

地槽通风高大平房仓仓内温度场研究

Study on temperature field in tall bungalow based on geosynclinal ventilation

张淑媛¹ 王森¹ 侯耀龙¹ 陈曦² 张祥祥²

ZHANG Shuyuan¹ WANG Sen¹ HOU Yaolong¹ CHEN Xi² ZHANG Xiangxiang²

(1. 郑州铁路职业技术学院, 河南 郑州 451460; 2. 河南工业大学土木工程学院, 河南 郑州 450001)

(1. Zhengzhou Railway Vocational and Technical College, Zhengzhou, Henan 451460, China;

2. School of Civil Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China)

摘要:[目的]研究高大平房仓地槽通风对仓内温度的影响。[方法]利用数值模拟软件 COMSOL,对仓房尺寸为60 m×24 m,装粮高度为6 m的高大平房仓进行96 h机械通风条件下的温度场数值模拟,通过建立质量守恒、动量守恒和能量守恒方程,分析不同通风方式条件下仓内温度场变化情况,并对不同单位通风量工况进行数值模拟拓展。[结果]机械通风36 h后,仓内装粮线以下粮堆大部分已降至15℃;机械通风96 h后,粮堆温度已降至15℃以下,距离仓底1~6 m处粮层温度均降至15.2℃以下;单位通风量从3 m³/(h·t)增至8 m³/(h·t)时,粮堆降温速度变快。[结论]在地槽通风条件下,粮堆温度从仓底逐渐降低,并呈圆弧状进行扩散;仓内粮堆温度变化出现一定的迟滞,随着距离仓底距离的逐渐增加,粮层温度降温速率逐渐减小;随着单位通风量的增大,粮堆的降温效果更好。

关键词:粮食;高大平房仓;地槽通风;单位通风量;温度场;COMSOL

Abstract: [Objective] In order to study the effects of geosynclinal ventilation on the temperature of tall bungalow warehouse. [Methods] The numerical simulation software COMSOL was used to conduct numerical simulation of temperature field under mechanical ventilation for 96 h for tall bungalow warehouse with size of 60 m×24 m and loading height of 6 m. By establishing the mass conservation equation, momentum conservation equation and energy conservation equation, the variation of temperature field in the warehouse under different ventilation modes was

analyzed, and the numerical simulation of different unit ventilation conditions was extended. [Results] After mechanical ventilation for 36 h, most of the grain pile below the grain line in the warehouse had dropped to 15℃, and after mechanical ventilation for 96 h, the temperature of the grain pile had dropped to below 15℃, the grain layer temperature at the distance of 1~6 m from the bottom of the warehouse all dropped below 15.2℃. By changing the unit ventilation rate [$q=3\text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{t})$ to $q=8\text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{t})$], the cooling rate of the grain pile became faster. [Conclusion] The temperature of the grain pile decreases gradually from the bottom of the bin and spreads in an arc shape under the geosynclinal ventilation condition. The grain layer 1 m and 2 m away from the bottom of the warehouse is affected by the fluctuation of external environment temperature, and the temperature gradually decreased in the fluctuation. With the increase of the distance between the grain layer and the bottom of the warehouse, the temperature fluctuation gradually disappears. The temperature change of grain pile in the bin appears a certain lag, and the cooling rate of grain layer temperature decreases with the increasing distance from the bottom of the bin, and the increase of the unit ventilation rate makes the grain pile get better cooling effect.

