

小麦机械通风各向异性阻力的数值模拟研究

高 帅 王远成 邱化禹 杨 君

(山东建筑大学热能工程学院 济南 250101)

摘 要 机械通风是实现安全储粮、保证粮食品质的主要措施。以小麦为研究对象,采用计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD) 的方法对大型平房仓小麦的横向通风、压入和吸出式竖向通风阻力进行了数值模拟。通过对不同通风方式下粮堆的阻力的分析发现,粮层阻力与风量成正比,风量越大,粮层阻力越大;通风方式不同,单位粮层阻力也不相同,小麦下行通风的单位粮层阻力最大,上行通风次之,横向通风最小。通过对小麦粮种各向异性阻力的分析,为以后不同粮种机械通风系统的分析奠定基础。

关键词 机械通风 各向异性 数值模拟 阻力变化

中图分类号: S379.2 文献标识码: A 文章编号: 1003 - 0174(2017) 02 - 0116 - 05

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^[1],因此大型平房仓机械通风效果非常重要。竖向通风应用广泛,U 型一机三道通风是最为常用的地上笼通风形式,即 1 个分配器分出 3 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。根据气流的组织形式的不同,竖向通风又可分为上行式通风和下行式通风,上行式通风是气流经水平风道从粮仓下部进入穿过粮层并从粮堆的上部流出;下行式通风则为气流经粮面从上向下穿过粮层进入水平风道并从风道口流出。横向式通风作为新兴的通风方式有着风道数少、投资少等优势,横向通风通风道垂直地面放置,粮面覆膜,气流水平穿过粮层。

粮堆是一种典型的多孔介质^[2],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^[3]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。粮堆自上而下孔隙率逐渐减小,由外到里逐渐减小,粮堆内部孔隙率是各向异性的^[4],即水平方向阻力与垂直方向的孔隙率是各不相同的。因此粮堆在不同粮种不同通风方向时的阻力分布是非常有探究的必要的。随着计算流体力学的发展,数值模拟仿真技术被应用到机械通风领域中去,从而为分析机械通风设计的有效性、通风效果、工艺优化等提供了有力的保证。

采取数值模拟与实验研究相结合的方法,选取小麦作为数值模拟粮种,对大型平房仓横向通风、上行通风、下行通风 3 种通风方式进行数值模拟研究,得到不同通风方向的阻力数据并与试验结果进行比较,找出小麦各向异性阻力变化规律,并为今后粮食通风技术优化提供参考。

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 2 种物理模型,图 1a 和图 1b 粮仓

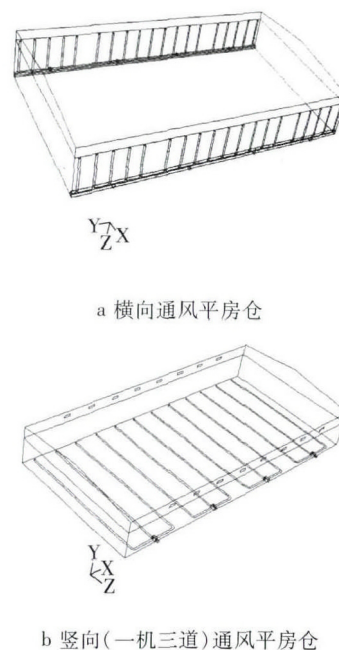


图 1 横向和竖向 U 型一机三道平房仓通风物理模型

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)

收稿日期: 2015 - 06 - 04

作者简介: 高帅,男,1990 年出生,硕士,建筑与土木工程

通讯作者: 王远成,男,1963 年出生,教授,多孔介质热质传递

均长 60 m、跨度 30 m、高 10.5 m,装粮线高度为 6 m,粮堆顶部南北两侧各 8 个窗户。图 1a 中通风笼装设在南北侧的墙上,垂直地面放置,每侧各 18 根通风笼,南北地面各有 1 根主风道,南北侧各有 4 个风口;图 1b 中通风笼为一机三道布置,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 1 个通风口,此物理模型用于小麦上、下行 2 种通风方式的数值模拟研究。

1.2 平房仓网格

本研究选取的前处理器是 ICEM,对 2 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 平房仓数学模型

平房仓的机械通风问题实质上是多孔介质内的流动问题即空气在粮食缝隙中的流动问题^[5]。横向通风和竖向下行通风均为负压吸出式通风,竖向上行通风为正压压入式送风,三者粮堆内部空气流动的驱动力均为风机提供的压力,粮堆内部的流动问题采用如下方程:

