DOI:10.13652/j.spjx.1003.5788.2024.60069

基于COMSOL多物理场的多孔介质缓苏干燥模拟

刘丁通[1] 刘泽钰[2] 刘绍东[2,3] 冯 太[1,2]

（1. 山东科技大学储能技术学院清洁能源实验室，山东 青岛 266590；2. 中科瑞能（山东）科技有限公司，山东 济南 250301；3. 山东好汉种业科技有限公司，山东 济南 250101）

摘要：[**目的**]探究缓苏过程中温度场和湿度场的变化规律。[**方法**]将玉米粒和粮堆分别作为多孔介质，利用COMSOL Multiphysics传热模块中的热湿流动接口进行多物理场耦合。[**结果**]5次缓苏6次干燥使玉米粒的相对湿度从22.5%降至4.97%，进行2次缓苏3次干燥后玉米粒的平均相对湿度降低至11%，干燥效果相较无缓苏干燥提高了9.5%。常温通风缓苏策略在减少一次干燥的前提下获得了相同的效果。[**结论**]缓苏策略通过减小水分梯度，有效提高了干燥速率，缩短了总的热风干燥时间，但干燥和缓苏时间增加。风干仓中常温通风缓苏策略的应用，可进一步减少干燥后期所需的缓苏次数和时间。

关键词：玉米干燥；多孔介质；缓苏；粮堆；多物理场；COMSOL

Simulation of tempering drying of porous media based on COMSOL multi-physics field

LIU Dingtong[1] *LIU Zeyu*[2] *LIU Shaodong*[2,3] *FENG Tai*[1,2]

（1. *Clean Energy Lab*, *College of Energy Storage Technology*, *Shandong University of Science and Technology*, *Qingdao*, *Shandong* 266590, *China*; 2. *Zhongke Ruineng* (*Shandong*) *Technology Co.*, *Ltd.*, *Jinan*, *Shandong* 250301, *China*; 3. *Shandong Haohan Seed Industry Technology Co.*, *Ltd.*, *Jinan*, *Shandong* 250101, *China*）

Abstract: [**Objective**] To investigate the variation laws of temperature and humidity fields during the tempering process. [**Methods**] Using corn kernels and grain piles as porous media, perform multi-physics field coupling using the heat and moisture flow interface in the COMSOL Multiphysics heat transfer module. [**Results**] Five tempering and six drying processes reduced the relative humidity of corn kernels from 22.5% to 4.97%, and after two tempering and three drying processes, the average relative humidity of corn kernels decreased to 11%. The drying effect improved by 9.5% compared to no tempering drying. The same effect was obtained by the strategy of tempering at normal temperature with less drying time. [**Conclusion**] The tempering strategy effectively improves he drying rate by reducing the moisture gradient, shortening the overall hot air drying time. However, the drying and slow fermentation times are increased. The application of ambient temperature ventilation slow fermentation strategies in the air-drying chamber can further reduce the number and duration of slow fermentation sessions required in the later stages of drying.

Keywords: corn drying; porous media; tempering; grain pile; multi-physics field; COMSOL

中国每年的粮食损耗率高达8%，远高于其他粮食生产大国3%的损耗率[1]，主要的损耗原因是粮食干燥程度未达到国家粮食贮藏标准。目前，中国粮食收获后需要晾晒、脱粒入库，中间环节多，人工成本高，粮食损耗大，如果遇到阴雨天气，霉变的概率大幅增加[2−3]，由此造成的损失率高达7%~11%[4]，经济高效的粮食干燥设备及配套设施的研发设计成为了粮食生产全程机械化打通“最后一公里”的“卡脖子”技术。

玉米粒是一种典型的多孔介质[5]。陶斌斌等[6−8]建立了玉米干燥二维单组分模型，并研究了玉米的传热和传质特性。贾灿纯等[9]利用二维有限元方法建立了玉米多组分模型，研究了干燥过程中玉米内部的温度和水分分布情

基金项目：山东省自然科学基金资助项目（编号：ZR2023ME186）；济南市农业应用技术创新项目（编号：CX202203）
通信作者：冯太（1991—），男，山东科技大学讲师，博士。E-mail：fengtai@sdust.edu.cn
收稿日期：2024-03-18 **改回日期：**2024-07-02

况。毕清跃等[10−11]构建了玉米籽粒三维多组分模型,并利用COMSOL对玉米内部的温度场和浓度场进行了模拟分析。

为了预测粮堆的温度场和湿度场变化规律,马春云等[1,12−14]对静态储粮进行了模拟研究;Zhang等[15−16]将粮堆作为多孔介质进行通风干燥;Zhou等[17]将堆叠玉米作为双多孔介质建立三维模型并进行了干燥;欧文妍[18]将粮食干燥层作为多孔介质建立了烘干机仿真模型;孟斐[19]将玉米烘干机内的玉米区域作为多孔介质建立了热量传递和水分迁移的数学模型。

