

不同粮种横向通风和地上笼上行通风粮层阻力模拟研究

潘 钰¹, 孙 源², 王远成¹, 赵会义³, 石天玉³, 魏 雷³

(1. 山东建筑大学热能工程学院, 山东 济南 250101;

2. 云南农业大学建筑工程学院, 云南 昆明 650100;

3. 国家粮食局科学研究院, 北京 100037)

摘 要:机械通风是保证储粮品质的主要技术手段, 平房仓储粮机械通风方式可分为地上通风笼通风与横向通风, 其中不同粮种粮堆的通风阻力也不尽相同。对3种孔隙率不同的粮种(小麦、稻谷、玉米), 采用计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)的方法, 分别以横向通风和U型一机三道地上笼上行通风时粮层阻力进行数值模拟研究, 得到不同粮种在不同通风方式下的通风阻力数据, 并与实验数据进行了对比, 分析了其粮层阻力变化规律, 为机械通风系统的风机选型及通风系统的优化奠定基础。

关键词:机械通风; 不同粮种; 数值模拟; 粮层阻力

中图分类号:S 379.9 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-7561(2016)01-0102-04

The numerical and experimental study on the ventilation resistance of three stored grains during horizontal aeration and vertical aeration using half-round perforated duct on the floor

PAN Yu¹, SUN Yuan², WANG Yuan-cheng¹, ZHAO Hui-yi³, SHI Tian-yu³, WEI Lei³

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

2. College of Architectural Engineering, Yunnan Agricultural University, Kunming Yunnan 650100;

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

Abstract: Mechanical ventilation is the main measure of ensuring the grain's safety and quality. The mechanical ventilation of the grain storage in warehouse can be divided into the horizontal ventilation and the vertical ventilation. The ventilation resistance varies with different grain variety and grain bulk. According to Computational Fluid Dynamics (CFD) method, numerical simulation analysis of horizontal ventilation and vertical ventilation resistance of three kinds of grains (wheat, paddy and corn) in grain bulk is conducted. The foundation for the fan selection of the mechanical ventilation system and the optimization of ventilation system was laid through the comparison between the ventilation resistance under different grains' ventilation pattern and the experimental data, with the analysis of its grains' layer resistance variation.

Key words: Mechanical ventilation; Three stored grain; Numerical simulation; Aeration resistance

近年来,大型粮食平房仓储粮数量迅速增加,粮堆机械通风已成为保证粮食安全储藏的主要技术之一而得到广泛的应用。目前国内常用的机械通风方式是地上笼竖向通风,其中U型一机三道通风是最为常用的地上笼通风形式,即一个分配器分出三个

支风道,其目的是将风机的风量均匀的分配到各支风道中,保证粮堆送风的均匀性。但这种通风方式给粮食出入库带来极大的不便,加大了粮食进出库的工作量,增加了储粮成本。最近,有关研究单位开展了横向通风试验研究,即把两组通风笼沿高度方向垂直安装在粮仓跨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跨度方向的横向通风。横向通风避免了地上笼带来的粮食进出仓的不

投稿日期:2015-09-07

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:潘钰,1991年出生,硕士研究生。

通信作者:王远成,1963年出生,教授,博士。

便,使得粮食的装卸可以在粮仓内部完成,大大地提高了粮食进出仓的效率。

仓储粮堆是由粮食颗粒聚集而成,是一种典型的多孔介质,由于粮堆堆积过程中自溜分级、粮粒堆积时具有“自稳定性”现象^[1]以及深层粮堆重力产生的压力作用,粮堆内部的孔隙率分布是不均匀的,不同粮种粮堆内部孔隙率也不同。在通风过程中,粮堆内部空气的流动是一个复杂的过程,故不同粮种在不同通风方式下的阻力分布是非常值得探究的。

本实验主要采用数值模拟的方法,研究不同粮种在不同通风方式下,粮堆内部通风阻力情况。数值模拟得出的阻力结果与实验数据所得结果进行比较,更加准确分析得出不同粮种、不同通风布局方式的阻力大小关系,为机械通风的风机选型提供理论依据和技术参考。

1 平房仓模型建立与条件设置

1.1 平房仓物理模型

如图1所示,以大型平房仓为研究对象,建立横向通风和竖向通风两种物理模型,图1a和图1b粮仓均长60 m、跨度30 m、高10.5 m,粮堆高度6 m,粮堆顶部南北两侧各8个窗户。图1a中通风笼垂直装设在南北侧的墙上,每侧各18根通风笼,南北地面各有一根主风道,南北侧各有4个风口;图1b中通风笼为U型一机三道布置,通风途径比为1.56,4个通风笼均敷设在地面,共12根风道,南侧设有4个分配器,每个分配器连接一个通风口。

