

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2019.03.008

24米跨度高大平房仓横向保水降温通风模拟研究

俞晓静¹, 王远成¹, 戚禹康¹, 石天玉², 魏雷²

(1. 山东建筑大学热能工程学院, 山东 济南 250101;

2. 国家粮食和物资储备局科学研究院, 北京 100037)

摘要: 横向通风作为高大平房仓一种新的通风方式, 国内外对其保水降温效果研究较少。基于多孔介质流动和传热传质理论, 采用数值模拟的方法, 预测了不同大气温湿度条件下横向通风过程中粮堆内部温度变化和水分迁移规律。通过分析进风湿度和通风时间不同时粮堆内部的温度和水分分布, 得到了横向保水降温通风的最佳通风条件, 可为合理进行机械通风操作提供理论指导。

关键词: 高大平房仓; 横向通风; 保水降温; 数值模拟; 通风效果

中图分类号: TS205.9; S379.5 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2019)03-0046-06

Simulation study on water retention and cooling effect in high & large warehouse with span of 24 meters by transverse ventilation

YU Xiao-jing¹, WANG Yuan-cheng¹, QI Yu-kang¹, SHI Tian-yu², WEI Lei²

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

2. Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037)

Abstract: Transverse ventilation is a new type of ventilation for large warehouse, which effect of water retention and cooling is rarely studied either at home or abroad. Based on the theory of heat and mass transfer in porous medium, the temperature variation and water migration in the grain bulk during transverse ventilation in different air temperature and humidity conditions is predicted by numerical simulation. The optimal ventilation condition of water retention and cooling is obtained by analyzing the distribution of temperature and moisture in the grain bulk in the condition of different air temperature and time. The result provides theoretical guidance for reasonable operation in mechanical ventilation.

Key words: high & large warehouse; transverse ventilation; water retention and cooling; numerical simulation; ventilation effect

为确保粮仓内部的温度和水分在安全储存范围内, 需要对粮仓进行机械通风^[1]。这就需要控制粮堆温度小于 20℃, 水分在 10%~13%之间, 以有效抑制病虫害的滋生, 提高粮食储藏的稳定性^[2]。垂直通风系统在粮仓地面设置通风道, 不

利于装粮和出粮, 无法用机械自动化代替人力劳动。而横向通风系统在两侧墙壁上设置通风道, 具有便于装粮出粮的优点。

对于处在安全水分以内的储粮, 机械通风的目的是降低粮堆温度的同时丢失较少水分, 又保证通风的均匀性。目前对储粮通风效果的研究主要是采用现场观测方法, 但这种方法需要投入较大的人力物力, 成本较高, 而且实验结果不具有可重复性。基于计算流体动力学的数值模拟方法

收稿日期: 2019-01-22

基金项目: 国家重点专项(2016YFD0400100, 2016YFD0401002), 国家粮食公益专项(201513001)

作者简介: 俞晓静, 1995年出生, 女, 硕士生。

通讯作者: 王远成, 1963年出生, 男, 教授。

是国外近年发展起来的一种预测和评价储粮通风效果的新方法，为解决储粮通风问题也提供了一个良好的数值分析和优化设计的工具^[3]。Thrope^[4]基于传热传质的守恒方程建立一维模型，重点研究对象是粮堆缝隙间空气的温度和湿度，但是该方法计算较繁琐。Lukasse 等^[5]建立了粮食就仓通风时的热湿传递模型，并对粮堆内温度和水分进行了预测分析。王远成等^[6-11]深入研究了高大平房仓在通风过程中的热湿传递规律，对通风粮堆进行温度和水分的数值模拟；考虑到仓外太阳辐射、粮仓顶部空气区域和粮堆区域的耦合过程；对比验证实验数据和模拟数据，建立了准确描述粮堆热湿耦合规律的数学模型。

本实验基于多孔介质热湿耦合传递理论局部热平衡原理，结合局部热平衡原理，对送风湿度不同工况的横向通风过程进行了模拟，预测分析了各种工况下粮仓内温度和水分分布的规律，以此确定最佳的送风条件，确保在降低粮温的同时只丢失少量水分。

1 平房仓通风模型的建立

1.1 物理模型

以高大平房仓为研究对象进行模拟，粮仓跨度为 24 m，总高度为 11.5 m，装粮高度为 6 m。仓内采用横向通风方式，吨粮通风量为 5 m³/h·t。在平房仓左侧设置进风道，空气经过整个稻谷粮堆，在压差的作用下，从粮仓右侧的通风道排出仓外，完成如图 1 所示的通风过程。

