

# 储粮仓横向保水通风的数值模拟及对比研究

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:** 粮仓横向通风方式相比于传统的竖直通风方式,便于粮食装卸,但其通风跨度大,粮堆内部的温度和水分布复杂,对储粮横向保水通风的模拟对比研究,可以为安全储粮提供参考依据。文章基于多孔介质的传热传质理论,建立了横向通风过程中粮堆热湿传递的数学模型,并对横向送风温湿度不同的工况进行模拟和分析。结果表明:当进风空气与粮堆的相对湿度差为 0 时,粮堆内部吸湿与解吸湿过程会很快达到动态平衡,既保证了降温又使粮堆水分降低幅度很小;进风温湿度一定,通风时间越长能耗越大,因此通风时间不宜过长,横向通风时间为 120~144 h;通风天数相同的情况下,相比于传统的竖直通风方式,采用横向通风方式可以实现高效降温的效果,并且反向通风能有效降低粮堆的平均温度。

**关键词:** 横向通风; 温湿度; 数值模拟; 保水通风

中图分类号: S379

文献标识码: A

文章编号: 1673-7644(2019)02-0037-08

## Comparative study on numerical simulation of lateral ventilation for moisture retention of grain storage

YU Xiaojing, WANG Yuancheng\*, QI Yukang

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

**Abstract:** Compared with the traditional vertical ventilation of barn, the lateral ventilation is convenient for grain loading and unloading, but the span of lateral ventilation is large, the temperature and moisture distribution inside the grain pile is complicated. Therefore, the comparative study on numerical simulation of lateral ventilation for moisture retention of grain storage can provide a reference for safe storage of grain. This paper, based on the theory of heat and mass transfer of porous media, establishes the mathematical model of heat and moisture transfer of grain in the process of lateral ventilation and simulates and analyzes the working conditions of different temperature and humidity of air. The results show that the relative humidity difference between the inlet air and the grain pile is 0%, the process of moisture absorption and desorption in the grain pile quickly reaches a dynamic equilibrium, which not only ensures cooling, but also reduces the moisture content of grain pile very little. Given the temperature and humidity of the inlet air, the longer the ventilation time, the greater the energy consumption, so the ventilation time should not be too long, and lateral ventilation for 120~144 hours is enough. The lateral ventilation can effectively reduce the average temperature of the grain pile compared to traditional vertical ventilation during the same period of ventilation, and reverse ventilation can effectively reduce the average temperature of grain pile.

**Key words:** lateral ventilation; temperature and humidity; numerical simulation; ventilation for moisture retention

收稿日期: 2019-02-17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0400100, 2016YFD0401002); 国家粮食公益专项(201513001)

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

稻谷的储存过程中,粮堆内部的温度和湿度分布是影响安全储存的重要因素。为使粮堆的温度和水分都处于安全储存范围内,粮仓通常采用机械通风的方式,其能够有效抑制霉菌及虫害的滋生,使粮食得到安全储存<sup>[1]</sup>。竖向通风系统的通风道设置在粮仓地面,装粮储粮时需耗费大量人力,而横向通风系统的通风道设置于墙壁,有利于粮堆内外的热湿交换,粮仓内温度和水分分布更为均匀<sup>[2]</sup>。为保证仓内稻谷在通风降温的同时水分不丢失,需要对其进行降温保水通风,合理控制粮堆的温度和水分,因此,研究储粮通风过程中的热湿传递尤为重要。随着计算机技术的发展和进步,国内外众多学者开始借助基于流体力学的数值模拟软件,以预测分析通风粮堆内的热湿环境<sup>[3]</sup>。Thrope<sup>[4]</sup>基于传热传质的守恒方程建立一维模型,研究粮堆的物性参数对通风过程的影响,此方法代数计算比较繁琐,且对复杂情况欠缺考虑。Wang等<sup>[5]</sup>和Gao等<sup>[6]</sup>利用数值模拟方法对谷物的降温干燥过程进行了分析,忽略了粮堆内部水分的分布。刘新涛等<sup>[7]</sup>借助数值模拟软件,研究浅圆仓内自然对流对粮堆温度场的影响。陈桂香等<sup>[8]</sup>建立了高大平房仓的三维物理模型,预测干燥通风过程的热湿耦合规律。沈邦灶等<sup>[9]</sup>对比分析了粮面覆膜密闭与不覆膜密闭粮种情况下的通风降温效果。王远成等<sup>[10-11]</sup>深入研究大型房式仓中粮堆通风过程的温度和水分变化规律,将实验实测与数值模拟相结合,建立了准确描述粮堆热湿耦合规律的数学模型。尉尧方等<sup>[12]</sup>通过试验台的搭建,发现实测数值与模拟结果误差不大,验证了数值模拟结果的可靠性。

文章基于到通风粮堆内部的热湿耦合传递特性,借助数值模拟方法,对比分析送风湿度不同的3种工况下粮仓内温度和水分分布,以此确定最佳的送风条件,确保在降低粮温的同时不丢失水分,得到的结果对储粮的通风过程有现实指导意义。

## 1 平房仓储粮通风模型的建立

### 1.1 物理模型

数值模拟的对象为高大平房仓,粮仓跨度为27 m、高为12.5 m,粮堆高度为6 m。通风方式为横向通风,吨粮通风量为 $5 \text{ m}^3 / (\text{h} \cdot \text{t})$ ,在压差作用