Keywords: grain; tall bungalow warehouse; geosyncline ventilation; unit ventilation volume; temperature field; COMSOL

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:51708180);河南省科技攻关项目(编号:232102240024);河南省高等学校重点科研项目计划(编号:22B560020)

作者简介:张淑媛(1993—),女,郑州铁路职业技术学院助教,硕士。E-mail: zhangshuyuan_1@163.com

收稿日期:2023-02-02 **改回日期:**2023-06-12

粮食问题是世界性问题,粮食安全关系到国计民生^[1-2]。中国粮仓储量大,贮藏周期较长,在贮藏过程中,粮堆发热作为破坏储粮安全的重要威胁之一而备受关注^[3-4]。机械通风降温技术因操作简便、价格低廉被广泛应用于高大平房仓储粮过程中^[5-6]。因此,研究高大平房仓机械通风仓内温度场的分布具有十分重要的意义。

数值模拟模型的开发益处诸多,可为研究人员有效预测不同工况结果^[7]。Jia 等^[8]研究表明,高温波动沿垂直方向由仓壁向仓心移动;Thorpe 等^[9-10]通过数学模型的建立,对机械通风过程中粮堆温度场变化进行了数值模拟分析,在满足局部热平衡的同时,所建立的模型可对仓内粮堆温度进行较好的预测;考虑到模型的维数,Andrade 等^[11]建立了柱坐标下的三维瞬态传热模型,模拟内部产热引起的温度变化。模拟结果表明,仓内不同位置的温度预测值与实测值存在不同的相对误差(最大值为 4.2%);Montross 等^[12]建立了一个轴对称有限元模型,利用现实边界条件预测扩散、传导、自然和强制对流(通气)过程中的热量、质量和动量传递;陈桂香等^[13-14]利用数值模拟软件 COMSOL,通过建立高大平房仓三维模型,对仓内温度场进行了研究,数值模拟结果可为粮仓冷却通风提供指导;王远成等^[15-18]基于多孔介质传热理论,对机械通风过程中粮堆温度场变化进行了分析,研究结果可为储粮通风降温 and 粮堆局部发热的预防提供参考。

研究拟对高大平房仓采用地槽通风降温方式,就仓内粮堆温度场变化进行 96 h 数值模拟分析,并对不同单位通风量工况下,仓内粮堆温度场变化进行数值模拟,旨在为安全储粮措施的制定提供依据。

1 粮仓模型的建立与网格划分

粮堆是一种典型的多孔介质^[19],在粮堆通风过程中,由于空气与粮堆温度存在差异,粮粒与空气进行热交换,冷风会通过粮粒孔隙将热量带走,使粮温逐渐下降。为简化计算,假定粮堆是均匀连续分布的,且遵循平衡热力学基本定律,由于通风时间短,忽略粮堆自呼吸影响及粮粒间辐射作用。

1.1 数学模型的建立

假定空气为不可压缩流体。

质量守恒方程为:

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

式中:

ϵ ——孔隙率;

ρ_a ——空气密度,kg/m³;

u ——空气流动速度,m/s。

动量守恒方程为:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u = -\frac{\nabla P}{\rho_a} + \nabla \cdot \left(\frac{\mu}{\rho_a} \cdot \nabla u \right) + S_j, \quad (2)$$

式中:

ρ_a ——粮食密度,kg/m³;

P ——压力,N;

μ ——动力黏度系数,N·s/m²;

S_j ——仓内粮堆的阻力项^[20]。

忽略由于粮食颗粒自呼吸产生的热量,则能量守恒方程为^[21]:

$$\rho_g C_g \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k_g \nabla T) + \rho_a C_a u_j \cdot \nabla T = 0, \quad (3)$$

式中:

ρ_g ——粮食密度,kg/m³;

C_g ——粮食比热容,J/(kg·K);

C_a ——空气比热容,J/(kg·K);

T ——热力学温度,K;

k_g ——粮食导热系数,W/(m·K)。

1.2 物理模型的建立与网格划分

1.2.1 模型建立及网格划分 模拟仓为河南某高大平房仓,该仓房尺寸为 60 m×24 m,装粮高度为 6 m,仓内为小麦粮堆。地槽出风面宽度为 0.33 m,风道筛孔板开孔率均为 30%。采用 COMSOL 建立高大平房仓几何模型,在高大平房仓内区域,分为粮堆域(多孔介质域,孔隙率为 0.453 8)^[22]和空气域,装粮高度线以下至地面为粮食区域,装粮高度线以上至仓顶为空气域,网格采用自由四面体网格,对粮堆域网格进行加密,粮堆域和空气域网格共 435 015 个,网格独立性较好,高大平房仓几何模型及网格划分图如图 1 所示。由于机械通风时间较短,忽略外围环境对仓内粮堆温度的影响。

