

密闭粮堆中水分和温度变化的模拟研究

潘 钰¹,张中涛¹,王远成¹,赵会义²,石天玉²,魏 雷²

(1. 山东建筑大学热能工程学院,山东 济南 250101;2. 国家粮食局科学研究院,北京 100037)

摘要:通过数值模拟的方法对考虑呼吸作用的密闭粮仓内温度和水分随时间的变化进行了探究。在数值模拟过程中,对真实粮仓进行适当的简化,建立数学模型,利用有限元法,对不同初始温度的粮堆进行数值模拟分析,研究粮堆内部温度和水分变化与呼吸作用的关系,当粮堆的初始温度较高时,呼吸作用对粮堆温度和水分的影响非常显著。利用研究结果可以为粮堆进行合理的“人工干预”提供理论依据。

关键词:呼吸作用;温度;水分;数值模拟

中图分类号:S 379.9 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-7561(2015)S-0024-04

Numerical simulation of changes of temperature and moisture in closed grain bulk

PAN Yu¹, ZHANG Zhong-tao¹, WANG Yuan-cheng¹, ZHAO Hui-yi², SHI Tian-yu², WEI Lei²

(1. School of Thermal Energy Engineering, Shandong Architecture University, Jinan Shandong 250101;
2. Academy of State Administration of Grain, Beijing 100037)

Abstract: The changes of the temperature and moisture in the closed grain warehouse were studied by numerical simulation. The factors of the warehouse were simplified, and a mathematical model was set. The relationship between respiration and the changes of the temperature and moisture in the grain bulk was studied. When the initial temperature in the grain bulk was high, the effect of respiration on the temperature and moisture was very significant. It provided a theoretical basis for reasonable "human intervention" to the environment of grain bulk.

Key words: respiration; temperature; moisture; numerical simulation

粮食储藏过程中,水分和温度是特别重要的两个参数。环境温度的季节性变化,会导致粮堆内热量传递和水分迁移,继而引起粮堆局部的温度和湿度的升高,从而导致微生物和害虫的生长,使得粮仓中的粮食变得不安全^[1]。同时,粮食作为一种生命体,具有吸湿和解吸湿的特点,并且表现有呼吸作用。因此,粮堆的温度和水分变化是由粮仓外的环境和粮仓内谷物的生物特征共同决定的。

粮堆的呼吸作用会消耗粮食的干物质,同时,呼吸过程会产生热量和水分,如果粮堆通风情况不好,呼吸产生的热量和水分很难散发出去的话,就会使

粮堆的水分含量不断增加,有可能引起粮堆的“出汗”甚至“结顶”。呼吸作用产生的大量热量积聚于粮堆中,如果这些热量不能及时散发出去,将会使粮温升高,有可能导致粮堆发热,甚至霉变。由此可见,粮食的呼吸作用会引起粮堆的水分和温度的变化,进而会导致粮食重量的损失、粮堆中昆虫的繁殖、粮堆的结顶、发霉等。这些情况的发生都对粮食的安全储存有直接影响。因此,粮食的呼吸作用在粮食的水分和温度变化的数值模拟中是不得不考虑的重要因素^[2-3]。

目前,国内学者对于“人工干预状态”(如通风等)^[4]的情况研究较多,而缺乏对“非人工干预状态”(如密闭粮仓非通风)下的探索,且国内外对于粮食的呼吸作用的研究也刚刚起步,而且研究时多假设壁温为定值,本研究考虑呼吸作用的密闭粮仓内部热湿耦合传递规律的数值模拟研究,与此前学

收稿日期:2015-02-10

基金项目:国家自然科学基金(51276102);国家粮食公益专项(201313001,2015449-001-03)

作者简介:潘钰,1991年出生,硕士研究生。

通讯作者:王远成,1963年出生,教授,博士。

者研究不同的是本研究选择了逐日变化的温度作为边界条件。

1 数值模拟

1.1 物理模型

模拟研究用一封闭的圆柱形储粮仓作为研究对象,简化模型见图1和图2。根据实地调查的结果显示,粮仓内部水分含量、温度等参数变化呈现对称分布,并且圆筒仓是轴对称图形,为了节省计算时间,选择圆筒仓轴向截面的一半作为需要模拟计算的几何模型。圆柱底面的直径为(2R)10 m,高度(L)10 m, x 轴方向即为底面半径的方向, y 轴为圆柱仓的高度方向。

