

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2021.03.027

王柯, 王远成, 俞晓静, 等. 不同通风温度下储粮仓横向降温保水通风数值模拟研究[J]. 粮油食品科技, 2021, 29(3): 198-207.

WANG K, WANG Y C, YU X J, et al. Numerical simulation of lateral ventilation for moisture retention of grain storage at different ventilation temperatures[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2021, 29(3): 198-207.

不同通风温度下储粮仓横向降温保水通风数值模拟研究

王 柯¹, 王远成¹✉, 俞晓静², 余 海¹

(1. 山东建筑大学 热能工程学院, 山东 济南 250101;
2. 山东大卫国际建筑设计有限公司, 山东 济南 250101)

摘 要: 为保证长期储藏的稻谷品质, 对相同湿度不同通风温度条件下储粮仓横向降温保水通风模拟分析研究具有重要意义。基于吸湿性多孔介质的传热传质理论, 结合应用已有的粮堆热湿传递的数学模型, 并以数值模拟的方法分析相同湿度时不同进风温度对储粮仓温度与水分变化规律。结果表明: 当粮堆初始温度为 25 °C、进风温度为 17 °C 时, 粮堆的降温速率最快, 粮粒的吸湿与解吸过程也最先达到平衡, 粮堆内部的保水效果最佳; 其中距离进风口处 0.4 m 粮层与不同湿度的进风空气进行热湿耦合传递时, 粮层温度、水分下降趋势一致, 该粮层进风温度越高, 水分丢失现象越明显; 进风温度越低, 粮堆温度的下降幅度越大。随着与进风口距离的增加, 粮层的降温效果变差, 在通风温度为 19 °C 时, 距离进风口处 26.2 m 粮层温度几乎保持粮仓初始温度不变, 达不到降温效果。

关键词: 通风; 数值模拟; 吸湿性多孔介质; 温度; 水分

中图分类号: TS210.3; S379.5 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2021)03-0198-10

网络首发时间: 2021-04-16 17:24:18

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3863.TS.20210416.1322.008.html>

Numerical Simulation of Lateral Ventilation for Moisture Retention of Grain Storage at Different Ventilation Temperatures

WANG Ke¹, WANG Yuan-cheng¹✉, YU Xiao-jing², YU Hai¹

(1. Shandong Jianzhu University, School of Thermal Engineering, Jinan, Shandong 250101, China;

2. Shandong Dawei International Architecture Design Co., Ltd., Jinan, Shandong 250101, China)

Abstract: In order to ensure the quality of rice in long-term storage, it is of great significance to simulate and analyze the horizontal cooling and water-retaining ventilation under the conditions of same humidity and different ventilation temperatures. Based on the heat and mass transfer theory of hygroscopic porous media, this study applied the existing mathematical model of heat and moisture transfer of grain reactor, and analyzed the change rule of different air inlet temperature on the temperature and moisture of grain storage

收稿日期: 2020-11-30

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFD0400100; 2016YFD0401002)

Supported by: National Key Research and Development Project of China (No.2016YFD0400100; No.2016YFD0401002)

作者简介: 王柯, 女, 1998 年出生, 在读硕士生, 研究方向为多孔介质热湿传递等。E-mail: 1920195649@qq.com.

通讯作者: 王远成, 男, 1963 年出生, 博士, 教授, 研究方向为复杂多孔介质热湿传递。E-mail: wycjn1@163.com.

barn under the same humidity with the numerical simulation method. The results showed that when the initial temperature of the grain reactor was 25 °C and the air inlet temperature was 17 °C, the cooling rate of the grain reactor was the fastest and the moisture absorption and desorption of grain reached the balance first, and the water retention effect inside the grain reactor was the best. When coupling heat and moisture transfer was carried out between the grain layer 0.4 m away from the air inlet and the air inlet at different temperatures, the grain layer temperature and moisture decreased in the same trend. The higher the air inlet temperature was, the more obvious the moisture loss was. The lower the inlet air temperature was, the greater the drop in grain stack temperature was. As the distance between the grain layer and the air inlet increased, the cooling effect of the grain layer became worse. When the ventilation temperature was 19 °C, the temperature of the grain layer 26.2 m away from the air outlet almost kept the initial temperature of the granary unchanged, so the cooling effect cannot be achieved.

Key words: ventilation; numerical simulation; hygroscopic porous media; temperature; moisture content

储粮的品质好坏与环境的温度和水分密切相关, 当储粮仓内粮食温度超过一定标准时, 害虫的繁衍速率会加快, 且会从粮仓表层向下发展^[1]。粮食在储存中的损耗尤其是通风过程导致的水分丢失成为全球性粮食危机的重要影响因素^[2]。因此, 在热湿耦合理论的基础上研究随着通风过程的进行, 整个储粮仓距风口不同粮层的温度和水分的变化规律, 对降低储粮过程中的损耗、提高经济效益有现实的应用意义。随着计算机技术的发展和进步, 国内外众多科学家提出用数值模拟方法进行预测分析通风粮堆内的热湿环境。Meeso^[3]等和 Rocha^[4]等建立了传热传质的耦合方程。张忠杰^[5]等提出了在准静态过程粮堆内热湿耦合传递的数学模型, 陈桂香^[6-7]等提出了在通风过程中粮堆内热湿耦合传递的数学模型。吕宗旺^[8]等基于数值模拟方法模拟了通风过程及通风效果, 且进一步完善了通风模型。王远成^[9-11]团队在安全储粮领域, 建立了一个完备的储粮通风数值模拟的技术体系, 并对国内外储粮系统的数学模型等进行了综述。将机械通风过程视为储粮仓内粮粒与粒间流体的复杂热质交换过程, 探究了自然对流、水分输运和热量传递过程之间的联系, 且对储粮效果预测和优化工艺展开研究。尉尧方^[12]基于 FORTRAN 语言设计了圆筒仓的迭代计算模型, 计算机运行结果与实验实测相符合, 验证了该模型的精准性。余晓静^[13]对高大平房仓稻谷横向降温保水通风工艺进行数值模拟研究。

