

文章编号 :1673-2383(2016)05-0100-07

网络出版网址 <http://www.cnki.net/kcms/detail/41.1378.N.20161025.1327.036.html>

网络出版时间 2016-10-25 13:27:44

静态粮堆就仓通风的数学模型及模拟研究

张晓静,王远成*,杨 君,尉尧方

(山东建筑大学 热能工程学院,山东 济南 250101)

摘要 :小麦储藏过程中,温度和水分是安全储粮的关键因素。迄今为止,相关研究人员设计了多种数学模型来预测通风过程中小麦堆的温度和水分,然而这些模型一般需要占用大量的内存且计算周期很长。基于局部热质平衡原理采用 Fortran 程序设计了一套新的数学模型,有效地解决了这些问题。通过对不同通风情况下粮堆温度和水分变化的模拟研究,探索了粮堆通风过程中温度和水分变化的一般规律,并且首次提出 R 值(粮层内实际传递的水分与在平衡状态下传递的水分之比),使水分传递更加接近实际情况,通过与试验结果的比较,验证了该模型的准确性与可行性,对以后指导安全储粮具有非常重要的意义。

关键词 :Fortran 程序;储粮通风;传热传质

中图分类号 :TS210

文献标志码 :B

DOI:10.16433/j.cnki.issn1673-2383.2016.05.018

0 引言

粮食是一种典型的多孔介质^[1],通风过程中粮堆内部的流动是一个非常复杂的过程,它与粮堆热物性参数和粮食生物特性等多种因素有关。大型平房仓是我国储粮的重要设施,机械通风是实现安全储粮、保证粮食品质、提高经济效益的重要举措^[2],研究人员提出原始水分 16.5%~18.0% 的粮食,利用机械通风完全可均匀地将其干燥使之达到安全水分之内^[3]。就仓机械通风在确保储粮安全方面,发挥着至关重要的作用。

为了掌握通风过程中储粮生态系统变化规律,储藏工作者进行了大量的测试工作。Sharma^[4]开发了仿真模型来描述在可变参数通风下热与质量传递现象。吕宗旺等^[5]利用 CFD 技术对粮仓进行了降温模拟,王远成等^[6-8]对大型房式仓地上笼粮堆温度和水分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热湿耦合传递进行了数值模拟研究。

以上发展的模型虽然能比较准确地模拟通风

过程中温度和水分的变化,但是一般都存在计算周期长,占用计算机内存大的缺陷。作者通过集总参数的方法结合 Fortran 程序设计了一套新的数学模型。为了与前人模拟结果进行对比,作者对储粮过程中小麦堆的温度和水分变化进行模拟,获得在不同通风条件下小麦堆的温度和水分,通过与试验结果的比较也证明这个模型的准确性与可行性。

1 模型与试验

1.1 物理模型的建立

将粮堆划分为相等厚度的谷物薄层, ΔH 为空间增量(cm), T_i 为进风温度($^{\circ}\text{C}$), W_i 为进风空气湿度比率(kg 水/kg 干空气), T_o 为出风温度($^{\circ}\text{C}$), T_w 为小麦堆温度($^{\circ}\text{C}$), W_o 为出风空气湿度比率(kg 水/kg 干空气)。这些粮层间的空气流动的方向如图 1 所示,建立仿真模型的目的是预测在规定的时间内每一层粮层最终的温度和水分含量。从上一层排出的空气状态被用作输入下一层粮层的条件,此过程重复,直到在一段时间的增量上整个粮堆上的模拟完成。然后该模型以这段时间增量末期的粮堆状态为初始条件,开始模拟在进风状态下下一个时间增量的第一层的小麦状态,然后使用和第一次时间增量相同的程序,模拟了在第二个时间增量的整个小麦堆。不断循环直到完成小麦的整个通风过程。

收稿日期 2016-02-29

基金项目 :国家自然科学基金项目(51276102) 国家粮食公益专项(201513001, 2015449-001-03)

