



储粮通风模型及实仓应用研究*

员怡怡 王远成 杨开敏 尉尧方

(山东建筑大学热能工程学院 250101)

摘 要 在对某粮库进行实仓通风测试的基础上, 基于局部热平衡和质量平衡原理, 建立储粮就仓通风模型, 采用 Fortran 编程对储粮通风时粮堆内部热湿耦合传递过程进行了数值求解, 得到了温度和水分变化规律, 并将模拟结果与实测数据进行对比。进一步通过在其他粮库的应用对该模型进行验证和分析, 其研究结果对储粮通风具有一定的参考意义。

关键词 通风模型 Fortran 编程 实仓测试 数值模拟

由于外界多变的环境和谷物本身的呼吸作用以及害虫等的影响, 粮堆内部出现温度梯度, 从而引起水分的变化, 导致局部环境变化引起霉变, 损害粮食的品质, 由此可见, 选择合适的时机进行通风是降低粮堆内部温度和水分, 保证安全储粮的重要措施。

为了解通风过程中粮食温度和水分的变化规律, 学者们进行了大量的研究, 冯黎明等开展了粮仓通风降温的试验研究^[1], 分析了温度的变化规律; 随着数值模拟方法的发展, 王远成等对圆筒仓和房式仓内自然对流对粮堆热湿传递的影响以及温度和水分变化规律进行了数值模拟^[2-5], 为实验研究提供理论基础; 吕宗旺等通过建立实仓物理模型进行 CFD 数值模拟, 优化了通风数学模型^[6]; 张晓静等通过搭建实验台验证了程序模拟结果的可靠性^[7]。基于上述研究, 为使储粮通风过程预测和控制可以更加简便和快捷, 本文建立了储粮就仓通风数学模型, 并采用数值模拟的方法, 模拟在降温干燥通风过程中粮堆内部的温度和水分变化, 并在聊城粮库 24 号仓进行了实测, 将模拟结果与实测数据进行对比, 验证该模型的准确性和可行性。

1 数学模型

粮食通风的过程是冷却干燥的过程, 在通风过

程中粮粒与周围空气进行热湿交换, 即多孔介质的传热传质过程, 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。

1.1 热平衡公式

根据局部热平衡理论, 热平衡公式可以表示为:

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

其中: 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·℃); 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、粮堆进风温度、粮堆出风温度, ℃; 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·h₂O)。

T_w 在 -33.5℃ ~ 21.8℃ 时小麦 c_{pw} 的值采用 Viravanichai^[8] 给出的值。公式中 l/l_s 的计算公式由式②、③^[9] 确定:

$$l/l_s = 1 + 23 \exp(-0.40M) \quad (2)$$

$$l_s = 597.768 - 0.569837T_w \quad (3)$$

式中: M 是小麦水分, 单位是干基百分比。

1.2 水分平衡公式

根据质量守恒原理, 水分平衡公式表示为:

* 基金项目: 国家重点专项 (2016YFD0400100, 2016YFD0401002); 国家粮食公益专项 (201513001); 国家自然科学基金项目资助 (51276102)

通讯地址: 济南市临港开发区凤鸣路

$(W_i - W_0) 100m_a \Delta t + (M_0 - M_i) m_d = 0$ ④

其中： m_d 是粮层中的小麦干重，单位是 kg； M_0 是在时间增量 Δt 内模拟的小麦堆水分，单位是干基百分比； M_i 是小麦堆的初始水分，单位是干基百分比； Δt 是时间增量，单位是 h。

1.3 模型实现

粮堆是一种结构复杂的多孔介质，其复杂性具体表现为两个方面^[10]：①由于小麦颗粒堆积时分布的随意性，堆积起来无法确定它的孔隙；②不同于一般的多孔介质，粮食颗粒是活的生命体，自身可以进行呼吸作用，具有吸湿和解吸湿的性质。

本文建立的数学模型采用集总参数法，根据薄层理论基于局部热、质平衡原理和热湿耦合规律建立的。然后对建立的数学模型进行编程离散，配合通风过程进行时的初始和边界条件，求解相应的控制方程。通过运行计算程序，可得到粮食通风后的温度、湿度、水分含量等值。最后借助 origin 软件对数据进行处理，并进一步完成计算结果和试验数据的对比分析。

