

储粮通风模型的构建及其应用分析

尉尧方¹, 王远成^{1,*}, 王兴周², 朱帅², 都昌起², 鲁子枫¹, 张晓静¹

(1. 山东建筑大学热能工程学院, 山东 济南 250101; 2. 山东省粮油收储有限公司鲁中储备库, 山东 昌乐 262400)

摘要: 温度和水分是小麦安全储存过程中2个非常重要的影响因素, 对粮堆通风过程进行模拟仿真可以实现粮堆通风过程中粮温和水分含量的有效监控, 确保储粮安全。文章基于多孔介质的传热传质理论, 建立了粮堆内的通风模型, 运用 Fortran 编程对储粮通风时粮堆内部热湿耦合传递过程及温度和水分变化规律进行了数值求解, 并在昌乐县鲁中粮库通风期间进行了6 d的通风实验测试, 将模拟结果与实测数据进行对比。结果表明: 模型预测的温度、水分含量与其相应的实测数值的变化趋势相吻合, 粮堆的水分含量最大相差0.93%, 温度差值最大为2.1℃, 偏差在可接受范围内; 相同的工况下, 采用建立的通风模型, Fortran 编程模拟时间仅为0.256 s, 耗时短, 模型操作方便; 通过程序调整物理参数, 该模型也可以应用于其他具有复杂生物特性的物质储存中, 有利于物质的安全储存, 减少储存中的损耗。

关键词: 多孔介质; 储粮; 通风模型; Fortran 编程; 模拟

中图分类号: TS205

文献标识码: A

Construction and application analysis of ventilation model for grain storage

Yu Yaofang¹, Wang Yuancheng^{1,*}, Wang Xingzhou², et al.

(1. School of Thermal Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China; 2. Luzhong Grain Depot of Shandong Cereal & Oil Reserve Ltd. Co., Changle 262400, China)

Abstract: The temperature and moisture content of wheat in the safe storage process is two very important factors, and the simulation of the grain filling process can realize the real-time and effective monitoring of the grain moisture content in the process of grain storage ventilation, and ensure the safety of grain storage. The paper, based on the heat and mass transfer in the porous medium theory, established the model of grain interior ventilation, and by using Fortran programming to numerical simulation the internal heat coupled moisture transfer process and the variation of temperature and water of ventilation in the grain silo, made a test in Changle County of Shandong Province during grain storage ventilation for 6 days. Through the comparison of simulation results and measured data, the results show: the change trend of temperature and moisture content is consistent with the measured value of model prediction, the maximum difference of moisture content of grain is 0.93%, the maximum temperature difference is 2.1℃, deviations are within acceptable limits; in the same condition, the ventilation model, Fortran programming simulation time is only 0.256 s, the model with short time, convenient operation; through the process of adjusting the physical parameters, the

收稿日期: 2017-04-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0400100, 2016YFD0401002); 国家粮食公益专项(201513001); 国家自然科学基金资助项目(51276102)

作者简介: 尉尧方(1992-), 女, 在读硕士, 主要从事多孔介质热质传递等方面的研究。E-mail: yuyaofangde@163.com

通讯作者: 王远成(1963-), 男, 教授, 博士, 主要从事复杂系统的传热传质等方面的研究。E-mail: wycjn1@163.com

model can also be applied to other complex biological characteristics of the material storage, and it is beneficial to create a safety storage environment and reduce the loss in storage.

Key words: porous medium; grain storage; ventilation model; Fortran programming; simulation

0 引言

粮食安全关系着国民经济的发展和社会稳定。2016年我国粮食总产量高达6亿t,但只有80%~90%的粮食能够被合理利用。导致这一损失的主要原因是粮食在储藏过程中被昆虫和真菌侵蚀使粮食品质发生劣变^[1]。Holmes指出温度和水分的影响会导致霉菌、细菌、螨虫等的出现,进而使得粮食在储存过程中产生了损失^[2]。经过长期的实践和研究,人们发现当粮食储藏温度在15℃,粮食安全储藏水分在15%时,可以有效地避免虫害的发生,抑制粮堆中生物体的生命活动,延缓储粮品质的劣变。因此,对粮堆进行冷却干燥通风,适当地控制粮堆的温度和水分,可以实现粮食的安全储藏^[3]。

