储粮横向通风多尺度热湿耦合传递研究

余 海 杨开敏 王远成 鲁子枫 王 柯

(山东建筑大学热能工程学院,济南 250101)

摘 要 温湿度是影响粮食安全储存的重要因素,为保证储粮安全,采用机械通风,使粮堆和粮粒的温度 和水分含量可以得到有效控制。该文基于多孔介质的传热传质理论,建立了仓储稻谷通风过程中粮堆内部流 动和热湿耦合传递的数学模型以及粮粒的热量传递和水分输运模型。采用计算流体力学的方法,从粮堆尺度 和粮粒尺度,分析了机械通风过程中仓储粮堆和粮粒内部的温度、水分分布规律。研究发现,通风过程阶段, 粮堆内部温度降温显著,粮堆整体平均水分呈降低趋势,且粮堆内部温湿度受外界环境温湿度的影响很大;研 究还发现粮粒水分扩散速度远小于温度扩散速度。研究结果可以为储粮横向通风保水降温的工作以及粮堆 局部霉变、发热和害虫的发育的预防提供参考。

关键词 稻谷 横向通风 多尺度 数值模拟 热湿传递 中图分类号: S379 文献标识码: A 文章编号: 1003 – 0174(2021) 08 – 0074 – 06 网络首发时间: 2021 – 03 – 16 16: 54: 06 网络首发地址: https: //kns. cnki. net/kcms/detail/11. 2864. TS. 20210316. 1632. 024. html

储粮安全是粮食安全的重中之重,而温度、湿度 又是粮食安全储藏过程中两个最为重要的因素,如 果不能保证合适的温湿度,害虫数量以及霉菌就会 急剧增加,最终导致粮堆粮食局部害虫的发育和霉 变、发热。粮堆由粮粒堆积而成,粮堆是吸湿性多孔 介质,仓外大气温湿度随季节更替而变化给水分迁 移带来隐患^[1]。粮粒是一个由壳、麸皮和胚乳多层 结构组成的颗粒几何体。粮粒具有吸湿和解吸湿的 特性,粮粒会和粮堆间隙中的周围空气进行热质交 换,并且引起粮粒内部水分扩散^[2]。

基于计算流体力学的数值模拟方法是国内外近 年发展起来的一种研究流动、传热传质等现象的新 方法,可以形象的再现气体流动、热湿传递过程的情 景,为解决储粮通风问题提供了一个良好的数值分 析和优化的工具^[3,4]。当前国内外采用数值模拟方 法研究通风情况下粮堆内部热湿耦合传递的模型普 遍还是为 Thorpe 建立的模型^[5]。该模型虽然可以较 好地反映粮堆内部温度和水分的分布特点,但不能 准确的给出颗粒内部的温湿度分布。刘慧等^[6]通过 实验对高水分粮进行机械通风得出了粮堆上中下层 水分分布情况,但粮粒的温度和水分分布规律无法 得出。戚禹康等^[7]从粮堆尺度和粮粒尺度研究了稻 谷在自然储存中的热湿耦合传递规律,但是粮食在 长期的储存过程中,如果只依靠自然储存恐难以维 持合适的粮温及湿度,因为粮堆内的温度和水分随 外界环境温湿度的变化而变化。Jia 等^[8 9]对粮粒内 部温度和水分进行了数值模拟并预测了颗粒内部的 水分分布,但没有从粮堆尺度出发分析粮粒与粮堆 的相互耦合关系。本研究采用 COMSOL Multiphysics 软件对稻谷进行横向通风数值模拟,机械通风是在 自然储存 75 d 的基础之上进行的,从粮堆尺度和粮 粒尺度出发探究粮堆和粮粒的温度和水分分布规 律。

物理模型

1.1 粮仓和粮堆物理模型

图1是用 COMSOL 以浙江省某粮库为研究对象 建立的物理模型 模型按照实仓原尺寸构建,其中为 了简化问题,选取房式仓的横截面作为数值模拟的 对象,实仓内部横跨18 m,高10 m,混凝土墙厚 0.5 m粮堆高度5 m。为了得到粮堆内部某个位置 的温度和水分数据,在模拟过程中设置了3个监测 点来记录粮堆内部的温湿度变化 3 个监测点的位置 分别为监测点1(0.4 m,0.4 m),2(9 m,2.5 m),