1.3.1 质量守恒方程

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

式中: ε 为孔隙率; ρ_a 为空气密度; t 为时间; u 为空气的表观速度或达西速度。

1.3.2 动量方程

方程(2)描述的是通风时粮堆内部流动及其阻力的动量方程,右边第三项为黏性阻力项,右边第四项为惯性阻力项^[6],两者用于描述粮堆内部空气流动的阻力。

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

式中: ε 为孔隙率,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 为空气密度; ρ_b 为粮堆的容重; 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,矢量的表达形式可以表征水平和垂直不同方向的速度; P 为压力; t 为时间, ∇ 为微分算子; μ 为空气的动力黏度。

1.4 平房仓模拟条件

1.4.1 通风工况条件

小麦的横向通风和竖向上下行通风均采用 6 个通风工况,探究其不同工况下阻力的变化情况(表 1)。

表 1 U 型一机三道上下行通风工况

储粮数量/t	通风工况/ $\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{t})$	总通风量/ m^3/h	通风表观风速/ m/s
8 200	25	205 000	0.031 6
8 200	20	164 000	0.025 3
8 200	15	123 000	0.019 0
8 200	10	82 000	0.012 7
8 200	7.5	61 500	0.009 5
8 200	5	41 000	0.006 3

表 2 横向通风通风工况

储粮数量/t	通风工况/ $\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{t})$	总通风量/ m^3/h	通风表观风速/ m/s
8 200	10	82 000	0.063 3
8 200	8	65 600	0.050 6
8 200	6	49 200	0.038 0
8 200	5	41 000	0.031 6
8 200	4	32 800	0.025 3
8 200	2	16 400	0.012 7

1.4.2 基本参数及边界条件

试验选用的粮种是小麦,容重是 800 kg/m^3 ,孔隙率为 0.468 6;流体设为不可压缩流体,湍流模型选择 $k-\varepsilon$ 模型,粮堆区设为多孔介质区域^[7-10],入口条件设为质量流量入口,根据表 1 和表 2 的通风工况设置不同的质量流量,出口边界为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。

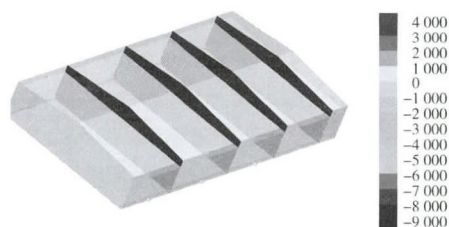
采用稳态算法,对控制方程采用有限体积法进行离散,离散格式为一阶上风差分格式,为了防止迭代过程的发散和数值不稳定,对动量方程采用欠松弛技术,压力与速度耦合采用 SIMPLE 算法。

2 模拟结果与分析

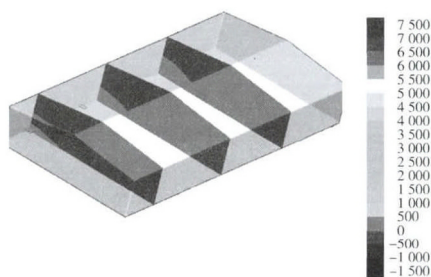
2.1 平房仓压力场分析

图 2 是横向和 U 型一机三道平房仓通风压力分布图,选取横向通风和竖向上行通风两仓,每仓取几个截面进行压力的分析。图 2a 截取了 4 个压力面,4 个面上压力分布一致,通风过程中由左至右形成了压力稳定的高压区、中压区和低压区,由此可见横向

通风小麦的阻力在水平方向分布均匀,小麦阻力在 3 000 Pa 左右 [$10 \text{ m}^3 / (\text{h} \cdot \text{t})$]; 图 2b 中截取了 3 个压力面,由于南侧是通风入口,下侧设有通风笼,因此图中左下侧通风道阻力大,粮堆阻力较小,小麦上行阻力在 400 Pa [$25 \text{ m}^3 / (\text{h} \cdot \text{t})$] 左右,整体来看竖直方向上粮堆的阻力均匀。



a 横向通风压力分布



b 上行通风压力分布

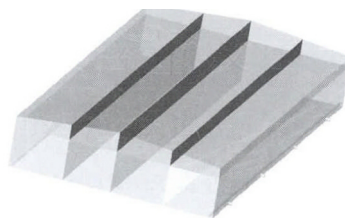
图 2 横向和 U 型一机三道平房仓通风压力分布图

小麦在图 2a 和图 2b 这 2 种通风方式下,阻力是不同的,横向通风气流需要穿过 30m 的粮堆而竖向通风只需穿过横向路径长度的 1/5,横向通风的路径长于竖向通风,所以总的粮堆阻力横向通风的阻力要大于竖向上行通风的阻力。下行通风时粮堆阻力与上行通风时基本一致,这里未予给出。

