

# 钢筋混凝土浅圆仓中大豆粮堆温度场的研究

王森<sup>1</sup>, 张淑媛<sup>1</sup>, 周阳<sup>2</sup>, 侯耀龙<sup>1</sup>

(1. 郑州铁路职业技术学院, 郑州 450000; 2. 河南大学土木建筑学院, 河南 开封 475001)

**摘要:**为研究大豆在机械通风过程中的温度变化,以华北地区内径为30 m、装粮高度为20 m的钢筋混凝土浅圆仓为研究对象,基于多孔介质传热传质理论,利用数值模拟软件COMSOL建立大豆储藏过程中粮堆内部温度变化的数值模型,利用此模型对机械通风过程浅圆仓大豆粮堆温度场进行了分析,并预测了不同初始粮温和装粮高度条件下仓内粮堆温度变化过程。结果表明:随着与风道距离的增加,粮层温度变化幅度由剧烈逐渐变得缓慢;粮堆热阻的存在导致热量在整个粮堆的传递过程表现出一定的迟滞性,从而使整个粮堆温度分布不均;初始粮温分别为12、14、16、18、20℃时,机械通风86 h后仓内粮温分别降至4.9、6.2、7.3、8.4℃和9.6℃,分别下降了59%、56%、54%、53%和52%,在相同边界条件下,初始温度较低的粮堆,粮温降幅较大;机械通风过程,不同装粮高度(18、19 m和20 m)的粮堆温度变化差异呈现先增大后减小的趋势,在机械通风19 h和110 h后,装粮高度相差1 m时,粮堆之间温差分别为0.1℃和0.6℃,在机械通风结束后,仓内粮堆温度分别为0.3、0.5℃和0.9℃,此时装粮高度相差1 m时,粮堆之间的温差为0.2~0.4℃。综上,所建立的模型可对多种初始边界条件的钢筋混凝土浅圆仓大豆粮堆温度场进行预测。

**关键词:**浅圆仓;机械通风;数值模拟;温度场

中图分类号:TS222+.1;S379 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2023)08-0137-05

## Temperature field of soybean grain pile in reinforced concrete shallow round silo

WANG Sen<sup>1</sup>, ZHANG Shuyuan<sup>1</sup>, ZHOU Yang<sup>2</sup>, HOU Yaolong<sup>1</sup>

(1. Zhengzhou Vocational College of Railway Technology, Zhengzhou 450000, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Henan University, Kaifeng 475001, Henan, China)

**Abstract:** In order to study the temperature change of soybean in the process of mechanical ventilation, a reinforced concrete shallow round silo with a inside diameter of 30 m and a grain loading height of 20 m in North China was taken as the research object, and based on the theory of heat and mass transfer in porous media, the numerical simulation software COMSOL was used to establish numerical model of temperature changes inside grain pile during soybean storage. The model was used to analyze the temperature field of soybean grain pile in shallow round silo in the process of mechanical ventilation, and the temperature change process of the grain pile under the conditions of different initial grain temperature and grain loading height were predicted. The results showed that the temperature of the grain layer changed from violent to slow with the increase of the distance from the air duct. The existence of the thermal resistance of the grain pile led to a certain hysteresis in the heat transfer process of the whole grain pile, so that the temperature distribution of the whole grain pile was uneven. When the initial grain temperature was 12, 14, 16, 18, 20℃, after 86 h of mechanical ventilation, the temperature of the grain piles in the silo dropped to 4.9, 6.2, 7.3, 8.4℃ and 9.6℃, and decreased by 59%, 56%, 54%, 53% and 52%

收稿日期:2022-06-27;修回日期:2022-07-08

基金项目:河南省高等学校重点科研项目(22B560020)

作者简介:王森(1996),男,助教,硕士,研究方向为结构与粮食仓储(E-mail)w8023sin@126.com。

respectively. Under the same boundary conditions, the grain temperature with the lower initial temperature had a larger drop in grain temperature. During the mechanical ventilation

process, the grain temperature change difference at different grain loading heights (18, 19 m and 20 m) showed a trend of first increasing and then decreasing. After the mechanical ventilation for 19 h and 110 h, the temperature difference between the grain piles was 0.1 °C and 0.6 °C when the height difference between the grain loading was 1 m; after the mechanical ventilation, the temperatures of the grain piles in the silo were 0.3, 0.5 °C and 0.9 °C respectively, and when the height difference of grain loading was 1 m, the temperature difference between the grain piles was 0.2–0.4 °C. In conclusion, the established model can predict the temperature field of soybean grain pile in reinforced concrete shallow round silo with various initial boundary conditions.

