

引用格式:

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.

ZHANG X X, WANG Z Q, CHEN X. Numerical simulation on ventilation temperature field of grain piles in underground silos[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2021, 47(5): 591–597.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



地下仓粮堆通风温度场数值模拟研究

张祥祥, 王振清*, 陈曦

(河南工业大学土木工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 为了解地下仓通风对粮堆温度场变化的影响, 对筒仓直径 25 m、仓高 20.1 m 的地下仓粮堆进行了 288 h 通风工况下的温度场数值模拟研究。该模型以实际地下仓为背景, 基于多物理场数值模拟软件 COMSOL, 通过调整内置质量守恒方程、能量守恒方程和动量守恒方程, 分析不同入口边界压力和温度下地下仓温度场的变化情况。结果表明: 在对地下仓通风 288 h 条件下, 竖向通风比横向通风降温更快; 提高边界入口压力(由 300 Pa 提高至 400 Pa)时, 横向通风和竖向通风粮堆均温都有效下降; 在降低入口边界温度(由 17 °C 降至 13 °C)时, 相同时间的降温效果都得到明显改善, 竖向通风过程的整体粮堆温度下降较快, 在通风 288 h 后, 仓内温度趋于平稳。

关 键 词: 地下仓; 粮堆; 横向通风; 竖向通风; 温度场

中图分类号: TU249.2

文献标志码: A

文章编号: 1007–1032(2021)05–0591–07

Numerical simulation on ventilation temperature field of grain piles in underground silos

ZHANG Xiangxiang, WANG Zhenqing*, CHEN Xi

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

Abstract: In order to study the influence of underground warehouse ventilation on the temperature field of the grain piles, the temperature field of underground warehouse with the diameter of 25 m and the height of 20.1 m was simulated under 288 h ventilation condition. Based on multi-physical field numerical simulation software COMSOL, the model takes the actual underground warehouse as the background. By adjusting the built-in mass conservation equation, energy conservation equation and momentum conservation equation, the temperature field evolution of the underground warehouse is analyzed under different inlet boundary pressures and temperatures. The results show that the temperature of vertical ventilation is faster than that of transverse ventilation under the condition of 288 h ventilation of underground warehouse. When increasing the pressures from 50 Pa to 100 Pa, the mean temperature of grain piles was effectively reduced for transverse ventilation and vertical ventilation. When the inlet boundary temperature was lowered from 17 °C to 13 °C, the cooling effect under the same time was significantly improved, whereas the overall grain pile temperature decreased rapidly in the vertical ventilation process. The temperature tended to be stable in the whole underground warehouse after 288 h ventilation.

Keywords: underground silos; grain piles; horizontal ventilation; vertical ventilation; temperature field

收稿日期: 2020–10–12

修回日期: 2021–03–09

基金项目: 粮食公益性行业科研专项(201413007–01、201513001–03); 河南省科学技术厅项目(202102110122); 河南工业大学高层次人才科研启动基金项目(2018BS077)

作者简介: 张祥祥(1993—), 男, 河南周口人, 硕士研究生, 主要从事粮食仓储研究, zhangxiang2052@163.com; *通信作者, 王振清, 硕士, 教授, 主要从事粮食仓储研究, hautwang@126.com

