

平房仓横向谷冷通风小麦粮堆 传热传质数值模拟

高 帅¹, 王远成¹, 赵会义², 石天玉², 邱化禹¹, 杨 君¹, 魏 雷²

(1. 山东建筑大学热能工程学院, 山东 济南 250101; 2. 国家粮食局科学研究院, 北京 100037)

摘要:平房仓横向通风具有进出粮快捷方便、节省大量人力物力等优势,但其通风的均匀性及降温降水效果有待于深入研究。基于多孔介质传热传质的理论,建立了一种谷冷通风过程中仓内热湿耦合传递的数学模型,并采用计算流体动力学(CFD)的方法,对某粮库小麦的横向谷冷通风进行二维数值模拟研究。通过对谷冷通风的数值模拟结果的分析,并与相关实验测试数据进行比较,探究了横向通风粮堆内部热量和水分迁移规律,得出了横向通风具有通风均匀、降温效果显著的结论,为今后储粮通风操作和管理奠定了基础。

关键词:小麦粮堆;横向通风;多孔介质;计算流体动力学(CFD);传热传质

中图分类号:S 379.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-7561(2015)S-0015-05

Numerical simulation of heat and mass transfer in wheat mass during lateral cooling ventilation

GAO Shuai¹, WANG Yuan-cheng¹, ZHAO Hui-yi², SHI Tian-yu², QIU Hua-yu¹, YANG Jun¹, WEI Lei²

(1. School of Thermal Energy Engineering, Shandong Architecture University, Jinan Shandong 250101;

2. Academy of State Administration of Grain, Beijing 100037)

Abstract: Lateral ventilation is convenient to load and unload grain and saves a lot of manpower and material resources in the warehouse. The uniformity of air flow and cooling effect of the lateral ventilation need being further studied. Based on the theory of heat and mass transfer in porous medium, a mathematical model of coupled heat and moisture transfer in warehouse during the cooling ventilation was derived. According to computational fluid dynamics (CFD) method, lateral ventilation for cooling wheat was conducted with two-dimensional numerical simulation analysis. By numerical simulation study on cooling lateral ventilation, the heat transfer and moisture migration in stored grain was analyzed, and it was found that lateral ventilation was uniform and cooling effect for stored grain was significant. This study also laid a foundation for the future operation and management of ventilation.

Key words: wheat mass; lateral ventilation; porous media; computational fluid dynamics (CFD); heat and mass transfer

我国是世界产粮大国,也是粮食消费大国,做好粮食储藏工作意义重大,关系军需民食,也关系国家安全、社会稳定。经过长期的实践和研究,人们发现当粮食温度低于 15 ℃(粮食安全储藏的温度)、水分在 12%~12.5%(安全水分)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^[1]。1971年 Sinha^[2]提出,减少储粮变质的一种方法是通过冷却干燥通风把粮食降低到一个安全温度和安全水分。因此,对粮仓内粮堆进行冷却干燥通风,适当控制粮堆的温度和水分,可以实现粮食的安全储藏。1990年 Wilkin^[3]等人提出,粮食储藏期间通过冷却通风降低储粮温度可以有效控制虫害,并减少农药的使用。

收稿日期:2015-02-25

基金项目:国家自然科学基金(51276102);国家粮食公益专项(201313001,2015449-001-03)

作者简介:高帅,1990年出生,硕士研究生。

通讯作者:王远成,1963年出生,教授,博士。

粮堆是由粮食颗粒堆积而成的,是一种典型的多孔介质^[4]。通风的过程实质上是粮粒与周围孔隙空气进行热湿交换的过程,即多孔介质内部对流传热传质的过程。由于粮食与周围空气存在温度梯度,粮食内部的热量被周围的冷空气带走;同时,粮食与空气存在湿度梯度,粮食与冷空气也进行着水分的交换。通风过程中粮堆内部的热湿迁移是一个非常复杂的过程,它与气候条件、粮堆热物性和粮食生物特性等多种因素有关,而且涉及到气象学、流体力学、传热学^[5]、生物学以及多孔介质内部的热湿传递理论^[6],横向通风粮堆内部的热湿传递规律目前尚未完全掌握。