干燥过程中,玉米籽粒内部形成的温度梯度和湿度梯度容易导致裂纹,通过缓苏可以均衡玉米籽粒内部的水分。贾灿纯等[20]利用有限元法对缓苏过程中玉米内部的含水量进行了模拟研究,发现玉米籽粒中心含水量下降而四周含水量上升。陈兴付等[21]利用COMSOL建立了玉米籽粒的缓苏干燥数学模型,玉米籽粒内部最大的水分梯度出现在热风干燥5~10 min时。

目前,有关玉米干燥的研究较多,但关于干燥过程中玉米粒的湿热场分布还有待进一步研究。此外,在玉米缓苏干燥过程中多物理场的研究较少,粮堆在干燥过程中容易出现过度干燥及水分分布不均匀等问题[22]。因此,研究拟采用多物理场数值模拟的方法对玉米粒及粮堆进行缓苏干燥,探究温度场和湿度场的变化规律,旨在为多孔介质缓苏干燥提供参考依据。

1　干燥模型的建立与验证

1.1　建立干燥模型

1.1.1　物理模型　多孔介质的干燥过程是一个多物理场问题[23],在COMSOL Multiphysics 6.0多物理场仿真软件中,考虑流体可压缩性、精度要求、计算机性能和仿真时间限制,以及k-ε模型所具有的诸多优点,选择标准k-ε模型[18]作为湍流模型,将玉米粒和粮堆分别作为多孔介质进行模拟。在空气中的水分输送接口中,吸湿性多孔介质采用毛细管模型并设置为扩散模式。在湿空气传热接口中将含湿多孔介质的多孔基体定义为固相属性。通过传热模块的热湿流动接口实现流体流动中的湍流、化学物质传递模块中的水分传递、传热模块中湿空气的换热的耦合,可以对整个系统的热湿传递过程进行全面深入的模拟和分析。其初始条件和相关参数见表1[6,24−25]。

由于玉米干燥过程是复杂的,而理论方程为理想条件下提出的,因此作出如下假设[11,18]:

(1)理想化玉米粒,将多组分模型的各组分以及粮堆分别作为均匀各向同性物质。

(2)在干燥初期玉米粒和粮堆内部的温度分布和湿度分布均匀一致。

(3)不考虑玉米粒的变形和接触导热。

(4)假设气流为不可压缩气体且不受重力影响。

(5)假设风干仓中玉米粒均匀分布,孔隙率不变。

根据以上假设,在COMSOL中建立简化二维模型,如图1所示。将玉米粒的一个截面假设为一个长10 mm,宽7 mm的长方形[25],为了减少边界处的干燥缺陷作倒圆角处理。多组分模型按体积分数为9%,21%,66%,4%将玉米粒分为四部分:胚、软质胚乳、硬质胚乳和表皮,并分别添加材料属性(见表2)[11]。其中:W_C为玉米含水量,是相对湿度的插值函数;M为含水率,初始值为0.3,假定扩散系数不变,进行定性模拟分析。

表1　干燥条件和相关参数

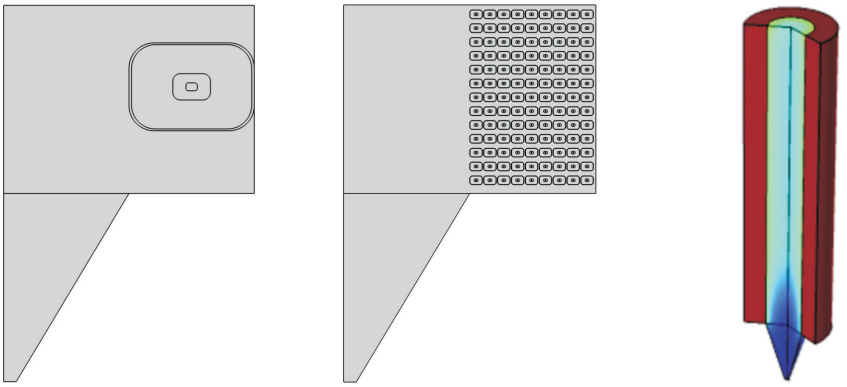
Table 1　Drying conditions and related parameters

符号	数值	单位	描述
T_0	300	K	环境温度
U_0	1.64	m/s	流速
R_{HE}	4.70	%	环境相对湿度
R_{HC}	22.5	%	谷物相对湿度
Φ_{CK}	0.12		玉米粒孔隙率
P_{CK}	1e−19	m^2	玉米粒渗透率
Φ_{CGP}	0.44		玉米粮堆孔隙率
P_{CGP}	1.91e−9	m^2	玉米粮堆渗透率
K	0.163 6	W/(m·K)	玉米粮堆导热率
C_P	2.223	J/(kg·K)	玉米粮堆热容
ρ	737	kg/m^3	玉米粮堆密度
D	$1e-8\times\exp(-2.8+2\times W_C\div\rho\div\Phi_{CGP})$	m^2/s	玉米粮堆扩散系数