大量实践和研究表明,低温储粮不仅能延缓粮食的劣变,还能抑制虫害的发生^[1]。现阶段,中国储备粮库多为平房仓、浅圆仓、立筒仓等仓型^[2],地下仓虽拥有天然低温环境,能较好地保护粮食品质和减少有毒药物熏蒸^[3],但地下仓存在初始入粮粮温高的问题。为保证储粮安全,对地下仓进行机械通风意义十分重大。相比于实仓测试成本较高、受限条件多等,数值模拟对于探索粮堆内部温度场分布及其传递规律更经济有效^[4]。JIA等^[5]构建了笛卡尔坐标系下的圆筒仓粮堆温度场模型,结果表明随着距仓壁和顶面距离的增加,小麦的温度变化逐渐减小,环境峰值温度与小麦峰值温度之间的时间延迟约为3至4个月;THORPE^[6-7]对通风时粮堆的温度变化进行研究,并建立了数学模型,在满足局部热平衡的条件下,该模型能很好地重现仓内粮堆温度场的分布;刘文磊等^[8]基于数值模拟软件COMSOL,探讨了粮堆中压力场的变化对温度场分布的影响,结果表明,随着储粮压力的增大,粮堆温度迁移逐渐变慢;戚禹康等^[9]对浅圆仓不同装粮高度的径向与垂直通风进行模拟对比研究,得出装粮高度对径向、垂直通风的降温效果没有明显影响,且浅圆仓径向与垂直通风的通风效果比较接近;王远成等^[10]基于局部热平衡原理和多孔介质理论,对粮堆横向谷冷通风过程进行了数值模拟研究,得出横向通风时粮堆内部速度分布均匀,且具有降温速度快、冷却效率高的结论;相对于地上笼垂直通风而言,横向谷冷通风时粮堆内部温度梯度较小。王振清等^[11]、金立兵等^[12]通过对地下仓温度场进行数值模拟,认为地下仓粮温存在纵向明显分层现象,且上层温度受外界温度的影响大于下层的,下层温度整体趋于稳定。这些研究多集中于平房仓和浅圆仓,在地下仓温度场的研究中,对非人工干预条件下粮堆温度场虽有所涉及,但对地下仓通风降温的研究还相对较少。笔者采用横向和竖向通风2种降温方式,对筒仓直径25 m、仓高20.1 m地下仓装粮后288 h的粮堆温度场进行数值模拟对比,分析不同入口温度边界和压力边界下的地下仓粮堆温度场分布,以期为制定地下仓安全储粮措施提供参考。

1 地下仓粮堆模型的建立与条件设置

粮堆可视作是典型的多孔介质^[13]。在粮堆通风

过程中,粮粒之间空气进行热交换,由于空气与粮堆温度存在差异,冷风会通过粮粒孔隙带走热量,使粮温逐渐下降。为简化计算,假定粮堆是均匀连续分布的,遵循平衡热力学基本定律,且通风时间短,可忽略粮堆自呼吸影响及粮粒间的辐射作用。

1.1 数学模型的建立

在粮堆的CFD数值模拟过程,遵从基本守恒定律,即质量守恒、动量守恒和能量守恒^[14]。假定空气为不可压缩流体,则质量守恒方程为:

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

式中: ε 为孔隙率; ρ_a 为空气密度; t 为时间变量; v_j 为 x_j 方向空气的流动速度。

动量守恒方程为:

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

$$S_j = \frac{dP}{dx_j} = -R_{v_j} - S_{v_j}^2 \quad (3)$$

式中: P 为压强; x_j 为系统坐标; μ 为动力黏度系数; S_j 是仓内粮堆的阻力项; R_{v_j} 、 S_{v_j} 分别表示垂直方向的线性阻力项和惯性阻力项。

忽略压力功、粘性发热和由于粮食颗粒自呼吸产生的热量,则能量守恒方程简化为:

$$\rho_g C_g \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla(-k_g \nabla \cdot T) + \rho_a C_a v_j \cdot \nabla \cdot T = 0 \quad (4)$$

式中: ρ_g 为粮食密度; T 为温度; C_g 为粮食比热容; k_g 为粮食导热系数; C_a 为空气比热容。

1.2 物理模型的建立与探针布置

1.2.1 模型建立及网格划分

由于地下仓为轴对称空间结构,为简化计算,仅以右半部分建立几何模型和进行网格划分,COMSOL可自动计算出整仓结果。

地下仓内半径为12.5 m,中心筒半径为1.3 m,仓高20.1 m,其中装粮线高18 m,锥底高8.5 m,仓壁厚0.35 m,锥底壁厚0.25 m,仓底壁厚0.5 m,仓壁为混凝土结构。鉴于长江以北地区地下土壤均温为16~20℃^[11],取土壤均温17℃,外部环境温度为30℃。粮仓内区域划分成粮堆域和空气域,装粮线上至仓顶盖区域为空气域,装粮线以下为粮堆域。粮仓采用压入式通风方式,竖向通风时,在锥底斜面上布置地上笼风道;横向通风时,风道布置于中心筒壁上。在仓内布置边界探针用于记录温