粮堆通风期间其内部流动过程复杂,不仅与粮堆热物性参数和小麦理化特性有关,而且还涉及流体力学、工程热力学、传热学、生物学以及多孔介质内部的流动传热传质理论^[4]。机械通风通过引入粮仓外的冷空气与粮堆中的湿热空气进行热质交换,使粮食保持在安全的温度和水分含量。适时选择机械通风为粮仓安全储存发挥了重要作用。随着研究的深入,冯黎明等开展了粮仓通风降温的实验研究^[5]。吕宗旺等通过建立实仓物理模型进行CFD数值模拟,通过对比模拟结果和实验结果优化通风数学模型^[6]。王远成等对大型房式仓地上笼粮堆

温度和水分的变化规律和圆筒仓内自然对流对粮堆热湿传递的影响以及仓储粮堆内粮食温度和水分变化规律进行了数值模拟^[7-10]。张晓静等通过搭建实验台验证了程序模拟结果的可靠性^[11]。

针对上述文献中采用的数值模拟计算周期长、占用内存大、对计算机配置要求高等问题,文章采用Fortran编程设计了一套新的数学模型,对通风过程中粮堆内部的温度和水分变化进行了模拟,并在昌乐县鲁中粮库进行为期6d的通风实验测试。最后将实测数据与模拟结果进行对比,以验证该模型的准确性和可行性。

1 储粮通风模型的建立

1.1 物理模型

实验选取了鲁中粮库40号仓进行了垂直通风实验测试研究。粮仓为平房仓,长×宽为27.48m×23.34m;粮种为小麦,容重为770kg/m³,装粮高度为5.5m,粮库实际库存2738.16t。风机型号为YS90S-4(风机为1.1kW的轴流风机,风量为12812m³/h,风压为232Pa),通风口数量为4个,风机安装位置如图1所示。吨粮通风量为3.68m³/(h·t),通风形式为一机两道式,通风笼采用鱼鳞式通风道,通风开孔率为25%。通风笼尺寸和位置如图2所示。