表2　玉米粒材料属性

Table 2　Material properties of corn kernels

部位	扩散系数/($m^2\cdot s^{-1}$)	导热系数/($W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$)	恒压热容/($J\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}$)	密度/($kg\cdot m^{-3}$)
胚	$8.97\times10^{-6}\exp(-3\,020.2/T)M^{1.5}$	0.167	2 010	1 150
软质胚乳	$4.08\times10^{-6}\exp(-2\,506.6/T)M^{1.5}$			
硬质胚乳	$9.65\times10^{-7}\exp(-1\,588.1/T)M^{1.5}$			
表皮	$3.69\times10^{-6}\exp(-3\,559.1/T)M^{1.5}$			



（a）单粒模型　　（b）多粒模型　　（c）风干仓模型

红色区域为装有玉米粮堆的外仓，浅蓝色区域为内仓，深蓝色区域为热风入口

图 1　模型验证结果

Figure 1　Model verification results

对玉米风干仓进行简化处理，在COMSOL中利用二维轴对称组件进行建模，可以通过二维建模得到三维模型的结果，这样可以减小模拟的难度，节省模拟时间。所建立的模型如图1(c)所示，热风从底部入口进入，经内仓与外仓间密布的通风孔流向外仓，最终从外仓侧壁的通风孔流出。

1.1.2　数学模型　傅里叶定律和热力学第一定律可用于计算玉米堆干燥过程中的传热[26]。

玉米干燥过程中的传热方程[9,26]：

$$\nabla\cdot(\lambda\nabla T)=\rho c_p\frac{\partial T}{\partial\tau}-\rho h_{fg}\frac{\partial M}{\partial\tau},\tag{1}$$

式中：

h_{fg}——水汽化潜热，J/kg。

初始条件：

$$\tau=0,T=T_0,\tag{2}$$

边界条件：

$$-\lambda\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)=h_t(T_w-T_a)+\rho[h_{fg}+c_V(T-T_w)]\frac{V}{A}\frac{\partial M}{\partial\tau},\tag{3}$$

式中：

h_t——对流传热系数，W/(m²·K)；

T_w——物料表面温度，℃；

T_a——物料周围流体温度，℃；

V——玉米的体积，m³；

A——玉米的表面积，m²。

玉米干燥过程中的传质方程[9,26]：

$$\frac{\partial M}{\partial\tau}=\frac{\partial}{\partial x}\left(D_i\frac{\partial M}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(D_i\frac{\partial M}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(D_i\frac{\partial M}{\partial z}\right),\tag{4}$$

初始条件：

$$\tau=0,M=M_0,\tag{5}$$

边界条件：

$$-D\left(\frac{\partial M}{\partial x}+\frac{\partial M}{\partial y}+\frac{\partial M}{\partial z}\right)=h_m(M-M_e),\tag{6}$$

式中：

h_m——对流传质系数，m/s；

D——玉米籽粒的有效扩散系数，m²/s；

M_e——物料周围流体含水率，%。

1.2　模型的验证

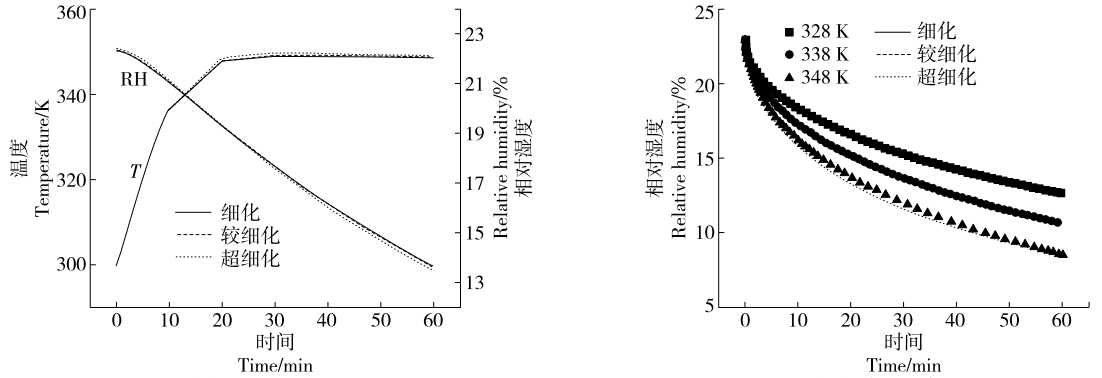
针对不同网格密度进行模拟研究，目的是选出合适的网格密度以及验证模型的可行性。表3列出了所划分网格的单元划分和最小单元质量情况。单粒模型的最小单元质量均＞0.01，多粒模型的最小单元质量均＞0.1，认为该模型的网格质量符合要求。

表 3　各模型网格情况

Table 3　Grid situation of each model

模型	顶点单元数	边界单元数	域单元数	最小单元质量
单粒	39	750	11 715	0.046 9
多粒	3 751	43 052	837 182	0.141 5
风干仓	8	1 057	21 908	0.168 0

由图2(a)可知，玉米粒温度随时间缓慢上升，10 min后接近风温，与陶斌斌等[6,9,11]的结论相符，验证了模型的准确性。经过10 min的干燥，玉米粒的相对湿度从22.5%下降至14.2%，与微波干燥下的相近[26]，湿度的变化幅度较大且较为接近，差距为干燥方式的不同，可以验证该模型的可行性。同时，3种网格密度下，玉米粒的温度和相对湿度变化情况一致且偏差较小，因此选取较细化的网格密度进行后续模拟。