下空气穿过粮堆,经由南侧通风道排出仓外,完成如图1所示的通风过程<sup>[13]</sup>。

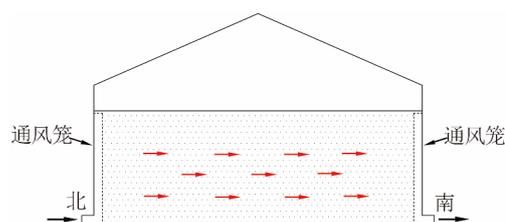


图1 粮仓横向通风示意图

### 1.2 参数设置

粮仓内储粮品种为稻谷,容重为 $600 \text{ kg} / \text{m}^3$ ,初始湿基水分为15%,初始粮温为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,孔隙率为0.6,导热系数为 $0.11 \text{ W} / (\text{m} \cdot \text{K})$ 。文章对进风相对湿度不同的3种工况进行模拟研究,通风温差皆为 $8 \text{ }^\circ\text{C}$ ,详细通风参数值见表1。计算粮堆的初始相对湿度由式(1)表示为

$$r = \exp \left[ - \frac{A}{T + C} \exp(-BW) \right] \quad (1)$$

式中: $W$ 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; $r$ 为粮堆的相对湿度,%。

表1 3种通风湿度工况下的初始参数表

工况类型	粮食初温 $/^\circ\text{C}$	粮食初始 水分/%	进风温度 $/^\circ\text{C}$	进风相对 湿度/%	吨粮通风量 $/( \text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{t}^{-1} )$
工况一	25	15	17	76.5	5
工况二	25	15	17	71.5	5
工况三	25	15	17	81.5	5

由此计算出粮堆的初始相对湿度为76.5%,确定3种工况的进风相对湿度分别为76.5%、71.5%和81.5%,与粮堆初始相对湿度的湿差分别为0%、5%和-5%。

### 1.3 数学模型

基于局部热平衡和多孔介质的流动和传热传质理论,在粮堆内部的通风过程,本质上可以视为稻谷颗粒堆积而成的多孔介质与周围空气进行热湿耦合传递的过程,由此建立粮堆内部横向通风过程中的传热传质和热湿传递模型<sup>[14]</sup>。

#### 1.3.1 连续性方程

根据质量守恒定律,建立粮堆内的质量守恒方程由式(2)表示为

$$\frac{\partial(\varepsilon \rho_a)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_a u) = 0 \quad (2)$$

式中: $\varepsilon$ 为孔隙率; $\rho_a$ 为空气密度, $\text{kg} / \text{m}^3$ ; $t$ 为时间,s; $u$ 为气流的表观速度<sup>[15]</sup>, $\mu / \text{s}$ ; $\nabla$ 为哈密顿算子。

### 1.3.2 动量守恒方程

粮堆内流动空气的动量的变化率满足动量守恒原理,推导出粮堆的动量守恒方程由式(3)表示为

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla) u = \frac{\nabla \rho}{\rho_a} + \nabla \cdot \left( \frac{\mu}{\rho_a} \nabla u \right) + S_i \quad (3)$$

式中: $\rho$ 为粮食密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $S_i$ 为粮堆阻力项<sup>[16]</sup>。

### 1.3.3 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: $w$ 为粮粒间的绝对含水量,  $\text{kg}/\text{kg}$ ;  $D_{\text{eff}}$ 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。

### 1.3.4 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,考虑到粮堆这一多孔介质中空气的焓和粮粒的相<sup>[17]</sup>根据能量守恒方程可得对流传热方程由式(5)表示为

$$\rho_a \varepsilon c_a + \rho_a (1 - \varepsilon) (c_g + c_w W) \frac{\partial T}{\partial t} + c_a \nabla \cdot (\rho_a u T) = k_{\text{eff}} \nabla^2 T + h_s (1 - \varepsilon) \rho_s \frac{\partial W}{\partial t} \quad (5)$$

式中: $c_a$ 、 $c_g$ 、 $c_w$ 分别为空气的比热、粮食的比热和水的比热,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $K_{\text{eff}}$ 为粮堆的有效导热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 取值为0.157;  $h_s(1 - \varepsilon) \rho_s \frac{\partial W}{\partial t}$ 为热源项。

## 2 储粮仓横向进风湿度不同时的模拟分析

### 2.1 储粮仓横向通风的流场

横向通风粮堆内部的流场如图2所示。沿粮仓长度方向等距的分布通风道,由于粮面有覆膜,冷空气由北侧的主风道口进入,沿水平方向穿过整个稻谷粮堆,在南侧出风口流出,粮堆区域的流线分布均匀。

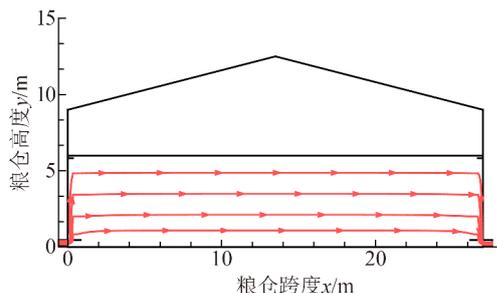


图2 横向通风的流场图

高大平房仓任意一个纵截面的流线分布皆如图2所示,因此,可以选用二维流场示意图,研究横向通风时粮仓内部空气的流动方向和流速。进口和出口处空气流速较大,达0.09 m/s,粮堆内部各点处的表观风速保持一致,其值为0.03 m/s。

### 2.2 工况一的结果和分析

横向通风时,由于粮仓长度方向相对于粮仓高度和跨度方向的温度和水分的梯度较小,分析粮仓内部温度和水分分布规律时,可以将其简化为二维问题进行研究。进风道和出风道分别位于粮仓跨度方向的最左侧和最右侧。

