

# 高大平房仓横向与竖向通风的数值模拟及分析

俞晓静,王远成\*,戚禹康

(山东建筑大学 热能工程学院,山东 济南 250101)

**摘要:** 机械通风是调节高大平房仓粮堆温湿度的有效方式,对横向和竖向通风方式下粮堆内部热湿耦合传递规律进行分析,可为实际储粮仓的最佳通风条件设置提供重要依据。文章建立了高大平房仓的物理模型,采用计算流体力学软件模拟了横、竖向通风下粮堆的温度和水分分布,分析了温度水分均匀性指数和通风能耗。结果表明:进风湿度会影响粮堆的水分分布,由于粮堆内部吸湿与解吸湿过程更快达到平衡,因此横向通风方式粮堆内部的保水性能更好;相较于竖向通风,横向通风系统具有通风路径长、温度和水分分布均匀性好等优势;横向通风单位阻力小,空气流动速度快,相同温湿度条件下其降温调湿的效率更高。

**关键词:** 高大平房仓;数值模拟;横向通风;竖向通风;均匀性

中图分类号: S379

文献标识码: A

文章编号: 1673-7644(2020)01-0064-07

## Numerical simulation and comparative analysis of lateral and vertical ventilation of large warehouses

YU Xiaojing, WANG Yuancheng\*, QI Yukang

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

**Abstract:** Mechanical ventilation is an effective way to adjust the temperature and humidity of grain stacks in large warehouses. The numerical simulation and analysis of the coupled heat and humidity transfer law in grain stacks under lateral and vertical ventilation modes can provide important basis for the optimal temperature and humidity setting of ventilation in actual grain storage. This paper establishes a physical model of a large warehouse, simulates the temperature and moisture distribution of grain stack under lateral and vertical ventilation by using computational fluid dynamics software, and analyses the temperature and moisture uniformity and ventilation energy consumption. The results show that the moisture distribution of grain stack is affected by the degree of lative humidity of the air. Because the process of moisture absorption and desorption in grain stack can reach equilibrium faster, the water retention of grain stack is better by lateral ventilation. Compared with vertical ventilation, the lateral ventilation system has the advantages of long ventilation path, good uniformity of temperature and moisture distribution. The unit resistance to lateral ventilation is small, the air flow speed is fast, and the cooling and humidification efficiency is higher under the same temperature and humidity conditions.

**Key words:** large warehouse; numerical simulation; lateral ventilation; vertical ventilation; uniformity

收稿日期: 2019-12-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0400100, 2016YFD0401002); 国家粮食公益专项(2015133001)

作者简介: 俞晓静(1995-),女,在读硕士,主要从事多孔介质传热传湿等方面的研究。E-mail: 13065053585@163.com

通讯作者\*: 王远成(1963-),男,教授,博士,主要从事复杂多孔介质传热传湿等方面的研究。E-mail: wycjn1@163.com

## 0 引言

机械通风作为一种操作方便且成本较低的降温技术,目前已大规模地投入用于高大平房仓的储粮过程中<sup>[1]</sup>。对粮仓进行机械通风不但可以将粮堆温度控制在理想的低温条件下,还可以有效地调节粮仓内部粮堆的水分分布<sup>[2]</sup>。传统竖向通风方式在平房仓地面上铺设通风道,其通风较为均匀且降温效果快,但是粮食进出仓时需安装和拆卸地上笼风道,严重地制约了粮食进出库的机械化水平<sup>[3]</sup>。针对竖向通风存在的问题,采用一种新型的通风方式即横向通风,其将通风道固定在粮仓壁面,可以有效地提高进出仓效率<sup>[4]</sup>。竖向通风和横向通风是两种主要的粮仓通风方式,因此对比研究分析不同通风方式下粮堆温度和水分的变化,可为实际通风操作提供最佳的进风温湿度条件<sup>[5]</sup>。