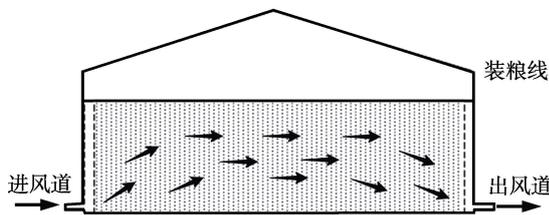


图 1 高大平房仓的横向通风示意图

1.2 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^[12-14]。

1.2.1 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如式(1)。

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

式中： ε 为孔隙率； ρ_a 为空气密度，kg/m³； t 为时间，s； u 为气流的表观速度，m/s。

1.2.2 动量守恒方程

粮堆内流动空气的动量变化率满足动量守恒原理，推导出粮堆的动量守恒方程如式(2)。

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

式中： ρ 为粮食密度； S_i 为粮堆阻力项。

1.2.3 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如式(3)。

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho_a\omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_a u) = \nabla \cdot (\rho_a D_{eff} \nabla \omega) + S_w \quad (3)$$

式中： ω 是粮粒间的绝对含湿量； D_{eff} 是粒间空气水分通过粮堆的有效扩散系数； S_w 是吸湿解吸湿的源项。

1.2.4 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^[15]，根据能量守恒方程可得对流换热方程如式(4)。

$$\rho_a \varepsilon c_a + \rho_a (1 - \varepsilon)(c_g + c_w W) \frac{\partial T}{\partial t} + c_a \nabla \cdot (\rho_a u T) = k_{eff} \nabla^2 T + h_s (1 - \varepsilon) \rho_s \frac{\partial W}{\partial t} \quad (4)$$

式中： c_a 是空气的比热； c_g 是粮食的比热； c_w 是水的比热； W 是粮食的含湿量； k_{eff} 是粮堆的有效导热系数，取 0.157 W/(m²·K)； $h_s(1-\varepsilon)\rho_s \frac{\partial W}{\partial t}$ 为热源项。

2 粮堆内部温度和水分的变化规律分析

2.1 模拟工况及参数设置

两种模拟工况进风条件的设置见表 1，通风温差为 8℃，工况一和工况二的进风湿度分别为 69.1%和 76.5%，其他的进风参数值相同。数值模拟的储粮品种为稻谷^[16-17]，容重为 600 kg/m³，初

表 1 两种通风湿度工况下的初始参数

工况类型	初始参数				
	粮食初温/ °C	粮食初始水分/%	进风温度/ °C	进风相对湿度/%	吨粮通风量/(m ³ /h·t)
工况一	25	15	17	69.1	5
工况二	25	15	17	76.5	5

始湿基水分 15%，初始粮温为 25℃，孔隙率为 0.6，导热系数为 0.11 W/(m·K)。

2.2 不同湿度条件下同一粮层粮堆温度对比

沿跨度方向选取 5 个截面，距离左侧仓壁的距离分别为 0.8、6.4、12、17.6 和 23.2 m。记录通风过程中不同截面的温度变化值，借助 origin 制图软件将数据整合成折线图，如图 2 所示。

图 2 所示的是送风湿度不同的条件下，同一

粮层温度随时间变化的规律。图 2a 所示的是 0.8 m 粮层温度随时间的变化图，开始通风时进风空气和粮堆之间温差较大，0.8 m 粮层的粮堆会向周围空气放出大量的热量，温度急剧下降为 17.1℃。在通风 6 h 之后，送风湿度为 69.1% 的工况中粮堆的平均温度不变，送风湿度为 76.5% 的工况中温度下降幅度为 0.1℃。图 2b~图 2e 所示的是其余 4 个粮层的降温过程，通风初始阶段温度下降比较平稳，随着通风时间的增加，温度大幅度下降，通风 42 h 后各个粮层的温度保持不变。距离进风道越远的粮层温度下降曲线越滞后，这是因为冷锋面由左向右移动，穿过整个粮堆需要时间，通风时间小于 12 h 时，12、17.6 和 23.2 m 这三个粮层还没有受到冷锋面的影响。