基金项目:国家重点研发计划(2016YFD0400100 2016YDF0401002), 国家粮食公益专项(201513001)

收稿日期:2020-10-11

作者简介:余海,男,1995年出生,硕士,多孔介质热湿传递

通信作者:杨开敏,男,1983 年出生,副教授,强化传热技术、相变 传热及复杂多孔介质传热传质

3(17.6 m 4.6 m),其中监测点1和监测点3 靠近墙 壁,监测点1在左侧(南墙壁)左下角,监测点3在右 侧(北墙壁)右上角。因为南北墙直接与大气接触, 所以靠近粮仓墙壁的粮食容易受大气环境的影响, 故在两侧的墙壁附近各设置一个监测点,而粮堆内 部受大气环境的影响不是很大,因此在粮堆中部设 置一个监测点。



图1 粮堆物理模型及监测点位置示意图

1.2 粮粒物理模型

图 2 为粮粒的物理模型及监测点位置示意图, 该模型按稻谷实际尺寸构建,并且根据实际情况将 粮粒分为外部壳和内部胚乳两部分,COMSOL 构建 粮粒模型时,用两个椭球分别代替壳和胚乳,外部椭 球(壳)长半轴为 4.5 mm,短半轴 1 mm,内部椭球 (胚乳)长半轴为 3 mm,短半轴 0.9 mm。为了获得 粮粒中某个位置的温度和水分数据,在粮粒中同样 设置了 3 个监测点,监测点位置分别为 A(0 0 0),B (0 0.9 0),C(0 1 0),单位为 mm,监测点 A 位于粮 粒中心,B 位于壳表面,C 位于壳与胚乳交界面,位置 如图 2 所示。



图 2 粮粒物理模型及监测点位置示意图

2 数学模型及条件设置

假定粮堆为连续性的、均匀分布的多孔介质区 域^[4,10-12],空气-水蒸气混合物不可压缩,考虑粮堆 内部的热湿耦合和稻谷颗粒的吸湿与解吸湿特性, 建立储粮横向通风过程中的粮堆和粮粒的流动与热 质平衡方程。

2.1 粮堆的数学模型 连续性方程: $\frac{\partial (\epsilon \rho_a)}{\partial t} + \nabla (\rho_a u) = 0$ (1)

动量方程:

$$p_a \frac{\partial u_i}{\partial t} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \delta_{ij} \rho_a g \beta (T - T_0) - \frac{\varepsilon \mu u_i}{K} \qquad (2)$$

能量方程:

$$\rho_{s}C_{s}\frac{\partial T}{\partial t}+C_{a}\nabla\cdot(\rho_{a}uT) = k_{\text{eff}}\nabla^{2}T+h_{s}(1-\varepsilon)\rho_{s}$$

$$\frac{\partial W_g}{\partial t}$$

t

水分守恒方程:

$$\frac{\partial (\varepsilon \rho_a \omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_a u \omega) = \nabla \cdot (\rho_a D_{\text{eff}} \nabla \omega) - (1 - 1) \rho_s \frac{\partial W_g}{\partial t}$$
(4)

式中: ε 为孔隙率 ,t 为时间 , $\rho_a \ \rho_s$ 分别为空气 和稻谷的密度 ,u 为空气的表观速度或达西速度 , μ 为流体的动力黏度 ,K 为稻谷的渗透率 ,P 为多孔介 质中的压力 , $C_s \ C_a$ 分别为稻谷和空气的比热容 k_{eff} 为粮堆的有效导热系数 , h_s 为稻谷的蒸发潜热 , W_g 为稻谷粮堆的含湿量 , $h_s(1 - \varepsilon) \rho_s \frac{\partial W_s}{\partial t}$ 为吸湿或解 吸湿热 , $(1 - \varepsilon) \rho_s \frac{\partial W_s}{\partial t}$ 吸湿或解吸湿产生的干基水 分质量 , ω 为粮粒间空气的绝对含湿量 , D_{eff} 为水蒸 气的有效扩散系数。

2.2 粮粒的数学模型

能量守恒方程:

$$\rho_s C_s \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T + \rho_s Q_s \frac{1}{1 + M} \frac{\partial M}{\partial t}$$
(5)