图1 40号仓通风系统图

实验中4层粮仓分别为下层、中下层、中上层、上层。40号仓采用的是垂直上通风形式,通风时打开粮仓南立面两个轴流风机,风机抽吸粮仓顶部空气

至室外,造成粮仓内部负压环境,在压差作用下空气从下部通风口进入地上笼穿过粮堆并被排出室外,完成粮仓的通风过程^[12]。通风示意图如图3所示。

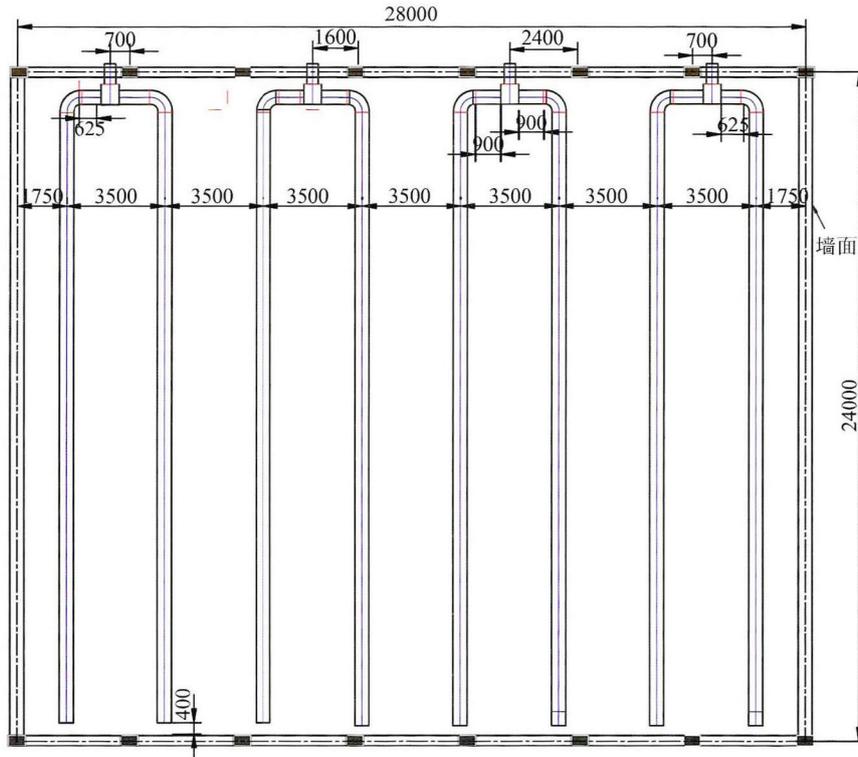


图2 40号仓通风笼平面布置图/mm

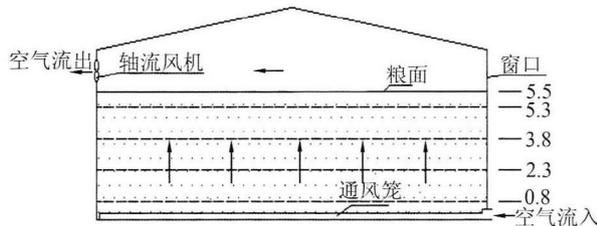


图3 垂直上通风示意图/m

1.2 数学模型

粮堆是由粮食颗粒堆积而成的,是一种典型的多孔介质。通风的过程是粮粒与周围空气进行热湿交换的过程,即多孔介质的传热传质过程。通过建立热平衡公式、水分平衡公式等来描述粮堆内的热湿传递过程。

1.2.1 热平衡公式

根据局部热平衡理论,热平衡公式可以由式(1)表示为

$$m_a \Delta t c_{pa} (T_i - T_0) + m_g c_{pw} (T_w - T_0) + (h_i - h_0) m_a \Delta t l / l_s = 0 \quad (1)$$

式中: m_a 为空气的质量 kg/h; Δt 为时间增量 h; m_g 为粮层中的小麦质量 kg; c_{pw} 为小麦的比热值, kcal/(kg·°C); h_i 、 h_0 分别为进风焓、出风焓, kcal/kg; T_w 、 T_0 、 T_i 分别为粮堆内部温度、进风温度、出风温度, °C; l 为小麦水分中的蒸发潜热, kcal/kg; l_s 为自由水分的蒸发潜热, kcal/kg。

Viravanichai 给出了 T_w 在 -33.5 至 21.8 °C 时的小麦的 c_{pw} 值,由式(2)^[13] 表示为

$$c_{pw} = \begin{cases} 0.250 + 0.00743M, & -33.5 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_w < -21.4 \text{ }^\circ\text{C} \\ 0.279 + 0.00580M, & -21.4 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_w < -10.8 \text{ }^\circ\text{C} \\ 0.297 + 0.00708M, & -10.8 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_w < 0.6 \text{ }^\circ\text{C} \\ 0.245 + 0.01058M, & 0.6 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_w < 8.9 \text{ }^\circ\text{C} \\ 0.273 + 0.00933M, & 8.9 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_w < 21.8 \text{ }^\circ\text{C} \end{cases} \quad (2)$$

l/l_s 和 l_s 的计算公式由式(3)、(4)^[14] 表示为

$$l/l_s = 1 + 23 \exp(-0.40M) \quad (3)$$

$$l_s = 597.768 - 0.56983T_w \quad (4)$$

式中: M 为小麦的水分含量(干基)。

1.2.2 水分平衡公式

根据质量守恒原理,水分平衡公式由式(5)表示为

$$(W_i - W_0) 100 m_a \Delta t + (M_0 - M_i) m_d = 0 \quad (5)$$

式中： m_d 为粮层中的固体质量 kg ； W_i 为空气的初始湿度比率； W_0 为时间增量 Δt 内空气的湿度比率； M_0 为时间增量 Δt 内模拟的小麦对水分（干基）； M_i 为小麦堆的初始水分（干基）。