**Key words:** shallow round silo; mechanical ventilation; numerical simulation; temperature field

粮堆温度是影响储粮安全的重要因素<sup>[1-3]</sup>, 保证粮堆温度在合适范围内, 可减少粮食结露、霉变的发生<sup>[4-6]</sup>。机械通风作为方便快捷的降温方式, 被广泛应用于各种仓型储粮过程, 对于保障储粮安全具有十分重要的意义<sup>[7-9]</sup>。

利用数值模型对机械通风过程中粮堆温度的变化进行研究, 不仅可以节省大量时间和成本, 而且可预测多种工况<sup>[10]</sup>。Wang 等<sup>[11]</sup>基于最小二乘法的傅里叶基函数预测模型, 描述了大米粮堆平均温度随大气环境变化的过程。高帅<sup>[12]</sup>、Thorpe<sup>[13]</sup>、王若兰<sup>[14]</sup>等建立了预测小麦粮堆温度的数学模型, 通过对模型的优化, 利用数值模拟软件进一步分析了小麦的冷却干燥过程, 在满足局部热平衡的同时, 所建立的模型可对仓内小麦粮堆温度进行较好的预测。Hammamia 等<sup>[15]</sup>利用数值模拟软件对通风过程小麦粮堆温度变化进行了研究, 并用试验验证了数值模拟结果的可靠性, 同时研究发现通风温度对于粮堆温度的控制具有重要作用。Subrot Panigrahi 等<sup>[16]</sup>利用 CFD 数值模拟软件对储粮过程中热湿传递过程进行了分析, 发现温度与含水率的变化相互影响。陈雁等<sup>[17-19]</sup>对机械通风过程仓内小麦粮堆温度场变化进行了研究, 通过优化风道设置和建立仓顶隔热系统, 探究了新型风道和隔热系统下通风过程对仓内温、湿度变化的影响以及对小麦温升的抑制作用。余海<sup>[20]</sup>、张修霖<sup>[21]</sup>等基于多孔介质传热传质理论, 对多种通风工况下仓内粮堆温度变化进行了研究, 通过建立粮堆热湿传递数学模型, 用数值模拟的方法分析了送风边界条件变化对仓内温度场的影响。目前, 关于粮堆温度场的研究主要集中于小麦、玉米等, 关于大豆粮堆温度场的研究较少, 针对浅圆仓中大豆粮堆温度场分布的研究更少。

本文利用数值模拟软件 COMSOL 对浅圆仓机械通风过程大豆粮堆温度变化进行了研究, 并基于华北地区大气环境温度变化对多种工况条件下仓内

粮堆温度变化进行预测, 以期为粮食的安全储藏提供一定的参考和理论支持。

## 1 粮仓模型的建立与网格划分

### 1.1 数学模型的建立

设多孔介质中流体为单相流体, 且在整个流动过程中无化学反应<sup>[22-23]</sup>。

$$\text{质量守恒方程: } \frac{\partial(\varepsilon\rho_\alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_\alpha u_j) = 0 \quad (1)$$

式中:  $\varepsilon$  为孔隙率;  $\rho_\alpha$  为空气密度, kg/m<sup>3</sup>;  $\nabla$  为哈密顿算子,  $\nabla = \frac{\partial}{\partial x}i + \frac{\partial}{\partial y}j + \frac{\partial}{\partial z}k$ ;  $u_j$  为空气的流动速度, m/s。

设孔隙率( $\varepsilon$ )为常数, 且流体为不可压缩流体, 即  $\varepsilon = \text{const}$ ,  $\rho_\alpha = \text{const}$ ; 方程(1)可写为  $\nabla \cdot (u_j) = 0$ ,

$$\nabla \cdot (u_j) \text{ 为速度的散度, } \nabla \cdot (u_j) = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z}。$$

$$\text{动量守恒方程: } \frac{\partial(\rho_\alpha u_j)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_\alpha u_j) = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu \cdot \nabla u) + S_j \quad (2)$$

式中:  $P$  为压力, N;  $\mu$  为动力黏度系数, N·s/m<sup>2</sup>;  $S_j$  为动量方程的广义源项。

忽略由于大豆颗粒自呼吸产生的热量, 则能量守恒方程:

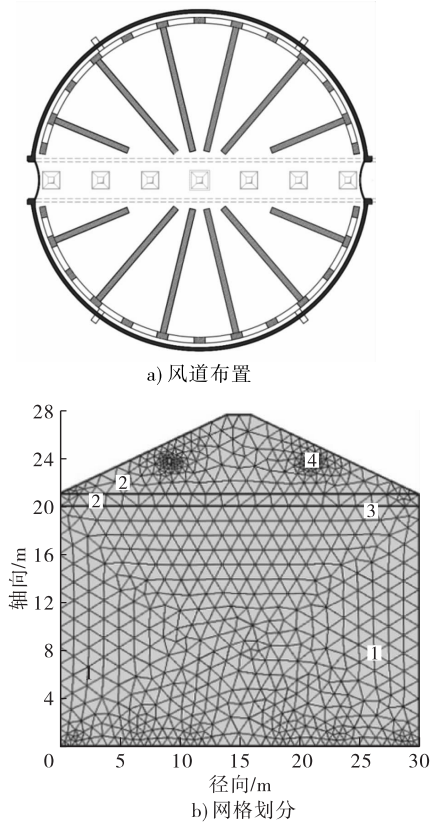
$$\rho_g C_g \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-\lambda \nabla T) + \rho_\alpha C_\alpha u_j \cdot \nabla T = 0 \quad (3)$$

式中:  $\rho_g$  为大豆密度, kg/m<sup>3</sup>;  $C_g$  为大豆比热容, J/(kg·K);  $C_\alpha$  为空气比热容, J/(kg·K);  $T$  为热力学温度, K;  $\lambda$  为大豆导热系数, W/(m·K)。

### 1.2 物理模型与网格划分

风道布置与在数值模拟软件 COMSOL 中建立的粮仓仓体剖面的模型网格划分见图 1。该模型仓以华北地区某浅圆仓实仓为依据, 浅圆仓内径为 30 m, 装粮高度为 20 m, 仓壁采用钢筋混凝土结构, 厚度为 300 mm, 仓顶布置有 2 个离心风机通风口

(见图1b)。该浅圆仓采用两组两机六道放射型风道布置,风道宽度为570 mm(见图1a)。本次浅圆仓机械通风采用压入式的通风方式,仓内布置探针用于记录温度变化。



注:1.大豆粮堆;2.空气域;3.装粮线;4.通风口  
图1 风道布置与粮仓模型网格划分

### 1.3 初始条件与边界条件

本文研究对象为大豆,在机械通风开始前,粮堆初始温度为14℃。利用冬季自然低温空气进行通风,可平衡仓内外和粮堆内温度,抑制虫、霉生长,减缓粮食陈化,使粮堆以较低温度安全过夏。机械通风自12月31日至次年1月8日,共计通风189 h。对机

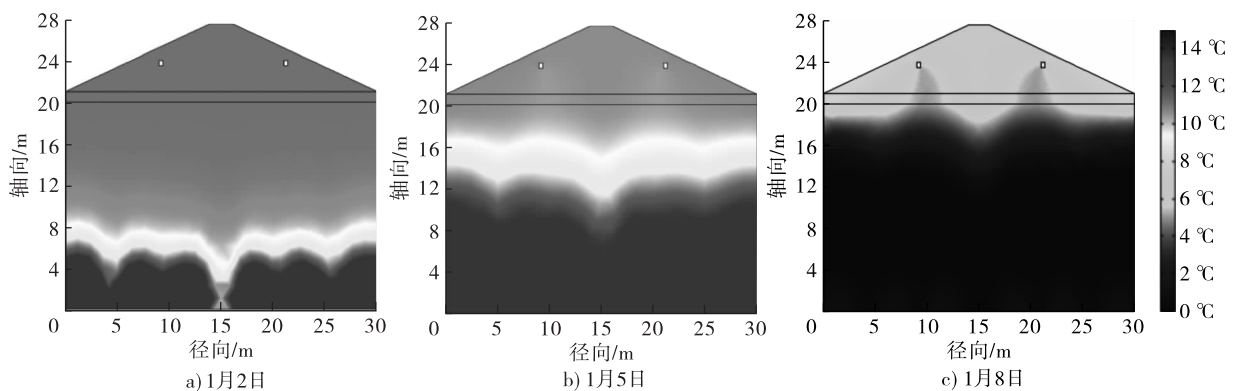


图3 机械通风过程浅圆仓内温度场分布

### 2.2 模型验证

图4为机械通风过程粮堆模拟结果与实测结果

械通风过程中大气环境温度进行监测记录,结果如图2所示。由图2可知,环境温度最高为1℃,最低为-8℃。对环境温度数据进行非线性拟合,得到对数函数为 $y = 4.1551 \ln x - 7.9658$  ( $R^2 = 0.9019$ ),回归拟合效果较好,用拟合函数作为本次数值模拟的温度边界条件。