粮堆机械通风过程中涉及到多孔介质的热质交换问题,通风实验的外界环境温湿度、风机开启时间、当地气候、气流速度等都会影响实验结果,并且受实验场地和环境的影响,粮温和进风温湿度会随环境变化,不能进行相同条件的多次实验<sup>[6]</sup>。借助计算流体力学 CFD(Computational Fluid Dynamics) 软件,可以克服实验操作难题。通过建立通风道位置不同的物理模型,模拟竖向、横向两种通风方式<sup>[7]</sup>,可以控制其他模拟条件不变,所得结果直观、准确,为粮食储存提供理论指导。王远成等<sup>[8]</sup>提出通风过程中粮堆内部的热湿耦合传递模型,研究机械通风后粮

堆内部热量和水分迁移规律;Thrope<sup>[9]</sup>基于传热传质的守恒方程建立数字模型,研究粮堆的物性参数对通风过程的影响;许启铿等<sup>[10]</sup>建立颗粒流数值模型,对散粮堆底部压力进行数值模拟分析;赵会义等<sup>[11]</sup>研究了不同通风和风速条件下的粮层阻力的变化规律;陈桂香等<sup>[12]</sup>采用 CFD 软件数值模拟高大平房仓的热湿传递过程,得到最佳的机械通风风量。

文章基于多孔介质的传热传质理论,以高大平房仓为例,建立了通风过程中热湿耦合的  $k-\varepsilon$  模型,采用 CFD 软件模拟通风过程中粮堆(稻谷)的温湿度变化,从温度、水分均匀性和能耗角度进行分析,得到降温保水效果最佳的通风方式,并对横向和竖向通风的结果进行了评价和分析。

## 1 高大平房仓模型的建立、参数与实测点的设置

### 1.1 物理模型的建立及网格划分

以高大平房仓为研究对象,其长为 27.0 m、高为 12.5 m、装粮高度为 6.0 m。采用横向和竖向两种通风方式,竖向通风采用上行压入式通风,横向通风采用左进右出的吸入式通风<sup>[13]</sup>。高大平房仓物理模型及其网格划分如图 1 所示。采用 GMBIT 软件对高大平房仓进行建模,数值模拟区域分为粮仓粮堆区域(黄色区域)等 3 部分、粮仓上部空气区域(红色区域)和风道空气区域(蓝色区域)。

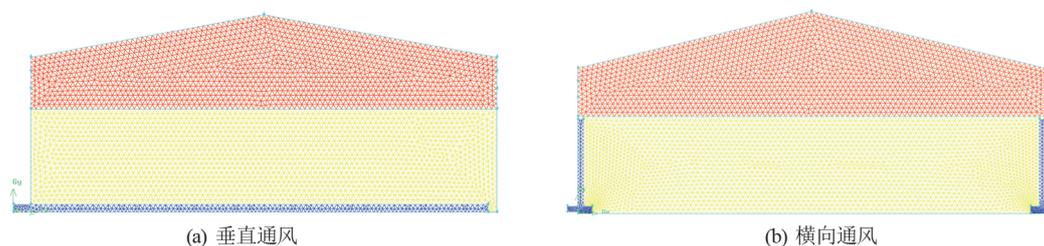


图 1 高大平房仓通风物理模型图

### 1.2 通风过程的数学模型

假设不同通风方式下的仓储粮堆体积都是均匀分布的多孔介质,则机械通风过程可以视为多孔介质与周围空气进行热湿耦合传递的过程。基于多孔介质的流动和传热传质理论,可以建立通风粮堆的热湿耦合传递和传质模型<sup>[14]</sup>。由于连续通风时间相对较短,谷物的呼吸作用产生的水分和热量可以忽略不计。

#### 1.2.1 连续性方程

根据质量守恒定律可知,在控制体内质量总量的改变,等于从边界流入和流出质量之差。由此得到粮堆的连续性方程的微分形式由式(1)表示为

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

式中:  $\varepsilon$  为孔隙率;  $\rho_a$  为空气密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $t$  为时间,  $\text{s}$ ;  $u$  为气流的表观速度或达西速度,  $\mu/\text{s}$ 。

### 1.2.2 动量守恒方程

稻谷粮堆是典型的多孔介质,粮粒间空气动量的变化率满足 Navier-Stokes 方程。由此推导出粮堆的动量守恒方程由式(2)表示为

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

式中:  $\rho$  为粮食密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $S_i$  为粮堆阻力项<sup>[15]</sup>。

