

基于 COMSOL 的仓储粮堆内部自然对流和热湿传递的模拟研究

王远成 潘钰 尉尧方 鲁子枫 崔宏英

(山东建筑大学热能工程学院, 济南 250101)

摘要 本文基于仓储粮堆内部自然对流、热湿耦合传递的数学模型, 采用 COMSOL 模拟的方法, 探讨了仓储粮堆内部自然对流、热量传递和水分迁移过程的相互关系。提出了判断粮堆内部自然对流强弱的瑞利数及其影响因素, 分析了仓型结构、粮种对粮堆内部自然对流、热量传递和水分迁移的影响。结果表明, 数学分析方法是分析仓储粮堆内部自然对流、热量传递和水分迁移过程的一种有效途径, 数学分析的结果可以为仓型设计、储粮生态系统的模拟、仓储技术管理提供借鉴。

关键词 数值模拟 粮堆 自然对流 热量传递 水分迁移

Simulation analysis of natural convective heat and moisture transfer in grain bulk during sealed storage

Wang Yuancheng Pan Yu Yu Yaofang Lu Zifeng Cui Hongying

(Thermal Engineering school, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101)

Abstract In present paper, the relationship between natural convection, heat and moisture transfer were examined by the method of numerical simulation. The simulation analysis shows that for small cereal grains such as wheat, heat and moisture transfer is dominated by heat conduction and diffusion, but for larger particles the effect of convection is more important. The effect of natural convection is significant in stored bulk grain when the ratio of height to radii of bin or warehouse is larger. The moisture transfers that occur in storage have little effect on the average temperature of the stored bulk grain. However, heat conduction and natural convection dominates the moisture transport process. Respiration has an effect on temperature in stored bulk grain. The effect of natural convection is significant in stored bulk grain when the ratio of height to radii of bin or warehouse is larger.

Key words numerical simulation, stored bulk grain, natural convection, heat conduction, moisture transfer

0 引言

温度和水分是影响粮食安全储存的主要因素, 准确预测粮仓中粮食的温度和水分是至关重要的。由于储粮的温度由周围的天气条件决定, 所以周围天气的变化会影响到储粮的温度。

同时,在温度梯度的作用下,粮堆内部形成自然对流运动,它也会促进粮堆内部的水分迁移,从而导致仓储粮堆的水分发生了迁移和再分配。

Converse 等^[1]采用实验和数值模拟相结合的方法,对圆筒仓内部温度和水分变换规律进行了研究。Yaciuk 等^[2]、Jiang 和 Jofriet^[3]建立了在粮堆内部以导热为主要热量传递的模型,忽略了自然对流的影响,并对仓储粮食内部的温度变化进行了模拟分析。该研究认为,粮食在储存过程中会发生自然对流,但对储粮的温度并没有太大的影响。Fuji Jian 等^[4]调查发现仓内小麦温度变化的峰谷值较仓外气温变化的峰谷值推迟一个月,而且在温度梯度的作用下,在粮仓内产生了空气的自然对流,导致仓内粮食水分的迁移。Beukema 等^[5]对矩形粮仓中的自然对流和传热过程进行了研究,结果表明,自然对流会影响粮堆内部的热量传递。Nguyen^[6]发展了一个二维的瞬态模型来描述由于粮堆内部的自然对流而引起的水分迁移过程,但忽视了扩散引起的水分迁移。Khankari^[7-8]对仓储粮堆内部由于温度梯度及自然对流引起的温度和水分变化规律进行了研究,且他们考虑了由温度梯度引起的自然对流对储粮中热湿迁移的影响。王远成等和 Wang^[9-11]采用计算流体动力学技术(CFD)对圆筒仓和房式仓内粮堆的微气流流动、温度和水分随仓外大气温度的改变而变化的规律进行了数值模拟研究,研究发现,在非人工干预情况下,尽管粮堆内部的自然对流流动微弱,但对粮堆内部的水分迁移产生影响,而且粮堆内部热量传递和水分迁移过程是相互耦合的。