度变化。边界探针共布置 6 层, 竖向通风按照从下到上、横向通风按照从左到右的方式布置, 边界探针间距为 2 m, 边界探针与仓壁和中心筒壁的距离为 1 m。锥底采用域探针的形式以消除通风不均的影响。地下仓剖面图和网格划分如图 1 所示。

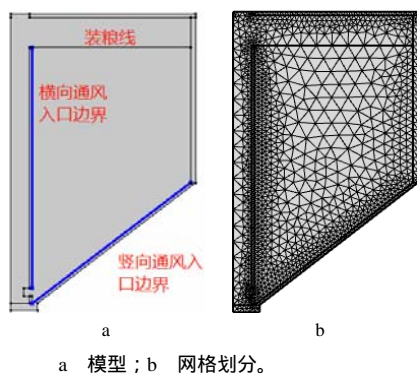


图 1 地下仓右半部分模型和网格划分

Fig.1 The model and grid division of the right half of the underground silos

1.2.2 COMSOL 边界条件及参数设置

对地下仓进行通风 288 h 的模拟, 数值模拟初始条件: 夏季装粮, 初始粮温 30 °C, 地下仓仓壁温度取地下土壤均温 17 °C, 仓顶为外部环境温度

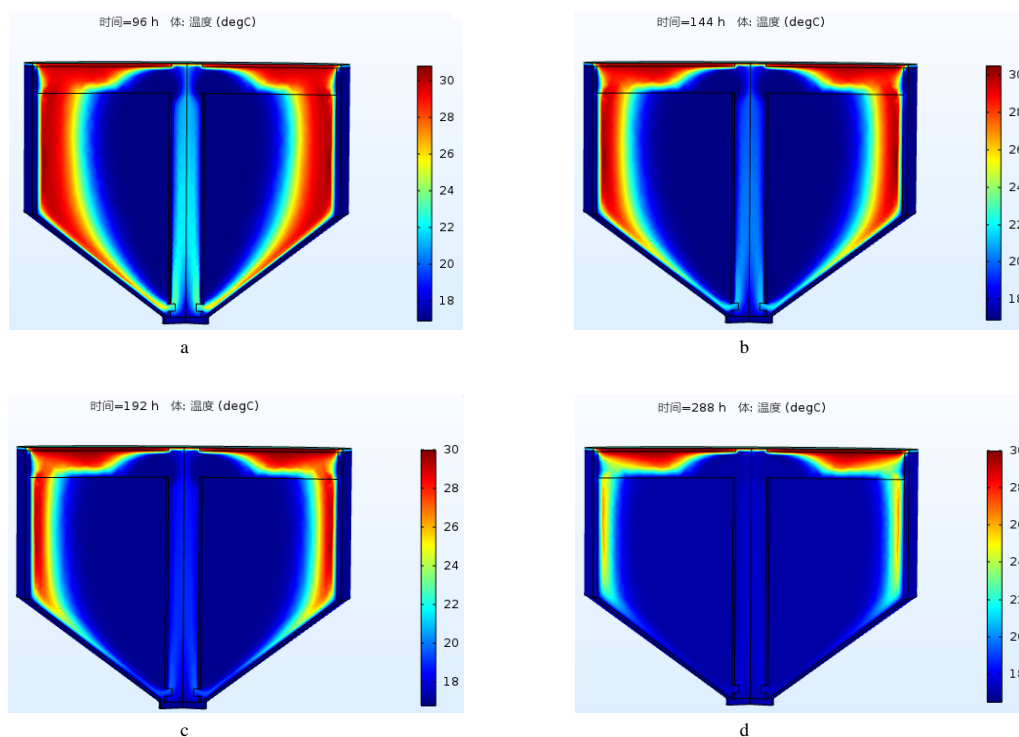
30 °C。仓内空气域温度为初始外部环境温度 30 °C, 参照文献[15]获取粮食的物性参数。在入口边界相对压力分别为 300、350、400 Pa, 入口温度分别为 13、15、17 °C 的 9 种工况下进行数字模拟。

