

不同果径苹果差压预冷性能模拟与分析

Simulation and analysis of forced air precooling performance of apples with different fruit diameters

田津津^{1,2} 谷旭东^{1,2,3} 张哲^{1,2} 朱志强³ 集贤³

TIAN Jinjin^{1,2} GU Xudong^{1,2,3} ZHANG Zhe^{1,2} ZHU Zhiqiang³ JI Xian³

(1. 天津商业大学制冷技术重点实验室, 天津 300314; 2. 天津商业大学机械工程学院, 天津 300314; 3. 天津市农科院国家农产品保鲜工程技术研究中心[天津]农业农村部农产品贮藏保鲜重点实验室, 天津 300384)

(1. Key Laboratory of Refrigeration Technology, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300314, China; 2. School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300314, China; 3. Tianjin Academy of Agricultural Sciences National Engineering Research Center for Preservation of Agricultural Products [Tianjin], Key Laboratory of Storage and Preservation of Agricultural Products of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300384, China)

摘要:目的:分析相同包装箱下不同果径苹果对差压预冷的影响。方法:基于球形类比模型和传热理论,使用 CFD 非稳态 SST $k-\omega$ 湍流模型,对不同送风风速、温度、包装箱开孔大小、果径苹果的差压预冷情况进行数值模拟,选取 3 种不同工况条件进行准确性验证。结果:送风温度越低、风速越快、苹果果径越小,冷却速度越快;送风温度越高、风速越快、开孔越大预冷均匀性越好。综合正交试验结果对比来看,果径大小对差压预冷的影响显著。结论:苹果果径对预冷的冷却速率和均匀度影响程度最大,需要针对不同果径苹果采取合理的包装方式和码放方式。**关键词:**差压预冷;苹果;果径;CFD 仿真;包装方式;码放方式

Abstract: Objective: To analyze the effect of apples of different fruit diameters on differential pressure precooling under the same box. Methods: Based on the spherical analogy model and heat transfer theory, the CFD unsteady SST $k-\omega$ turbulence model was used to numerically simulate the differential pressure precooling of apples with different air supply air speed, temperature, box opening size and fruit diameter, and three different working conditions were selected for accuracy. The simulation scheme of mixed orthogonal test was used to discuss the effects of different factors and different fruit diameters on the

cooling rate and pre-cooling uniformity. Results: The lower of the air supply temperature was, the faster the wind speed was, the smaller of the apple diameter was, and the faster of the cooling rate it was. The higher of the supply air temperature was, the faster the wind speed was, the larger of the opening was, and the better of the uniformity of precooling it was. Based on the comparison of orthogonal test results, the effect of fruit diameter on differential pressure precooling was significant. Conclusion: Apple fruit size has the greatest influence on the cooling rate and uniformity of pre-cooling, and reasonable packaging and stacking methods need to be adopted for apples with different fruit diameters.

Keywords: forced air precooling; apple; fruit trail; CFD simulation; packaging method; stacking method

新鲜果蔬采后新陈代谢仍然非常旺盛,其品质在采后几天内会迅速下降^[1]。同时室温条件下,新鲜果蔬在装卸运输过程中易造成的机械损伤成为腐烂源而迅速变质,造成食品浪费和经济损失。因此,及时高效的预冷方式对于减缓采后果蔬新陈代谢活动,抑制病原菌生长十分必要^[2-3]。

常见的果蔬预冷方式包括商业预冷(静止风冷)、差压预冷、水冷、真空预冷。相较于其他预冷方法,压差预冷具有设备成本低,果蔬适应性强,相对效率高,使用灵活的优点而被广泛应用^[4-5]。

目前差压预冷的研究内容集中在送风工艺参数,送风方式以及包装方式上。王晓冉等^[6]以国光苹果为材

基金项目:国家自然科学基金(编号:12172254,11772225)