作者简介 张晓静(1990—),女,山东平度人,硕士研究生,主要从事多孔介质热质传递等方面的研究。

* 通信作者

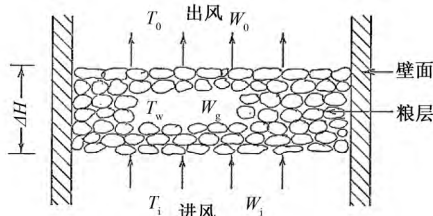


图1 粮层间空气流动方向示意图

Fig.1 The air flow direction between the grain layers

1.2 数学模型的建立

1.2.1 焓湿关系

Brooker^[9]给出以下焓湿关系来计算空气的属性:

当干球温度 T_{db} 大于或等于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 饱和蒸汽压 $P_s(\text{g}/\text{cm}^2)$ 由下式算得:

$$P_s = \exp [58.885 - 8 - 12 \cdot 301.69 / (491.69 + 1.8T_{db}) - 5.169 \cdot 23 \ln(491.69 + 1.8T_{db})] \quad (1)$$

当干球温度 T_{db} 低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 饱和蒸汽压 $P_s(\text{g}/\text{cm}^2)$ 由下式算得:

$$P_s = \exp [27.645 - 2 - 11 \cdot 286.148 \cdot 9 / (491.69 + 1.8T_{db}) - 0.460 \cdot 57 \ln(491.69 + 1.8T_{db})] \quad (2)$$

在给定湿度下的气体压力 $P_v(\text{g}/\text{cm}^2)$ 定义为:

$$P_v = (RH)P_s \quad (3)$$

式中: RH 是进风的相对湿度, 用小数表示。

空气的湿度比率 W (每千克空气所含的水) 由下式给出:

$$W = 0.621 \cdot 9 P_v / (P_{atm} - P_v) \quad (4)$$

式中: P_{atm} 是标准大气压, g/cm^2 。

空气的比体积 $v_{sa}(\text{m}^3/\text{kg})$ (干空气) 定义为:

$$v_{sa} = 0.007 \cdot 573 (491.69 + 1.8T_{db}) (1 + 1.605 \cdot 5W) \quad (5)$$

空气的质量流速 $m_a(\text{kg} \text{ 干空气}/\text{h})$:

$$m_a = Q_a / v_{sa} \quad (6)$$

式中: Q_a 是空气的体积流量, m^3/h 。

空气的比热 $c_{pa}(\text{kcal}/\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$:

$$c_{pa} = 0.240 \cdot 5 + 0.44W \quad (7)$$

自由水分的蒸发潜热 $l_s(\text{kcal}/\text{kg})$:

$$l_s = 597.768 - 0.569 \cdot 83T \quad (8)$$

式中: T 是粮堆的温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

空气焓 $h(\text{kcal}/\text{kg} \text{ 干空气})$ 由 ASHRAE^[10]基本手册给出为:

$$h = 4.267 + 0.240T_{db} + W(597.386 + 0.444T_{db}) \quad (9)$$

1.2.2 小麦基本属性

Othmer^[11]推导出了小麦达到平衡时空气的相对湿度 RH_e (小数),

$$RH_e = \exp[(l/l_s) \ln(2.048 \cdot 16P_s) + c] / 2.048 \cdot 16P_s \quad (10)$$

$$l/l_s = 1 + 23 \exp(-0.40M) \quad (11)$$

$$c = -3.34 \times 10^4 M^{-4.0} \quad (12)$$

式中: l 是小麦中水分的蒸发潜热, kcal/kg ; c 是常数, M 是小麦的水分, 单位是干基百分比。

Viravanichai^[12]得到了热量的以下关系, 硬红春小麦在温度范围为 $-33.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $21.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的小麦的比热 c_{pw} ($\text{kcal}/\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$) 值:

$$c_{pw} = \begin{cases} 0.250 + 0.007 \cdot 43M & (-33.5 \sim -21.4\text{ }^{\circ}\text{C}) \\ 0.279 + 0.005 \cdot 80M & (-21.4 \sim -10.8\text{ }^{\circ}\text{C}) \\ 0.297 + 0.007 \cdot 08M & (-10.8 \sim -3.6\text{ }^{\circ}\text{C}) \\ 0.245 + 0.010 \cdot 58M & (0.6 \sim 8.9\text{ }^{\circ}\text{C}) \\ 0.273 + 0.009 \cdot 33M & (8.9 \sim 21.8\text{ }^{\circ}\text{C}) \end{cases} \quad (13)$$