2 通风模型的建立

2.1 试验仓房

聊城库 24 号仓通风为地上笼垂直通风模式，采用 Y132 M-4 型离心风机为通风过程提供动力。24 号仓在冬季通风，具体时间为 2016 年 12 月 3 日上午 8 时到 12 月 4 日上午 8 时，通风时长 24 h。聊城库 24 号仓长 31.5 m，跨度 20.6 m，高 10 m，其内粮堆高度为 4.9 m，储粮 2551.273 t。粮仓通风示意图如图 1 所示。

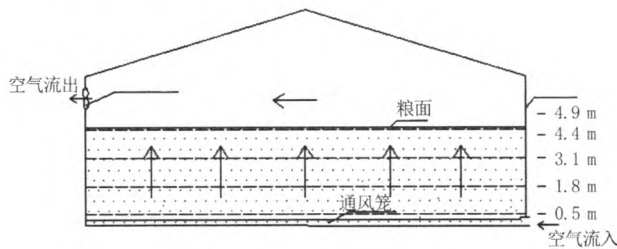


图 1 垂直上通风示意图

表 1 24 号仓通风参数表

通风时间 (h)	R	小麦的初始水 分含量 (%)	小麦的初始 温度 (℃)	进风的干球 温度 (℃)	通风的相对 湿度 (%)	空气流速 (m/min)
24	50	13.62	21.1	见图 3	见图 4	1.75

通风时首先打开窗户，然后启动离心风机，在离心风机的抽吸作用下仓内压强降低，空气在压差作用下由室外进入通风笼，再进入小麦堆进行热、质交换之后由风机排出仓外，至此完成通风过程。

试验中，把粮仓划分为下层、中下层、中上层、上层 4 层。粮仓内安装了温湿一体化监测系统，其测量温度和水份含量的探头分别埋设在粮堆高度 0.5 m、1.8 m、3.1 m、4.4 m 处，每个水平高度上布置 13 个探头，如图 2 所示。

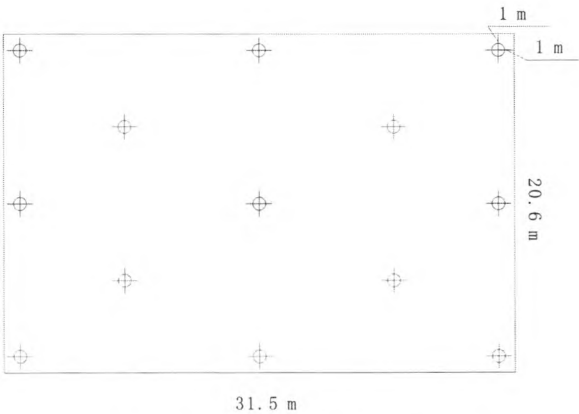


图 2 聊城库粮仓探头布置平面图

2.2 模型参数确定

- 通风过程数值计算模型中涉及的需要通过测试来确定的各参数：
- ①粮食的初始温度及通风过程中的温度由粮情检测系统测得。
 - ②粮食的初始水分及通风过程中的粮食水分含量通过水分测定仪进行测定。
 - ③进风的温度和相对湿度由温湿度仪表测得。
 - ④进风的表观风速通过在通风口处利用 L 型比托管、压力计测得。