水分守恒方程:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \nabla^2 M \tag{6}$$

式中: ρ_s 为稻谷颗粒密度; C_s 为稻谷比热容; T为温度; k 为传热系数; Q_s 为蒸发潜热; M 稻谷颗粒 水分湿基百分数; $M = W_g/(1 + W_g) \times 100$; D 为扩 散系数。

2.3 数值模拟条件设置

该模型采用有限元法进行数值模拟分析,横向 通风是稻谷自然储存至75 d 后进行的,通风时长 6 d 时间跨度为2016年12月15日至2016年12月

(3)

20 日。粮堆的密度 ρ_s 为 580 kg/m³,比热容 $C_s =$ (1 269 + 34. 89*M*) W/m • k⁻¹,渗透率 *K* 为 7. 27 × 10⁻⁹ m³,孔隙率 ε 为 0. 48。单位通风量为 10. 3 m³/(h • t),进风温湿度为仓外大气温湿度,大气平 均气温在 75 d 时为 14. 5 °C,77 ~ 78 d 的时间段骤降 至 2. 7 °C,在 81 d 时平均气温上升至 7. 2 °C,平均相 对湿度为 65%,通风前粮堆的平均温度为 20 °C,平 均湿基水分为 11. 5%。粮粒的初始温度为 13. 4 °C, 边界空气温度 $T_a = 4$ °C,粮粒的初始水分为 11. 2%。

3 模拟结果分析

3.1 粮堆温度与水分分布

模拟过程中,横向通风的进风口在南墙与稻谷 的交界面,出风口在北墙和稻谷的交界面。图3是 通风情况下 3 个监测点记录的温度变化情况 3 个监 测点温度变化情况并不相同。3个监测点分别为:监 测点1位于粮堆左下角,监测点2位于粮堆正中间, 监测点3位于粮堆右上角。从图3可看出,在通风 初期,监测点2的温度最高,这是由于自然储存至 75 d时 粮堆温度处于热芯粮状态(粮堆内部温度 高,外部温度低),随后在通风阶段监测点2的温度 逐渐降低。监测点3在最初通风时,温度出现先上 升后下降的情况 因为在通风初期 粮温为热芯粮状 态 所以刚开始通风时粮堆中部的热量随着空气传 递到了北墙,导致靠近北墙粮食温度出现上升。监 测点1的温度在77~78 d的时间段出现骤降的情 况 而监测点2、3 较监测点1 温度大幅降低的时间点 稍微滞后,这是因为大气气温在77~78 d 的时间段 出现急剧降低,而送的冷风首先接触的是靠近南墙 的粮食 故监测点1的温度先骤降 这也充分验证了 温度的延滞效应。通风至144 h 时 监测点1 和监测 点3温度接近外界大气温度,这是由于南墙、北墙的 粮食受外界大气温度的影响比较大,再一次说明粮 堆内部温度受外界环境温度影响很大。图4 是粮仓 内的速度场分布 其中三角形区域为空气区 矩形区 域为粮食区,从图4可以清楚地看出,通风过程中, 粮堆内部的微气流分布非常均匀,而空气区域为自 然对流运动,因此空气区域内的微气流比较杂乱。 均匀的气流为粮堆快速降温降湿创造了条件。

图 5 为横向通风 144 h 的粮堆温度分布图,通风 后的温度相对于通风初期粮堆温度要低得多,平均 温度由 20 ℃下降到 5 ℃,平均温度下降了 15 ℃之 多。粮堆中的高温出现在靠近南墙、北墙附近,这是 因为跟外界环境温度有关,最高温出现在靠近北墙、 粮面下 2.5 m 左右,最高温为 6.12 ℃,这是由于横向 通风时稻谷和昆虫呼吸产生的热量随气流扩散到北 墙,因而最高温位于此。另外,从温度分布图还可以 看出,粮堆内部温度分布比较均匀,而且横向温度没 有出现分层现象,从这就可以体现出横向通风的优 点了,即横向通风可以避免粮堆垂直方向出现温度 梯度,从而使粮堆温度分布更为均匀。

通风阶段监测点 3 的水分有升高、降低,再升高 再降低的变化规律,但总体是呈降低趋势的,这表明 通风过程中易受外界大气温湿度的影响。图 6 为 144 h 粮堆的水分分布,经过144 h 的机械通风,粮堆 的平均湿基水分降到了11.0%,水分下降了0.5%。