1.2.3 热湿传递公式

根据局部热平衡, 可以得到公式:

空气损失的热 + 粮堆损失的热 + 蒸发潜热 = 0,

$$\text{即 } m_a \Delta t c_{pa} (T_i - T_o) + m_g c_{pw} (T_w - T_o) + (h_i - h_o) m_d \Delta t / l_s = 0 \quad (14)$$

式中: m_a 是空气的质量流速, kg/h ; m_g 是粮层中的小麦质量, kg ; h_i 是进风的焓, kcal/kg ; h_o 是出风的焓, kcal/kg 。

对于干燥过程, 可变形为:

空气损失的热 = 粮堆获得的热 + 蒸发潜热。

根据质量守恒原理, 可以得到以下公式:

空气损失的水分 + 粮堆吸收的水分 = 0,

$$\text{即 } (W_i - W_o) 100 m_a \Delta t + (M_o - M_i) m_d = 0 \quad (15)$$

式中: m_d 是粮层中的固体质量, kg ; M_o 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, h 。

对于干燥过程, 可变形为: 空气获得的水分 = 粮堆失去的水分。

本模型以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、粮堆的初始水分和初始温度为初始输入数据, 各种基础属性由上述公式计算得到。

进风的初始蒸汽压 $P_{vi}(\text{g}/\text{cm}^2)$, 可使用公式(1)或(2)和(3)利用温度 T_i 算得。类似地, 粮食的水分蒸汽压 $P_g(\text{g}/\text{cm}^2)$, 可以利用温度 T_w 和水分含量 M_i , 使用公式(1)或(2), (3), (10), (11)和(12)计算得到。

比较 P_{vi} , P_g , T_w , T_i 的关系, 存在下面4种可能:

加热干燥小麦: $T_i > T_w$, $P_{vi} < P_g$;

冷却加湿小麦: $T_i < T_w$, $P_{vi} > P_g$;

冷却干燥小麦: $T_i < T_w$, $P_{vi} < P_g$;

加热加湿小麦: $T_i > T_w$, $P_{vi} > P_g$ 。

以上4个过程中, 都达到了热质平衡。但是, 为了发展的数学模型, 假设在空气温度下首先发生水分传递, 然后发生热量传递。假定平衡时, 小麦

堆某一粮层的出风温度和该粮层的温度相同,出风比湿和粮层比湿达到平衡。在粮食通风过程中,温度的变化对粮食的影响比湿度变化影响得快。因此,当温度已经达到平衡时,水分尚未达到平衡。

当水分传递未达到平衡时,出风空气湿度比率可以通过下面的等式计算得到:

$$W_o = W_i + (W_e' - W_i) \frac{R}{100}, \quad (16)$$

式中: W_e' 是空气和小麦在湿度为 m_i 传质温度为 T_w 或 T_i 下达到平衡时的空气湿度比率, kg/kg 。

R (以百分比表示) 定义为: 粮层内实际传递的水分与在平衡状态下传递水分之比。干燥和调质试验是在温度为 $6.8 \sim 25.0$ $^{\circ}\text{C}$ 的范围内进行的, 通过反复的试验, R 值确定为 80。在 $-19.0 \sim 0$ $^{\circ}\text{C}$ 范围润湿测试使用的 R 为经验数值。 R 值在小麦堆粮层厚度和空气流速一定的情况下取决于空气和小麦的状态。

1.3 通风试验(图 2)

通风试验的试验设备是 Sharma^[4] 在实验室构造出来的。这个设备可以被分成 3 部分: 储存粮食的垂直通风柱, 调节空气的空气室, 调节穿过粮食

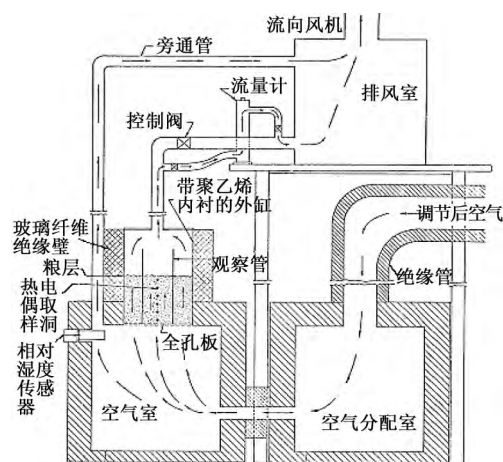


图 2 试验原理图

Fig.2 Air distribution system (Experiments principle diagram)