#### 2.2.1 粮堆温度的变化规律

进风湿度为76.5%时,粮堆温度随通风时间的变化如图3所示,对房式仓进行为期336 h的横向通风模拟,稻谷粮堆由北向南沿跨度方向逐渐降温。稻谷粮堆的初始温度为25℃,送风温差为8℃,即送入粮堆的空气温度为17℃,通风结束时粮堆的平均温度降至18.4℃,降幅为6.6℃。仓间的初始温度同样为25℃,粮面的揭膜不影响热传导,通风过程中粮堆上部的仓间空气区域温度下降缓慢,明显滞后于粮堆内部的温度下降。

图3(a)为通风24 h的温度分布云图,冷锋面前沿穿过粮堆中部,中北部的稻谷与周围空气发生热交换,形成温度均匀的北侧低温区,以及待冷却的南侧高温区。图3(b)为通风48 h的温度分布云图,冷锋面前沿穿过整个粮堆,冷锋面平均每1 h向前推进1 m,稻谷粮堆的均温降至18.4℃。图3(c)为通风72 h的温度分布云图,粮堆各处温度均下降至<19.5℃,相较于通风48 h的温度云图,粮堆的个别区域的温度小幅度下降,温度分布更加均匀。通风96、120、144和336 h的温度分布云图分别如图3(d)~(g)所示,温度的分布无明显变化,结合表2中数据可知,通风48 h后粮堆的平均温度降为18.4℃后不再发生变化。图3(h)为通风144 h的不同粮层温度随时间的变化曲线图,将距离进风道位置不同的5个竖直截面选取为不同粮层,其中靠近进风口0.8 m的粮堆最先接触到进风空气,由于进风空气和粮堆之间存在温差,粮堆向周围空气放热,该粮层温度最先开始下降,降幅为7.6℃,降幅很大;通风6 h后平均温度降为17.4℃且趋于平稳。由图3(h)可以看出,沿跨度方向,同一通风时间,距离进风道越远的粮层温度越高,这是因为进风空气不断从粮堆中吸热,导致温度升高,与距离远的粮层之间传递的热量逐渐降低所致。粮层距离进风道越