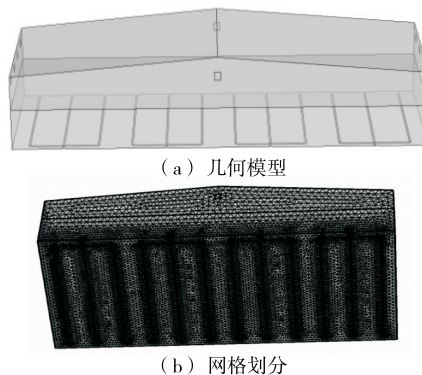


图 1 高大平房仓几何模型和网格划分图

Figure 1 Geometric model and grid drawing of tall bungalow

粮仓采用压入式通风,在仓内装粮线处布置边界探针用于记录小麦粮堆表面温度变化,在整个小麦粮堆中,布置域探针,用于记录机械通风过程中,整个多孔介质域温度变化过程。

1.2.2 模拟参数设置 对高大平房仓进行 96 h 的机械通风模拟,机械通风在秋季进行,通风时间为 11 月 10 日—13 日,将模型仓外温度变化绘制成二维线图(图 2)。初始粮温为 20 ℃,机械通风过程送风温度为外部环境温度,其数值通过插值函数的形式赋予给模型仓边界温度。

据外部环境温度检测数据可知,机械通风过程中,外部大气环境最低温度为 6.8℃,平均温度为 14.5℃。机械通风过程中主要发生对流传热,粮堆比热容、导热系数的变化对过程中粮堆温度变化影响较小,故采用定值,粮堆其他参数见表 1。

为确定机械通风所采用地槽尺寸,依据 LS/T 1202—2002 对高大平房仓粮堆总通风量进行计算。

$$Q_{\text{总}} = q \times G = q \times V \times r, \tag{4}$$

式中:

$Q_{\text{总}}$ ——总通风量, m^3/h ;

q ——单位通风量, $\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{t})$;

G ——粮食质量, t ;

V ——粮堆体积, m^3 ;

表 1 参数表

Table 1 Parameters

项目	水分/ %	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	比热容/ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	导热系数/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	渗透率/ m^2
小麦	13	810.5	1 927	0.167	2.78×10^{-8}
空气	—	1.225	1 006	0.024	—

r ——粮食容重, t/m^3 。

计算过程中,小麦容重为 $0.75 \text{ t}/\text{m}^3$,选取单位通风量为 $5 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{t})$,故总粮堆总通风量为 $32\,400 \text{ m}^3/\text{h}$ 。经计算,地槽通风过程中,风道表观风速为 0.103 m/s ,筛板平均开孔率为 30%,则风道表面实际出风速度为 0.344 m/s 。

2 结果与分析

为简化计算,取平房仓二维截面结果进行分析。首先通过实仓测试数据对模型仓进行验证,再利用建立的粮仓物理模型,在总风量一定的条件下,对地槽通风过程进行数值模拟,模拟通风时长为 96 h。