### 1.2.3 对流传热方程

储粮内部的热量传递过程满足热力学第一定律,考虑到粮堆粒间空气的焓和粮粒的相<sup>[16]</sup>,根据能量守恒方程可得粮堆内部热量传递的对流换热方程由式(3)表示为

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

式中:  $c_a$ 、 $c_g$ 、 $c_w$  分别为空气、粮食和水的比热,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $k_{\text{eff}}$  是粮堆的有效导热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , 取 0.157;  $h_s$  为对流换热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $h_s (1 - \varepsilon) \rho_s \frac{\partial W}{\partial t}$  为热源项。

### 1.2.4 水分迁移方程

根据局部热平衡理论可以推导出水分迁移方程由式(4)表示为

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

式中:  $w$  为粮粒间的绝对含湿量,  $\text{kg}/\text{kg}$ ;  $D_{\text{eff}}$  为粒间空气水分通过粮堆的有效扩散系数,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $S_w$  为吸湿解吸湿的源项。

### 1.3 模拟的参数设置

粮堆机械通风过程受到进风温度和湿度的影响,根据散粮的堆积特性和粒间空气与粮粒之间的热湿耦合规律,研究粮堆温湿水变化需要设置合理的送风温差和湿差。数值模拟采用  $k-\varepsilon$  模型,模拟储粮品种为中晚籼稻,粮堆的初温为  $25\text{ }^\circ\text{C}$ ,湿基水分为 15%。稻谷粮堆的容重为  $600\text{ kg}/\text{m}^3$ ,孔隙率取 0.6,比热容为  $1600\text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ,导热系数为  $0.11\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。根据初始粮温和初始湿基水分来确定粮堆的初始相对湿度为 76.5%,具体的计算公式由式(5)表示为

$$r = e^{\left( \frac{A}{T+C} - BW \right)} \quad (5)$$

式中:  $r$  为粮堆的相对湿度,%;  $W$  为谷物湿基平衡水分,%;  $T$  为谷物温度,  $^\circ\text{C}$ ;  $A$ 、 $B$  和  $C$  皆为取决于谷物品种的等温常数。

露点温度的计算公式由式(6)表示为

$$T_{\text{dew}} = \frac{243.12 \times \ln \frac{r \times e^{[17.62r/(243.12+\eta)]}}{100}}{17.62 - \ln \frac{r \times e^{[17.62r/(243.12+\eta)]}}{100}} \quad (6)$$

式中:  $T_{\text{dew}}$  为露点温度,  $^\circ\text{C}$ ;  $r$  为相对湿度,%;  $T$  为进风空气的温度,  $^\circ\text{C}$ 。

将 3 个不同的进风空气的温度和相对湿度代入式(6)中,可以分别求出露点温度为 12.7、11.5 和 13.6  $^\circ\text{C}$ ,皆低于进风温度,不会发生结露现象,进风空气的相对湿度设置合理。

为研究两种不同通风方式对粮堆内部温度和水分分布规律的影响,设置 3 个进风湿度不同的对照组,每一个对照组中除通风方式外其他送风条件均相同,具体的通风参数值见表 1。

表 1 不同通风湿度工况下的初始参数表

工况类型	粮食初温/ $^\circ\text{C}$	进风温差/ $^\circ\text{C}$	进风湿差/%	进风空气的相对湿度/%	吨粮通风量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{t}^{-1})$	通风方式	
对照组一	工况 1	25	8	0	76.5	5	横向通风
	工况 2	25	8	0	76.5	5	竖向通风
对照组二	工况 3	25	8	-5	71.5	5	横向通风
	工况 4	25	8	-5	71.5	5	竖向通风
对照组三	工况 5	25	8	+5	81.5	5	横向通风
	工况 6	25	8	+5	81.5	5	竖向通风

### 1.4 实际测点的设置

实验在安徽省现代物流中心粮食储备库中进行,根据 LS/T 1203—2002《储粮机械通风技术规程》<sup>[17]</sup>,在粮堆中合理布置温湿度传感器。为实现实验与数值模拟的数据对比,采用温度检测系统和

温湿水一体化检测系统测定实验中粮堆温度和湿基水分数据,并对通风过程中的温度和水分变化值进行数据记录。水分测定采用型号为 LDS-1S 的电脑水分测定仪,测量误差  $\leq \pm 0.5\%$ 。