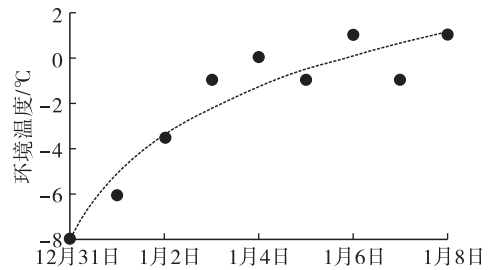


图2 机械通风过程外部环境温度变化

## 2 结果与分析

### 2.1 浅圆仓机械通风温度场分析

图3为机械通风过程浅圆仓内温度场分布。由图3可以看出,在对浅圆仓进行垂直机械通风时,仓内温度从底部到顶部逐渐升高。外部低温空气经离心风机从仓底风道进入粮堆,在粮食颗粒的空隙间与热空气发生热交换,并随气流方向带走交换热。由于环境温度的变化,机械通风入口处气流温度也是不断变化的,这就导致靠近风道的粮堆温度随着机械通风送风温度的变化而发生较为剧烈的变化,而远离风道位置的上部粮堆,其温度变化较为缓慢。这是由于粮堆是热的不良导体,存在一定的热阻,导致热量在整个粮堆的传递过程中表现出一定的迟滞性,进而导致整个粮堆温度分布不均。以图3a为例,由于环境温度低于仓内粮堆温度,在机械通风进行一段时间后,距离风道较近的位置温度变化明显,而远离风道处粮堆温度变化较小。随着机械通风的持续进行,这种温度分布不均的现象逐渐改善。

的对比,其中,实测温度为机械通风过程开始的第0、1、3、6、9天整仓粮堆平均温度,数值模拟过程为

189 h 整仓连续平均温度。由图 4 可知,在机械通风开始一段时间后,粮堆实测温度与模拟温度变化差异不大,在通风过程的第 6 天实测温度与模拟温度差值最大,此时实测温度为 1.6℃,模拟温度为 3.4℃,差值为 1.8℃,产生差值的主要原因是实仓机械通风过程外部环境温度是瞬时变化的,且模拟温度取的是当天粮堆逐时温度变化的平均值。机械通风结束后,实测粮堆温度为 0.80℃,模拟粮堆温度为 0.87℃,差值为 0.07℃,数值模拟结果能够较好反映仓内粮堆温度变化。

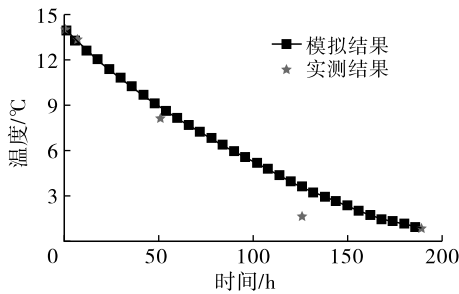


图 4 机械通风过程实仓测试温度与数值模拟温度对比

2.3 不同初始边界条件粮堆温度变化对比  
不同工况设置见表 1。

表 1 不同工况设置

工况	初始粮温/℃	装粮高度/m
1	12	18
2	12	19
3	12	20
4	14	18
5	14	19
6	14	20
7	16	18
8	16	19
9	16	20
10	18	18
11	18	19
12	18	20
13	20	18
14	20	19
15	20	20

利用经实仓验证的模型,在不改变装粮高度(20 m)和外部环境温度( $y = 4.1551 \ln x - 7.9658$ )的情况下,对不同初始粮温(12、14、16、18℃和 20℃)的 5 种工况进行数值模拟分析。图 5 为不同初始粮温下机械通风过程仓内粮堆温度变化情况。

由图 5 可以看出:仓内粮温随通风时间的延长而降低,在机械通风 24 h 后,仓内粮堆温度分别从 12、14、16、18℃和 20℃下降至 9.6、11.4、13.1、14.9

