

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-11

doi: 10.12465/issn.0253-4339.20251228001

粮仓通风管道几何结构优化的模拟与实测研究

李成文¹ 张忠斌¹ 史金龙¹ 戴亚东¹ 秦家泉² 戴前茜²

(1 南京师范大学 能源与机械工程学院 南京 210023; 2 江苏科技大学计算机科学与工程学院 镇江 212003;
3 江苏永昇空调有限公司 泰州 225400)

摘要 粮食存储是保障国家粮食安全的重要环节。传统粮仓通风管道设计较依赖经验设定,易出现仓内气流分布不均匀,粮体局部热湿点问题。本文对粮仓横向通风系统中进风口布局、管道直径以及开孔率等几何结构参数进行调整,并进一步对开孔率进行优化1与优化2处理,采用模拟与实测相结合的方式,结合评价指标对稻谷内部温湿度变化以及均匀性进行系统分析。研究表明:进风口位于主风道中间位置稻谷内部温差较低,存储效果较优;支风管道管径为600 mm、开孔率为35%时,稻谷内部平均温差较最高平均温差分别降低29.1%、14.3%;优化1与优化2平均温度分别比优化前降低0.136 K、0.078 K;平均相对湿度分别降低0.134%、0.164%,且优化1能够较好提升稻谷温湿分布均匀性。以上研究为通风管道几何结构设计提供理论指导,进一步提升温湿均匀性、降低风机能耗,提高粮食的高品质存储。

关键词 通风管道;CFD模拟;孔隙率;热湿性能

中图分类号: TU834.4;S379;TS210

文献标识码: A

Simulation and Experimental Study on the Geometric Optimization of Grain Silo Ventilation Ducts

Li Chengwen¹ Zhang Zhongbin¹ Shi Jinlong¹ Dai Yadong¹ Qin Jiaquan² Dai Qianxi²

(1. School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2. School of Computer Science and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China; 3. Jiangsu Yongsheng Air Conditioning Co., Ltd., Taizhou 225400, China)

Abstract Grain storage is a critical component of safeguarding national food security. The design of ventilation ducts in traditional granaries often relies heavily on empirical settings, which can easily lead to uneven airflow distribution within the silo and the formation of localized heat and moisture hotspots within the grain bulk. In this study, geometric structural parameters such as the air inlet layout, duct diameter, and perforation ratio in the lateral ventilation system of the granary were investigated, and the perforation ratio was subjected to two distinct optimization treatments, labeled Optimization 1 and Optimization 2. A systematic analysis of temperature and humidity variations and their uniformity within the paddy bulk was conducted by combining simulations and physical measurements guided by specific evaluation metrics. The results indicate that positioning the air inlet at the center of the main duct results in a lower temperature differential within the paddy bulk and superior storage efficacy. When the branch duct diameter was 600 mm with a perforation ratio of 35%, the average temperature differential within the paddy bulk was reduced by 29.1% and 14.3%, respectively, compared with the highest recorded average differentials. The average temperatures of Optimization 1 and Optimization 2 were reduced by 0.136 K and 0.078 K, respectively, compared with the pre-optimization values, and the average relative humidities were reduced by 0.134% and 0.164%, respectively, compared with the pre-optimization state. Optimization 1 demonstrated a more pronounced improvement in the uniformity of temperature and moisture distribution within the paddy. Collectively, these findings provide theoretical guidance for the geometric design of ventilation ducts, thereby enhancing temperature and humidity uniformity, reducing fan energy consumption, and promoting high-quality grain storage.

Keywords ventilation ducts; CFD simulation; porosity; thermal-hygroscopic performance

目前,全球粮食产量日益增加,有效的粮食储存是收获环节的重要组成部分,而粮食储存损失对全球粮食安全带来了严峻挑战,在储粮中,粮堆内的温

度和湿度是影响粮食安全储存期的2个至关重要的因素,温度和湿度的空间不均匀性可能会导致局部热点与水分凝结现象,从而降低粮食品质^[1-4]。

收稿日期:2025-12-28;修回日期:2026-01-24;录用日期:2026-02-02

为解决这一储粮难题,国内外研究者通常采用空调制冷降温与通风降温冷却方式来对粮食进行低温处理,是为粮食储存而开发的主要技术之一。该技术包括降低粮食温度,从约 25 °C 降至约 15 °C,降低了谷物的水分活动和呼吸速率,从而减少粮食通过呼吸过程带来的营养物质流失,同时延缓昆虫、害虫和微生物区系的发展。为评估温度对谷物储存影响的几项研究表明:温度是影响谷物物理化学性质的因素,会导致脂肪酸度升高、谷物颜色变化及硬度增加。对储存期为 2 年的大型平房仓中的小麦进行空调降温实验,结果表明,空调制冷降温能够有效保持小麦颗粒的内部结构,降低游离脂肪酸值,并维持不饱和脂肪酸成分的含量,延缓品质劣化^[5-9],通风降温冷却分为自然与机械通风。自然通风是依靠自然界的冷空气来对稻谷进行冷却降温,机械通风是依靠机械设备来对稻谷进行降温冷却,2 种通风方式均需结合相应的通风管道系统来进行处理^[10-15]。机械通风中的谷物冷却技术,即利用谷物冷却机对空气进行温湿度的处理,产生适宜的空气通入粮堆,对粮堆进行冷却降温的一项低温储粮技术,具有在任何气候和环境条件下实现控温储粮的特点,能满足各类仓型和粮食品种的要求^[16],为避免结露问题,谷物冷却机出风温度与稻谷温度之间的温差应控制在 3~5 °C^[17]。

针对通风系统,国内外普遍采用数值仿真技术与现场实验的方法对提出的通风系统性能与粮食储藏设施内气流进行研究,该方法可大幅缩短粮食储藏设施内气流组织的研究时间和费用^[18-20],赵娟等^[21]通过优化风道结构以减少冷藏厢内局部热点问题,且预冷时降温速率加快 0.006 °C/s。M. O. Binelo 等^[22-23]通过将模拟得到的数据与观测数据进行对比验证,获得了粮粒不同深度处压力的观测数据,并据此提出了一种优化的储粮通风入口风压方案;马国浩等^[24]研究入口铝管内径对冷却器换热性能的影响,对入口管径与传热功率进行合适的匹配。为解决储粮机械通风过程中通风不均匀问题。

陈思羽等^[25]建立了环流通风仓模型,应用 EDEM-Fluent 流固热耦合方法,对相同工况下,储粮仓 2 种风道结构在机械通风时的速度场、温度场进行仿真对比分析,结果表明,环流通风的速度均匀性指数为 0.92,纵向通风速度均匀性指数为 0.88,相同工况下环流通风气流在粮仓内分布更均匀。储粮通风管道的几何结构和布置是影响稻谷内部温湿度分布的重要因素。设计不佳的管道可能会导致整个谷物散装的温度分布不均匀,M. E. V. Araujo 等^[26]利用