具体测试方法见文献 11，取得相关参数后对该通风过程进行程序模拟，通风参数如表 1，进风的干球温度和空气相对湿度如图 3 和图 4。

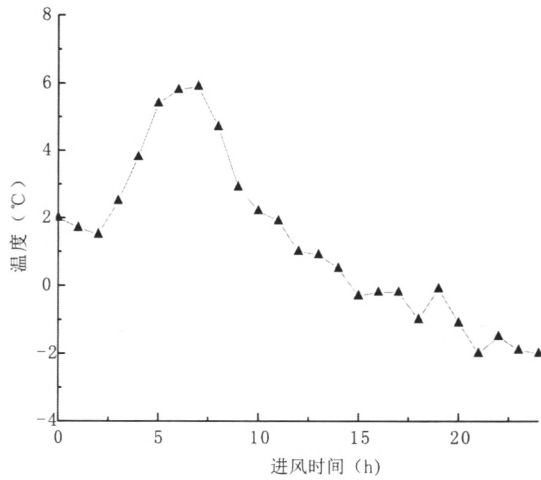


图3 进风的干球温度

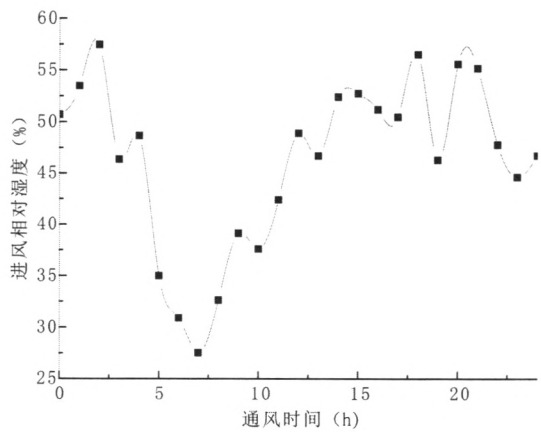
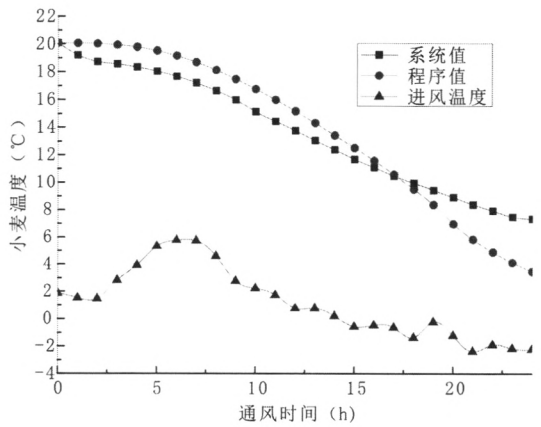


图4 进风的相对湿度

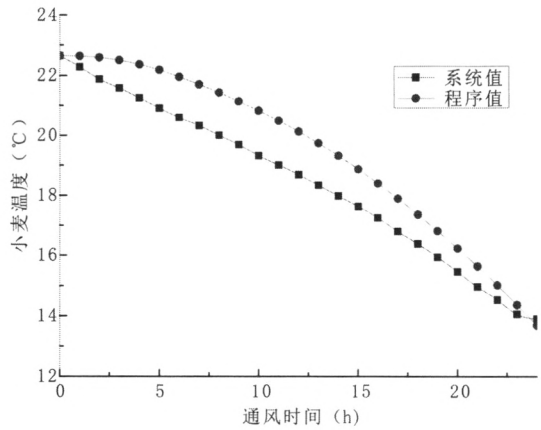
3 结果与分析

3.1 模拟结果与实测数据对比分析

粮仓通风 24 h 后,运用本文自主编写的程序计算得出温度、水分含量值,以程序值表示;实测数据通过温湿一体化监测系统得到,以系统值表示,二者对比结果如图 5 和图 6 所示。