℃和 16.6℃,粮堆温度下降明显,分别降低 2.4、2.6、2.9、3.1℃和 3.4℃,初始温度较高的粮堆,相应的降温效果也较明显;在机械通风 86 h 后,仓内粮堆温度分别降至 4.9、6.2、7.3、8.4℃和 9.6℃,此时与初始粮温相比分别下降了 59%、56%、54%、53%和 52%。在相同边界条件下,5 种初始粮温中,初始温度较低的粮堆,粮温降幅较大;在机械通风结束后,仓内粮堆温度分别为 0.3、0.8、0.9、1.3℃和 1.5℃,初始粮温为 14℃和 16℃的两种工况下,粮堆最终温度相差最小,为 0.1℃。在完成机械通风后,粮堆温度均降至 2℃以下。

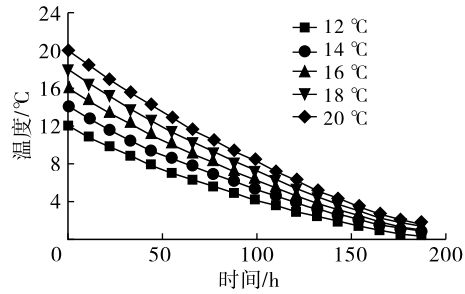


图 5 不同初始粮温下仓内粮堆温度的变化情况

图 6 为初始粮温是 14℃、不同装粮高度(18、19、20 m)条件下机械通风过程仓内粮堆温度变化情况。

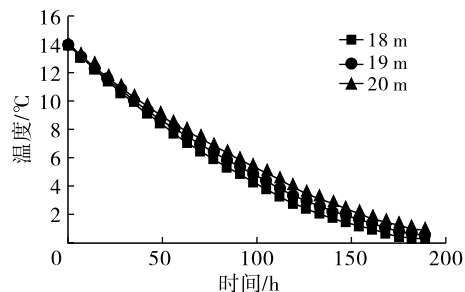


图 6 不同装粮高度下仓内粮堆温度的变化情况

由图 6 可知,仓内粮堆温度随通风时间的延长逐渐降低,通风初始阶段,不同装粮高度的粮堆温度差异很小,在机械通风 19 h 后,装粮高度为 18、19、20 m 的仓内粮堆温度分别降至 11.7、11.8℃和 11.9℃,装粮高度相差 1 m 时,粮堆之间温差为 0.1℃。随着机械通风的进行,温差逐渐增大,在机械通风 110 h 后,装粮高度为 18、19、20 m 的仓内粮堆温度分别为 3.4、4.0℃和 4.6℃,此时装粮高度相差 1 m 时,粮堆之间的温差为 0.6℃;再继续进行机械通风时,粮堆温度依然逐渐降低,但降速变得缓慢,且不同装粮高度的粮堆之间温差也逐渐减小,在机械通风结束后,仓内粮堆温度已降至 1℃以下,分别为 0.3、0.5℃和 0.9℃,此时,与机械通风 110 h 相比,装粮高度相差 1 m 时粮堆之间温差为 0.2~0.4℃。

### 3 结论

以大豆粮堆温度 14℃、装粮高度 20 m 为初始条件,以大气环境温度为温度边界条件,基于数值模拟软件 COMSOL,对机械通风过程仓内粮堆温度变化进行了研究,并基于实仓测试结果对数值模型结果进行验证。通过改变单一边界条件,对不同初始粮温和装粮高度仓内温度进行预测分析,得出以下结论。

(1)靠近风道的粮堆温度随着机械通风入口处气流温度的不断变化发生较为剧烈的变化,而远离风道位置的上部粮堆,其温度变化较为缓慢。粮堆热阻的存在导致热量在整个粮堆的传递过程表现出一定的迟滞性,进而导致整个粮堆温度分布不均。

(2)仓内粮温随通风时间的延长而降低,初始粮温分别为 12、14、16、18、20℃时,机械通风 86 h 后仓内粮堆温度分别降至 4.9、6.2、7.3、8.4℃和 9.6℃,此时与初始粮温相比已分别下降了 59%、56%、54%、53%和 52%,在相同边界条件下,5种初始粮温中,初始温度较低的粮堆,粮温降幅较大。在机械通风结束后,初始粮温为 14℃和 16℃的两种工况下,粮堆最终温度相差最小,为 0.1℃。