（a）网格无关性验证　　（b）模型可靠性验证

图2　模型验证结果

Figure 2　Model verification results

将玉米粮堆的平均相对湿度值与Zhang等[27]的数据进行对比，如图2(b)所示。在低温(328 K)和高温(348 K)条件下，预测不太准确。由于机型不同，风干仓热风入口的位置决定了玉米受热不均匀，导致误差的产生。相对湿度的最大相对误差＜5%，且趋势一致，验证了模型的可靠性。

2　结果与讨论

2.1　玉米单粒缓苏干燥

为提高籽粒内部水分扩散速率，通常采用缓苏策略[28]。缓苏的主要作用是使玉米籽粒水分梯度减小，降低其内部的应力，避免糊化、爆腰和裂纹[21]，保证玉米品质。

由图3可知，5次缓苏6次干燥后，玉米的相对湿度比无缓苏工况更低，最终将玉米的相对湿度从22.5%降低到4.97%，相比无缓苏工况下提高了3.7%，但随着缓苏次数的增加，干燥难度变大，相对湿度降低，缓苏效果也会减弱。因此，缓苏干燥的干燥速率更高，可缩短玉米热风干燥时间，但由于增加了缓苏过程延长了总的干燥时间。

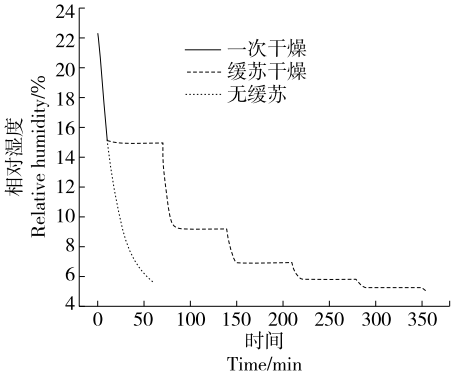


图3　缓苏干燥模拟结果

Figure 3　Simulation results of tempering drying

由图4可知，一次缓苏后玉米的相对湿度从干燥10 min后的不均匀状态变成了基本均匀，平衡在15%左右。由于左侧进风导致了玉米粒的相对湿度左侧比右侧稍低。4次缓苏前，玉米粒各处的初始相对湿度不均匀，缓苏结束时玉米各处的相对湿度均在5.795%左右，缓苏仍然有效，但由于此时相对湿度差较小，因此在干燥后期可以不采用缓苏策略，或进行较短时间的缓苏，即可达到很好的干燥效果。5次缓苏6次干燥后，玉米的相对湿度更低，干燥效果更好。

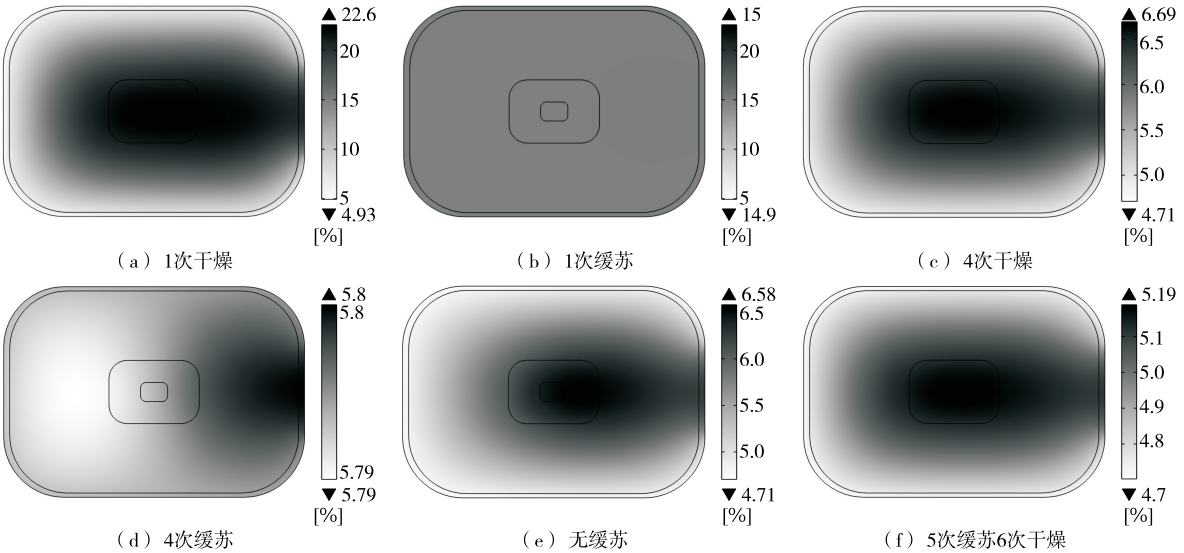
2.2　玉米多粒缓苏干燥

由图5可知，是否进行缓苏对玉米粒整体的温度影响较小，玉米进行缓苏的温度略低于无缓苏的；相对湿度变化较大，无缓苏干燥结束玉米粒的平均相对湿度为12%，而进行2次缓苏3次干燥后，玉米粒的平均相对湿度降低到11%，干燥效果提高了9.5%。

