

基于装配式周转箱的甘薯气调贮藏环境仿真

Simulation study of controlled atmosphere storage environment
for sweet potatoes using modular turnover boxes

胡汝生 刘寅 孟照峰 张帆 吴飞骏

HU Rusheng LIU Yin MENG Zhao Feng ZHANG Fan WU Feijun

(中原工学院能源与环境学院,河南 郑州 451191)

(School of Energy and Environment, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou, Henan 451191, China)

摘要:目的:减少果蔬盛装、运输及贮藏时的不利因素,以循环、绿色理念为前提设计出一种装配式折叠式塑料周转箱。方法:将甘薯看作长旋转椭球体,以标准化周转箱盛装甘薯并对气调贮藏库进行建模,通过多孔介质模型、组分输运模型、局部非热平衡模型研究愈伤升温、愈伤后降温,以及贮藏阶段货物区的温度、湿度、速度、O₂体积分数、CO₂体积分数分布情况。结果:较佳的愈伤送风温度为40℃,所需时间为5.85 h;较佳的愈伤后降温送风速度为10 m/s,所需时间为8.47 h。送风速度(4.0~6.0 m/s)对O₂、CO₂体积分数分布影响不大;当送风速度为4.5 m/s时,贮藏效果较佳,与目标贮藏条件(12℃,90.00% RH)相比,偏差率依次为1.24%,0.48%。甘薯呼吸热的产生使得货物区内部温度达到目标愈伤温度所需的时间较短,达到目标贮藏温度所需的时间较长,相较于导热,对流换热占主导作用,造成贮藏过程中货物区内部温度与外部温度变化存在滞后。增大送风温度、送风速度分别有利于缩短达到目标愈伤、贮藏温度所需的时间,货物区贮藏甘薯的物理性质以及贮藏量决定了后续升温、降温过程。结论:货物区表面速度场与相对湿度场分布关联性较小,温度场与相对湿度场呈负相关且分布状态相似。送风速度可以改变货物区箱体内部的流体流向,送风速度大小以及箱体内流体流向对货物区内部温度分布影响较大。

关键词:甘薯;周转箱;多孔介质;不均匀系数;数值模拟;

基金项目:河南省重大科技专项(编号:221100320100);中原工学院专项资金项目(编号:K2022TD004, JD202304, GG202216)

作者简介:胡汝生,男,中原工学院科研助理,硕士。

通信作者:刘寅(1974—),男,中原工学院教授,博士。

E-mail:hvacr@126.com

孟照峰(1990—),男,中原工学院讲师,博士。

E-mail:mengzhao Feng325@163.com

收稿日期:2023-05-05 **改回日期:**2024-02-27

贮藏

Abstract: Objective: To mitigate unfavorable factors during the packing, transportation, and storage of fruits and vegetables, a foldable, preassembled turnover box was designed based on the premise of recycling. Methods: Standardized boxes were used to hold sweet potatoes, which were considered long rotating ellipsoids, and the storage environment was modeled. A porous medium model, a species transport model, and a local non-thermal equilibrium model were used to study the temperature, humidity, speed, O₂ volume fraction, and CO₂ volume fraction distributions in the cargo area during the curing warming, post-curing cooling, and storage stages. Results: 40℃ was the optimum curing air supply temperature, and the time required was 5.85 h. 10 m/s was the optimum post-curing cooling air supply speed, and the time required was 8.47 h. The air supply velocity (4.0~6.0 m/s) had little effect on the distribution of O₂ and CO₂ volume fractions. When the air supply velocity was 4.5 m/s, the storage effect was the optimal, with deviation rates of 1.24% and 0.48% compared to the target storage conditions (12℃, 90.00% RH). The generation of respiratory heat in sweet potatoes led to a shorter time for the internal temperature of the cargo area to reach the target curing temperature, while requiring a longer time to reach the target storage temperature. Compared to thermal conduction, convective heat transfer played a dominant role, resulting in a lag in temperature change between the internal and external temperatures of the cargo area during the storage process. Increasing the temperature and air supply velocity facilitated a faster attainment of the desired curing and storage temperatures. The physical characteristics and storage volume of sweet potatoes within the cargo area determined the subsequent warming and cooling processes. Conclusion: The velocity field on the surface of the cargo area exhibits a weak correlation with the distribution of RH, whereas the temperature field demonstrates a negative

correlation with the RH field and exhibits a similar distribution pattern. The air supply velocity can alter the fluid flow direction inside the cargo area box, and both the magnitude of the air supply velocity and the direction of fluid flow inside the box significantly impact on the temperature distribution within the cargo area.

Keywords: sweet potato; turnover box; porous medium; non-uniformity coefficient; numerical simulation; storage

甘薯是旋花科草本植物,生长周期短、易繁殖、耐盐、耐旱,具有很好的栽培适应性^[1]。其富含淀粉、纤维素、维生素、花青素、胡萝卜素、可溶性糖、黄酮类和酚类物质^[2],是优质的保健食品、优秀的工业原料^[3]、重要的粮食和能源作物,可在全球气候的动态变化下确保粮食和营养安全^[4],在100多个国家被作为重要作物种植^[5]。全球甘薯年产量超过1亿t,其中中国作为主要生产国,生产总量占全球的80%^[6]。

气调贮藏是目前国际上使用最普遍、效果最好、最先进的贮藏保鲜技术之一^[7]。甘薯贮藏过程中的腐烂是由物理、生理和微生物等共同作用造成的。甘薯在机械收获、贮藏或运输过程中其根表皮破坏和损伤导致易腐烂^[8-10]。而且农产品在采摘、运输、销售或者贮藏时,常常进行“倒箱”作业,不仅增加了仓储、中转环节的手工劳动,降低了物流效率,增加了物流成本,还易对果蔬造成损伤,降低农产品的营养品质和商品价值^[11]。此外,气调贮藏时,周转箱网眼大小和形状会影响贮藏时果蔬呼吸、散热及与库内气体交换的效率,给予不同果蔬运输、贮藏时的最佳透气有利于保障品质,降低损失。而现有的周转箱不能根据果蔬大小随意调整或更改网眼大小和形状。

研究^[12-14]表明,贮藏时的气流、温度、湿度分布的均匀性会影响果蔬保鲜。目前甘薯的贮藏主要以窖藏为主,存在贮藏期短、贮后品质差等问题^[15]。近年来,关于甘薯贮藏保鲜以及抑芽等领域的研究取得了一定进展^[16]。主要是在特定品种小规模贮藏试验下,研究新技术对保鲜效果及营养方面的影响,新技术、新方法较多,但多数仅停留在实验室阶段且耗费资金较大,不易大规模推广应用。目前对果蔬贮藏库内速度场、温度场、湿度场的研究较多,对气体浓度分布特性研究较少,且鲜有对规模化贮藏甘薯时气体浓度分布均匀性的研究,特别是对甘薯贮藏流程的研究尚未见报道。研究拟设计一种装配式塑料周转箱,并以甘薯为研究对象,建立气调贮藏库仿真模型。通过预试验确定送风参数,研究愈伤升温、愈伤后降温及贮藏阶段货物区的温度、湿度、速度、O₂体积分数、CO₂体积分数分布情况,以期为未来标准化物流周转箱设计及未来甘薯实现一体化气调贮藏提供依据。

1 模型与方法

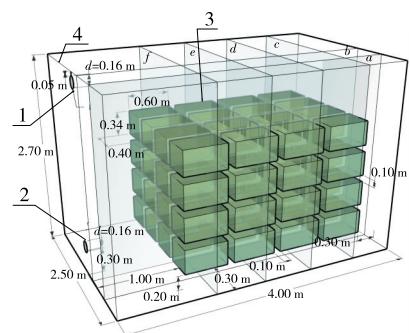
1.1 物理模型

贮藏库及贮藏区几何模型如图1所示。为进行数值分析,对贮藏库内实体情况进行1:1建模,货物区为库内贮藏的64箱甘薯,分为上、下、左、右、前、后侧。为便于后续进行内部流场分析,货物区前侧1列16箱中心轴平分切面记为a、前侧2列记为b;右侧1列16箱中心轴平分切面记为c,其余3列从右到左依次分别记为d、e、f。算例中选用《果蔬类周转箱尺寸系列及技术要求》(GB/T 39907—2021)推荐的尺寸之一,0.60 m×0.40 m×0.34 m(长×宽×高)。