作者简介:田津津,女,天津商业大学高级实验师,硕士。

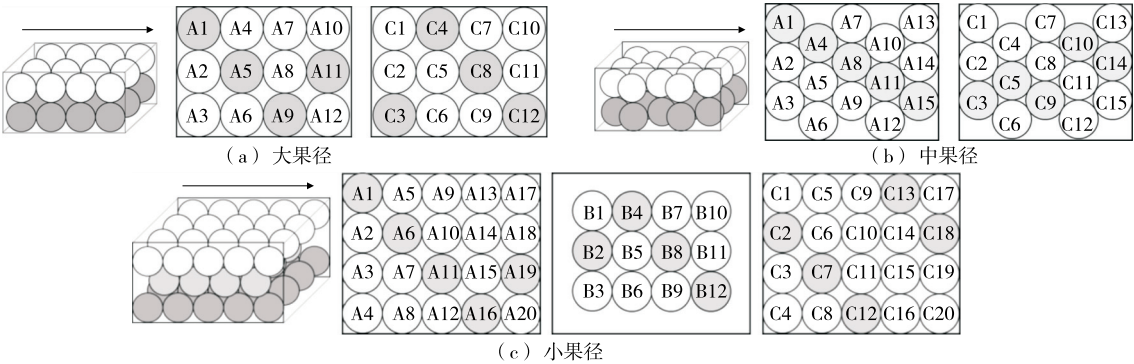
通信作者:张哲(1975—),男,天津商业大学教授,博士。

E-mail: zhang zhe @tjcu.edu.cn

收稿日期:2023-04-12 改回日期:2023-08-02

料,探究了塑料大帐开孔大小、送风风速和温度以及周转箱间距对差压预冷效果的影响并对预冷工况进行优化,结果表明在开孔大小 20 mm、周转箱间距 100 mm、送风速度 1.5 m/s、送风温度-1℃的优化工况下,差压预冷的效率比静止预冷提高了 233.33%,冷却均匀度提高了 73.92%。申江等^[7]探究了不同因素对白萝卜差压预冷的影响,结果显示在送风温度 3℃、风速 0.32 m/s、包装箱开孔率 0.08、孔隙率 0.48 条件下的预冷效果最优。金滔等^[8]利用仿真模拟技术对苹果的垂直送风方式进行性能验证分析,对比不同因素对垂直送风方式的影响,结果表明在 15%开孔率下垂直送风式差压预冷的最佳送风速度约为 2 m/s,低于相同工况下水平送风的最佳送风速度。随着计算机的发展,CFD 仿真模拟逐渐代替试验成为了差压预冷新的研究方法^[9-11]。胡时发等^[12]通过仿真模拟探究了荔枝预冷的最佳风速,并拟合出压力与填装方式的关联式。宫亚芳^[13]利用仿真模拟探究了不同因素对苹果包装箱的影响,并通过试验对其包装箱进行了优化。

在实际的果蔬收获过程中,通常果蔬由于性状差异(性状不同、大小不同)而被分类装填,之后用于不同的需求。果蔬大小不同通常会影响到预冷包装箱中的码垛方式和孔隙率大小,研究拟针对这一现象以苹果为试验材料,对不同果径果实在差压预冷中的影响进行规律探究,建立单箱不同果径的差压预冷数值模型并进行实验验证,以期同种类不同果径的果蔬的差压预冷方法的优化设计提供参考。



A 为最下层,B 为中间层,C 为最上层;箭头代表送风方向

图 2 大、中、小果径各层码放及温度测点图

Figure 2 Stacking and temperature measurement point diagram of each layer of large, medium and small fruit diameter

表 1 冷却工况下空气、苹果、箱体的物性参数

Table 1 Physical property parameters of air, apple and box under cooling conditions

类别	密度 ρ / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏度 μ / ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	比热容 c_p / ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	导热系数 λ / ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
空气	1.225	1.789×10^{-5}	1 006	0.024 2
苹果	837.0	/	3 822	0.380 0
箱体	220.0	/	1 700	0.050 0

1 材料与方法

1.1 数值模拟模型及计算方法

1.1.1 物理模型 选用的差压预冷包装箱为 F4 快递包装箱,包装箱两侧开孔,开孔位置及数量如图 1 所示,模型的厚度为 5 mm。进行差压预冷时将包装箱放置在通风通道中,尽量防止周围的漏风情况。将苹果根据果径大小划分为 95,82,72 mm 的球形模型,苹果的排列方式如图 2 所示,由于苹果与箱体大小的限制会在箱体顶部留有 15~30 mm 的空隙。冷空气从迎风端的气孔进入,流经苹果后从背风端的气孔流出。根据前人^[8,13-14]的研究,仿真模拟过程中苹果、包装箱及空气的物性参数如表 1 所示。

1.1.2 数学模型 F4 包装箱同苹果的水力直径之比小于 10,所以此问题不适合使用多孔介质的模型,采取建立

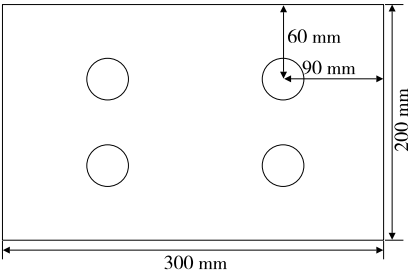


图 1 包装箱通风孔开孔位置图

Figure 1 Location diagram of the ventilation hole opening of the box

球形类比模型进行求解^[15]。实际的苹果差压预冷过程的热量传递过程比较复杂,通常还伴有传质现象的影响。对模型做以下简化:每种果径苹果的大小均匀,苹果之间保留 2~3 mm 的空隙;苹果和空气视为常物性;同田间热比较忽略苹果的呼吸热和蒸腾热^[13];忽略苹果的水分损失;忽略苹果间、苹果与箱体辐射热。

