

圆筒仓储粮通风微环境模拟研究

鲁子枫,王远成*,尉尧方,曲安迪,杜传致

(山东建筑大学 热能工程学院, 山东 济南 250101)

摘要: 圆筒仓内的微环境是由温度、水分、干物质损耗、谷蠹等构成了复杂的生态系统。对圆筒仓储粮通风微环境进行模拟研究,可为粮食的安全储藏提供理论依据。文章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 Fortran 语言编译程序,模拟分析了粮堆内部的自然对流、热量传递和水分传递之间的问题,研究了通风过程中粮堆内部的干物质损耗、谷蠹的变化规律,并将模拟结果与通风实验数据进行对比分析。结果表明:模拟数据和实验数据较为吻合,其中温度、水分的最大误差分别为 2℃和 5.9%,其误差在粮食安全储存可接受范围之内;相对其他 CFD 模拟软件而言,设计的 Fortran 程序模拟时间极短(47s),且程序不限粮种,只需调整物性参数;温度和水分近似呈对称分布,而且太阳辐射导致靠近壁面的温度高于粮仓中心的温度;干物质损耗和谷蠹在粮仓中分布会受温度和水分的影响。

关键词: 圆筒仓; 通风; 储粮; 微环境; 模拟

中图分类号: TU996

文献标识码: A

文章编号: 1673-7644(2018)01-0051-08

Simulation study on micro-environment of grain storage in silo

Lu Zifeng, Wang Yuancheng*, Yu Yaofang, *et al.*

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

Abstract: The micro environment in the silo consists of temperature, moisture, dry matter loss, *R. dominica* and so on, which constitute a complex ecosystem. Based on the laws of local thermal and mass balance in stored grain, the mathematical model of coupled heat and moisture transfer, the paper makes the simulation analysis of natural convection, heat transfer and moisture transfer problems of grain by a program compiled by Fortran language, and explores the changes law in the aeration about the dry matter loss, the insects in grain bulk. The simulation results of aeration are compared with the experimental data. The results show that the simulated data are in good agreement with the experimental data. The maximum error of temperature is 2℃, the maximum error of moisture content is 5.9%, and although it has error, it is within the acceptable range of food safety storage. Compared with other CFD simulation software, the mathematical model designed by the Fortran program simulates the very short time, and the program is not limited to grain type, only to adjust the physical parameters. The simulation results of temperature and moisture are approximately symmetrical distribution, and because of the influence of solar radiation, the temperature near the wall is higher than that of the center in silo, at the same time, the distribution of temperature and moisture affects the distribution of dry matter loss and *Rhyzopertha dominica* in silo.

Key words: silos; heat and moisture transfer; stored grain; microenvironments; simulation

收稿日期: 2018-01-05

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

作者简介: 鲁子枫(1992-),男,在读硕士,主要从事生物性多孔介质传热传质等方面的研究。E-mail: 625827052@qq.com

通讯作者*: 王远成(1963-),男,教授,博士,主要从事复杂多孔介质传热传质等方面的研究。E-mail: wycjn1@163.com

0 引言

粮食以及粮食的安全储藏对于社会的稳定甚至人类文明的发展有着非常重要的作用。仓储粮堆内部是一个复杂的多场耦合问题,其中包括温度场、湿度场、水分场、生物场等。粮仓外部会受到大气温湿度和太阳辐射的作用,而粮食本身是一种有活性的物质,种种因素相互耦合构成复杂的生态系统,其中温度和水分是粮食安全储藏的重要因素。经过研究发现,对于小麦储藏问题,粮堆温度 $<15^{\circ}\text{C}$,且水分在 $12\% \sim 12.5\%$ 之间时有利于安全储藏,可以有效避免虫害的发生,抑制粮堆中生命体的活动,延缓粮食的劣变^[1]。因此,将粮食的温度和水分控制在合理的范围之内,可以保证粮食的安全储藏。

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^[2]。借助于数值模拟方法国内外研究人员取得了丰硕的成果。Cerconse 等采用实验和数值模拟相结合的方法,对圆筒仓内的温度和水分进行了研究^[3]。曹崇文对各物的干燥过程做了详细的综述^[4]。张忠杰等采用 CFD 模拟方法模拟了仓储食堆内温度的变化^[5]。Wang 等和 Gao 等利用数值模拟方法对谷物的干燥和降温过程进行了分析^[6-7]。Li 等基于压力传感器对水分的测量进行了探究^[8]。姜俊伊等就粮仓的通风方式对粮食的降温效果进行了对比分析^[9]。王利敏等对引起粮食霉菌的原因进行了探索,并提出了有效的防治措施^[10]。但是他们只考虑了粮堆内部单区域的温湿水的变化,没有考虑外部太阳辐射以及粮仓顶部空气区域和粮食区域之间的耦合过程。王远成等对双区域模型中温度和水分进行了很好地分析和验证^[11-12]。但在计算流体力学模拟时,具有软件对电脑硬件设施要求比较高,及耗时间较长等问题。

