

玉米粮堆通风干燥过程中热湿传递模拟及试验

吴帅强¹, 任广跃¹, 张永立^{2,3}, 朱广飞^{2,3*}, 白岩松⁴, 师建芳^{2,3},
谢奇珍^{2,3}, 邵广^{2,3}, 段续^{1*}

(1. 河南科技大学食品与生物工程学院, 洛阳 471023; 2. 农业农村部规划设计研究院, 北京 100125; 3. 农业农村部农产品产地初加工重点实验室, 北京 100121; 4. 辽宁工业大学机械工程与自动化学院, 锦州 121001)

摘要: 为了准确预测玉米粮堆通风干燥过程中的热湿分布变化, 明确适宜的通风条件。该研究基于干储一体仓, 运用局域热非平衡理论, 考虑玉米呼吸热, 建立玉米粮堆通风干燥热湿传递模型, 探究不同因素对通风干燥过程的影响, 并进行通风干燥试验, 分析玉米含水率、温度以及粮堆空气的温湿度分布变化情况。结果表明: 建立的热湿传递模型可有效模拟仓内玉米粮堆通风干燥的过程, 玉米监测点的温度、含水率模拟值与试验值的相对误差分别为 1.4%~12.1%、0.3%~14.5%, 平均值分别为 4.8%、6.5%; 通风前期玉米粮情存在一定的不均匀性, 内层玉米的升温速率与干燥速率快于外层。随着通风过程的持续, 上述不均匀性逐渐降低。综合考虑不同条件下玉米温度和含水率的变化, 适宜的通风条件为空气相对湿度低于 75%、通风风速为 0.09~0.23 m/s, 风温随大气条件而定。玉米通风干燥中试试验的单位能耗为 890.2 kJ/kg, 节能效果显著。研究结果可为玉米通风干燥技术和操作工艺的优化提供理论支持。

关键词: 玉米; 热湿传递; 模拟; 含水率; 通风干燥

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202402062

中图分类号: S229+3; TQ018

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-12-0264-12

吴帅强, 任广跃, 张永立, 等. 玉米粮堆通风干燥过程中热湿传递模拟及试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(12): 264-275. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202402062 <http://www.tcsae.org>

WU Shuaiqiang, REN Guangyue, ZHANG Yongli, et al. Simulation and experiment of heat and moisture transfer during ventilated drying process in maize grain pile[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(12): 264-275. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202402062 <http://www.tcsae.org>

0 引言

玉米是中国种植面积最大的粮食作物, 2022 年全年产量 2.77 亿 t^[1]。然而, 玉米收获时含水率普遍较高, 一般为 25%~30%, 需要及时干燥处理, 防止霉变发生。但与此同时, 中国粮食产后损失巨大, 仅在储藏、运输和加工环节, 每年损失量约 3 500 万 t^[2]。究其原因, 农村储粮(占当年粮食产量 50% 左右)的损失仍然较大, 因烘储设施简陋等原因导致的损失每年高达 2 000 万 t^[3-4]。近年来, 中国农民专业合作社等新型规模化经营组织蓬勃发展, 提高了粮食收储的集约化、规模化水平, 但由于其先天禀赋不足, 加之资源要素缺乏、现有设备性价比不高, 致使合作社粮食产后烘储技术与装备水平未得到显著提高^[5]。根据实地调研, 通风干燥储藏因其绿色、节能、低成本等特点, 在粮食产地得到越来越多的关注,

然而目前普遍存在设备制造简陋、操作工艺粗糙、温湿度等粮情监测调控措施缺乏等问题。优化通风仓结构及对粮堆内的温湿度分布进行监测或预测, 通过适宜的通风工艺确保高含水率粮食高效、安全干燥储藏, 是解决上述问题的必要措施。翟晓娜等^[6]研究不同储存条件下高含水率玉米品质变化, 表明低温或高温低湿的储藏条件对延缓玉米的霉变效果显著。郑祥贵等^[7]研发出筒式通风干燥仓, 将仓外干燥的空气与仓内由粮食散发的潮湿空气进行互换, 降低粮食水分, 然而其通风均匀性差, 且出料机械化程度较低。田琳等^[8]应用旋转通风干燥仓对高含水率玉米进行干燥, 该工艺干燥效果相对均匀, 但该设备在较大仓储量的适应性上有待提高。朱广飞等^[9]研发了一种中心通风式的粮食干储一体仓, 通过结构优化提高了通风流场均匀性, 但未对通风过程中粮堆温湿度变化规律进行探究。

由于粮食收获的季节性及通风干燥储藏试验周期长, 开展大量有效的试验研究比较困难, 而数值模拟因其高效率、低成本的特点则为其提供了可行的途径。张淑媛等^[10]通过对地下粮食筒仓中高含水率玉米冷通风过程进行测定, 并应用数值模拟软件 COMSOL 进行数值分析, 结果表明地下仓内高含水率玉米存在较大结露风险, 需要持续通自然风以保障储藏品质。IGUAZ 等^[11]建立了一个基于动态热量平衡的数学模型, 模拟分析稻谷强制

收稿日期: 2024-02-21 修订日期: 2024-04-02

基金项目: 农业农村部规划设计研究院农规创新科研项目(QD202108, SP202105); 河南省重大科技专项(221100110800); 中原科技创新领军人才项目(234200510020)

作者简介: 吴帅强, 研究方向为食品加工与质量控制。

Email: 1971697730@qq.com

*通信作者: 朱广飞, 博士, 研究方向为农产品加工及贮藏。

Email: zhuguangfei02@163.com; 段续, 博士, 教授, 研究方向为农产品加工。Email: duanxu_dx@163.com

通风期间粮堆温度的变化规律，该模型可用于预测不同通风条件下稻谷温度的变化和冷却储存粮食所需的时间，但缺乏对稻谷含水率变化的预测。EPSTEIN 等^[12]研究了低温固定床玉米通风干燥作为高温干燥的替代方法，建立的一维瞬态模型可以预测干燥过程中玉米粮堆含水率的变化，但对于复杂的仓内三维工况的适应性有待提高。张忠杰等^[13]模拟了浅圆仓内粮堆静态储藏过程中温度场的变化规律。基于局域热平衡理论，刘文磊^[14]建立了平房仓内玉米粮堆静态储藏的湿热传递模型，王远成等^[15-16]构建了仓储谷物热湿耦合传递模型，可以较为准确预测仓内谷物温度随储藏时间变化的规律。GASTON 等^[17]应用谷物水分等温吸附方程和热质局域平衡理论，构建了土豆储藏过程中的湿热传递模型，模拟分析仓内湿热变化与外界气温变化的关系。由于涉及到粮堆内部动量、质量和热量传递过程的高度复杂性，上述研究大多采取了简化策略，仅关注部分核心因素的变化规律（如温度或含水率），或将实际复杂的仓体简化为一维或二维模型，无法满足实际应用的需求。而基于局域热平衡理论构建的模型只能相对准确地反映静态或变化比较缓慢的粮堆整体状态，不能单独反映粮堆内空气和粮粒的状态变化，且在高含水率粮堆通风干燥阶段会存在较大的误差^[18]。同时，由于玉米籽粒是生命体，高含水率阶段可能存在较强的呼吸作用，构建模型时也应加以考虑。

因此，本文基于前期研究的中心通风式干储一体仓^[9]，考虑玉米呼吸热的影响，运用局域热非平衡理论构建湿热传递模型，并采用三维建模的方法对玉米粮堆通风过程中的多场耦合进行分析；采用数值模拟与试验相结合的方法，应用多物理场耦合数值模拟软件 COMSOL，对建立的热湿传递模型进行求解，描述玉米粮堆在整个通风过程中的温度、含水率等指标的变化规律，并用试验数据验证模型的准确性；探究不同通风条件对玉米粮堆干燥的影响，以期直观呈现玉米粮堆热湿传递现象，实现对含水率、温度等指标的有效预测，为得到适宜的通

风工艺参数提供指导；通过中试试验将数值模拟与品质及能耗指标相结合，进一步验证模型的实用性及通风干燥技术的可行性，为实际生产中玉米通风干燥技术和操作工艺的优化提供理论支持。

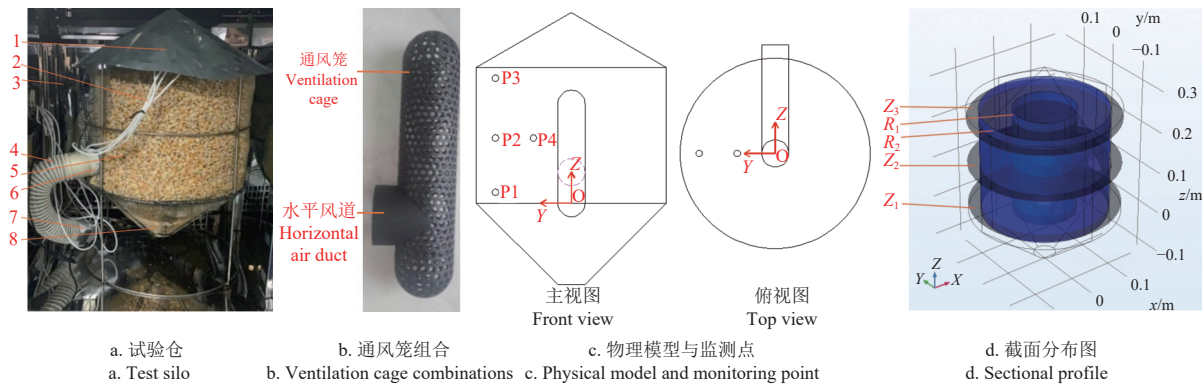
1 材料与方法

1.1 试验材料与设备

玉米（“纪元 168”）2023 年 10 月收获于北京，初始干基含水率为 (0.333 ± 0.005) g/g。

模型构建及试验研究采用的主要设备包括：CDW-150 L-20 恒温恒湿箱（上海尚岑精密仪器有限公司，温度： $-20 \sim 150$ °C，相对湿度： $20\% \sim 98\%$ ，腔内风速： $0 \sim 3$ m/s）、自制粮食干储一体试验仓、扦样器、TG267 红外热像仪（美国菲力尔公司）、FS-WS-WIFI-Y4 温湿度记录仪（山东仁科测控技术有限公司）、TEMPOS 热特性分析仪（美国 METER 公司）、TSI-9 535 热线风速仪（美国 TSI 公司）、DHG-9 000 电热鼓风干燥箱（上海一恒科学仪器有限公司）、ZDJ-4A 自动电位滴定仪（上海仪电科学仪器股份有限公司）、YS3010 分光测色仪（广东三恩时科技有限公司）。