(3)机械通风过程,不同装粮高度的粮堆温度变化差异呈先增大后减小的趋势。装粮高度分别为 18、19、20 m 时,在机械通风 19 h 后,仓内粮堆温度分别降至 11.7、11.8℃和 11.9℃,装粮高度相差 1 m 时,粮堆之间温差为 0.1℃;在机械通风 110 h 后,不同装粮高度仓内粮堆温度分别为 3.4、4.0℃和 4.6℃,此时装粮高度相差 1 m 时,粮堆之间的温差为 0.6℃;在机械通风结束后,仓内粮堆温度分别为 0.3、0.5℃和 0.9℃,此时装粮高度相差 1 m 时,粮堆之间的温差为 0.2~0.4℃。

#### 参考文献:

[1] 王远成,余海,杨开敏,等. 仓储稻谷热湿耦合传递及黄变的数值模拟[J]. 农业工程学报, 2022, 38(4): 297-307.

[2] 张祥祥,张昊,王振清,等. 内衬塑料地下粮食筒仓粮堆温度场研究[J]. 农业工程学报, 2021, 37(16): 8-14.

[3] 尹君. 小麦粮堆多场耦合模型及结露预测研究[D]. 长春:吉林大学,2015.

[4] 王小萌,吴文福,尹君,等. 基于温湿度场云图的小麦粮堆霉变与温湿度耦合分析[J]. 农业工程学报, 2018, 34(10): 260-266.

[5] 刘立意,郝世杨,张萌,等. 基于 CFD-DEM 的稻谷通风阻力数值模拟与试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(8): 27-32, 158.

[6] 张淑媛,张祥祥. 地下粮食筒仓中高水分玉米粮堆谷冷通风后的温湿度研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(22): 8898-8905.

[7] 戚禹康,王远成,俞晓静,等. 浅圆仓不同装粮高度时径向与垂直通风模拟对比研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2019, 40(4): 108-113.

[8] 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.

[9] 张祥祥,王振清,陈曦. 地下仓粮堆通风温度场数值模拟研究[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2021, 47(5): 591-597.

[10] SUBROT P S, SINGH C B, FIELKE J, et al. Modeling of heat and mass transfer within the grain storage ecosystem using numerical methods: a review [J]. Dry Technol, 2020, 38(13): 1677-1697.

[11] WANG Q Y, FENG J C, HAN F, et al. Analysis and prediction of grain temperature from air temperature to ensure the safety of grain storage [J]. Int J Food Prop, 2020, 23(1): 1200-1213.

[12] 高帅,王远成,邱化禹,等. 小麦机械通风各向异性阻力的数值模拟研究[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(2): 116-119.

[13] THORPE G R. The application of computational fluid dynamics codes to simulate heat and moisture transfer in stored grains [J]. J Stored Prod Res, 2008, 44(1): 21-31.

[14] 王若兰,刘胜强,李换,等. 小麦粮堆降温冷却过程中温度变化研究[J]. 粮食与油脂, 2017, 30(5): 23-27.

[15] HAMMAMIA F, BEN MABROUK S, MAMIA A. Modelling and simulation of heat exchange and moisture content in a cereal storage silo [J]. Math Comp Model Dyn, 2016, 22(3): 207-220.

[16] SUBROT PANIGRAHI S, SINGH C B, FIELKE J, et al. Modeling of heat and mass transfer within the grain storage ecosystem using numerical methods: a review [J]. Dry Technol, 2020, 38(13): 1677-1697.

[17] 陈雁,王昱博,丁永刚,等. 不同运行参数下平房仓粮堆表层控温系统的隔热性能试验[J]. 现代食品科技, 2021, 37(9): 155-161, 206.

[18] 陈雁,王子嘉,丁永刚,等. 双层环形通风系统在模拟浅圆仓中的实验研究[J]. 粮食与油脂, 2020, 33(11): 129-132.

[19] 陈雁,王子嘉,付常青,等. 浅圆仓环壁通风降温系统的性能试验与风道设置优化[J]. 农业工程学报, 2019, 35(17): 285-292.

[20] 余海,杨开敏,王远成,等. 储粮横向通风多尺度热湿耦合传递研究[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(8): 74-78, 87.

[21] 张修霖,杨开敏,王远成,等. 浅圆仓压入式和吸出式通风效果对比研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2021, 52(1): 63-69.

[22] 林瑞泰. 多孔介质传热传质引论[M]. 北京:科学出版社, 1995.

[23] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2001.