Sun Dawen 等^[7-8]提出了一个谷物冷却的数学模型,并应用该模型模拟了冬季英国东南部的圆筒仓内谷物冷却过程中温度、水分的变化规律。基于热量和质量守恒定律,Jia Cancun 等^[9]模拟了仓内通风过程中粮仓内储藏小麦的温度变化,但是没有模拟小麦水分的变化。王远成等^[10]对大型房式仓地上笼粮堆温度和水分变化规律进行了数值模拟研究。

本实验通过计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics,CFD)的方法对粮库小麦的横向谷冷通风进行数值模拟研究,获得横向谷冷通风过程中粮仓内温度和水分的变化过程,分析了横向谷冷通风过程中粮仓内温度和水分分布规律。通过与实验结果的对比分析,验证了所建立的数学模型。

1 物理模型

研究对象为某粮仓的大型平房仓,该粮仓存储5 700 t小麦。粮仓长为61 m,宽为21 m,高度为10 m,粮堆高度为5.8 m。房式仓的横向谷冷通风工艺如图1a所示。横向通风是把两组通风笼沿高度方向垂直安装在粮仓宽度方向的两个内墙上,通过吸式或吹式的方式实现了沿着粮仓宽度方向的横向通风。由于横向通风的通风笼1和2沿着粮仓长度方向均匀对称布置,而且粮仓长度方向温度梯度较小,因此,为了简化问题,取粮仓中间横截面作为数值模拟对象。基于前面建立的模型,采用有限体积的方法数值模拟分析了就仓横向谷冷通风时仓储粮堆内部热湿耦合传递规律。

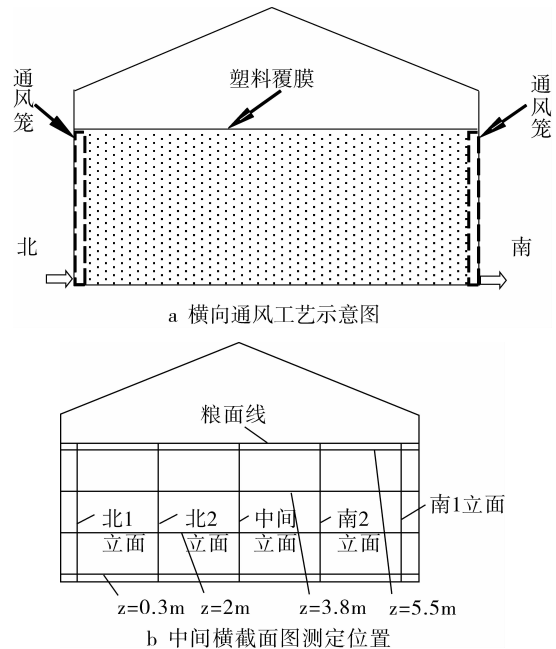


图1 物理模型及截面示意图

2 仓储粮堆热湿耦合传递的数学模型

通风道内流体为湍流流动,仓内粮堆中粮粒空隙间气体的流动具有典型的层流特性,模拟时采用质量、动量、能量守恒方程,另外还要考虑水分迁移方程。

2.1 质量连续性方程

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho_a)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_a \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

其中, ε 空隙率; ρ_a 空气密度; t 时间; u 空气的表观速度或达西速度。

2.2 动量方程

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = -\frac{\nabla p}{\rho_a} + \nabla \cdot \left(\frac{u}{\rho_a} \nabla \vec{u} \right) - S_i \quad (2)$$

其中 $S_i = \frac{dP}{dx_i} = -Rv_i - Sv_i^2$ 是粮堆的阻力。

2.3 能量方程

$$\rho_a \varepsilon c_a + \rho_a (1 - \varepsilon) (c_g + c_w W) \frac{\partial T}{\partial t} + c_a \nabla \cdot (\rho_a \vec{u} T) = k_{eff} \nabla^2 T + hs(1 - \varepsilon) \rho_s \frac{\partial W}{\partial t} \quad (3)$$