远,降低到同一温度所需的通风时间越长,原因是冷锋面由北向南地穿过整个粮仓需要时间,距离远的

粮层降到进风口附近粮层的温度需要更长的通风时间。

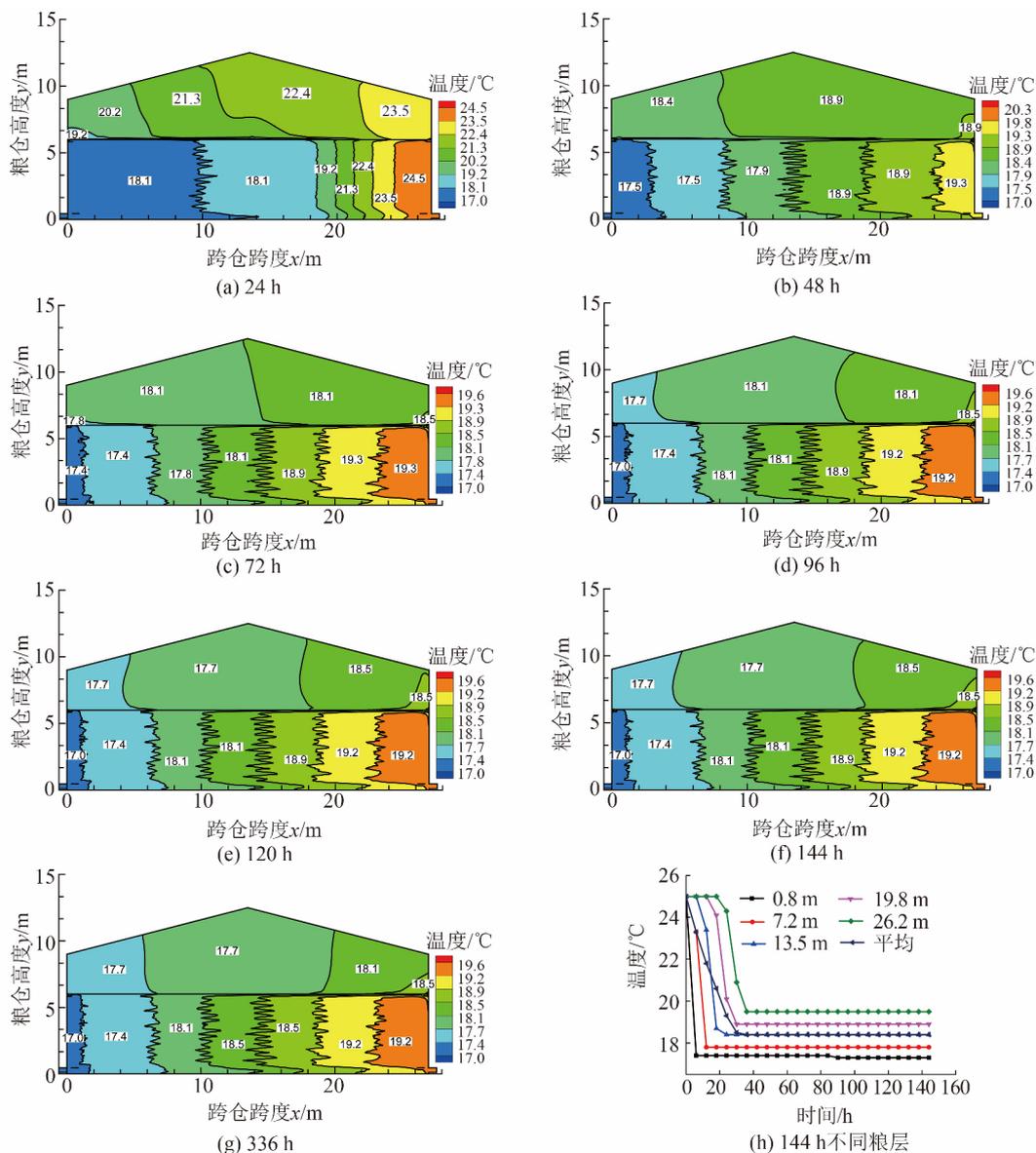


图3 粮堆温度随通风时间的变化图

在进风湿度为76.5%时,不同通风时间的温度和水分变化值见表2。通风24、48、72 h的温度平均变化率分别为5.7、3.3、2.2 °C/d,而通风336 h的温度平均变化率为0.5 °C/d,由此可见,随着通风天数的增加,平均温度变化速率逐渐降低。因此,通风过程中,早期的通风降温效果明显,后期不明显,为无效通风,而继续延长通风时间,只会增加能耗。由此选定144 h为不同进风湿度工况的通风模拟时间,研究粮堆内部的热湿耦合规律。

### 2.2.2 粮堆水分的变化规律

进风湿度为76.5%时粮堆水分随通风时间的变化如图4所示。对房式仓进行为期336 h的横向通

风模拟,稻谷粮堆的水分沿跨度方向从北侧开始下降,整体水分值变化较小,图4(a)~(g)中蓝色仓间区域的水分均为0%,这是由于仓间为空气而非稻谷粮堆,通风只对粮堆的水分变化有影响。稻谷粮堆的初始水分分为15%,送风空气的湿度为76.5%,送风湿差为0%,通风结束时粮堆的平均水分降至14.90%,降幅为0.1%。

表2 工况一不同通风时间的温度和水分值表

参数	通风时间/h						
	24	48	72	96	120	144	336
温度/°C	19.3	18.4	18.4	18.4	18.4	18.4	18.4
水分/%	14.93	14.90	14.90	14.90	14.90	14.90	14.89