文章基于仓储粮堆内部自然对流、热湿耦合传递以及局部热平衡原理,建立了热湿传递和流动的数学模型,并引入干物质损耗、谷蠹数量关联式,基于 Frotran 语言编写模拟计算程序,对通风过程中圆筒仓内部的小麦温度、水分、干物质损耗、谷蠹数量的变化进行了模拟,并且与实验数据进行了比较,验证了这个程序的准确性和实用性。

1 储粮通风微环境模型及程序实现

1.1 储粮通风仓原型

储粮通风仓型结构及尺寸如图 1 所示,圆筒仓为钢板仓。筒仓高度为 4.5 m,直径为 4.2 m。图 1、2 分别为粮仓的正视图 and 侧视图,图 3 是粮仓的俯视图,其中阴影部分是 4 个通风口,分布在对称的位置,其中每个通风口长度为 1.2 m。

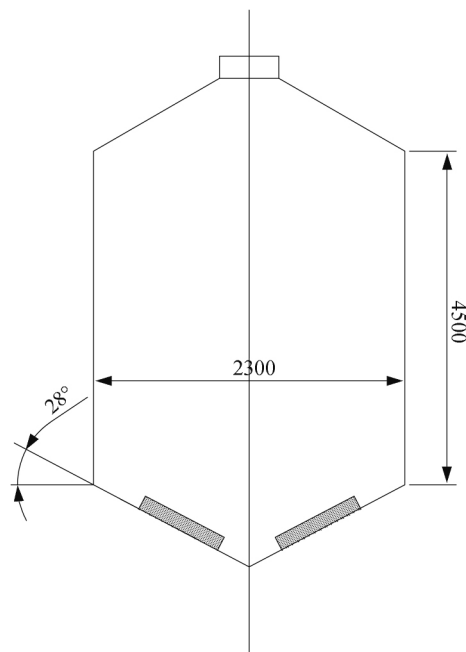


图 1 仓型结构及尺寸正视图/mm

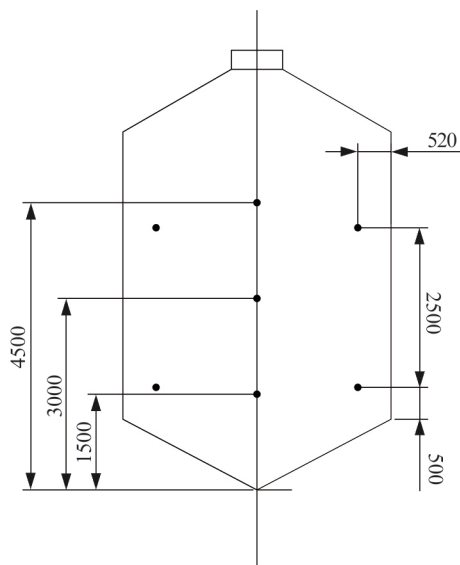


图 2 传感器布置位置图/mm

1.2 数学模型

基于多孔介质传热传质理论和局部热平衡的方

法,考虑粮堆内部的热湿耦合和吸湿解吸湿的影响,建立储粮机械通风过程中粮堆内部的流动和热湿传递的数学模型^[13]。

用圆柱坐标(r φ z)表示动量方程、能量方程、水分方程、干物质损耗、以及谷蠹和霉菌的数学模型。其中 r 为半径方向; φ 为角度方向; z 为高度方向。

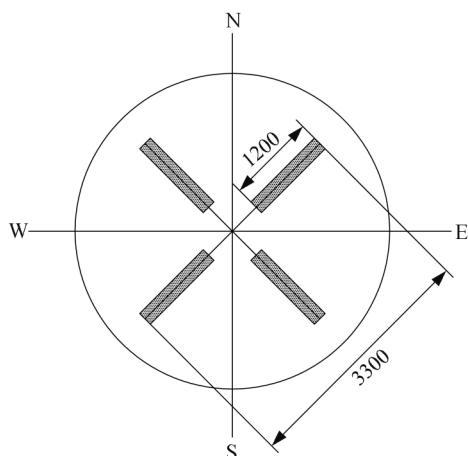


图3 仓型结构及尺寸俯视图/mm

1.2.1 动量方程

粮堆中压强的分布符合拉普拉斯方程,由式(1)表示为

$$\frac{\partial^2 P}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 P}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\text{denom}} [K_{\text{eff}} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \rho_b \frac{dm}{dt} (Q_r - 0.6h_{\text{vap}}) + \rho_b \frac{dm}{dt} \int_0^w h_s dw + \rho_b h_s \frac{\partial W}{\partial t} - \rho_a (c_a + Hc_{1r} + c_{2r}) \times (V_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{V_\varphi}{V_r} \frac{\partial T}{\partial \varphi} + V_z \frac{\partial T}{\partial z})] \quad (8)$$