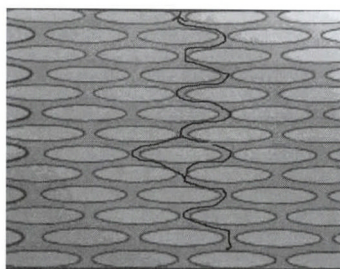
2.2 平房仓单位粮层阻力分析

图 3 是小麦在不同的通风方式下单位粮层阻力和通风路径图。选取 6 个通风工况,对小麦粮种横向通风、竖向上行通风、竖向下行通风进行了数值模拟研究,数值计算后对物理模型做切片,如图 3a 所示,沿长度方向做出切片,对粮堆高度的截面取面积分得出表观风速,前后 2 个墙面的位置取静压的面积分,从而求出粮堆的阻力,除以粮仓的跨度后得出单位粮阻,竖向通风亦是如此,这里不再重复,最后得出表观风速即空气流经粮堆时的平均气流速度与单位粮层阻力的关系。

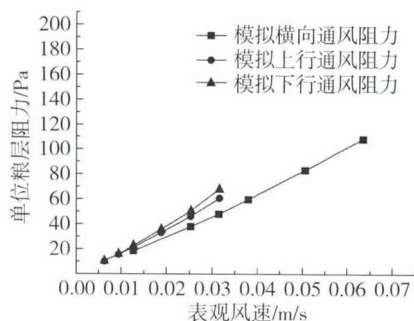
图 3c 中,随着表观速度的增大(通风量的增大),小麦横向通风、上行和下行的单位粮层阻力逐



a 横向通风粮仓切片图



b 小麦通风气流路径图



c 小麦不同通风方向单位粮层阻力

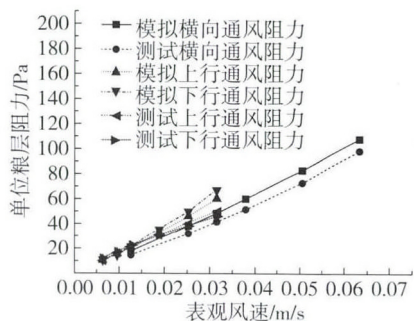


图 3 小麦单位粮层阻力和通风路径图

渐增大,表观速度和单位粮层阻力正相关。表观速度小于 0.025 m/s 时,小麦上行和下行通风的单位粮层阻力一致,表观速度大于 0.025 m/s 时,小麦下行通风的单位粮层阻力逐渐大于上行时的阻力,随着表观速度的增大,单位粮层阻力相差越来越大;小麦

横向通风的表观速度在 $0 \sim 0.0127 \text{ m/s}$ 之间时,单位粮层阻力与上、下行阻力几乎相同,表观速度大于 0.0127 m/s 横向通风的单位粮层阻力将小于竖向通风的阻力,大约是竖向阻力的 80%。总体来看,小麦的下行单位粮层阻力略大于上行的单位粮层阻力,随着风量的增大,两者的差距有增大的趋势,横向通风的单位粮层阻力最小。

图 3b 是小麦粮堆堆积图,小麦为椭球状颗粒,受其自稳定性的影响,其堆积形式大多为长轴接近于水平方向。小麦在重力作用和侧壁压力的作用下,深层粮堆自上而下,由外到里孔隙率逐渐减小,粮堆内部不同区域的孔隙率也是不同的。从图 3b 可以看出,竖向通风的气流路径迂回曲折,横向通风相对平直。气流的弯曲程度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, $\tau = (\frac{L}{Le})^2$ 。式中: Le 为孔隙弯曲通道的真实长度, L 为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,显然小麦横向通风的迂曲率更接近于 1,单位粮层阻力要小于路径曲折的竖向通风。小麦下行通风的过程中,气流由窗户进入粮堆表面,然后再由粮堆表面进入粮堆,粮堆上方的气流紊乱,而粮堆内速度很小处于层流状态,在粮面处气流由紊流状态进入层流状态,惯性力会出现一定损失(小风量的工况下损失较小,风量越大损失越大);气流在上行通风中不存在这个问题,所以小麦下行通风的单位粮层阻力会略大于上行通风的单位粮层阻力。随着风量的增加,粮堆上方气流的紊流增强,进入粮堆时的惯性阻力损失会逐渐增大。

图 3d 是模拟结果与试验数据对比图,本研究数据来自国家粮食局科学研究院对北京某粮库小麦进行了不同通风方式的实仓测试,横向通风时,北侧的 4 个风口接入风机,每个风机接入一个变频器,通过调节变频器的频率来达到测试要求的风量;竖向通风时南北两侧都接入风机和变频器,南北侧窗户打开,同样的调节变频器控制风速完成测试,表观风速仪测试粮堆内风速,通过预埋在粮堆内的探针来测试静压。测试不同通风工况下粮堆的静压并计算单位粮层阻力,通过大量的测试总结出表观风速与单位粮层阻力的关系,得出经验公式。从图中可以看出模拟小麦的单位粮层阻力与测试数据基本吻合,从而验证了数值模拟的合理性与准确性。

