主要是由温度梯度引起的。Stremmer<sup>[8]</sup>观察了从贮藏在气温为5℃,空气相对湿度为35%的地方搬到气温为30℃,空气相对湿度为95%的地方去贮藏时,精米样品的应力变化。Husain<sup>[4]</sup>研究了糙米受压时的流变性质。他发现糙米有象粘弹性材料那样的性质。Zoerb<sup>[9]</sup>研究玉米颗粒的基本力学性

质和流变性质,发现玉米含水量对强度影响最大。压缩弹性模量、最大压应力和剪应力一般随含水量的增加而减小。

Sokhansanj<sup>[7]</sup>用有限元法计算了一颗谷粒内的瞬时热传递和水分传递。Gustafson<sup>[1]</sup>和 Haghghi<sup>[2]</sup>也利用有限元法分别计算了玉米和大豆中由温度梯度产生的应力裂纹。

本研究工作应用有限元法分析了一颗典型糙米中的水应力和热应力。

**方法** 把糙米的横断面分成许多小的几何形状单元。对于各个单元,温度,水分和位移的连续函数可以用一些简单的线性函数来近似。这些函数构成描写整个区域的代数方程组。用计算机解所得的代数方程组。有限元计算程序以 Segerlind<sup>[6]</sup>提出的方法为基础。二维瞬时热传递或质量传递方程和弹性方程可用此方法求解。基本单元为三角形。

表1 大米的模拟物性

物 性	单 位	胚 乳	糠 皮	胚 芽
热 导 率	瓦/(米·℃)	0.105	0.100	0.110
密度 × 比热	焦耳/(米 <sup>3</sup> ·℃)	2.5 × 10 <sup>6</sup>	2.4 × 10 <sup>6</sup>	2.8 × 10 <sup>6</sup>
水分扩散系数	米 <sup>2</sup> /小时	3.4 × 10 <sup>-7</sup>	1.0 × 10 <sup>-7</sup>	3.42 × 10 <sup>-7</sup>
弹 性 模 量	千帕	4.2 × 10 <sup>6</sup>	4.2 × 10 <sup>6</sup>	4.4 × 10 <sup>6</sup>
泊 松 比	—	0.4	0.4	0.4
水力膨胀系数		1.7 × 10 <sup>-3</sup>	1.7 × 10 <sup>-3</sup>	1.7 × 10 <sup>-3</sup>
热膨胀系数		5.2 × 10 <sup>-5</sup>	5.4 × 10 <sup>-5</sup>	5.4 × 10 <sup>-5</sup>

一颗糙米由结构不同的三部分即胚乳、糠皮和胚芽组成(图1a)。为求有限元解,可对糙米的上述各个部分分别列出其材料性质,它们包括:弹性模量,泊松比,水力收缩系数,热膨胀系数,热导率,比热,水分扩散系数以及密度。由各种来源得到的这些性质的数据见表1。

有限元计算程序利用一个含有192个三角形单元的网格。因为结构的差异,这些单元集中在糠皮内以及胚芽与胚乳之间的区域内(图1b)。

水应力和热应力分析分两步进行:(1)瞬时的热传递和水分传递;(2)由于温度梯度和水分梯度产生的应力变化。

水和热的加载条件与谷物的人工干燥条件相似。先使 $10^{\circ}\text{C}$ 的谷粒受到 $50^{\circ}\text{C}$ 的温度跃变。这些条件对于冷却模拟则相反。取对流传热系数为 $40\text{瓦}/(\text{米}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ 。类似地,进行干燥分析时,使均匀含水量为33%的谷粒(干组分)在气温为 $50^{\circ}\text{C}$ ,空气的相对湿度为40%的条件下干燥。所用对流传质系数为105米/小时。

对于瞬时解,分别取时间步长为0.2秒和0.2小时来模拟热传递和质量传递。时间步长的选取是根据解的稳定性以及热传递速率大于质量传递速率。在给定的时间间隔里所得的微元温度和微元含水量对于下面的应力分析是节省机时的。

应力分析以单元的膨胀与收缩所引起的节点相对位移为基础。解中不包括外力和边界力。假设应力完全由温度梯度或水分梯度产生的等效载荷所引起。对整个谷粒确定一个初始均匀温度或含水量。于是可根据后来相对于初始条件的温度变化或含水量变化计算应力。

**结果** 谷粒的最小与最大节点温度同加热时间之间的函数关系见图2。对于同样的加热时间,所得最小法应力(压缩力)和最

大法应力(拉伸力)也画出了。应力的最大值是在温度发生初始跃变的24秒内。Gustafson<sup>[4]</sup>对玉米粒也作了上述应力分析,表明有类似的结果。同加热相似,当谷粒受到环境冷却的影响时,最大应力也发生在24秒之内。图3表示了加热和冷却时稻米内的拉应力和压应力分布。在加热时,外层各单元膨胀,它们之间互相施加压缩载荷。内部单元处于较低的温度下,所以它们的位移很小。其最后结果就是产生作用于内部单元的拉应力。冷却时可以看到类似的现象,但过程的方向与加热时相反:当内部单元受压应力时,外部单元受拉应力。

模拟大米的等温脱水,要比模拟加热脱水稍微复杂些。结果,在干燥的初始阶段得到最大的模拟应力。图4表示了三个时间间隔中由于去湿(干燥)而引起的应力变化。压应力一般在谷粒的内部产生,而张应力则集中在外层。应力值在干燥过程中逐渐减小。图4还表示了应力位置随干燥时间而改变。应力变化图与Kunze<sup>[5]</sup>所讨论的一致。也分析了吸湿引起的应力。当前的数值方法还不能计算在吸湿过程中发生的应力的滞后时间。由于缺乏实验数据,所以未打算验证上述模拟工作。但打算为此作进一步的实验。

**结论** 用有限元计算了谷粒中的水应力和热应力。分别探讨了谷粒中温度变化和水分变化的影响。虽然没有用实验数据来与数值模拟相比较,但应力变化图与Kunze<sup>[5]</sup>根据他的实验所得结果一致。对于小谷粒中的应力分析,有限元是个有生命力的有用工具。但此方法的成功主要取决于谷粒各种物性值的精度,这些值必须由实验求得。

俞稼槃译自: Engineering Applications of Mechanics(Proc. 5th Symp. on Eng. Appl. of Mech.; 16—17 June, 1980, Canada); 145—147。(图及参考文献略)