式中: denom 为 $\rho_b c_{2\sigma} + c_{1\sigma} w + \frac{\partial H_w}{\partial T} + \varepsilon_r \rho_a (c_a + Hc_{1r} + C_{2v})$; T 为粮堆中温度分布 K ; W 为粮食中水分的含量 kg ; H 为空气中的绝对湿度 kg/kg ; K_{eff} 为有效热扩散量; H_w 、 h_{vap} 、 h_s 分别为粮堆吸湿而放出的热量、自由水放出的潜热和粮堆吸收的热量 J/kg ; ρ_b 、 ρ_a 分别为粮堆的密度和干空气的密度 kg/m^3 ; Q_r 为粮堆累积耗氧量 kg ; c_a 、 c_{1r} 、 $c_{1\sigma}$ 、 $c_{2\sigma}$ 分别为干空气、水

$$\frac{\partial W}{\partial t} = D_{\text{eff}} \frac{\rho_a}{\rho_b} \left(\frac{\partial^2 H}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 H}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} \right) - \frac{\rho_a}{\rho_b} \left(V_r \frac{\partial H}{\partial r} + \frac{V_\varphi}{r} \frac{\partial H}{\partial \varphi} + V_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) + \frac{dm}{dt} (0.6 + W) \quad (9)$$

式中: D_{eff} 是由 Thorpe 提出来的表示有效扩散率^[15], m^2/s ; $\frac{dm}{dt}$ 为干物质损耗率; ρ_b 、 ρ_a 分别为粮堆的密度

式中: P 为粮堆的压力,而当时间趋近于无穷的时,近似认为粮仓里压力分布为稳态,由式(2)表示为

$$\frac{1}{\alpha_p} \frac{\partial P}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

由式(1)、(2)相等可得式(3)为

$$\frac{1}{\alpha_p} \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 P}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \quad (3)$$

式中: α_p 为一个瞬变因子 Pa 。

由达西定律可知,速度场和压力场的分布关系用式(4)表示为

$$-\text{grad}P = \left(\frac{\mu}{k} \right) \vec{V} \quad (4)$$

将式(2)、(3)带入式(4)进而可得出3个方向上速度场的分布关系分别由式(5)~(7)表示为

$$V_r = -\frac{1}{R_p} \frac{\partial P}{\partial r} \quad (5)$$

$$V_\varphi = -\frac{1}{R_p} \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \varphi} \quad (6)$$

$$V_z = -\frac{1}{R_p} \frac{\partial P}{\partial z} \quad (7)$$

式中: R_p 为空气有效阻力系数^[14], $Pa \cdot s/m$ 。

1.2.2 能量守恒方程

根据局部热平衡理论,热平衡公式可以由式(8)表示为

蒸气、液态水、粮食的比热容 $J/(kg \cdot K)$; c_{2v} 为潜热方程中的特定常数; ε_r 为粮堆的孔隙率; m 为干物质质量 kg ; V_r 、 V_φ 、 V_z 分别为半径的角度、高度方向上的分速度 m/s 。

1.2.3 水分守恒方程

根据质量守恒原理,水分平衡公式由式(9)表示为

和干空气的密度 kg/m^3 。

1.2.4 干物质损耗模型

Lacey 等提出的干物质损耗模型可由式 (10)、(11)^[16] 表示为

$$\frac{dm}{dt} = \frac{20}{21} \frac{\partial Q_r}{\partial t} \quad (10)$$

$$Q_r = \frac{b_1 + b_2 t}{\{1 + \exp[b_3(b_4 - T)]\} \{1 + \exp[(b_5 + b_6 t + b_7 T)(b_8 + M)]\}} \quad (11)$$

式中: Q_r 为粮堆累积耗氧量 kg ; T 为粮堆中温度分布, $^{\circ}\text{C}$; t 为储藏时间 s ; m 为粮食的干物质损失的重量 kg ; M 为粮食的湿基水分, %; $b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8$ 为粮食的特定经验常数, 其值分别为 $3.4583 \times 10^{-4}, 3.478 \times 10^{-8}, 0.1737, 20.33, 0.9143, -2.878$

$\times 10^{-7}, -2.878 \times 10^{-7}, -0.013634, 24.38$ 。

1.2.5 谷蠹生长模型

Desmarchelier 在报告中提出了谷蠹生长率的数学模型由 (12)、(13)^[17] 表示为

$$R_s = C_{cl}(T_{web} - C_{c2}) \quad (12)$$

$$T_{web} = -5.806 + 0.672T - 0.006T^2 + RH(0.061 + 0.004T + 0.000099T^2) + (-0.000033 - 0.000005T - 0.0000001T^2)RH^2 \quad (13)$$

式中: R_s 为害虫数量增长率; T_{web} 为湿球温度, $^{\circ}\text{C}$; 谷蠹的 C_{cl}, C_{c2} 分别为经验常数 0.0435、13.0; T 为粮堆温度, $^{\circ}\text{C}$; RH 为粮堆小数级的相对湿度。