其中 c_a 、 c_g 、 c_w 分别是空气的比热,粮食的比热和水的比热, H_w 是谷物吸湿的总热, k_{eff} 是粮堆的有效导热系数,取 $0.157W/(m \cdot K)$ 。 $hs(1 - \varepsilon) \rho_s \frac{\partial W}{\partial t}$ 是热源项,即粮粒吸附或解吸附水分时产生的热量。

2.4 水分迁移方程

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho_a w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_a \vec{u}) = \nabla \cdot (\rho_a D_{eff} \nabla w) + S_w \quad (4)$$

其中, w 是粮粒间空气中的绝对含湿量, D_{eff} 是粮粒间空气中的含湿量通过粮堆的有效扩散系数, $S_w = (1 - \varepsilon)\rho_s \frac{\partial W}{\partial t}$ 是谷粒解吸或吸附水分的源项, 其中 ρ_s 为粮食干基密度, W 为粮食水分含量。水蒸汽通过散装谷物的有效扩散系数 D_{eff} 是 $0.233D_v$, 其中 D_v 是水通过空气的分子扩散系数。

3 数值方法及初始和边界条件的建立

3.1 数值方法

对数学模型采用有限体积法进行离散, 离散格式为二阶上风差分格式。为了防止迭代过程的发散和数值不稳定, 对动量方程、能量和标量输运方程采用了欠松弛技术, 压力与速度耦合采用 SIMPLE 算法。

3.2 初始条件及热物性参数

根据实验测定, 粮堆(小麦)平均初温 $32.2\text{ }^\circ\text{C}$, 平均湿基水分 12.2% (干基水分 13.98%)。粮堆的密度为 $\rho = 693\text{ kg/m}^3$ (容重 805 kg/m^3), 粮堆的比热容为 $c_p = 1790\text{ J/kg}\cdot\text{K}$, 粮堆的导热系数为 $\lambda = 0.159\text{ W/m}\cdot\text{K}$, 粮堆的孔隙度 ε 取为 0.4 。

3.3 边界条件

出口边界沿流线方向各流动参数的一阶导数取为零, 在固体壁面和地面采用无滑移条件, 并且为绝热边界, 由于是负压谷冷通风, 粮面敷有一层透明薄膜, 所以粮面假设不可渗透, 而且与上部空气有热量交换。

谷冷机提供的冷空气参数: 进入粮堆的空气平均温度为 $17.5\text{ }^\circ\text{C}$, 相对湿度为 85% , 单位通风风量为 $q = 4.9\text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{t}$ 。

3.4 模拟实验数据

对某粮库大型平房仓进行负压谷冷通风, 并用粮情检测系统对粮堆的温度和水分进行实时监控, 实际通风时间约为 72 h , 因此对整个通风模拟过程也为 72 h 。

4 结果与分析

4.1 仓内温度随时间变化情况

横向谷冷通风 72 h , 平房仓小麦粮堆由北向南逐渐降温, 见图 2。初始平均粮温为 $32.2\text{ }^\circ\text{C}$, 横向

通风管道内的负压进入的空气温度为 $17.5\text{ }^\circ\text{C}$, 经过 72 h , 平均粮温降到 $25.2\text{ }^\circ\text{C}$, 降低了 $7\text{ }^\circ\text{C}$ 。通风 24 h , 横向通风粮堆内温差最大, 形成 3 个主要温区 ($t = 24\text{ h}$, 如图 2 所示), 可定义为低温平稳区、温度变化区和高温平稳区, 在温度变化区小麦间冷热交换