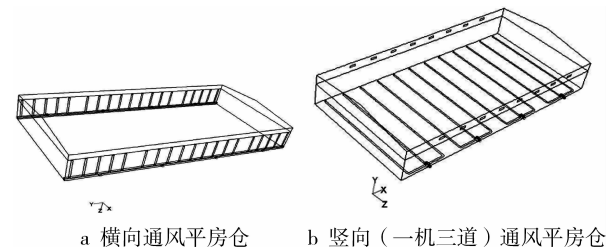


图1 平房仓横向和U型一机三道竖向通风物理模型

1.2 平房仓网格

选取的前处理器是ICEM,对两个平房仓进行了网格划分。采用四面体和六面体相结合的方式,并在通风口和通风笼处进行局部加密,每个平房仓生成的网格数约290万。

1.3 通风过程的数学模型

通风时,粮堆内部空气流动的驱动力是风机提供的压力。在通风条件下,粮堆内部的流动采用如下方程描述。

1.3.1 连续性方程:

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

其中 ε 为孔隙率, ρ_a 是空气密度, t 是时间, u 是空气的表观速度或达西速度。

1.3.2 动量方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{\varepsilon}(u \cdot \nabla)u = -\frac{\nabla p}{\rho_a} + \nabla \cdot \left(\frac{\mu}{\rho_a} \nabla u\right) - \frac{150\mu(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3 d_p^2}u - \frac{1.75\rho_a(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3 d_p}|u| \cdot u \tag{2}$$

方程(2)描述的是通风时粮堆内部强迫对流流动及其阻力的动量方程,方程右边第三项为粘性阻力,右边第四项为惯性阻力,而这两项是基于 Ergun 方程得到的。其中, ε 为空隙率,当 $\varepsilon = 1$ 时为空气区域流动方程,即 N-S 方程;当 $\varepsilon \neq 1$ 时为粮堆区域流动方程,即达西—布林克曼方程。 ρ_a 是空气密度, ρ_b 是粮堆的容重, d_p 是谷物颗粒的等效直径, u 是粮堆内部空气的表观速度或达西速度。 p 是压力, t 是时间, ∇ 是微分算子, μ 是空气的动力粘度。

1.4 不同粮种两种通风方式初始条件和边界条件

通风模拟选用的粮种是小麦、稻谷和玉米。各粮种的容重与孔隙率见表1,入口条件设置均为质量流量入口,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,通风模拟条件由表2和表3给出。

表1 不同粮种的模拟条件设置

粮种	容重/(kg/m³)	孔隙率
小麦	800	0.47
稻谷	580	0.48
玉米	700	0.50

表2 U型一机三道地上笼上行通风的模拟条件

模拟通风工况 (吨粮通风量)	U型一机三道通风 总风量/(m³/h)	U型一机三道通风 表观风速/(m/s)
25	205 000	0.031 6
20	164 000	0.025 3
15	123 000	0.019 0
10	82 000	0.012 7
7.5	61 500	0.009 5
5	41 000	0.006 3

表3 横向通风的模拟条件

模拟通风工况 (吨粮通风量)	横向总风量/ (m³/h)	横向表观风速/ (m/s)
10	82 000	0.063 3
8	65 600	0.050 6
6	49 200	0.038 0
5	41 000	0.031 6
4	32 800	0.025 3
2	16 400	0.012 7

1.5 数值模拟方法

采用稳态计算法,对控制方程采用有限体积法进行离散,离散格式为二阶迎风差分格式,为了防止迭代过程的发散和数值不稳定,对动量方程采用欠松弛技术,压力与速度耦合采用 SIMPLE 算法。

2 模拟结果与分析

分别对横向通风和 U 型一机三道地上笼(上行)通风进行数值模拟,对主通风笼速度变化图及不同粮种不同风速下的单位粮阻进行了分析,并与某粮库实验仓测得数据结果进行了对比研究。

2.1 横向通风

图2是实仓下横向通风时主通风笼速度变化图,从图中可以看出,通风笼主风道内速度较为均匀,其中通风入口处速度较大,到主风道末端风速逐渐减小,南北两侧通风效果一致,整体上来看气流比较均匀合理。

