

横向充氮气调工艺数值模拟研究及评价

邱化禹¹,赵会义²,石天玉²,王远成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:横向通风系统应用到粮食储藏中,具有装卸粮快捷方便、节省人力物力等优势。通风的均匀性效果对于粮食的安全储藏非常重要,基于CFD有限体积法,对仓储静态粮堆横向通风过程中的氮气流动和氮气浓度进行数值模拟研究。模拟结果表明,利用横向通风系统进行充氮气调,整个粮堆中氮气的浓度非常均匀,可以提供低氧的储藏环境,为横向通风系统的优化设计提供了有价值的参考依据。

关键词:数值模拟;均匀性;横向通风;低氧;有限体积法

中图分类号:S 379.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-7561(2015)S-0020-04

Numerical simulation and evaluation of nitrogen - filled lateral ventilation in grain warehouse

QIU Hua - yu¹, ZHAO Hui - yi², SHI Tian - yu², WANG Yuan - cheng¹, 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 system for grain storage has the advantages of conveniently and quickly loading and unloading grains, saving the manpower and material resources. The effect of ventilation uniformity plays an important role in grain storage system. The nitrogen concentration and nitrogen flow uniformity which in the lateral ventilation process of stored bulk grain was analyzed based on the finite volume method of computational fluid dynamics (CFD). The result showed that nitrogen concentration in the whole stored grain was very uniform during lateral ventilation for filling nitrogen, which provided hypoxic environment for storage. It provided a valuable reference for the optimization design of lateral ventilation system.

Key words: numerical simulation; uniformity; lateral ventilation; hypoxia; finite volume method

目前,世界各国对食品安全和环境保护越来越重视,世界粮农组织要求各成员国逐步减少直至全部禁止在粮食储藏过程中使用化学药剂,而气调储藏技术是国际公认的绿色储藏技术^[1]。气调贮藏是一种成熟的技术,可以延长贮藏时间,保持食品的天然品质^[2]。

由于粮堆是由粮食颗粒堆积而成,是一种典型的多孔介质^[3]。充氮气调本质上是氮气在多孔介质内的流动过程。通风过程中粮堆内部的流动是一个非常复杂的过程,它与粮堆热物性参数和粮食生物特性等多种因素有关,而且涉及到流体力学、传热

学^[4]、工业通风^[5]、生物学以及多孔介质内部的流动传递理论^[6]。

目前,国内采用数值模拟的方法研究横向通风流动特性的工作还不是很多,而数值模拟是国外近年发展起来的一种研究流动、传热质等现象的新方法,它可以形象地再现流动、热湿传递过程的情景。也为分析和预测粮食储藏、粮仓生态系统的变化规律提供了一个良好的数值分析和优化工具。计算流体力学(CFD)模拟结果不仅可以提供粮食储藏中空气流动过程中各种热力学参数与流体流动的详细信息,而且还可以为优化储粮通风系统及工艺,探究储粮生态系统的发生发展规律提供了新的方法^[7]。

本实验利用CFD有限体积法对横向通风过程中的氮气流动和氮气浓度进行数值模拟研究,为横

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:邱化禹,1989年出生,硕士研究生。

通讯作者:王远成,1963年出生,教授,博士。

向通风系统的优化设计提供依据。

1 物理模型

模拟对象为杭州某粮库 P24 号仓, 仓房尺寸为: 长 49.5 m, 宽为 18 m, 装粮高度为 5 m。储粮品种为稻谷, 水分 11.2%, 杂质 0.6%。物理模型如图 1 所示。

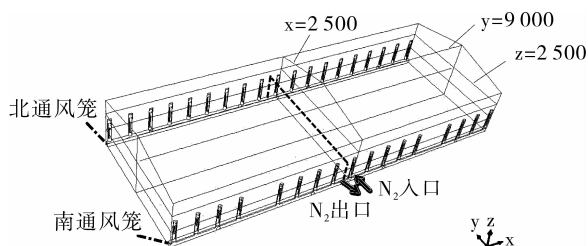


图1 仓房物理模型

图 1 中 N₂ 进出口尺寸均为直径 65 mm 的圆管, 进出口均在南侧, 虚线表示北侧通风笼由一根在粮面上的管道连接。由于南侧有两扇门, 所以南侧通风笼比北侧通风笼少两根立通风管道(南侧 17 根, 北侧 19 根)。同时, 由于数值模拟的是三维模型, 为了便于分析数值模拟结果, 分别选取 X = 25 000 mm、Y = 9 000 mm、Z = 2 500 mm 三个不同截面上的氮气浓度进行分析。