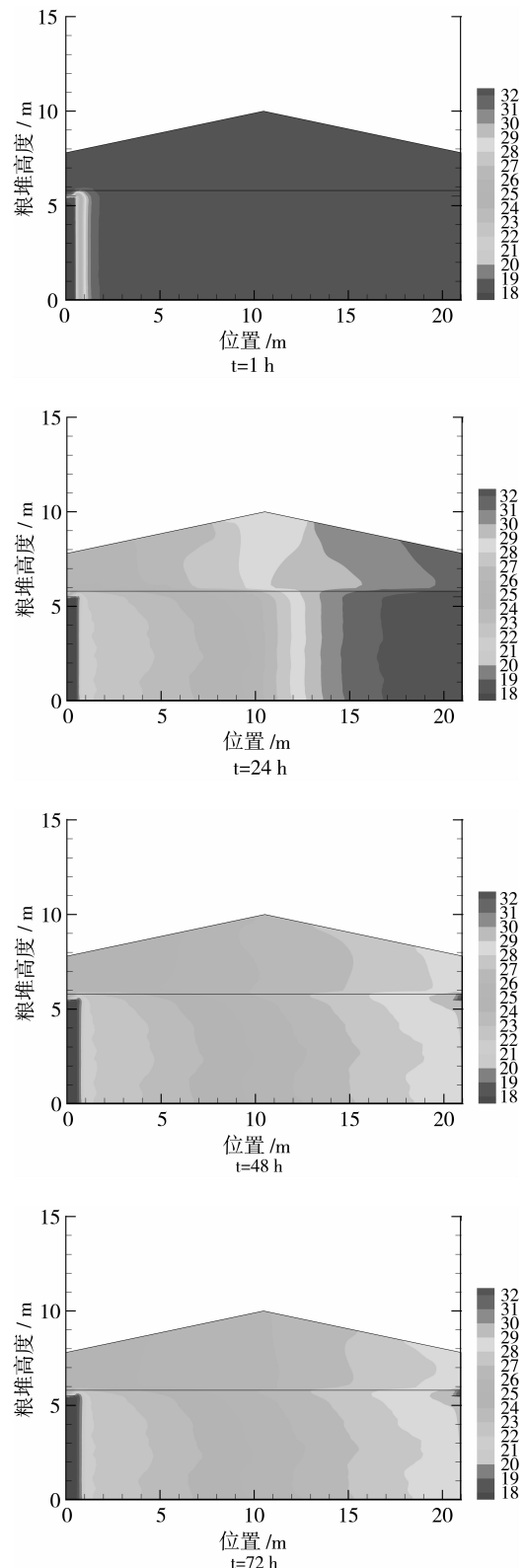


图 2 横向通风时仓内温度变化图

程度较高,经过充分交换后,形成温度稳定的低温区,通风降温过程中,高温区的气体流出仓外,可见模型很好的描述了横向谷冷通风降温过程的冷热交换的特点和规律。

经过 48 h,(见图 2)整个小麦粮堆的温度变化锋面整齐,由北向南移动。初始粮的高温(大于 29℃)全部移出仓外,仓内温度有分层,形成间距平均 2.5 m宽的横向同温带,带间温差 1℃;到 72 h,整个粮堆温度更加均匀,粮堆的平均温度在 25℃。

4.2 仓内水分随时间变化情况

横向谷冷通风期间粮堆内水分的变化见图 3,通风 24 h,粮堆内水分差最大,形成 3 个主要水分区($t=24$ h,图 3 所示),可定义为低水分平稳区、水分变化区和高水分平稳区,在水分变化区小麦间热湿