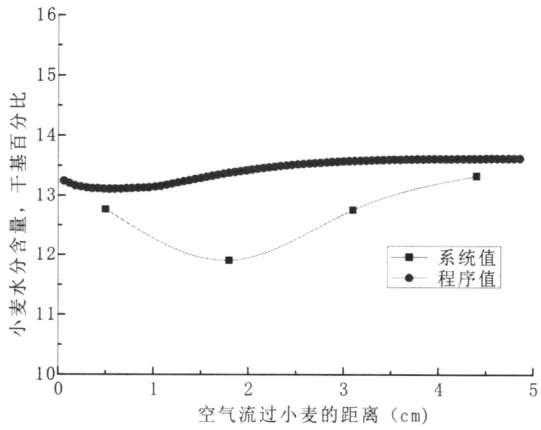


(a) 小麦堆 1.8 m 处

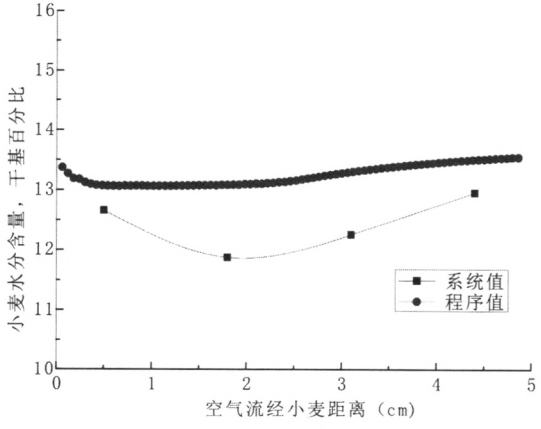


(b) 小麦堆 3.1 m 处

图5 通风 24 h 小麦堆不同粮层深度的粮温



(a) 通风 12 h



(b) 通风 24 h

图6 不同通风时刻小麦堆的水分含量

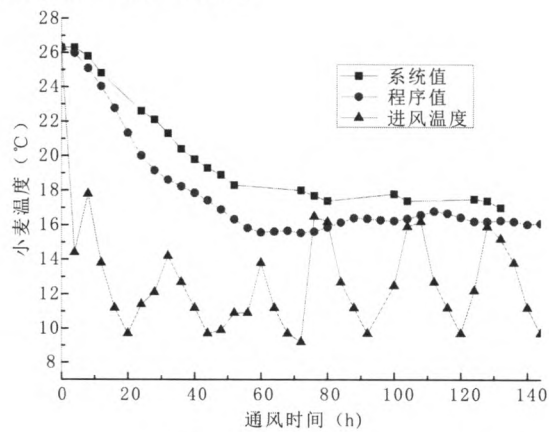
分析图 5 可见,在小麦堆高度 1.8 m 处,通风前 17 h,程序模拟的粮温比系统监测的该水平面处的粮温高约 2℃,之后程序模拟的粮温降温显著,比系统测量值低 3℃~4℃。在小麦堆高度 3.1 m 处,程序模拟的粮温比系统测量值普遍偏高,偏差约为 2℃。

分析图 6 可见,通风过程中程序模拟的小麦水分含量比系统测得值普遍偏高,其最大差值出现在

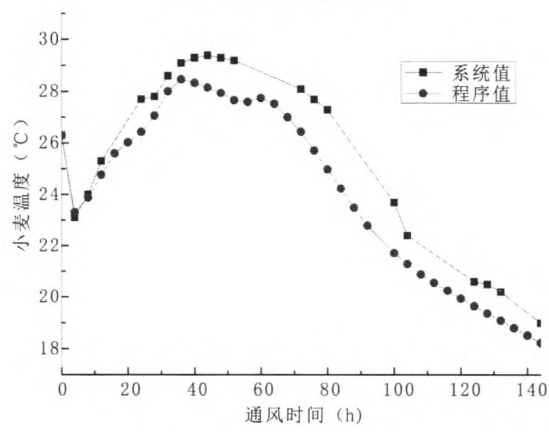
粮堆中部,最大可达 1.5 个百分点的干基水分,系统测得的小麦水分含量比程序值偏低,监测系统本身存在的误差是导致水分含量程序值与系统值差值较大的原因。

3.2 其他粮库模拟分析

为了进一步验证模型的可行性和准确性,运用该模型对其他粮仓的通风过程进行分析。选取该仓进行的某一通风过程,持续 144 h,同样将该期间粮堆内温度和水分的程序值和系统值进行对比分析,结果如图 7~图 8 所示。