自制干储一体试验仓：由于生产中一体仓仓容较大，且受自然环境因素影响，试验条件难以控制和重复，导致实际通风过程较为复杂。因此，基于近似模型法^[19-20]，将一体仓按照模型尺寸/原型尺寸=1/6 的比例进行缩小^[9]，建立了一体仓模型试验台（图 1a），对试验仓内玉米粮堆通风过程中湿热传递规律进行研究。试验仓主体圆筒直径 ϕ 为 350 mm，高度为 250 mm。筒壁由铁丝网制成，网孔尺寸为 3 mm×3 mm，内置采用 3D 打印的通风笼（图 1b），通风笼圆柱段直径 ϕ 为 50 mm，长度为 183 mm，两端为直径 $\phi 50$ mm 的半球型，通风笼开设直径 $\phi 4$ mm 的圆孔（开孔率 35%），通风笼圆柱段下缘与试验仓圆柱段下缘保持水平。水平风道（不开孔）直径为 50 mm，轴线距原点高度为 57 mm，通过软管与轴流风机（JYF-50S，可调速）连接。



注：1 为仓顶；2 为温湿度传感器；3 为恒温恒湿箱；4 为软管；5 为仓体；6 为水平风道；7 为轴流风机；8 为仓底， Z_1 为高度 0.02 m 的 X-Y 圆截面， Z_2 为高度 0.12 m 的 X-Y 圆截面， Z_3 为高度 0.23 m 的 X-Y 圆截面， R_1 为半径 0.07 m 的圆柱截面， R_2 为半径 0.14 m 的圆柱截面。

Note: 1 is the silo roof; 2 is temperature and humidity sensor; 3 is a constant temperature and humidity box; 4 is a hose; 5 is the silo body; 6 is a horizontal air duct; 7 is an axial fan; 8 is the bottom of the silo; Z_1 is the circular section of X-Y direction with a height of 0.02 m; Z_2 is the circular section of X-Y direction with a height of 0.12 m; Z_3 is the circular section of X-Y direction with a height of 0.23 m; R_1 is the cylindrical section with a radius of 0.07 m; R_2 is the cylindrical section with a radius of 0.14 m.

图 1 粮仓结构及物理模型

Fig.1 Structure and physical model of grain silo

1.2 试验方法

本文采用数值模拟与试验相结合的方法, 试验分为玉米薄层通风干燥试验以及玉米粮堆通风干燥试验, 数值模拟为玉米粮堆通风干燥模拟, 并进行中试试验验证。由于模型仓与原型仓的物理要素与几何要素对应相似, 基于相似理论, 可以将试验仓内玉米的湿热传递规律推广到仓容较大的原型仓。

1.2.1 玉米薄层通风干燥试验

选取玉米表面风速(以下简称风速)、空气相对湿度(以下简称相对湿度)、通风温度(以下简称风温)为影响因素, 研究不同条件下玉米含水率的变化, 根据GB/T 26880-2011和LS/T 1202-2002有关粮食储藏温湿度、通风条件及粮食烘干机通风和实际气象条件, 设计单因素试验方案如表1所示。将高含水率玉米(0.333 g/g)装于铝制料盘中, 标记编号, 并按照试验方案中的条件置于恒温恒湿箱(温度、湿度、风速均可调)中进行通风干燥。在进行每组试验前对恒温恒湿箱内温湿度以及玉米存放处的风速进行标定, 以保证试验条件的准确。每隔3~4 h测定样品的质量变化, 考虑到达平衡含水率所需时间较长, 以含水率降到高于该条件下平衡含水率0.005 g/g时为通风干燥终点。每个条件分别做3组平行试验。试验结果用以构建玉米薄层通风干燥过程中含水率变化模型, 为构建一体仓内玉米粮堆通风干燥水分控制方程提供基础。

表1 单因素试验设计方案
Table 1 Single factor experiment scheme

序号 No.	风温 Air temperature/ °C	风速 Air velocity/ (m·s ⁻¹)	空气相对湿度 Relative humidity of air/%
1	15	0.16	60
2	20	0.16	60
3	25	0.16	60
4	30	0.16	60
5	35	0.16	60
6	25	0.16	30
7	25	0.16	45
8	25	0.16	75
9	25	0.16	90
10	25	0.02	60
11	25	0.09	60
12	25	0.23	60
13	25	0.30	60

1.2.2 玉米粮堆通风干燥试验

将玉米置于自制粮食干储一体试验仓内, 并将其置于恒温恒湿箱内(如图1a所示, 温度25°C、相对湿度60%, 一体仓通风笼表面风速0.16 m/s, 进行通风干燥, 用温湿度记录仪全程记录仓内4个监测点(点位见图1c)空气的温湿度, 每隔3~4 h将一体仓取出恒温恒湿箱并快速对仓内监测点位的玉米进行取样, 每个点位取10~15 g样品, 测定玉米的温度及含水率。玉米温度使用TG267红外热像仪在取样完成后迅速拍照, 后期对图像进行处理, 获得各个监测点玉米的温度, 玉米含水率参考GB 5009.3-2016进行测定。

1.2.3 玉米粮堆通风干燥数值模拟与中试试验

将玉米粮堆通风热湿传递模型的参数设置为与1.2.2

玉米粮堆通风干燥试验相同, 分析粮情变化规律, 并用前述试验结果对热湿传递模型进行验证。同时, 为探究不同因素对玉米粮堆通风干燥过程中热湿传递的影响, 按表1设计方案开展数值模拟研究。

为进一步验证模型的准确性、探究大仓条件玉米粮情变化规律及通风干燥储藏的可行性, 在北京市平谷区开展了干储一体仓(原型仓, 提升机和风机(可调频)功率均为1.5 kW)的通风干燥试验。将刚收获的高水分玉米((0.337±0.043) g/g, 4.4 t)置于干储一体仓内进行通风干燥, 直至含水率达到0.15 g/g左右, 停止通风。酸值参考GB/T 29405-2012进行测定; 色泽采用YS3010分光测色仪进行测定, 光源D65, 观察者角度10°, 测量口径8 mm; 能耗参考JB/T 13628-2020的方法以单位脱水能耗(kJ/kg)计算。

2 模型的建立

2.1 物理模型

试验仓以干储一体仓为原型按尺寸进行等比例(1:6)缩小, 物理模型如图1c所示。进行试验时, 将试验仓置于恒温恒湿箱中。结合试验仓“中心放射-横向通风”式的流场分布^[9]可知, 仓内玉米粮堆存在对称性, 圆周方向上温湿度变化规律相似, 且靠近仓壁处粮层处于通风薄弱位置, 需要监测, 同时增加径向中间层监测点, 以呈现通风路径方向的粮情变化规律, 故在试验过程中设置了4个监测点(温湿度传感器)来观察粮堆内部的参数变化, 以图1c中的O点为坐标原点, 4个监测点位置分别为点P1(0, 0.14 m, 0.02 m)、点P2(0, 0.14 m, 0.12 m)、点P3(0, 0.14 m, 0.23 m)和点P4(0, 0.07 m, 0.12 m), 其中点P3、P2、P1分别代表仓壁处粮层上、中、下3点, 点P4、P2分别代表径向内、外2点。同时, 试验仓(原型仓)锥底设计为45°锥角, 锥面距通风笼的最远处距离不超过点P1所代表的区域, 且开设通风孔的锥面可以确保锥底粮食与外界有较大的接触面积, 导致该处粮情处于相对安全的地位。因此, 在确保粮情薄弱位置得到监测并能够分析通风路径方向温湿度变化规律的前提下, 为尽可能减少传感器布置对流场的影响, 水平通风位置及锥底不再单设监测点。选取模型中轴向不同高度的3个圆截面($Z_1=0.02$ m、 $Z_2=0.12$ m、 $Z_3=0.23$ m)以及2个以Z轴为轴线不同半径的圆柱截面($R_1=0.07$ m、 $R_2=0.14$ m)来进行三维数据分析(如图1d), 坐标系如图1c和图1d所示。

2.2 数学模型

将玉米粮堆假设为均匀连续的多孔介质, 采用局域热非平衡理论, 分别针对高含水率玉米粮堆气相和固相进行建模, 构建其各自的动量、热量、水分迁移(湿度)控制方程。由于玉米粮堆通风过程中热湿传递的过程比较复杂, 涉及籽粒的解吸/吸湿、热湿传递、气体流动等, 结合玉米粮堆通风过程的实际情况, 为了简化计算, 在研究过程中作了如下基本假设: 1) 玉米粮堆是大尺度上均匀分布、各向同性的连续介质, 孔隙内气体流动均匀;

2) 玉米颗粒是刚性的, 不考虑收缩和变形; 3) 气体是理想气体, 不可压缩; 4) 忽略颗粒之间及颗粒与气体之间的热辐射; 5) 物料内部的水分传递只以扩散的方式进行, 水分以液态水状态由内部传递至表面, 然后在表面蒸发。

2.2.1 气体相控制方程

气体流动的连续性方程如下:

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

式中 ε 为玉米粮堆孔隙率; ρ_a 为空气的密度, kg/m^3 ; t 为时间, s ; \mathbf{V} 为空气的速度矢量, m/s 。

对于自由流动区域内的流体, 可以使用 Navier-Stokes 方程^[21] 描述其动量守恒方程:

$$\rho_a \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \rho_a (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = \nabla P + \nabla \tau + \mathbf{F} \quad (2)$$

$$\tau = \mu (\nabla \mathbf{V} + (\nabla \mathbf{V})^T) \quad (3)$$

式中 P 为空气压力, Pa ; τ 为黏性应力张量, Pa , 不可压缩流体可简化为式 (3), 其中, μ 为空气动力黏度系数, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; \mathbf{F} 为体积力矢量, N/m^3 。

由于玉米孔隙内的气体流动比较缓慢^[22], 故本文采用 Brinkman 方程对玉米粮堆内的气体流动进行分析。

$$\rho_a \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \rho_a (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = \nabla P + \nabla \tau - \frac{\mu}{K} \mathbf{u} + \mathbf{F} \quad (4)$$

式中 K 为渗透率, m^2 ; \mathbf{u} 为达西速度, m/s , $\mathbf{u} = \varepsilon \mathbf{V}$ 。

根据气体流动连续性方程得出气体相水分控制方程如下:

$$\varepsilon \frac{\partial C_{air}}{\partial t} + (\varepsilon \mathbf{V}) \cdot \nabla C_{air} = \nabla \cdot (\varepsilon D_{va} \nabla C_{air}) + S_v \quad (5)$$

$$S_v = -(1 - \varepsilon) \rho_{sd} \frac{\partial M}{\partial t} \quad (6)$$

式中 C_{air} 为空气的水分浓度, kg/m^3 ; D_{va} 为玉米堆内水蒸气分子的扩散系数, m^2/s ; S_v 为玉米解吸引入的源项, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$, 其中 ρ_{sd} 为玉米的绝干密度, kg/m^3 , M 为玉米的含水率, g/g 。

气体相的热量控制方程如下:

$$\varepsilon \rho_a C_a \frac{\partial (T_a - T_r)}{\partial t} + (\varepsilon \rho_a C_a \mathbf{V}) \cdot \nabla (T_a - T_r) = \nabla \cdot (\varepsilon k_a \nabla T_a) + Q_{v1} + Q_{v2} \quad (7)$$

$$h_v = 10^3 (-2.36(T_a - 273.15) + 2501.5) \quad (8)$$

式中 C_a 为空气的比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; T_a 为空气温度, K ; T_r 为参考温度, K , 一般取 273.15 K ; k_a 为空气导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; Q_{v1} 为玉米蒸发水分引入的热量通量, W/m^3 , $Q_{v1} = S_v (C_w (T_s - T_r) + h_v)$, 其中, T_s 为玉米的温度, K ; C_w 为液态水的比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; h_v 为水的汽化潜热, J/kg , 常压下为式 (8)^[23]; Q_{v2} 为气体与玉米对流换热引入的热量通量, W/m^3 , $Q_{v2} = h_a a_v (T_s - T_a)$, 其中, h_a 为气体与玉米的对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; a_v 为物料的比表面积, m^2/m^3 。

2.2.2 玉米相控制方程

与气相控制方程类似, 玉米相热量控制方程仍然采用局域非热平衡方法进行建模, 方程如下:

$$(1 - \varepsilon) \rho_s \frac{\partial (C_s (T_s - T_r))}{\partial t} = \nabla \cdot ((1 - \varepsilon) K_s \nabla T_s) - Q_{v1} - Q_{v2} + Q_{v3} \quad (9)$$

式中 ρ_s 、 C_s 、 K_s 分别为玉米的密度 (kg/m^3)、比热容 ($\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$)、导热系数 ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$); Q_{v3} 为谷物呼吸释放的热量通量, W/m^3 , $Q_{v3} = (1 - \varepsilon) \rho_s q_H R_{\text{CO}_2}$ ^[24], 其中, q_H 为谷物呼吸作用放出的热量, $10.738 \text{ J}/\text{mg}$; R_{CO_2} 为谷物呼吸 CO_2 的释放率, $\text{mg}/(\text{kg}\cdot\text{s})$, $R_{\text{CO}_2} = -4.054 + 0.0406(T_s - 273.15) - 0.0165t_d + 0.0001t_d^2 + 23.89 \frac{M}{1 - M}$, 其中, t_d 为储藏时间, d ; M 为干燥过程中的实时含水率, g/g 。

通过 1.2.1 中的玉米薄层通风干燥试验获得玉米粮堆水分变化规律, 采用 Misra 方程^[25] 形式构建的通风干燥模型如下:

$$M_R = \exp(-kt^N) = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (10)$$

式中 M_R 为水分比; k 和 N 为干燥常数; M_e 为不同气体条件下玉米的平衡含水率, g/g ; M_0 为玉米的初始含水率, g/g 。根据 1.2.1 试验数据可知:

$$k = \exp\left(\frac{-24.16711 + 0.37476|V| + 2.85831 \ln(37.56T_a + 1275.6)}{1}\right) \quad (11)$$

$$N = -0.84884 \ln(\text{RH}) + 1.34533M_0 \quad (12)$$

$$M_e = -\frac{1}{C_3} \ln\left(-\frac{(T_a + C_2) \ln(\text{RH})}{C_1}\right) \quad (13)$$

式中 RH 为空气的相对湿度; 参数 C_1 、 C_2 、 C_3 分别为 392.366 、 43.14 、 17.397 ^[25]。

3 数值模拟参数设置

3.1 边界条件和壁面设置

壁面边界条件: 仓内壁默认为无滑移壁面。由于仓体顶部为镀锌板, 没有气体的流入与流出, 即没有质量的进出, 设置通量为 0。

入口边界条件: 由于实际通风笼上开孔较多, 求解时不易收敛, 因此本文采用通风笼全表面通风来近似代替孔洞通风。流动边界采用速度入口边界条件, 质量边界采用入口气体的浓度边界条件, 热量边界采用温度入口边界条件, 其值或表达式见表 2。

出口边界条件: 流动边界采用压力出口边界条件, 出口处压力值设置为 0, 热量边界和质量边界分别采用热量流出和浓度流出边界条件, 其浓度梯度为 0。

3.2 玉米和空气的物性参数及通风条件

本文以纪元 168 玉米为研究对象, 热湿传递模型中涉及的物性参数, 主要包括孔隙率、渗透率、当量直径、比表面积、导热系数和比热容等, 这些参数均直接或间接对玉米粮堆多孔介质内气体的流动、热湿传递过程产生影响。由于本文试验仓仓容较小, 与颗粒堆积情况有

关的参数变化较小,所以本文不考虑粮堆压降的影响,并将孔隙率、渗透率等设定为常数^[26]。玉米籽粒的导热系数、比热容采用 TEMPOS 热特性分析仪测定,通过回归分析,得到其与玉米籽粒含水率和温度的关系分别如式(14)和式(15)所示。为确保模拟结果与试验结果具有可比性,模型计算的初值条件与通风试验的初始状态保持一致。

表2 玉米和空气的物性参数及通风条件

Table 2 Physical parameters of maize and air and ventilation conditions

来源 Source	参数 Parameter	符号 Symbol	单位 Unit	数值或 表达式 Numerical/ Expression	参考文献 Reference
玉米 maize	初始温度	T_{s0}	°C	4	
	初始含水率(干基)	M_0	$\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	0.333	
	初始相对湿度	RH_0	%	96.27	
	孔隙率	ε	—	0.41	[27]
	容重	ρ_b	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	728	[28]
	密度	ρ_s	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\rho_s = 988.884 + 988.884M$	
	当量直径	D_v	mm	8.322	[29]
	比表面积	a_v	$\text{m}^2\cdot\text{m}^{-3}$	425.4	[30]
	渗透率	K	m^2	7.62×10^{-8}	[31]
	迂曲率	τ_1	—	1.581	[31]
	水蒸气分子有效扩散系数	D_{va}	$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$	4.52×10^{-11}	[32]
	导热系数	K_s	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	K_s	式(14)
	比热容	C_s	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	C_s	式(15)
	对流传热系数	h_t	$\text{W}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$h_t = 100G_a^{0.49} = 100(\rho_a V)^{0.49}$	[23]
通风条件 atmospheric conditions	进风温度	T_{a0}	°C	25	
	进风速度	v_0	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	0.11	
	进风相对湿度	RH	%	60	
空气 air	密度	ρ_a	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\frac{1000}{(2.87+1.73H)T_a}$	[32]
	饱和蒸汽压	P_s	Pa	$\frac{101.325\times 10^{(8.10765-\frac{1750.286}{T_a-38.15})}}{760}$	[32]
	水蒸气摩尔浓度	j_v	$\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$	$\frac{P_v}{RT_a}$	[32]
	相对湿度	RH_a	%	$\frac{P_v}{P_s}\times 100\%$	[32]
	绝对湿度	H_a	$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\frac{0.622}{P_T-RH\cdot P_s}$	[32]
	动力黏度	μ	$\text{Pa}\cdot\text{s}$	$\frac{1.455\times 10^{-6}\cdot T_a^{1.5}}{T_a+110.4}$	[33]
	导热系数	K_a	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$7.811\times 10^{-5}T_a+0.02437$	[34]
比热容	C_a	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$1010+870H$	[34]	

注: M 为玉米的干基含水率, $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$; G_a 为空气的质量流量, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; H 为空气的湿含量, $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$; T_a 为空气的温度, K ; P_v 为水蒸气分压, Pa ; R 为通用气体常数, $8.314\text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; P_s 为饱和蒸汽压, Pa ; P_T 为总压强, Pa 。