1.2.3 模型实现

模型是根据薄层理论基于局部热质平衡原理和热湿耦合规律采用集总参数的方法建立的。仓储粮堆是一种复杂的多孔介质，其复杂性主要表现在 2 个方面^[15]：

- (1) 仓储散装小麦粮堆孔隙不确定，因为小麦籽粒的堆放形态具有随意性；
- (2) 小麦堆与普通多孔介质不同，由于其本身具有的生物特性，使其具有吸湿和解吸湿的性质。

空气流经粮堆进行热质交换，若以小麦堆整体作为研究对象，会使问题复杂化。因此，为方便模型建立，根据薄层理论将小麦堆沿气流方向划分为相同厚度的薄层，以薄层为基础进行数值模拟计算^[16]。

基于 Fortran 语言将建立的数学模型编程，对公式求解。程序运行初始，需要调入进风状态参数文件，文件内容包括空气逐时的温度和相对湿度、粮堆的深度、粮层的厚度、空气流速、谷物的初始水分和初始温度等，运行程序，可以得到粮食通风后的温度、湿度、水分含量等值。将模拟数值和实验所测的数值利用 origin 软件绘制图表，可以直观地进行对比分析。Fortran 运行界面如图 4 所示。

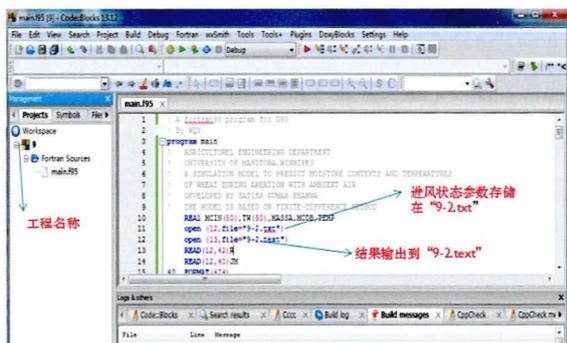


图 4 程序运行界面图

进行逐时的监测。温度传感器采用美国 DALLAS 公司生产的可组网式数字温度传感器 DS1820，热电偶测温范围为 $-55 \sim +125 \text{ }^\circ\text{C}$ ，测温误差 $\leq \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。其测温探头布置在粮堆高度 0.8、2.3、3.8、5.3 m 处，每层选取 5 个探头，平面布置如图 5 所示。

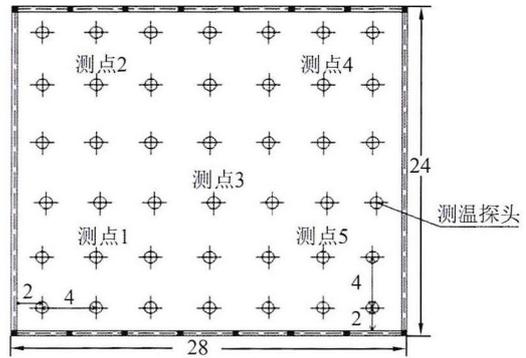


图 5 测点布置平面图/m

同样在测粮食水分时，在这些测温点取样，测定粮食的水分含量。取样时做好标记，且每次取样应装满存放袋，以满足筒式粮食水分快速测定仪的使用要求。将样品带回实验室静置 3 h，使粮食温度达到室温，然后用筒式粮食水分快速测定仪 QLY-T 型（青州巨丰）测定每个样品的水分含量，如图 6 所示。此筒式粮食水分快速测定仪具有读数稳定、直观、方便、测量精度高、测试速度快的特点，适用于测定小麦的水分含量。最后对每一层样品的水分含量取平均值，作为所在粮层粮食的水分含量。