装配折叠式塑料周转箱如图2所示。板面为搭配品,可在装箱时根据果蔬尺寸及透气性需求选择适配合适开孔的板面,避免倒箱作业时损伤果蔬,减少箱架塑料原材料的消耗;箱架可折叠,可减少空箱运输成本。

为简化计算,对模型进行如下假设^[17-20]:

(1) 库体围护结构以及地面对数值计算精确性影响较小,设为绝热边界条件,忽略辐射传热。



1. 送风口 2. 回风口 3. 货物区 4. 壁面

图1 贮藏库及贮藏区几何模型

Figure 1 Geometric models of storage depots and storage areas

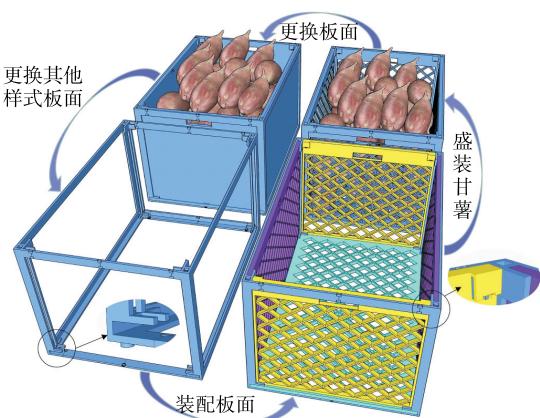


图2 装配折叠式塑料周转箱使用流程

Figure 2 Folding turnover box assembly

(2) 库内压强调节良好,库内外无压强差产生,流体为标准大气压下不可压缩理想气体,不参与辐射。

(3) 甘薯用装配折叠式塑料周转箱盛装,箱体对流体流动无阻碍作用,忽略货架等对库内流体状态的影响,货物区设为各向同性多孔介质,内部流体流动为层流。

(4) 考虑甘薯呼吸热,且呼吸热作为恒定热源项,忽略瞬时呼吸作用对周围环境气体组分的影响。

1.2 气流组织

贮藏库内每箱甘薯的表面中心位置设置 1 个监测点,内部中心位置设置 1 个监测点,每箱甘薯包括 6 个面监测点和 1 个内监测点。贮藏库内共 64 箱甘薯,即 64 个内部监测点,384 个外部面监测点,监测点总数为 448 个,绘图时简称为内、面、总。为更好地对甘薯贮藏时的贮藏环境进行系统评价,针对常用的气流组织评价指标,采用不均匀系数,对气体组分引入此概念进行评价,包括温度、速度、湿度、O₂体积分数、CO₂体积分数不均匀系数进行评价。

温度不均匀系数:

$$k_t = \frac{\sigma_t}{t}, \quad (1)$$

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{\sum (t_i - \bar{t})^2}{n}}, \quad (2)$$

式中:

k_t ——温度的不均匀系数;

σ_t ——温度的均方根偏差;

\bar{t} ——测点的平均温度,℃;

n ——测点数;

t_i ——每一测点的温度,℃。

速度、湿度、O₂体积分数、CO₂体积分数不均匀系数概念和计算公式均类似于温度不均匀系数。

2 数学模型

2.1 多孔介质模型

多孔介质内热质传递是耦合的,当多孔介质内部存在相变、内热源时,流体在多孔介质内进行流动传热,流体和固体之间存在一定的温差,流体温度不等于固体温度 $T_s \neq T_f$,局部非热平衡模型(双方程模型)有很好的适用性^[21]。

$$\epsilon C_{pf} \frac{\partial (\rho_f T_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f u_f h_f) = \nabla \cdot (k_{f,eff} \nabla T_f) + h_{sf} \alpha (T_s - T_f), \quad (3)$$

$$(1-\epsilon) \rho_s C_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \nabla \cdot (k_{s,eff} \nabla T_s) - h_{sf} \alpha (T_s - T_f), \quad (4)$$

式中:

$k_{f,eff}$ ——流体导热系数,W/(m·K);

T_s ——固体温度,K;

T_f ——流体温度,K;

C_{pf} ——流体比热容,J/(kg·K);

C_s ——固体比热容,J/(kg·K);

h_{sf} ——流固传热系数,W/(m²·K);

u_f ——流体黏度,kg/(m·s);

ϵ ——多孔介质孔隙率,%。

根据每箱甘薯内部真实结构进行建模比较困难,因此将每箱箱体所在区域定义为多孔介质域,其余域为流体域。将盛装甘薯的箱体看作各向同性多孔介质,甘薯作为固体颗粒。每箱甘薯间隙之间的流体对应多孔介质域中的流体。当库内气体向盛装甘薯的箱体内渗透时受到阻力,这部分阻力作为流体动量方程的源项考虑,其主要表现为黏性阻力与惯性阻力^[22]:

$$S_i = - \left(\frac{\mu_f}{\alpha} v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |v| v_i \right), \quad (5)$$

式中:

S_i —— $i(i=x,y,z)$ 向源项,kg/(m²·s²);

$1/\alpha$ ——黏性阻力系数,m⁻²;

C_2 ——惯性阻力系数(可看作沿流动方向上每一单位长度的损失系数),m⁻¹;

v_i ——在 $i(i=x,y,z)$ 向的速度分量,m/s;

$|v|$ ——流体速度,m/s。

其中,黏性阻力系数 $1/\alpha$ 与惯性损失系数 C_2 :

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{150(1-\epsilon)^2 \varphi^2}{D_p^2 \epsilon^3}, \quad (6)$$

$$C_2 = \frac{3.5(1-\epsilon)\varphi}{D_p \epsilon^3}, \quad (7)$$

式中:

D_p ——甘薯的等体积球当量径,m;

φ ——甘薯形状系数。

其中,甘薯形状系数 φ 和等体积球当量径 D_p :

$$\varphi = \frac{4\pi a^{\frac{2}{3}} b^{\frac{2}{3}} c^{\frac{2}{3}}}{S}, \quad (8)$$

$$D_p = \left(\frac{6V}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (9)$$

式中:

S ——甘薯表面积,m²;

V ——单个甘薯体积,m³;

a,b,c ——甘薯的三半轴,m。

NY/T 1320—2007 中,根据甘薯质量分级,未与甘薯形状特性进行联合。而 NY/T 2642—2014 以鲜食甘薯薯块质量为划分规格的指标中,提供了大(L)、中(M)、小(S)、微型(P) 4 个规格甘薯的参考图。鉴于现行标准并未制定甘薯几何分级标准,结合当前市售甘薯中中型甘薯普遍为优质薯类。因此,选用中型甘薯为试验模拟贮藏对象并进

行多孔介质阻力源项计算。而长旋转椭球体作为甘薯最合理的常见几何形状^[23]。结合标准中中型甘薯的几何尺寸,将其赋予长旋转椭球体的三半轴 a 、 b 、 c 进行数值计算,如图 3 所示。其中 a 为 7.50 cm, b 、 c 均为 3.50 cm。

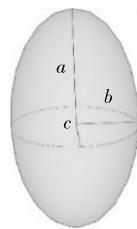


图 3 长旋转椭球体示意图

Figure 3 Long rotating ellipsoid schematic

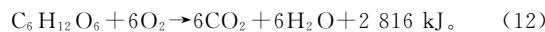
长旋转椭球体几何计算^[24]:

$$V = \frac{4}{3}\pi abc, \quad (10)$$

$$S = 1.3(ab + bc + ca) + 5\sqrt{a^2b^2 + b^2c^2 + c^2a^2}. \quad (11)$$

以适合多孔介质层流的理论解析式来近似计算流固传热系数^[25]。将每箱甘薯视为多孔介质,多孔介质视为各向同性。根据贮藏情况将模型划分为 64 块多孔介质域。考虑货物内部渗透性较差以及其几何尺度比湍流涡的要大,多孔介质域内部流体流动设为层流以对湍流生成进行抑制。甘薯物性参数^[26-28]:密度为 1 130 kg/m³,比热容为 1 589.81 J/(kg·K),导热系数为 0.46 W/(m·K)。