文章基于粮堆内部的热湿耦合传递特性, 借

助数值模拟的方法, 预测分析了相同湿度时在不同进风温度条件下, 粮仓及粮堆各层水分和温度的分布, 以此确定最佳送风温度, 得到的结果对合理设计通风方案有现实性指导意义。

1 储粮通风模型的建立

1.1 物理模型

数值模拟对象为高大平方仓, 粮仓跨度为 27 m、高为 12.5 m, 粮堆高度为 6 m。为了探究粮堆内部温度场与水分场之间的耦合传递特性, 主要分析在时间和空间不同维度下粮堆温度和水分这两个变量的变化情况。由于高大平房仓在仓高和粮仓跨度方向上尺寸远远小于粮仓的长度尺寸, 且在对粮仓机械通风时, 进风空气的初始条件恒定, 通风道是均匀布置在粮仓的长度方向上, 气流从左侧进风道进入粮仓, 空气横穿过整个粮堆后, 从粮仓右侧的出风道排出仓外, 所以温度和水分在每个横截面上的分布情况基本相同。综上所述, 可以忽略不计各类热物性参数在长度方向上变化的影响, 对储粮仓进行简化处理, 用二维模型来近似模拟三维模型, 这样不但不会影响数值模拟探究的精确性, 还能够减少计算机运算的次数, 提高软件迭代步骤的速度^[9-11]。在粮仓的长度方向上截取一个横截面, 横向降温保水通风的二维物理模型如图 1 所示。

1.2 数学模型

基于吸湿性多孔介质的流动和传热传质理论, 在满足粮堆内部局部热平衡理论的前提下,

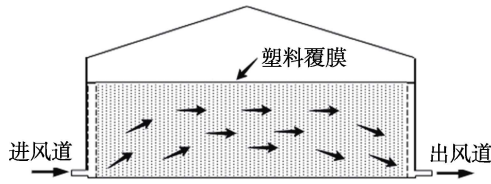


图 1 横向通风示意图

Fig.1 Diagram of transverse ventilation

建立了机械通风时粮堆内热湿耦合传递的数学模型。

1.2.1 连续性方程

根据质量守恒定律，推导得到粮堆内部的连续性方程由式 (1) 所示：

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho_a)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_a u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_a v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_a w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

上式中引入微分算子，由此将连续性方程的微分形式简化表示为式 (2)：

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

式中： ρ_a 为空气密度， kg/m^3 ； \vec{u} 是速度矢量， m/s ，即在直角坐标系下 x, y, z 三个方向上速度的分量，这里指气流的表现速度或达西速度，有公式 $u = \varepsilon \cdot v$ ； v 为气体速度， m/s 。 ε 为孔隙率； t 为时间， s 。

1.2.2 动量守恒方程

依据动量守恒原理，写出粮堆内部受迫对流的动量方程式 (3)：

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

式中： S_i 为流体流过粮粒时的动力源项。

1.2.3 对流传热方程

基于热力学第一定律，得出粮堆内部热量交换的对流换热方程 (4)：

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u} T) = \text{div} \left(\frac{k}{c_p} \cdot \text{grad} T \right) + S_T \quad (4)$$

由于粮堆是复杂的吸湿性多孔介质，在对流传热过程中粮粒的相及空气的焓均应考虑在内，补充后可得对流传热方程式 (5)：

$$\left(\rho_a \varepsilon c_a + \rho_b (1 - \varepsilon) (c_g + c_w W + \frac{\partial H_w}{\partial T}) \right) \frac{\partial T}{\partial t} + c_a \nabla \cdot (\rho_a \vec{u} T) = k_{eff} \nabla^2 T + S_h \quad (5)$$

式中： C_a 、 C_g 、 C_w 分别是空气的比热、粮食的比

热、水的比热， $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ； H_w 表示对流传热过程中由于粮食被冷却引起的水分的传递，此项可以忽略不计； k_{eff} 是粮堆的有效导热系数，取 0.157。

由于 $c_g + c_w W + \frac{\partial H_w}{\partial T}$ 受水分含量变化的影响，可以将粮堆内部水分含量的变化问题用水分含量的平均值来简化。 S_h 是对流传热方程中的源项。

1.2.4 水分运输方程

粮堆及粮粒间的吸湿与解吸湿过程中的水分迁移是导致粮堆的质量变化的主要因素，基于质量守恒定律，推导出水分守恒方程的一般式 (6)：

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x w)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y w)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z w)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_w \cdot \frac{\partial(\rho w)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_w \cdot \frac{\partial(\rho w)}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_w \cdot \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right) + S_w \quad (6)$$

式中： D_w 是空气中水蒸气的分子扩散系数； ρ_a 是空气的密度， kg/m^3 ； w 是粮粒间空气的绝对含湿量， kg/kg ；

根据局部热平衡理论推导出水分迁移方程可以表示为式 (7)：

$$\frac{\partial(\varepsilon \rho_a w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_a \vec{u} w) = \nabla \cdot (\rho_a D_{eff} \nabla w) + S_w \quad (7)$$

式中： D_{eff} 是通过散装粮粒的水分有效扩散系数； \vec{u} 为空气的达西速度； S_w 是粮粒在水分传递过程中吸湿解吸湿的源项。

2 横向通风进风温度不同时的模拟预测与分析

2.1 模拟进风工况的选择

以储存稻谷的储粮仓为例，在进入粮仓时稻谷的初始条件如下表 1。

表 1 稻谷储存的初始参数表

Table 1 Initial parameters of rice storage		
初始温度/ $^{\circ}\text{C}$	湿基水分/%	平衡湿度/%
25	15	76.5

对储粮仓进行机械通风时为了保证在粮堆水分含量保持不变的前提下，实现对稻谷粮堆降温的目的，应以稻谷储存的初始条件为基准选择进

风空气的湿度、温度等参数值。本文模拟研究在相同湿度下进风空气温度分别为 15、17、19 °C 的三种工况时粮堆内部温度场与水分场的变化规律，且进风空气的湿度与稻谷储存的初始平衡湿度相同均为 76.5%，进风吨粮通风量均为 5 m³/(h·t)。根据粮粒这种吸湿性多孔介质与粒间流动空气的热湿耦合规律，模拟预测通过程中进风空气的温度对储粮降温保水通风效果的影响，选定的进风工况初始条件如表 2 所示。