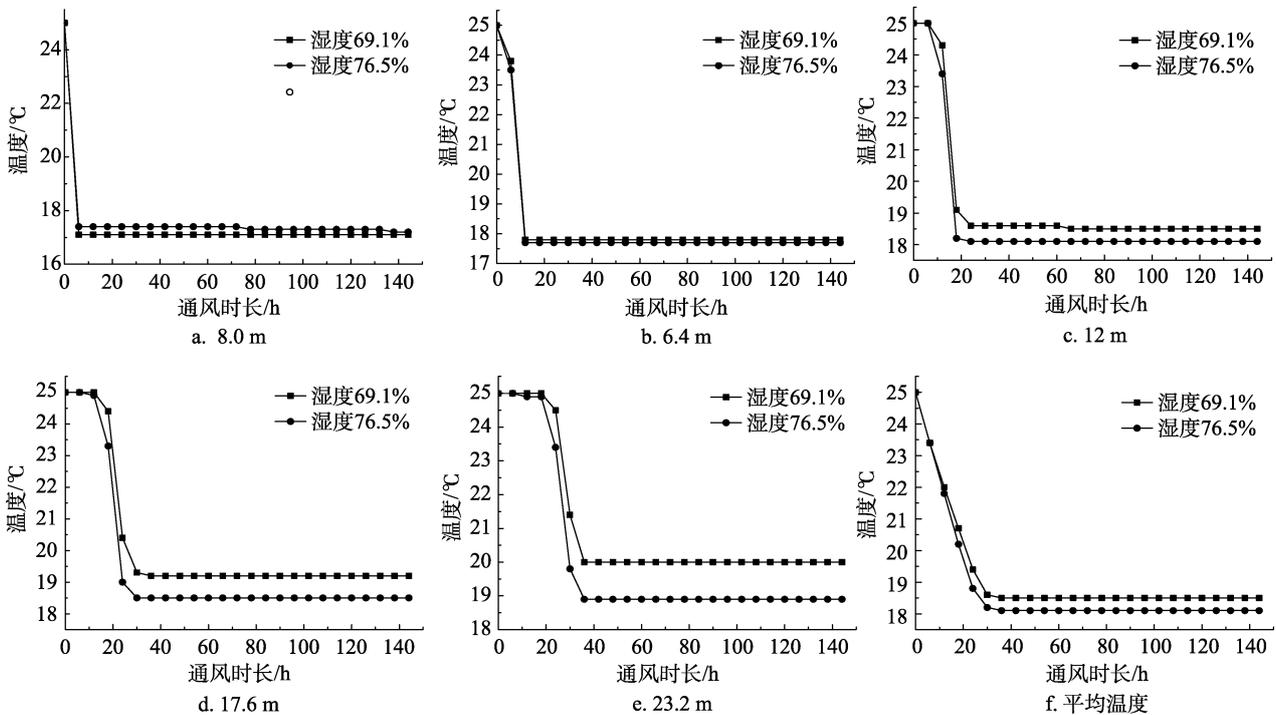


图 2 不同湿度条件下同一粮层温度随时间变化

2.3 不同湿度条件下各层粮堆的温度随时间变化的规律分析

图 3 所示的是进风湿度不同的两个工况的各层粮堆的温度随时间变化图。由图 3 可知，粮堆温度为 25℃，送风温度为 17℃ 时，通风开始后粮堆各层温度皆有下降。送风湿度为 69.1% 时，靠近送风道的粮层温度最先开始下降，通风 6 h 后温度急剧下降到 17.1℃ 并且保持不变。通风

24 h 后 12 m 粮层的温度下降为 18.5℃ 并趋于稳定，最接近于粮堆内部的平均温度。送风湿度为 76.5% 时，靠近送风道的粮层温度最先开始下降，通风 6 h 后温度急剧下降到 17.4℃ 并且保持不变。通风 24 h 后 12m 粮层的温度下降为 18.1℃ 并趋于稳定，最接近于粮堆内部的平均温度。5 个粮层之间的温度差值不超过 0.4℃，由此可知送风湿度为 76.5% 的工况粮堆温度分布更为均