1.3 程序实现

模拟采用 Codeblocks 软件中的 Fortran 语言编程。Fortran 运行界面如图 4 所示。模拟边界条件设置采用实验数据, 模拟了 10 d 通风实验。每天固定在 0:00 am ~ 6:00 am 进行通风, 程序中最初设定把粮仓的网格划分为 19 个 $\times$ 19 个 $\times$ 19 个、39 个 $\times$ 39 个 $\times$ 79 个 $\times$ 79 个 $\times$ 79 个, 通过模拟发现 19 个 $\times$ 19 个 $\times$ 19 个的模拟结果与另外 2 个方案相差无几, 为了节约模拟时间最终选用 19 个 $\times$ 19 个 $\times$ 19 个的网格划分方案。程序初始需要调入一个状态参数文件, 文件中包括外部空气的逐时温度和相对湿度、仓型尺寸、粮堆的初始温度、初始水分等, 最后运行程序即可。

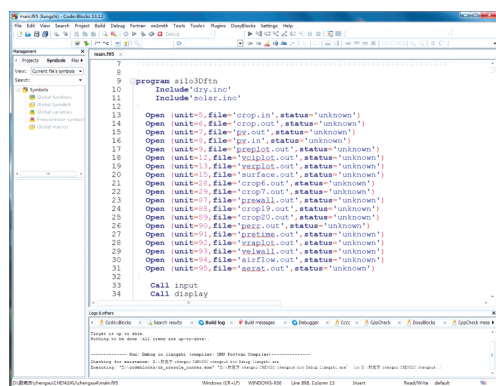


图 4 程序运行界面图

选取的具体参数为: 粮种为小麦, 容重为 800 kg/m^3 , 初始平均粮食温度为 40°C , 初始平均湿基水分为 12%, 吨粮通风量为 $13.8 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{t})$, 通风阶段日最大平均干球温度为 28.7°C , 平均日最小干球温度为 13°C , 9:00 平均相对湿度为 47%, 而

15:00 平均相对湿度为 28%, 每天通风 6 h, 默认通风参数和大气环境中的参数一致。

2 结果与分析

2.1 储粮通风实验

选取入仓之后的小麦进行通风, 通风时间从 2016 年 11 月 9 日至 19 日。粮仓中一共布置了 11 个温度和湿度传感器, 其中 3 个在粮仓中心线上, 分别布置在距最下端 1.5、3、4.5 m 处, 另外 8 个测点分别分布在东南 (SE)、东北 (NE)、西南 (SW)、西北 (NW) 4 个方向上, 每个方向有 2 个测点, 测点名称为 SEA、SEB、NEA、NEB、SWA、SWB、NWA、NWB, 测点距仓壁 52 cm。

实验采集系统是由传感器 (vaisala HMP45A vo520014) 传来的信号到达数据记录仪 (HP E1326B 5 1/2@14083) 转换之后传递给 PC 记录仪记录数据。数据记录间隔为 31 min。将实验获得数据和模拟数据进行对比分析。

2.2 粮堆水分模拟结果对比分析

程序一共模拟了通风 10 d 的结果, 其中输出了 3、6 和 9 d 的温度和水分数据, 水分的模拟结果如图 5 所示。水分分布图近似对称分布, 由于温度场和微气流的影响靠近通风道和仓壁的水分偏大, 随着通风天数的增加, 水分略有降低, 但对于降低的幅度不如温度降低的大。粮仓模拟平均湿基水分数据与实测数据的对比见表 1。

根据表 1 分析可知, 随着通风时间的延长, 粮堆水分略有增加, 这与大气中的湿度及粮堆中的温度场有直接性的关系。水分的模拟数据和实测数据误差最大为 5.9%, 验证了文章中的数学模型和编写