当果蔬以葡萄糖作为呼吸底物时,有氧呼吸的总反应式为:



由式(12)可知,每放出 1 mg CO₂ 会释放 10.676 3 J 的热能。实际上,果蔬在呼吸过程中所产生的能量,有一部分以腺苷三磷酸的形式贮存起来,以供体内需要。根据糖的有氧氧化循环可知,正常情况下果蔬呼吸过程中,实际以热能的形式释放出来的能量只占总能量的 55%^[29]。甘薯最佳气调贮藏条件为 12 °C、5% CO₂、8% O₂、90% RH,此时呼吸强度为 5 CO₂ mg/(kg·h)^[30]。依据上述条件可以计算出甘薯呼吸热为 53.381 5 J/(kg·h)。根据甘薯计算模型和箱体尺寸可知,每箱可装 5 层甘薯,每层 20 个,故一箱 100 个甘薯,当量球直径为 9 cm。因此,根据装配折叠式塑料周转箱尺寸以及甘薯装箱时的孔隙率可计算出每块多孔介质域模型参数,如表 1 所示。

2.2 组分输运模型

流体传热及传质过程中的质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程参照文献[18]。当系统流动包含有不同组分的相互作用或混合时,还需遵循组分守恒定律。

$$\frac{\partial(\rho_i Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_i \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + \rho_i \vec{g} + S_i, \quad (13)$$

表 1 模型参数

Table 1 Model parameter

参数名称	单位	参数值
孔隙率		0.53
密度	kg/m ³	532.66
呼吸热	W/m ³	4.34
比热容	J/(kg·K)	1 589.81
导热系数	W/(m·K)	0.46
黏性阻力系数		22 753.97
惯性阻力系数		117.72
多孔介质比面	m ⁻¹	34.27
流固传热系数	W/(m ² ·K)	3.80

式中:

Y_i —— i 组分的体积分数, %;

S_i —— 出口回流流量, kg/s;

J_i —— 组分 i 的扩散通量, kg/(m²·s);

$\rho_i \vec{g}$ —— 重力作用项, N/m³;

\vec{v} —— 速度矢量, m/s。

气体组分物理特性设置^[31]: 使用理想气体定律模拟不可压流动,首先混合物组分材料密度设为 incompressible-ideal-gas; 比热设为 mixing-law; 导热系数以及黏度设为 ideal-gas-mixing-law; 质量扩散率以及热扩散系数设为 kinetic-theory。将混合物组分质量分数最大的放在最后,然后定义组成混合物每一个流体材料的物性。使用 kinetic-theory 定义每一组分的比热、热导率、黏度,其余设置选择默认值。

2.3 网格划分及参数设置

模型采用 Polyhedra(多面体)网格进行划分,对流体进出口以及多孔介质域进行局部加密。模型划分为 400 504 个单元。网格单元的最小正交质量为 0.50,最大正交质量为 1.00,平均正交质量为 0.92。网格单元质量的最大偏斜度为 0.49,平均偏斜度为 0.07,网格质量较好。体网格划分如图 4 所示。

流体进口边界条件采用速度入口,出口边界条件采

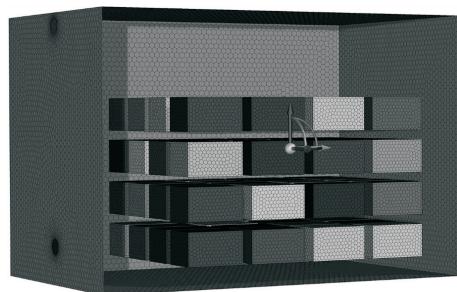


图 4 体网格划分示意图

Figure 4 Schematic diagram of grid division

用自由出流,围护结构及地面采用无滑移边界。水力直径设为圆形风口内直径 0.16 m,库内环境重力加速度设为 9.81 m/s²,多孔介质速度格式采用物理速度,其余设置选择默认值。采用 Realizable k-ε 湍流模型,壁面采用可扩展壁面函数。流场求解方面,基于压力求解器,压力—速度耦合采用 Simple 算法,动量、湍动能和湍流耗散率等选用二阶迎风离散格式。稳态计算时通过残差曲线的收敛情况选择适当的迭代次数。瞬态计算时,通过 courant number(库朗数)来大致估算时间步长^[32],并设置合适的求解步数。

2.4 贮藏工艺模拟参数设置

提高送风速度一定程度上可以提高温度场均匀性,但过大的风速会造成果蔬干耗严重,短时间内出现干瘪萎蔫,贮藏时货间风速一般应低于 0.50 m/s^[33]。根据贮藏技术流程,结合预试验研究,对各阶段送风参数进行计算,计算方法参照文献^[34]。

不同深度、季节地温对气温变化的响应存在差异,0~80 cm 地温对气温变化的响应较敏感^[35]。随着土层深度的增加,地温与气温的相关系数逐渐减小^[36]。因此一般情况下,气温与浅层地温的温差不大。甘薯通常在地温 18 ℃或者地温 12 ℃以上时进行收获^[37]。因此,假设甘薯收获进入贮藏库时温度为地温 18 ℃,且此时库内空气温度与地温相同。研究^[16,38~40]表明,45 ℃间歇热空气处理或者 45,50,55 ℃热水浴浸泡甘薯进行贮藏是可行的,表明甘薯能够在不损伤品质的情况下承受 50 ℃以下的温度。因此,对库内甘薯进行愈伤升温时的空气温度设计标准为 30,35,40,45,50 ℃。愈伤升温阶段进行模拟计算所输入参数如表 2 所示。

愈伤结束后快速降温阶段进行模拟计算所输入参数如表 3 所示。

贮藏内循环阶段进行模拟计算所输入参数如表 4 所示。

表 2 愈伤升温阶段送风参数

Table 2 Air supply parameters in curing heating stage

项目	单位	参数值
送风速度	m/s	14.0
送风温度	℃	30.0,35.0,40.0,45.0,50.0
送风 O ₂ 体积分数	%	21
送风 CO ₂ 体积分数	%	0.03
送风 H ₂ O 相对湿度	%	95
库内初始温度	℃	18.0
库内初始 O ₂ 体积分数	%	21
库内初始 CO ₂ 体积分数	%	0.03
库内初始 H ₂ O 相对湿度	%	90

表 3 愈伤后降温阶段送风参数

Table 3 Air supply parameters in cooling stage after curing

项目	单位	参数值
送风速度	m/s	6.0,8.0,10.0,12.0,14.0
送风温度	℃	0
送风 O ₂ 体积分数	%	21
送风 CO ₂ 体积分数	%	0.03
送风 H ₂ O 相对湿度	%	90
库内初始温度	℃	30.0
库内初始 O ₂ 体积分数	%	21
库内初始 CO ₂ 体积分数	%	0.03
库内初始 H ₂ O 相对湿度	%	95

表 4 贮藏内循环阶段送风参数

Table 4 Air supply parameters in storage internal circulation stage

项目	单位	参数值
送风速度	m/s	4.0,4.5,5.0,5.5,6.0
送风温度	℃	11.0
送风 O ₂ 体积分数	%	8
送风 CO ₂ 体积分数	%	5
送风 H ₂ O 相对湿度	%	95

2.5 模型验证

贮藏库送风口为圆形射流送风,送风口靠近库顶,为有限空间受限贴附射流。贴附射流可看作完整射流的 1/2,规律相同。可按两倍风口断面,出口流速不变的完整射流进行计算。根据蔡增基圆断面射流轴心速度公式^[41]:

$$\frac{v_m}{v_0} = \frac{0.96}{\frac{ax}{r_0} + 0.294}, \quad (14)$$

式中:

v_m ——射流主体段任意一断面轴心速度,m/s;

v_0 ——射流断面送风速度,m/s;

r_0 ——送风截面半径,m;

a ——紊流系数(圆形射流可取 0.08);

x ——所求断面到送风口的距离,m。

为了验证仿真结果,选用贮藏内循环下 4.5 m/s 送风口轴线速度与蔡增基经验公式进行对比。由图 5 可知,在主体段随着无因次距离的增大,模拟值与经验公式计算结果趋势一致且相近,说明试验仿真模型的可靠性,可用于贮藏库的贮藏环境研究。