计算流体力学与实验数据相验证的方法,分别评估了方形、环形、双杆和单杆形状的通风管道,研究发现,方形与环形形状的管道在稻谷内部的气流分布最佳,平均速度分别为 0.002 36、0.002 75 m/s。

D. Zare 等^[27]对通风管道创新性地进行了 E、F、H 型进口布置,实验研究表明,F 型风道表现出优良的通风性能。Zhang Wanqing 等^[28-29]提出一种插入穿孔板,研究了穿孔板不同的几何参数对流动均匀度和阻力性能的影响,以进一步提高气流组织流动的均匀性,并得出优化孔径比为 30%。综上所述,大多数学者高度关注粮仓通风气流宏观通风方式研究,缺少通风系统的介观几何结构参数与粮体孔隙率的耦合研究。本文旨在通过模拟结合实测验证的研究方法,探讨储粮横向通风中主风道进风口布局、支风管道直径、支风管道开孔率对稻谷内部温湿度的影响,并对通风支管道开孔率进行 2 种优化,研究其与稻谷孔隙率之间的适应性,以使稻谷内部温湿度场达到有效均匀分布。

1 粮仓实测与模拟

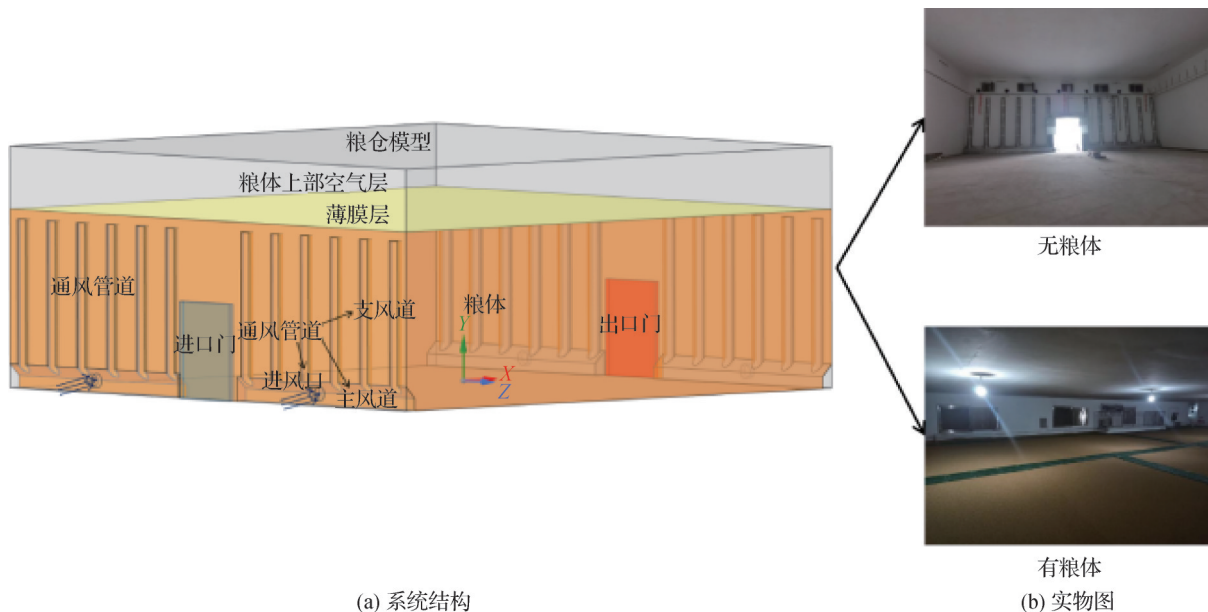
1.1 粮仓实测

本研究的实测地点为江苏省某散粮平房仓中的横向负压通风系统,具体由密闭粮堆、通风管道以及风机等部分组成。粮仓尺寸为 24 m×24 m×10 m,其中粮堆高度为 7 m,通风管路包括主风道、支风道、风道口和必要的连接设施。横向通风需要在仓房内墙两侧设置主风道和支风道,在两侧墙外设置通风口。主风道横截面采用直角梯形,高度为 800 mm,宽度为 600 mm,支风管道为半圆形,宽度为 500 mm,高度为 350 mm,全程开孔,为竖向长条孔,开孔长度为 15 mm,宽度为 1.7 mm,开孔率为 30%,进出风管所在平面在门的左右两侧各均匀排布 6 根高度为 6 m 的风管。为防止气流从粮面穿过导致通风短路,冷却通风时需对粮堆顶部覆盖塑料薄膜加以密闭处理。且出风侧使用的风机为负压风机,牵引气流穿过粮堆。

进行机械制冷通风时,通常采用分体式谷物冷却装置。将送风侧制冷机组、送风风机放于粮仓一侧,吸风风机置于粮仓另一侧,并分别连接对应的通风口。通过设定制冷机组的送风参数,可产生恒温恒湿的冷风,冷风经横向通风管道,在吸风风机协助下穿过覆膜粮堆,实现降温目的。在整个通风作业期间,粮堆内部始终保持负压状态。粮仓横向通风示意图如图 1 所示。粮仓内部为长方体,考虑到粮仓几何尺寸较大,且具有对称的特点,取粮仓的一半空间对温湿度测点进行布置,以保证测量的精度。测

点均匀地分布在粮仓内部,测点布置如图2所示。在z轴方向上,从上到下均匀布置5层测点,每层36个测点,共180个测点,且每层测点之间的距离为1.5 m,顶层与底层测点分别距粮面与地面0.5 m,在x轴方

