

粮仓机械通风阻力和均匀性模拟研究

潘钰¹, 王远成^{1,*}, 邱化禹¹, 高帅¹, 张晓静¹, 赵会义²

(1. 山东建筑大学教育部可再生能源建筑利用技术实验室, 山东 济南 250101; 2. 国家粮食局科学研究院, 北京市 100037)

摘要: 机械通风是保证储粮品质的主要技术手段, 平房仓储粮地上笼通风系统主要有圭字型和 U 型一机三道两种, 其中圭字型和不同通风途径比的 U 型一机三道地上笼系统的粮堆通风阻力和通风均匀性也不尽相同。文章通过建立圭字型和三种不同途径比的 U 型一机三道地上笼通风方式的物理模型, 采用计算流体力学的方法, 进行数值模拟研究, 获得小麦粮仓在不同通风工况下的通风阻力数据, 并与实验数据进行对比, 分析其粮层阻力变化规律, 探究四种通风方式的通风阻力均匀性。结果表明: U 型地上笼的通风阻力与其途径比成正比关系, 通风均匀性与其途径比成反比关系, 圭字型通风阻力介于途径比为 1.56 和 1.83 的 U 型地上笼之间, 通风均匀性介于途径比 1.21 和途径比 1.56 的 U 型一机三道地上笼之间。

关键词: 数值模拟; 机械通风; 粮层阻力; 通风均匀性; 通风途径比

中图分类号: TU996

文献标识码: A

Numerical study on the ventilation resistance and uniformity of mechanical vertical ventilation on the grain storage

Pan Yu, Wang Yuancheng^{*}, Qiu Huayu *et al.*

(Key Laboratory of Renewable Energy Utilization Technologies in Buildings of the National Education Ministry, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

Abstract: Mechanical ventilation is the main measure of ensuring the grain's safety and quality. The mechanical vertical ventilation of the grain storage in warehouse can be divided into the GUI-shape and U-shape. The ventilation resistance and ventilation uniformity varies with different mechanical vertical ventilation variety. According to Computational Fluid Dynamics (CFD) method, numerical simulation analysis of different vertical ventilation resistances of wheat 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 ventilation pattern and the experimental data, with the analysis of its grains' layer resistance variation and ventilation uniformity. The results show that the ventilation resistance of the U type ventilation cage is proportional to the ratio of the way, and that the uniformity of the ventilation is inversely proportional to the ratio of the way, ventilation resistance of GUI-shape between 1.56 and 1.83 U-type ventilation cage, uniform ventilation between 1.21 and 1.56 U-type ventilation cage.

Key words: numerical simulation; mechanical ventilation; aeration resistance; ventilation

收稿日期: 2016-03-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51276102); 国家粮食公益专项项目(201513001)

作者简介: 潘钰(1991-) 男, 在读硕士, 主要从事多孔介质内流动传热等方面的研究. E-mail: 465748419@qq.com

通讯作者*: 王远成(1963-) 男, 教授, 博士, 主要从事复杂介质中传热传质等方面研究. E-mail: wycjn1@163.com

uniformity; ventilation rout ratio

0 引言

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,因此保证大型平房仓良好的机械通风效果是十分必要的^[1]。目前国内常用的机械通风方式是地上笼垂直通风,地上笼通风风网布局主要有U型和圭字型,U型一机三道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。圭字型即一个分配器连接主风道,主风道两侧不同位置处又分出多个支风道,用多个支风道来保证粮堆送风的均匀性。文中重点研究比较U型一机三道不同途径比(1.21、1.56、1.83)和圭字型风道的通风均匀性和阻力情况。