3 结果与分析

3.1 送风温度和速度与时间的分析

根据表 2、表 3 设定的愈伤升温阶段、愈伤后降温阶

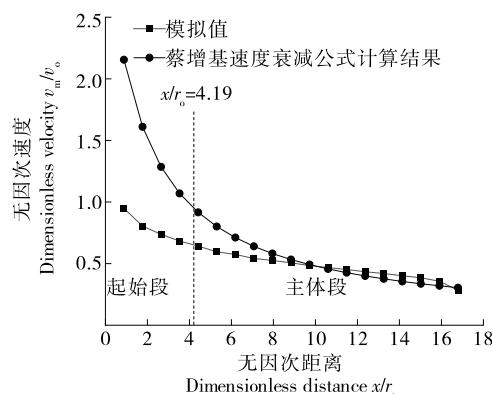


图 5 送风口轴线处模拟速度与理论速度的对比

Figure 5 Comparison of simulated velocity and theoretical velocity at the axis of the air supply outlet

段送风参数记录货物区总、内测点平均温度以及总测点平均温度不均匀系数随时间的变化,结果如图 6、图 7 所示。

由图 6、图 7 可知,增大送风温度有利于缩短到达目标愈伤所需的时间、增大送风速度有利于缩短到达贮藏温度所需的时间,整个过程中的温度不均匀系数大。开始进行升温愈伤、降温贮藏时,送风空气流体与贮藏库内空气剧烈混合导致前期温度波动较大,当两者进行短时

间混合后,货物区贮藏甘薯的物理性质以及贮藏量决定了后续升温、降温过程。当送风温度为 30, 35, 40, 45, 50 °C 时,愈伤时间依次为 31.33, 9.42, 5.85, 4.15, 3.11 h。送风温度为 35, 40, 45, 50 °C 时的总升温时间相比 30 °C 时的分别缩短了 69.95%, 81.34%, 86.75%, 90.07%。结合较大送风温度会增加能耗及考虑甘薯高温耐受性来看,40 °C 的送风温度是较佳的。当送风速度为 6.00, 8.00, 10.00, 12.00, 14.00 m/s 时,总降温所需时间依次为 14.03, 10.54, 8.47, 7.08, 6.06 h;送风速度为 8.00, 10.00, 12.00, 14.00 m/s 时的降温时间相比 6.00 m/s 时的分别缩短了 24.85%, 39.60%, 49.50%, 56.83%;10 m/s 时继续增大风速的降温所需时长降幅较低。结合较大送风速度会增加能耗及干耗来看,10.00 m/s 的送风速度是较佳的。

此外,货物区内部温度达到目标愈伤温度所需的时间较短,达到目标贮藏温度所需的时间较长。这是由于甘薯自身的物性参数以及库内流体强制流动,相较于导热,对流换热占主导作用,造成贮藏过程中货物区内部温度与外部温度变化存在滞后。

3.2 贮藏内循环气流组织指标

为了更好地对货物区甘薯贮藏环境进行评价,对货

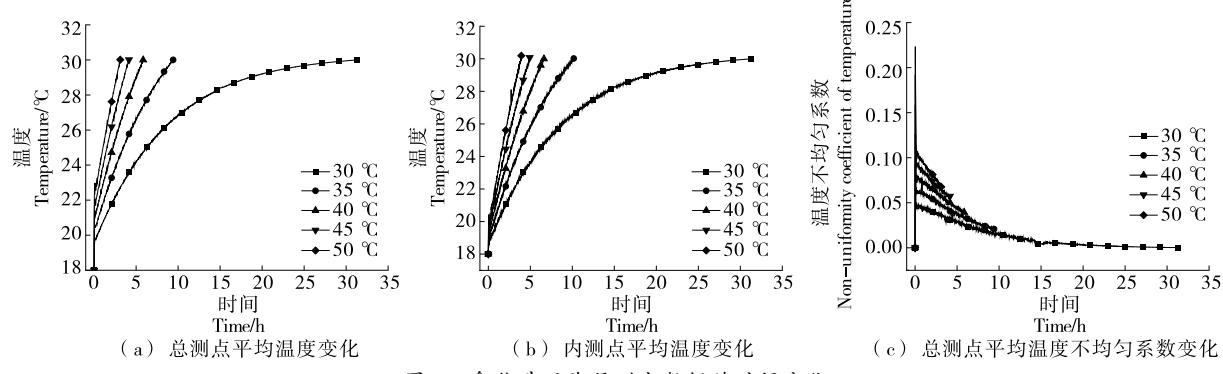


Figure 6 Variation of measurement point data over time during the curing heating stage

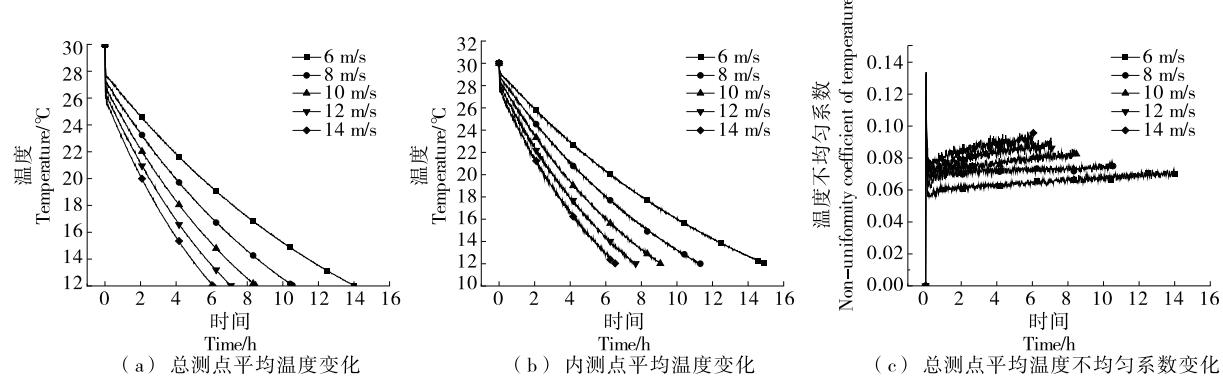


Figure 7 Variation of measurement point data over time during the cooling stage after curing

物区内、面、总测点数据进行分析,计算结果如图 8~图 12 所示。

由图 8 可知,提高送风速度有利于减小货物区的温度不均匀系数、温度平均值、温度最大值和最小值。相较于货物区表面温度,内部温度分布更不均匀。总体来看,送风速度为 5.00~5.50 m/s 时通过增大风速有利于促进

货物区温度均匀性,当送风速度从 5.50 m/s 提高至 6.00 m/s 时,温度均匀性效应变小。整个贮藏过程中,货物区内温度高于面温度,由图 9 可以明显看出内速度平均值远远小于面速度,这也解释了货物区内温度较高的原因在于箱体内部流速较小导致甘薯呼吸热散失较慢。从总、内温度最大值曲线重合可知,整个贮藏过程中,货