向上,每相邻测点相距4 m,最左、最右侧测点分别距离左右两壁2 m,在y轴方向上,每相邻测点相距2 m,最前、最后侧测点分别距离前后两壁1 m。



(a) 系统结构

(b) 实物图

图1 粮仓横向通风系统

Fig.1 System of lateral ventilation in a grain bin

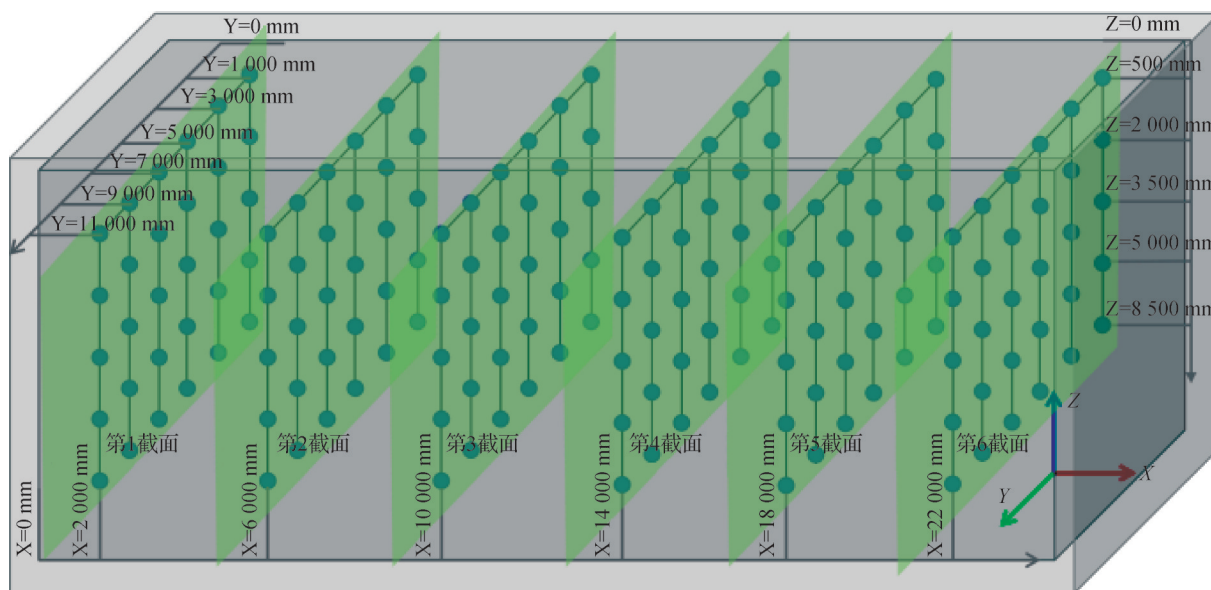


图2 粮仓内部测点布置

Fig.2 Layout of measuring points inside the grain bin

1.2 测量仪器说明

用于实测粮仓和实验粮仓模型温度的仪器为 Agilent 34972A 数据采集单元, 配备 K 型热电偶。湿度测量采用 VAISALA 温湿度变送器。测试时, 将测量设备置于待测粮堆一侧, 热电偶测点均匀分布。测量仪器的详细技术参数如表 1 所示。所选温湿度测量设备具有高精度、良好稳定性以及适应多种环

境的能力, 不仅能实时监测并记录粮堆内外的温湿度变化, 还具备基本的数据处理功能, 有助于分析稻谷温湿度分布的均匀性及其影响因素。稻谷温度数据采集周期设为 30 s, 采样周期过短易引入随机误差, 过长则可能因外部干扰导致数据偏离实际。在研究不同通风管道结构、运行工况和稻谷孔隙率对温度分布的影响时, 其余参数保持不变, 每个测点重

复测试10次,以减小实测误差。

表1 测试仪器具体参数

Tab.1 Specifications of the measuring instruments

名称	品牌	测量范围	精度
数据采集仪	Agilent/ 34972A	40~80 °C	分辨率:0.1%,误差:±5%
温湿度变送器	VAISALA/ HMT120	-40~80 °C 0~100% RH	±0.25 °C, ±3.0%RH(0~90% RH) ±4.0%RH(90%~100% RH)
红外成像仪	FLIR	-20~400 °C	红外分辨率:160×120

1.3 数值模拟

1.3.1 模型说明

为确保数值模拟结果和实测结果的可比性,本模型参照实测粮仓建立稻谷平房仓通风模型。根据实仓得出横向通风平房仓物理模型,尺寸为24 m×24 m×10 m,其中粮堆高度为7.4 m,横向通风空气从一面通风口进入,从另一面通风口排出,主风管主要负责将风分配到支风管中,通风管道为高6 m的半圆柱形风管,进出风管所在平面在门的左右两侧分别均匀排布6根风管。本模拟中将模型分为通风管道与稻谷2部分进行简化处理,即通风管道部分模拟出的出风温湿度参数作为粮仓稻谷部分的初始进口条件。在Spaceclaim里对模型进行处理后,将模型导入Fluent Meshing中,采用水密工作流对其进行网格划分,填充体网格类型为Poly-Hexcore,结合了多面体(polyhedral)和六面体(hexahedral)网格的优势,在保证网格计算精度的同时提高网格计算效率。网格尺寸控制方式采用Global方法,以确保计算域内网格的均匀性和质量,且稻谷散装平房仓横向通风网格划分时风管、粮面处做加密处理。本研究在模拟过程中发现网格数量从78.5万到105.3万时,模拟结果得到的温度及风速分布随着网格数量的增加不再出现明显变化,能满足计算精度要求。

粮仓计算域划分为上部空气区、下部稻谷粮堆多孔介质区2个流体域,以下为设置的初始条件及边界条件。

1)通用设置。

本研究模拟采用湍流模型,求解器类型采用压力基,速度格式采用绝对,重力加速度在z轴方向上取-9.81 m/s²。

2)通风管道边界条件。

通风管道入口边界条件设置为质量入口。入口空气温度为14 °C,质量流量为9 m³/(h·t),取通风管道内空气相对湿度为75%,出口边界设置为压力出

口,表压值为0 Pa。其中,空气相对湿度为75%的设置方法操作步骤如下:在Fluent中打开组分-组分传递,选择应用,并编辑mixture-template,选定组分空气(air)和水分(H₂O),在入口边界条件中,打开物质选项,填入温度为14 °C,相对湿度为75%下水分(H₂O)为0.0078,即设置完毕。

3)无稻谷负载边界条件。

假设粮仓所有壁面为热壁面,温度设定为25 °C,取仓内空气相对湿度为75%,粮仓内部空气相对湿度的设置方法同上。

4)稻谷多孔介质域参数设置。

在进行有稻谷负载部分的模拟中,稻谷的密度为623 kg/m³,设置稻谷材料为均匀多孔介质,孔隙率为0.5。

5)求解设置。

连续性方程与动量方程的收敛残差设为1×10⁻³,能量方程的收敛残差设为1×10⁻⁶,采用SIMPLE算法。

6)初始化设置。Fluent默认的初始化设置是针对整个计算域给出初始值,本文模拟稻谷入仓后的通风降温情况,稻谷粮堆的初始入仓温度通常较高,因此采用PATCH方法对稻谷区域的温度进行修改,粮堆区域设置初始温度为25 °C。

1.3.2 守恒方程

1)质量守恒方程(连续性方程)。

质量守恒定律在流体力学中的表述形式是连续性方程。用数学模型来描述流体运动,根据质量守恒定律得出如下式的连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

式中: v 为速度矢量,m/s; ρ 为空气密度,kg/m³; t 为时间,s。

2)动量守恒方程。

动量守恒定律是流体运动的根本准则,其守恒方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_j + F_i \quad (2)$$

式中: p 为静压,Pa; τ_{ij} 为应力张量,Pa; g_j 为 j 方向上的重力体积力,N/m³; F_i 为 i 方向上的外部体积力,N/m³; u_i, u_j 分别为 i, j 方向速度分量,m/s。

应力张量如下:

$$\tau_{ij} = \mu \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \right] \quad (3)$$