2 结果与分析

利用建立的粮仓二维对称物理模型, 对横向和竖向通风 2 种通风方式进行数值模拟。粮食入仓后, 模拟通风时长 288 h, 粮堆域平均表观速度为 0.021 m/s, 粮堆域流动速度较小, 静压驱动是粮堆域内空气流动的主要驱动力。

2.1 横向通风温度场的分布

由图 2 可知, 横向通风时, 冷空气从中心筒边界不断向粮堆扩散, 且呈现弧状。通风 96 h 时, 中心筒与粮堆温差达 13 °C, 冷空气扩散较快, 使得靠近中心筒区域粮堆孔隙间发生强烈的热交换, 近中心筒区域粮堆温度迅速下降至 17 °C, 粮堆整体均温降至 22.9 °C。通风 144 h 后, 粮堆温度下降速率逐渐放缓, 靠近仓壁处温度较高, 且由于仓顶盖外边界与外界环境直接接触, 上部空气域仍有部分不



a 通风 96 h; b 通风 144 h; c 通风 192 h; d 通风 288 h。

图 2 不同时长横向通风粮堆的温度场分布

Fig. 2 The temperature field distribution of grain piles after different transverse ventilation time

规则高温区域,此时粮堆整体均温为 21.1°C 。通风 288 h 后,仓壁处仍有小部分区域温度未降至通风温度,粮堆整体温度降至 18.1°C 。中心筒边界为通风入口边界,使得中心筒得以降温。由于采用压差通风,随着与入口边界距离的增加,导致与入口边界较远的仓壁温度下降缓慢。不过由于地下仓仓壁外土壤具有较好的保温作用,土壤的低温在仓壁处通过导热的方式穿透混凝土仓壁,进而渗透进粮仓,在一定程度上有利于仓壁处粮堆温度的降低。

2.2 竖向通风温度场的分布

由图 3 可知,地下仓竖向通风过程中,冷空气从仓底斜坡处向粮堆渗透,在粮粒孔隙间与初始热空气发生热交换,由于初始温差大,因而热驱动力较大。通风 144 h 后,粮堆温度从初始的 30°C 降至

17°C ,下降较快,此时粮堆整体均温为 19.1°C ,比初始粮温下降 10.9°C ;通风 192 h 后,粮堆温度趋于稳定,此时粮堆均温为 18.1°C ,仅靠近中心筒处存在小部分高温区域,这是因为中心筒采用混凝土材料(导热系数为 $1.8\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$),导热系数较小,热阻较大。粮堆竖向通风过程中,冷空气无法直接和中心筒内空气进行对流换热,冷空气通过和中心筒混凝土壁进行热传导和热对流,中心筒壁再与中心筒内部高温空气进行导热和自然对流换热,使得中心筒温度下降较慢,致使高温集中于中心筒处,特别是中心筒壁处。通风 288 h 后,混凝土壁均温仅比初始温度降低 1.5°C ,为 28.5°C 。提示后期可通过加强中心筒内的对流换热来降低其温度。