的空气的空气分配室。

1.4 初始条件的建立

模拟了 120 cm 深的粮堆冷却通风时的温度和湿度。初始条件如表 1 所示。

表 1 用于通风模型的变量

Table 1 Variables used in ventilation model

工况 标号	工况 类型	通风时间 /h	R 值	粮层厚度 /cm	小麦堆初始水分 含量(干基)/%	小麦堆初始 温度/ $^{\circ}\text{C}$	进风干球 温度/ $^{\circ}\text{C}$	进风相对 湿度/%	通风表观风速 /($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)
1	冷却加湿	25	80	15.2	12.18	27.9	6.8	70.1	1.96
2	冷却干燥	80	80	10	24.2	28.3	变化如图 6(a)	72	2.44
3	加热加湿	19	80	15.2	12.26	18.6	22.0	58.0	2.02
4	加热干燥	25	80	15.2	12.60	8.1	21.7	70.0	2.02

2 模拟结果与分析

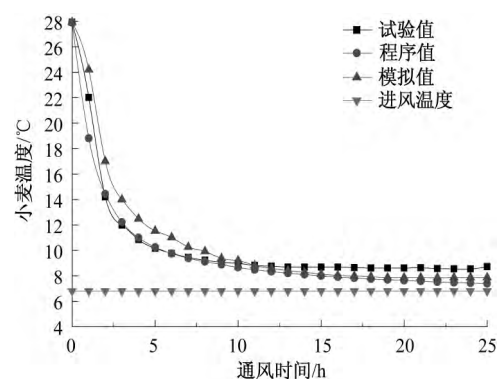
将文中利用程序计算出来的结果(程序值)与试验值和 Sharma^[4] 的模拟结果(模拟值)作比较, 得到工况 1 到工况 4 的模拟。

2.1 工况 1 模拟结果与分析

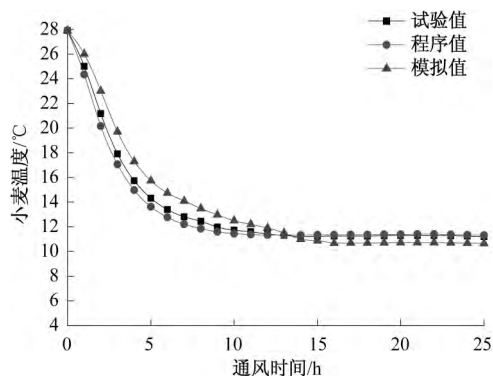
工况 1 是在进风参数恒定的状态下进行模拟, 模拟结果如图 3 和图 4 所示。

由模拟结果可以发现, 在通风过程中, 小麦堆温度逐渐降低, 由于小麦在吸湿过程中释放出潜热使得小麦堆的最终粮温高于进风温度(图 3(a))。同时由于局部热平衡, 随着粮层高度的增加, 粮温变化越来越缓和(图 3(b))。通风 15 h 时, 粮层内水分含量出现一个峰值(图 4(a)), 随着通