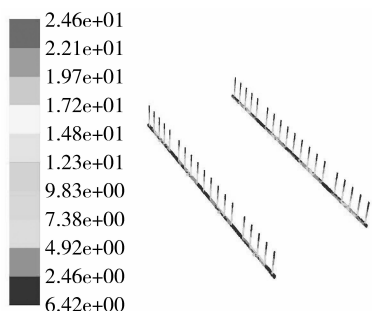


图2 横向通风笼速度变化

图3是模拟某粮库不同粮种横向通风阻力与实验数据结果对比图,从图中可以看出,不同粮种在横向通风过程中其单位粮阻明显不同。实验数据显示不同粮种在横向通风中,表观风速小于 0.03 m/s 时稻谷与玉米横向通风单位粮阻近似相等,且均小于小麦的横向通风单位粮阻,表观风速大于 0.03 m/s 时,小麦横向通风的单位粮阻最大,稻谷的单位粮阻次之,玉米的单位粮阻最小。

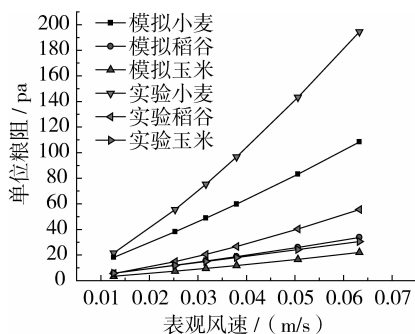


图3 横向模拟结果与实验结果对比

通过对不同粮种横向通风模拟研究也发现近似的规律,不同粮种在通风时的单位粮阻受其孔隙率

的影响,孔隙率越小,单位粮阻越大,即小麦横向通风单位粮阻最大,稻谷横向通风单位粮阻次之,玉米横向通风单位粮阻最小。图3中显示,模拟结果与实仓测得的横向通风单位粮阻相比,表观风速小于 0.02 m/s 时,小麦,玉米和稻谷的横向通风单位粮阻与实验结果近似,表观风速大于 0.02 m/s 时,小麦的横向通风单位粮阻的模拟结果偏小,稻谷和玉米的单位粮阻与实验结果基本一致。在横向通风过程中,通风量的大小对小麦的通风单位粮阻影响较大,而对玉米和稻谷的影响较小。

2.2 U 型一机三道地上通风笼上行通风

图4是实仓下 U 型地上主通风笼速度变化图,从图中可以看出,一机三道 U 型通风笼三个风道内速度较为均匀,其中通风入口处速度较大,到各个主风道末端风速逐渐减小,每个风道的通风效果一致,整体上来看气流比较均匀合理。

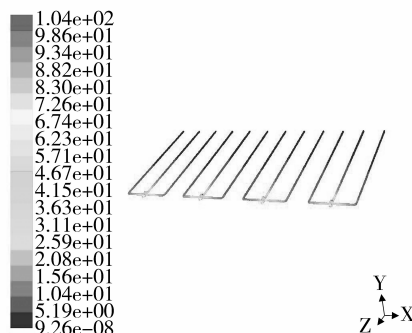


图4 上行通风通风笼速度变化

图5是模拟某粮库不同粮种上行通风阻力与实验结果的对比图,从图5中可以看出,不同粮种在上行通风过程的单位粮阻亦有所不同。实验所得的数据显示不同粮种在上行通风中,表观风速小于 0.03 m/s 时小麦的通风单位粮阻最大,玉米的单位粮阻近似相等于稻谷的单位粮阻,但其相对大小稍有波动,表观风速大于 0.03 m/s 时,小麦的上行通风单位粮阻最大,稻谷的单位粮阻次之,玉米的单位粮阻最小。

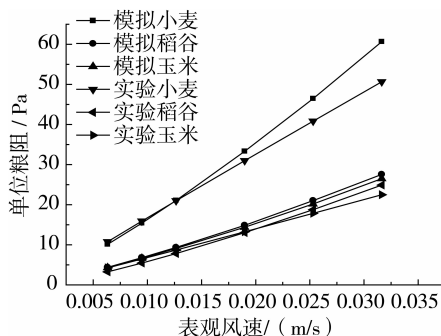


图5 上行模拟结果与实验结果对比

通过对不同粮种上行通风模拟分析也发现近似的规律,不同粮种的通风单位粮阻与孔隙率负相关,小麦上行通风单位粮阻最大,稻谷的单位粮阻与玉米的单位粮阻近似相等,但没有两者相对大小的波动,稻谷的单位粮阻一直稍稍大于玉米的单位粮阻。模拟结果与上行通风单位粮阻的实验结果相比,表观风速小于0.015 m/s时,小麦,玉米和稻谷的横向通风单位粮阻与实验结果近似,表观风速大于0.015 m/s时,小麦的横向通风单位粮阻的模拟结果偏大,稻谷和玉米的单位粮阻与实验结果近似一致。