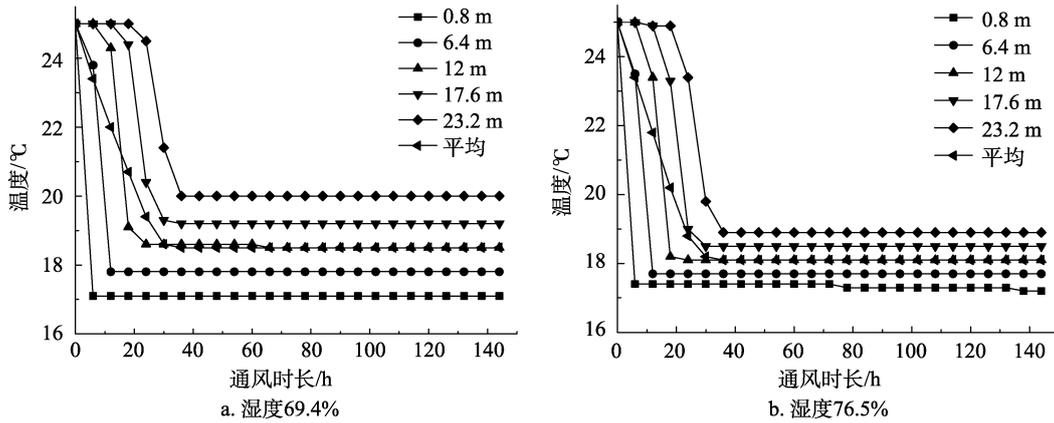


图 3 不同湿度条件下各层粮堆的温度随时间变化图

匀。通风时间不够长时，距离远的粮层尚未接触到冷空气，先与周围粮堆进行热量交换，因此粮堆温度的下降幅度较小。

表 2 所示的是两个工况在通风过程中平均粮温的变化值。由表 2 可以看出，进风湿度为 69.1% 的工况，粮堆初始温度为 25℃，通风 24 h 后平均粮温开始下降，温度的平均变化率为 0.23℃/h，通风 48 h 后粮堆内部的平均温度为 18.5℃ 并保持稳定。送风湿度为 76.5% 的工况，通风 24 h 后粮堆温度开始下降，平均粮温从 25℃ 下降为 18.8℃，温度的平均变化率为 0.26℃/h。对比两个工况的温度随通风时间的变化值，可知送风湿度为 76.5% 时降温效果更好。

表 2 不同通风时间的平均粮温 /℃

送风	时间/h					
	24	48	72	96	120	144
69.1	19.4	18.5	18.5	18.5	18.5	18.5
76.5	18.8	18.1	18.1	18.1	18.1	18.1

2.4 不同湿度条件下同一粮层粮堆水分对比

图 4 所示的是送风湿度不同的条件下，同一粮层水分随时间变化的规律。图 4a 所示的是 0.8 m 粮层水分随时间的变化图，两个工况通风 6 h 后粮堆的水分皆下降为 14.90%，送风湿度为 69.1% 的工况水分保持不变，送风湿度为 76.5% 的工况在通风 72 h 后水分开始略有增加，这是因为进风空气蒸汽分压高于粮粒表面蒸汽分压，水分由空