的 Fortran 程序的准确性和实用性,对以后粮食的安全储藏有着重要指导意义。

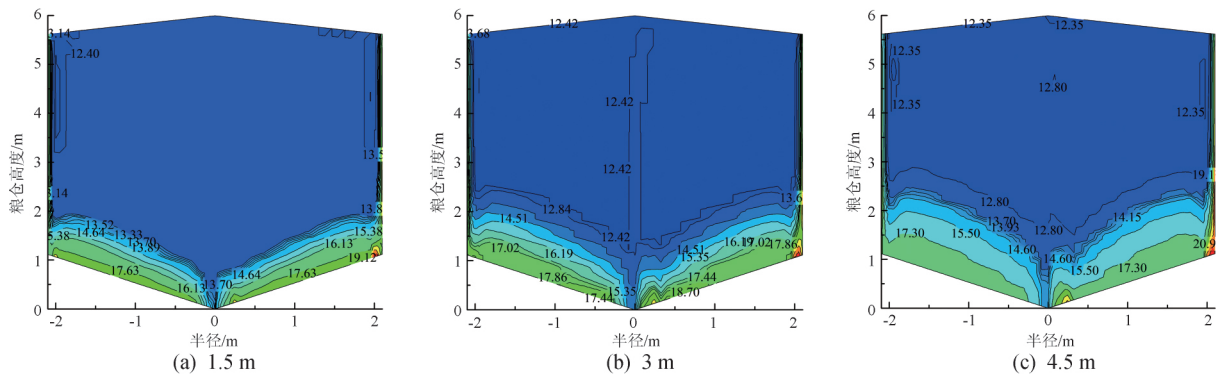


图 5 通风过程中水分的模拟结果图

表 1 粮仓模拟平均湿基水分数据与实测数据对比表

通风天数/d	模拟水分值/%	实测水分值/%
3	13.5	12.8
6	13.8	14.0
9	14.2	15.1

2.3 粮堆温度实验与模拟结果对比分析

通风过程中温度模拟结果如图 6 所示。由于风道处于粮仓的对称位置,可以明显看出温度场的分布近似为对称分布,而且由于风道的位置处于两侧,粮仓两侧的温度比中心的温度低。靠近粮仓四周部分由于受到太阳辐射的影响,温度比粮仓中心的温度高。图 6(a) 为通风 3 d 后的温度分布,粮堆上半部分与下半部分的温差大概为 7℃。图 6(b) 为通风 6 d 后的温度分布,上、中、下层温差近似为 4℃。

图 6(c) 为通风 9 d 后的温度分布,温度场比较均匀。分析可知粮堆由于通风的原因,粮堆的由下而上温度逐渐降低,最后温度场变得均匀。

同时,用模拟出的逐时温度数据与实验实测的温度数据进行对比,结果如图 7~8 所示。

通过比较图 7 粮仓中心部分 3 个测点和图 8 中靠近仓壁的 8 个测点的温度数据可知:随着通风时间的延长,粮堆各个位置的温度明显降低,且靠近仓壁的温度降低幅度比粮仓中心降低的幅度大。这是因为通风道的位置和仓型的影响;在通风 100 和 180 h 时,温度上升较明显,由于受外界大气温湿度的影响较大;模拟数据和实验数据较为吻合,温度误差最大为 2℃。