横向通风沿粮仓宽度方向设置 3 个粮层,粮层

1 和粮层 3 皆距仓壁 0.6 m 粮层 2 取宽度的 1/2, 每一粮层上皆均匀设置 13 个监控测点, 如图 2( a) 所示。竖向通风沿粮仓高度方向设置 3 个粮层, 粮层 3 距离地面 0.8 m, 顶部粮层距离粮面 0.8 m, 粮层 2 取装粮高度的 1/2, 即距离地面 3 m 处, 每一粮层上

均匀设置的 13 个测点如图 2( b) 所示。实际测点和数值模拟的监控测点应保持一致, 设置依据是进出风口处的温度和水分变化幅度大, 应设置更多监测点, 监测距离仓壁 1 m 内粮层的温度和水分变化, 便于分析粮堆内部的热湿耦合传递规律。

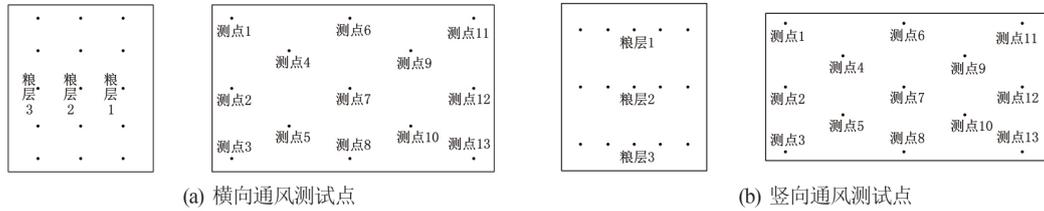


图 2 实仓测试点布置图

## 2 模拟结果与分析

文章研究的是谷物冷却的通风过程, 进风空气恒温恒湿, 其温度低于初始粮温, 温差为 8 °C, 模拟为期 6 d 的降温冷却通风过程, 通过通风过程的温度和水分变化图, 以分析不同通风方式和不同进风相对湿度对通风效果的影响。

### 2.1 对照组一的温度和水份变化

主要对比研究横、竖向通风 6 d 后的结果。通风结束时粮堆内部的温度分布如图 3 所示, 沿通风方向粮堆温度出现分层现象, 这是由于传热过程有衰减延迟现象。图 3( a) 所示的横向通风方式由于

通风路径长, 相较于图 3( b) 的竖向通风方式, 温度梯度大, 但粮堆内总温差在仓储允许范围内。

进风湿度为 76.5% 时水分随通风时间的变化如图 4 所示。横向通风结束时, 进口附近的粮层水分高于初始水分值, 这是因为通风过程中该粮层表面的蒸汽分压不断降低, 水分沿压差方向传递, 表现为粮堆吸收水分。而竖向通风方式下, 进口附近粮层的水分变化幅度小, 如图 4( b) 所示。

横、竖通风方式通风 0~144 h 的数值模拟与通风实验实测的温度、水分值对比如图 5 所示。在横向和竖向通风时, 无论是粮堆的温度值还是水分值, 其模拟与实验实测数据都基本吻合, 因此数值模拟结果是可靠的。