选择3号玉米粒的原因是该处的干燥效果最差，其为相对湿度最高处。由1、2、3号玉米粒的温度和相对湿度变化可知，靠近热风入口的玉米粒的升温速度最快，相对湿度降低速度也最快；在玉米堆中间的玉米粒升温速度和相对湿度降低速度居中；热风出口处的玉米粒升温速度最慢，干燥1 h后均未能达到热风温度，湿度堆积到出口处玉米粒，致使其相对湿度居高不下。

由图6可知，随着缓苏时间的增加，温度和相对湿度逐渐变得更加均匀，说明缓苏过程有效促进了玉米内部水分的均匀分布和温度的平衡，从而达到了预期的缓苏目的，有助于改善玉米的贮藏品质以延长其保质期。

由图7(a)可知，经过缓苏处理，玉米粒内部的水分在梯度作用下发生了扩散。这种扩散过程使得整体的相对湿度逐渐趋于均衡。相对湿度最小值从4.74%提高至8.98%，说明在缓苏过程中，较低湿度的区域得到了水分的补充，从而提高了整体的湿度水平。这种变化对于谷

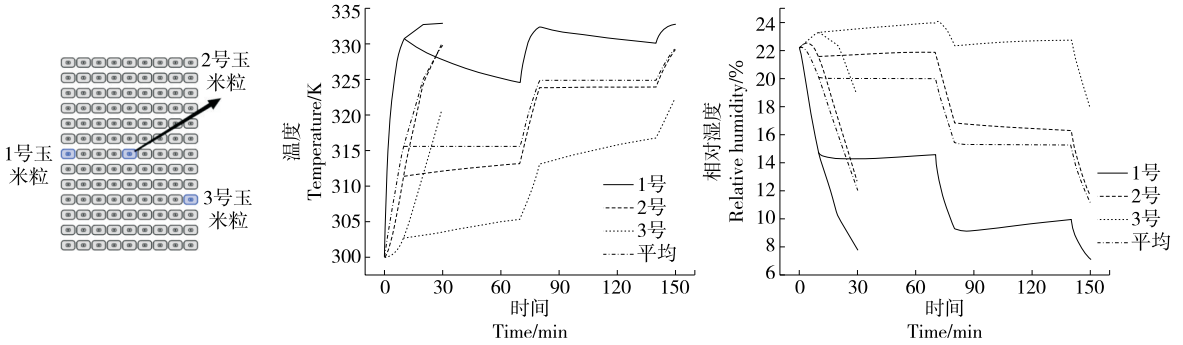


（a）1次干燥　（b）1次缓苏　（c）4次干燥

（d）4次缓苏　（e）无缓苏　（f）5次缓苏6次干燥

图 4　缓苏干燥相对湿度场云图

Figure 4　Cloud chart of relative humidity field during tempering drying



（a）玉米粒位置　（b）玉米粒温度变化　（c）玉米粒相对湿度变化

图 5　不同位置玉米粒缓苏干燥

Figure 5　Tempering drying of corn kernels at different locations

物的贮藏和品质保持具有积极的意义，有助于减少水分蒸发和防止谷物干燥过度。

由图 7(b)可知，靠近热风入口的玉米最先接触热风，相对湿度降低速度最快；经过缓苏后，相对湿度低的玉米数量更多，进行缓苏后的最大相对湿度超过 22% 的数量更少，最大相对湿度有所降低，解决了部分玉米的湿度堆积现象，但仍然存在出口部分玉米干燥困难的问题，结合图 5，应使玉米粒循环流动以及设置多个角度的热风入口。

2.3　粮堆缓苏干燥

图 8(a)为多孔介质粮堆模型以 1.64 m/s 的热风速度不进行缓苏以及进行 5 次不通风缓苏和 6 次热风干燥两种工况下粮堆的平均相对湿度变化情况。缓苏过程中内仓的空气无法流通，由于湿度梯度的影响，水分向内仓空气迁移，导致内仓湿度变大，对缓苏后的干燥过程产生了影响，因此，两种工况下粮堆的相对湿度差异较小。缓苏过程粮堆的平均相对湿度变化较小，结合图 5(b)可知，粮堆不同位置处相对湿度差别较大，且缓苏过程是水分的迁移过程，水分仍停留在风干仓中，因此进行常温通风缓苏带走了析出的水分。图 8(b)为在 1.64 m/s 的条件下不进行缓苏以及进行 5 次高温干燥和常温通风缓苏的相对湿度变化情况，进行 5 次缓苏干燥，干燥总时间为 50 min，与无缓苏干燥 60 min 的相对湿度相差较小，体现了缓苏干燥的优势，即减少干燥时间，但增加了缓苏时间，总的干燥时间增加。相比于不通风缓苏来说，进行常温通风缓苏可以减少一次干燥的时间，也能达到 6 次干燥时间相近的效果。因此可以通过一拖多来达到缓苏干燥的目的，同时提高干燥效率和能源利用率。