表 2 进风工况的初始参数表
Table 2 Initial parameters of inlet conditions

工况序号	粮堆温度 /°C	进风温度 /°C	吨粮通风量 / (m ³ /(h·t))	温差 /°C	湿差 /%
工况 1	25	15	5	10	0
工况 2	25	17	5	8	0
工况 3	25	19	5	6	0

2.2 稻谷粮堆温度的变化规律及分析

为了深入探究一定的通风空气温湿度条件下通风过程中粮堆内部热湿迁移规律，进行为期 15 d 的降温保水通风数值模拟，即 366 h。对全部模拟工况的结果分析发现，早期通风降温效果明显，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。所以重点研究分析前期降温通风过程，比较通风时间在 144 h 内，稻谷粮堆内部温度场和水分场变化情况。

以储粮仓的跨度方向为 X 轴，以高度方向为 Y 轴，绘制不同工况下粮堆内部温度、水分的分布云图。图 2 所示的是工况 1 条件下通风 144 h 内不同时间段的粮堆温度变化的分布图。由图 2 可知，通风过程中，粮堆上部的储粮仓空气区域温度下降缓慢，明显滞后于粮堆内部的温度下降速度。这是因为空气的热阻大于稻谷粮堆的热阻，相同温差下稻谷粮堆内部的热量交换速率由于空气区域。图 2 (a) 为通风 2 h 的温度分布图，低温空气只到达粮堆前部约 2 m 处，此区域内粮堆温度均低于初温，而较远侧温度依旧保持 25 °C 不变，形成了进风口侧低温区与远风口侧待冷却高温区。图 2 (c) 所示为通风 48 h 的温度分布图，此时低温冷空气前沿正好穿过整个粮堆，与进风口距离最远的粮层也被冷却。图 2 (d) 所示通风 144 h 时，通风后粮仓距风口最近与最远侧的温差约为 4.6 °C。由于粮粒属于吸湿性多孔介质，通风时会吸收进风空气中的热量，发生解吸湿过程，通风结束时粮堆的平均温度降至 19.0 °C 左右。

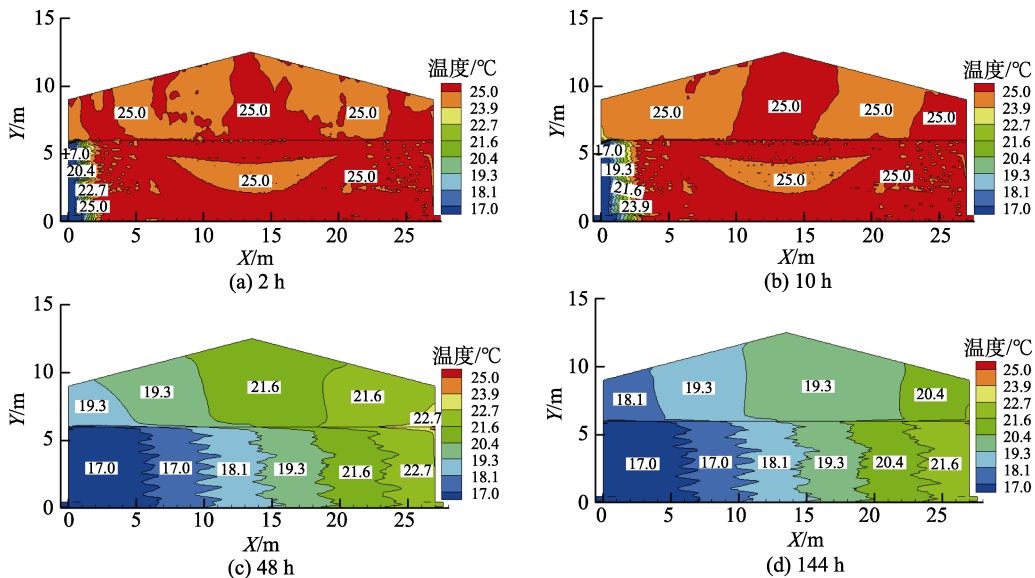


图 2 工况 1 条件下粮堆内部温度分布

Fig.2 The temperature distribution inside the grain pile under working condition 1