Note: M is the dry basis moisture content of maize, $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$; G_a is the mass flow rate of air, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; H is the water vapor content of the air, $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$; T_a is the temperature of the air, K ; P_v is the partial pressure of water vapor, Pa ; R is the universal gas constant, $8.314\text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; P_s is saturated vapor pressure, Pa ; P_T is the total pressure, Pa .

$$K_s = 0.15357 - 0.00186(T_s - 273.15)$$

$$+ 5.8 \times 10^{-5}(T_s - 273.15)^2$$

$$+ (0.12705 + 0.00612(T_s - 273.15))M \quad (14)$$

$$C_s = 0.52066 + 5.31348M + 0.02894(T_s - 273.15)$$

$$- 8.38076M^2 - 6.25517 \times 10^{-4}(T_s - 273.15)^2 \quad (15)$$

4 网格无关性验证

网格数量影响计算精度以及收敛情况,网格数量过少,通常会导致获得的结果不够精确,或者使结果难以收敛。但网格数量越大,计算量就越大,对计算机硬件要求就越高。因此,需要合理确定网格数量。将模型网格分别划分为 27 400、52 400、133 000、383 000、840 000 等 5 组,选择仓内点 P4 (0, 0.07 m, 0.12 m),在 0.3 m/s 的进风条件下,通过不同网格数量与该点气流压力、速度的关系来表征网格数量对模拟结果的影响。从图 2 可以看出,当网格数量增加到 383 000 个后,该点气流压力与速度趋于平缓,可以满足仿真要求。因此,本文采用数量为 383 000 的网格密度。

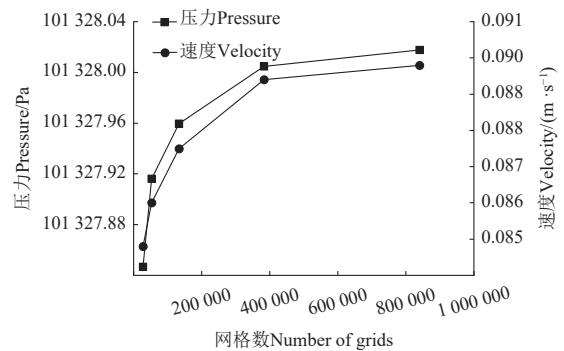


图2 网格无关性验证

Fig.2 Grid independence verification

5 结果与分析

5.1 玉米粮堆空气参数模拟结果与分析

5.1.1 玉米粮堆空气温度变化

图 3a 描述了不同通风时刻玉米粮堆内 4 个点空气温度变化的模拟值和试验值,通过对比分析可知,总体上二者的规律和变化趋势基本一致,且二者的差距较小,相对误差范围为 0.7%~15.1%,平均值为 5.5%,表明构建模型的准确性^[35-36]。其中,点 P4 温度升高的速率显著大于其他 3 个点,这与点 P4 距离通风笼的位置较近有关。总体上模拟值略高于试验值,这可能是由于玉米表面水分蒸发所需的热量除了来自玉米籽粒,也可能部分来自空气,而模型中的热量控制方程,认为水分蒸发的热源全部来自于玉米,空气则不会失去热量,这就会导致空气温度的模拟值高于试验值^[32]。进一步分析模拟结果可知,随着通风过程的进行,玉米粮堆内空气的温度在前 1 h 内快速上升,而后持续缓慢升高并接近 25 °C。对比 4 个点的数据可知,点 P4 温度升高的速率显著大于其他 3 个点,这与点 P4 距离通风笼的位置较近、先接触热风进而率先升温有关。

5.1.2 玉米粮堆空气相对湿度变化

图 3b 为玉米通风干燥过程中 4 个点空气相对湿度的模拟值和试验值,二者的相对误差范围为 1.3%~15.4%,平均值为 8.9%。开始干燥时,粮堆空气温度迅

速升高，干燥速率较快，试验仓内产生大量水蒸气，导致空气相对湿度迅速上升。从图中模拟结果可以看出，在通风前 1 h 之内，4 个点空气的相对湿度均有短暂的上升趋势，且接近 100%，表明该处存在较大的冷凝风险，张淑媛等^[10]在对高含水率玉米进行冷通风的试验中也存在类似现象。较高相对湿度的空气，遇到较低温度的玉米颗粒有可能形成液态水即发生结露现象，并伴随着热量的释放。由相似理论分析可知，在实际大仓厚粮层通风时，随着沿通风方向位置距离的增加，粮堆空气相对湿度上升的趋势更加明显，高相对湿度保持的时间会更长，干燥过程发生意外风险的可能性更大，需要加大干预力度，使干燥前沿尽快向外推移，以降低仓内粮堆空气的相对湿度；试验时 4 个点相对湿度的初始值大部分都低于初始条件下玉米的平衡相对湿度（96.27%），这是由于玉米从冷藏柜取出装入试验仓的过程中，接触到室内相对湿度较低的空气，导致其表面水分降低，近而导致玉米粮堆的初始相对湿度低于初始含水率对应的平衡相对湿度；具体来看，与温度的变化规律类似，点 4 的空气相对湿度降低速率最大，显著高于点 P1、点 P2、点 P3，且点 P2 的空气相对湿度降低速率略高于点 P1 和点 P3，这与上述点位的位置及通过该点的风速大小有关。通风 9 h 时，仓内空气相对湿度整体趋于稳定。

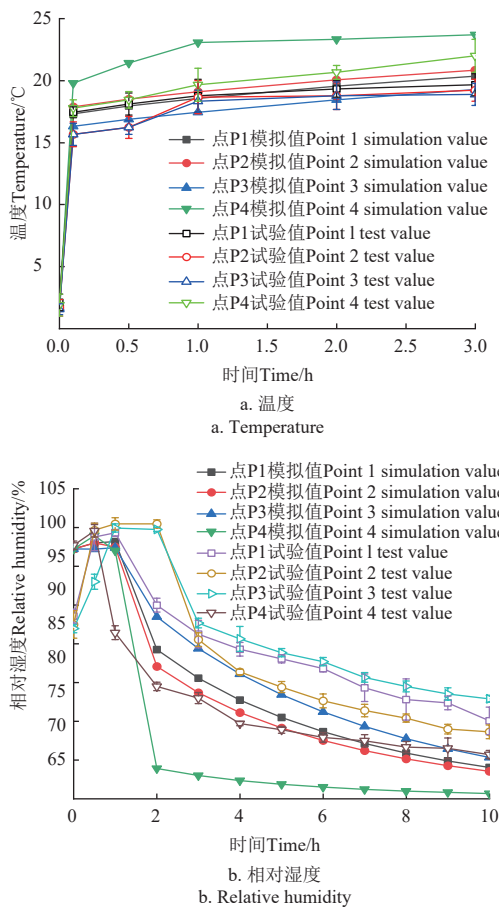


图 3 玉米粮堆空气温度和相对湿度变化
Fig.3 Changes of air temperature and relative humidity in maize pile

5.2 玉米粮堆状态模拟结果及分析

5.2.1 玉米粮堆温度变化

图 4 显示了 4 个点玉米温度的试验值与模拟值，二者的相对误差范围为 1.4%~12.1%，平均值为 4.8%。图 5 为仓内 X-Z 截面上玉米不同时刻的温度分布云图。综合来看，尽管本文试验仓仓容较小，外层升温延后的现象^[26]并不明显，但玉米的温度分布规律与空气相同，存在分层现象，且由于玉米升温较慢，分层现象更加明显，内外粮层最大温差可达 6 °C（3 h）。综合来看，在通风过程的前 20 h 以内，点 P4 玉米的温度值高于其他点位，随着通风过程的持续，各点温度在 25 h 后趋于稳定，接近 25 °C。基于相似原理分析，对于粮层更厚的大仓而言，玉米温度的分布会更加不均匀，内外粮层的温差会进一步扩大，需要采取措施提高粮堆温度均匀性。

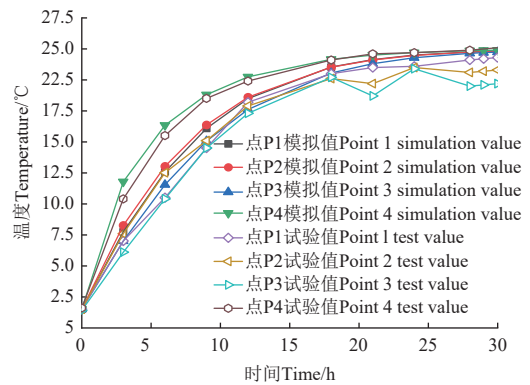


图 4 通风过程中玉米粮堆温度的变化
Fig.4 Changes of maize pile temperature during ventilation process

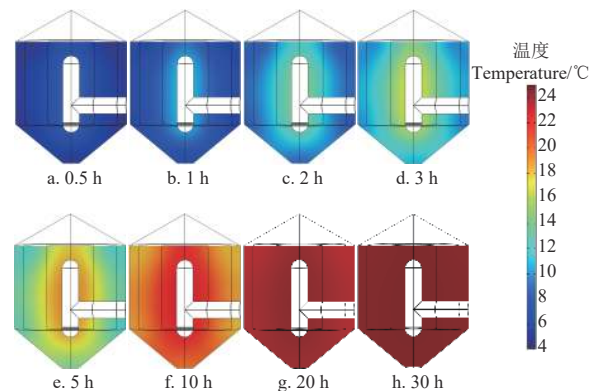


图 5 不同时刻玉米粮堆温度分布云图
Fig.5 Cloud map of maize pile temperature distribution at different times