式中: μ 为流体动力黏度,Pa·s; δ_{ij} 为Kronecker delta符号,数学和物理学中常用的二阶单位张量的分量

表示,无量纲参数。

3)能量守恒方程。

能量守恒定律是描述伴随热交换的流动系统必须遵循的基本物理规律。其核心表述为:对于流体中的任一微元体,其总能量随时间的变化率,等于单位时间内由导热、辐射及热对流通过微元表面净传入的热量。以温度 T 为变量的能量守恒方程如下:

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

式中: c_p 为比定压热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; T 为温度, K ; k 为流体的传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$; S_i 为黏性耗散项。

1.3.3 多孔介质理论

黏性阻力项考虑了黏性流体通过多孔介质的压力损失,与表面速度成正比。该术语表明,粒径越大,阻力越小,而孔隙率越高,黏性阻力越小。惯性项是通过多孔介质的空气密度的函数,与通过晶粒中孔隙的曲折路径过程中的惯性损失有关。它与表面速度的平方成正比,且对颗粒大小和孔隙率的依赖性较小。J. Lawrence等^[30]发现,黏性和惯性分量需要分别乘以3.0和1.7,以匹配储存稻谷中的压力损失,粮堆的多孔结构可用孔隙率(ε)来表征,其定义为粮堆内部空气体积(即孔隙体积)与总体积之比:

$$\varepsilon = \frac{V_v}{V_t} = 1 - \frac{V_s}{V_t} \quad (5)$$

式中: V_v 为粮堆内部的孔隙体积(空气部分), m^3 ; V_s 为固体颗粒(粮食)的总体积, m^3 ; V_t 为稻谷的总体积, m^3 。

为方便模拟求解计算,在本文中,分别将通风管道表面带有开孔的部分与含有孔隙的稻谷均作为多孔介质。虽同为多孔介质,但两者在本质上有区别,如图3所示,一方面,通风管道表面的多孔介质作为几何开孔率,其尺度为毫米~厘米级,并非真实的多孔介质,而是离散孔口集合,其流态特性为湍流主导,存在突扩或突缩边界的边界效应;另一方面,稻谷多孔介质尺度为微米~毫米级,为体积孔隙率,粮粒间的孔隙不规则且形态比较复杂,较为符合真实多孔介质特性,孔隙率的数值由粮种与堆积方式决定,其流态特性为层流主导,存在连续多孔界面的边界效应,适用于达西定律。

1.3.4 模拟与实测验证

为验证该横向通风降温数值模拟的准确性,在通风管道的几何结构均保持一致的情况下,对稻谷温度为 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 、含水率为14.5%的粮堆,通入温度为 $14\text{ }^\circ\text{C}$ 、相对湿度为75%、单位通风量为 $9\text{ m}^3/\text{h}$ 的空气,

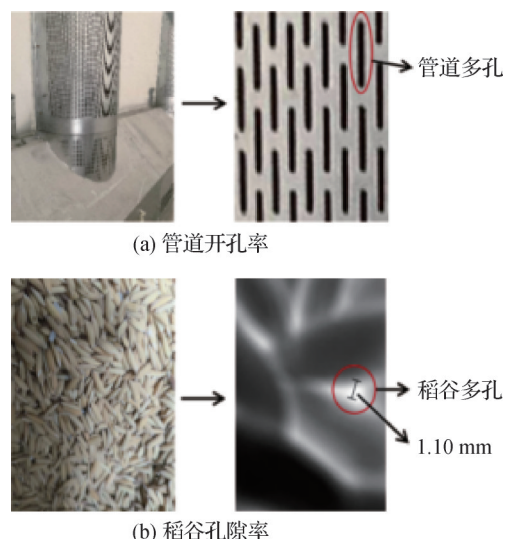


图3 通风管道与稻谷两种多孔介质

Fig.3 The two porous media: ventilation duct and grain bulk

将降温后的数值模拟结果和粮仓实测结果进行对比。结果验证对比中随机采用粮堆内部第3截面(如图2所示)测温电缆所在面上的30个测点的温度与相对湿度数据进行分析。稻谷模拟值与实测值对比如图4所示,横向通风的模拟温度大多比实测温度略高,模拟相对湿度大多比实测相对湿度略低,且整体变化趋势较为一致(模拟与实测趋势一致的判据为模拟与实测测点数据逐点计算,统计整体一致率,若一致率 $\geq 85\%$ 即可认定仓内整体温湿度模拟变化趋势与实测相符。在本次模拟与实测的验证中,模拟平均温度存在13、19、28等3个测点的趋势较为不同,相对湿度存在20、22等2个测点的趋势不同,但其整体一致率均大于85%,即可认为本次模拟与实测的数据整体较为一致),实测温度值与模拟温度值的最大温差为 $2.6\text{ }^\circ\text{C}$,相对误差均在0.35%~1.18%,平均相对误差为0.75%;横向通风的模拟相对湿度一般低于实测相对湿度,其差值约为1.8%,相对误差位于1.12%~3.07%,平均相对误差为1.86%;横向通风的模拟温度大多比实测温度略高,这可能是由于模型边界条件进行简化(如忽略局部热源或粮堆内部非均匀性)导致温度场预测偏高,而模拟相对湿度大多比实测相对湿度略低,这可能是由于数值模型忽略粮堆水分迁移的滞后效应,导致预测的相对湿度低于实测值。模拟结果与实测结果存在误差,经过计算,其误差值均在可接受范围内,因此认为本研究所得出的相关模拟数据具备可行性,以下不再重复给出模型验证结果。

1.4 不确定度与均匀性分析

任何测量仪器都不能提供绝对准确的值,因此,

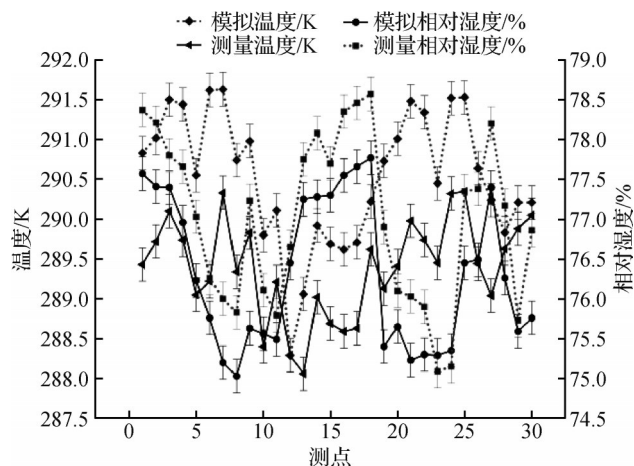


图4 稻谷模拟值与实测值对比

Fig.4 Comparison between simulated and measured values for the grain

本文用不确定度来评价测量数据的准确性,从而表征测量数据与真实值之间的偏差。不确定度可分为2类:按统计分布估计的A类不确定度与按非统计分布估计的B类不确定度,前者采用贝塞尔公式计算,后者通常简化为仪器误差,可采用非统计方法计算,计算如下:

$$\Delta A = \frac{t_p(m-1)}{\sqrt{n}} S_x \quad (6)$$

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (7)$$

式中: n 为测点数; $t_p(m-1)$ 为 m 次测试对应的 t 分布; S_x 为贝塞尔公式计算的标准差; ΔA 为A类不确定度。

$$\Delta B = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (8)$$

式中: a 为测量的可能值区间的半宽; ΔB 是B类不确定度。

$$\Delta X = \sqrt{\Delta A^2 + \Delta B^2} \quad (9)$$

式中: ΔX 为合成标准不确定度,即不确定度的最终结果。在不确定度的分析中,若单独使用A类不确定度,可能遗漏未在重复测量中显现的系统误差,会低估真实不确定性;若单独使用B类不确定度,则会忽略实际测量中的随机波动,可能高估或低估随机波动的影响。而合成不确定度同时包含随机影响(A类)和系统影响(B类),更全面地表征测量结果的不可靠程度,因此,本文使用合成不确定度,根据实测数据计算每个截面温度的不确定度。在实测过程中,共采集180个测量点。截面不确定度最高为0.0682,即测量值均在误差范围内。

本文采用温度、湿度变异系数评价指标来对稻

谷内部的温湿度场均匀性进行描述,如式(10)所示。变异系数是衡量数据相对离散程度的标准化指标,核心含义是数据的标准差与均值的比值,反映数据围绕均值波动的相对幅度。变异系数越小说明粮堆各监测点的温湿度值越接近整体均值,即粮体温湿度分布越均匀根据标准GB/T 40150—2021《粮油储藏 储粮机械通风均匀性评价方法》^[31]可知,粮体温度变异系数小于15%,可认为达到通风均匀性要求

$$C_v = \frac{S}{\bar{x}} \times 100\% \quad (10)$$

式中: S 为标准差,反映数据的绝对离散程度; \bar{x} 表示算术平均值,反映数据的集中趋势。

2 结果与讨论

2.1 进风口布局对仓内气流组织热湿分布的影响

在不同主风道进风口(表2)的粮仓内部的不同距离 x 截面(图2)处进行温度测量。各截面的平均温度如图5所示。由测量结果可知,在 x 方向上各截面处,进风口布局1~5的平均温度在289.09~290.42 K波动。截面 $x=2000$ mm距离进风口较近,温度较低,但受风道气流温度影响较为显著,这可能导致稻谷出现局部湿点问题。在进风口布局1~5中,随着进风口距离的增加,各截面平均温度呈先降低再升高的趋势,在布局3中的仓内截面平均温度最低值为289.09 K,比同截面平均温度最高的布局1和5低约1.33 K。而布局1、5位于最右端,距离风道中部较远,空气气流在风道内分布不均匀,与布局3相比未能很好地冷却到稻谷整体,稻谷存在局部高温,导致布局1下稻谷整体温度偏高。另一方面,图5所示5种进风口布局的各截面平均温差分别为0.38、0.30、0.25、0.33、0.37 K,其中,布局3不同截面的平均温度差较小为0.25 K,布局1与5截面平均温差较高,为0.38 K,两者相差0.13 K,说明布局3对应的稻谷温度梯度较小,稻谷整体温度分布较均匀,能够较为有效地缓解稻谷内部局部热点的问题,为稻谷的安全存储提供了有利环境。

2.2 通风管道直径尺寸对仓内气流组织热湿分布的影响

不同通风管道直径(图6)可能导致气流组织不同的涡流和湍动现象。4种通风管道直径平均温度和温差分布如图7所示,由图7可知,仓内各横截面的平均温度随深度的增加而增加,且与其他直径相比,当通风管道直径为600 mm时粮仓内部各截面平

表2 不同进风口布局
Tab.2 Different inlet layouts

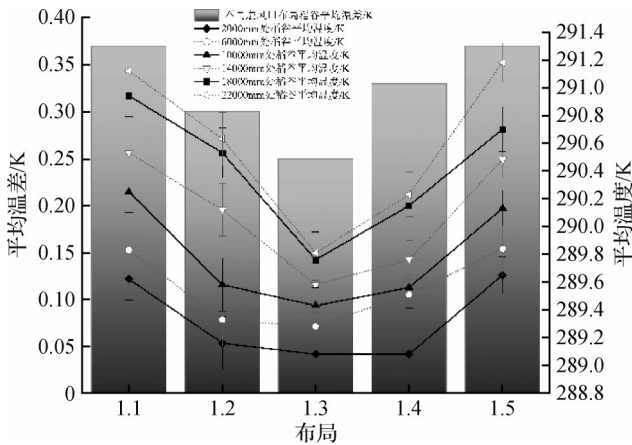
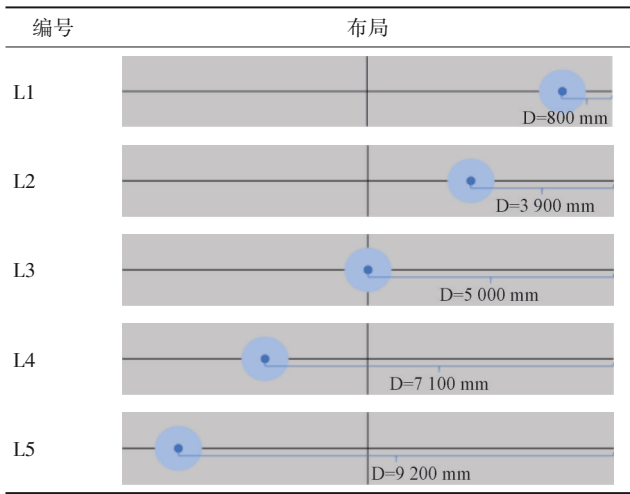


图5 5种进风口布局各截面平均温度和温差

Fig.5 The average temperature and temperature difference at each cross-section for the five inlet layouts

均温度最低,为 289.01 K。管道直径为 650 mm 时粮仓内部各截面的平均温度最高,为 290.28 K,这表明,对于此种体积下的粮仓,相比于其他 3 种直径的管道,直径为 600 mm 的通风管道能够为粮食的存储提供安全温度。由图 7 还可知,直径为 600 mm 的通风管道截面间的平均温差比直径为 650 mm 时小,为 0.302 K,两者相差 29.1%,表明该直径条件下气流分布更为均匀。