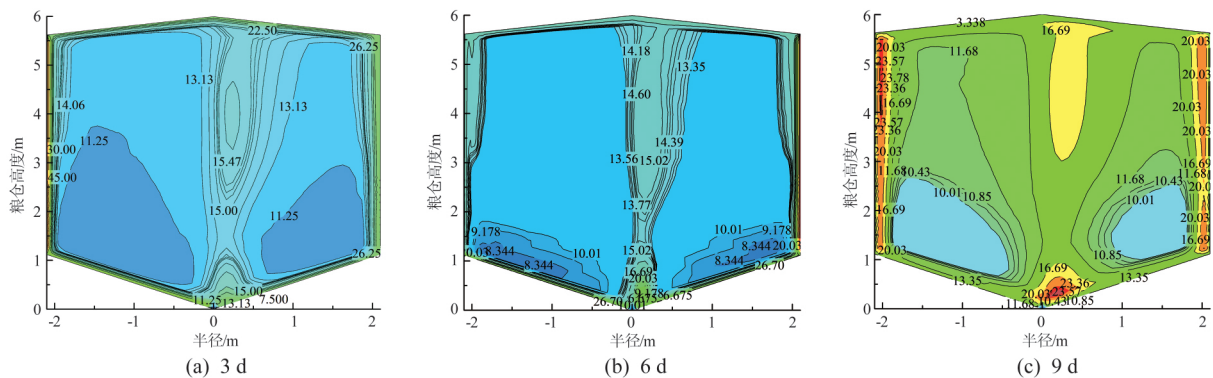


图 6 通风过程中温度的模拟结果图

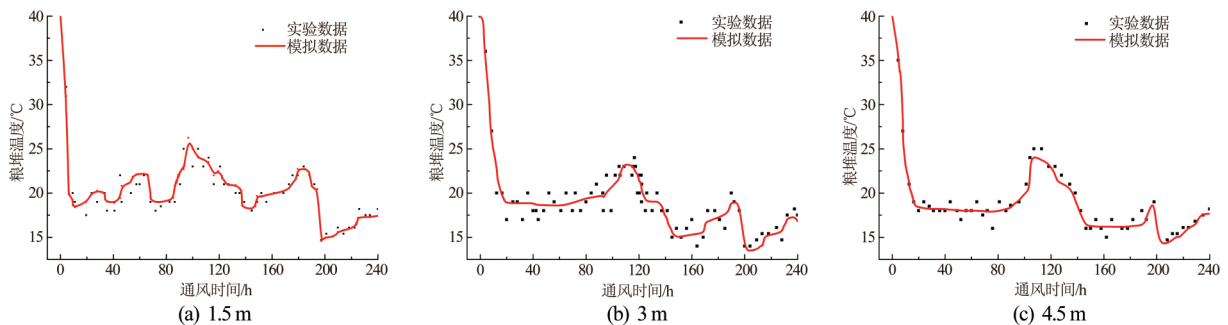


图 7 粮仓中心各温度测点的实验数据与模拟数据对比图

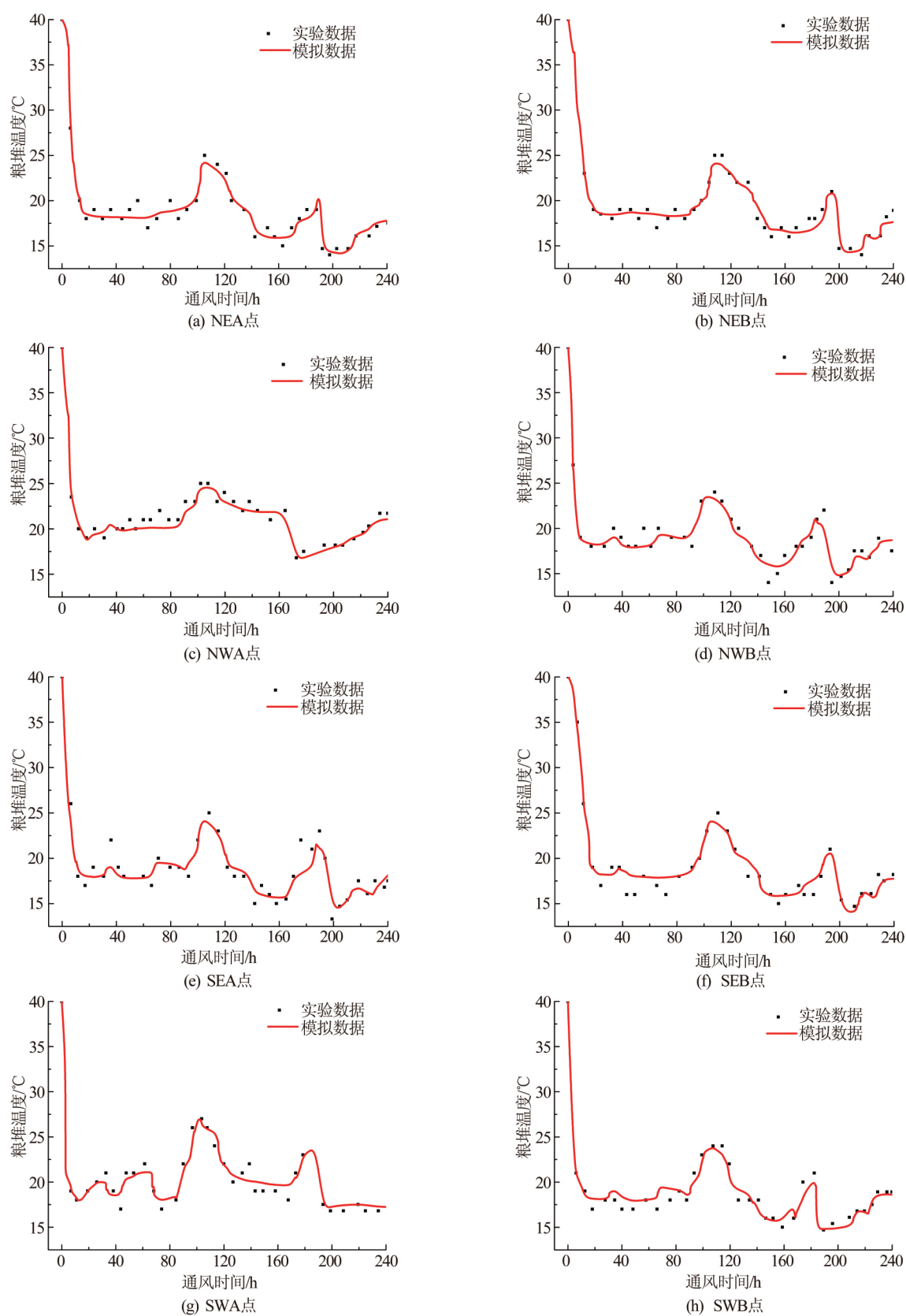


图8 靠近壁面各个温度测点实验数据与模拟数据的对比图

2.4 干物质损耗、谷蠹数量变化的模拟结果对比分析

干物质损耗、谷蠹数量变化的模拟结果如图9~10所示。

通过分析图9、10可知,由于通风楼处于对称位置,干物质损耗及谷蠹的分布近似对称分布,干物质损耗一般集中在靠近仓壁和通风楼的区域。通风3 d时,通风楼附近的干物质损耗为 2.5×10^{-5} kg;通风6 d时,通风楼附近的干物质损耗为 7.9×10^{-4} kg;通风9 d时,通风楼附近的干物质损耗为 3.5×10^{-3} kg。总体来看干物质损耗不是很大,但是随着

通风时间的延长,干物质损耗增加。而从谷蠹的分布图可知,通风3 d时,谷蠹为1.108个/kg;通风6 d的时候,谷蠹为1.416个/kg;通风9 d时,谷蠹为1.533个/kg。综合粮仓中温度和水分的变化可知,随着通风时间的延长,温度和水分变化梯度大的区域,干物质损耗和谷蠹数量较大。可见,干物质损耗和谷蠹数量的变化和温度、水分和通风的时间有关。