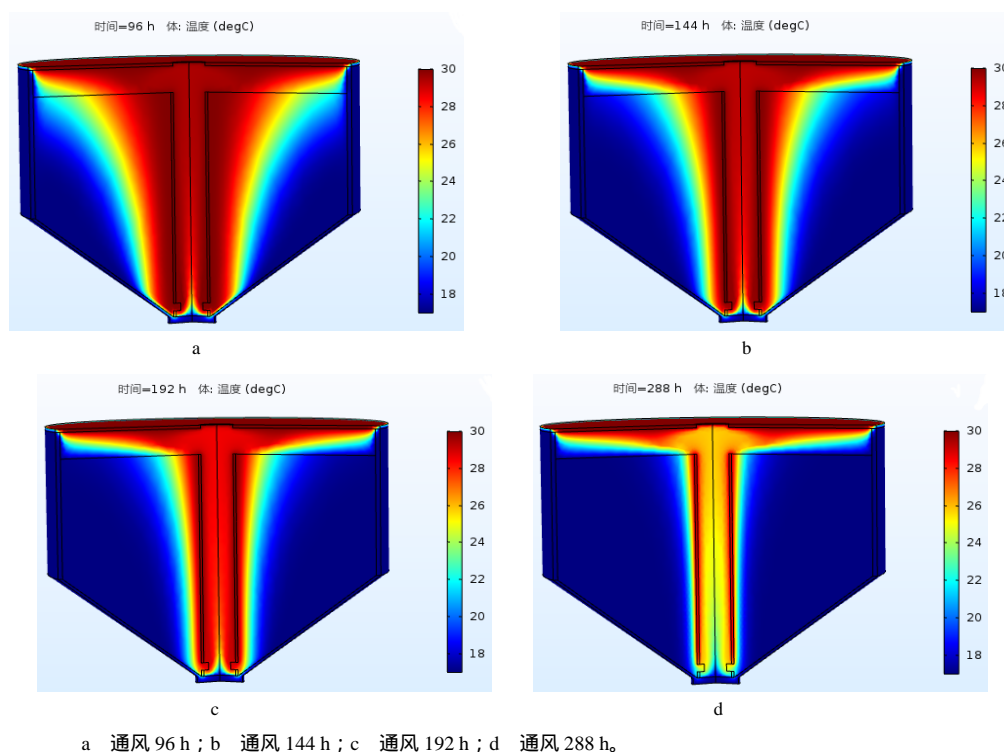


图 3 不同时长竖向通风粮堆的温度场分布

Fig. 3 The temperature field distribution of grain piles after different vertical ventilation time

2.3 粮层温度的分布

由图 4 可知,无论何种通风方式,通风入口边界处温度都下降较快,而随着与通风入口边界距离的增大,粮堆温度下降都变得缓慢。这是因为粮堆作为一种热导体,在粮堆通风降温过程中,粮堆存在热阻,使得粮堆温度的变化出现延迟现象。对比

分析图 5 可知,不论是仓身还是锥型仓底,横向通风过程粮堆的热阻都比竖向的大,通风 144 h 后,横向通风与竖向通风整体粮温相差 2°C ;通风 288 h 后,竖向通风粮堆平均粮温降至 17.2°C ,横向通风粮堆均温降至 18.1°C ,竖向通风的降温效果更好。

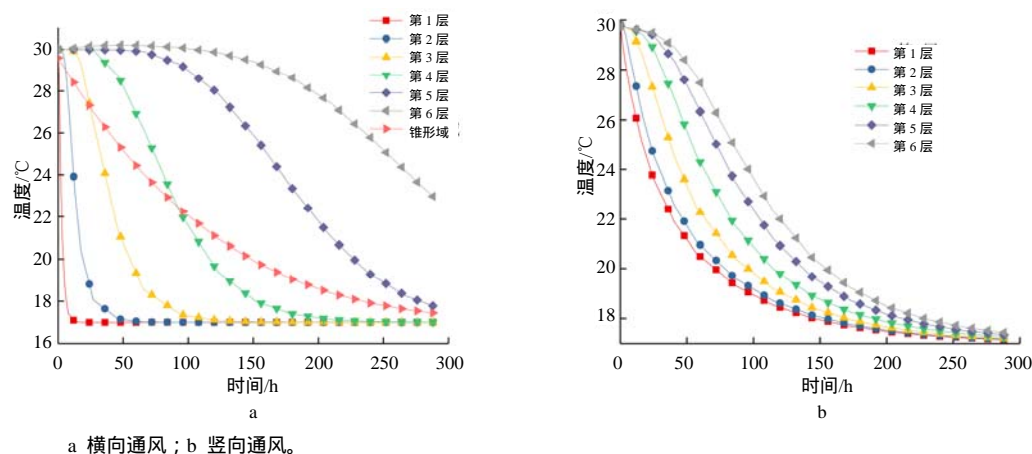


图 4 通风各粮层的温度

Fig.4 Temperature of each grain layer dependent on ventilation time under different ventilation