图 3 所示的是工况 3 条件下连续通风 144 h 粮仓内部温度场的分布情况。图 3 (a) 所示的是通风时间为 2 h 时粮堆内部温度分布图，由于通

风时间较短，进风空气仅仅与距风口约 3 m 内的粮层进行热量交换，且降温效果明显。由于热量在传递过程存在延迟和衰减现象，在与风口距离

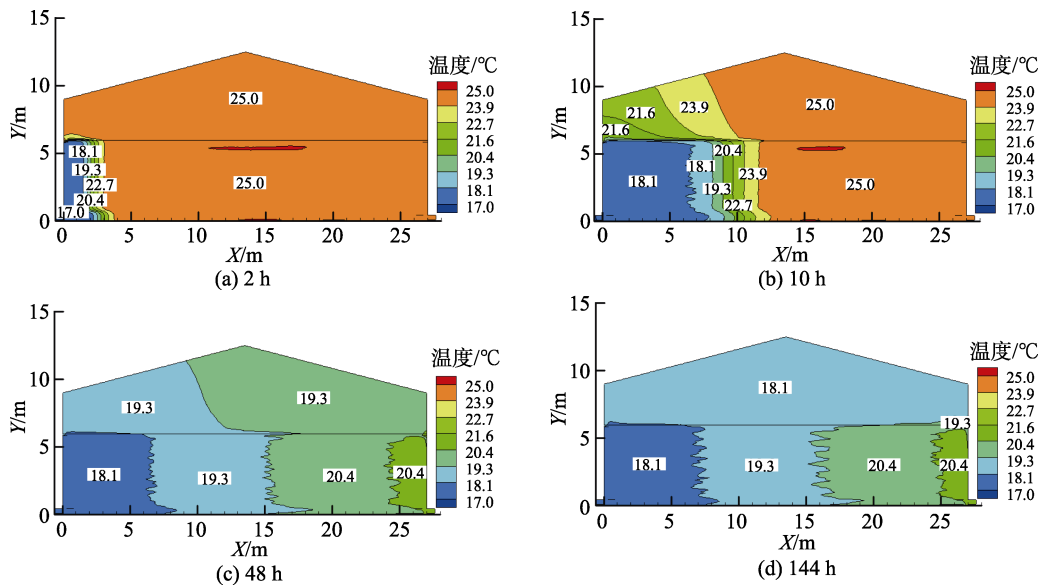


图 3 工况 2 条件下粮堆内部的温度分布

Fig.3 The temperature distribution inside the grain pile under working condition 2

不同的粮层间存在一定的温度梯度，离进风口较远的粮层温度变化较为缓慢。由图 3 (b) 可知，通风 10 h 后低温冷空气已经穿过粮堆的中部，距风口 5~10 m 之间粮堆存在明显的温度梯度，而距离风口 5 m 内区域，粮堆温度已降至 18.1 °C 左右，降幅约 9 °C。对比图 2 与图 3 可知，进风温度为 17 °C 时，通风结束储粮仓降温效果优于进风温度为 15 °C 的工况。

图 4 所示的是工况三条件下连续通风 144 h 粮仓内部温度场的分布情况。此工况下稻谷粮堆与进风空气的温差相比于工况一缩小了 4 °C，明

显看出，储粮降温效果明显变差。如图 4 (a) 和图 4 (b) 所示在通风时间 10 h 内，进风空气所冷却的粮层距风口较近，且粮堆温度下降较小。由 4 (c) 可知，在对粮仓通风 48 h 时，距风口 20~25 m 粮层温度依旧为 25 °C，说明进风温度与粮仓初始温度温差为 4 °C 时过小，无法冷却距风口最远侧粮仓上部空气区域温度已经低于初始温度 25 °C，说明低温空气已经流经整个粮仓，而口较远处的高温粮堆。由图 4 (d) 可知，在对粮堆通风 144 h 后，距风口较远侧粮堆温度仍保持 25 °C，未达到降温效果。由图 2~4 可知，在相同的进风

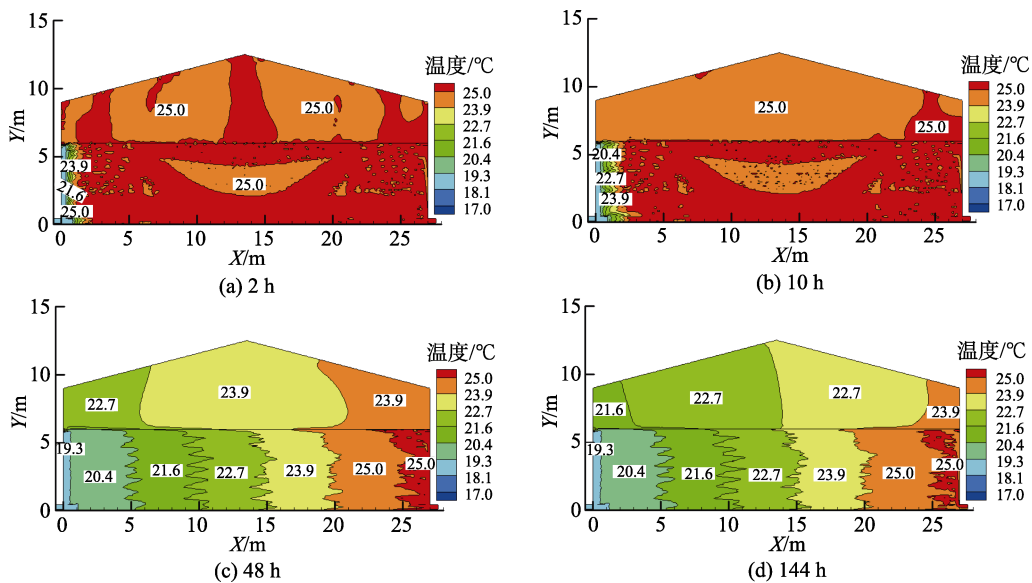


图 4 工况 3 条件下粮堆内部的温度分布

Fig.4 The temperature distribution inside the grain pile under working condition 3

湿度下, 进风温度为 19 °C 时对储粮仓降温效果最差; 进风温度为 17 °C 时降温效果最佳, 整个粮仓降温更均匀。

2.3 稻谷粮堆水分的变化规律及分析

进风温度与粮堆温差为 10 °C, 通风 144 h 内粮堆水分随时间变化如图 5 所示。由于粮堆与进风空气之间存在的温度差会造成蒸汽分压差, 在初始通风阶段, 粮粒与进风空气之间会发生明显的水分迁移过程。不同粮层间的蒸汽分压力梯度引起水分迁移, 从饱和蒸汽分压高处迁移至饱和蒸汽分压力低处。因此在通风过程中, 距风口最近处粮堆水分最先丢失, 且沿横向通风方向粮堆的水分值逐渐降低。由于通风过程研究水分迁移的对象是稻谷这种吸湿性多孔介质, 而在储粮仓

内上部空间不堆积粮食, 所以储粮仓上部蓝色空气区域的水分值为 0%。由图 5 (a) ~ (b) 可知, 通风时间在 10 h 内, 低温空气只与近风口粮堆区域完成对流换热, 右侧粮堆水分保持初始值, 且在此 8 h 内低温冷空气向右推移的距离较短。由图 5 (c) 可知, 通风时间在 48 h 时, 进风空气已经穿过整个粮仓, 粮堆的平均水分下降了 0.07%。由图 5 (d) 可知通风时间在 144 h 时, 进风口侧粮层的水分上升为 15.22%, 超出粮堆初始水平 0.22%, 这是由于进风口侧粮堆内部发生吸湿过程, 并且在进风口附近的粮层聚集大量水分, 导致进风口处粮层水分高于初始值, 水分在该区域不断聚集, 通风时间过长时会有局部霉变现象的发生。