表 3 展示了试验仓整体、3 个圆截面 (Z_1 、 Z_2 、 Z_3) 以及 2 个圆柱截面 (R_1 、 R_2) 玉米的温度变化情况。通风 25 h 时，仓内玉米整体和各截面的平均温度均超过 24.5 °C，开始接近 25 °C，与图 4 所示单点温度数据变化规律相一致。具体来看， R_1 温度的上升速度明显高于 R_2 ， Z_2 的温度上升略快于 Z_1 与 Z_3 ，这与前述的原因一致，归根到底均是与通过该处的风速大小有关。表 3 与图 5 一起，共同印证随着通风过程的持续，仓内玉米温度的均

匀性逐渐增大。靠近仓壁的角落处玉米升温速率明显偏低, 存在一定的不均匀性, 这与实际粮食仓储机械通风

的情况类似^[36]。研究结果可以为优化结构以改善通风均匀性提供理论依据。

表3 玉米粮堆温度的分布

Table 3 Distribution of maize pile temperature

时间 Time/h	整体 Whole			R_1			R_2			Z_1			Z_2			Z_3		
	平均 Ave	最大 Max	最小 Min	平均 Ave	最大 Max	最小 Min	平均 Ave	最大 Max	最小 Min	平均 Ave	最大 Max	最小 Min	平均 Ave	最大 Max	最小 Min	平均 Ave	最大 Max	最小 Min
0	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
3	11.75	16.56	8.89	13.59	14.38	11.71	10.24	10.89	9.33	11.34	16.55	8.93	13.52	14.45	11.78	10.64	14.89	9.46
6	16.26	20.54	13.61	18.15	18.92	16.35	14.99	15.82	14.11	16.12	20.31	13.60	18.21	18.92	16.49	15.33	19.32	14.12
9	19.31	22.47	17.38	20.85	21.59	19.53	18.35	18.95	17.90	19.41	22.31	17.34	20.78	21.49	19.50	18.43	21.71	17.60
12	21.49	23.51	20.00	22.35	22.88	21.56	20.98	21.69	20.15	21.45	23.94	20.18	22.35	22.78	21.78	20.82	23.01	20.24
15	22.75	24.13	21.82	23.73	23.87	22.75	22.56	22.45	21.82	22.92	24.61	21.93	23.38	23.69	22.79	22.37	23.77	21.90
18	23.78	24.74	23.99	24.12	24.23	23.56	23.38	23.51	23.43	23.86	24.49	23.32	24.11	24.25	23.61	23.34	24.56	23.32
21	24.15	24.63	23.79	24.42	24.51	24.34	24.13	24.19	23.57	24.29	24.61	24.12	24.49	24.50	24.44	24.02	24.59	23.99
24	24.55	24.91	24.29	24.64	24.78	24.54	24.40	24.75	24.42	24.56	24.80	24.39	24.67	24.75	24.45	24.45	24.76	24.35
25	24.56	24.94	24.32	24.68	24.87	24.56	24.69	24.78	24.33	24.72	24.83	24.55	24.69	24.77	24.66	24.67	24.79	24.37
27	24.83	24.96	24.59	24.87	24.89	24.63	24.71	24.79	24.55	24.74	24.90	24.62	24.82	24.85	24.68	24.72	24.91	24.58
30	24.88	24.99	24.71	24.89	24.90	24.92	24.79	24.93	24.73	24.86	24.94	24.77	24.97	24.90	24.85	24.86	24.89	24.77

注: Ave, Max 和 Min 分别代表平均、最大、最小值。

Note: Ave, Max and Min represents average, maximum and minimum, respectively.

5.2.2 玉米粮堆含水率变化

图6a展示了不同通风时刻仓内玉米含水率的模拟值及试验值, 可以看出, 模拟结果与试验结果比较吻合, 二者的相对误差为0.3%~14.5%, 平均值为6.5%, 表明模型能够较好地反映玉米含水率的变化情况^[37]。其中, 点P1、点P2、点P3相比较, 通风过程中同一时刻, 点2的含水率略小于点P1、P3; 点P2、点P4相比较, 点4的含水率明显小于点P2, 这与前述粮堆空气温湿度及玉米温度的变化规律相符合。

进一步分析, 在通风中前期, 玉米含水率的模拟值低于试验值, 而在通风后期, 二者的值则比较接近。主要原因可能如前所述, 模型中的热量控制方程形式导致粮堆空气温度模拟值高于试验值, 又由于空气持续通入, 弥补水蒸发等热量损失并提高玉米籽粒温度, 使得通风前期玉米干燥速率高于实际情况; 而在通风后期, 粮堆空气温度模拟值与试验值已经比较接近, 该现象就相应消失。

图6b展示了粮堆过点P2、点P4所在截线上各点玉米含水率随时间的变化规律, 点线中间间断部分为通风笼所在位置。从相同时间内玉米含水率分布点线的间隔大小可以看出, 在干燥前期玉米的干燥速率显著大于后期, 这与图6a含水率变化曲线的规律相一致。进一步分析同一时刻含水率分布点线的形态可知, 沿空气流动方向, 玉米的含水率呈逐渐升高趋势, 最大梯度可达约0.03 g/g, 表明厚粮层通风干燥存在明显的降水梯度, 尽管这种梯度随着通风过程的持续会逐渐减小, 直至接近通风条件下的玉米平衡含水率, 但在实际生产中对于直径几米至十几米的大仓来说, 其通风干燥过程中内外粮层的含水率差异将会更加明显, 需要采取相应措施以减少这种差异, 保障通风干燥的均匀性。

图7为仓整体、3个圆截面(Z_1 、 Z_2 、 Z_3)以及2个圆柱截面(R_1 、 R_2)玉米含水率的最大值、最小值和平均值的变化情况, 反映出玉米在通风60h左右时接近了通风条件下的平衡含水率。具体来看, 仓整体玉米含水率的变化呈现前期快速降水、后期缓慢降水的过程, 玉米最大含水率和最小含水率与整体平均值的差异较大, 尤其是在干燥后期仍然存在较大差异, 可知厚粮层的通风干燥均匀性的问题需要特别关注。 Z_2 截面玉米含水率平均值的降低速率略大于 Z_1 与 Z_3 , 且 Z_2 截面上玉米含水率的最大值和最小值偏离平均值的幅度均小于另外2个截面。 R_1 截面玉米含水率平均值的降低速率明显大于 R_2 , 这与点P1、P2、P3、P4的含水率分布及变化规律一致。综合前文所述, 其原因主要有两个: 一是与空气

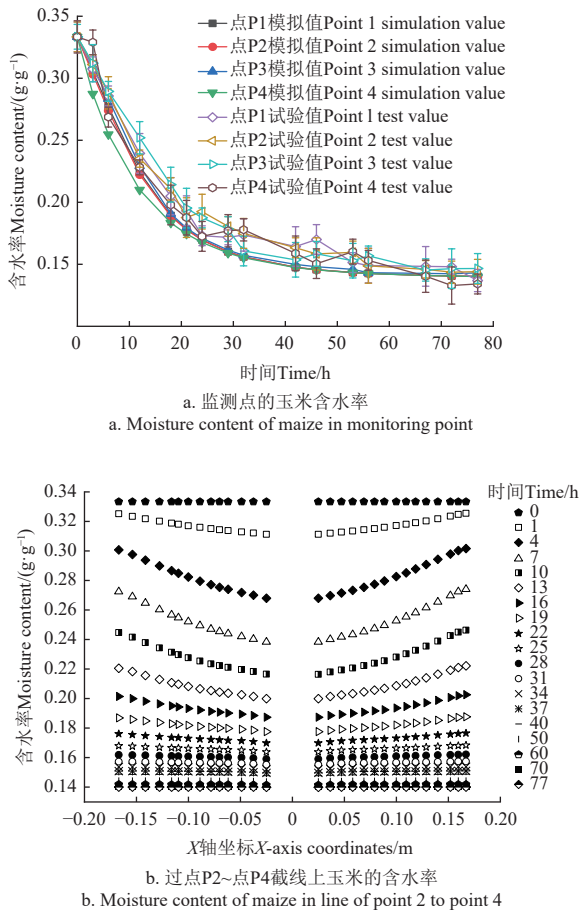


图6 玉米粮堆含水率变化情况

Fig.6 Changes of moisture content in maize pile

的相对湿度有关。空气从通风笼进入粮堆后，先与最内层的玉米进行热质交换，空气的相对湿度有所增加，运载水汽的能力下降，导致外层玉米干燥速率相应下降；二是与风速大小有关。风速越大，单位时间流入的风量

就越大，可以带走玉米粮堆内更多的水汽， R_1 截面的平均风速 0.0273 m/s (点 P4: 0.032 m/s)，明显大于 R_2 截面 0.0102 m/s 的风速(点 P1: 0.0092 m/s , 点 P2: 0.012 m/s , 点 P3: 0.0063 m/s)。