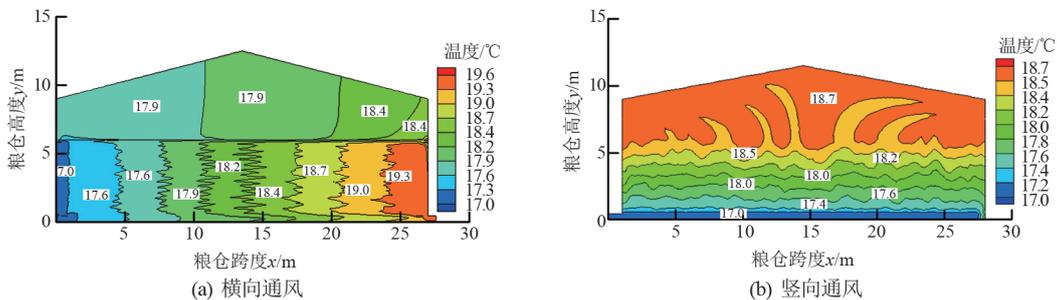


图 3 通风 6 d 时进风湿度为 76.5% 工况的温度分布图

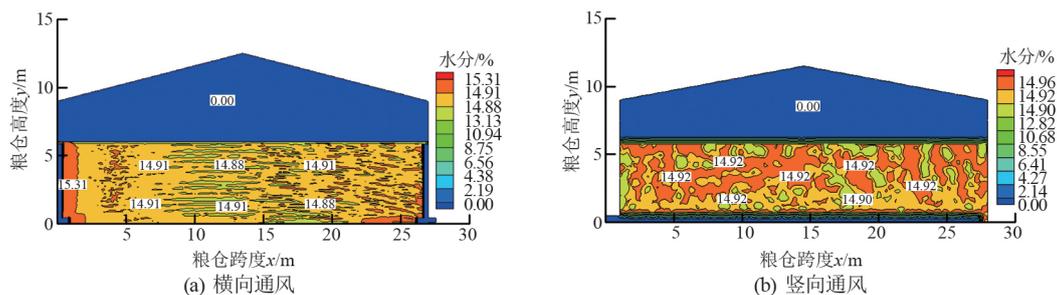


图 4 通风 6 d 时进风湿度为 76.5% 工况的水分分布图

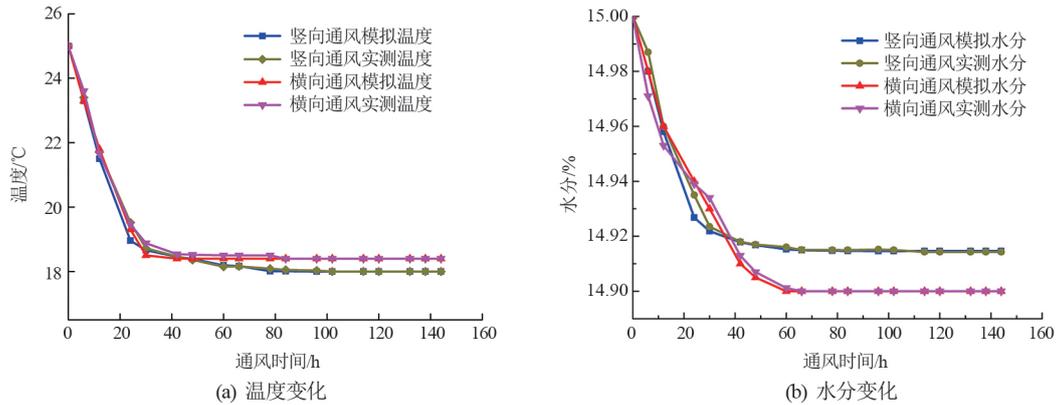


图5 横、竖向通风 144 h 温度和湿基水分的模拟值与实测值对比图

### 2.2 对照组二的温度和水份变化

进风湿度为 71.5% 时,粮堆内部的温度分布如图 6 所示。由于进风湿度低于粮堆湿度,粮粒的解吸湿贯穿整个通风过程,稻谷粮堆放出热量,如图 6(a) 所示,横向通风结束时,平均温度降幅较大,降为 18.3 °C。如图 6(b) 所示,因竖向通风的路径短,平均温度降为 17.4 °C,下降幅度更大。

进风湿度为 71.5% 时,水分随通风时间的变化如图 7 所示。粮堆的初始相对湿度高于进风湿度,粮堆内部不断发生解吸湿过程,通风结束时粮堆的水分丢失较多。但随着粮粒表面的蒸汽分压的降低,空气中的水分向粮堆传递,最终吸湿过程和解吸湿过程达到平衡时,粮堆内部的水分基本不变。