本文基于仓储粮堆内部自然对流、热湿耦合传递的数学模型,对仓储粮堆内部热湿耦合传递过程进行了数值模拟分析,探究了瑞利数对仓储粮堆内部热量传递及水分迁移的影响;同时分析了自然对流作用对仓储粮堆内部热量传递和水分迁移过程的影响,同时,分析了呼吸作用对仓储粮堆内部热量传递的影响。

1 仓储粮堆内部自然对流和热湿传递的模拟及分析

1.1 仓储粮堆内部自然对流的瑞利数

对仓储粮堆内部自然对流、热湿耦合传递的数学模型^[9-11]进行数学变换,并引入流函数 ψ ,可以推导出:

$$0 = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{Ra\alpha}{HA} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

其中， H 是粮仓中粮堆的高度， T 是空气和多孔介质混合的绝对温度， A 是粮仓周围空气温度变化幅度， α 为粮堆热扩散系数。方程 (1) 中 Ra 是描述粮堆中自然对流强弱的无量纲数—瑞利数，其表达式如下：

$$Ra = K\rho_a g\beta AH / (\mu\alpha) \quad (2)$$

不难看出，瑞利数是反应粮堆内部的自然对流强弱的无量纲数，与渗透率 K 、仓外大气温度变化幅度 A 、粮堆热扩散系数 α 以及粮堆内部的空气的热物性参数有关。不同粮种的显著差异项是渗透率 K 和粮堆热扩散系数 α 。 A 和 β 受周围环境温度的影响，而渗透率主要与粮粒等效直径及孔隙率有关。

1.2 粮堆内部的自然对流流动

由于密闭粮仓内部压力变化很小，即 ∂p 为 10^0 数量级，粮堆跨度 $\partial x \approx 12$ ，粮堆高度 $\partial y \approx 6$ 。而且，考虑粮堆内的小麦渗透率 $K = 5.96 \times 10^{-9} \text{m}^2$ 和空气的运动粘度 $\mu = 1.79 \times 10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{s}$ ， $\rho_a = 1.23 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ，空气的体积膨胀系数 $\beta = 0.0034$ ，仓外大气温度与粮堆平均温度之差 $T - T_a = 15^\circ\text{C}$ 。对描述粮堆内部流动的达西方程^[9-11]进行近似分析，可以得到：

$$u = -\frac{5.69 \times 10^{-9}}{1.79 \times 10^{-5}} \frac{1}{12} = 2.65 \times 10^{-5} = 0.0954 \text{m/h}$$

$$v = -\frac{0.243 \times 5.69 \times 10^{-9}}{1.79 \times 10^{-5}} \left(\frac{1}{6} + 1.23(1 - 0.0034 \times 15 \times 9.8) \right) = 5.15 \times 10^{-5} = 0.185 \text{m/h}$$

其中， u 和 v 为 x ， y 方向上粮堆内部空气的流动速度， $u = -\frac{K}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x}$ ，

$$v = -\frac{K}{\mu} \left[\frac{\partial p}{\partial y} + \rho_a [1 - \beta(T - T_a)] g \right]。可以看出，粮堆内部自然对流的速度很小，平均速度$$

的数量级为 10^{-5}m/s ，而且垂直方向的平均速度大于水平方向的平均速度。粮堆内部自然对流运动是微弱的，因此，俗称为微气流。图 1 和 2 分别是使用 COMSOL 模拟的浅圆仓和房式仓内部的自然对流传场的数值模拟结果。从图 1 和 2 也可以看出，粮堆内部存在微气流，而且其数量级分为 $10^{-5} \sim 10^{-4} \text{m/s}$ 。