风时间的延长, 峰值升高且峰值后水分含量普遍增加(图 4(b)), 说明当温度达到平衡时, 水分尚未达到平衡。



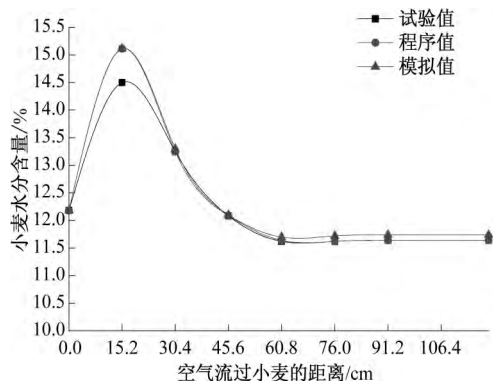
(a) 小麦堆第 1 层



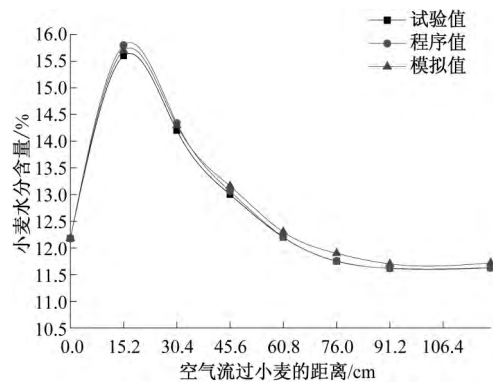
(b) 小麦堆第 5 层

图 3 小麦堆各层温度随时间的变化

Fig.3 Experimental and simulated temperature changes of wheat stack layers during aeration



(a) 15 h



(b) 25 h

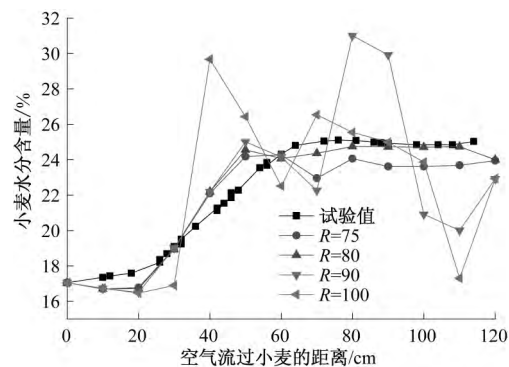
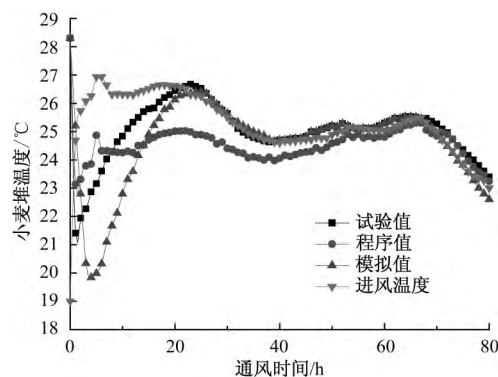
图 4 不同时刻下小麦堆各层水分的变化

Fig.4 Experimental and simulated moisture content changes of wheat stack layers during aeration

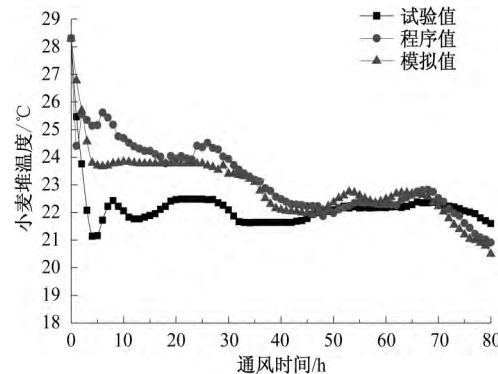
2.2 工况 2 模拟结果与分析

工况 2 是在进风参数随时间不断变化的状态下进行模拟的,模拟结果如图 5—图 7 所示。

低 R 值表征水分传递较少,即从空气和小麦中带走少量显热。而高 R 值表征水分传递较多,即从空气和小麦中带走大量显热。由模拟结果可知,

图 5 不同 R 值对小麦堆水分含量的影响(80 h)Fig. 5 Effect of R value on simulated moisture content of wheat stack