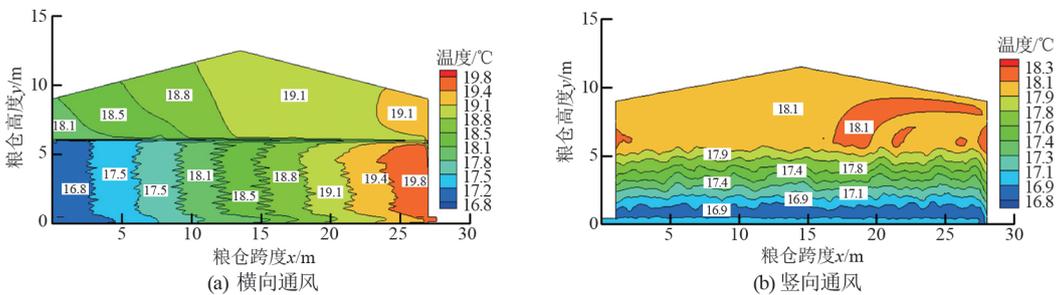


图6 通风 6 d 时进风湿度为 71.5% 工况的温度分布图

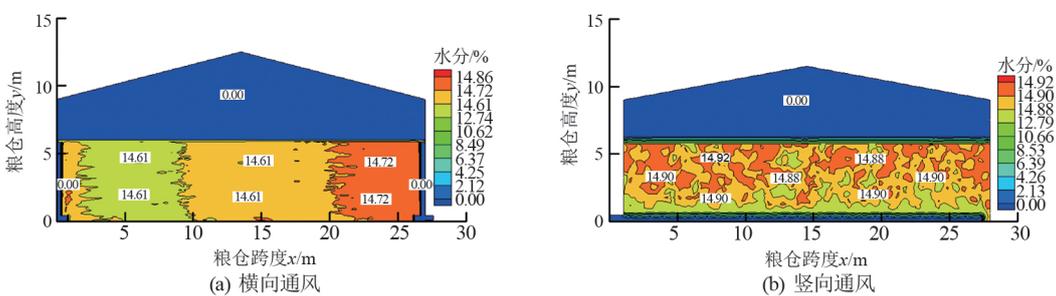


图7 通风 6 d 时进风湿度为 71.5% 工况的水分分布图

### 2.3 对照组三的温度和水份变化

进风湿度为 81.5% 时,粮堆温度分布如图 8 所示。通风粮堆这一多孔介质有吸湿再热现象,而进风湿度高于粮堆的相对湿度,由图 8(a) 和 (b) 可以看出横、竖向通风方式下,粮堆各处温度均有所上升,平均温度分别为 19.4 和 18.5 °C,是粮堆平均温度最高的对照组。

进风湿度为 81.5% 时,粮堆水分分布如图 9 所示。通风初始阶段进风空气的蒸汽分压低于粮堆的蒸汽分压,粮堆丢失较多水分。由于进风湿度较大,粮堆很快进入长期吸湿过程。如图 9(a) 所示,粮堆各处丢水比较严重,但进口附近的粮层相比初始水分增高;如图 9(b) 所示,竖向通风方式下的增水效果比较弱。