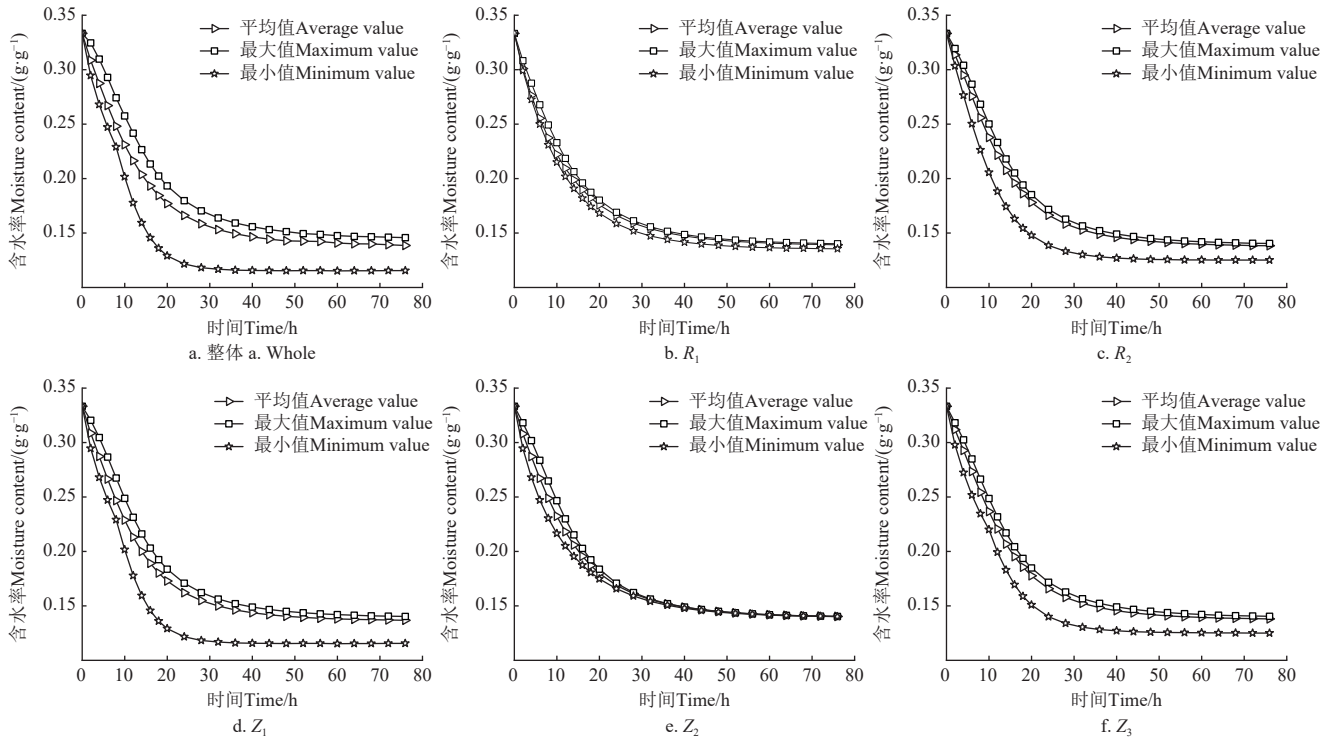
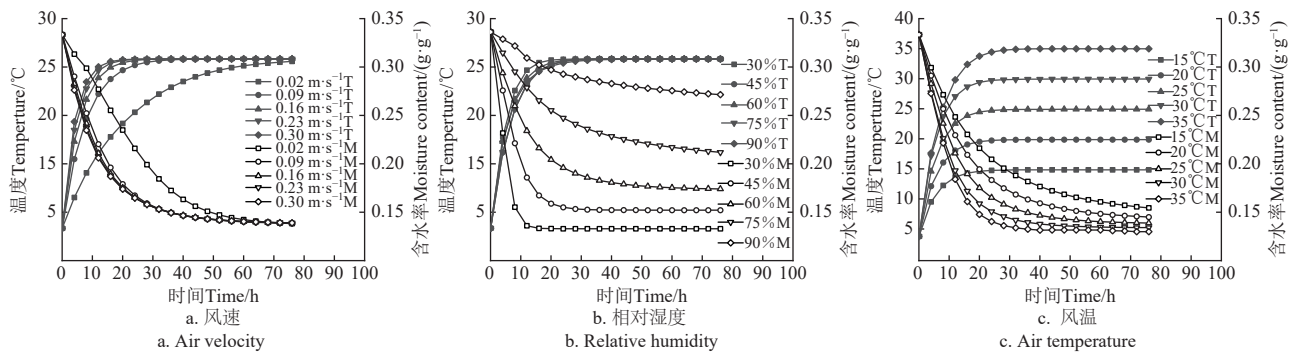


图 7 粮堆整体及各个截面玉米含水率变化情况

Fig.7 Changes in moisture content of maize as a whole and different sections

5.3 不同通风条件对玉米粮堆含水率及温度变化的影响
为探究不同通风条件对玉米通风干燥的影响，分别以风速、风温、相对湿度 3 个因素为自变量^[38]，以不同

通风条件下仓内玉米平均温度和含水率为考核指标，进行如表 1 所示的单因素仿真试验分析，其他参数如表 2 所示，结果如图 8 所示。



注：图中 T 代表温度，M 代表含水率。
Note: In the figure, T stands for temperature and M for moisture content.

图 8 不同条件对通风过程玉米含水率与温度变化的影响

Fig.8 Effects of different ventilation conditions on changes in maize moisture content and temperature

图 8a 为不同风速下仓内玉米平均温度和含水率的变化情况，可以看出，风速在小于 0.16 m/s 时变化会显著影响玉米的升温速率和干燥速率，但随着通风过程的持续，最终均会趋于通风条件下的平衡温度以及平衡含水率。具体来看，在相对湿度 60% 、风温 25°C 下，风速 0.09 、 0.16 、 0.23 和 0.30 m/s 4 组条件下玉米的干燥速率比较接近，其中， 0.09 m/s 的相应速率略小于其他 3 组，

且四者均显著大于 0.02 m/s 时的相应速率 ($P < 0.05$)，这可能是因为当风速大于 0.16 m/s 时，玉米粮堆通风干燥主要是以内部扩散控制为主，继续增大风速对于提高干燥速率意义不大。参考 GB/T 26880-2011 和 LS/T 1202-2002，从节约能源、降低成本和保障安全的角度综合考虑，建议风速范围为 $0.09 \sim 0.23 \text{ m/s}$ 。从图 8b 可以看出，在风温 25°C 、风速 0.16 m/s 下，相对湿度对玉米温度的

变化趋势及温度值影响不大, 但会显著影响玉米的平衡含水率以及干燥速率 ($P < 0.05$)。平衡含水率与空气相对湿度呈正相关的关系, 依据粮食储藏安全含水率的要求及试验结果, 空气相对湿度选择 75% 以下较为合适, 玉米的平衡含水率可以达到 0.16 g/g 以下; 从图 8c 可以看出, 风温会显著影响玉米的升温速率及平衡温度, 同时也会影响玉米的平衡含水率及干燥速率。风温越高, 玉米的平衡温度、升温速率以及玉米的干燥速率就越大, 而玉米的平衡含水率则越低。玉米粮堆在 20 h 时基本上能够达到“热平衡”状态, 可为粮堆通风干燥提供指导。这是由于温度是玉米颗粒内部水分扩散的重要动力来源, 当所通空气温度较高时, 将导致较大的玉米内部水分扩散速率, 同时也有利于表面水分的蒸发。因此, 通自然风干燥, 在相对湿度条件满足的情况下, 风温可不受限制, 即风温随大气条件而定。

5.4 干储一体仓通风干燥中试试验

5.4.1 玉米含水率变化分析

根据前述研究结果, 设定空气相对湿度在 75% 以下时进行通风, 风速为 0.23 m/s。试验从 2023 年 10 月 10 日持续到 21 日, 每天 8 点对仓内 7 个点位 (点 1 (0, 0.85 m, 0.1 m), 点 2 (0, 0.85 m, 0.7 m), 点 3 (0, 0.85 m, 1.3 m), 点 4 (0, 0.55 m, 0.1 m), 点 5 (0, 0.55 m, 0.7 m), 点 6 (0, 0.55 m, 1.3 m), 点 7 (0, 0.25 m, 0.7 m)) 的玉米进行取样 (图 9), 测定其含水率。将试验期间所在地的温湿度拟合为数学方程, 作为热湿传递模型的通风参数 (式 16 (空气温度) 和式 17 (空气相对湿度)), 其他参数见表 2。模拟及试验结果见图 10。

$$T = 12.45 - 1.122 \cos(0.04357t) + 1.837 \sin(0.04357t) + 0.2774 \cos(0.08714t) - 0.5951 \sin(0.08714t) + 0.7809 \cos(0.13071t) - 0.05512 \sin(0.13071t) - 0.5017 \cos(0.17428t) + 0.248 \sin(0.17428t) - 0.4465 \cos(0.21785t) - 0.8317 \sin(0.21785t) - 6.745 \cos(0.26142t) - 3.861 \sin(0.26142t) - 1.232 \cos(0.30499t) + 0.1738 \sin(0.30499t) + 0.4392 \cos(0.34856t) + 0.3791 \sin(0.34856t) \quad (16)$$

$$RH = 68.73 + 3.86 \cos(0.06554t) - 3.083 \sin(0.06554t) - 3.13 \cos(0.13108t) - 1.161 \cos(0.13108t) + 0.2707 \sin(0.19662t) - 2.681 \cos(0.19662t) + 27.37 \sin(0.26216t) + 19.27 \cos(0.26216t) - 1.936 \sin(0.3277t) + 0.9161 \cos(0.3277t) + 0.3691 \sin(0.39324t) + 3.386 \cos(0.39324t) + 0.05425 \sin(0.45878t) + 0.526 \cos(0.45878t) - 7.138 \sin(0.52432t) - 7.788 \cos(0.52432t) \quad (17)$$

由图 10 可知, 一体仓通风干燥玉米含水率的模拟值与试验值的相对误差范围为 1.3%~16.7%, 平均值为 4.4%, 进一步验证了构建模型的实用性。最内层的玉米

含水率下降速率最快, 在 130 h 就接近安全含水率, 中间层的玉米含水率变化较慢, 在 180 h 左右接近安全含水率, 最外层的玉米降水最慢, 在 250 h 左右接近安全含水率, 并且降水速率从内层到外层差异明显。点 3 的含水率明显高于点 1、2, 点 6 明显高于点 4、5, 表明粮仓上层的降水速率小于下层。玉米粮堆的不均匀性呈先上升后下降的趋势, 在 100 h 左右不均匀性最高, 与图 6 相比, 一体仓内、外层含水率不均匀性更加明显。含水率高的区域更易发生霉变, 为改善粮堆温湿度的不均匀性, 实际生产中可以进行换向通风和粮食循环^[39]。