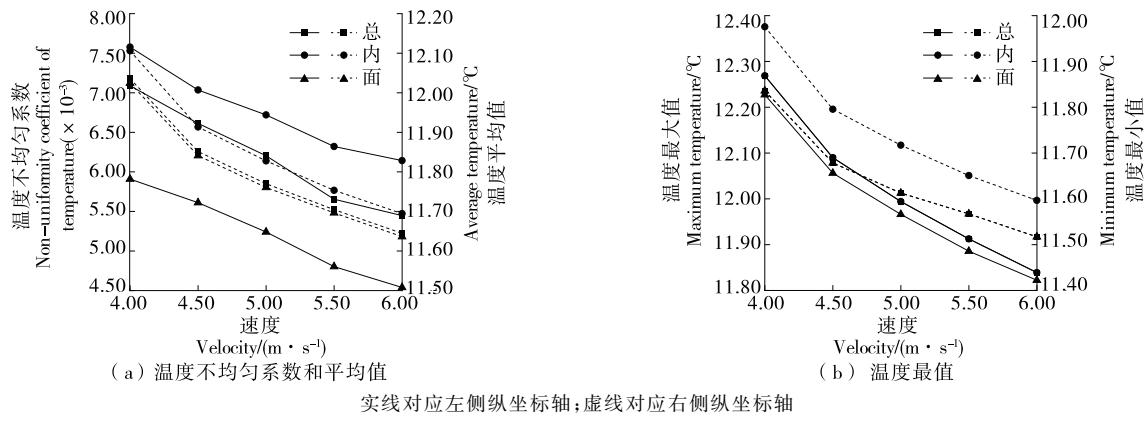


Figure 8 Calculation results of temperature evaluation index

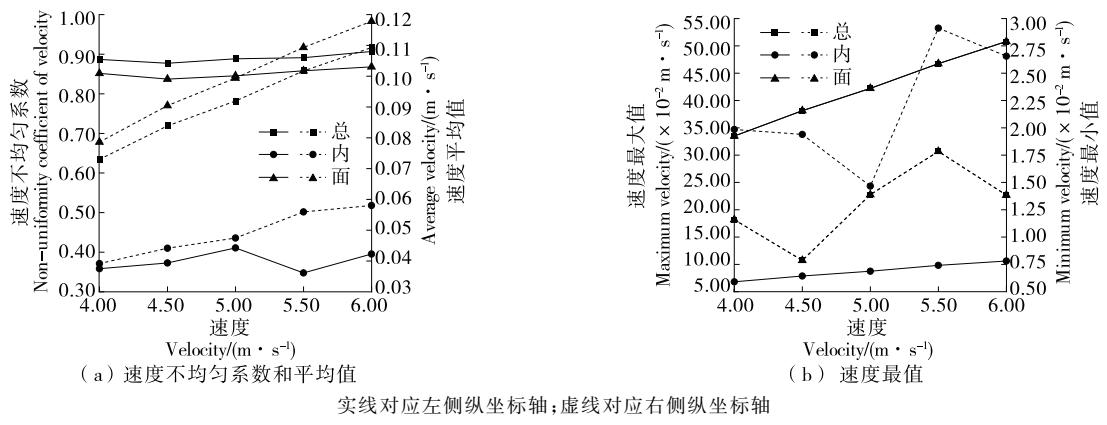


Figure 9 Calculation results of velocity evaluation index

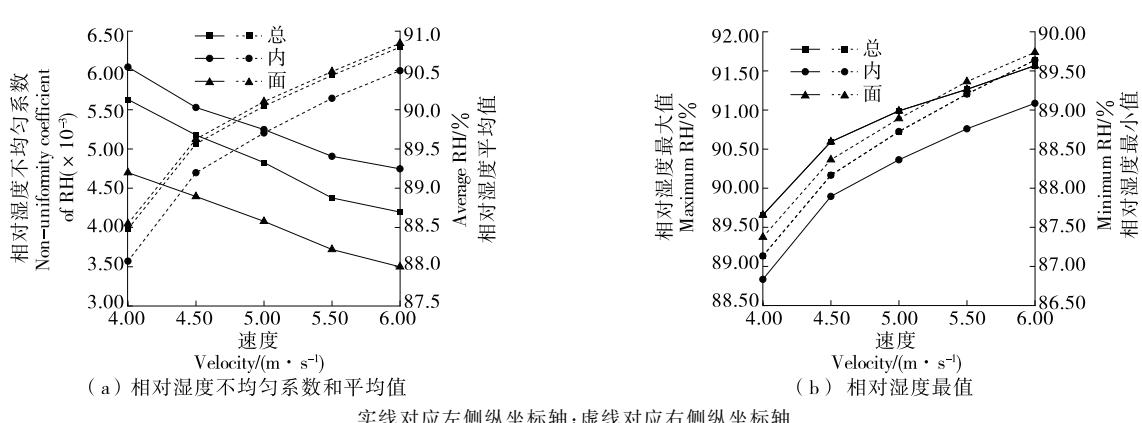
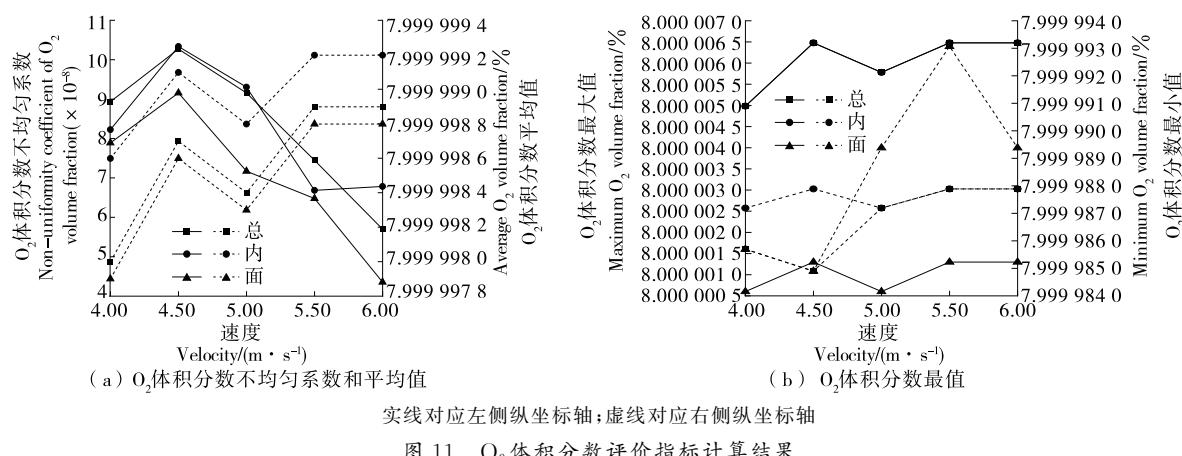
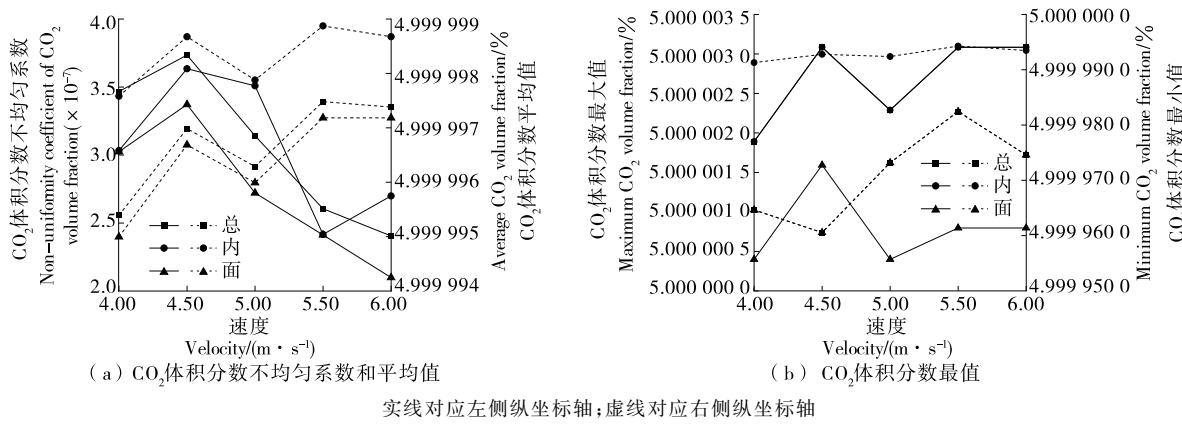


Figure 10 Calculation results of RH evaluation index

Figure 11 Calculation results of O_2 volume fraction evaluation indexFigure 12 Calculation results of CO_2 volume fraction evaluation index

物区部分内部测点温度较高;从总、面温度最小值曲线重合可知,货物区部分测点面温度最低。送风速度为4.00,4.50,5.00,5.50,6.00 m/s时的总温度平均值相比目标贮藏温度(12.00 °C),偏差率依次为0.30%,1.24%,1.92%,2.46%,2.96%。此外,送风速度为4.00~4.50 m/s时,部分测点温度随风速增大呈大幅下降。综上,4.50~5.00 m/s的送风速度对保障货物区贮藏时的温度均匀性是较佳的。