2.1 模型验证

对河南某高大平方仓进行实仓测试,高大平房仓尺

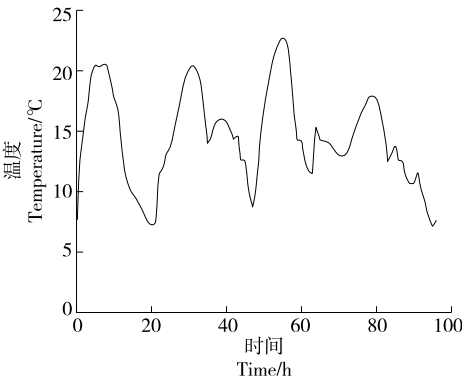
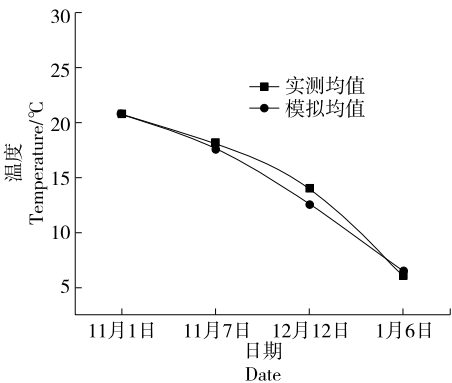


图 2 机械通风过程中外部环境温度变化

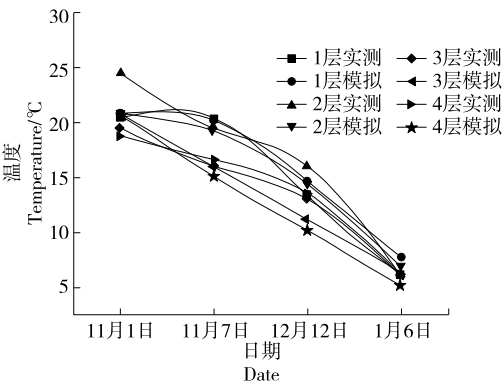
Figure 2 The external ambient temperature changes during mechanical ventilation

寸为 $36 \text{ m} \times 30 \text{ m}$,装粮高度为 6 m,依据 LS/T 1202—2002 计算得出,风道表面实际出风速度为 0.122 m/s 。同时在数值模拟软件 COMSOL 中建立等尺寸模型,并在相同边界条件下进行数值模拟分析,其中验证仓粮堆初始温度为 20.8°C ,整体粮堆温度均匀相等。

由图 3(a)可知,数值模拟和实仓测试数据吻合度较好,二者在 12 月 12 日的温差达到最大为 1.4°C ,机械通风结束后,数值模拟和实仓测试温度相差 0.9°C 。数值模拟温度与实仓温度的差值,主要原因为实仓测试过程中外部环境温度瞬时变化,而数值模拟过程中外部环境温度取当天平均值。由图 3(b)可知,各层粮堆实测温度和数值模拟温度变化趋势相同,其中第 2 层实测温度和数



(a) 实测均温与模拟均温对比



(b) 实测与模拟各层温度对比

图 3 实仓测试温度与数值模拟温度对比

Figure 3 Comparison of real warehouse test temperature and numerical simulation temperature

值模拟温度的差异最大,主要是由于二者初始温度不同所致,在数值模拟中,粮堆初始温度取实仓粮温的均值,模型中粮温均匀一致,而在实仓中粮堆温度分布不均。

2.2 地槽通风温度场分析

由图 4 可知,机械通风条件下,外部较低温度空气经风道进入粮堆,使得粮堆温度从仓底逐渐降低,并呈圆弧形进行扩散。通风 12 h 后,仓内下部粮堆温度已得到有效降低,仓内上部粮堆温度变化较小;随着机械通风时间的增长,粮堆温度逐渐降低。由图 4(b)可知,机械通风

36 h 后,仓内装粮线以下粮堆大部分已降至 15℃,在粮堆表层和仓壁处存在部分温度偏高区域;由图 4(c)可知,机械通风 72 h 后,粮堆温度已降至 15℃左右,仅有左上和右上边缘空气域小范围区域存在高温;经探针监测,此时粮堆温度已降至 15.17℃,较初始粮温降低了 4.83℃;随着机械通风的继续进行,粮堆温度继续降低。机械通风 96 h 后,粮堆温度已降至 15℃以下,由于粮堆导热系数较小,较低的粮堆温度对于保证粮食品质和安全度过来年夏天十分有益。