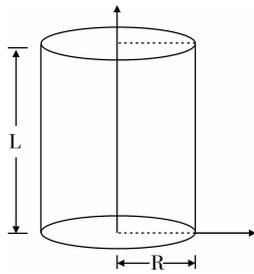


图1 几何模型

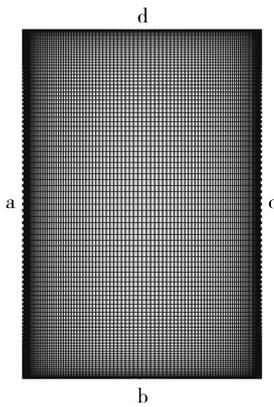


图2 求解区域

1.2 数学模型

1.2.1 控制方程

以小麦作为研究对象,假定小麦为连续介质,因此各守恒方程均适用于本研究中的模拟。小麦的储藏过程中主要涉及到的方程有质量守恒、能量守恒、动量守恒、水分守恒方程^[5]。

$$\text{连续性方程 } \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\text{动量守恒方程 } \rho_{\text{air}} \frac{\partial u_i}{\partial t} = - \frac{\varphi \mu u_i}{K} - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \delta_{ij} \rho_{\text{air}} g \beta (T - T_0) \quad (2)$$

能量守恒方程

$$(\rho_{\text{bulk}} C_{\text{bulk}}) \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho_{\text{air}} C_{\text{air}}) u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[k_{\text{bulk}} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] +$$

$$\rho_{\text{bulk}} h_{fg} \frac{\partial W_g}{\partial t} + \rho_{\text{bulk}} q_h Y_{\text{CO}_2} \quad (3)$$

水分守恒方程

$$\rho_{\text{bulk}} \frac{\partial W_g}{\partial t} + u_j \left(\frac{\sigma}{R_v T} \right) \frac{\partial W_g}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D_M \frac{\partial W_g}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D_T \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) - u_j \left(\frac{\omega}{R_v T} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} + \rho_{\text{bulk}} q_w Y_{\text{CO}_2} \quad (4)$$

其中:基于温度梯度的水蒸气扩散系数 $D_T = D_{\text{eff}} \omega$; 基于水分梯度的水蒸气扩散系数 $D_M = D_{\text{eff}} \sigma$; 水蒸气在粮堆中的有效扩散系数 $D_{\text{eff}} = \frac{D_v \varepsilon}{\tau R_v}$;

$$\text{水蒸气扩散系数 } D_v = \frac{9.1 \times 10^{-9} \cdot (T)^{2.5}}{(T + 245.18)}$$

; σ 是固定温下水分含量改变引起的分压变化量; ω 是固定水分含量下温度改变引起的分压变化量; β 是空气膨胀系数; h_{fg} 粮堆的蒸发潜热; ρ_{air} 和 ρ_{bulk} 分别是空气密度和粮堆密度; c_{air} 和 c_{bulk} 分别是空气比热容和粮堆比热容; $Y_{\text{H}_2\text{O}}^{[6]}$ 是粮堆呼吸 24 h 释放的水分; $Y_{\text{CO}_2}^{[6]}$ 是粮堆呼吸 24 h 的 CO_2 释放率; q_H 是呼吸过程放热量, 值为 10.738 J/mg; q_w 是呼吸过程产生的水分量, 值为 4.09×10^{-5} kg/mg。

1.2.2 初始条件和边界条件

在模拟过程中,认为边界是无滑移边界,且是不可渗透的。主要研究初始水分 14% 时的四种情况,分别为初始粮温 -10°C 时,考虑呼吸热和不考虑呼吸热的两种情况,以及初始粮温 30°C 时,考虑呼吸热和不考虑呼吸热的两种情况。另外,也研究了初始水分 16% 时的部分情况,并加以对比分析。

求解区域中边界 a 是轴对称边界,该边界上热湿通量为零,边界 b 为地面边界,按绝热条件处理,边界 c 和 d 取逐日变化温度(冬季工况取 11 月 1 日~2 月 8 日,夏季工况取 4 月 1 日~7 月 9 日,数据来源于中国建筑热环境分析专用气象数据集,详见图 3、图 4)。边界 c 和 d 的处理使模拟更加接近于真实情况。

1.3 数值模拟方法

采用有限元法(finite element method)。即将连续的求解域离散为一系列的单元体,然后在单元体上选取几个点作为节点,然后用控制方程组进行积分处理,得到离散方程组进行计算。有限元法是一种高效常用的计算方法,常用于解决微分方程复杂以及边界条件复杂的数学模型。

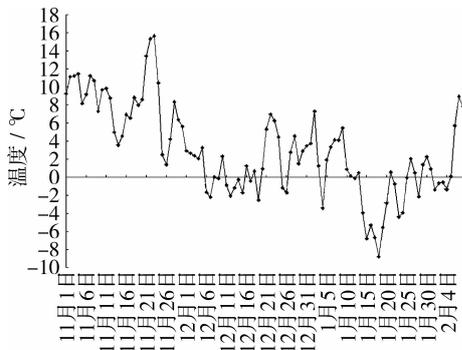


图3 冬季逐日变化温度(11月1日-2月8日)