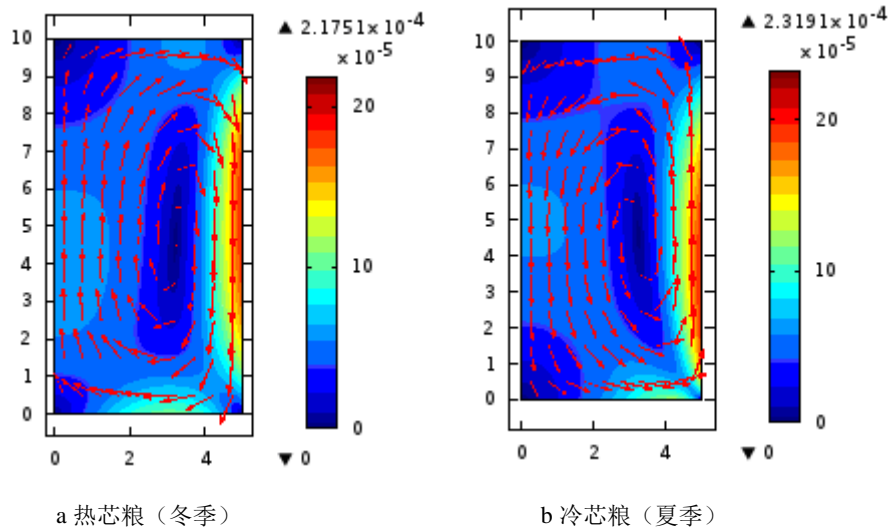


图 1 王远成等^[9-10]模拟的近似冬季和夏季储藏 150 天时浅圆仓内小麦的流场分布

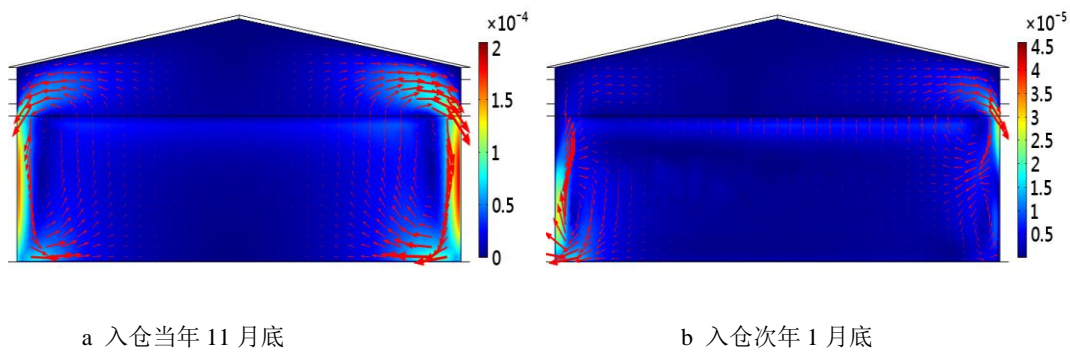


图 2 王远成等^[9-10]模拟的跨度 22m 粮堆高度 5m 房式仓内稻谷的流场分布

1.3 自然对流对传热过程的影响

由前面的分析，我们知道，粮堆内部自然对流强弱的影响因素主要有：仓型结构、粮种物性参数及周围大气温度变化。

由粮堆内部空气流动的连续性方程^[9-11]，可得 $u/(L/2) \sim v/H$ ，并假设粮堆温度的变化 $\Delta T \sim A$ 。根据数学分析原理，将式（1）写成如下形式：

$$v \left[\left(\frac{L/2}{H} \right)^2 + 1 \right] \sim \alpha \cdot Ra/H \quad \text{或} \quad u \left[\frac{H}{L/2} + \frac{L/2}{H} \right] \sim \alpha \cdot Ra/H \quad (3)$$

如果自然对流项数量级非常大或者远大于传导项的数量级，由能量方程^[9-11]得到自然对流项和扩散项之间的关系如下式：

$$\gamma \left(u \frac{\Delta T}{L/2} + v \frac{\Delta T}{H} \right) \geq \alpha \left(\frac{\Delta T}{L^2/4} + \frac{\Delta T}{H^2} \right) \quad (4)$$

因此，自然对流项数量级大于传导项时，

$$4\gamma u / L \geq \alpha \left(\frac{1}{L^2/4} + \frac{1}{H^2} \right) \quad (5)$$

将式(5)带入方程(3)，可得

$$\text{房式仓: } Ra \geq \left[2 + \left(\frac{H}{L/2} \right)^2 + \left(\frac{L/2}{H} \right)^2 \right] \frac{1}{2\gamma} \quad (6-1)$$