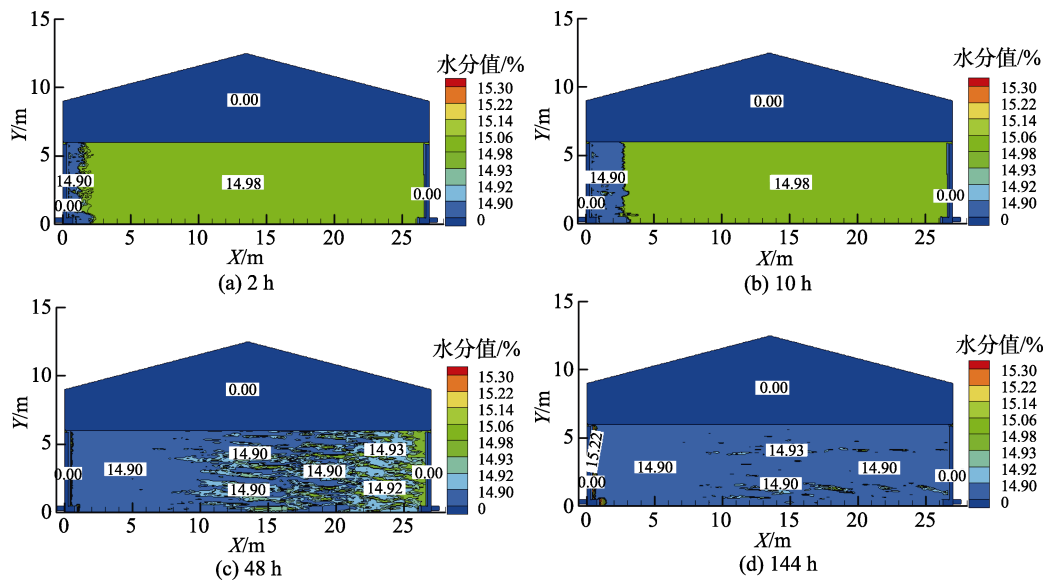


图 5 工况 1 条件下粮堆内部的水分含量分布

Fig.5 The moisture content distribution in grain pile under working condition 1

图 6 所示是工况 2 条件下通风 144 h 时间内粮仓内部水分场的分布情况。对比图 6 (a) 与图 5 (a) 明显看出, 在通风时长为 2 h 时, 进风空气温度为 17 °C 时, 进风口侧粮堆水分分层更明显, 在距进风风口 3 m 内水分值相差 0.07%。如图 6 (b) 所示通风时间在 10 h 时, 进风空气已经抵达粮仓中部, 距进风口约 10 m 距离的粮堆均发生水分丢失, 且粮堆的水分值几乎相同, 均为 14.92%, 而相比于图 6 (b) 此时进风口处粮堆水分值已近出现上升趋势。由图 6 (c) 可知, 通风过程进行到 48 h 时低温冷空气已经穿过整个粮

仓, 距离风口最远侧粮堆水分值为 14.93%, 通风结束时距风口不同粮层水分值相差很小, 相比于图 5 (c) 而言, 粮堆水分值整体分布更均匀。而进风口侧粮层水分值上升至 15.14%, 超出粮堆初始水平 0.14%, 这是由于随着通风过程的进行, 进风口侧粮堆持续与冷空气产生热量交换, 粮堆内部持续发生吸湿过程。

图 7 是工况 3 条件下通风 144 h 时间内粮仓内部水分场的分布情况。对比图 5 与图 7 可知, 进风温度为 15 °C 和 19 °C 下通风时间在 48 h 时稻谷粮堆水分值的变化趋势几乎相同。随着通风

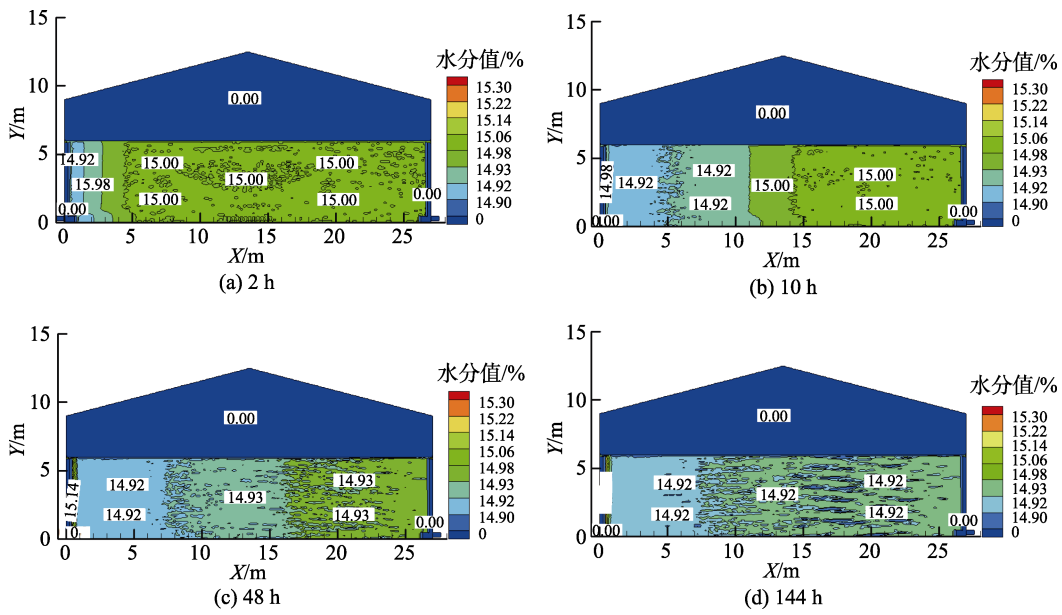


图 6 工况 2 条件下粮堆内部的水分含量分布
Fig.6 The moisture content distribution in grain pile under working condition 2