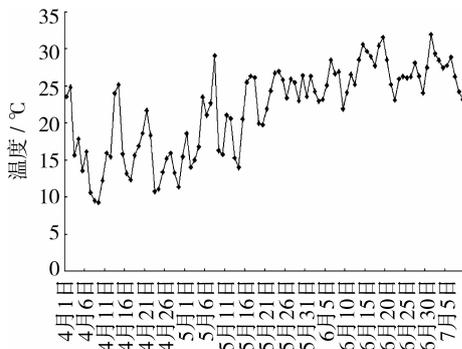


图4 夏季逐日变化温度(4月1日-7月9日)

2 数学模型验证

将模拟结果与 Kishor K. Khankari^[7] 的文献中的实验结果做对比,以验证本研究所采用的模型的可靠性, Kishor K. Khankari 在自然对流状态下对小麦的水分、温度变化进行了实验研究。

表1 小麦的物性参数

时间/s	密度/(kg/m ³)	初始水分/%	当量直径/mm	渗透率/m ²
10	816.5	12.7 ± 0.15	3.64	5.96 × 10 ⁻⁹
20	808.9	12.6 ± 0.13	3.64	5.96 × 10 ⁻⁹

与 Kishor K. Khankari 的结论进行了温度和水分变化的对比,结果如图5和图6所示。对比分析发现模拟结果与 Kishor K. Khankari 实验的模拟结果基本吻合,验证了本实验数学模型的有效性。

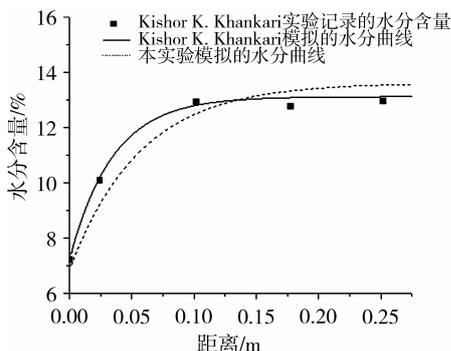


图5 本实验与 Kishor K. Khankari 实验观测的水分比较

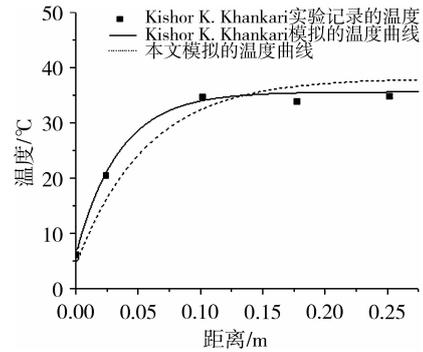


图6 本实验与 Kishor K. Khankari 实验观测的温度比较

3 结果与分析

实验模拟了初始粮温为 -10℃ 和 30℃ 的情况,这两种情况分别近似于实际情况中的夏季和冬季工况。每种情况下又分别研究了考虑呼吸热和不考虑呼吸热的情况,以方便进行对比分析。图7~图10列出了初始水分含量为 14% 的小麦 100 天后的温度变化和水分变化的情况。