图 6 通风 144 h 时粮堆水分分布

3.2 粮粒温度与水分分布

通风阶段,以监测点1(粮堆左下角)处的粮粒为 研究对象 粮粒周围空气初始温度取自自然储存 75 d 时监测点1记录的温度 ,为 13.4 ℃ 边界条件为送 风空气温度,为4℃,通风空气速度4m/s。粮粒设 置了3个监测点,分别在粮粒内部正中央、壳与胚乳 交界面、壳表面,3个监测点记录的初始温度为 13.4 ℃ 通风阶段 3 个监测点的温度下降趋势大致 相同,但降至同一温度时监测点 A 用时较监测点 B 和 C 多几秒钟 监测点 B 和监测点 C 的温度非常接 近。通风时间接近100 s 时,粮粒温度已经趋近空气 温度 但监测点 A 相对于监测点 B、C 有一定的延迟, 这是由于粮粒内部存在热阻,所以热量从粮粒中心 传递到粮粒表面存在延迟现象。图7是10s时粮粒 内部温度分布图,这时粮粒内部温度已经趋向均匀 了,可以看出,粮粒内部温度趋于一致的时间非常 短。粮粒中部的温度比两端的要高,粮粒内部温度 略高于表面空气温度 最高温度在粮粒中心 这是因 为粮粒内部热阻大于壳表面空气热阻,再一次说明 热量从粮粒中心传到表面有一定的延迟效应。

横向通风前,粮堆左下角监测点1记录的初始 水分为11.2% 横向通风结束后,进风口处粮堆水分 降至9.9%,以该处的空气湿度作为粮粒初始条件,



粮粒初始水分设为 11.2%,通风模拟设置第三类边 界条件,边界条件为 h_m *($M_{eq} - M_1$), M_e 为平衡水 分,与粮食颗粒的温度和水分活度有关 稻谷颗粒体 积很小,其水分扩散速率不仅和边界温湿度有关,还 与自身吸湿和解吸湿有关。粮粒内部水分在 40 s 时 就已经趋向均匀了(如图 8 所示),t = 40 s 时粮粒平 均水分为 10.6%,较初始水分降低 0.6%,水分降低 很少,这是由于横向通风时空气的平均相对湿度为 65%,接近粮粒的平衡湿度,所以粮粒的水分降幅很 低。对比粮粒温度的扩散速度可知粮粒水分扩散速 度远小于温度扩散速度。



图 8 t = 40 s 粮粒水分分布

4 结论

本研究采用有限元法从耦合粮堆尺度和粮粒尺 度对房式仓内稻谷横向通风过程中粮堆和粮粒温度 水分变化规律进行了数值模拟,对模拟结果进行分 析研究,得出以下结论:横向通风由于流场分布均 匀,粮堆降温迅速且显著,粮堆内部温度分布均匀, 避免了垂直方向上的温度分层现象。因为受外界环 境的影响 横向通风时粮堆最高温出现在仓壁附近。 热量在粮堆与粮粒内部的传递存在延迟效应,横向 通风时靠近进风口的粮食温度率先降温 ,随后沿气 流方向逐渐降低: 粮粒内部热量传递的延迟是由于 粮粒内部热阻大于壳表面热阻造成的。稻谷颗粒体 积很小 其水分扩散速率不仅和边界温湿度有关 还 与自身吸湿和解吸湿有关。通风过程中粮堆与粮粒 的水分略有降低,但由于进风空气平均相对湿度较 大,所以粮堆与粮粒的水分下降幅度不大。粮粒内 部温度在 10 s 时就趋于一致,粮粒内部水分在 40 s 时趋于一致,粮粒水分扩散速度远小于温度扩散速 度。

参考文献

[1] 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 , et al. 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

[2] 王远成 杨开敏 ,潘钰 ,等.双扩散传热传质模型及在横向谷冷通风中应用 [J].中国粮油学报 ,2016 ,31(11): 106-111

WANG Y C , YANG K M , PAN Y , et al. A double – diffusivity heat and moisture transfer model and simulation of the cooling aeration of stored grain in a warehouse with a horizon–tal air flow [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association , 2016 31(11):106-111