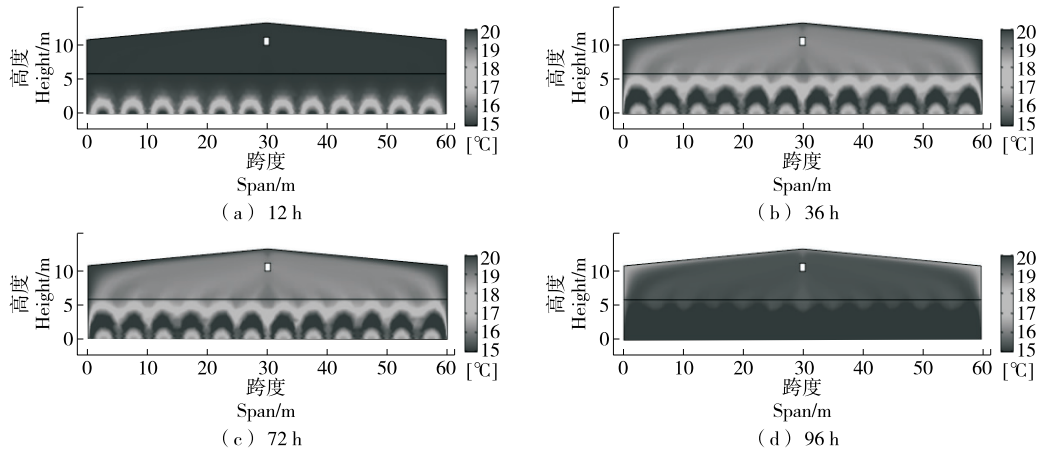


图 4 地槽通风温度场分布
Figure 4 Geosyncline ventilation temperature field distribution

2.3 粮堆各层温度对比分析

由图 5 可知,随着机械通风的进行,粮堆温度逐渐降低,由于外部环境温度存在一定的波动性,在距离仓底 1, 2 m 处粮层温度逐渐降低。地槽通风 52 h 后,距离仓底 1,2 m 处粮层温度出现一温度峰值,分别为 17.07, 15.98℃,原因是在机械通风 28~33 h,外部环境温度高于仓内粮堆温度。地槽通风 96 h 后,距离仓底 1,2 m 处粮层温度分别从 20℃降至 11.92,13.07℃,降幅分别为 8.08,6.93℃;随着粮层距离仓底距离的增加,温度的波动性逐渐消失,在地槽降温通风结束后,距离仓底 3,4,5,

6 m 处粮层从 20℃分别降至 13.91,14.46,14.86,15.15℃。在粮堆机械通风降温过程中,由于粮食是热不良导体,存在热阻,导致仓内粮堆温度变化出现一定的迟滞,随着距离仓底距离的逐渐增加,粮层温度降温速率逐渐减小。

2.4 不同单位通风量温度变化

保持其他条件不变,分别对单位通风量为 3~8 m³/(h·t)的 6 种工况条件下的粮堆温度变化进行数值模拟分析,通过计算粮堆总通风量,在不改变通风风道尺寸的条件下,计算其风道表面实际出风速度,并赋予此值至数值模型的入口边界,然后分别对地槽通风的 6 种工况进行数值模拟分析,结果见表 2。

表 2 不同单位通风量工况设置

Table 2 Setting of ventilation volume in different units

单位通风量/ (m³ · h⁻¹ · t⁻¹)	总通风量/ (m³ · h⁻¹)	地槽通风/ (m · s⁻¹)
3	19 440	0.207
4	25 920	0.275
5	32 400	0.344
6	38 880	0.413
7	45 360	0.482
8	51 840	0.551