图 6 QLY-T 型水分测定仪图

2 储粮模型初始参数及实验数据测定

2.1 实验数据测定

鲁中粮库 40 号仓具体通风时间为 2016 年 10 月 22 日上午 8 时~2016 年 10 月 28 日上午 8 时，通风时长为 144 h，为降温降水通风过程。进入粮仓内的空气是室外大气，室外空气温湿度用温湿度仪进行逐时的监测及记录。用粮情监测系统对粮食温度

进风的表现风速通过在通风口处利用 L 型毕托管、压力计，采用环环法测得^[17]。具体测量方法如下：

- (1) 根据通风口内径 480 cm 将圆管截面分为 4 个面积相等的同心圆环，在各圆环的中心线上布置测点，经计算毕托管直管插入长度分别为 15、50、93、155、325、387、430、464 cm，在直管相应位置做标记。
- (2) 为正确选择测量点断面，确保测点在气流流动平稳的直管段，在距端口 2 m 处的风管上进行水平和竖直方向穿孔，皮托管测量时应当将全压孔

对准气流方向,以指向杆指示,静压在气流的垂直方向上。测量点插入孔应避免漏风,可防止该断面上气流干扰。用皮托管只能测得管道断面上某一点的流速,但计算流量时要用平均流速,由于断面流量分布不均匀,因此断面上应多测几点,以求取平均值。风速测定如图7所示。

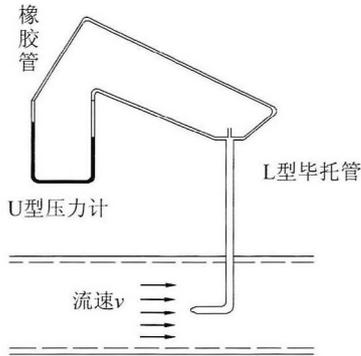


图7 风速测定示意图

(3) 将压差转换成表观风速,其换算由式(6)

表示为

$$\frac{1}{2}\rho v^2 = \Delta P \quad (6)$$

式中: ρ 为空气密度,取 1.2 kg/m^3 ; ΔP 为各测点压差值的平均值,Pa; v 为空气流速, m^3/s 。

2.2 初始参数设定

取得相关参数后,对通风过程进行程序模拟,经回归分析,粮层厚度取 15.2 cm ,具体通风参数见表1。为验证模型的准确性,程序模拟时设置的时间步长为 4 h ,每隔 4 h 程序会调取相应时刻的温度、相对湿度值进行运算并输出结果值,程序总运行时间为 0.256 s ,进风温度、相对湿度分别如图8、9所示。

表1 粮库测定的初始参数

通风时间/h	实际水分输送值/最大水分输送值 R/%	小麦的初始水分含量(湿基百分比) I/%	小麦的初始温度 /°C	杂质含量 /($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	空气表观流速 /($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)
144	80	11.9	26.3	0.5%	0.2256

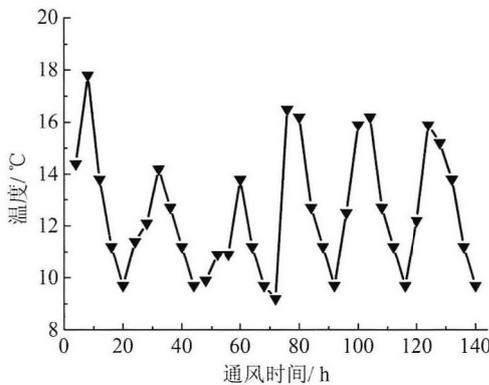


图8 进风温度图

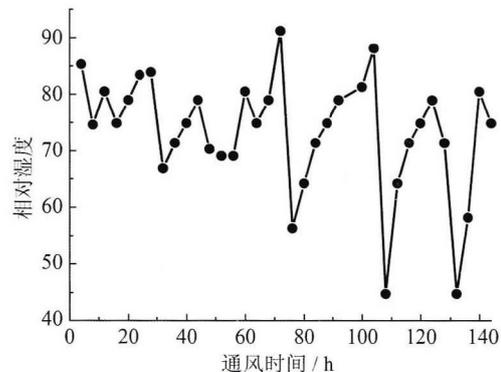


图9 进风相对湿度图

3 模型模拟数据与实测数据对比分析

3.1 粮堆温度的对比分析

粮库通风 144 h 后,运用Fortran程序得出的温度、水分含量值与测试数据对比结果如图10所示。

图10中,通风前粮堆中心温度高、上下层粮温低。因为夏季粮食入库以来,室外气温高,不能进行很好的通风,粮食堆积起来之后由于中心处粮堆的热量不能有效的散出,造成中心温度高于上层和下层的温度。由图10(a)~(c)可知,通风结束后每层的粮堆都得到了有效的降温。图10(d)中上层粮食