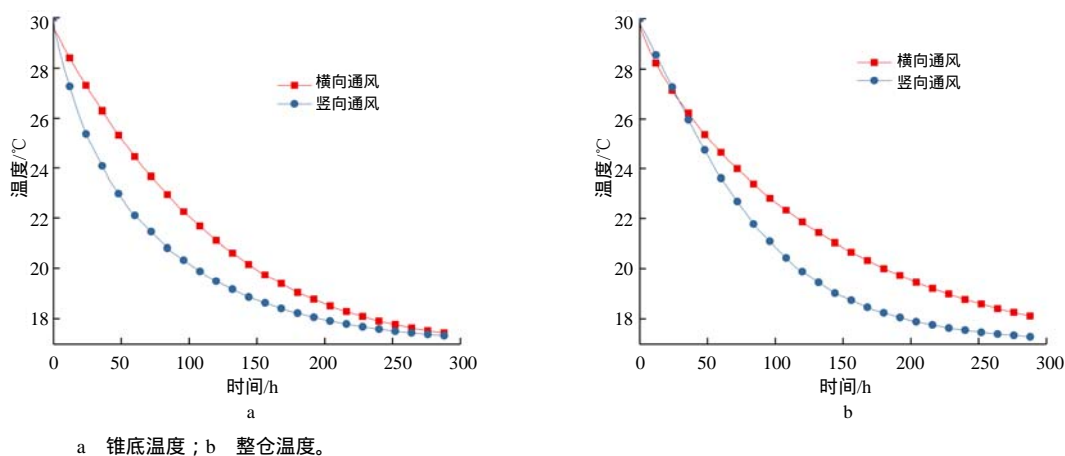


图 5 横向与竖向通风粮仓温度

Fig. 5 Temperature of different position dependent on ventilation time under horizontal and vertical ventilation

2.4 不同入口边界条件的温度变化

在数值模拟软件 COMSOL 中,改变入口边界的温度和压力,通过监测粮堆的温度均值变化,得出

整仓粮堆的温度,如图 6 所示。表明增大入口边界压力和降低入口边界温度均能加速粮堆的降温,这是由于边界条件的改变使得换热更加剧烈的缘故。

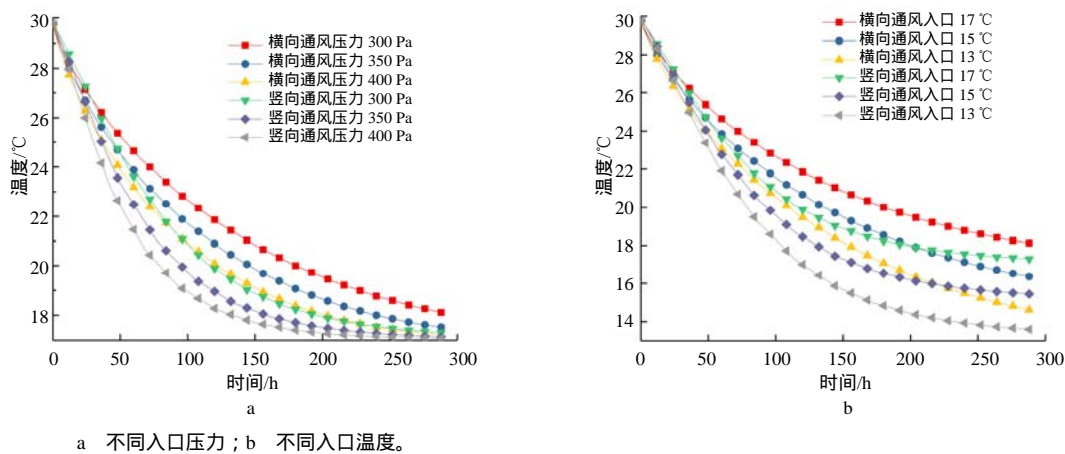


图 6 不同入口压力和温度下通风的粮堆温度

Fig.6 The temperature of the grain piles dependent on ventilation time under different inlet pressure and temperature