由图9可知,总、面速度不均匀系数虽在4.50 m/s时达到最小,但总体趋势平稳且相差不大。由于箱体内部盛装的甘薯使其成为多孔结构,贮藏库内流体流经箱体时,互相交错的甘薯会使空气绕行,产生阻力,相较于箱体表面其内部流速较小,内部速度分布较平均,在5.00~5.50 m/s时内速度平均值增长率较大。由于送风口射流使得空气流体流向库体右侧壁面后向下回卷,使得货物区下底面速度较大,由图13可知,面速度分布相差较大,因此内速度不均匀系数远远小于面速度。此外,提高送风速度虽会增大货物区面、内速度,但对提高内速度最大值作用较小,且在送风速度为6.00 m/s时导致部分货物

区面速度超过最大最佳流速(0.50 m/s);此外,货物区最小送风速度与送风速度的增大无明显相关性,在4.50~5.00 m/s时继续增大送风速度虽然会造成部分内速度的降低,不利于甘薯散热且增加送风能耗,但从图8可知,4.50~5.00 m/s的温度平均值降低幅度远小于4.00~4.5 m/s的。综上,4.50~5.50 m/s的送风速度对保障货物区贮藏时的速度均匀性是较佳的。

由图10可知,送风速度的增大有利于提高货物区相对湿度以及相对湿度均匀性。在4.00~4.50 m/s时,送风速度的增大对提高货物区相对湿度效果较好,此时相对湿度平均值、最大值和最小值的增长幅度最大。送风速度为4.00,4.50,5.00,5.50,6.00 m/s时的总相对湿度平均值相比目标贮藏的偏差率依次为1.69%,0.48%,0.05%,0.48%,0.88%。总的来说,4.50~5.50 m/s的速度对维持货物区相对湿度均匀性较好。

由图11和图12可知,不同设计送风速度下,货物区 O_2 和 CO_2 体积分数评价指标趋势相同,与速度无相关性且各项指标均处于适宜范围,送风速度不会影响气调效果。综上,不考虑较大送风速度会增加能耗的情况下,

4.00~6.00 m/s 的送风速度皆适宜。

3.3 贮藏内循环货物区流场

由于增大送风速度会增加能耗,故对送风速度为 4.50 m/s 时货物区表面流场进行分析,结果如图 13 所示。

由图 13 可知,由于库内气流强制流动, O_2 、 CO_2 体积分数分布均匀且符合贮藏标准。在不考虑甘薯呼吸作用下 O_2 、 CO_2 体积分数分布主要受送风射流参数、库体和货

物区空间几何位置、货物区温度分布导致的大分子气体向受热面扩散速度的差异以及重力的影响。货物区表面温度范围主要集中在 11.67~12.07 °C,与贮藏目标温度(12.00 °C)接近,最大温度主要出现在三视侧前两层箱体的上表面且离送风口越近分布范围越大;速度范围主要集中在 0.007~0.539 m/s,与最大较佳流速(0.50 m/s)接近,下侧风速较大;相对湿度范围主要集中在 88.26%~

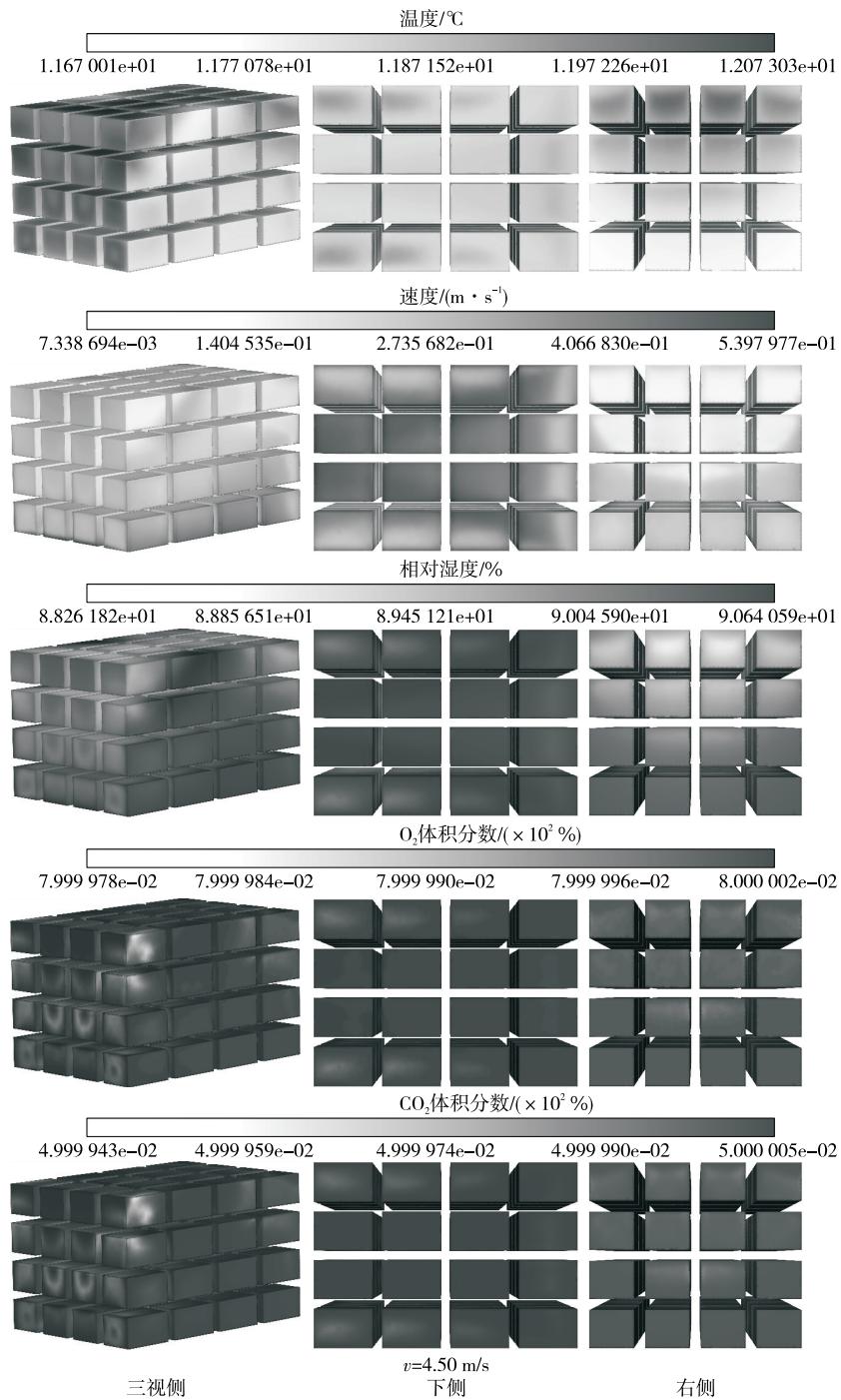


图 13 货物表面分布云图

Figure 13 Goods surface distribution cloud map

90.64%，与贮藏目标相对湿度(90.00%)接近，最小湿度主要出现在三视侧前两层箱体的上表面且离送风口越近分布范围越大。货物区表面速度大的地方虽然相对湿度普遍较大，但两者分布关联性较小；温度场与相对湿度场呈负相关，货物表面温度大的部位的相对湿度小，温度小的部位的相对湿度大，两者分布状态相似。总体来看，贮藏效果较好，但离送风侧较近的货物区还有待进一步优化。

货物区内部温度梯度小，风速较均匀一致，是最佳的贮藏状态。在温度场等均匀的情况下，较低的气流速度有利于减少果蔬干耗，保障果蔬品质与营养。4.50 m/s 贮藏送风速度下的货物区内部温度分布以及速度矢量分布如图 14 所示。由图 14 可知，由于甘薯呼吸热导致靠近