同理可得，圆柱坐标下，

$$\text{浅圆仓: } Ra \geq \left[2 + \left(\frac{H}{R} \right)^2 + \left(\frac{R}{H} \right)^2 \right] \frac{1}{2\gamma} \quad (6-2)$$

其中， $\gamma = \frac{\rho_a c_a}{\rho_b c_b}$ ， ρ_a 、 c_a 为空气的密度和比热容， ρ_b 、 c_b 和 k_b 为粮堆的密度、比热容和有效导热系数，从式(6)可以看出，如果房式仓的 $H/L=1/2$ 或浅圆仓的 $H/R=1$ ，

当 $Ra \geq 2/\gamma$ 时，自然对流就显得重要了。目前，我国的浅圆仓，半径 $R=20-30m$ ，装粮高度 $H=15-30m$ ，即装粮高度与半径比 $H/R=1.0-1.5$ ；对于房式仓，其跨度 $L=18-30m$ ，装粮高度 $H=5-8m$ ，所以，装粮高度与 $1/2$ 跨度比 $H/(L/2)=0.4-0.56$ 。

对于浅圆仓，通过式(6)计算可知：当 $H/R=1$ 时，如果 $H > 1.1m$ ；当 $H/R=1.5$ ，如果 $H > 1.29m$ 时，粮储过程中自然对流就会大于热传导的作用。对于小麦，当

$\mu/K=3 \times 10^3$ ， $g=9.81$ ， $\alpha=1.1 \times 10^{-7}$ ， $\beta=3.4 \times 10^{-3}$ ， $\gamma=9.8 \times 10^{-4}$ ， $\rho_a=1.23$ 以及 $A=15$ 时，根据式(1)可得， $Ra/H=1.86 \times 10^3$ 。若储藏的是玉米的话， $Ra/H=5.83 \times 10^3$ ，当 $H/R=1$ 时，如果 $H > 0.35m$ ；当 $H/R=1.5$ ，如果 $H > 0.41m$ 时，粮储过程中自然对流（微气流运动）就会大于热传导的作用。

图3是王远成等^[9]模拟的近似冬季和夏季储藏小麦150天时浅圆仓内温度场分布，王远成等^[9]采用的是对流扩散模型，而Khankari^[8]采用的扩散模型（忽略自然对流作用），可以看出，两者模拟结果中等温线略有差异。其原因在于，对于热芯粮来说，由于壁面附近和右下角的粮堆内部自然对流较强，加速该处热量扩散，使得该处粮温下降的较快；对于冷芯粮