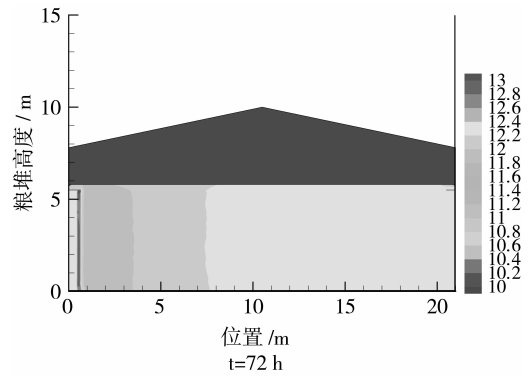


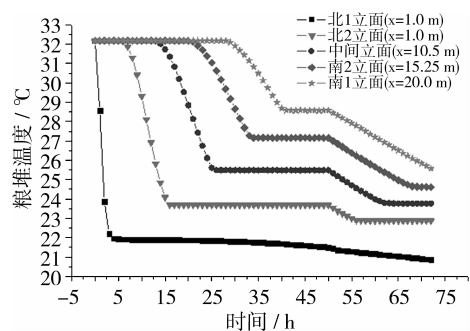
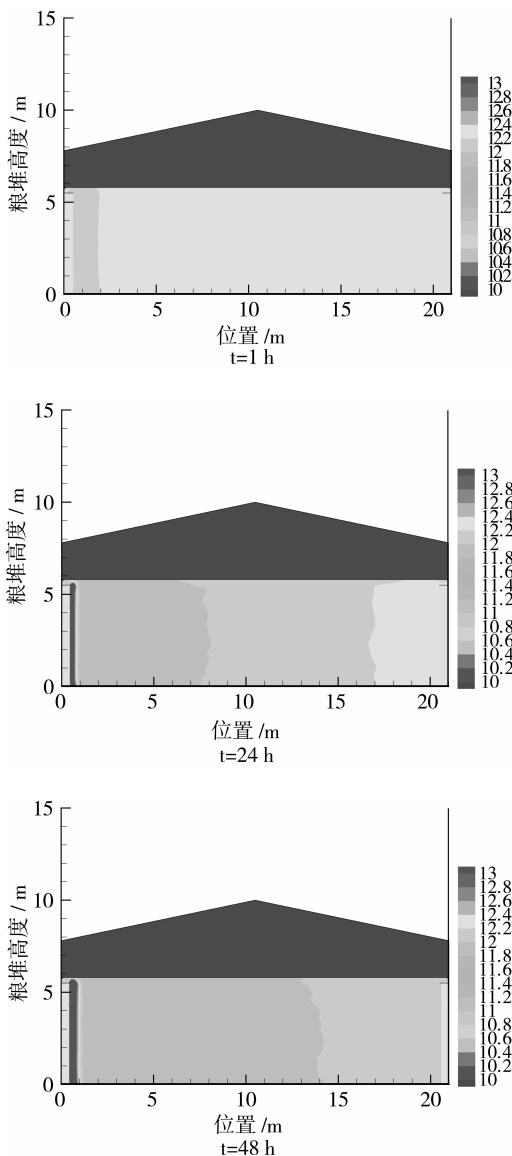
图 3 横向通风时仓内水分变化图

交换程度较高,经过充分交换后,形成水分稳定的高湿区。通风过程中,高水分区的气体流出仓外,可见模型很好的描述了横向谷冷通风水分变化过程。

通风经过 72 h,整仓的粮堆水分基本上均匀,在 12.2%和 12.0%之间。通风经过 48 h后,由于仓外水分比仓内高,通风过程出现了变化,特别是 72 h后,在进风端出现了水分由高到低的情况,与通风初期的由低到高相反。说明通风期间水分分层明显,变化复杂,特别是在通风入口位置出现了局部低湿度段,提示我们(湿度或水分)质量的传递与温度的传递有明显的不同。因此,在今后的研究中应尤为关注。

4.3 各个立面和水平面的变化规律

从图 4 看出,在粮堆长度方向的竖直面,冷风从进口粮堆的北一立面推进到冷风出口的南 1 立面,冷锋逐步推进粮温降低。在间距为 5 m 的相邻两个截面之间的平均粮温变化不大于 2℃,北 1 和南 1 两个截面的温差为 4.6℃。降温速度快,平均每 3.6 h 冷风向前推进 1 m(以通风结束时刻南 1 面上的平均温度为基准),冷锋前沿移动速度为 0.28 m/h。水平截面温度变化具有很高的一致性,通风均匀。