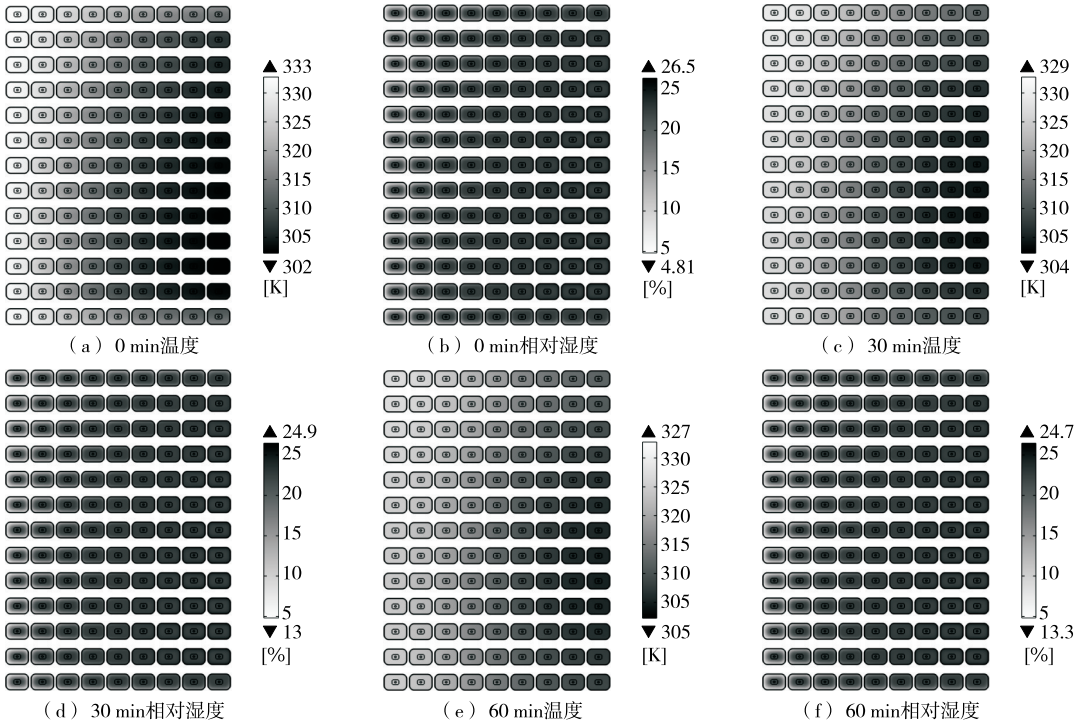


图6　多粒1次缓苏温度场和相对湿度场云图

Figure 6　Cloud chart of temperature field and relative humidity field of multi-grain first tempering

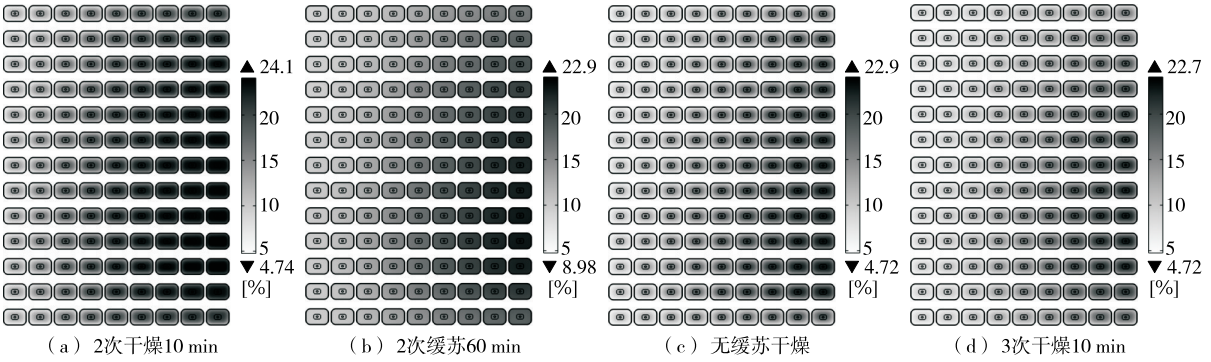


图7　多粒2次缓苏和3次干燥相对湿度场云图

Figure 7　Relative humidity field cloud chart of the second tempering and third drying of multiple grains