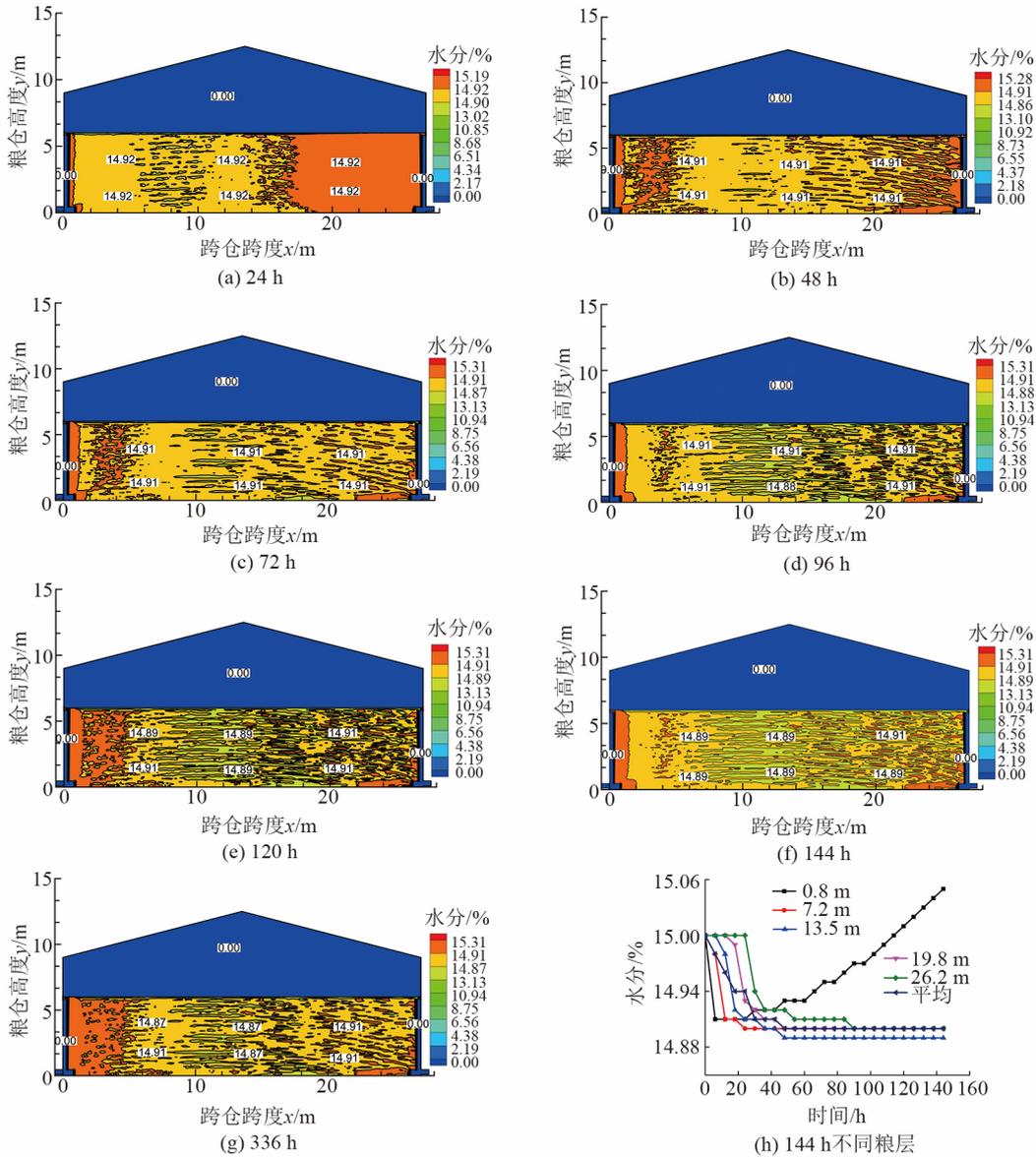


图 4 粮堆水分随通风时间的变化图

图 4(a) 为通风 24 h 的水分分布云图,水分锋面前沿穿过粮堆中部,粮堆中北部的稻谷与周围空气发生质量交换,粮堆的平均水分降低至 14.93%,此时南侧水分高于北侧水分。图 4(b) 为通风 48 h 的水分分布云图,水分锋面前沿穿过整个粮堆,水分锋面平均每 1 h 向前推进 0.8 m,水分分布较均匀,稻谷粮堆的平均水分降至 14.90%。在进风道附近的粮堆水分升高,原因是通风后粮粒表面蒸汽分压降低,粮堆从蒸汽分压高的周围空气中吸收水分。图 4(c) 为通风 72 h 的水分分布云图,粮堆内部的解吸湿过程滞后于吸湿过程,因此,相较于通风 48 h 的水分云图,粮堆中下部由于解吸湿过程的发生,丢失更多的水分。图 4(d)、(e)、(f) 分别为通风 96、120 和 144 h 的水分分布云图,可以看出水分的分布

无明显变化。图 4(g) 为通风 336 h 的水分分布云图,粮堆的水分分布更加均匀,结合表 2 可知,平均水分有所下降,降低至 14.89%。图 4(h) 为通风 144 h 的不同粮层水分随时间的变化曲线图,靠近进风口 0.8 m 的粮堆先发生解吸湿过程,此时粮粒表面的蒸汽分压大于送风空气的蒸汽分压,水分由粮粒表面向进风空气传递,表现为 0.8 m 处的粮层水分先下降;随之进入长期吸湿过程,通风空气的蒸汽分压逐渐增大,粮粒从送风空气中吸水,通风 66 h 后水分相比初始水分略有升高。由图 4(h) 可知,由于水分锋面由北向南开始移动,沿空气流动方向水分依次下降,通风结束时水分皆约降为 14.90%,水分变化较小接近于初始水分,原因是粮堆初始平衡湿度和进风空气湿度相等,吸湿和解吸湿过程很快达到动态平衡。

## 2.3 工况二的结果和分析

### 2.3.1 粮堆温度的变化规律

进风湿度为 71.5% 时,粮堆温度随通风时间的变化如图 5 所示,对房式仓进行为期 144 h 的横向通风模拟,稻谷粮堆由北向南沿跨度方向逐渐降温。稻谷粮堆的初始温度为 25 °C,送风温差为 8 °C,即送入粮堆的空气温度为 17 °C,通风结束时粮堆的平均温度降至 18.4 °C,降幅为 6.6 °C。仓间的初始温度同样为 25 °C,通风结束时粮堆上部的仓间空气区域温度下降明显滞后于粮堆内部的温度下降。图 5(a) 为通风 144 h 的温度分布云图,冷锋面前沿已穿过整个粮堆,粮堆内部温度分布较均匀,粮堆各处温度均下降至 <20 °C,由于通风跨度大,粮仓北侧和南侧温差为 3 °C。图 5(b) 为通风 144 h 的不同粮层温度随时间的变化曲线图,靠近进风口 0.8 m

的粮堆最先接触到进风空气,由于进风空气和粮堆之间存在温差,粮堆向周围空气放热,该粮层温度最先开始下降,且降幅最大为 8.1 °C,通风 6 h 后平均温度降为 16.9 °C 且趋于平稳。由图 5(b) 可以看出沿跨度方向,同一通风时间,距离进风道越远的粮层温度越高,这是因为冷空气温度虽始终低于粮粒表面温度,但其流经距离近的粮层时吸热温度升高,与距离远的粮层之间传递的热量逐渐降低。将粮堆温度降低到 20 °C 这一相同温度,0.8、13.5 m 的粮层分别需要 3.5 和 39 h,而 26.2 m 的粮层则需要 122.5 h,其通风时间最长,原因是冷锋面由北向南的穿过整个粮仓需要时间,距离进风道越远所需通风时间越长。通风 132 h 之后,各个粮层粮粒不再与周围空气发生热量传递,温度分别降为 16.9、17.6、18.3、18.9 和 19.6 °C 后保持不变。

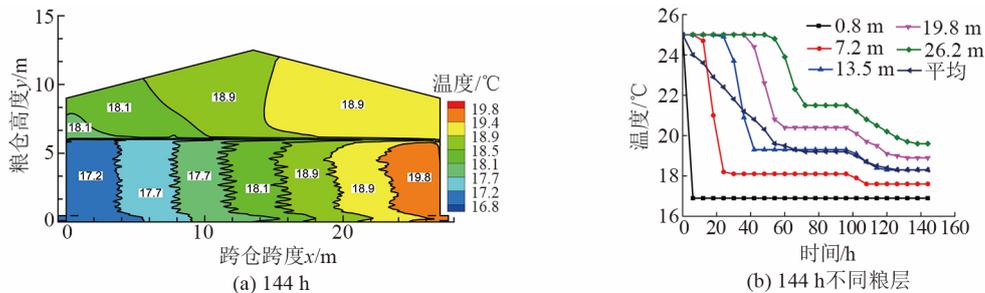


图 5 粮堆温度随通风时间的变化图

进风湿度为 71.5% 时,不同通风时间的温度和水分变化值见表 3。通风 24、48、72 h 的温度平均变化率分别为 2.6、2.4、1.9 °C/d,而通风 144 h 的温度平均变化率为 1.1 °C/d。因此,随通风天数的增加,平均温度变化速率逐渐降低。粮堆达到相对理想的温度时,可以适当减少通风天数以降低能耗。