送风口垂直侧温度逐渐升高，货物区外侧温度较低，空气流体从送风口流出时形成射流，空气流体碰到右侧库壁后主要向下流动，部分穿过箱体间隙进行回卷流动。甘薯呼吸热影响流体温度的不平衡势差，一定程度上影响货物区的热对流，进而影响温度均匀性。底部速度矢量较集中，这也是图 13 下侧速度较大的原因，此外单一箱体内部截面温度分布的不同也与空气流向相关；对于内部温度场来说，流体流入的部位箱体温度低，由于箱体内部甘薯的存在产生阻力，导致流出过程中的速度变小，从而造成同一箱体内部温度分布的差异；靠近右侧壁面两列箱体内部存在涡流，速度的流向及大小导致了右侧壁面两列箱体与左侧两列箱体内部温度分布的不同。

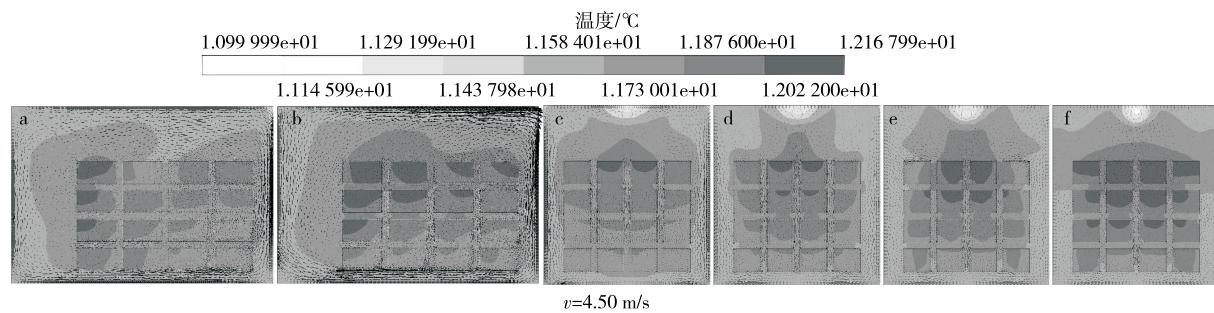


图 14 货物内截面温度和速度矢量分布云图

Figure 14 Temperature and velocity vector distribution cloud map in the goods inner section

由图 14(b)可知，空气流体主要从底层箱体之间的间隙流入，货物区温度与速度矢量的分布与图 14(a)不同，涡流主要存在于靠近右侧壁面一列箱体的下三层；相似的是单一箱体温度分布不同是由速度流入和流出方向导致的。靠近右侧壁面的温度较低且与速度矢量的分布相关，图 13 中的右侧温度与速度云图也证明了这一点，说明速度大小及流向对货物区内部温度分布影响较大。

4 结论

研究以循环、绿色理念设计了一种装配折叠式塑料周转箱。通过建立标准化装配折叠式塑料周转箱盛装甘薯的物理模型，采用 CFD 流场数值模拟方法，对甘薯气调贮藏工艺流程进行研究。结果表明：① 增大送风温度、送风速度分别有利于缩短达到目标愈伤、贮藏温度所需的时间，货物区贮藏甘薯的物理性质以及贮藏量决定了后续升温、降温过程。40 ℃是较佳的愈伤送风温度，所需时间为 5.85 h。10 m/s 是较佳的愈伤后降温送风速度，所需时间为 8.47 h。② 甘薯呼吸热的产生使得货物区内温度达到目标愈伤温度所需时间较短，达到目标贮藏温度所需时间较长，相较于导热，对流换热占主导作用，造成贮藏过程中货物区内部温度与外部温度变化存在滞后。③ 不同送风速度对 O₂体积分数、CO₂体积分数分布影响不大，4.5 m/s 的送风速度是较佳的，可保障

货物区温湿度、流速在良好范围且均匀性较好。货物区表面速度场与湿度场分布关联性较小，温度场与相对湿度场呈负相关且分布状态相似。送风速度改变货物区箱体内部的流体流向，送风速度大小以及箱体内流体流向对货物区内部温度分布影响较大。研究提出的周转箱在缓冲抗震、智能包装^[42]等方面仍有很大的改良空间，有待进一步减少物流运输振动时造成的机械损伤及保障果蔬品质。此外，周转箱尺寸参数、位置分布、码垛方式及装载密度等在不同温湿度、风速、送风方式等贮藏关键参数下对不同品种甘薯宏观品质和生理特性的影响规律有待探明。

参考文献

- [1] GOVENDER L, PILLAY K, SIWELA M, et al. Consumer perceptions and acceptability of traditional dishes prepared with provitamin a-biofortified maize and sweet potato[J]. Nutrients, 2019, 11(7): 1 577.
- [2] ALAM M K. A comprehensive review of sweet potato (*Ipomoea batatas* L. Lam): Revisiting the associated health benefits[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 115: 512-529.
- [3] ROZI F, PRASETIASWATI N, ELISABETH D. Study on sweet potato market behaviour in supporting food security [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021,

- 756: 12082.
- [4] LEE C, PARK S, KIM S, et al. Overexpression of IBLFP in sweetpotato enhances the low-temperature storage ability of tuberous roots[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2021, 167: 577-585.
- [5] AYELESO T B, RAMACHELA K, MUKWEVHO E. A review of therapeutic potentials of sweet potato: Pharmacological activities and influence of the cultivar[J]. Tropical Journal of Pharmaceutical Research, 2016, 15(12): 2 751-2 761.
- [6] SCOTT G J. A review of root, tuber and banana crops in developing countries: Past, present and future[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2021, 56(3): 1 093-1 114.
- [7] 李静宇.“气调库”必须迈过成本这道坎：专访中国食品工业协会食品物流专业委员会副会长 张签名[J]. 中国储运, 2017(4): 66-67.
LI J Y. "Gas-controlled warehouses" must overcome the hurdle of cost - Interview with Zhang Qianming, Vice president of the food logistics professional committee of the China food industry association[J]. China Storage & Transport, 2017(4): 66-67.
- [8] ABIDIN P E, KAZEMBE J, ATUNA R A, et al. Sand storage, extending the shelf-life of fresh sweetpotato roots for home consumption and market sales[J]. Food Science and Engineering, 2016, 6(4): 227-236.
- [9] SOWLEY E, NEINDOW M, ABUBAKARI A H. Effect of poultry manure and NPK on yield and storability of orange-and white-fleshed sweet potato[*Ipomoea batatas* (L.) Lam][J]. Isabb Journal of Food and Agricultural Sciences, 2015, 5(1): 1-6.
- [10] BAO G, WANG G, WANG B, et al. Study on the drop impact characteristics and impact damage mechanism of sweet potato tubers during harvest[J]. PLoS One, 2021, 16(8): e255856.
- [11] 邵海燕, 杨海龙, 陈杭君, 等. 生鲜果蔬物流及包装技术研究与展望[J]. 食品与生物技术学报, 2020, 39(8): 1-9.
GAO H Y, YANG H L, CHEN H J, et al. Progress and prospect of logistics and preservation technology on fresh fruit and vegetables [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2020, 39(8): 1-9.
- [12] DURET S, HOANG H, FLICK D, et al. Experimental characterization of airflow, heat and mass transfer in a cold room filled with food products[J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 46: 17-25.
- [13] 向明月. 生鲜农产品冷链物流包装技术研究及应用[J]. 食品与机械, 2023, 39(8): 103-109.
XIANG M Y. Research and application progress of cold-chain logistics packaging technology of fresh agricultural products[J]. Food & Machinery, 2023, 39(8): 103-109.
- [14] 杨智康, 杨大章, 谢晶, 等. 冷库低碳新技术研究进展[J]. 食品与机械, 2023, 39(1): 221-227.
YANG Z K, YANG D Z, XIE J, et al. Research progress of novel low-carbon technologies in cold storages[J]. Food & Machinery, 2023, 39(1): 221-227.
- [15] 李露露, 张苗, 孙红男, 等. 甘薯采后物理、化学与生物保鲜技术研究现状[J]. 江苏师范大学学报(自然科学版), 2021, 39(3): 36-41.
LI L L, ZHANG M, SUN H N, et al. Research status of postharvest physical, chemical and biological preservation technology of sweetpotato [J]. Journal of Jiangsu Normal University (Natural Science Edition), 2021, 39(3): 36-41.
- [16] 王晓军, 赵琳, 石江, 等. 甘薯采后贮藏保鲜及抑芽技术研究进展[J]. 浙江农业科学, 2021, 62(1): 133-138.
WANG X J, ZHAO L, SHI J, et al. Research progress on post-harvest storage, preservation, and bud suppression technology of sweet potatoes[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2021, 62(1): 133-138.
- [17] 杜子峰, 谢晶, 朱进林. 数值模拟技术预测风机两种摆放方式对冷库堆垛货物的影响[J]. 食品与机械, 2015, 31(3): 145-149.
DU Z Z, XIE J, ZHU J L. Effects of two different fans arrangement on stacking cargo in cold store based on numerical simulation[J]. Food & Machinery, 2015, 31(3): 145-149.
- [18] 刘妍华, 曾志雄, 郭嘉明, 等. 增施 CO₂ 气肥对温室流场影响的数值模拟及验证[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 194-199.
LIU Y H, CENG Z X, GUO J M, et al. Numerical simulation and experimental verification of effect of CO₂ enrichment on flow field of greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(12): 194-199.
- [19] 周轲, 王瑞华, 孙海亭, 等. CFD 模拟两种风机位置的苹果冷藏库的温度场[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(7): 75-79.
ZHOU K, WANG R H, SUN H T, et al. Simulation on the temperature field of the two fan solution in cool store based on CFD[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(7): 75-79.
- [20] 向立平, 王汉青. 空调客车内气流组织与污染物浓度场数值模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(5): 2 017-2 021.
XIANG L P, WANG H Q. Numerical simulation of airflow and concentration fields in air-conditioning vehicle passenger compartment[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2010, 41(5): 2 017-2 021.
- [21] 路朗, 辛成运, 刘忠鑫. 多孔介质局部非热平衡模型研究综述[J]. 热能动力工程, 2019, 34(7): 1-8.
LU L, XIN C Y, LIU Z X. Review on local thermal non-equilibrium model for porous media[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2019, 34(7): 1-8.
- [22] 胡汝生, 刘寅, 杜晨阳, 等. 基于多孔介质模型的非织造布阻力特性研究[J]. 毛纺科技, 2022, 50(6): 80-89.
HU R S, LIU Y, DU C Y, et al. Study on resistance characteristics of nonwovens based on porous media model [J]. Wool Textile Journal, 2022, 50(6): 80-89.
- [23] WRIGHT M E, TAPPAN J H, SISTLER F E. The size and shape of typical sweet potatoes[J]. Transactions of the Asae, 1986, 29(3): 678-682.