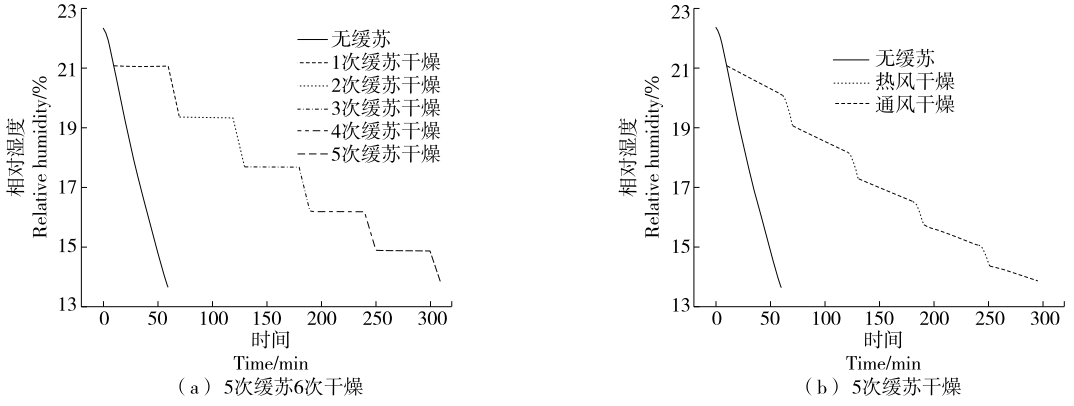


图8　粮堆缓苏干燥相对湿度变化

Figure 8　Change of relative humidity of grain pile during tempering drying

3 结论

缓苏策略显著提升了玉米籽粒内部水分的扩散速度。此策略通过有效降低水分梯度和内部应力，有效防止了玉米的爆腰和裂纹现象，从而确保了玉米的高品质。在5次缓苏与6次干燥过程中，玉米粒的相对湿度从22.50%下降至4.97%。而采用2次缓苏与3次干燥后，玉米多粒的平均相对湿度也大幅降低至11%，相较于无缓苏的干燥方法提升了9.5%。

尽管干燥效果随着缓苏次数的增加而有所减弱，但缓苏处理确实促进了谷物内部水分在梯度作用下的扩散。这种扩散过程使得整个谷物体系的相对湿度逐渐达到均衡状态。缓苏过程不仅优化了干燥效果，还显著缩短了热风干燥时间，进一步提高了干燥效率。减少水分蒸发和防止过度干燥有助于维持玉米的优良品质，减少贮藏过程中的损耗。此外，风干仓模型中常温通风缓苏策略的应用，进一步减少了干燥后期所需的缓苏次数和时间，为玉米的干燥处理提供了更为高效和经济的解决方案。但对玉米干燥过程具体的缓苏策略有待研究，应根据缓苏程度设置干燥条件以及缓苏时间。

参考文献

[1] 马春云 . 非人工干预条件下玉米粮堆湿热场数值模拟及其规律研究[D]. 沈阳: 沈阳师范大学, 2017: 1-52.
MA C Y. Numerical simulation of heat and humidity on stored corn without manual intervened[D]. Shenyang: Shenyang Normal University, 2017: 1-52.

[2] 张欣达, 李娜, 赵世瑾, 等 . 免疫亲和注射器微萃取—高效液相色谱串联质谱法测定牛奶中玉米赤霉醇类化合物[J]. 食品与生物技术学报, 2023, 42(5): 29-34.
ZHANG X D, LI N, ZHAO S J, et al. Determination of zeranols in milk using immunoaffinity microextraction in a packed syringe and high performance liquid chromatograph-tandem mass spectrometry[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2023, 42(5): 29-34.

[3] 王云云, 石广革, 孙嘉笛, 等 . 玉米赤霉烯酮和脱氧雪腐镰刀菌烯醇双特异性抗体的制备及检测方法构建[J]. 食品与生物技术学报, 2023, 42(11): 1-10.
WANG Y Y, SHI G G, SUN J D, et al. Preparation of bispecific antibodies against zearalenone and deoxynivalenol and construction of detection methods[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2023, 42(11): 1-10.

[4] 位艳芳 . 玉米干燥热泵技术应用及干燥塔角状盒优化设计研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2018: 1.
WEI Y F. Research on the application of corn drying heat pump technololgy and the optimization design of the angle box structure of the drying tower[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2018: 1.

[5] 朱靖宇, 王启民 . 玉米干燥传热传质理论及干燥工艺发展趋势分析[J]. 黑龙江粮食, 2022(5): 78-80.
ZHU J Y, WANG Q M. Analysis of heat and mass transfer theory and drying process development trend of corn drying[J]. Heilongjiang Liangshi, 2022(5): 78-80.

[6] 陶斌斌 . 多孔介质对流干燥传热传质机理的研究及其数值模拟[D]. 天津: 河北工业大学, 2004: 30-46.
TAO B B. The study and simulation of heat and mass transfer's mechanism for porous media's drying[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2004: 30-46.

[7] 袁越锦, 杨彬彬, 徐英英, 等 . 非固结多孔介质干燥的双尺度孔道网络模型与模拟[J]. 工程热物理学报, 2010, 31(2): 302-306.
YUAN Y J, YANG B B, XU Y Y, et al. Dual-scale pore network simulation on drying of unconsolidated porous media[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(2): 302-306.

[8] ZHANG Z, ZHANG S, SU T, et al. Cortex effect on vacuum drying process of porous medium[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013, 2 013: 120736.