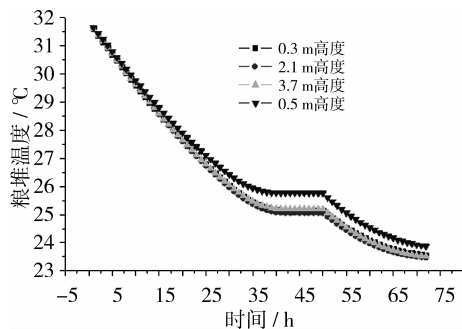


图4 横向通风时粮堆各个立面和水平面温度随时间变化图

4.4 模拟数据与实测数据对比

在对长度为60 m,跨度为21 m,储存5 700 t小麦的粮仓,模拟通风72 h,仓内粮堆一次降温从32.2 °C降低到23.6 °C,降温幅度为8.6 °C。与水分对应的平衡水分从12.2%降到12.0%,降水幅度为0.2%。测试中粮堆降温由32.2 °C降低到24.2 °C,降幅为8.0 °C。本次谷冷通风并未对水分进行测量,模拟结果可以看出这是一个降水的通风过程,结果是比较合理的。

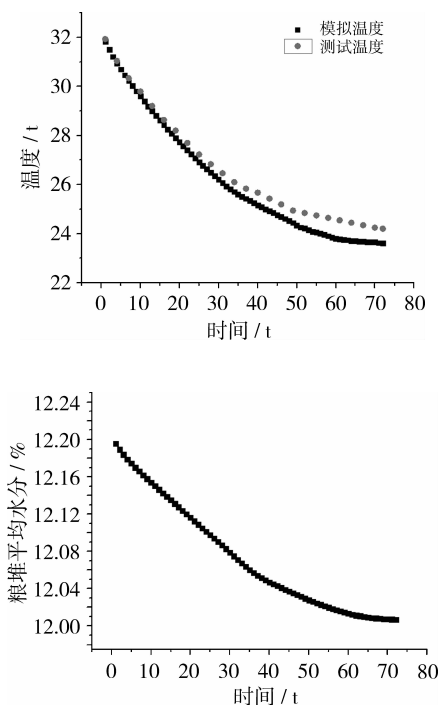


图5 横向通风时粮堆温度和水分的随时间变化图

从图2、图5的温度变化图可以看出,通风的前40个小时,降温幅度明显,由原来的32.2 °C度下降到25.2 °C(降温7 °C),之后的30个小时,随着时间的推移,粮堆与通风温差减小,降温幅度减缓(降温1 °C)。从图3、图5仓内水分变化图可以看出,整个通风过程水分由12.2%下降到12%,变化不大,是一个降水很低(保湿)的通风过程。

5 结论

本实验基于多孔介质传热传质的理论,建立了一种谷冷通风过程中粮仓内热湿耦合传递的数学模型,借助计算流体动力学方法对谷冷通风过程中粮堆内温度和水分的变化进行了数值模拟研究。通过数值模拟并与实验数据对比发现,横向谷冷通风过程是一个热量交换和水分迁移的过程,横向通风降温明显且冷峰面的移动速度要快于水分锋面的移动速度。横向通风的锋面均匀,冷却效果良好,谷冷通风应用于横向通风工艺,具有降温速度快,冷却效率高的特点,符合安全储粮的要求。通过对温度分布和水分迁移规律的研究,为以后储粮通风操作和管理奠定了基础。

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预测[J].河南工业大学学报,2009,30(6):76-77.
 [2]Sinha R N. Spoilage of farm - stored grain by moulds, insect and mites in western Canada [J]. Canada Department of Agricultural Publication, 1971.
 [3]Wilkin D R, Armitage D M, Cogan P M. Integrated Pest Control Strategy for Stored Grain [J]. HGCA Project Report, 1990, 24.
 [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]陶文铨.数值传热学[M].西安:交通大学出版社,1998.
 [6]林瑞泰.多孔介质传热传质引论[M].北京:科学出版社,1995.
 [7]Sun Dawen, 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(4):299-312.
 [8]Sun Dawen, Woods J L. Simulation of heat and moisture transfer process during drying in deep grain beds [J]. Drying Technology, 1997,15(10):2479-2508
 [9]Jia Canchun, Sun Dawen, Cao Chongwen. Computer simulation of temperature changes in a wheat storage bin [J]. Journal of Stored Products Research,2001,37(1):165-177.
 [10]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,2008,27(5):86-90.