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”现象以及深层粮堆重力产生的压力作用,粮堆内部不同区域的孔隙率不同^[2]。所以在通风过程中,粮堆内部空气的流动是一个复杂的过程,其不仅涉及到流体力学和多孔介质内部的流动传递理论,它还与粮食颗粒的生物特性等多种因素有关^[3-4]。Smith等人采用有限元的方法对就仓干燥底部水平通风的圆筒仓内部的速度和压力进行了模拟分析^[5]。Garg等使用CFD软件模拟分析了大型圆筒仓中粮粒非均匀分布时通风过程中粮仓内部流场的分布规律^[6]。Lukasse等建立了农产品在就仓通风时仓内微气候动力学模型^[7]。Lukaszuk等采用数值模拟的方法研究了不同粮食颗粒在不同堆积方式下的通风阻力^[8]。

以上发展的模型虽然比较准确的模拟了圆筒仓的粮食颗粒在通风过程中的通风阻力情况,但并不适用于国内房式仓大体积粮堆内部垂直通风阻力及通风均匀性的研究,而且对房式仓粮堆进行垂直机械通风时,风道布置方式及通风途径比不同,粮堆内部通风的均匀性及阻力也不相同。文中主要采用数值模拟的方法,模拟研究房式仓在不同风道布置方式下不同通风量的通风阻力和均匀性,并将数值模拟得出的通风阻力结果与实验所得经验公式计算进

行比较,同时更加准确分析得出不同风道布置方式的阻力大小关系,利用数值模拟结果评价不同风道布置的通风均匀性,为地上笼通风的合理布局方式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

平房仓物理模型图如图1所示。

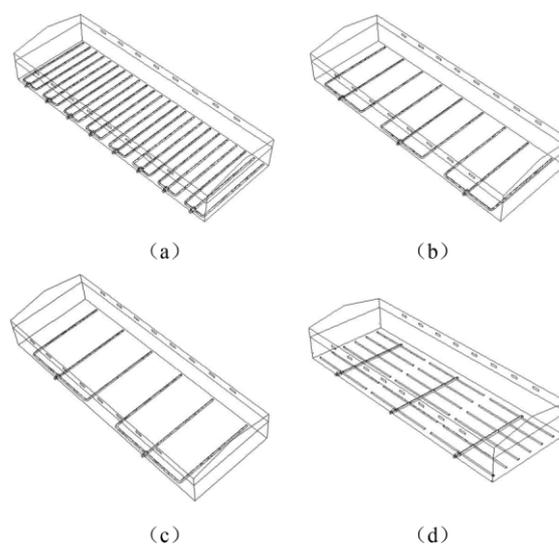


图1 平房仓物理模型图

a) U型途径比1.21物理模型; (b) U型途径比1.56物理模型;
(c) U型途径比1.83物理模型; (d) 圭字型物理模型

如上图所示,文中以大型平房仓为研究对象,建立垂直通风的物理模型,图中粮仓均长为60 m、跨度为21 m、高为10.5 m,而粮堆高度为6 m,粮堆顶部南北两侧各8个窗户。图1(a)、(b)和(c)中地上地上笼为U型一机三道布置,通风途径比分别为为1.21、1.56和1.83,北侧分别设有8个、3个和2个分配器,每个分配器连接一个通风口。图1(d)中地上地上笼为圭字型,北侧设有3个分配器,每个分配器连接一个通风口。

1.2 平房仓网格

文中选取的前处理器是ICEM,对四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,并在通风口和地上笼处进行局部加密,每个平房仓生成的网格数约310万。

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

连续性方程由式(1)表示为

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

式中: ε 为孔隙率; ρ_a 为空气密度,kg/m³; t 为时间,s; u 为空气的表观速度或达西速度,m/s。

1.3.2 动量方程

动量方程由式(2)表示为

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

式中: ρ_a 为空气密度,kg/m³; ρ_b 为粮堆的容重,N/m³; d_p 为谷物颗粒的等效直径,m; u 为粮堆内部空气的表观速度或达西速度,m/s; p 为压力,Pa; t 为时间,s; ∇ 是微分算子, μ 是空气的动力粘度,N·s/m²。式(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,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。