1.1.3 控制方程

(1) 冷空气流域:冷空气流域的计算采用雷诺平均 N-S 方程对流场进行求解,其中包括连续性方程、动量方程和能量方程。

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_a u_i)}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho_a u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_a u_i u_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_a \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_a \overline{u'_i u'_j}) - \rho_a g, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_a c_{p,a} T) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_a c_{p,a} T u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda_a \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_a c_{p,a} \overline{u'_j T'}) , \quad (3)$$

式中:

t ——时间, s;

p ——流体压力, Pa;

ρ_a ——空气密度, kg/m³;

g ——重力加速度, m/s²;

$c_{p,a}$ ——空气比热容, J/(kg·K);

λ_a ——空气导热系数, W/(m·K);

T ——温度, K;

T' ——空气脉动温度, K;

u_i, u_j ——空气时均速度, m/s;

u'_i, u'_j ——空气脉动速度, m/s;

$\overline{u'_i u'_j}$ ——雷诺应力分量;

x_i, x_j ——笛卡尔坐标张量表示形式。

(2) 苹果区域:由非稳态导热定律进行计算求解,由于忽略苹果的呼吸热和蒸发吸热量的内热源项 $S_e = 0$ 。

$$\rho_p c_{p,p} \frac{\partial T_p}{\partial t} = \lambda_p \nabla^2 T_p + S_e, \quad (4)$$

式中:

ρ_p ——苹果密度, kg/m³;

$c_{p,p}$ ——苹果比热容, J/(kg·K);

λ_p ——苹果导热系数, W/(m·K);

T_p ——苹果温度, K;

S_e ——苹果的内热源项。

(3) 纸箱导热:纸箱为无内热源固体区域,纸箱厚度远远小于纸箱的尺寸,可将纸箱的传热视为无限平板导热,其导热微分方程为

$$\frac{d^2 T_b}{dx^2} = 0, \quad (5)$$

式中:

T_b ——纸箱温度, K。

1.1.4 初始条件和边界条件设置 风道入口段长度距离纸箱 200 mm,保证入口段气流均匀,出口段设置风道长度为 1 100 mm 防止气体回流影响。初始条件在 $t = 0$ 时,苹果的初始温度为 25 °C,边界条件:

(1) 入口边界:风道入口段设置为速度—进口边界条件,湍流强度设置为 5%,温度为冷库温度 2 °C,验证速度设置为 1 m/s,后续单因素研究中风速分别为 0.75, 1.00, 1.25 m/s。入口的水力直径为 0.24 m,雷诺数范围为 9 000~30 000。

(2) 出口边界设计为出流边界条件,冷空气的返流不影响箱内气体的流动。

(3) 壁面及风道设置为无滑移壁面,壁面风速为零,垂直于壁面的速度同样为零。模拟过程中将箱子和风道四周的界面设置为绝热边界条件。

1.1.5 网格划分 利用 Mesh 进行箱体、风道以及苹果三维模型的前处理,全局网格尺寸设置为 10 mm,苹果表面尺寸设置为 3 mm,两苹果之间间距设有一定间距,3 种模型的网格正交质量均为 1,目标歪斜度设置为 0.9,每个模型网格数目均大于 3.0×10^6 。

1.1.6 求解设置 使用商业 CFD 软件 ANSYS Fluent 19.2 进行计算求解,计算过程采用双精度求解器,湍流模型采用 SST $k-\omega$ 模型,动量、能量、湍动能、扩散率的离散格式为二阶迎风格式,压力速度耦合采用 SIMPLEC 算法,流体域的动量松弛因子设置为 0.3,时间步长为 $20 \text{ s}^{[8]}$ 。

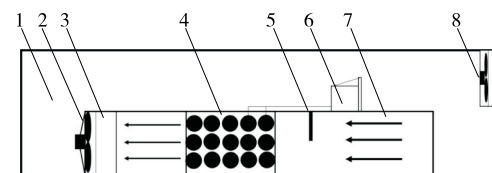
1.2 仿真模型验证

1.2.1 试验材料

富士苹果:分别挑选大果径(果径约 95 mm),中果径(果径约 82 mm),小果径(果径约 72 mm),无虫害的富士苹果作为试验样本,市售;