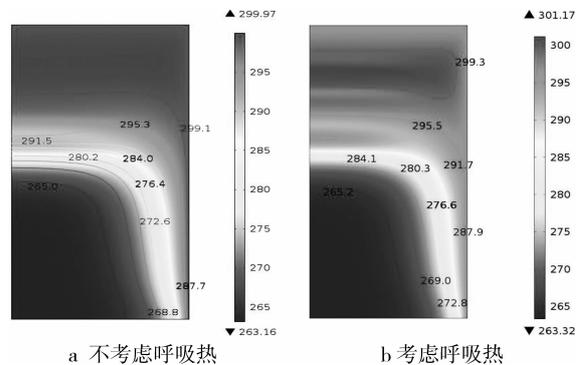


图7 初始粮温 -10℃ (263k), 夏季工况下温度变化情况

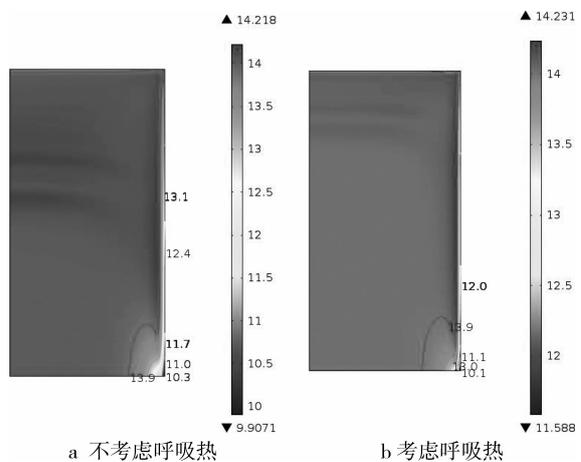


图8 初始粮温 -10℃ (263k), 夏季工况下水分变化情况

由模拟结果可以发现,当初始粮温为 -10℃ 时(夏季工况),不考虑呼吸作用和考虑呼吸作用两种情况下,100天后粮堆能达到的最高温度均为 26℃

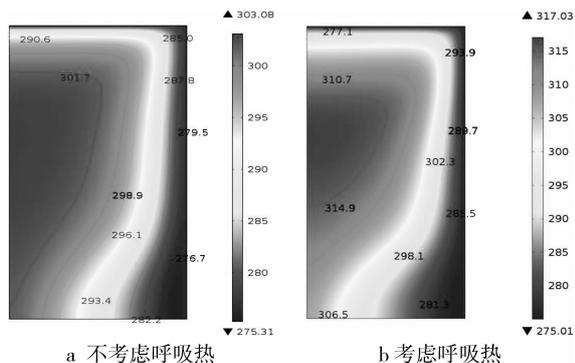


图9 初始粮温30℃(303k),冬季工况下温度变化情况

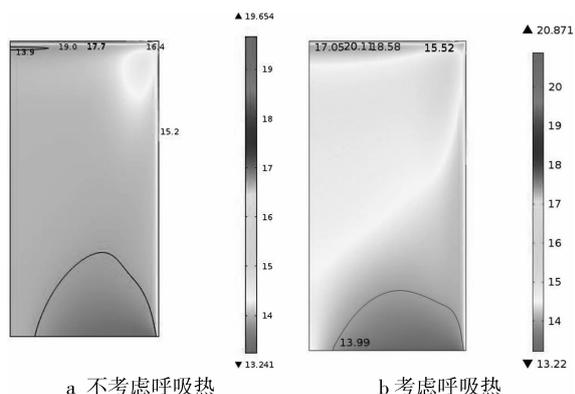


图10 初始粮温30℃(303k),冬季工况下水分变化情况

左右,最低温度在-10℃左右。水分变化的情况也类似,粮堆能达到的最高水分含量时在考虑呼吸和未考虑呼吸时基本相同,最低水分含量考虑呼吸时比不考虑呼吸时大1.5%左右。分析其原因,主要是由于夏季工况时,粮堆的初始温度较低,尽管外界气温逐渐升高,但是由于粮堆导热系数较低,温度升高较慢。这说明当粮食温度较低时,粮堆的呼吸作用对温度的影响较小,对水分含量的影响则稍大一些。

当初始粮温为30℃时(冬季工况),不考虑呼吸作用时,粮堆的最高温度维持在30℃左右,最高水分含量为19.6%,但当考虑呼吸作用时,粮堆的最高温度达到40℃,最高水分含量达到22%,这说

明当小麦初始温度较高时,小麦的呼吸作用加强,呼吸作用产生的热量和水分也增加,对粮堆的温度和水分变化的影响比较明显。

4 结论

基于有限元的方法,利用 comsol 软件进行模拟,对考虑呼吸作用的储粮仓中小麦的水分含量和温度的变化进行了数值模拟分析,并且模拟过程创新性地选择了变温度的边界条件,使得模拟结果更加贴近于真实情况。通过模拟得到了“非人工干预”条件下近似冬季和夏季温度,水分随时间的变化规律,发现在初始粮温较低时,呼吸作用相对较弱,呼吸作用对粮堆温度和水分的影响较小,初始粮温较高时,呼吸作用旺盛,呼吸作用对粮堆温度和水分的影响十分显著。

参考文献:

- [1]杨广靖,任云虹,贾金元,胡德泗. 我国粮食储藏的现状与发展趋势[J]. 粮食加工,2012, 37(1):60-63.
- [2]束旭强. 粮食储藏期间水分变化的探讨[J]. 粮油仓储科技通讯,2004(5):52-54.
- [3]王远成,武传欣,段海峰. 粮食储藏过程中粮堆内部热湿耦合传递过程对粮食品质变化的影响研究[C]. 中国粮油储藏学会第六届年会报告,中国,云南德宏,2009,167-171.
- [4]Thorpe G R. Moisture diffusion through bulk grain subjected to temperature gradient[J]. J. Stored Prod. Res.,1982,18:9-12.
- [5]Gastón A, Abalon R, Bartosik R E, Rodríguez J C. Mathematical modeling of heat and moisture transfer of wheat stored in plastic bags (silobags)[J]. Biosystems Engineering. 2009,104:72-85.
- [6]White N D G, Sinha R N, Muir W E. Intergranular carbon dioxide as an indicator of biological activity associated with the spoilage of stored wheat[J]. Canadian agricultural engineering. 1982,24:35-42.
- [7]Khankari K K,Suhas R. Patankar V, Vance R,Morey. A mathematical model for natural convection moisture migration in stored grain [C]. University of Minnesota supercomputer institute research report UMSI 93/239. 27