来说，由于壁面附近和右上角的粮堆内部自然对流较强，加速该处热量扩散，使得该处粮温下降的较快。因此可以看出，忽略自然对流作用的影响，会导致数值模拟结果的差异。

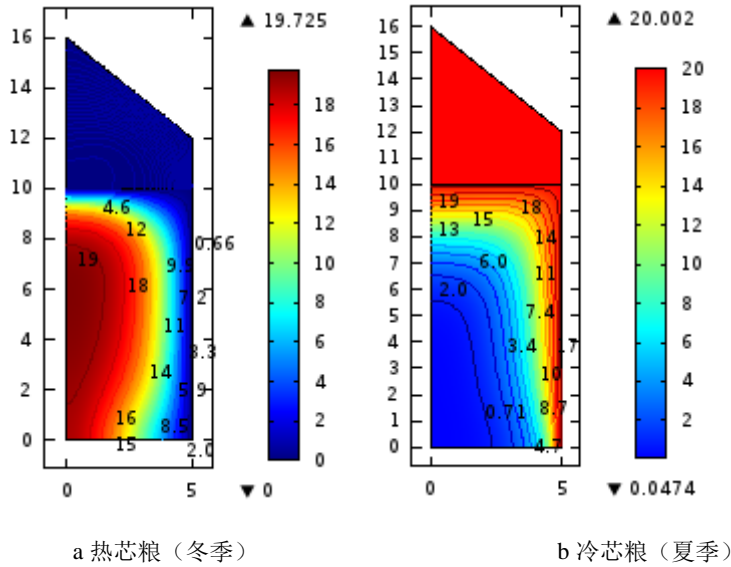
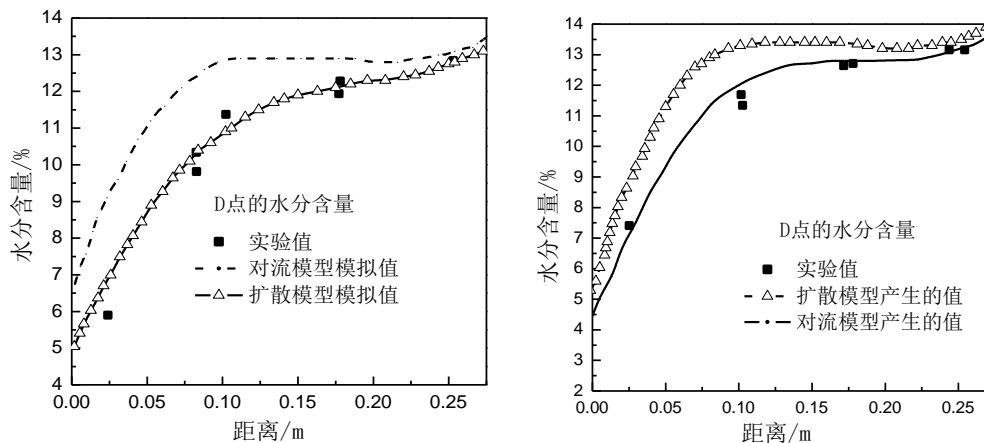


图3 王远成等^[9]模拟的近似冬季和夏季储藏150天时浅圆仓内温度场分布

1.4 自然对流对水分迁移的影响

对同时期粮堆内部水分迁移方程^[9-11]进行数量级分析，可以发现，自然对流对（微气流运动）水分迁移影响是明显的。图4是自然对流对粮堆内部水分变化的影响实验及模拟结果的比较。从图4可以看出，对于小麦来说，水分迁移主要受扩散作用的影响；对于玉米来说，控制玉米水分迁移过程主要是对流作用。这也说明，对于颗粒粒径较大的粮种，比如玉米，由于其渗透率相对较大，自然对流水分迁移的影响较大。



a 小麦

b 玉米

图 4 Khankari^[7]实验与数值模拟结果（水分）的比较

1.5 呼吸作用对热量传递的影响

粮堆是具有吸湿/解吸湿和呼吸作用的多孔介质，对于长期储藏的粮堆来说，粮堆呼吸作用对粮堆内部的热量传递的影响具有累加效应，不可忽略。也就是说，长期储藏的谷物，可能会由于呼吸作用产生的热量而导致粮堆温度的升高，甚至会产生局部发热霉变。图 5 是储存 400 天的房式中稻谷平均温度变化规律，可以看出，谷物呼吸放热会对粮堆内部温度产生一定的影响。

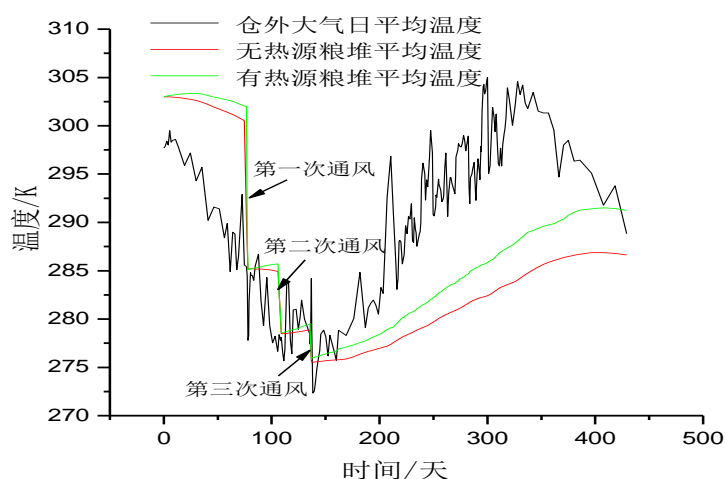


图 5 小麦储藏 400 天粮堆平均温度随时间变化规律

2 结论

通过对仓储粮堆内部自然对流、热湿耦合传递的数学模型的近似分析和数值模拟验证，粮堆内部热量传递和水分迁移是相互耦合的，但是，热量传递对水分迁移影响较大，而水分迁移对热量传递影响较小。同时，自然对流作用会加剧水分的迁移和再分配。房式仓如果满