在通风过程中,相同初始温度的粮堆,通过改变入口边界压力条件,竖向通风过程的整体粮堆温

度下降较快,入口边界相对压力提高(由 300 Pa 升至 400 Pa)的过程中,降温效果得到提升;通过改变

入口温度条件, 竖向通风过程的整体粮堆温度同样下降较快, 入口边界温度降低(由 17 °C 降至 13 °C)过程中, 相同时间的降温效果都得到明显改善。在通风 288 h 后, 仓内温度趋于平稳。

在本研究条件下, 通过改变入口边界压力, 或改变入口边界温度, 竖向通风的粮堆整体降温要好于横向通风方式。

3 结论

基于数值模拟软件 COMSOL, 采用横向和竖向通风的降温方式, 对装粮后 288 h 的地下仓粮堆温度场进行数值模拟, 并通过改变入口边界的温度和压力, 地下仓粮堆温度场变化结果表明: 地下仓横向通风过程中, 随着与入口边界距离的增加, 远离入口边界区(仓壁处)通风降温缓慢, 但地下仓可依托天然的外界低温环境, 对仓壁处粮堆温度的降低起促进作用。

地下仓竖向通风过程中, 能克服横向通风仓壁处降温缓慢的问题, 但中心筒边界处温度下降缓慢, 高温区域集中于中心筒边界处。

地下仓通风过程中, 增大入口边界压力(由 300 Pa 升至 400 Pa)和降低入口边界温度(由 17 °C 降至 13 °C), 横向通风和竖向通风都会提高降温效果。与横向通风相比, 竖向通风在相同条件下表现出更好的降温效果。

参考文献:

- [1] 毛海锋, 曾端辉, 卢黄华, 等. 优质籼米地下仓储过程中品质变化[J]. 粮油食品科技, 2017, 25(3): 87-91. MAO H F, ZENG D H, LU H H, et al. Study on the changes of quality index of high quality milled long-grain-nonglutinous rice during storage in underground granary[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2017, 25(3): 87-91.
- [2] 尹君, 吴子丹, 张忠杰, 等. 不同仓型的粮堆温度场重现及对比分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1): 281-287. YIN J, WU Z D, ZHANG Z J, et al. Comparison and analysis of temperature field reappearance in stored grain of different warehouses[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(1): 281-287.
- [3] 王振清, 揣君, 刘永超, 等. 地下粮仓的结构设计研究现状与新进展[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2019, 40(5): 132-138. WANG Z Q, CHUAI J, LIU Y C, et al. Current situation and new progresses of the structure design of underground silos[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 40(5): 132-138.
- [4] 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. Numerical simulation of coupled heat and moisture transfer in stored grains during cooling ventilation by using COMSOL[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2018, 33(11): 79-85.
- [5] JIA C C, SUN D W, CAO C W, et al. Computer simulation of temperature changes in a wheat storage bin[J]. Journal of Stored Products Research, 2001, 37(2): 165-177.
- [6] THORPE G R. Modelling ecosystems in ventilated conical bottomed farm grain silos [J]. Ecological Modelling, 1997, 94(2/3): 255-286.
- [7] 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.
- [8] 刘文磊, 陈桂香, 陈家豪, 等. 储粮压力对玉米粮堆温度场影响的实验与模拟研究[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(4): 92-99. LIU W L, CHEN G X, CHEN J H, et al. Experimental and simulation study on the influence of grain storage pressure on the temperature field of maize grain pile[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2020, 35(4): 92-99.
- [9] 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. QI Y K, WANG Y C, YU X J, et al. Comparative study on radial and vertical ventilation simulation of different filling heights in squat silos[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 40(4): 108-113.
- [10] 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 study during the horizontal grain aeration with cooling air[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2016, 31(7): 103-106.
- [11] 王振清, 田栋杰, 刘海燕. 钢筋混凝土圆形地下粮仓温度场试验研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2018, 39(3): 99-102. WANG Z Q, TIAN D J, LIU H Y. Experimental study on temperature field of underground reinforced concrete