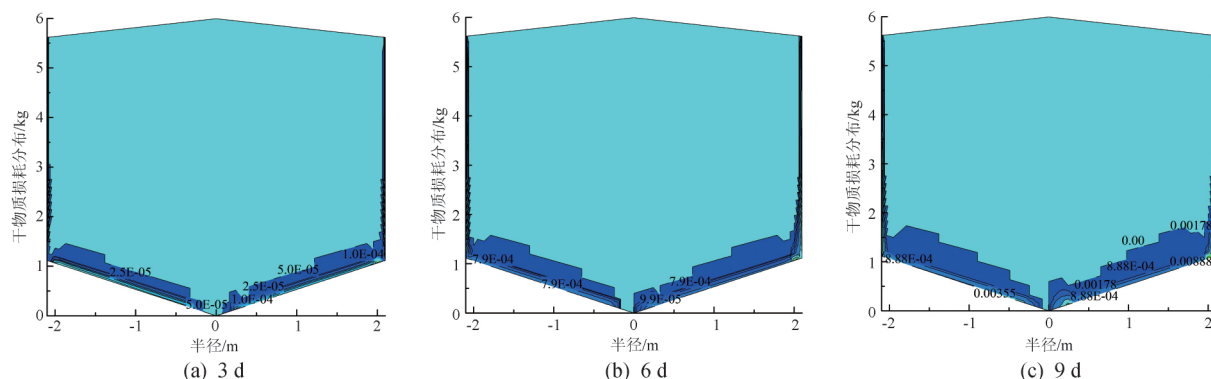


图9 干物质损耗随通风时间的模拟分布图

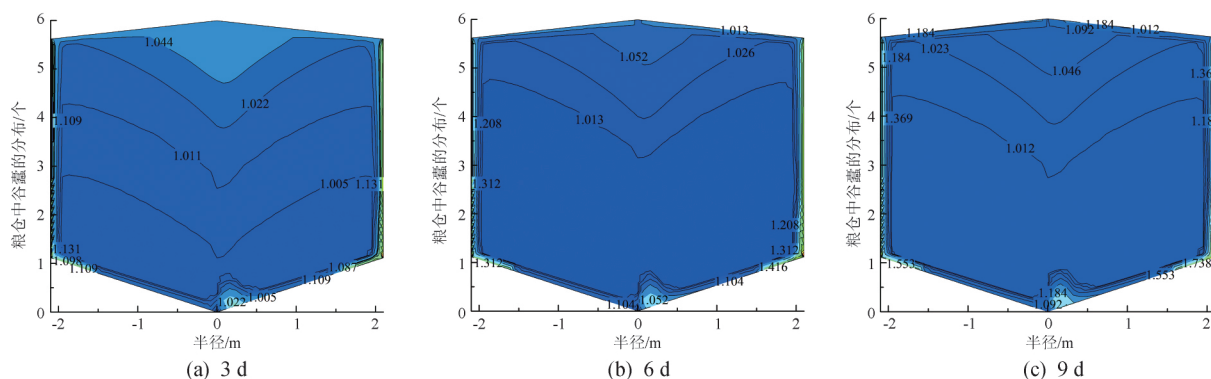


图10 谷蠹随通风时间延长的模拟分布图

3 结论

通过上述研究可知:

(1) 温度和水分的模拟数据和实验数据较为吻合。其中,其最大误差分别为 2°C 和 5.9% ,但是误差在粮食安全储存可接受范围之内。同时,通过与实验真实测得的数据对比结果验证了由Fortran程序设计的数学模型的实用性。

(2) 相对其他CFD模拟软件而言,设计的Fortran程序模拟时间极短(47 s)。这套程序不限粮种,只需调整物性参数。

(3) 温度和水分近似呈对称分布,靠近壁面和通风楼的区域,温度和水分变化梯度较大,且由于太阳辐射的影响,靠近壁面的温度比粮仓中心的温度

高。

(4) 干物质损耗和谷蠹在粮仓中分布近似呈对称分布,并且与温度、水分以及通风时间有关。

参考文献:

- [1] 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模拟[J].河南工业大学学报,2009,30(6):76-77.
- [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] Converse H H, Graces A H, Chung D S. Transient heat transfer within wheat stored in a cylindrical bin [J]. Transaction of American Society Agriculture Engineering, 1973, 16(1): 129-133.
- [4] 曹崇文.谷物干燥的数学模拟[J].北京农业机械学院学报,1984,3:79-94.
- [5] 张忠杰,李琼,杨德勇,等.准静态仓储粮堆温度场的CFD模拟[J].中国粮油学报,2010,25(4):46-50.