表 3 工况二不同通风时间的温度和水分值表

参数	通风时间/h					
	24	48	72	96	120	144
温度/°C	24.8	22.4	20.3	19.3	19.2	18.4
水分/%	14.99	14.92	14.84	14.77	14.72	14.68

### 2.3.2 粮堆水分的变化规律

进风湿度为 71.5% 时粮堆水分随通风时间的变化如图 6 所示,对房式仓进行为期 144 h 的横向通风模拟,稻谷粮堆的水分沿跨度方向从北侧开始下降,整体水分值下降,图 6(a) 中蓝色仓间区域的水分为 0%,由于仓间为空气而非稻谷粮堆,通风只对粮堆的水分变化有影响,所以仓间水分为零。稻谷粮堆的初始水分为 15%,送风空气的湿度为 76.5%,

送风湿差为 -5%,通风结束时粮堆的平均水分降至 14.68%,降幅为 0.32%。

图 6(a) 为通风 144 h 的水分分布云图,水分锋面前沿已穿过整个粮堆,粮堆内部水分分布较均匀,由于粮粒表面解吸湿过程的发生,粮堆各处有丢水现象,水分均 ≤ 14.70%。图 6(b) 为通风 144 h 的不同粮层水分随时间的变化曲线图,通风开始后,粮粒表面的蒸汽分压大于送风空气的蒸汽分压,粮粒表面的水分传递到进风空气中,发生解吸湿过程,靠近进风口 0.8 m 的粮堆最先接触到进风空气,表现为 0.8 m 处的粮层水分先下降。由图 6(b) 可知,同一通风时间,距离进风道越远的粮层水分越高,这是由于水分锋面由北向南穿过整个粮堆需要时间。进风空气的湿度是变化的,但送风蒸汽分压始终低于粮粒表面蒸汽分压,解吸湿过程会在粮堆各处不断发生,各个粮层的水分皆处于下降趋势。结合表 3 可知,通风结束时粮仓内平均水分降为 14.68%,送风湿度为 71.5% 时,该通风过程在粮堆温度降低的同时,水分持续丢失。

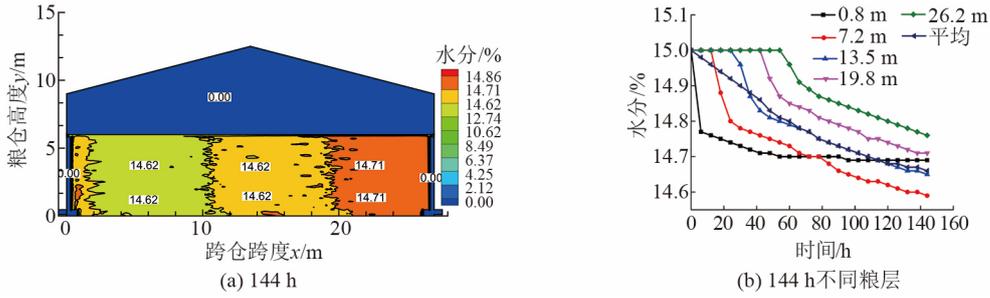


图 6 粮堆水分随通风时间的变化图

2.4 工况三的结果和分析

2.4.1 粮堆温度的变化规律

进风湿度为 81.5% 时粮堆温度随通风时间的变化如图 7 所示,对房式仓进行为期 144 h 的横向通风模拟,稻谷粮堆由北向南沿跨度方向逐渐降温。稻谷粮堆的初始温度为 25 °C,送风温差为 8 °C,即送入粮堆的空气温度为 17 °C,通风结束时粮堆的平均温度降至 19.5 °C,降幅为 5.5 °C。仓间的初始温度同样为 25 °C,通风结束时粮堆上部的仓间空气区域温度下降明显滞后于粮堆内部的温度下降。通风 144 h 的温度分布云图如图 7 (a) 所示,冷锋面前沿已穿过整个粮堆,粮堆内部温度分布较均匀,粮堆各处温度均下降至 <20.5 °C,由于通风跨度大,粮仓北侧和南侧的温差为 3.5 °C。通风 144 h 的不同粮层的温度随时间的变化曲线图如图 7 (b) 所示,靠近进

风口 0.8 m 的粮堆最先接触到进风空气,由于进风空气和粮堆之间存在温差,粮堆向周围空气放热,该粮层的温度最先开始下降,而且降幅很大。通风 114 h 后平均温度降为 17.6 °C 且趋于平稳。由图 7 (b) 可以看出,沿跨度方向,同一通风时间,距离进风道越远的粮层温度越高,这是因为冷空气温度虽然始终低于粮粒表面的温度,但是其流经距离近的粮层时吸热温度升高,与距离远的粮层之间传递的热量逐渐降低。将粮堆温度降低到 20 °C 时,0.8、13.5 m 粮层分别需要 4.5 和 34 h,而 19.8 m 粮层需要 127 h,通风时间最长,其原因是冷锋面由北向南穿过整个粮仓需要一定时间,距离进风道越远所需通风时间越长。通风 126 h 之后,各个粮层的粮粒不再与周围的空气发生热量传递,温度保持不变。