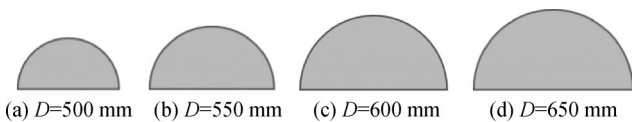


图6 不同通风管道直径

Fig.6 Different ventilation duct diameters

2.3 通风管道开孔率对仓内气流组织热湿分布的影响

在保持稻谷孔隙率不变的情况下,对通风管道

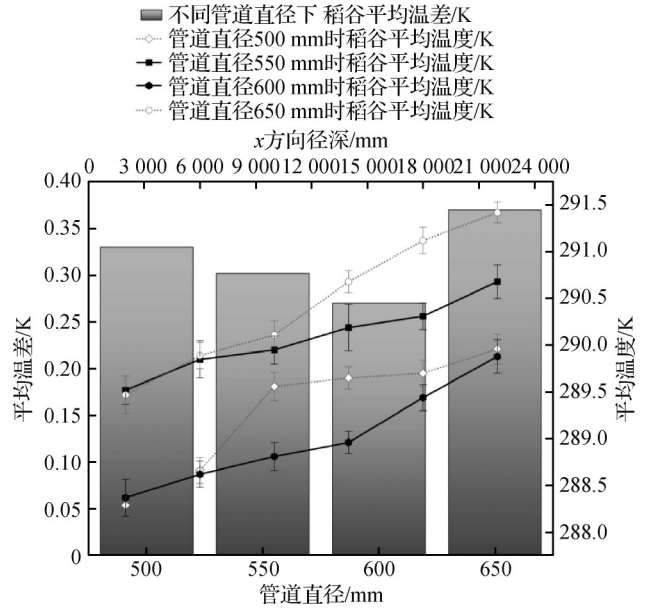


图7 4种通风管道直径平均温度和温差分布

Fig.7 Distribution of average temperature and temperature difference for four ventilation duct diameters

开孔率(图8)进行优化。图9所示为4种通风管道开孔率平均温度分布与各截面之间平均温差,由图9可知,管道开孔率由30%增至45%时,粮仓内部气流温度呈现“先降低后升高”的非单调变化,原因在于当通风支风道的开孔率从30%适度增至约35%时,开孔较为密集,改善了气流分布的均匀性,使冷空气较为广泛接触谷堆,提升稻谷整体热交换效率,致使仓内气流温度降低;开孔率继续增至45%时,较多冷空气易于从靠近风机的近端开孔直接逸出,形成气流“短路”现象,无法维持足够的静压驱动气流穿透至粮堆深层,致使冷空气与深层高温稻谷的热交换不足,单位风量的冷却效率下降,导致仓内温度一定程度上呈现升高趋势。且仓内各横截面面积的平均温度随深度的增加而增加,其中,在管道开孔率为30%和35%时,粮仓内部的气流温度较为接近,分别为288.89、288.68 K,管道开孔率为35%时,仓内温度最低,当开孔率为45%时,粮仓内部的气流温度较高,为289.8 K,上述结果表明,35%开孔率的通风管道能够为此类体积粮仓下粮食的安全存储提供合适的低温。

平均温差通常被认为是反映粮仓内部稻谷温度均匀性的参数。温差越小,表明稻谷内部的温度梯度越小,温度均匀性越好^[32],不同截面之间的平均温差如图9所示,可知,不同截面之间的温差波动较大,其中,开孔率为35%各截面平均温差较低为0.18 K,比开孔率为45%时稻谷截面较高平均温差0.21 K降低14.3%。另一方面,由图9可知,随着横截面深度

的增加,温度梯度上升,说明截面间的温差较大,其中, $x=18\ 000\ \text{mm}$ 和 $x=22\ 000\ \text{mm}$ 处的平均温差要远大于其他截面。这可能是由于粮仓较大且未装载稻谷,通风空气在粮仓内部贯穿运动,但在重力作用下,气流运动的动量衰减较大,从而导致距离通风口较远的粮仓部分温差较大,温度较高。

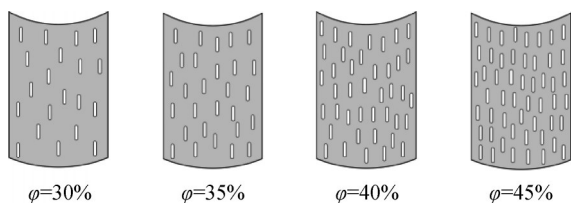


图8 4种通风管道开孔率

Fig.8 Porosity of the four ventilation ducts

- 2 000-6 000 mm稻谷平均温差/K
- 6 000-10 000 mm稻谷平均温差/K
- 10 000-14 000 mm稻谷平均温差/K
- 14 000-18 000 mm稻谷平均温差/K
- 18 000-22 000 mm稻谷平均温差/K
- 开孔率0.30时稻谷平均温度/K
- 开孔率0.35时稻谷平均温度/K
- ▲ 开孔率0.40时稻谷平均温度/K
- ◇ 开孔率0.45时稻谷平均温度/K

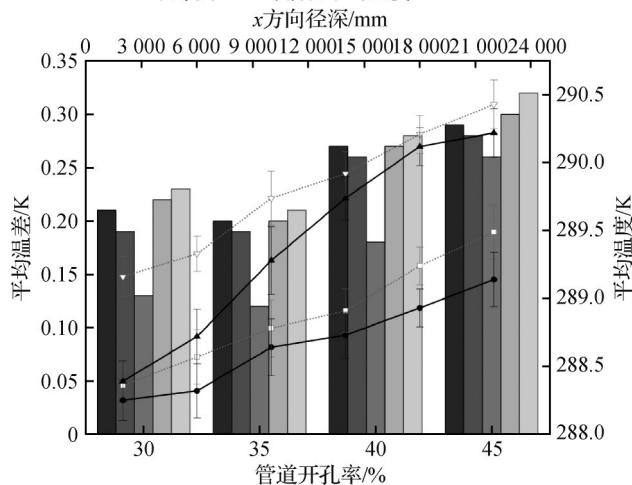


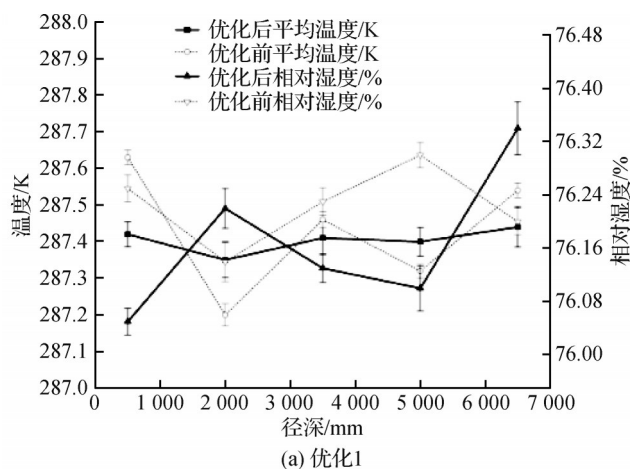
图9 4种通风管道开孔率平均温度分布与各截面之间平均温差

Fig.9 Average temperature distribution and average temperature difference between cross-sections for ventilation ducts with four different porosity levels