(a) 小麦堆第 1 层



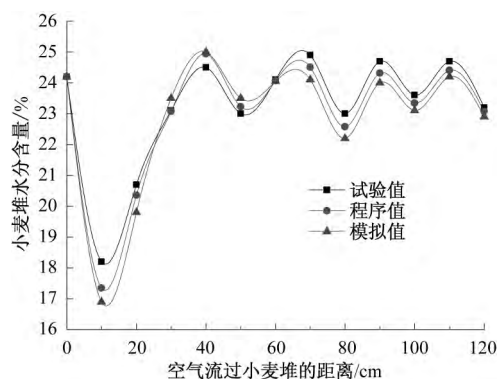
(b) 小麦堆第 7 层

图 6 小麦堆各层温度随时间的变化

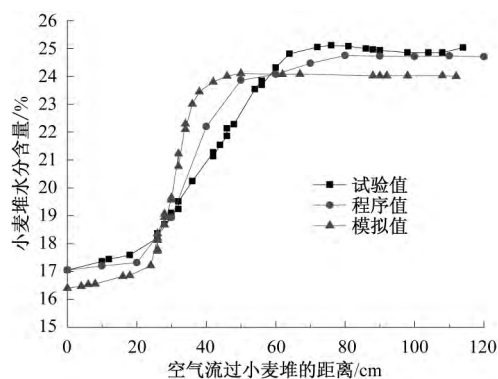
Fig.6 Experimental and simulated temperature changes of wheat stack layers during aeration

最终模拟 R 值等于 80 最切合实际(图 5)。由图 6、图 7 发现下部粮层模拟温度偏低,上部粮层模拟温度偏高,通风前期预测温度偏低。这是因为当空气流过粮层时,它的湿度趋向于平衡湿度。因此,在处于较上面的粮层里,空气的湿度与平衡时的湿度差值很小。这就会使得水分传递的实际速率比最大传递速率的 80% 大,即上层粮层的 R 值应该比 80 大,高 R 值表征水分传递较多,即从空气和小麦中带走大量显热,所以实际温度应该比预

测温度要低,同理,底层 R 值应该比 80 小,即预测温度会比测量温度低。通风前期,水分传递较慢, R 值应该比 80 小,所以前期预测温度比测量温度低。这也是通风前期预测水分低于测量水分的原因。



(a) 40 h



(b) 80 h

图 7 不同时刻下小麦堆各层水分的变化

Fig.7 Experimental and simulated moisture changes of wheat stack layers during aeration

2.3 工况 3 模拟结果与分析

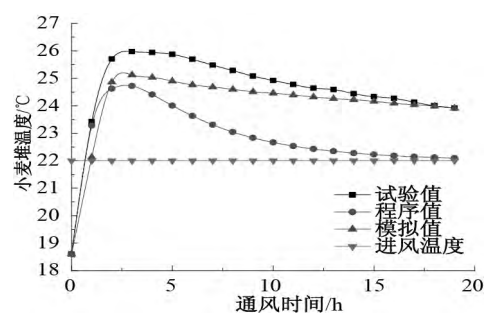
工况 3 是在进风参数恒定的状态下进行模拟的,模拟结果如图 8 和图 9 所示。

由模拟结果可以发现,在通风过程中,小麦堆温度逐渐升高,由于小麦吸湿释放潜热,使得小麦堆的温度峰值高于进风温度(图 8(a)),随着通风时间的延长,小麦堆温度逐渐趋近于进风温度。同时由于局部热平衡的作用,上层粮层温度变化比较缓和(图 8(b))。通风 15 h 时,粮层内水分出现一个峰值(图 9(a)),随着通风时间的延长,峰值升高且达到峰值后的水分含量普遍增加(图 9(b)),说明当温度达到平衡时,水分尚未达到平衡。