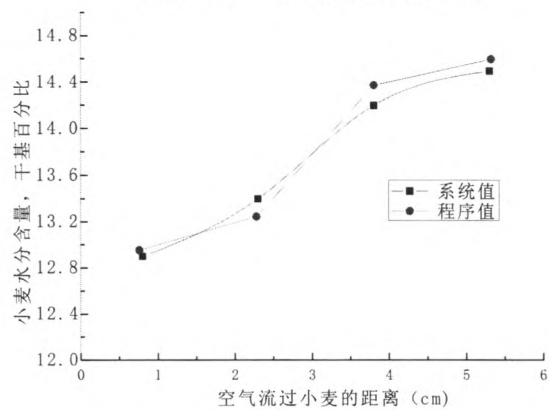


(a) 小麦堆 0.8 m 处

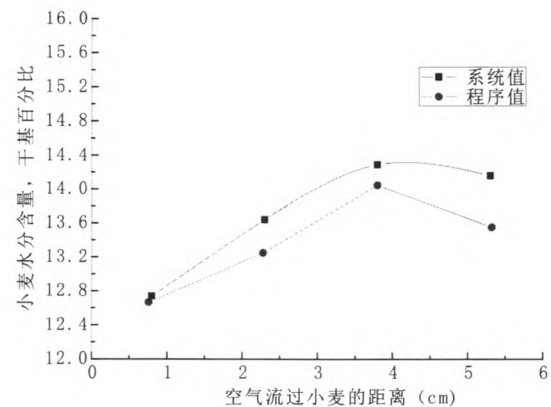


(b) 小麦堆 5.3 m 处

图 7 通风 144 h 小麦堆不同粮层深度的粮温



(a) 通风 24 h



(b) 通风 96 h

图 8 不同通风时刻小麦堆的水分含量

分析可见,由于监测系统本身存在的误差,使得程序模拟的粮食温度比系统的测量值普遍偏低,最大偏差在 2℃左右,水分最大偏差为 0.4 个百分点的干基水分,但是程序模拟的粮温和粮情检测的粮温值具有相同的变化趋势,观察图 8 可见程序模拟的水分含量与实测值变化趋势相同,由此可验证该模型的正确性。

3.3 通风过程分析

由图 5 (a) 可见,在通风时间较短的情况下,外界大气环境温度对小麦温度并无太大影响。分析图 7 (a),在通风时间变长的情况下,明显可以看出,进风温度已对小麦的温度产生一定的影响,在 70 h、92 h、125 h 处,进风温度的上升并没有马上引起小麦温度的上升,而是存在延迟作用。

在通风过程中,小麦的温度和水分含量是相互耦合的,小麦水分含量的测量误差必定会影响到小麦温度的测量精度,粮仓通风过程为小麦降水的过程,过程中潜热会降低,因此由温湿一体化监测系统测得的小麦水分含量偏低,可以推测出系统监测的小麦温度会偏低,这也是与系统监测值相比程序测得的温度偏高的原因。

在同样的工况下进行通风模拟,使用其他 CFD 软件模拟大约需要 40 min 的计算和数据处理时间,而使用程序运算,所用时间不到 1 s,非常迅速,可以节省大量的时间,同时也能较好预测分析粮仓通风过程中温度、水分的变化,为相关工作者提供了便利。

4 结论

本文基于局部热平衡原理,建立储粮通风数学

模型,使用 Fortran 编程计算,并通过聊城粮库实仓测试验证。同时在其他粮库使用该模型进行通风模拟计算,进一步验证了该模型的正确性。将模拟结果与实验测得数据进行对比分析发现:

(1) 由程序模拟得到的温度和水分值变化趋势与监测系统得到的实际值变化趋势相吻合,温度最大偏差为 2℃,水分最大偏差为 1.5 个百分点的干基水分。

(2) 使用本文的程序模拟储粮通风过程,所用时间不到 1 s,且操作简单,对专业知识没有强制性要求,计算效率较高,方便使用。

(3) 该模型能较好预测分析粮仓通风过程中温度、水分的变化,为创造良好的储存环境,减少粮食的损耗,保证品质,同时节省人力物力,提供了理论支持。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 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
- 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中的数值预测 [J]. 河南工业大学学报, 2009, 30 (6) 76~77
- 4 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
- 5 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
- 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 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
- 8 Viravanichai S. Effect of moisture content and temperature on specific heat of wheat [J]. Journal of? Stored? Products Research, 1971, 31 (6) 51~52
- 9 Othmer D. F, Huang H. Correlating vapour pressure and latent heat data [J]. Chemical Engineering Science, 1940, 32 (2) 841~846
- 10 Szafran R. G, Kmiec A. CFD modeling of heat and mass transfer in a spouted bed dryer [J]. ? Chemical Engineering Science, 2004, 43 (4) 1113~1124
- 11 尉尧方,王远成,王兴周,等. 储粮通风模型的构建及其应用分析 [J]. 山东建筑大学学报, 2017, X (03) 251~257

(收稿日期: 2017 08 22)

AN AERATION MODEL OF GRAIN BULK AND ITS APPLICATION

Yuan Yiyi Wang Yuancheng Yang Kaimin Yu Yaofang

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

The paper based on the principle of local heat and mass balance, established the model of grain interior ventilation, made a test in grain depot during grain storage ventilation and recorded data. Fortran programming was used to simulate the internal heat with moisture coupling transfer process, and then to get the variation rule of temperature and water in the grain silo. The simulation results was compared with the measured data. Furthermore, the model is verified and analyzed in other grain depots. The results have certain guiding significance for the scientific ventilation in stored grain.

Keywords: ventilation model, Fortran programming, field test, numerical simulation