- [24] VILLORDON A, GREGORIE J C, LABONTE D. Direct measurement of sweetpotato surface area and volume using a low-cost 3D scanner for identification of shape features related to processing product recovery[J]. Hortscience, 2020, 55(5): 722-728.
- [25] KUWAHARA F, SHIROTA M, NAKAYAMA A. A numerical study of interfacial convective heat transfer coefficient in two-energy equation model for convection in porous media [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 44(6): 1 153-1 159.
- [26] 石胜强, 张蕊, 于晋泽, 等. 基于红薯为贮藏对象的自然冷源改造库理论计算[J]. 冷藏技术, 2020, 43(4): 36-41.
- SHI S Q, ZHANG R, YU J Z, et al. Theoretical calculation on natural cold source modification warehouse based on sweet potatoes[J]. Journal of Refrigeration Technology, 2020, 43(4): 36-41.
- [27] 申海洋, 纪龙龙, 胡良龙, 等. 甘薯收获期薯块机械物理特性参数研究[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(12): 55-61.
- SHEN H Y, JI L L, HU L L, et al. Study on the mechanical and physical parameters of sweet potato tuber during harvest [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(12): 55-61.
- [28] 张治权. 果蔬导热系数影响因素及其内部温度场数值模拟研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2019: 25-26.
- ZHANG Z Q. Research of influencing factors of thermal conductivity and internal temperature field numerical analyzation for fruit and vegetables [D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2019: 25-26.
- [29] 朱向秋. 果蔬呼吸热计算常数的推导和应用[J]. 河北果树, 1996(3): 32-33.
- ZHU X Q. Derivation and application of the constant for calculating the respiratory heat of fruits and vegetables[J]. Hebei Fruits, 1996(3): 32-33.
- [30] 石小琼, 林标声, 杨永林, 等. 甘薯气调保鲜最佳贮藏条件研究[J]. 食品研究与开发, 2013, 34(15): 92-96.
- SHI X Q, LIN B S, YANG Y L, et al. Study on the optimum condition about controlled atmosphere storage of sweet potato[J]. Food Research and Development, 2013, 34(15): 92-96.
- [31] ANSYS. Fluent user's guide. Chapter 8: Physical properties[EB/OL]. (2023-04-11) [2023-01-01]. https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v221/en/flu_ug/flu_ug_chp_props.html.
- [32] 田康, 张尧, 李金龙, 等. 基于 OpenFOAM 几何流体体积方法的波浪数值模拟[J]. 上海交通大学学报, 2021, 55(1): 1-10.
- TIAN K, ZHANG Y, LI J L, et al. Numerical wave simulation using geometrical VOF method based on OpenFOAM[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2021, 55(1): 1-10.
- [33] 南晓红, 魏高亮, 赵喜梅. 纤维风管喷射渗透比对冷藏库内流场特性的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(9): 300-307.
- NAN X H, WEI G L, ZHAO X M. Effects of ejection-permeation ratio in fiber duct on the characteristics of air flow field in cold storage[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(9): 300-307.
- [34] 黄翔. 空调工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017: 439-440.
- HUANG X. Air condition engineering [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2017: 439-440.
- [35] 柴萌, 王振龙, 陈元芳, 等. 淮北南部区地温变化及其对气温变化的响应[J]. 土壤通报, 2020, 51(3): 568-573.
- CHAI M, WANG Z L, CHEN Y F, et al. Changes of soil temperature and its response to air temperature in the southern area of Huabei plain[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2020, 51(3): 568-573.
- [36] 刘明亮, 王振龙, 吕海深, 等. 五道沟地区 1971—2020 年地温月尺度变化及其对气温的响应[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(2): 83-90.
- LIU M L, WANG Z L, LU H S, et al. Change in temperature over the past 50 years at Wudaogou and its influence on soil temperature at different depths [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(2): 83-90.
- [37] 高丽娜. 甘薯适时收获应注意的问题[J]. 乡村科技, 2014(17): 18.
- GAO L N. Issues to be aware of when harvesting sweet potatoes at the appropriate time[J]. Rural Technology, 2014(17): 18.
- [38] PAN Y, CHEN L, CHEN X, et al. Postharvest intermittent heat treatment alleviates chilling injury in cold-stored sweet potato roots through the antioxidant metabolism regulation[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2019, 43(12): e14274.
- [39] HU Q Y, XIAO F Z, CHENG Q H, et al. Effects of different treatments on chilling injury and antioxidative metabolism in sweet potato[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2014, 28(8): 1 407.
- [40] 吴丹宁, 杨海洋, 邓吉良, 等. 热水处理对甘薯贮藏品质和生理指标的影响[J]. 食品科技, 2018, 43(12): 43-49.
- WU D N, YANG H Y, DENG J L, et al. Effects of hot water treatment on storage quality and physiological indexes of sweet potatoes[J]. Food Science and Technology, 2018, 43(12): 43-49.
- [41] 蔡增基, 龙天渝. 流体力学泵与风机[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 158-168.
- CAI Z J, LONG T Y. Pump fan and fluid mechanics[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2009: 158-168.
- [42] 赵冬艳, 孙金才, 陈纪算. 新鲜度指示型包装技术在生鲜食品的应用进展[J]. 食品与生物技术学报, 2022, 41(1): 1-9.
- ZHAO D Y, SUN J C, CHEN J S. Progress of freshness indicator used in fresh food packaging [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2022, 41(1): 1-9.