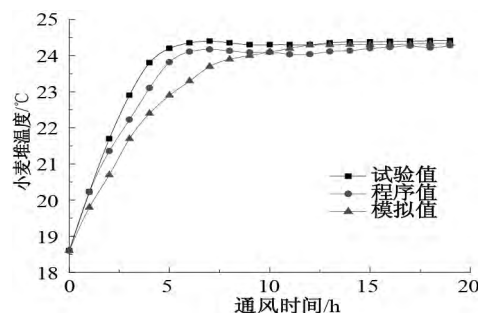
2.4 工况 4 模拟结果与分析

工况 4 是在进风参数恒定的状态下进行模拟的,模拟结果如图 10 和图 11 所示。

由模拟结果可以发现,随着通风时间的延长,



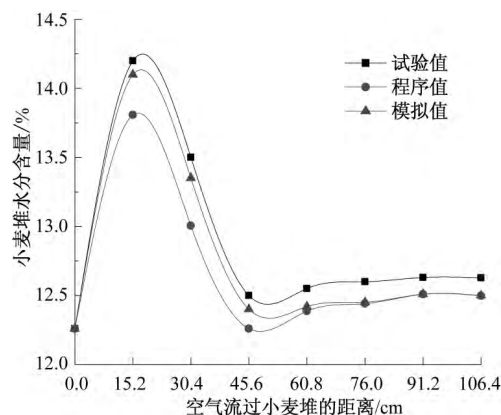
(a) 小麦堆第 1 层



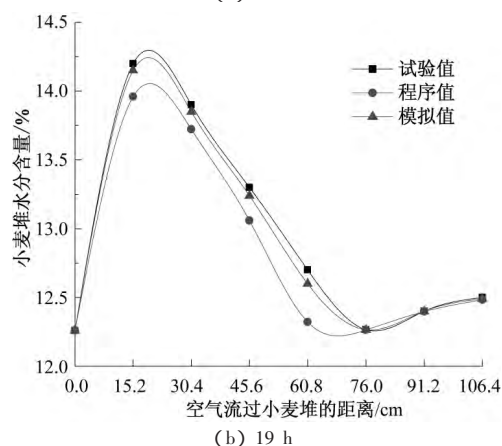
(b) 小麦堆第 5 层

图 8 小麦堆各层温度随时间的变化

Fig.8 Experimental and simulated temperature changes of wheat stack layers during aeration



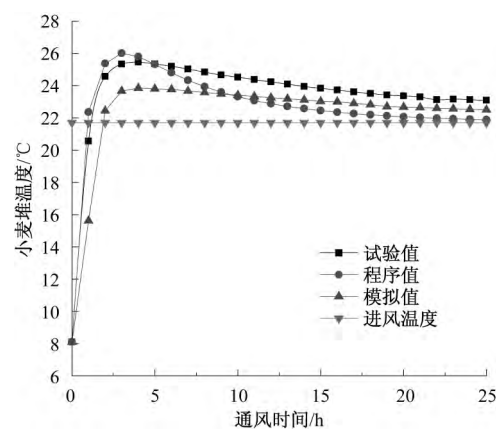
(a) 10 h



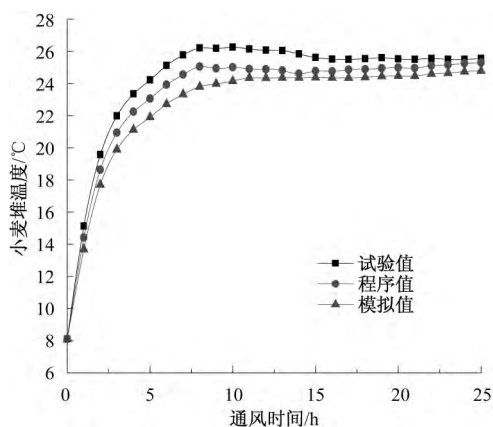
(b) 19 h

图 9 不同时刻下小麦堆各层水分的变化

Fig.9 Experimental and simulated moisture content changes of wheat stack layers during aeration



(a) 小麦堆第 1 层



(b) 小麦堆第 5 层

图 10 小麦堆各层温度随时间的变化

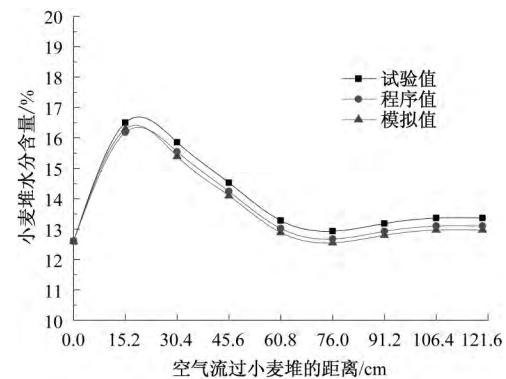
Fig.10 Experimental and simulated temperature changes of wheat stack layers during aeration

小麦堆温度逐渐升高,达到峰值后逐渐趋于进风温度(图 10(a)),底层小麦堆的温度在通风的前几个小时里高于测量温度而在通风后期预测温度又低于测量温度,这个差值最大可达到 2℃。同时由于局部热平衡的作用,随着粮层高度的增加,温度变化越来越缓和(图 10(b))。通风 15 h 时,粮层内水分出现一个峰值(图 11(a)),随着通风时间的延长,峰值小幅降低且峰值后水分含量普遍降低(图 11(b)),说明当温度达到平衡时,水分尚未达到平衡。