2 仓储粮堆中的氮气流动及对流扩散数学模型

2.1 连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial(\rho x_j)} = 0 \quad (1)$$

2.2 动量方程

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\rho u_j \partial u_i}{\varphi \partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] - \frac{\varphi \mu u_i}{K} \quad (2)$$

2.3 氮气浓度对流扩散方程

$$\varphi \frac{\partial C}{\partial t} + u_j \frac{\partial C}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[D_{eff} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right] \quad (3)$$

其中, ρ 氮气密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; φ 稻谷孔隙率; p 压力, Pa; t 时间, s; u_i 和 u_j 为 i th 和 j th 方向速度分量, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; x_i 和 x_j 为坐标 ($x_1 = x, x_2 = y, x_3 = z$), m; K 稻谷渗透率, m^2 ; μ 氮气动力粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; C 氮气浓度; D_{eff} 稻谷内部氮气的有效扩散系数。

3 数值方法及初始边界条件的建立

3.1 边界条件

粮堆顶部的覆膜和墙壁设为不可渗透壁面; 进口氮气流量为 $60 \text{ m}^3/\text{h}$, 浓度为 99.8%; 进口设为速度入口, 出口为自由出流。

3.2 数值方法

对流项采用 QUICK 格式, 扩散项采用二阶中心

差分格式, 时间项采用 Adams - Bashforth 格式, 为了防止迭代过程数值的发散和不稳定, 对动量方程、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^[5]。计算域采用非均匀网格, 建筑物壁面附近采用较密集的网格, 计算域中心区域采用较稀疏的网格。

4 数值模拟结果与分析

对所选取 X = 25 000 mm、Y = 9 000 mm、Z = 2 500 mm 三个不同截面上的氮气浓度进行分析, 各个截面示意图如图 2 所示。

4.1 不同时刻氮气浓度在各个截面的分布

图 2 中黑色箭头表示氮气的流动方向, 从图 2 可以看出, 在充氮初始阶段 (0.603 9 h), 氮气主要在进口一侧的通风笼中, 大约 3.237 2 h 时, 氮气充满进口侧的通风笼, 此后, 氮气进入粮堆 (多孔介质) 流动, 直到大约 60 h 时, 氮气到达另一侧的通风笼, 并通过出口流出。此时粮堆内部氮气浓度达到 98%。

同时, 从图 2 还可以看到, 由于位于两个门一侧的通风笼数量少于均匀布置的进口侧的通风笼数量, 而且位于门一侧的通风笼沿着粮仓长度方向并不是均匀布置的, 氮气在粮堆中迁移时, 造成位于两个门附近的氮气浓度略低于其它部位的浓度, 导致门附近粮堆内部的氮气浓度在充氮接近完成时略低于其它位置处氮气浓度, 造成氮气浓度分布的均匀性降低。

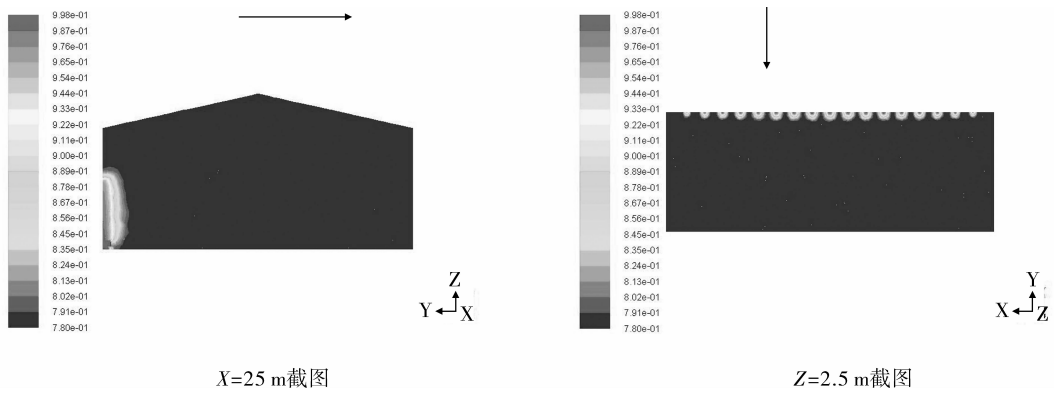
4.2 氮气流动的流场分布规律

由于充氮流量为 $60 \text{ m}^3/\text{h}$, 粮堆内部的表观速度为 $6.67 \times 10^{-5} \text{ m/s}$, 所以, Z = 2.5 m 的截面上的速度很难用矢量图描述, 只能采用流动方向图表示, 故图 3 只表示流动方向和流动规律, 而不说明速度大小和均匀程度, 其中黑色箭头表示氮气的流动方向。由图 3 可知在水平切面上和纵向切面氮气流动流场各方向速度分布是比较均匀的, 通风笼处有较大的速度梯度, 进入通风笼后速度减慢趋于均匀, 粮堆内氮气均匀扩散。流动的均匀性使用均匀度指数描述。