3 结论

机械通风小麦的单位粮层阻力与通风量正相关,风量越大,单位粮层阻力越大;小麦在不同的通风方式下阻力不同,相同的表观风速下水平方向阻力最小,下行的阻力略大于上行时的阻力,随着风量的增大,上下行的阻力差不断增加。通过对小麦各向异性阻力的分析,为以后玉米、稻谷等不同粮种的各向异性阻力分析与通风系统的优化设计提供参考。

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]. 中国粮油学报, 2012, 27(5): 86-91
Wang Yuancheng, Zhang Zhongjie, Wu Zidan, et al. Application of computational fluid dynamics technology in grain storage systems[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 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
Wang Yuancheng, Wei Lei, Liu Wei, et al. Key techniques of ventilation for cooling stored cereal grains[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2008, 23(5): 141-145
- [3] Griffith F. Numerical investigation into the aeration of grain silos[D]. Toowoomba: 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, 2004, 19(6): 766-773
Song Yingtao, Xu Cenghe, Jiang Yuanyong. Study on the motion of compressible fluid and multi-phase gas-solid reaction in a packed channel[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 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] Tsimplanogiannis I N, Yortsos Y C. Scaling theory of drying in porous media[J]. Journals of the American Physical Society, 1999, 59(4): 4353-4365
- [8] Hoa M L K, Lu M H, Zhang Y. Preparation of porous materials with ordered hole structure[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2006, 121(1-3): 9-23

(下转第 129 页)

Tocopherol and Fatty Acids Contents of Walnut in South Xinjiang Based on Clustering Analysis

Zhang Rui¹ Jia Changlu^{1 2} Gao Shan² Xu Chongzhi¹ Liu Huaying³ Zhang Ruili³

(Xinjiang Production and Construction Corps Key Laboratory of Protection and Utilization of Biological Resources in Tarim Basin¹ ,Alaer 843300)

(College of Plant Science and Technology ,Tarim University² ,Alaer 843300)

(College of Life Science ,Tarim University³ ,Alaer 843300)

Abstract In order to strengthen application of walnut oil and select preferred oil variety ,11 walnuts varieties were collected from Aksu region in Xinjiang as study materials. The HPLC and GC technique were used to determine the contents of fatty acid and VE on walnut oil ,and the Euclidean distance and group – average method were used for cluster analysis. The results showed that “A Hun 2” , “Zhi Pi” walnut on oil yielding were higher than those of others ,the contents of VE in “Xin Wen 81” and “Xin Cuifeng” were higher than other cultivars ,and “Er Jufeng” , “A Hun 2” , “Xin Jufeng” , “Xin Cuifeng” , “Zha 71” , “Xin Wu 417” , “Zhi Pi” walnut species cluster together ,indicating that difference between this seven varieties of unsaturated fatty acids and VE contents was insignificant. The analysis result showed that the “Xin Jufeng” has high oil yielding ,and higher unsaturated fatty acid and monounsaturated fatty acid ,and α and γ totaxinis contents were higher ,so it was worthy of expanding nutritional walnut resource.

Key words walnuts ,fatty acid ,VE ,clustering analysis

(上接第 119 页)

[9]Prat M. Recent advances in pore – scale models for drying of porous media [J]. Chemical Engineering Journal , 2002 (86) : 153 – 164

[10]Plourde F , Prat M. Pore network simulations of drying of

capillary porous media. Influence of thermal gradients [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer , 2003 (46) : 1293 – 1307.

Numerical Simulation for Anisotropic Resistance of Wheat Under the Condition of Mechanical Ventilation

Gao Shuai Wang Yuancheng Qiu Huayu Yang Jun

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

Abstract Mechanical ventilation was the main measure to keep the grain storage security and guarantee quality of grain. Based on Computational Fluid Dynamics(CFD) method ,numerical simulation analysis of horizontal ventilation and vertical ventilation resistance in press – in and extraction method of wheat in large – scale horizontal warehouse was conducted; through the resistance analysis of grain pile under different ventilation modes ,some conclusion was accepted that grain resistance was proportional to air flow rate ,the larger air flow rate is ,the greater resistance was; the unit grain layer resistance was related to ventilation in different ways ,downward ventilation was largest ,the ascensional ventilation was thesecond and horizontal ventilation was smallest. Through the analysis of the anisotropic resistance of wheat ,the foundation was established for different grain analysis of mechanical ventilation system in the future.

Key words mechanical ventilation ,anisotropy ,numerical simulation ,resistance changes