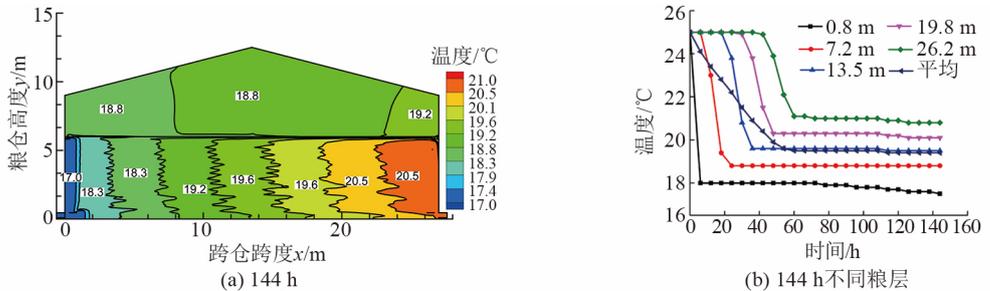


图 7 粮堆温度随通风时间的变化图

在进风湿度为 81.5% 时,不同通风时间的温度和水分变化值见表 4。通风 144 h 后,粮堆平均温度几乎不下降,但水分却持续丢失。通风 24、48、72、144 h 的温度平均变化率分别为 2.8、2.6、1.8 和 0.9 °C/d,由此可见,随着通风天数的增加,平均温度变化速率逐渐降低。早期的通风降温效果明显,后期不明显,为无效通风。继续延长通风时间,只会增加能耗。

表 4 工况三不同通风时间的温度和水分值表

参数	通风时间/h					
	24	48	72	96	120	144
温度/°C	24.8	22.2	19.9	19.5	19.5	19.5
水分/%	15.00	14.93	14.87	14.83	14.80	14.77

2.4.2 粮堆水分的变化规律

进风湿度为 81.5% 时,粮堆水分随通风时间的变化如图 8 所示,对房式仓进行为期 144 h 的横向通风模拟,稻谷粮堆的水分沿跨度方向从北侧开始下降,粮堆内部水分分布较均匀。图 8 (a) 中蓝色仓间区域的水分为 0%,这是由于仓间为空气而非稻谷粮堆,通风只对粮堆的水分变化有影响。稻谷粮堆的初始水分为 15%,送风空气的湿度为 81.5%,送风湿差为 5%,通风结束时粮堆的平均水分降至 14.77%,降幅为 0.23%。

图 8 (a) 所示为通风 144 h 的水分分布云图,水

分锋面前沿已穿过整个粮堆。在进风道附近的粮堆水分升高,原因是此处的进风湿度和蒸汽分压皆高于粮粒表面的湿度和蒸汽分压,粮堆从周围空气中吸收水分。其他区域由于粮粒表面解吸湿过程的发生,粮堆有丢水现象。图8(b)所示为通风144 h的不同粮层水分随时间的变化曲线图,靠近进风口0.8 m处的粮堆在通风6 h时先发生解吸湿过程,此时粮粒表面的蒸汽分压大于送风空气的蒸汽分压,粮粒丢水,随即进入长期吸湿过程,该粮层从进风湿

度大的空气中吸收水分,通风90 h后该粮层的水分高于初始的水分值,而在通风结束时,0.8 m处粮层的水分升高为15.43%。送风空气的湿度沿跨度方向逐渐减小,导致送风蒸汽分压终低于粮粒表面蒸汽分压,所以在粮仓的中南区域发生解吸湿过程,通风结束时水分仍会小幅度下降。由于粮仓跨度大,横向通风形式下空气流过的路径长,湿度高的进风空气只与进口附近的粮堆有强烈的水分交换,而对其他区域的区域影响甚微。

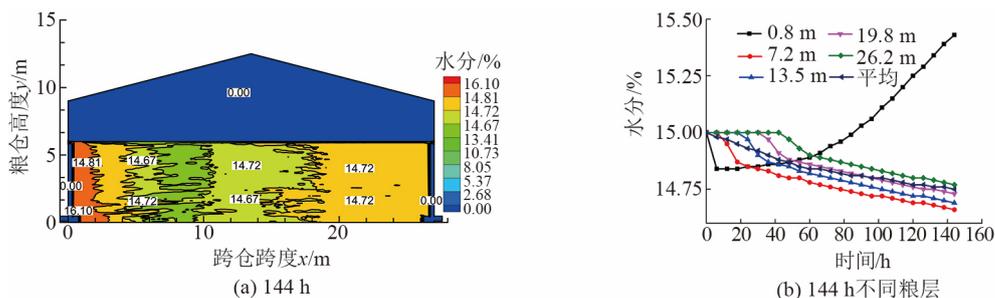


图8 粮堆水分随通风时间的变化图

### 3 结论

基于热湿耦合的数学模型,对平房仓内的稻谷粮堆进行横向通风的数值模拟,对比分析了3种不同送风湿度工况下粮仓内的温度和水分变化规律,得出以下结论:

(1) 进风空气与粮堆的相对湿度差为0%时,粮堆内部吸湿和解吸湿过程很快达到动态平衡,通风结束时粮堆水分丢失最少;进风空气相对湿度过大或过小时,水分由粮堆向空气方向转移,粮堆内部的水分大幅度下降。因此,送风温度一定的情况下,应该选取湿差小的进风空气湿度作为最佳送风条件,这样才能保证降温的同时,粮堆水分不降低或降低很小。

(2) 给定进风温、湿度的条件下,通风时间越长,能耗越大,在通风144 h之后粮仓内部的平均温度基本没有变化,因此,横向通风时间不宜过长,通风120~144 h即可,否则粮堆内部会丢失更多的水分。