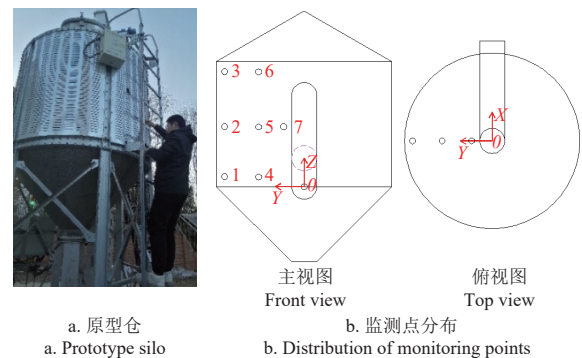


图 9 干储一体仓 (原型仓) 及监测点

Fig.9 Integrated silo for drying and storage (prototype silo) and monitoring points

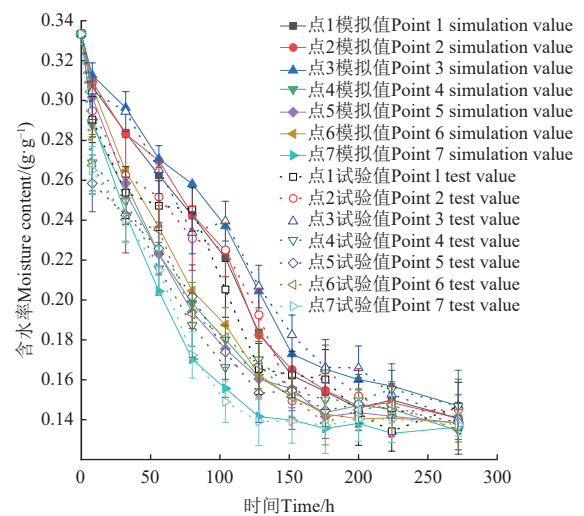


图 10 各点位玉米含水率的模拟值与试验值

Fig.10 Simulation and test values of maize moisture content at each monitoring point

5.4.2 玉米通风干燥品质及能耗分析

表 4 展示了玉米通风干燥品质变化及能耗指标情况, 经过近 12 d 的通风干燥后, 玉米含水率从初始的 (0.337 ± 0.043) g/g 降低到 (0.152 ± 0.045) g/g, 达到玉米储藏安全含水率的要求。其中, 有效通风时间 90.5 h, 通风结束后, 为提高出仓物料含水率均匀性, 配合使用提升机循环物料 12 h。玉米的酸值从初始的 19.85 mg/100 g 升高到 25.44 mg/100 g, 增长了约 28%, 但其值仍然远低于 65 mg/100 g, 满足 GB/T 20570-2015 适宜储藏的要求。通风干燥后的玉米与新收获玉米的色差值 ΔE 为 5.23 ± 1.42 ,

表明通风干燥前后, 玉米的色泽变化不明显。从入仓到出仓, 整个过程共耗电 150.5 kW·h, 单位能耗为 890.2 kJ/kg, 干燥成本约为 23.9~34.2 元/t, 与 100~200 元/t 的热源烘干成本相比, 节能效果显著, 表明了本文高含水率玉米通风干燥的可行性。

表 4 玉米通风干燥品质及能耗指标

Table 4 Quality and energy consumption indexes of maize ventilated drying

指标 Indexes	初始值 Initial value	终点值 Final value	
含水率 Moisture content/ (g·g ⁻¹)	0.337±0.043	0.152±0.045	
酸值 Acid value/ (mg·(100 g) ⁻¹)	19.85±3.23	25.44±2.45	
色泽 Color	<i>L</i>	84.08±1.67	85.47±1.98
	<i>a</i>	5.74±0.66	5.07±0.69
	<i>b</i>	27.1±1.15	22.49±1.62
	ΔE	-	5.23±1.42
能耗 Energy consumption/ (kJ·kg ⁻¹)	-	890.20	

6 结 论

以玉米粮堆为研究对象, 在恒温恒湿箱中, 对自制干储一体试验仓内高含水率玉米通风干燥过程中温湿度变化进行数值模拟及试验分析, 探究不同因素对玉米粮堆通风干燥过程中热湿传递的影响, 并进行中试试验, 得出以下结论:

1) 基于局域热非平衡理论, 考虑玉米呼吸热, 构建了玉米粮堆通风过程中热湿传递模型, 能够有效描述粮仓内玉米通风过程中温湿度分布及变化规律。粮堆空气温度、相对湿度及玉米温度、含水率的模拟值与试验值的相对误差范围分别为 0.7%~15.1%、1.3%~15.4% 和 1.4%~12.1%、0.3%~14.5%, 平均值分别为 5.5%、8.9% 和 4.8%、6.5%。

2) 高含水率玉米在通风过程中, 玉米的含水率及温度分布均存在不均匀性, 靠近通风笼的粮食含水率及温度变化较快。综合考虑不同条件下玉米温度和含水率的变化, 适宜的通风条件为空气相对湿度低于 75%、通风风速 0.09~0.23 m/s, 风温随大气条件而定。

3) 通风干燥中试试验玉米含水率的模拟值与试验值的相对误差范围为 1.3%~16.7%, 平均值为 4.4%, 进一步验证了构建模型的实用性。玉米通风干燥的单位能耗为 890.2 kJ/kg, 干燥成本为 23.9~34.2 元/t, 与品质指标一起表明了高含水率玉米通风干燥的可行性。为改善粮堆温湿度的不均匀性, 实际生产中建议进行换向通风和粮食循环。

[参 考 文 献]

- [1] 国家统计局. 年度数据[R/OL]. [2023-07-01]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>.
- [2] 国家统计局. 国家统计局关于 2021 年粮食产量数据的公告[EB/OL][2021-12-06] http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202112/t20211206_1825058.html.
- [3] 肖乐, 李家馨, 葛亮, 等. 面向粮情决策支持的知识图谱构建研究[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(10): 29-37.
- [4] XIAO Le, LI Jiabin, GE Liang, et al. Knowledge graph construction for decision support of grain situation[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(10): 29-37. (in Chinese with English abstract)
- [5] QIAO F B. The impact of mechanization on crop production in China[J]. *Applied Economics*, 2023, 55(15): 1728-1741.
- [6] 刘丹妮. 对吉林省公主岭市万欣农业专业合作社发展的研究[J]. *粮食问题研究*, 2018(2): 19-23.
- [7] LIU Danni. Study on the development of Wanxin agricultural professional cooperative in Gongzhuling city, Jilin Province[J]. *Grain Issues Research*, 2018(2): 19-23. (in Chinese with English abstract)
- [8] 翟晓娜, 邵广, 沈瑾, 等. 不同模拟温湿度环境下高水分玉米籽粒的品质变化[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(6): 23-30.
- [9] ZHAI Xiaona, SHAO Guang, SHEN Jin, et al. Quality changes of high-moisture corn kernels under different simulated temperature and humidity[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2020, 35(6): 23-30. (in Chinese with English abstract)
- [10] 郑祥贵, 朱松美. 太阳能加热、低温通风干燥仓: 201410253221. X [P]. 2015-11-04.
- [11] 田琳, 曹阳, 杨思成, 等. 旋转通风干燥仓高水分玉米降水试验研究[J]. *粮油食品科技*, 2020, 28(2): 120-124.
- [12] TIAN Lin, CAO Yang, YANG Sicheng, et al. Experimental study of high moisture corn dewatering in rotating air drying barn[J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2020, 28(2): 120-124. (in Chinese with English abstract)
- [13] 朱广飞, 白岩松, 王松林, 等. 玉米干储一体仓气流场仿真分析与优化[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(S1): 381-390.
- [14] ZHU Guangfei, BAI Yansong, WANG Songlin, et al. Simulation analysis and optimization of airflow field in integrated silo for corn drying and storage[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(S1): 381-390. (in Chinese with English abstract)
- [15] 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.
- [16] ZHANG Shuyuan, ZHANG Xiangxiang. Research on temperature and humidity of high-moisture corn grain piles in underground grain silos after grain cold and ventilation[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2021, 12(22): 8898-8905. (in Chinese with English abstract)
- [17] IGUAZ A, ARROQUI C, ESNOZ A, et al. Modelling and simulation of heat transfer in stored rough rice with aeration[J]. *Biosystems Engineering*, 2004, 89(1): 69-77.
- [18] EPSTEIN A, LUBITZ W, DINEEN G, et al. Performance evaluation of a non-equilibrium model for low temperature grain drying and simulation of seasonal dryer operation[J]. *Drying Technology*, 2022, 40(5): 835-851.
- [19] 张忠杰, 李琼, 杨德勇, 等. 准静态仓储粮堆温度场的 CFD 模拟[J]. *中国粮油学报*, 2010, 25(4): 46-50.
- [20] ZHANG Zhongjie, LI Qiong, YANG Deyong, et al. Temperature field simulation of stored bulk grain by CFD method[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2010, 25(4): 46-50. (in Chinese with English abstract)
- [21] 刘文磊. 静态储藏下玉米粮堆热湿耦合的数值模拟与实验