温度先上升然后通风一段时间后温度有所下降最后达到平衡,原因是刚开始通风的时候粮仓下层由于释放潜热导致上层粮食温度上升,随着通风时间的延长粮食温度开始下降。程序模拟的粮温和粮情检测系统的系统值具有相同的变化趋势,程序模拟的粮食温度比系统的测量值普遍偏低,但模拟结果与实验结果最大温差为 $2.13 \text{ }^\circ\text{C}$,在温度预测误差允许范围内。

3.2 粮堆水分含量的对比分析

在不同时刻下,随着粮堆高度的增加小麦水分的对比结果如图11所示。

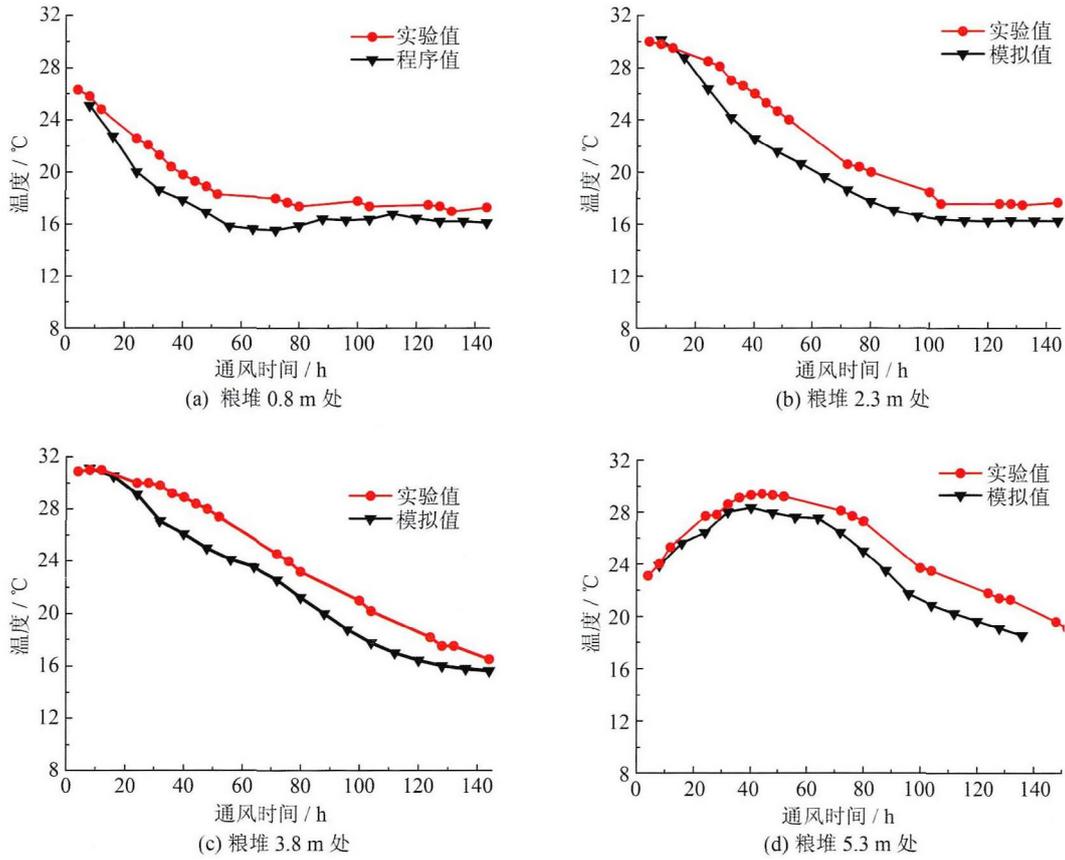


图 10 粮堆各层温度随通风时间的变化图

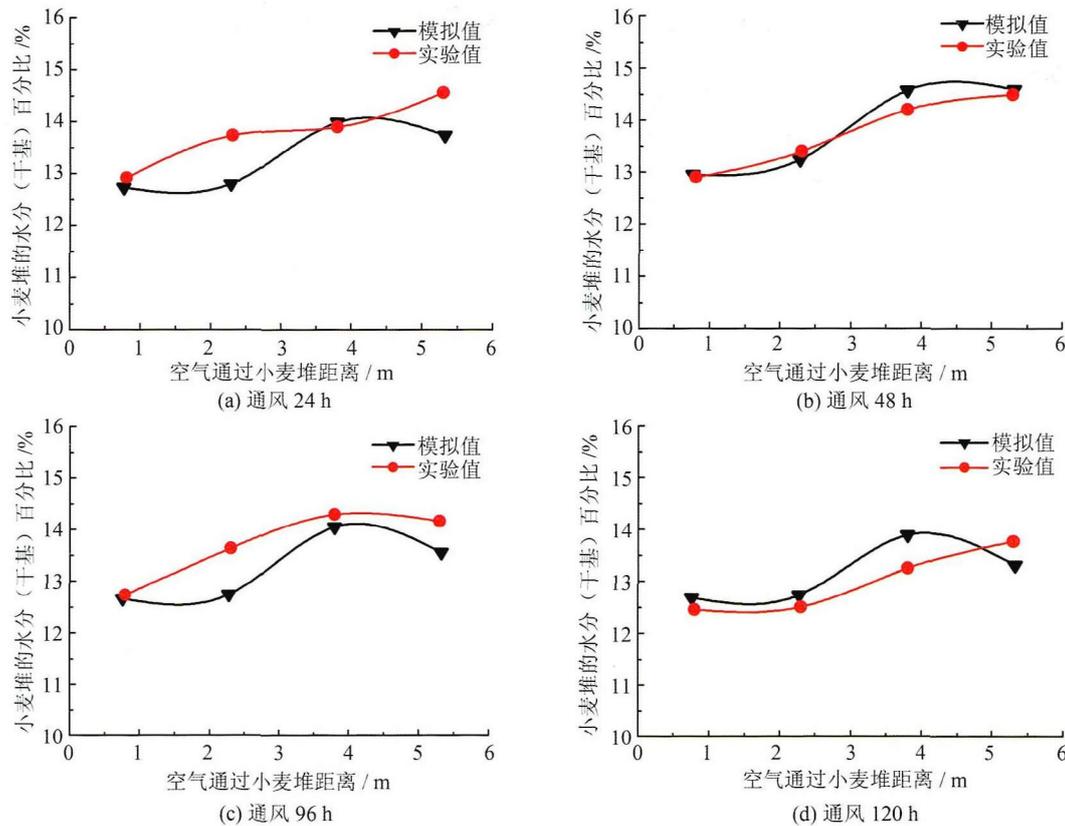


图 11 粮堆各层水分随着通风时间的变化图

就粮食水分而言,由图 11(a)~(d)可知:在通风时,粮堆自下往上粮食水分存在上层水分比下层水分高的现象,并且随着通风时间的延长,上下层水分差值越来越小。通风 24 h 时水分含量的程序模拟值和实测值相差很小,通风 96 h 时,程序模拟的水分含量比实际测量值普遍偏低,这是因为通风后期经过传热传质籽粒间空气与通风前期相比更接近于平衡状态,使得水分的实际传递速率要更大。且通风结束后,粮堆内部的水分含量平均值为 12.5%,这将有效的防止虫害和霉变,有利于提高储粮的稳定性。程序模拟的水分含量与人工取样实际测量的值变化趋势相同,模拟值与实验值的最大差值出现在通风 96 h 时,2.3 m 粮堆处,仅差 0.93%。通过对两者水分含量的对比分析进一步验证了这一模型的准确性和可靠性。