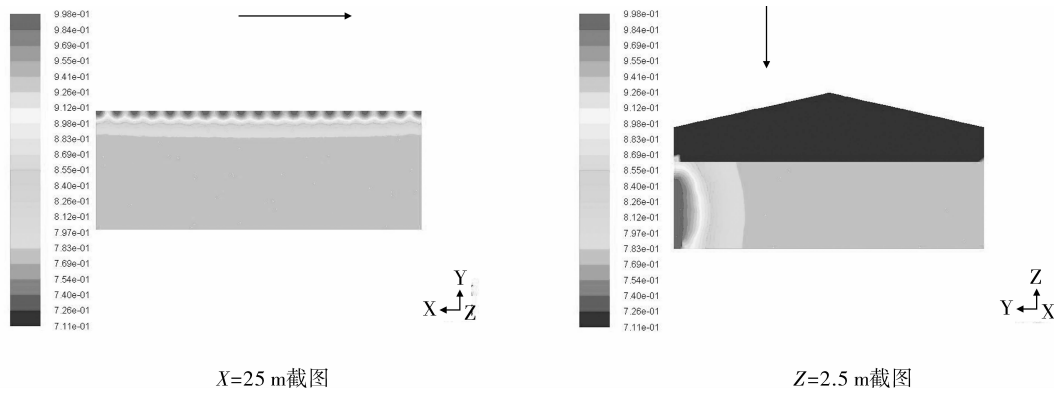
4.3 粮堆中氮气平均浓度和出口氮气浓度随充氮时间的变化规律

由图 4 可以看出, 充氮气时间大约 60 h (2.5 天), 出口氮气浓度可以达到 98%, 此时, 粮堆内部氮气平均浓度 99.5%。根据充氮储粮规范 (仓内浓度达 95% 以上) 要求, 此时充氮过程可以结束。