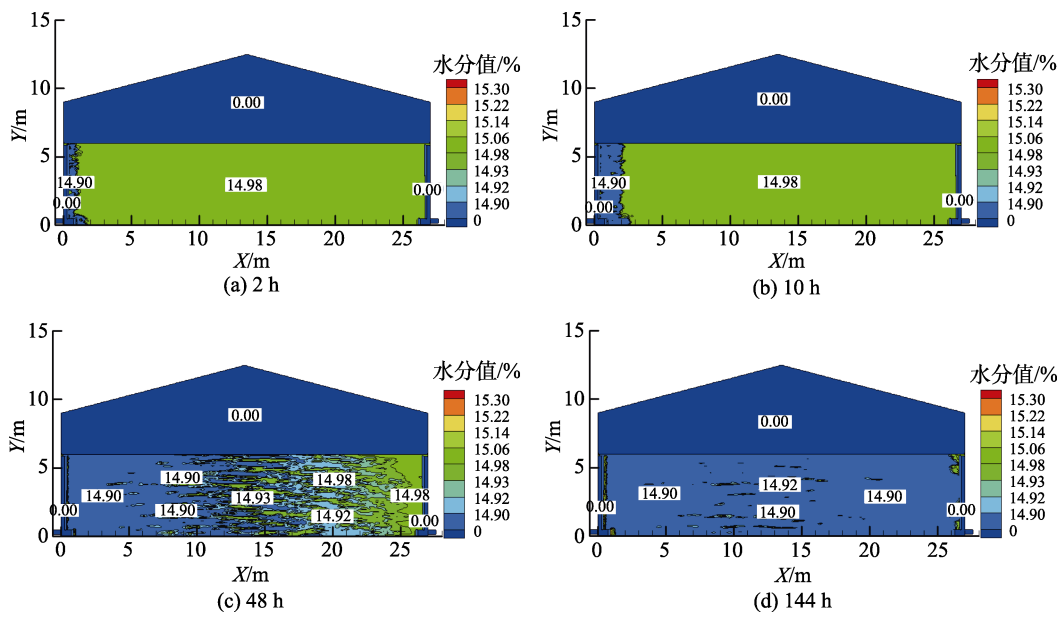


图 7 工况三条件下粮堆内部的水分含量分布
Fig.7 The moisture content distribution in grain pile under working condition 3

时长的增加，进风温度为 15 °C 时在进风口侧粮堆内部因吸湿过程水分值会明显高于初始值，但由图 7 (d) 可知，在工况 3 条件下即使通风 144 h 后进风口侧粮堆内部水分值依旧没有超出 15%，且通风结束后各粮层水分值相差很小，基本稳定在 14.9%，相比初始值水分丢失 0.1%。这是由于工况 3 进风空气与粮堆初温的温差只有 6 °C，粮堆内部的吸湿和解吸湿过程很快达到平衡。

2.4 稻谷粮堆各层温度的变化规律及分析

为了深入探究在相同湿度下不同的进风温度对储粮过程的影响，模拟分析了进风温度分别为 15、17、19 °C 三种工况下，距进风口处分别为 0.4、7.2、13.5、19.8、26.2 m 各粮层温度及水分的变化规律。如图 8 所示是三种工况下各粮层温度变化分布图及粮堆平均温度分布图，由图 8 (a) 可知，在三种不同的工况下，距进风口 0.4 m 粮

层温度随时间下降趋势一致，当通风时间超过 1.5 h 后温度下降至与进风温度相同且随时间基本无变化，进风温度越高，粮堆温度的下降幅度越小。如图 8 (b) 所示，三条折线代表了不同进风温度下 7.2 m 粮层温度随时间变化的规律，相比于另外两个工况，进风温度为 17 °C 时最先出现拐点，此粮层下通风时间至 40 h 时，粮堆温度均保持不变。由图 8 (c) 可知，三条折线代表了不同进风温度下 13.5 m 粮层温度随时间变化的规律，通风时间 40 h 后，进风温度为 15 °C 和 17 °C 工况下，粮堆温度均保持不变且均降至 19 °C。对比图 8 (a)~(d) 可以看出，当进风温度为 15 °C

时，距进风口 19.8 m 粮层相比于 0.4、7.2、13.5 m 粮层温度开始有上升的趋势，通风时间在 48 h 后基本稳定在 21 °C，相比于 0.4 m 粮层高出 6 °C；进风温度为 19 °C 时对于此粮层来说，相比于初始粮温温度仅下降 1 °C。由图 8 (e) 可知，当进风温度为 19 °C 时，距风口 26.2 m 粮层的温度仍为稻谷粮堆初始温度 25 °C，且通风结束后，三种工况下粮堆的最终温度相差较大。由图 8 可知，进风温度为 17 °C 时最先出现降温拐点，并且距进风口较远粮层在通风结束时粮堆温度相比其他两种工况最低。综上，在相同湿度下进风温度为 17 °C 时为最佳的进风温度。