2.3 横向通风与U型一机三道地上笼通风的对比

由于测试数据较少的限制,仅对表观风速小于0.035 m/s的范围内进行了对比。

图6是某粮库不同粮种上行通风阻力与横向通风阻力模拟结果的对比图,从图6中可以看出,在小于0.035 m/s的表观风速下,各粮种在上行通风过程的单位粮阻均大于横向通风过程中的单位粮阻。上行通风过程中稻谷和玉米单位粮阻近似,而在横向通风过程中稻谷的单位粮阻要明显大于玉米的单位粮阻。

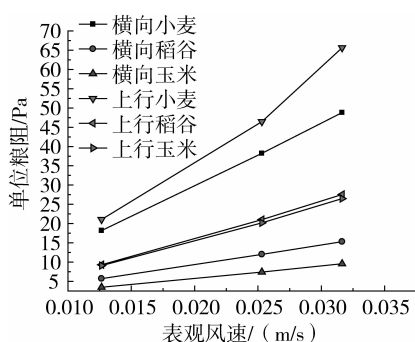


图6 不同粮种上行模拟结果与横向模拟结果对比

图6中不同通风方式下,各粮种在上行通风粮阻之所以大于横向通风的单位粮阻,是因为不同粮种,单颗粒形状大小不同,受其自稳定性的影响,堆积形式大多为长轴接近于水平方向,不同通风方式的气流路径不同,即上行通风的气流路径比横向通风的气流路径较为迂回曲折。气流的弯曲程度显然会对流动阻力的变化产生影响。迂曲度 τ 是表征这一影响的重要参数, $\tau = (\frac{L}{L_e})^2$, L_e 是孔隙弯曲通道的真实长度, L 是弯曲通道的直线长度, τ 越接近于

1,则气流越容易通过粮堆,阻力也就越小,小麦、稻谷和玉米的横向通风迂曲度比上行通风的更接近于1,即横向通风的单位粮阻小于上行通风的单位粮阻。

3 结论

基于有限体积的方法,利用fluent软件进行模拟,对仓储粮堆的不同粮种在不同通风方式不同通风量下的单位粮阻进行了数值模拟分析,并与实验粮仓的实测数据作对比发现:在上行通风及横向通风过程中,不同粮种的单位粮层阻力均与通风量正相关,风量越大,单位粮层阻力越大;不同粮种的单位粮层阻力均与孔隙率负相关,小麦的通风单位粮阻最大,稻谷次之,玉米最小;在表观风速小于0.035 m/s的区间内,小麦,稻谷和玉米横向通风的单位粮阻均小于上行通风的单位粮阻。

通过对不同粮种不同通风方式的阻力分析,为机械通风的风机选型及通风系统的优化提供理论依据和技术参考。同时由于实验及模拟条件的限制,各粮种在不同状态下的单位粮层阻力的变化还有待进一步研究。

参考文献:

- [1]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].中国粮学报,2012,27(5):86-91.
- [2]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.
- [3]Griffith Faulkner. Numerical investigation into the aeration of grain silos, degree dissertation, University of Southern Queensland, 2004.
- [4]Lukaszuk J, Molenda M, Horabik J, et al. Variability of pressure drops in grain generated by kernel shape and bedding method[J]. Journal of Stored Products Research, 2009, 45: 112-118.
- [5]宋颖韬,徐曾和,姜元勇.一维多孔介质中气体渗流与多相气固反应分析[J].水动力学研究与进展, A辑, 2004, 19(6): 766-773.
- [6]Thorpe G. The application of computational fluid dynamics codes to simulate heat and moisture transfer in stored grains[J]. Journal of Stored Products Research, 2008, 44: 21-31.
- [7]杨广靖,任云虹,贾金元,胡德泗.我国粮食储藏的现状与发展趋势[J].粮食加工, 2012, 37(1): 60-63.
- [8]Marcus Liew Kai Hoa, Meihua Lu, Yong Zhang. Preparation of porous materials with ordered hole structure[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2006, 121(1-3): 9-23.
- [9]Prat M. Recent advances in pore-scale models for drying of porous media[J]. Chemical Engineering Journal, 2002(86): 153-164. ☉