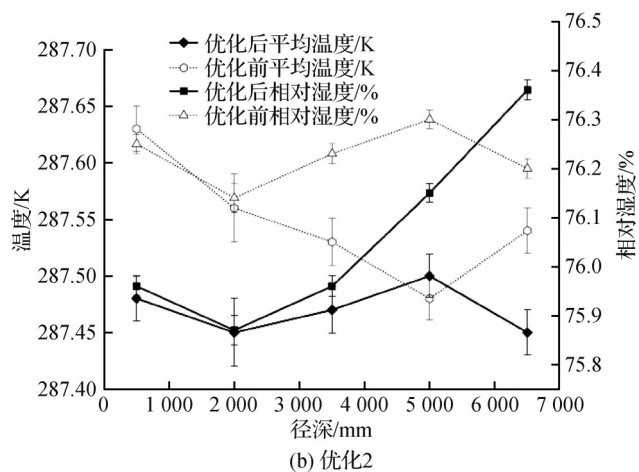
2.4 稻谷孔隙率与通风管道结构组合配置

针对通风管道开孔率,在稻谷孔隙率由顶部55%到底部40%均匀变化下,本文进行2种优化调整,优化1为通风管道开孔率从下向上依次为30%、35%、40%、45%,优化2为通风管道开孔率从下向上依次为45%、40%、35%、30%,数值模拟结果如图10所示,优化后的平均温度与相对湿度均比优化前降低,在优化1中,如图10(a)所示,平均温度与相对湿度分别比优化前低0.136 K、0.134%,在优化2中,如图10(b)

所示,平均温度与相对湿度分别比优化前低0.078 K、0.164%,经过分析可得,优化1的降温冷却效果比优化2更好,且优化1的保湿效果也比优化2更好。首先,优化后降温效果优于优化前,优化1降温效果好的原因是,在保持底部通风管道开孔率不变的情况下,上部开孔率逐渐增加,此时存在更多的冷却空气流入较为松散的稻谷内部,所以相比于优化前,优化后的温度较低;优化2降温效果好的原因是,在保证顶部通风管道开孔率不变的情况下,中层到顶部的开孔率逐渐增大,在底部较大开孔率作用下,较多的冷却空气气流进入较为紧密的稻谷内部,很大程度上使底部紧密的稻谷进一步的降温,而中部较大孔隙率也使较多冷空气流入相比底部较为松散的稻谷内部,从而使优化后的稻谷温度低于优化前。且由图11可知,通风管道开孔率优化后的稻谷温湿度均匀性均表现较好,与优化前相比,优化1稻谷温度变异系数降低8.8%,湿度变异系数降低9.6%,优化2稻谷温度变异系数降低1.5%,湿度变异系数降低4.1%。且优化1的热湿均匀性优于优化2,其变异系



(a) 优化1



(b) 优化2

图10 通风管道开孔率优化前后对比

Fig.10 Comparison of ventilation duct porosity before and after optimization

数分别比优化2低7.5%和4.3%,整体而言,优化1的热湿均匀性更好。

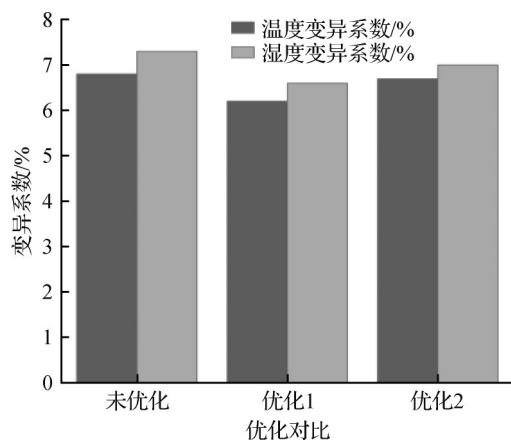


图 11 稻谷温度、湿度变异系数

Fig.11 Temperature and humidity variation coefficients in the grain bulk

3 结论

本文通过单因素优化实验,利用数值模拟与实测研究了主风道进风口布局、支风管道直径、支风管道开孔率对稻谷内部热性能的影响及机理。同时,进一步探究了2种支风管道变开孔率优化与变稻谷孔隙率之间的适应性,得到结论如下:

1)对于体积为24 m×24 m×10 m的稻谷粮仓,将主风道进风口布置在主风道中间的位置,横向支风管道直径采用600 mm、开孔率采用35%,将有助于提高稻谷内部温度分布的均匀性。

2)对5种通风布局不同深度的平均温度进行对比,发现优化进风口位置可以改善仓内温度分布。布局3不同截面的平均温差较小为0.25 K,比最高温差低约0.13 K,表明布局3的温度分布更为均匀,该布局适用于大容量粮仓内部稻谷储存。

3)为进一步提高仓内稻谷温度均匀性,在优化主进风口布局的基础上进行修改,包括修改支风管道直径与开孔率。结果表明,当支风管道管径为600 mm时,平均温差较其他直径降低了29.1%;35%开孔率下的平均温差比45%开孔率下的较高平均温差低14.3%。两者均提高了稻谷内部的温度均匀性,减少了局部热点。

4)支风管道变开孔率与稻谷变孔隙率之间的适应性。针对稻谷内部孔隙率不均匀的情况,对横向支风道开孔率分别进行优化1(开孔率从下向上依次为30%、35%、40%、45%)与优化2(开孔率从下向上依次为45%、40%、35%、30%),发现与优化前(通风管

道开孔率为35%)相比,优化1和优化2的平均温度分别降低0.136、0.078 K,相对湿度分别降低0.134%、0.164%。

参考文献

- [1] Das S, Barve A, Sahu N C, et al. Analysing the challenges to sustainable food grain storage management: a path to food security in emerging nations [J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2023, 58(10): 5501–5509.
- [2] Gong Maogang, Zhong Yanan, Elahi E, et al. Evolutionary game mechanisms for food savings and loss reduction in the grain industry [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2025, 105(12): 6583–6602.
- [3] Mu Zhenya, Wang Jin, Zhang Yan, et al. Effect of temperature gradient of grain storage on migration and distribution of three pests [J]. *Journal of Biomedical Research & Environmental Sciences*, 2021, 2(7): 632–640.
- [4] Qiu Zhuzhu, Wu Fenghua, Hu Hao, et al. Deciphering the microbiological mechanisms underlying the impact of different storage conditions on rice grain quality [J]. *Foods*, 2024, 13(2): 266.
- [5] Ziegler V, Vanier N L, Ferreira C D, et al. Changes in the bioactive compounds content of soybean as a function of grain moisture content and temperature during long-term storage [J]. *Journal of Food Science*, 2016, 81(3): H762–H768.
- [6] Paraginski R T, Vanier N L, De Jesus Berrios J, et al. Physicochemical and pasting properties of maize as affected by storage temperature [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2014, 59: 209–214.
- [7] Demito A, Ziegler V, Goebel J T S, et al. Effects of refrigeration on biochemical, digestibility, and technological parameters of carioca beans during storage [J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2019, 43(7): e12900.
- [8] Ferreira C D, Ziegler V, Da Silva Lindemann I, et al. Quality of black beans as a function of long-term storage and moldy development: Chemical and functional properties of flour and isolated protein [J]. *Food Chemistry*, 2018, 246: 473–480.
- [9] Wang Mengya, Zhao Minghui, Zhuang Xuhui, et al. Changes in intergranular air properties and fatty acid profile of wheat bulk in a large warehouse with air-conditioned oversummering [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2025, 111: 102520.
- [10] Chen Long. Decision-Making strategies in grain storage in China: From traditional methods to modern analysis [J]. *Drying Technology*, 2025, 43(10): 1495–1506.
- [11] Chen Xi, Li Yaning, Jiang Shuai, et al. Experimental