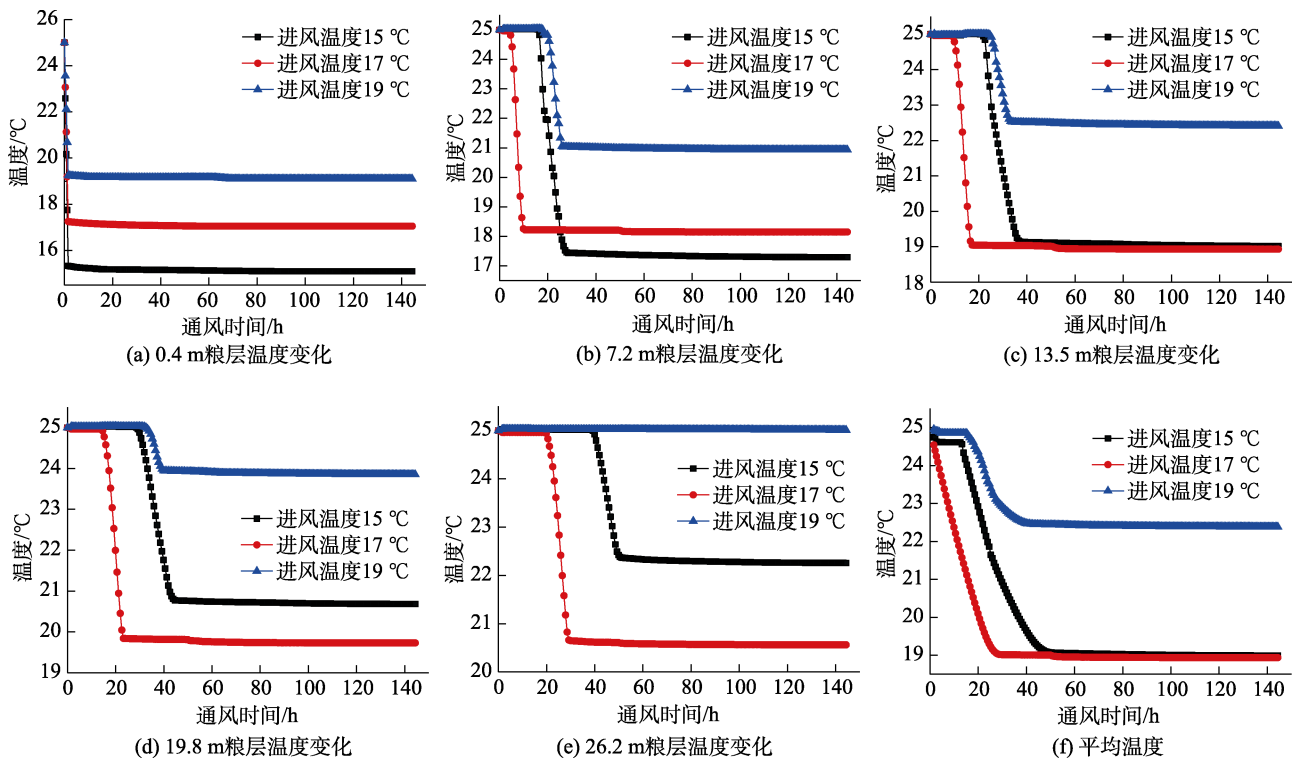


图 8 3 种工况下的各粮层温度变化

Fig.8 Temperature change of each grain layer under three working conditions

2.5 稻谷粮堆各层水分的变化规律及分析

如图 9 所示是 3 种工况下各粮层水分变化分布图及粮堆平均水分分布图，由图 9 (a) 可知在 3 种工况下距进风口 0.4 m 粮层的水分变化趋势相同，且由于粮粒是吸湿性多孔介质，该粮层发生吸湿过程水分值有上升趋势且高于初始值。如图 9 (b) 所示，7.2 m 粮层与不同温度的进风空气进行热湿耦合传递时，进风温度为 17 °C 工况在通风 10 h 时已经达到平衡，而另外两种工况下，

通风时间 20 h 内，水分均无变化。由图 9 (c)~(d) 可知在通风时间达 20 h 后，进风温度 17 °C 条件下距进风口中 13.5 m 和 19.8 m 粮层的水分稳定在 14.93%，而其他两种工况水分值则持续下降。如图 9 (e) 所示，在进风温度为 19 °C 时，距进风口 26.2 m 粮层水分值发生变化所需时间最长。综合图 8 与图 9 可知，在进风湿度相同下进风温度为 17 °C 时，储粮仓横向降温保水通风效果最佳。

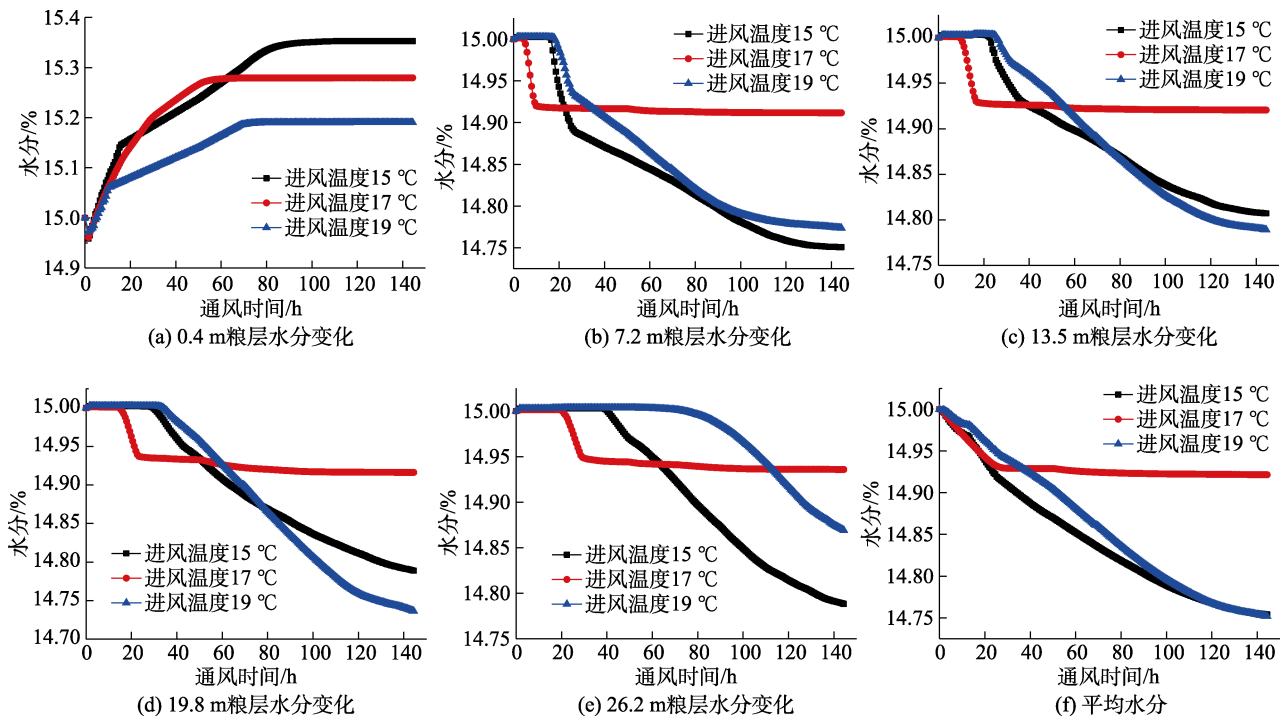


图 9 3 种工况下的各粮层水分含量变化

Fig.9 The moisture content distribution of each grain layer under three working conditions