- circular granary[J]. Journal of Henan University of Technology(Natural Science Edition), 2018, 39(3): 99-102.
- [12] 金立兵, 薛雅琪, 梁新亚, 等. 地下储粮仓温度场的数值模拟与试验研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2019, 40(5): 120-125.
- JIN L B, XUE Y Q, LIANG X Y, et al. Numerical simulation and experiment on temperature field in underground granary[J]. Journal of Henan University of Technology(Natural Science Edition), 2019, 40(5): 120-125.
- [13] 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 simulation of coupled heat and moisture transfer in grain bulk during in-bin drying[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2009, 30(6): 75-79.
- [14] 杨希文, 蒋蘋, 罗亚辉, 等. 气雾栽培箱喷雾条件下温度场的 CFD 数值模拟[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2019, 45(1): 103-107.
- YANG X W, JIANG P, LUO Y H, et al. CFD numerical simulation of temperature field under spray condition in aeroponics cultivation box[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2019, 5(1): 103-107.
- [15] 潘钰. 房式仓粮堆自然储藏和机械通风过程中热湿耦合问题的研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2017.
- PAN Y. Research on coupled heat and moisture transfer in the warehouse during natural storage and mechanical ventilation process[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2017.
- 责任编辑: 罗慧敏
英文编辑: 吴志立
-
- (上接第 590 页)
- [16] 曲湘勇, 彭豫东, 何俊, 等. 道州灰鹅×朗德鹅杂交 F_1 代与朗德鹅生长曲线及生产性能比较研究[J]. 中国家禽, 2016, 38(19): 9-14.
- QU X Y, PENG Y D, HE J, et al. Comparative study on growth curve and production performance between the F_1 generation of Daozhou grey goose×lande goose and lande goose [J]. China Poultry, 2016, 38(19): 9-14.
- [17] 蒋亮, 何俊. 蝇蛆及其提取物在动物生产中的应用[J]. 家畜生态学报, 2020, 41(5): 71-77.
- JIANG L, HE J. Application of fly maggot and its extractions in animal production[J]. Journal of Domestic Animal Ecology, 2020, 41(5): 71-77.
- [18] 宋宇琨, 何俊. 4 种动物性蛋白饲料的营养特性及其在畜禽养殖中的应用[J]. 动物营养学报, 2019, 31(1): 109-118.
- SONG Y K, HE J. Nutritional characteristics of four animal protein feeds and their application in livestock and poultry breeding[J]. Journal of Animal Nutrition, 2019, 31(1): 109-118.
- [19] 许乐为, 刘洋. 农村基本环境卫生常识[M]. 南昌: 江西科学技术出版社, 2016.
- XU L W, LIU Y. Basic Rural Sanitation Common Sense[M]. Nanchang: Jiangxi Science and Technology Press, 2016.
- [20] 尹仁国. 菜粉蝶幼虫 S 型生长曲线及其拐点的初步研究[J]. 昆虫学报, 1989, 32(3): 380-381.
- YIN R G. A preliminary study on the S-shaped growth curve and its point of inflection of *Artogeia rapae* (L.) [J]. Acta Entomologica Sinica, 1989, 32(3): 380-381.
- [21] 刘钦来. 嗜尸性丽蝇分子标记的检测及发育规律的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- LIU Q L. Detection of molecular markers of sarcophagous calliphorid flies and study on the growth and development laws[D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [22] 殷京珍. 郑州地区尸食性蝇类生长发育规律及其产卵习性的研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2011.
- YIN J Z. The study on growing development low and spawning behavior of necrophagous flies in Zhengzhou[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2011.
- 责任编辑: 邹慧玲
英文编辑: 柳 正