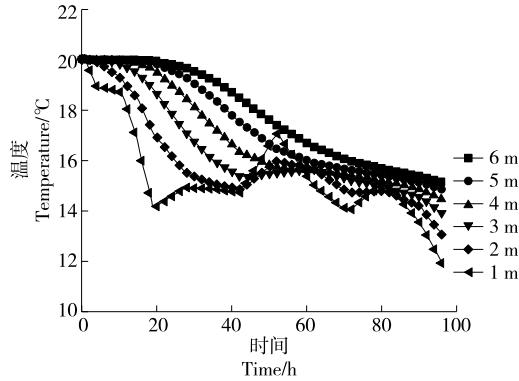


图 5 粮堆各层温度对比分析

Figure 5 Comparative analysis of overall temperature

由图 6 可知,地槽通风过程中,单位通风量从 $3 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{t})$ 增至 $8 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{t})$ 时,粮堆降温速度变快,是由于入口边界条件的改变使得粮食颗粒与周围空气换热过程变得更加剧烈。通风 24 h 后,粮堆温度分别为 $18.33, 17.95, 16.76, 16.14, 16.08, 15.15 \text{ }^\circ\text{C}$,较初始粮温 ($20 \text{ }^\circ\text{C}$) 分别降低了 $1.67, 2.05, 3.24, 3.86, 3.92, 4.85 \text{ }^\circ\text{C}$ 。随着机械通风的进行,粮堆温度继续降低,在机械通风结束时(通风 96 h),仓内最终温度分别为 $14.51, 13.87, 13.67, 13.25, 12.97, 12.70 \text{ }^\circ\text{C}$ 。由地槽通风数据可知,单位通风量越大,粮堆的降温效果越好。

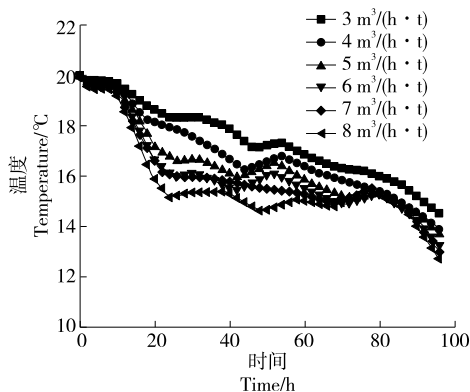


图 6 不同单位通风量下的粮堆温度

Figure 6 Grain stack temperature at different units of ventilation

3 结论

基于数值模拟软件 COMSOL,采用地槽通风降温方式对高大平房仓仓内粮堆温度变化进行了 96 h 的数值模拟分析,并通过改变单位通风量,对 6 种单位通风量条件下粮堆温度变化进行了分析。结果表明,地槽通风条件下,外部较低温度空气经风道进入粮堆后,粮堆温度从仓底逐渐降低,并呈圆弧状进行扩散。机械通风过程中,粮堆表层和仓壁处存在部分温度偏高区域,机械通风 96 h 后,粮堆温度已降至 $15 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下。距离仓底 1.2 m 处粮层受到外部环境温度波动的影响,温度在波动中逐渐降低,随着粮层距离仓底距离的增加,温度的波动性逐渐消失。机械通风粮堆降温过程中,仓内粮堆温度变化出现一定的迟滞,随着距离仓底距离的逐渐增加,粮层温度降温速率逐渐减小。单位通风量从 $3 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{t})$ 增至 $8 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{t})$ 时,粮堆降温速度变快,机械通风结束时(通风 96 h),仓内最终温度分别为 $14.51, 13.87, 13.67, 13.25, 12.97, 12.70 \text{ }^\circ\text{C}$,单位通风量越大,粮堆的降温效果越好。

参考文献

[1] 黄娴,陈佳,陈可心. 无线传感技术在粮食仓储环境监测中的应用[J]. 食品与机械, 2021, 37(10): 133-137.