3 结论

基于热湿耦合的数学模型，对高大平房仓的稻谷粮堆进行横向通风的数值模拟，得出了 3 种不同送风温度工况下粮仓内的温度和水分以及稻谷粮堆各层的温度和水分的变化规律，研究结论如下：

在进风湿度相同的条件下，当粮堆初始温度为 25 °C，进风空气温度为 17 °C 时储粮仓内粮堆内降温保水效果最佳。进风温度过高或过低均无法实现对稻谷粮堆降温的同时达到保水效果。研究结论丰富和完善了现有的储粮通风理论，同时也为设计最佳通风方案提供理论依据。

在储粮通风过程中，粮堆的热传导过程先于水分迁移过程发生。由于粮粒是吸湿性多孔介质，不同通风工况下距进风口 0.4 m 粮层会发生吸湿过程，使粮堆的水分含量有上升趋势且高于初始值，且相较于其它粮层其降温效果最佳。

在通风初始阶段，粮堆温度和水分随时间变化较明显，随着通风时间的增加，粮堆温度和水分随时间变化的速率减缓，通风时间至 144 h 时，粮堆内部的温度和水分处于相对平衡的状态，为了实现绿色储粮的目标，可以在达到理想的降温保水通风效果后停止通风。

参考文献：

- [1] 张英, 邓文斌, 郑绍锋. 高大平房仓储粮害虫分布与发生初步调查[J]. 粮油仓储科技通讯, 2012, 28(3): 27-29.
ZHANG Y, DENG W B, ZHENG S F. Preliminary investigation on the distribution and occurrence of grain pests in large bungalow[J]. Journal of grain and oil storage science and technology, 2012, 28(3): 27-29.
- [2] 冯梅. 关于我国粮食安全问题两点思考[J]. 农业与技术, 2020, 40(2): 26-29.
FENG M. Two thoughts on China's food security issues[J]. Agriculture and technology, 2020, 40(2): 26-29.
- [3] MEESO N, NATHAKARANAKULE A. Modelling of far-infrared irradiation in paddy drying process[J]. Journal of Food Engineering. 2007, 78(4): 1248-1258.
- [4] ROCHA, KELLER S O, MARTINS, et al. Three-dimensional modeling and simulation of heat and mass transfer processes in porous media: an application for maize stored in a flat bin[J]. Drying Technology. 2013, 31(10): 1099-1106.
- [5] 张忠杰, 李琼, 杨德勇. 准静态仓储粮堆温度场的 CFD 模拟[J]. 中国粮油学报, 2010, 25(4): 46-50.
ZHANG Z G, LI Q, YANG D Y. CFD simulation of temperature field of quasi static storage grain reactor[J]. Chinese journal of cereals and oils, 2010, 25(4): 46-50.
- [6] 陈桂香, 岳龙飞, 林森达. 基于计算流体力学的平房仓通风系统数值模拟[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2013, 34(5): 87-90.
CHEN G X, YUE L F, LIN M D. Numerical simulation of cabin

- ventilation system based on CFD[J]. Journal of henan university of technology (natural science edition), 2013, 34(5): 87-90.
- [7] 陈桂香, 岳龙飞, 林森达. 粮堆内热湿耦合传递数值模拟与试验验证[J]. 中国粮油学报, 2014, 29(1): 77-82.
 CHEN G X, YUE L F, LIN M D. Numerical simulation and experimental verification of heat and moisture coupling transfer in grain reactor[J]. Chinese journal of cereals and oils, 2014, 29(1): 77-82.
- [8] 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.
 LV Z W, FENG L M, SUN F Y. Research on granary ventilation CFD technology[J]. Journal of henan university of technology (natural science edition), 2013, 34(6): 105-109.
- [9] 王远成, 吴子丹, 李福君. 储粮生态系统数学模型和数值模拟研究进展[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(10): 157-162.
 WANG Y C, WU Z D, LI F J. Advances in mathematical model and numerical simulation of grain storage ecosystem[J]. Chinese journal of cereals and oils, 2016, 31(10): 157-162.
- [10] 王远成, 季振江, 王双林. 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.
 WANG Y C, JI Z J, WANG S L. Numerical simulation study on effects of different ventilation directions on rice precipitation[J]. Chinese Journal of Cereals and Oils, 2015, 33(11): 72-78.
- [11] 王远成, 俞晓静, 石天玉. 基于数值预测的稻谷横向降温保水通风最佳湿度研究[J/OL]. 中国粮油学报: 1-8[2020-02-20].
 WANG Y C, YU X J, SHI T Y. Research on optimal Humidity of horizontal cooling, water retention and ventilation of Rice based on numerical prediction[J/OL]. Chinese Journal of Cereals and Oils: 1-8[2020-02-20].
- [12] 尉尧方, 王远成, 王兴周. 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.
 YU Y F, WANG Y C, WANG X Z. Construction and application analysis of grain storage ventilation model[J]. Journal of shandong jianzhu university, 2017, 32(3): 251-257.
- [13] 俞晓静, 王远成, 戚禹康. 储粮仓横向保水通风的数值模拟及对比研究[J]. 山东建筑大学学报, 2019, 34(2): 37-44+51.
 YU X J, WANG Y C, QI Y K. Numerical simulation and comparative study on horizontal water-retaining ventilation of grain silos[J]. Journal of shandong jianzhu university, 2019, 34(2): 37-44+51.
- 备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://llyspkj.ijournal.cn/ch/index.aspx>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。☞