足 $Ra \geq \left[2 + \left(\frac{H}{L/2} \right)^2 + \left(\frac{L/2}{H} \right)^2 \right] \frac{1}{2\gamma}$ ，圆筒仓如果满足 $Ra \geq \left[2 + \left(\frac{H}{R} \right)^2 + \left(\frac{R}{H} \right)^2 \right] \frac{1}{2\gamma}$ ，此时储粮的温度变化主要受自然对流的影响，反之，圆筒仓内的储粮温度变化主要受热传导的影响。

当浅圆仓的装粮高度与半径比为 $H/R=1.0-1.5$, 房式仓装粮高度与 $1/2$ 跨度比 $H/(L/2)=0.4-0.56$ 时, 自然对流对仓储粮堆内部的温度和水分影响明显, 不可忽视。对于粒径较小的谷物(如小麦), 相对于粒径较大谷物(如玉米), 其内部自然对流作用更强。对于长期储藏的粮堆来说, 粮堆呼吸作用对粮堆内部的热量传递的影响具有累加效应, 谷物呼吸放热会对粮堆内部温度产生一定的影响。

参考文献

- [1] Converse H H, Graves A H, Chung D S. Transient heat transfer within wheat stored in a cylindrical bin[J]. Transactions of American Society Agricultural Engineering,1973,16(1): 129-133.
- [2] Yaciuk G, Muir W E, Sinha R N. A simulation model of temperatures in stored grain[J]. Agricultural Engineering Research,1977,20: 245-258.
- [3] Jiang S, Jofriet J C. Finite element prediction of silage temperature in tower silos [J]. Transactions of American Society Agricultural Engineering,1987,30(6):1744-1750
- [4] Fuji Jian, Digvir S, Jayas, etal. Temperature fluctuations and moisture migration in wheat stored for 15 months in a metal silo in Canada[J]. Stored Prod. Res,2009,45:82-90
- [5] Beukema K J, Bruin S, Schenk J. Three-dimensional natural convection in a confined porous medium with internal heat generation[J]. International Journal of Heat Mass Transfer,1983,26: 451-458
- [6] Nguyen T V. Natural convection effects in stored grains-a simulation study[J]. Drying Technology,1987,5: 541-560
- [7] Khankari K K, Patankar S V, Morey R V. A mathematical model for natural convection moisture migration in stored grain [J]. Transaction of ASAE, 1995a, 38(6): 1777-1787
- [8] Khankari K K, Morey R V, Patankar S V. Mathematical model for moisture diffusion in stored grain due to temperature gradients[J]. Transactions of the ASAE. 1994,37(5):1591-1604
- [9]王远成, 白忠权, 张中涛, 等. 仓储粮堆内热湿耦合传递的数值模拟研究[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(11): 97-102
Wang Y C, Bai Z Q, Zhang Z T, Qi W. Numerical study on natural convection heat and moisture transfer in stored grain in a silo [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2015, 30(11):97-102
- [10]王远成, 元伟, 张中涛. 圆筒仓内自然对流对粮堆热湿传递的影响研究[J]. 水动力学研究与进展 A, 2014, 29(4):487-496
Wang Y C, Qi W, Zhang Z T. The effect of natural convection on heat and moisture transfer of stored grain in a silo [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2014, 29(4):487-496
- [11] Wang Yuancheng, Yang Kaimin, Zhang Zhongtao, etal. Natural Convection Heat and Moisture Transfer with Thermal Radiation in a Cavity Partially Filled with Hygroscopic Porous Medium[J]. Drying Technology, 2016, 34(3): 275-286.