[9] 贾灿纯, 曹崇文 . 玉米颗粒内部的二维传热传质过程[J]. 北京农业工程大学学报, 1995, 15(1): 45-51.
JIA C C, CAO C W. Process of two-dimensional heat and mass transfer in corn kernel[J]. Journal of Beijing Agricultural Engineering University, 1995, 15(1): 45-51.

[10] 毕清跃 . 多场耦合的多层玉米籽粒热风干燥特性研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2021: 26-45.
BI Q Y. Multi-field coupled hot air drying characteristics of multilayer corn seeds[D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2021: 26-45.

[11] 金旭, 王晨, 毕清跃, 等 . 玉米热风干燥特性模拟研究[J]. 热科学与技术, 2021, 20(2): 128-133.
JIN X, WANG C, BI Q Y, et al. Simulation of corn drying characteristics with hot air[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2021, 20(2): 128-133.

[12] 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 X M, WU W F, YIN J, et al. Research on temperature and humidity field change during corn bulk microbiological heating[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(3): 268-273.

[13] 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: 17-61.
LIU W L. Numerical simulation and experimental study on coupled heat and moisture of corn pile during static storage [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2020: 17-61.

[14] 丁爱侠, 陈曦 . 基于COMSOL静态储粮玉米粮堆温度场研究[J]. 粮食与油脂, 2023, 36(4): 79-82.

DING A X, CHEN X. Study on temperature field of corn grain pile in static storage based on COMSOL[J]. Cereals & Oils, 2023, 36(4): 79-82.

[15] ZHANG H, LI X, WANG Y, et al. Evaluation and analysis of internal flow field uniformity in grain stack based on multi zone model of porous media[J]. Procedia Engineering, 2017, 205: 2 164-2 170.

[16] 杜传致 . 不同粮食颗粒横向和纵向通风数值模拟和实验研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2019: 32-60.
DU C Z. Numerical simulation and experimental study on orizontal and vertical ventilation of different grains[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2019: 32-60.

[17] ZHOU J, YANG X, ZHU H, et al. Microwave drying process of corns based on double-porous model[J]. Drying Technology, 2019, 37(1): 92-104.

[18] 欧文妍 . 循环式粮食烘干机设计与应用[D]. 广州: 华南农业大学, 2020: 33-48.
OU W Y. Design and application of circulating grain dryer[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2020: 33-48.

[19] 孟斐 . 玉米干燥过程中湿热传递的数值模拟及实验研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2022: 39-56.
MENG F. Numerical simulation and experimental study of moisture heat transfer during corn drying[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2022: 39-56.

[20] 贾灿纯, 李业波, 刘登瀛, 等 . 缓苏过程中玉米颗粒内部水分分布的数学模拟[J]. 农业工程学报, 1996(1): 147-151.
JIA C C, LI Y B, LIU D Y, et al. Mathematics simulation of the moisture content distribution in a corn kernel during tempering [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1996(1): 147-151.

[21] 陈兴付, 陈鹏泉, 杨德勇, 等 . 玉米籽粒缓苏干燥过程动力学分析[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(2): 1-5, 18.
CHEN X F, CHEN P X, YANG D Y, et al. Analysis of drying-temping kinetics for corn kernel[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2017, 32(2): 1-5, 18.

[22] 张德欣, 杨庆询, 刘艳芳 . 黄淮流域高水分玉米就仓干燥技术优化研究[J]. 食品与机械, 2017, 33(3): 134-138, 144.
ZHANG D X, YANG Q X, LIU Y F. Optimization of drying technology for high moisture corn in the Huang Huai Valley [J]. Food & Machinery, 2017, 33(3): 134-138, 144.

[23] 韩琭丛, 金听祥, 张振亚 . 火龙果热泵干燥数值模拟及试验[J]. 食品与机械, 2023, 39(4): 117-122.
HAN L C, JIN T X, ZHANG Z Y. Numerical simulation and experimental study of pitaya during heat pump drying[J]. Food & Machinery, 2023, 39(4): 117-122.

[24] 魏婉华, 牛鑫, 葛蓁, 等 . 一种循环式微波辅助玉米干燥机设计[J]. 农机化研究, 2017, 39(9): 244-248.
WEI W H, NIU X, GE Z, et al. Design for a circular microwave assisted corn dryer[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(9): 244-248.

[25] 魏彦艳 . 多孔介质热泵干燥过程热力学分析[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2021: 39-40.
WEI Y Y. Thermodynamic analysis of drying process of porous media heat pump[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2021: 39-40.

[26] JIN X, WANG C, BI Q, et al. Study on drying characteristics of corn based on 3D model[J]. International Journal of Food Engineering, 2020, 16(8): 20190320.

[27] ZHANG S, KONG N, ZHU Y, et al. 3D model-based simulation analysis of energy consumption in hot air drying of corn kernels[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013 (2): 579452.

[28] 樊梦珂, 陈鹏泉, 刘烨, 等 . 高水分小麦热风干燥后品质的变化[J]. 食品与机械, 2024, 40(2): 139-145, 191.
FAN M K, CHEN P X, LIU Y, et al. Study of quality changes in high moisture wheat after hot air drying[J]. Food & Machinery, 2024, 40(2): 139-145, 191.