4 结论

基于局部热平衡原理,采用 Fortran 编程模拟了昌乐粮库不同粮层的粮食温度和水分随时间的变化情况,并与实验测得数据对比分析表明:

(1) 程序模拟的粮食温度、水分含量与其相应的实测值变化趋势相吻合,粮堆的水分含量最大相差 0.93%,温度差值最大为 2.1℃。虽然存在偏差,但偏差不大,在可接受范围内。验证了模型的准确性和可靠性,通过分析误差产生的原因将进一步完善模型。

(2) 相同的模拟工况下,采用文章建立的模型模拟时间仅为 0.256 s,耗时短,且模型操作方便,占用内存小,相比于其他流体模拟软件具有更大的优势。

(3) 通过昌乐粮库实仓测试验证了由 Fortran 程序设计的数学模型的实用性。通过程序调整物性参数,模型也可以应用于其他具有复杂生物特性的物质储存中,将有利于物质的安全储存,减少储存过程的损耗,从而提高经济效益,也对以后的安全储粮有着重要的指导意义。

参考文献:

- [1] Sun D. W. , Woods J. L. . Deep bed simulation of the cooling of stored grain with ambient air: a test bed for ventilation control strategies [J]. *Journal of Stored Products Research* ,1997 ,33:299-312.
- [2] Holmes E. S. . Aerating farm-storage grain [M]. Manhattan: Cooperative Extension Service Kansas State University Press ,1978.
- [3] 王远成,段海峰,张来林. 就仓通风时粮堆内部热湿耦合传递过程的数值预测[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)* 2009 ,30(6):75-79.
- [4] 林瑞泰. 多孔介质传热传质引论[M]. 北京:科学出版社,1995.
- [5] 冯黎明,陈卫东,孙福艳. 粮仓通风智能控制技术和实现[J]. *河南工业大学学报* 2014 34(6):106-108.
- [6] 吕宗旺,冯黎明,孙福艳. 粮仓通风 CFD 技术研究[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)* 2013 34(6):105-109.
- [7] 王远成,段海峰,张来林. 就仓通风时粮堆内部热湿耦合传递过程中的数值预测[J]. *河南工业大学学报* 2009 30(6):76-77.
- [8] 王远成,魏雷,刘伟,等. 储粮保水降温通风关键技术研究[J]. *中国粮油学报* 2008 23(5):141-145.
- [9] 王远成,张忠杰,吴子丹,等. 计算流体力学技术在小麦储藏中的应用[J]. *中国粮油学报* 2008 27(5):86-90.
- [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 辑)* 2014 29(4):487-496.
- [11] 张晓静,王远成,潘钰,等. 静态粮堆冷却与干燥通风温湿度模拟研究[J]. *山东建筑大学学报* 2016 31(1):47-52.
- [12] 张波,王远成,高帅,等. 平房仓横向谷冷通风仓内粮堆热湿传递的数值模拟研究[J]. *粮食储藏技术* 2015 21(5):10-14.
- [13] Viravanichai S. . Effect of moisture content and temperature on specific heat of wheat [J]. *Journal of Stored Products Research* ,1971 ,31(6):51-52.
- [14] Othmer D. F. , Huang H. . Correlating vapour pressure and latent heat data [J]. *Chemical Engineering & Technology* ,1940 ,32(2):841-846.
- [15] Szafran R. G. , Kmiec A. . CFD modeling of heat and mass transfer in a spouted bed dryer [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 2004 43(4):1113-1124.
- [16] Abbouda S. K. , Chung D. S. , Seib P. A. , et al. Heat and mass transfer in stored milo [J]. *Transactions of the Amer Soc Agricultural & Biological Engineers* ,1992 35(5):1575-1580.
- [17] 孙一坚,沈恒根. 工业通风[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.

(学科责编:赵成龙)