- [6] Wang R L, Liu S Q, Huan L I, *et al.*. Study of temperature changes in wheat grain heap during cooling process [J]. *Cereals & Oils*, 2017, 30(5): 23 – 27.
- [7] Gao S, Wang Y, Qiu H, *et al.*. Numerical simulation for anisotropic resistance of wheat under the condition of mechanical ventilation [J]. *Journal of the Chinese Cereals & Oils Association* 2017, 32(2): 116 – 119.
- [8] Li X J, Zhang Y Q, Wu F W, *et al.*. Research of grain moisture measurement method based on pressure sensor [J]. *Advanced Materials Research*, 2012(472): 1518 – 1523.
- [9] 姜俊伊, 李倩倩, 沈邦灶等. 平房仓横向与竖向通风系统储粮温度变化对比研究 [J]. *粮食储藏技术* 2017, 46(6): 1 – 7.
- [10] 王利敏, 邢福国, 吕聪, 等. 复合植物精油防霉剂对玉米霉菌及真菌毒素的控制效果 [J]. *核农学报*, 2018, 32(4): 0732 – 0739.
- [11] 王远成, 潘钰, 尉尧方, 等. 仓储粮堆内部自然对流和热湿传递的数学分析和验证 [J]. *中国粮油学报*, 2017, 32(9): 120 – 130.
- [12] 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, 32(3): 251 – 257.
- [13] 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(1): 21 – 31.
- [14] Hunter A J. An isostere equation for some common seeds [J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1987, 37(2): 93 – 105.
- [15] Thorpe G R, Ochoa J A, Whitaker S. The diffusion of moisture in food grains [J]. *Journal of Stored Products Research*, 1991, 27(3): 1 – 9.
- [16] Lacey J, Hamer A, Magan N. Respiration and loss in stored wheat grain under different environmental condition [C]. *Proceedings of the 6th international Working Conference on Stored-product Protection*, 1994, 2: 1007 – 1013.
- [17] Desmarchelier M J. The relationship between wet-bulb temperature and the intrinsic rate of increase of eight species of stored-product coleoptera [J]. *Journal of Stored Products Research* 1998, 24(3): 107 – 113.

(学科责编: 赵成龙)

(上接第 24 页)

- [3] 傅武军, 朱昌明. 高速电梯水平振动建模及动态响应分析 [J]. *机械设计与研究* 2003, 19(6): 65 – 67.
- [4] 饶勇. 高速电梯曳引系统多向耦合振动建模与减振设计技术及其应用 [D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [5] 王晶晶. 基于滚动导靴—导轨接触模型的高速曳引电梯振动分析 [J]. *科技与企业* 2015(5): 238.
- [6] 朱彤, 吕风英, 万会. 电梯对重—导轨体系的水平振动试验和数值仿真研究 [J]. *结构工程师* 2017, 33(2): 175 – 181.
- [7] 李醒飞, 张晨阳, 李立京, 等. 电梯导轨对轿厢振动的影响 [J]. *中国机械工程* 2005, 16(2): 115 – 118.
- [8] 李立京, 李醒飞, 张国雄, 等. 电梯轿厢水平振动模型 [J]. *起重运输机械* 2002(5): 3 – 5.
- [9] 冯永慧, 张建武. 高速电梯水平振动模型的建立与仿真 [J]. *上海交通大学学报* 2007, 41(4): 557 – 560.
- [10] 梅德庆, 杜小强, 陈子辰. 基于滚动导靴—导轨接触模型的高速曳引电梯振动分析 [J]. *机械工程学报* 2009, 45(5): 264 – 270.
- [11] 尹纪财, 芮延年, 蒋黎明, 等. 高速电梯多自由度水平动态特性及其仿真的研究 [J]. *机械设计* 2011, 28(10): 70 – 73.
- [12] 李丹达. 电梯轮轨耦合振动建模及分析 [D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [13] 郭克尖, 李鸿光, 孟光. 滑动导向系统振动建模及动力学仿真研究 [J]. *振动与冲击* 2008, 27(10): 39 – 42.
- [14] 张鹏. 变长度柔性提升系统纵向—横向受迫耦合振动分析 [J]. *工程力学* 2008, 25(12): 202 – 207.
- [15] 王少钦, 夏禾. 变速移动载荷作用下简支梁桥的动力响应及共振分析 [J]. *振动冲击* 2010, 29(2): 26 – 30.
- [16] 杨超, 朱涛, 杨冰, 等. 结构动力学中的广义多步显式积分算法 [J]. *西南交通大学学报* 2017(1): 133 – 140.
- [17] Zhai W M. Two simple fast integration methods for large-scale dynamic problems in engineering [J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1996, 39(24): 4199 – 4214.
- [18] 翟婉明. 非线性结构动力分析的 Newmark 预测—校正积分模式 [J]. *计算力学学报*, 1990(2): 51 – 58.
- [19] Banimahd M, Woodward P K, Kennedy J, *et al.*. Behaviour of train-track interaction in stiffness transition [J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers—Transport* 2012, 165: 205 – 214.
- [20] 王焕玲. 表面粗糙度信号的统计误差特征分析 [J]. *上海计量测试* 2016, 43(5): 18 – 22.

(学科责编: 赵成龙)