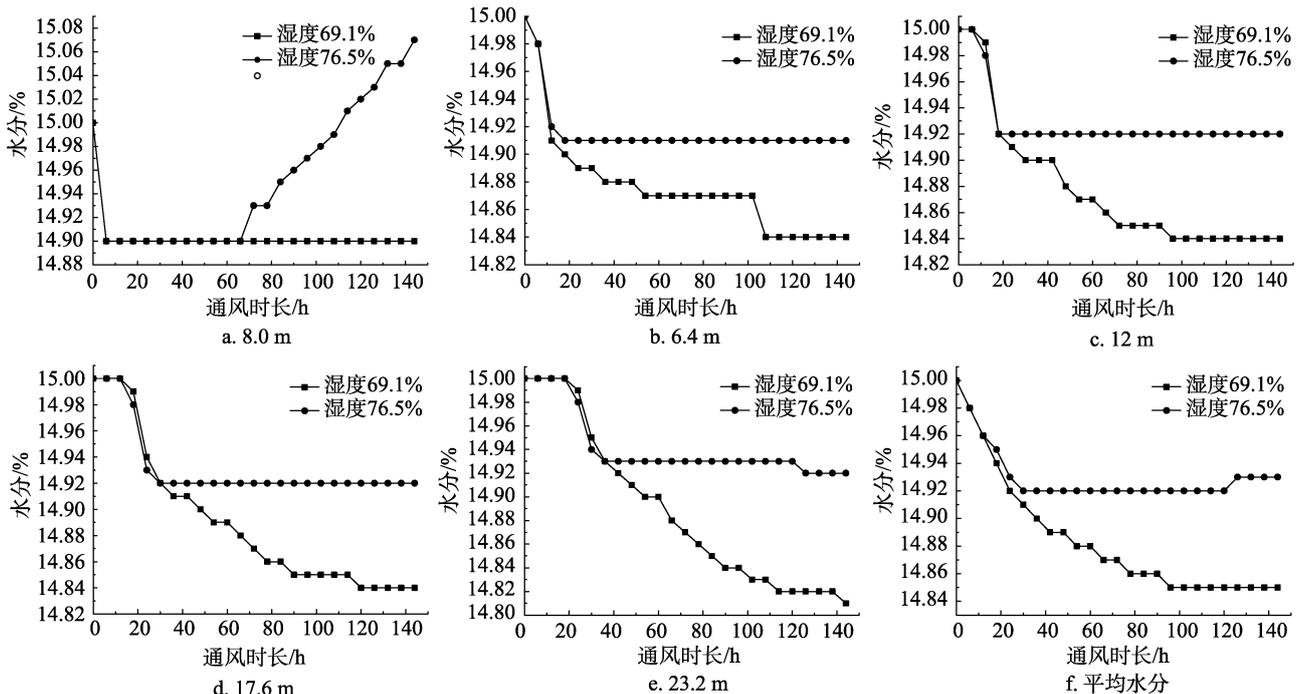


图 4 不同湿度条件下同一粮层水分随时间变化

气迁移到粮堆中。图 4b~图 4e 所示的是其余 4 个粮层的水分变化折线图，通风初始阶段水分下降比较平稳，送风湿度为 76.5% 的工况，通风 36 h 后各层水分基本保持不变。送风湿度为 69.1% 的工况，随着通风时间的增加，各粮层的水分仍在下降。对比两个工况的水分变化规律，可知送风湿度为 76.5% 时保水效果更好。

2.5 不同湿度条件下各层粮堆的水分随时间变化的规律

图 5 所示的是进风湿度不同的两个工况各层粮堆水分随时间变化图。送风湿度为 69.1% 时，靠近送风道的粮层水分最先开始下降，通风 6 h 后水分急剧下降到 14.90% 并且保持不变。随着通风时间的增加，其余 4 个粮层的水分依次下降。送风湿度为 76.5% 时，开始通风后靠近送风道的粮层水分最先开始下降，由于 0.8 m 粮层水分的增加，通风时间为 114 h 时粮堆的平均水分高于初始水分值。

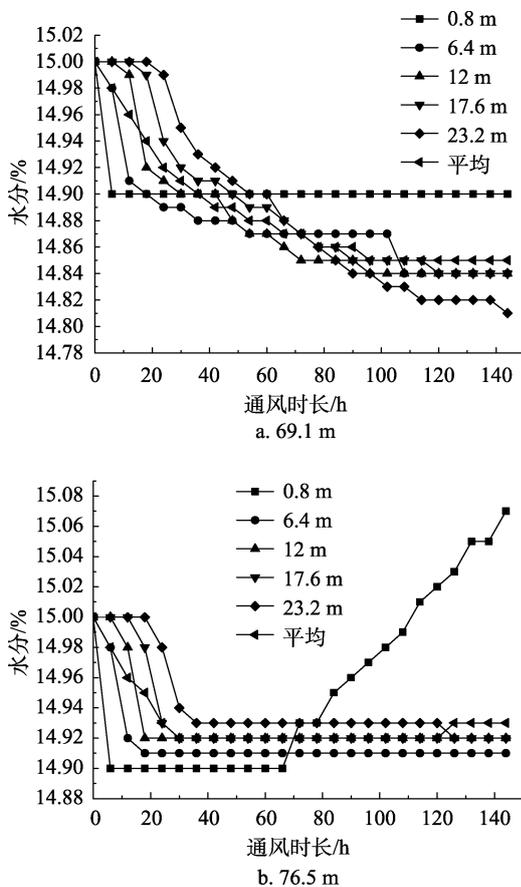


图 5 不同湿度条件下各层粮堆的水分随时间变化

表 3 所示的是两个工况在通风过程中平均水分的变化值。由表 3 可以看出，进风湿度为 69.1% 的工况，在通风 96 h 后粮堆内部的水分仍在丢失。送风湿度为 76.5% 的工况通风到 144 h 时水分略有回升，因此送风湿度为 76.5% 的工况保水效果更佳。