1.4 通风过程中的初始条件和边界条件

U型不同途径比和圭字型地上笼的进口采用质量流量进口。对于不同的单位通风量(5、7.5、10、15、20和25 m³/t·h),设置不同的进口质量流量,数值模拟的通风工况如表1所示。南北侧共十六扇窗户作为出口,出口采用自由出流。U型地上笼为无滑移交界面条件;圭字型主风道为不可渗透壁面条件,支风道为无滑移交界面条件。

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

2.1 地上笼速度分布规律

不同途径比的U型一机三道地上笼速度分布相似。图2(a)是实仓下途径比为1.21的U型地上主地上笼速度变化图,从图中可以看出,一机三道U型地上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。

表1 数值模拟通风工况

储粮/t	单位通风量 /(m ³ ·t ⁻¹ ·h ⁻¹)	总风量 /(m ³ ·h ⁻¹)	表观风速 /(m·s ⁻¹)
5800	5	29000	0.0064
5800	7.5	43500	0.0096
5800	10	58000	0.0128
5800	15	87000	0.0192
5800	20	116000	0.0256
5800	25	145000	0.0320

图2(b)表明圭字型地上笼主风道内速度变化图,从图中可以看出,圭字型地上笼每个支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,支风道速度更小,整体上来看气流比较均匀合理。

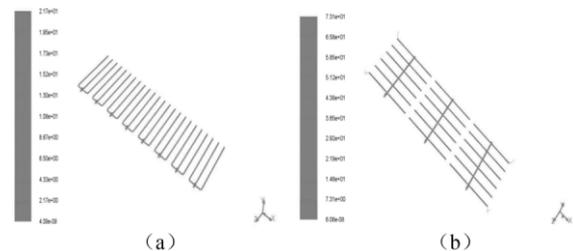


图2 地上笼速度分布图

(a) U型途径比1.21地上笼速度分布图;

(b) 圭字型地上笼速度分布图

2.2 通风总阻力分析

2.2.1 地上笼阻力经验公式

地上笼阻力经验公式由式(3)表示为

$$H = a \cdot Q^b \quad (3)$$

式中: H 为地上笼的阻力,Pa; Q 为单位通风量,m³/t·h;其中U型地上笼系数 $a = 43.8$, $b = 1.6879$,圭字型地上笼系数 $a = 39.1$, $b = 1.8573$ 。