HUANG X, CHEN J, CHEN K X. Application of wireless sensor technology in grain storage environment monitoring[J]. Food & Machinery, 2021, 37(10): 133-137.

[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.

ZHANG X X, ZHANG H, WANG Z Q, et al. Research on the temperature field of grain piles in underground grain silos lined with plastic[J]. Chinese Journal of Agricultural Engineering, 2021, 37(16): 8-14.

[3] 崔宏伟,吴文福,吴子丹,等. 基于温度场云图的储粮数量监控方法研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 290-298.

CUI H W, WU W F, WU Z D, et al. Research on the monitoring method of grain storage quantity based on temperature field cloud map[J]. Chinese Journal of Agricultural Engineering, 2019, 35(4): 290-298.

[4] 张瑞元. 地下粮仓钢板与塑料内壁粮食结露实验与数值模拟[D]. 郑州: 河南工业大学, 2020: 1-3.

ZHANG R Y. Experiment and numerical simulation of grain condensation on the inner wall of steel plate and plastic in underground granary [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2020: 1-3.

[5] 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.

SHEN B Z, YE Y Y, YU L F, et al. Application of dynamic temperature control for grain storage in grain pile based on transverse ventilation system[J]. Journal of Grain and Oil Storage Technology Communication, 2019, 35(1): 29-32.

[6] 刘伟,罗景瑞,吴树会. 地槽通风改造系统生产性试验研究[J]. 粮食储藏, 2019, 48(4): 4-6, 13.

LIU W, LUO J R, WU S H. Production test study of geosynclinal ventilation reconstruction system[J]. Food Storage, 2019, 48(4): 4-6, 13.

[7] NUTTALL J G, O'LEARY G J, PANOZZO J F, et al. Models of grain quality in wheat: a review[J]. Field Crops Research, 2017, 202: 136-145.

[8] JIA C, SUN D, CAO C, et al. Computer simulation of temperature changes in a wheat storage bin [J]. Journal of Stored Products Research, 2001, 37(2): 165-177.

[9] THORPE G R. Modelling ecosystems in ventilated conical bottomed farm grain silos[J]. Ecological Modelling, 1997, 94: 255-286.

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

[11] ANDRADE E T, COUTO S M, QUEIROZ D M, et al. Three-dimensional simulation of the temperature variation in corn stored in metallic bin[C]// Guido de Sousa Damasceno, American Society of Agricultural and Biological Engineers. Chicago: [s.n.], 2002: 28-31.