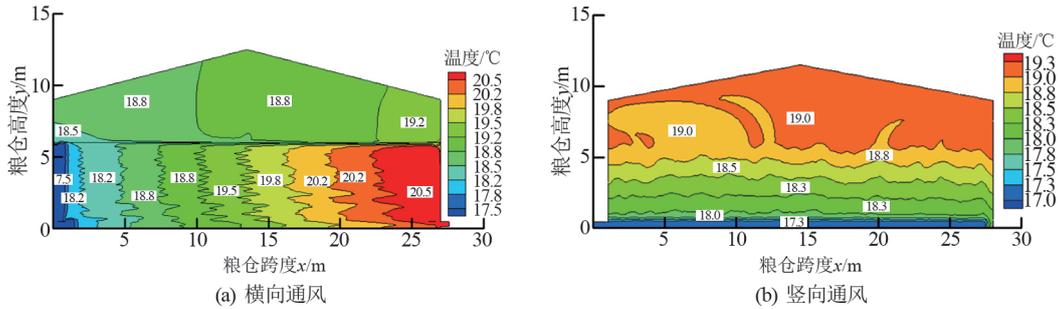


图 8 通风 6 d 时进风湿度为 81.5% 工况的温度分布图

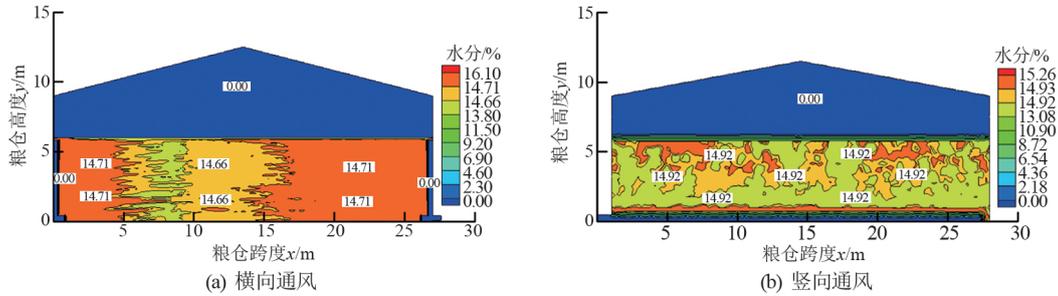


图 9 通风 6 d 时进风湿度为 81.5% 工况的水分分布图

2.4 通风后粮堆的均匀性分析

为表征通风结束后粮堆温度的分布特性,对不同通风方式的通风效果进行评价,采用评价分布特性的均匀性指数表示粮堆内部的温度、水分均匀性程度<sup>[16]</sup>。温度均匀性指数由式(7)表示为

$$\gamma_{\text{tem}} = 1 - \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{(T_i - T_1)^2}}{T_1} \quad (7)$$

式中:  $\gamma_{\text{tem}}$  为温度均匀性指数,一般在 0~1 之间取值,其值越大表示粮堆内部的温度分布越均匀;  $T_i$  为各个测点的温度;  $T_1$  为粮堆内部的平均温度;  $n$  为测点的数量。

水分分布的均匀性指数由式(8)表示为

$$\gamma_{\text{wat}} = 1 - \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{(W_i - W_1)^2}}{W_1} \quad (8)$$

式中:  $\gamma_{\text{wat}}$  为水分均匀性指数,一般在 0~1 之间取值,其值越大表示粮堆内部的水分分布越均匀;  $W_i$  为各个测点的水分;  $W_1$  为粮堆内部的平均水分。

通风结束时的温度均匀性指数和水分均匀性指数见表 2。可以看出,横向和竖向通风后温度均匀性无明显差异,均匀性指数皆接近于 1,表明两种通风方式的降温均匀性都很好。横向通风的水分分布均匀性较竖向通风方式更好,同样是进风湿度为 76.5% 的保水工况 1 和工况 2,竖向通风方式下的水

分均匀性指数仅为 0.84,表明通风结束时粮堆的水分分布不均匀。综合温度和水分分布情况及其均匀性,进风湿度为 76.5% 时的横向通风为最佳降温保水方案。

表 2 不同通风方式下的温度均匀性指数表

工况类型	平均温度 /°C	温度均匀性指数	平均水分 /%	水分均匀性指数
工况 1(横向)	18.4	0.99	14.90	1
工况 2(竖向)	18.0	0.99	14.89	0.84
工况 3(横向)	18.3	0.99	14.66	1
工况 4(竖向)	17.4	0.99	14.88	1
工况 5(横向)	19.4	0.98	14.75	1
工况 6(竖向)	18.5	0.99	14.94	1

2.5 通风系统的通风能耗

通风系统的能耗由式(9)<sup>[18]</sup>表示为

$$W_s = \frac{Q \times P}{\eta} \quad (9)$$

式中:  $W_s$  为通风系统的能耗, kW;  $Q$  为通风过程的通风量,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $P$  为出风口与进风口的压差, Pa;  $\eta$  为风机效率,此处取 0.85。

根据式(9)计算可得横、竖向通风方式下的通风能耗分别为  $4.6 \times 10^5$  和  $1.3 \times 10^5$  kW,横向通风方式由于通风路径长,其能耗相对较大,但优势在于通风不易形成死角,单位通风阻力小。后期需做各项通风参数测定的实验,选择最佳适用风机以降低能耗。

### 3 结论

基于多孔介质的热湿耦合传递规律,对高大平房仓横、竖向通风方式下的多个工况进行数值模拟。从粮堆温度、水分分布及其均匀性指数和能耗等方面进行分析,得到的结论如下:

(1) 进风湿度会影响粮堆的水分分布。进风湿度小,粮堆内部一直处于解吸湿过程,通风结束时粮堆水分丢失较多;进风湿度大,通风结束时进风口附近粮层的水分高于初始水分。横向通风方式下,由于通风跨度大粮温下降慢,相应的粮粒表面与进风空气之间的蒸汽分压差值较小,粮堆内部吸湿与解吸湿过程更快达到平衡,因此采用横向通风方式,粮堆内部的保水性能更好。

(2) 相较于传统的竖向通风,横向通风系统通风路径长且通风死角少,单位通风阻力小;通风结束时粮堆内部的温度和水分均匀性指数接近于1,表明粮堆各处的温度和水分值均匀性较好;相同进风湿度条件下水分丢失较少,可实现降温保水通风。

(3) 由于通风路径长,横向通风总能耗高于竖向通风总能耗;总阻力也相对较大,但其单位阻力较小,因此对于单位粮堆而言空气流动速度快,相同温湿度条件下,其降温调湿的效率更高。

#### 参考文献:

- [1] 沈邦灶,叶盈盈,俞鲁锋,等.基于横向通风系统的粮堆动态控温储粮应用研究[J].粮油仓储科技通讯,2019,35(1):29-32.
- [2] Passoth V, Eriksson A, Sandgren M, et al. Airtight storage of moist wheat grain improves bioethanol yields [J]. *Biotechnol for Biofuels* 2009(2):1-8.
- [3] 沈波,刘益云,王建民,等.平房仓竖向和横向通风系统降温能效对比研究[J].粮食储藏,2018,47(3):12-16.
- [4] 李波,荣群利.横向通风技术在平房仓稻谷储藏的应用[J].粮

- 食科技与经济,2017,42(3):62-63.
- [5] Khankari K K, Patankar S V, Morey R V. A mathematical model for natural convection moisture migration in stored grain [J]. *Transactions of the ASAE*, 1995, 38(6):1777-1787.
- [6] Gaston A, Abalone R, Bartosik R E, et al. Mathematical modelling of heat and moisture transfer of wheat stored in plastic bags (silobags) [J]. *Biosystems Engineering* 2009, 104(1):72-85.
- [7] 马文峰,邹军顺,李新果.高大平房仓机械通风降温对比试验[J].现代食品,2015(15):55-58.
- [8] 王远成,季振江,王双林,等.不同通风方向对稻谷降水效果影响的数值模拟研究[J].中国粮油学报,2018,33(11):72-78.
- [9] Thorpe G R. Modelling heat and mass transfer phenomena in bulk stored grains [C]. *Proceedings of the 6th International Working Conference on Stored Product Protection*, 1995:359-366.
- [10] 许启铿,端君,曹宇飞,等.散粮堆底部压力颗粒流数值模拟分析[J].中国粮油学报,2017,32(9):126-130.
- [11] 赵会义,魏雷,李福君,等.横向与竖向通风玉米粮层阻力研究[J].中国粮油学报,2016,31(12):95-100.
- [12] 陈桂香,岳龙飞,张虎,等.高大平房仓机械通风量优化数值模拟[J].河南工业大学学报(自然科学版),2014,35(4):86-90.
- [13] Meng L, Wang H, Liu G Q, et al. Study on topological properties in two-dimensional grain networks via large-scale Monte Carlo simulation [J]. *Computational Materials Science*, 2015, 103:165-169.
- [14] 尉尧方,王远成,王兴周,等.储粮通风模型的构建及其应用分析[J].山东建筑大学学报,2017,32(3):251-257.
- [15] He H C, Li S M, Liu Z, et al. Error analysis of high-moisture maize moisture measurement with PM-8188 grain moisture tester [C]. *Proceedings of 2011 International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control* 2011:1-3.
- [16] 潘钰,王远成,邱化禹,等.粮仓机械通风阻力和均匀性模拟研究[J].山东建筑大学学报,2016,31(3):254-258.
- [17] LS/T 1203—2002. 储粮机械通风技术规程[S].北京:国家粮食局,2002.
- [18] 张来林,钱立鹏,郝凤祥,等.不同粮种横向和竖向通风性能参数的对比研究[J].河南工业大学学报(自然科学版),2017,38(2):75-79,99.

(学科责编:朱志鹏)