2.2.2 单位粮层阻力经验公式

单位粮层阻力经验公式由式(4)表示为

$$H = 9.81 \cdot a \cdot u^b \quad (4)$$

式中: $H_{\text{粮层}}$ 为粮层阻力, Pa; u 为表观风速, m/s; 系数 a 和 b 分数为 143.31、0.9624。

根据实验数据处理所得经验公式(3)、(4)和数值模拟结果进行比较, 比较结果如图3所示。

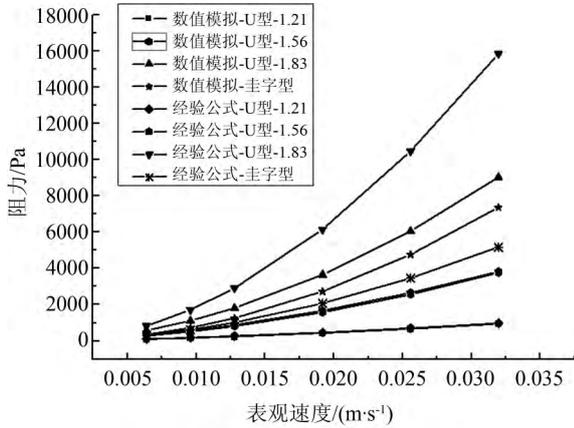


图3 四种风道布置方式的总阻力图

图3表明, 根据数值模拟结果和经验公式计算结果, 均可以清楚看出随着表观速度的增大, 通风总阻力也同时增大; 其中U型地上笼途径比为1.21的通风阻力最小, 途径比1.56的阻力次之, 途径比1.83的通风阻力最大; 途径比为1.21与1.56的U型一机三道地上笼的数值模拟结果与实验数据所得经验公式的通风阻力比较一致, 由于途径比1.83的U型地上笼风道较少, 通风时气流在多孔介质粮堆穿过的路径最长, 受粮堆内部粮食颗粒的自稳定性以及内部孔隙率的不同影响, 途径比为1.83的数值模拟结果小于实际实验测量所得经验公式计算结果。另外, 圭字型地上笼布局较复杂, 局部阻力损失较大, 圭字型的通风总阻力也较大, 所以其大于途径比为1.21和1.56的U型一机三道地上笼的通风阻力, 但小于途径比为1.83的U型一机三道地上笼的通风阻力。

2.3 四种风道布置方式均匀性分析

均匀性指数采用 Weltens 等^[9] 建立的评价流动分布特性的均匀性指数来表示流速/混合的均匀性程度计算式(5)为

$$r = 1 - \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{(v_i - v)^2}}{v} \quad (5)$$

式中: r 为均匀性指数, 在0和1之间变化, r 越大说明流动越均匀; v_i 为各观测点的速度, m/s; v 为全部观测点的平均速度, m/s; n 观测点数, 研究共39个观测点。粮堆内部共三层观测点, 最底层距离仓底

1 m, 最上层距离粮面 1 m, 中间层高度为粮堆高度的一半。图4为每层观测点布置示意图, 每层13个观测点。每层(水平切面)四个角点距墙1 m, 其他点尺寸如图所示, 测点分布均匀合理, 有利于均匀性的检测。

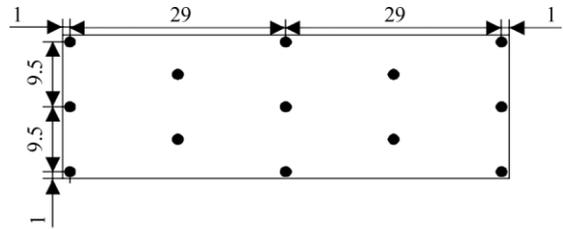


图4 观测点布局图/m

数值模拟结果与实验数据, 代入公式(5)得出四种通风方式不同表观速度下的粮堆通风均匀性, 如图5所示。

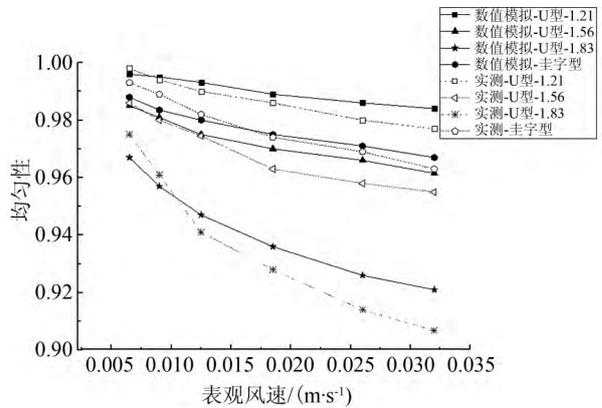


图5 四种风道布置方式均匀性图

图5表明, 在表观风速较小时, 模拟数据与实测数据比较一致, 表观风速较大时, 实测均匀性系数要小于模拟数据结果, 这是由于实际测量中, 测量存在误差, 导致测量的速度变化幅度较大, 通风均匀性降低。同时, 实测数据与模拟数据也均表明随着表观速度的增大, 四种布局方式的通风均匀性均降低。分析认为, 表观速度越大时, 气流对粮堆内部颗粒的扰动作用就越强, 影响了速度的均匀分布。U型一机三道中, 途径比越小, 通风均匀性越好; 圭字型的通风均匀性介于途径比1.21和途径比1.56之间, 其原因是粮堆底部支风道较多, 通风时粮堆内部气流速度分布较为均匀, 通风均匀性也越好。