- comparison of ventilation strategies for condensation risk in underground wheat granaries [J]. *Buildings*, 2025, 15 (19): 3483.
- [12] Kechkin I, Ermolaev V, Ivanov M, et al. Ventilation of grain in metal silos of large capacity in the South of Russia [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 659(1): 012135.
- [13] Myhan R, Jachimczyk E, Szturo K. A model of grain aeration in a grain silo [J]. *Food and Bioprocess Processing*, 2025, 153: 161-172.
- [14] Panigrahi S S, Singh C B, Fielke J. CFD modelling of physical velocity and anisotropic resistance components in a peaked stored grain with aeration ducting systems [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020, 179: 105820.
- [15] Zhu Yuhua, Li Hang, Zhen Tong, et al. Integrating self-attention mechanisms and ResNet for grain storage ventilation decision making: a study [J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(13): 7655.
- [16] 郑焱诚, 屈登辉, 朱延光, 等. 谷物冷却机降温通风粮温变化规律实验研究 [J]. *中国粮油学报*, 2024, 39(1): 33-38. (Zheng Yancheng, Qu Denghui, Zhu Yanguang, et al. Experimental study on laws of grain temperature variation in cooling ventilation of grain cooler [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2024, 39 (1): 33-38.)
- [17] GB/T 29374—2022 粮油储藏 谷物冷却机应用技术规程 [S]. (GB/T 29374—2022 Grain and oils storage—Code of practice for applicative technology of grain chiller [S].)
- [18] Echaroj S, Pannucharoenwong N, Vengsungnle P, et al. Effect of geometric design on airflow simulation inside the storage room for paddy [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 501(1): 012040.
- [19] Jin Libing, Li Chuang, Duan Haijing, et al. On-site test and numerical analysis on temperature field of an underground grain silo under static storage [J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2023, 46(4): e14306.
- [20] Schüller A S, Arghira N, Făgărășan I, et al. Grain moisture modeling and control framework for in-silo storage [J]. *Results in Engineering*, 2025, 28: 107471.
- [21] 赵娟, 张忠斌, 陈萌, 等. 疫苗冷藏车热性能影响因素实测研究 [J]. *制冷学报*, 2023, 44(2): 127-136. (Zhao Juan, Zhang Zhongbin, Chen Meng, et al. Experimental study on the factors influencing the thermal performance of vaccine refrigeration vehicles [J]. *Journal of Refrigeration*, 2023, 44(2): 127-136.)
- [22] Binelo M O, Faoro V, Kathatourian O A, et al. Airflow simulation and inlet pressure profile optimization of a grain storage Bin aeration system [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 164: 104923.
- [23] Khatchatourian O A, Binelo M O, Faoro V, et al. Three-dimensional simulation and performance evaluation of air distribution in horizontal storage bins [J]. *Biosystems Engineering*, 2016, 142: 42-52.
- [24] 马国浩, 卢曦, 郭佳琳, 等. 入口铝管内径对电池冷却器换热性能的影响 [J/OL]. *制冷学报*, 1-8 [2025-12-22]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2182.TB.20250225.1050.002>. (Ma Guohao, Lu Xi, Guo Jialin, et al. Study on the Effect of the Inlet Aluminum Tube Inner Diameter on the Heat Transfer Performance of the Chiller [J/OL]. *Journal of Refrigeration*, 1-8 [2025-12-22]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2182.TB.20250225.1050.002>.)
- [25] 陈思羽, 王贞旭, 吴文福, 等. 基于 EDEM-Fluent 的玉米储藏立筒仓环流通风与纵向通风仿真分析 [J]. *农业工程学报*, 2024, 40(6): 40-49. (Chen Siyu, Wang Zhenxu, Wu Wenfu, et al. Simulating the circulation and longitudinal ventilation of corn storage silos using EDEM-Fluent [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40(6): 40-49.)
- [26] Araujo M E V, Barbosa E G, Martins M A, et al. CFD analysis of different aeration ducts on temperature and airflow in stored maize [J]. *Journal of Agricultural Science*, 2019, 11(2): 301.
- [27] Zare D, Razavizadeh N, Maleki-Majd K. New inlet duct arrangements for grain aeration in a small-scale silo: Computational simulation and experimental validation [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2025, 111: 102511.
- [28] Zhang Wanqing, Gao Xin, Li Angui. Effects of multi-orifice plate with different geometric parameters on flow distribution of plenum chamber for ventilation duct systems [J]. *E3S Web of Conferences*, 2022, 356: 02044.
- [29] Zhang Wanqing, Li Angui, Gao Ran, et al. Visualization experiment and flow homogenization optimization of the multi-path plenum chamber system using a perforated plate [J]. *Building and Environment*, 2023, 233: 110081.
- [30] Lawrence J, Maier D E. Three-dimensional airflow distribution in a maize silo with peaked, levelled and cored grain mass configurations [J]. *Biosystems engineering*, 2011, 110(3): 321-329.
- [31] GB/T 40150—2021 粮油储藏 储粮机械通风均匀性评价方法 [S]. (GB/T 40150—2021 Grain and oil storage—evaluation of uniformity of grain mechanical ventilation [S].)
- [32] 金立兵, 朱豆豆, 李闯, 等. 半地下双层浅圆仓静态储粮温度场的数值分析 [J]. *粮油食品科技*, 2024, 32(1): 153-160. (Jin Libing, Zhu Doudou, Li Chuang, et al. Numerical analysis of temperature field of static grain storage in semi-underground double-storey squat silos [J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*,

2024, 32(1): 153-160.)

通信作者简介

张忠斌,男,教授,南京师范大学能源与机械工程学院, 13515112510, E-mail: zhangzhongbin@163.com。研究方向:粮食储运热安全和热管理;制冷剂回收再利用及低GWP制冷剂高效应用;天然气、氢气等水合物及输运。

About the corresponding author

Zhang Zhongbin, male, professor, School of Energy and

Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, 86-13515112510, E-mail: zhangzhongbin@163.com. Research fields: thermal safety and thermal management in grain storage and transportation, recovery and recycling of refrigerants and high-efficiency application of low-GWP alternatives, hydrates and transport of natural gas, hydrogen, etc.

(责任编辑:王亚薇)