(3) 与传统竖直通风方式相比,通风时间相同时,采用横向通风方式粮堆的温度平均变化率更大,可以实现高效降温的效果。

横向通风至粮堆内部温度基本不变时,可以改为右侧风道进风、左侧风道出风的反向通风,对高温

区域进行降温,可以有效降低粮堆的平均温度,而竖直通风风道置于地面,无法进行反向通风。

#### 参考文献:

- [1] Han Z, Michael G, Alison B, *et al.* Economic valuation of natural pest control of the summer grain aphid in wheat in South East England [J]. *Ecosystem Services* 2018, 30: 86-93.
- [2] 姜俊伊,李倩倩,沈邦灶,等.平房仓横向与竖向通风系统储粮温度变化对比研究[J].*粮食储藏*,2017,46(6):1-7.
- [3] 程小丽,李振华.计算流体力学技术在粮食储藏中的研究进展[J].*粮食加工*,2015,40(3):65-66.
- [4] Thorpe G R. Modelling and transfer phenomena in stored rains [C]. *Proceedings of the 6th International Working Conference on Stored-product Protection*, 1995: 359-366.
- [5] Wang R L, Liu S Q, Huan L, *et al.* Study of temperature changes in wheat grain heap during cooling process [J]. *Cereals & Oils Association* 2017, 30(5): 23-27.
- [6] Gao S, Wang Y, Qiu H, *et al.* Numerical simulation for anisotropic resistance of wheat under the condition of mechanical ventilation [J]. *Journal of the Chinese Cereals & Oils Association*, 2017, 32(2): 116-119.
- [7] 刘新涛,王健刚,王运坤.浅圆仓储存进口大豆温度传导规律[J].*现代食品*,2018(18):166-171.
- [8] 陈桂香,张宏伟,王海涛,等.基于COMSOL的平房仓冷却通风过程中粮堆热湿耦合传递研究[J].*中国粮油学报*,2019,37(1):76-87.
- [9] 沈邦灶,王伟杰,俞鲁锋,等.平房仓不覆膜粮堆横向通风降温新工艺研究[J].*粮油仓储科技通讯*,2018,34(4):38-42.

(下转第51页)

车型, 故轴数系数随交通量变化而变化。

(3) 交通量分别在 5、8 和 10 月达到峰值, 这与国家法定节假日及淄博段区域经济发展密切相关; 在 4~10 月份该路段交通量大, 重载车辆多, 同时该时间段雨热同期, 道路结构面临更严峻的挑战。

(4) 单轴单胎(方向轴)的轴重分布系数基本呈单峰特性; 对于整体式货车和半挂货车的单轴双胎、双联轴和三联轴的轴重分布系数呈明显的双峰特性。3 年内 4 种轴型的轴重分布系数略有波动, 但并无明显规律。

#### 参考文献:

- [1] 马士杰, 孙同波. 高速公路典型重载交通轴载谱参数与设计轴载分析[J]. 公路, 2014, 59(12): 39-44.
- [2] 韦金城, 王林, 辛星. 基于动态称重系统的轴载谱数据采集及处理[J]. 交通标准化, 2009(5): 6-10.
- [3] JTG D50—2017, 公路沥青路面设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社.
- [4] American Association of State Highway and Transportation Officials. Guide for design of pavement structures[Z]. Washington: American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993.
- [5] 纪小平, 郑南翔, 牛思胜, 等. 基于足尺 ALF 车辙试验的车辙等效轴载换算[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2013(1): 11-

- 15.
- [6] 王树东. 辽宁省高速公路轴载谱分析[J]. 北方交通, 2016(7): 79-81.
- [7] 吴正光, 王超, 沈燕, 等. 基于实测的高速公路重载交通轴载分析[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(27): 303-308.
- [8] 施磊. 季冻区沥青路面结构设计指标研究[J]. 北方交通, 2017(3): 72-76.
- [9] 曾维樵. 辽宁省高速公路轴载谱分析研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- [10] 白龙. 车辆动载实测及动载对路面响应影响的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [11] Zhao Y Q, Liu H, Bai L, et al. Characterization of linear viscoelastic behavior of asphalt concrete using complex modulus model[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013, 25(10): 1543-1548.
- [12] 赵延庆, 王家杰, 何昌轩, 等. 利用轴载谱确定高速公路沥青路面当量轴载换算系数[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2008, 27(5): 736-739, 842.
- [14] 黎晓, 梁乃兴, 程志豪. 云南省高速公路轴载分布研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2015, 11(12): 71-74.
- [15] 朱靛雯, 刘黎萍. 高速公路路段交通量分析及轴载换算[J]. 交通科技, 2016(4): 134-137.
- [16] 茅荃. 江苏省高速公路交通量轴载谱特性分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2015, 11(12): 207-209.

(学科责编: 赵成龙)

(上接第 44 页)

- [10] 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.
- [11] 王远成, 杨开敏, 潘钰, 等. 双扩散传热传质模型及在横向谷冷通风中应用[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(11): 106-111.
- [12] 尉尧方, 王远成, 潘钰, 等. 密闭储存粮堆内部自然对流和热量传递分析[J]. 粮油食品科技, 2016, 24(6): 93-98.
- [13] 杨登九. 基于 Fluent 的正压掘进风流场数值模拟研究[J]. 煤炭与化工, 2017, 40(1): 69-71.
- [14] Mellmann J, Kocsis L, Gottschalk K, et al. Development of the heat and mass transfer model for mixed-flow grain dryer[J]. Computational Methods in Engineering & Science, 2008, 41(2): 23-45.

- [15] Wang Y C, Duan H F, Fu X P, et al. Numerical simulation of the evolution of grain temperature and moisture content in stored wheat at near-ambient conditions[J]. Postharvest Biology and Technology, 2006, 43: 133-138.
- [16] Li Z M, Chen J, Sun K, et al. Numerical simulation and experimental validation of moisture-heat coupling for saturated frozen soils[J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2017, 9(3): 250-257.
- [17] Jolanta A P, Andrzej L. Investigation of heat and moisture effects in silos containing agricultural bulk solids[J]. Particle and Particle Systems Characterization, 2007, 24(4-5): 284-290.

(学科责编: 赵成龙)