3 结论

通过上述研究可知:

(1) U型地上笼途径比为1.21的通风阻力最小,途径比1.56的阻力次之,途径比1.83的通风阻力最大,圭字型通风阻力介于途径比为1.56和1.83的U型地上笼之间。

(2) U型一机三道中途径比越小,通风均匀性越好;圭字型地上笼的通风均匀性介于途径比1.21和途径比1.56的U型一机三道地上笼之间。

此研究为粮仓储粮机械通风采用地上笼通风形式时,风网的布局方式提供了重要的理论依据和技术参考。

参考文献:

- [1] 宋涛,孙颖,刘建岭.通风笼改造对玉米通风效果的研究[J].粮油仓储科技通讯,2011,27(4):45-47.
- [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] 刘鹤年.流体力学[M].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [4] 林瑞泰.多孔介质传热传质引论[M].北京:科学出版社,1995.
- [5] Smith E. A. . Pressure and velocity of air during aging and storage of cereal grains[J]. Transport in Porous Media,1996,23(2):197-218.
- [6] Garg D. ,Maier D. E. . Modeling non-uniform airflow distribution in large grain silos using Fluent [C]. Proceedings of the 9th International Working Conference for Stored-Product Protection 754-762. Campinas ,Sao Paulo ,Brazil: ABRAPOS 2006.
- [7] Lukasse L. J. S. , Kramer C. J. E. . A physical model to predict climate dynamics in ventilated bulk-storage of agricultural produce [J]. International Journal of Refrigeration 2007,30:195-204.
- [8] 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(2):112-118.
- [9] Weltens H. , Bressier H. , Terres F. . Optimization of Catalytic Converter Gas Flow distribution by CFD Prediction [R]. Detroit: Society of Automotive Engineers ,1993.
- [10] 王远成,元伟,张中涛.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辑),2014,29(4):487-496.
- [11] 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研究[J].中国粮油学报,2015,30(11):97-102.
- [12] Prat M. Recent advances in pore-scale models for drying of porous media[J]. Chemical Engineering Journal 2002(86):153-164.
- [13] 杨广靖,任云虹,贾金元,等.我国粮食储藏的现状与发展趋势[J].粮食加工,2012,37(1):60-63.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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):56-58.

(上接第253页)

- [6] 秦梓,郭成喜.单轴对称工字形截面悬臂钢梁在横向荷载作用下的整体稳定性研究[J].工程力学,2009(9):152-155.
- [7] 杨波.工字梁在弯矩和均布荷载作用下的整体稳定[J].钢结构,2012,27(11):23-25,86.
- [8] 周芬,池云祥,杜运兴.上下翼缘同时受荷的工字形钢梁整体稳定性分析[J].湖南大学学报:自然科学版,2012,39(11):7-12.
- [9] 周绪红,刘占科,陈明,等.钢梁弯扭屈曲临界弯矩通用公式研究[J].建筑结构学报,2013,34(5):80-86.
- [10] 刘占科,周绪红,何子奇,等.复合荷载作用下简支钢梁弹性弯扭屈曲研究[J].建筑结构学报,2014,35(4):78-85.
- [11] 董根树.钢结构的平面外稳定(修订版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [12] Bleich F. . Buckling Strength of Metal Structures [M]. New York: McGraw-Hill,1952.
- [13] 吕烈武,沈世钊,沈祖炎,等.钢结构构件稳定理论[M].北京:中国建筑工业出版社,1983.
- [14] 陈骥.钢结构稳定理论与设计.第6版[M].北京:科学出版社,2014.
- [15] Kirby P. A. , Nethercot D. A. . Design for Structural Stability [M]. Suffolk: Constrado Monographs ,1979.

(学科责编:吴芹)