表 3 不同通风时间的平均水分 %

送风湿度 /%	时间/h					
	24	48	72	96	120	144
69.1	14.92	14.89	14.87	14.85	14.85	14.85
76.5	14.93	14.92	14.92	14.92	14.92	14.93

3 结论

对高大平房仓内的通风过程进行数值模拟，通过分析横向通风后粮堆温度和水分随时间的变化规律，对比研究得出以下结论：

两个工况的初始粮温和送风温差皆为 25 和 17，通风结束时粮堆内部平均温度皆下降。送风湿度为 69.1% 的工况，粮堆的初始相对湿度大于进风空气的相对湿度，粮堆内部降温的同时丢失 0.15% 的水分。送风湿度为 76.5% 的工况，进风空气和粮堆之间的湿差为 0%，粮堆内部吸湿和解吸湿过程很快达到动态平衡，保水效果好并且随着时间的增加水分略有升高，通风结束时粮堆的平均温度下降了 6.9。由此选取送风湿度为 76.5%，送风温度 17 为最佳的通风条件，其降温效果和保水效果最佳。

送风空气条件的选取直接影响粮堆内部的降温保水效果。在温差相同的前提下，应该选取湿度和蒸汽分压都接近于初始粮堆的送风空气，可以保证粮堆内部丢失较少的水分。若送风湿度过大，靠近通风道的粮堆会吸湿导致水分大幅度上升，超过粮食储存的安全水分。而送风湿度过低，随着通风时间的增加，水分会持续丢失，无法达到保水通风的目的。

根据模拟结果可知在通风 48 h 之后，粮仓内部部的平均温度没有变化，送风湿度为 69.1% 的工况持续失水，水分湿度为 76.5% 的工况小幅度增

水。通风时间越长,实际机械通风过程中的能耗越大,因此已达到较理想的降温保水效果时,应该停止机械通风。

参考文献:

- [1] 季振江,程小丽. 横向通风技术在科学储粮中的应用进展[J]. 粮食加工, 2018, 43(5): 75-77.
- [2] 蔡静平,蒋澎,张燕燕,等. 储粮早期霉变监测方法测试研究[J]. 中国粮油学报, 2013, 28(11): 58-62+68.
- [3] 王远成,张忠杰,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.
- [4] 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, 1: 359-366.
- [5] LUKASSE L J S, KRAMER CUPPEN J E, VOOR VAN DER A J. A physical model to predict climate dynamics in ventilated bulk storage of agricultural produce[J]. International Journal of Refrigeration, 2007, 30: 195-204.
- [6] 王远成,魏雷,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.
- [7] WANG YUANCHENG, DUAN HAIFENG, ZHANG HAO, et al. Modeling on Heat and Mass Transfer in Stored Wheat during Forced Cooling Ventilation[J]. Journal of Thermal Science, 2010, 19(2): 167-172.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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): 255-258.
- [11] 段海峰,王远成,丁德强,等. 冷却干燥通风过程中粮仓内热湿耦合传递的数值模拟[J]. 制冷与空调, 2010, 24(3): 31-34+43.
- [12] MADHIYANON T, TECHAPRASAN A, SOPONRONNARIT S. Mathematical models based on heat transfer and coupled heat and mass transfers for rapid high temperature treatment in fluidized bed: Application for grain heat disinfestation[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 49(13) : 277-290.
- [13] 张晓培,覃永,王富领. 高大平房仓横向通风与竖向通风对比试验[J]. 粮油仓储科技通讯, 2018, 34(1): 24-25.
- [14] KOBYŁKA R, HORABIK J, MOLENDNA M. Numerical simulation of the dynamic response due to discharge initiation of the grain silo[J]. International Journal of Solids and Structures, 2017, 106-107.
- [15] GEZAEI ABERA A, SUNG-JIN SONG, HAK-JOON KIM, et al. Prediction of grain orientation in dissimilar metal weld using ultrasonic response of numerical simulation from deliberated scatterers[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2018, 168: 34-50.
- [16] 肖勇跃. 高大平房仓整仓稻谷机械通风降水试验[J]. 粮油仓储科技通讯, 2005(4): 14-15.
- [17] 卢洋,张徐,谢宏. 两种通风方式对高大平房仓内温湿度的影响[J]. 粮食储藏, 2018, 47(5): 31-33. 