(1) 充氮时间:0.603 9h。



(2) 充氮时间:3.237 2h。



(3) 充氮时间:60.977 8h。

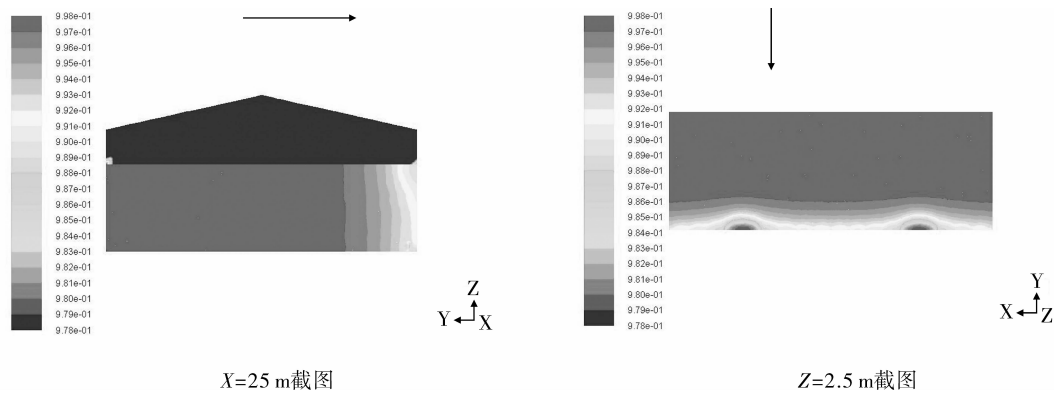


图2 不同时刻不同截面上氮气浓度分布

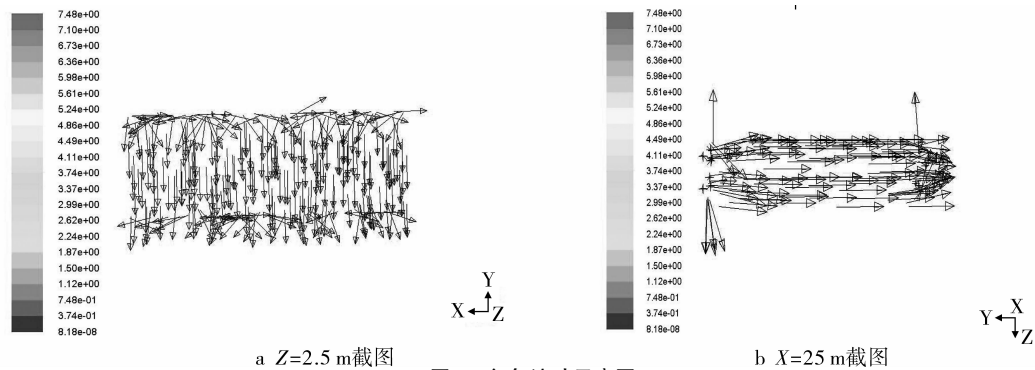


图3 氮气流动示意图

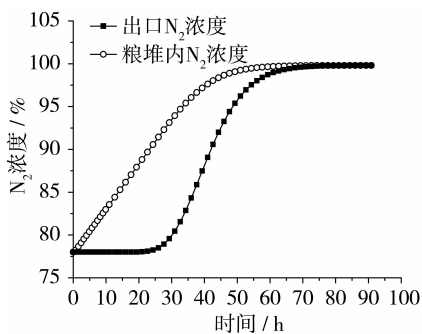


图4 氮气浓度随时间变化规律

4.4 充氮工艺的性能评价

充氮工艺的评价采用均匀性指数来评价氮气流和氮气浓度分布的均匀程度,均匀性指数采用 Weltens^[8]等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),计算公式为:

$$\gamma = 1 - \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{(v_i - v)^2}}{v} \quad (4)$$

其中, γ 为均匀性指数,在 0 和 1 之间变化, γ 越大说明流动或氮气浓度分布越均匀; v_i 为各观测点

的速度或浓度; v 为全部观测点的平均速度或平均浓度; n 观测点数,本研究 27 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 5 为每层观测点布置示意图,每层 9 个观测点。每层(水平切面)北侧第一行距离通风管道 1 m,西侧第一列距离墙 1 m,左右对称,上下对称。

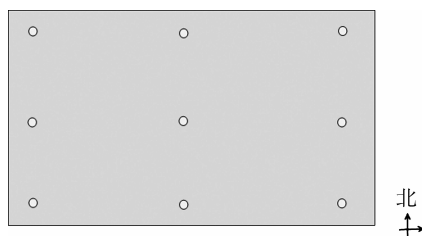


图5 每层观测点布置示意图

由模拟结果得出数据,利用公式(4)计算出充氮结束时(60.977 8 h), X、Y、Z 各个截面方向上流动和氮气浓度的均匀性指数如表 1。

表1 各个截面上流动和氮气浓度的均匀性指数

截面方向	X 方向			Y 方向			Z 方向		
	X = 1 m	X = 24.75 m	X = 48.5 m	Y = 1 m	Y = 9 m	Y = 17 m	Z = 1 m	Z = 2.5 m	Z = 4 m
速度	0.991 1	0.989 7	0.991 6	0.989 0	0.999 7	0.988 2	0.994 8	0.993 6	0.998 7
N ₂ 浓度	0.999 7	0.999 7	0.999 7	0.999 9	0.999 9	1.000 0	0.999 7	0.999 7	0.999 6

5 结论

横向通风系统充氮过程,在 60 h 时各个面上的流动和氮气浓度都非常均匀,说明横向通风充氮工艺可以达到均匀充氮的目的。为今后利用横向通风进行充氮气调提供了理论依据,有利于低氧充氮工艺的大面积推广,优化工艺流程,降低能耗,提高了氮气的利用率,最终达到提高经济效益。

参考文献:

[1] 罗建伟, 李荣涛, 陈兰. CO₂ 气调储粮技术对粮食真菌的抑制效果研究[J]. 粮食储藏, 2003, (6): 34 - 41.
 [2] Jayas D S, Jeyamkondan S. Modified Atmosphere Storage of Grains

Meats Fruits and Vegetables[J]. Biosystems Engineering, 2002, 82 (3): 235 - 251.
 [3] 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.
 [4] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 交通大学出版社, 1998.
 [5] 孙一坚, 沈恒根. 工业通风[M]. 中国建筑工业出版社, 2010.
 [6] 林瑞泰. 多孔介质传热传质引论[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
 [7] 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]. 中国粮油报, 2008, 27(5): 86 - 90.
 [8] Weltens, Bressier, Terres. Optimization of Catalytic Converter Gas Flow distribution by CFD Prediction. SAE Paper 930780, 1993.