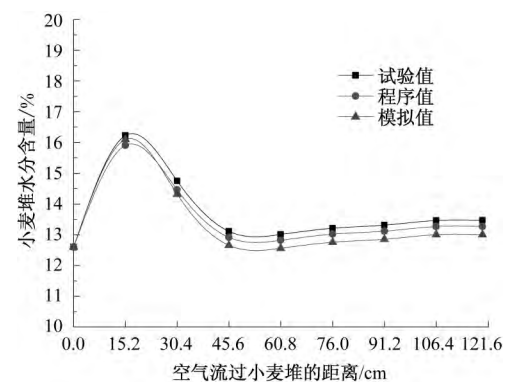
在上述模拟中模拟水分和实际水分的最大差值为 1.19%。产生误差的原因可能和以下因素有关:(1)通风过程中小麦和空气的状态时刻变化,取相同的 R 值是不准确的;(2) R 值的变化预示着水分含量的变化;(3)进风相对湿度和小麦堆水分含量的测量存在误差。

3 结论

采用局部热质平衡原理,建立了一套模拟粮食



(a) 15 h



(b) 25 h

图 11 不同时刻下小麦堆各层水分的变化

Fig.11 Experimental and simulated moisture content changes of wheat stack layers during aeration

储藏过程中温度和湿度的数学模型,借助 Fortran 程序可以方便地在不同的进风状态下进行模拟研究。通过对储藏过程中小麦堆的 4 种不同类型工况的模拟,得到不同时刻不同粮层厚度的小麦堆的温度和水分。由模拟结果得知,储粮通风过程中温度与湿度是相互耦合的。较于前人的模型,本模型在局部平衡的基础上首次提出了 R 值,使水分传递更接近于实际情况。通过与测量结果的比较,验证了该模型的准确性与可行性。该模型的突出优点是占用内存小、运行速度快、操作简单、普适性强,与之前的数学模型相比,有更好的实际应用价值。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 汤文良,狄育慧.关于我国粮仓的通风技术及低温储藏技术[J].洁净与空调技术,2013,3(1):44-46.
- [4] SHARMA S C. Simulation of heat and mass transfer during aeration of wheat and rapeseed bulks [D]. Winnipeg:University of Manitoba, 1973 :104-105.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 王远成,元伟,张中涛,等.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,2015,25(4):487-496.
- [8] 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[J].中国粮油学报,2015(11):64-66.
- [9] BROOKER D B. Mathematical model of the psychometrics [J]. Chart Trans ASAE,1967,11(10):558-560.
- [10] ASHRAE. Handbook of fundamentals. american society of heating, refrigerating and air-conditioning engineer [J].New York, N.Y. 1972,6:687-688.
- [11] OTHMER D F, HUANG H. correlating vapour pressure and latent heat data [J]. Ind Eng. Chem,1940,32:841-846.
- [12] VIRAVANICHA S. Effect of moisture content and temperature on specific heat of wheat[D]. Winnipeg:University of manitoba, 1971,31:51-52.

MATHEMATICAL MODEL AND SIMULATION RESEARCH ON STATIC GRAIN STACK DURING VENTILATION

ZHANG Xiaojing¹, WANG Yuancheng¹, YANG Jun¹, YU Yaofang¹

(1. Shandong Jianzhu University, School of Thermal Energy Engineering, Jinan 250101, China)

Abstract: The temperature and moisture content are critical factors for safety wheat storage. The researchers have designed a variety of mathematical models to predict the temperature and moisture content changes of wheat during ventilation, which generally take up a lot of memory and time. This problem can be solved effectively by a new mathematical model based on local heat and mass balance principle and Fortran program. Through the simulation research of grain temperature and moisture changes in different ventilation conditions, the general rule of grain temperature and moisture variation during ventilation was explored in the present study. The R value (the ratio of the actual transfer of moisture in the grain layer and the moisture content in the equilibrium state) was put forward for the first time, which made the water transmission more close to the actual situation. The accuracy and feasibility of the model were verified by comparison with the experimental results. The model established in this study would supply guidance for wheat storage.

Key words: Fortran program calculation; ventilation of wheat storage; heat and mass transfer