- 研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2020.
- LIU Wenlei. Numerical Simulation and Experimental Study on Coupled Heat and Moisture of Corn Pile During Static Storage[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2020. (in Chinese with English abstract)
- [15] 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 Yuancheng, DUAN Haifeng, ZHANG Lailin. 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. (in Chinese with English abstract)
- [16] 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.
- WANG Yuancheng, YU Hai, YANG Kaimin, et al. Numerical simulation of coupled heat and moisture transfer and yellowing of stored rice during storage in silo[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(4): 297-307. (in Chinese with English abstract)
- [17] GASTON A, ABALON R, BARTOSIK R E, et al. Mathematical modeling of heat and moisture transfer of wheat stored in plastic bags (silo bags)[J]. Bio Systems Engineering, 2009, 104: 72-85.
- [18] BADRUDDIN IRFAN ANJUM. Thermal non-equilibrium in porous annulus: A new finite element solution technique[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2020, 45(2): 1279-1292.
- [19] 罗松. 基于 CFD 对垂直通风猪舍气流场与温度场的数值模拟及优化研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2020.
- LUO Song. Numerical Simulation and Optimization Research of Airflow Field and Temperature Field in a Vertical Ventilated Piggery Based on CFD[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2020. (in Chinese with English abstract)
- [20] 俞超, 徐剑, 杨威, 等. 基于相似原理的基板玻璃铂金通道澄清物理模拟试验研究[J]. 玻璃, 2024, 51(3): 8-13.
- YU Chao, XU Jian, YANG Wei, et al. Physical simulation experimental research on clarification of platinum channel on substrate glass based on similarity principle[J]. Glass, 2024, 51(3): 8-13. (in Chinese with English abstract)
- [21] 王远成, 杨开敏, 杨君. 表面辐射对部分填充吸湿性多孔介质的封闭腔体内热湿耦合传递的影响[J]. 化工学报, 2015, 66(S1): 130-137.
- WANG Yuancheng, YANG Kaimin, YANG Jun. Effects of thermal radiation on natural convection heat and moisture transfer in rectangular enclosures partially filled with hygroscopic porous medium[J]. CIESC Journal, 2015, 66(S1): 130-137. (in Chinese with English abstract)
- [22] 李长友. 粮食干燥传递和转换特征及其理论表达[J]. 农业工程学报, 2018, 34(19): 1-8.
- LI Changyou. Theoretical analysis of exergy transfer and conversion in grain drying process[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(19): 1-8. (in Chinese with English abstract)
- [23] 曹崇文, 朱文学. 农产品干燥工艺过程的计算机模拟[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 191-192.
- [24] BARRETO A A, ABALONE R, GASTON A. Mathematical modelling of momentum, heat and mass transfer in grains stored in silos. part i: Model development and validation[J]. Latin American Applied Research, 2013, 43(4): 377-384.
- [25] 李兴军, 吴子丹. 粮食平衡水分理论与实践[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2022.
- [26] 王振华. 仓储粮堆湿热传递过程的数值模拟与试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
- WANG Zhenhua. Numerical Simulation and Experimental Study on Heat and Mass Transfer of Stored Grain Pile[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [27] 陈佩丽, 宋达, 邓金林, 等. 材料孔隙率测试方法的研究[J]. 分析测试技术与仪器, 2023, 29(4): 347-351.
- CHEN Peili, SONG Da, DENG Jinlin, et al. Study on porosity test method of materials[J]. Analysis and Testing Technology and Instruments, 2023, 29(4): 347-351. (in Chinese with English abstract)
- [28] KUSINSKA E, KORNACKI A. Testing of a mathematical model of grain porosity[J]. Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa, 2008, 8a: 112-117.
- [29] 王小萌, 吴文福, 尹君, 等. 玉米粮堆霉变发热过程中的温湿度场变化规律研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(3): 268-273.
- WANG Xiaomeng, WU Wenfu, YIN Jun, et al. Research on temperature and humidity field change during corn bulk microbiological heating[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(3): 268-273. (in Chinese with English abstract)
- [30] 尹君. 小麦粮堆多场耦合模型及揭露预测研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- YIN Jun. Research on Multi-fields Coupling Model of Wheat Grain and Condensation Prediction[D]. Changchun: Jilin University, 2015. (in Chinese with English abstract)
- [31] KOCABIYIK H, AKTAS T, KAYISOGLU B. Porosity rate of some kernel crops[J]. Journal of Agronomy, 2004, 3(2): 76-80.
- [32] 朱广飞. 油茶籽堆沤、储藏品质及通风湿热传递模拟研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2020.
- ZHU Guangfei. Quality of Camellia Oleifera Seeds During Fresh-stacking and Storage and Heat and Mass Transfer Simulation During Ventilation[D]. Beijing: China Agricultural University, 2020. (in Chinese with English abstract)
- [33] SUTHERLAND W L. The viscosity of gases and molecular force[J]. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 2009, 36(223): 507-531.
- [34] 李云飞, 葛克山. 食品工程原理[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2002.
- [35] 赵哲, 袁越锦, 李林凤, 等. 果蔬类多孔介质干燥传质过程的分子动力学模拟[J]. 农业工程学报, 2023, 39(7): 285-294.
- ZHAO Zhe, YUAN Yuejin, LI Linfeng, et al. Molecular dynamics simulation of the mass transfer process for the during fruits and vegetable porous media[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(7): 285-294. (in Chinese with English abstract)
- [36] 刘立意, 汪雨晴, 赵德岩, 等. 农户用机械通风钢网式小麦干燥储藏仓的气流场分析[J]. 农业工程学报, 2020,

- 36(2): 312-319.
LIU Liyi, WANG Yuqing, ZHAO Deyan, et al. Analyzing airflow in dry grain storage silo with ventilation using CFD[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(2): 312-319. (in Chinese with English abstract)
- [37] 王振文, 吴敏, 徐新民, 等. 热泵烘房结构及参数优化仿真设计[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(S1): 464-475.
WANG Zhenwen, WU Min, XU Xinmin, et al. Optimal simulation design of structure and Parameter in heat pump drying room[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(S1): 464-475. (in Chinese with English abstract)
- [38] 陈思羽, 吴文福, 徐岩, 等. 玉米果穗在自然通风过程中水分迁移的动力学分析[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(11): 277-282.
CHEN Siyu, WU Wenfu, XU Yan, et al. Dynamics analysis on water migration of corn ear during natural ventilation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2016, 32(11): 277-282. (in Chinese with English abstract)
- [39] 谢奇珍, 朱广飞, 赵玉强, 等. 一种自然通风与机械通风相结合的智能储粮仓: CN202110474519.3[P], 2022-06-10.

Simulation and experiment of heat and moisture transfer during ventilated drying process in maize grain pile

WU Shuaiqiang¹, REN Guangyue¹, ZHANG Yongli^{2,3}, ZHU Guangfei^{2,3*}, BAI Yansong⁴, SHI Jianfang^{2,3},
XIE Qizhen^{2,3}, SHAO Guang^{2,3}, DUAN Xu^{1*}

(1. School of Food and Biotechnology, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China; 2. Academy of Agricultural Planning and Engineering, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China; 3. Key Laboratory of Agro-Products Primary Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100121, China; 4. School of Mechanical Engineering and Automation, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China)

Abstract: This study aims to accurately predict the distribution of heat and moisture in maize piles during ventilated drying. Taking the maize pile within the silo as the subject, the heat and moisture transfer model was established to simulate the ventilated drying of the corn. A systematic investigation was also implemented to clarify the suitable ventilation conditions. The heat was then released by maize respiration, according to the local thermal non-equilibrium equation. The experiment was carried out on the integrated silo of grain drying and storage using COMSOL Multiphysics. An experiment was conducted on the maize pile in the silo, with specific conditions, including air velocity, air temperature and relative humidity. The simulation was focused on the moisture content, temperature distribution of maize and temperature, humidity distribution of air in the maize pile. The results showed that the heat and moisture transfer model effectively simulated the ventilated drying of maize pile in the silo. The relative errors between the simulated and experimental values of maize temperature and moisture content at four points within the silo ranged from 1.4%-12.1% and 0.3%-14.5%, and the average relative errors were 4.8% and 6.5%, respectively. Similarly, the relative errors between the simulated and experimental values of air temperature and air relative humidity within the silo were 0.7%-15.1% and 1.3%-15.4%, respectively, and the average relative errors were 5.5% and 8.9%, respectively. Notably, there was the unevenness of maize in the silo at the initial stage of maize ventilation. The inner layer of maize was experienced the higher rates of heating and drying. The higher air velocity resulted in the increased airflow per unit time. For example, the maximum difference in the moisture content reached 0.03 g/g along the ventilation direction. However, the heating and drying rates of maize were gradually reduced, as the ventilation progressed, leading to a decrease in the unevenness of maize pile. The equilibrium temperature of maize was then reached after 25 h, while the approximate equilibrium moisture content was reached after 60 h. The air temperature rose rapidly within the first hour of ventilation, followed by a slow increase to nearly 25 °C. The humidity initially increased and then decreased, where the rate of decline was gradually slowed down until equilibrium was reached. The cloud map analysis revealed that there was a significant difference in the area near the silo wall and the overall, indicating the need to optimize the silo and ventilation structure. The air velocity had also enhanced the heating and drying rate. But after reaching 0.16 m/s, there was a further increase in the air velocity without considering the change rate of corn. The relative humidity shared little effect on the trend and value of maize temperature. But the relative humidity decreased the drying rate, whereas increased the equilibrium moisture content of corn. The higher air temperatures resulted in a higher drying and heating rate with a lower content of equilibrium moisture. According to the maize temperature and moisture content under different conditions, the combination of ventilation parameters was achieved in the air relative humidity less than 75%, air velocity of 0.09-0.23 m/s, and air temperature with atmospheric conditions. The relative errors between the simulated and experimental values of the moisture content of maize in the pilot test of ventilated drying ranged from 1.3% to 16.7%, with an average value of 4.4%, indicating the further practicality of the constructed model. Then the moisture contents of the maize in the innermost, middle, and outermost layers approached the safe moisture content around 130, 180, and 250 h, respectively. The unit energy consumption of ventilated drying of maize was 890.2 kJ/kg, which was remarkable for energy saving. The quality indexes also showed the feasibility of ventilated drying and storage of high-moisture corn. Therefore, change-over ventilation and grain circulation were recommended in practical production, in order to improve the unevenness of temperature and humidity of the maize pile. These findings can also provide valuable theoretical support to optimize the corn-ventilated drying.

Keywords: maize; heat and moisture transfer; simulation; moisture content; ventilated drying