[12] MONTROSS M D, MAIER D E, HAGHIGHI K. Development of a

- finite-element stored grain ecosystem model[J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45(5): 1 455-1 464.
- [13] 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, 2018, 33(11): 79-85.
- CHEN G X, ZHANG H W, WANG H T, et al. Research on coupled heat and humidity transfer of grain reactor during cooling and ventilation of bungalow based on COMSOL[J]. China Journal of Cereals and Oils, 2018, 33(11): 79-85.
- [14] 葛蒙蒙, 陈桂香, 刘文磊, 等. 基于 COMSOL 的静态仓储稻谷粮堆温度场模拟研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2020, 41(6): 101-105.
- GE M M, CHEN G X, LIU W L, et al. Simulation of temperature field of static storage rice and grain pile based on COMSOL[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2020, 41(6): 101-105.
- [15] 王远成, 高帅, 邱化禹, 等. 横向谷冷通风过程的数值模拟研究[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(7): 103-106.
- WANG Y C, GAO S, QIU H Y, et al. Numerical simulation of transverse valley cooling ventilation[J]. China Journal of Grain and Oil, 2016, 31(7): 103-106.
- [16] 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.
- ZHANG X L, YANG K M, WANG Y C, et al. Comparative study on the effect of compression ventilation and suction ventilation in shallow silo [J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2021, 52(1): 63-69.
- [17] 王远成, 石天玉, 曲安迪, 等. 高大平房仓双侧吸出式斜流通风数值模拟和实验的比较研究[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(3): 139-146.
- WANG Y C, SHI T Y, QU A D, et al. Comparative study on numerical simulation and experiment of double-side suction oblique flow air in tall bungalow[J]. China Journal of Cereals and Oils, 2019, 35(3): 139-146.
- [18] 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.
- YU H, YANG K M, WANG Y C, et al. Research on multi-scale coupled heat and moisture transfer in transverse ventilation of grain storage [J]. Journal of Cereals and Oils, 2019, 36(8): 74-78, 87.
- [19] 王远成, 段海峰, 张来林. 就仓通风时粮堆内部热湿耦合传递过程的数值预测[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2009, 30(6): 75-79.
- WANG Y C, DUAN H F, ZHANG L L. Numerical prediction of coupled heat and humidity transfer process in grain reactor under bin ventilation [J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2009, 30(6): 75-79.
- [20] HE H C, LI S M, ZHE L, et al. Error analysis of high-moisture maize moisture measurement with PM8188 grain moisture tester [C]// First International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC). Beijing: IEEE, 2011: 1-3.
- [21] 张得正, 余克志, 张彤. 基于分形理论的火龙果冻干过程数值模拟[J]. 食品与机械, 2022, 38(11): 143-148.
- ZHANG D Z, YU K Z, ZHANG T. Numerical simulation of pitaya freeze-drying process based on fractal theory [J]. Food & Machinery, 2022, 38(11): 143-148.
- [22] 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: 55-56.
- YIN J. Research on multi-field coupling model and dew prediction of wheat grain pile[D]. Changchun: Jilin University, 2015: 55-56.
-
- (上接第 123 页)
- [21] 尹东霞, 马沛生, 夏淑倩. 液体表面张力测定方法的研究进展[J]. 科技通报, 2007, 23(3): 424-429.
- YIN D X, MA P S, XIA S Q. Research progress of liquid surface tension measurement methods[J]. Chinese Science and Technology Bulletin, 2007, 23(3): 424-429.
- [22] LARA I, BELGE B, GOULAO L F. The fruit cuticle as a modulator of postharvest quality [J]. Postharvest Biology and Technology, 2014, 87: 103-112.
- [23] 徐呈祥, 郑福庆, 马艳萍, 等. 贮藏温度对耐贮性不同的柑橘品种果皮蜡质含量及其化学组成的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(13): 223-232.
- XU C X, ZHENG F Q, MA Y P, et al. Effects of storage temperature on the wax content and chemical composition of citrus peel with different storability[J]. Journal of Food Science, 2021, 42(13): 223-232.
- [24] KOCH K, ENSIKAT H J. The hydrophobic coatings of plantsurfaces: epicuticular wax crystals and their morphologies, crystallinity and molecular self-assembly[J]. Micron, 2008, 39(7): 759-772.
- [25] 李金丽, 黄少云, 张荣荣, 等. 保鲜纸箱对樱桃常温贮藏品质的影响研究[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(5): 188-191.
- LI J L, HUANG S Y, ZHANG R R, et al. Effect of fresh-keeping carton on storage quality of cherries at room temperature[J]. Food Research and Development, 2018, 39(5): 188-191.
- [26] 陈镠, 余婷, 王允祥, 等. 壳聚糖—纳米氧化锌复合涂膜对甜樱桃采后生理和贮藏品质的影响[J]. 核农学报, 2017, 31(9): 1 767-1 774.
- CHEN L, YU T, WANG Y X, et al. Effects of chitosan and nano-zinc oxide composite coating on postharvest physiology and storage quality of sweet cherry[J]. Journal of Nuclear Agriculture, 2017, 31(9): 1 767-1 774.
- [27] ZHONG Y, LI Y F. Effects of surfactants on the functional and structural properties of kudzu (Pueraria lobata) starch/ascorbic acid films[J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 85(3): 622-628.