- [3] 王远成, 张忠杰, 吴子丹, 等. 计算流体力学技术在粮食储藏中的应用[J]. 中国粮油学报 2012 27(5):86-91
 WANG Y C, ZHANG Z J, WU Z D, et al. Application of computational fluid dynamics technology in grain storage systems [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2012 27(5):86-91
- [4] 王远成 高帅 邱化禹 等. 横向谷冷通风过程的数值模拟研究[J]. 中国粮油学报 2016 31(7):103-106 WANG Y C, GAO S, QIU H Y, et al. Numerical study during the horizontal grain aeration with cooling air [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2016 31(7): 103-106
- [5] THORPE G R. The application of computational fluid dynamics codes to simulate heat and moisture transfer in stored grains [J]. Journal of Stored Products Research 2008 44:21-31

[6] 刘慧,张来林,任力民,等. 高水分粮机械通风就仓干燥

试验[J]. 河南工业大学学报(自然科学版),2007(5): 22-25

LIU H , ZHANG L L , REN L M , et al. The in – store drying experiment of high moisture content by mechanical ventilation [J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition) , 2007(5): 22-25

- [7] 戚禹康 王远成 鲁子枫 等. 稻谷自然储存多尺度热湿耦合 传递研究[J]. 中国粮油学报 2019 34(6):109-113 QI Y K, WANG Y C, LU Z F, et al. Multi - scale coupled heat and moisture transfer in nature grain storage [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2019 34(6): 109-113
- [8] JIA C , YANG W , SIEBENMORGEN T J , et al. A study of rice fissuring by finite – element simulation of internal stresses combined with high – speed microscope imaging of fissure appearance [J]. Transactions of the ASAE , 2002 , 45(3) , 741 – 749
- [9] JIA C , YANG W , SIEBENMORGEN T J , et al. Development of computer simulation software for single kernel drying , tempering and stress analysis [J]. Transactions of the ASAE , 2002 , 45(5) , 1485 – 1492
- [10] THORPE G R , WHITAKER S. Local mass and thermal equilibria in ventilated grain bulks. Part I: The development of heat and mass conservation equations [J]. Journal of Stored Products Research ,1992 , 28: 15 – 27
- [11] THORPE G R , WHITAKER S. Local mass and thermal equilibria in ventilated grain bulks. Part II: The development of constraints [J]. Journal of Stored Products Research , 1992 , 28: 29 – 54
- [12]林瑞泰.多孔介质传热传质引论[M].北京:科学出版 社,1995:200-265
 LIN R T. Introduction to heat and mass transfer in porous medium[M]. Beijing: Science Press,1995: 200-265.

Multi – Scale Coupled Heat and Moisture Transfer in Grain Storage with Horizontal Ventilation

Yu Hai Yang Kaimin Wang Yuancheng Lu Zifeng Wang Ke

(College of Thermal Energy Engineering , Shandong Jianzhu University , Jinan 250101)

Abstract Temperature and humidity are important factors that affect the safe storage of grain. Mechanical ventilation was used to effectively control the temperature and moisture content of grain bulk and grain in order to ensure the safety of grain storage. In this paper, a mathematical model of internal flow and coupled heat and moisture transfer in the grain bulk and heat and moisture transfer model of grain during the aeration of stored rice based on the theory of heat and mass transfer in porous media were established. Based on the method of computation fluid dynamics (下转第 87 页) accuracy and fitting effect of the modified model were significantly improved. Finally , the validity and applicability of the IGWO – SVR model were tested by using the germination rate of Zhoumai 22 as the quality evaluation index and Zhengmai 9023 multi – index data , and the MAPE values were 1.85% and 3.87% , respectively , thus proving a commendable performance of this model. The results showed that the new model is effective and feasible in the quality prediction of short – term stored wheat.

Key words gray wolf optimizer , support vector regression , wheat quality , multi – indicator analysis , prediction model

(上接第78页)

(CFD), from which the two scales of grain bulk and grain, the temperature and moisture distribution inside the storage grain bulk and grains during mechanical ventilation were analyzed. The results showed that the temperature inside the grain bulk decreases significantly during the ventilation process, and that the average moisture content of the whole grain bulk decreases. Plus, the temperature and humidity inside the grain bulk were immensely affected by the temperature and humidity of the external environment. It was also found that the grain moisture diffusion rate is far less than the temperature diffusion speed. The results provided reference for the horizontal ventilation of grain storage over the work of water retention and cooling and the prevention of local mildew , fever and pests 'development in grain bulk.

Key words dspaddy , horizontal ventilation , multiscale , numerical simulation , heat and moisture transfer