F4 三层瓦楞纸箱:尺寸为 390 mm × 300 mm × 205 mm,经测量纸箱厚度约为 5 mm。

1.2.2 试验设备 搭建试验台如图 3 所示。试验在冰温库中进行,试验设备主要包括变频风机、风道、风速仪和温度记录仪,将装满苹果的包装箱放置于通风道中,通过



1. 冰温库 2. 变频风机 3. 静压腔 4. 包装箱 5. 风速仪
6. 温度记录仪 7. 预冷风道 8. 冰温库冷风机

图 3 压差预冷试验台

Figure 3 Experiment rig of forced air pre-cooling

冷库持续为试验提供低温环境,利用变频风机的抽吸作用使开孔包装箱两侧形成压差,冷风同箱子中的苹果进行强制对流换热,达到快速预冷的效果。温度采集装置由热电偶与 YOKOGAWA 无纸记录仪组成,热电偶一段插入接近苹果中心位置,另一端连接记录仪,温度传感器每隔 1 min 记录一次数据。

1.2.3 试验方案 包装箱体积有限,3 种不同果径的苹果尽量摆满包装箱,尽可能防止差压预冷送风短路,由于瓦楞纸箱高度限制,95,82 mm 果径苹果平铺上下两层,72 mm 果径苹果平铺上、中、下 3 层,不同果径苹果码放方式与测温点如图 2 所示,针对 3 种果径的苹果选用 3 种单箱试验情况进行 CFD 模拟的准确性验证,试验条件如表 2 所示,每组试验重复 3 次取平均值。将试验测得的数据同模拟数据对照。开孔位置如图 1 所示。

表 2 仿真模拟验证实验

Table 2 Simulation verification experiments

试验号	通道风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	送风温度/ $^{\circ}\text{C}$	开孔大小/ mm	苹果果径/ mm
1	1	2	35	95
2	1	2	22	82
3	1	2	45	72

1.3 模拟方案

针对多因素进行模拟分析,选取部分代表性模拟试验点,分析结果,从而了解整体的试验情况。共计 4 种影响因素,每种因素各取 3 种变量,如表 3 所示。以表 3 中的试验条件设定单因素试验与正交试验的模拟方案。

1.4 评价指标

1.4.1 降温速率 果蔬温度同送风温度的差与果蔬初始温度同送风温度差值之比为 1/8 时所对应的时间即为 7/8 冷却时间,温度的无量纲参数:

$$\theta = \frac{T_p - T_a}{T_{p0} - T_a}, \tag{6}$$

式中:

θ ——无量纲温度;

T_p ——苹果的实时温度, $^{\circ}\text{C}$;

T_{p0} ——苹果的初始温度, $^{\circ}\text{C}$;

表 3 4 种影响因素 3 种变量表

Table 3 Table of four factors and three levels

水平	A 送风温 度/ $^{\circ}\text{C}$	B 送风速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	C 开孔大小/ mm	D 果径大小/ mm
1	2	0.75	22	72
2	4	1.00	35	82
3	6	1.25	45	95

T_a ——送风温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

当苹果的无量纲温度 θ 降到 1/8 时,7/8 冷却时间内平均降温速率为:

$$v = \frac{T_{p0} - T_p}{\tau}, \tag{7}$$

式中:

v ——7/8 冷却时间内平均降温速率, $^{\circ}\text{C}/\text{h}$;

τ ——7/8 冷却时间,h。

1.4.2 冷却均匀度 不同时间下的冷却均匀度反映了不同预冷因素对预冷过程的影响,计算公式:

$$\sigma = \frac{1}{T_p} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T}_p)^2}, \tag{8}$$

式中:

σ ——包装箱中苹果的温度均匀度;

T_i ——第 i 个苹果的温度, $^{\circ}\text{C}$;

n ——测点的总个数;

$\bar{T}_p$ ——测点的平均温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

包装箱中的苹果温度越均匀, σ 越小,反之越大。

1.5 数据处理

数据统计采用微软 Excel 软件进行处理,采用 Origin 软件进行绘图分析。

2 结果与分析

2.1 仿真模型验证

如图 4、图 5 所示,3 种情况的整体变化趋势吻合较好。其中小果径试验组 3 和大果径试验组 1 的温度的误差整体不超过 2.5°C ,而中果径试验组 2 误差稍大,这是由于箱体周围漏风所导致的,当风道风速为 1 m/s 时,部分冷风会从箱体周围流过导致流入箱体的冷风变少,随着开孔的增大,漏风的影响则越小。试验测得的降温趋势均略小于模拟值,可能是由于苹果中心的传热阻力较高(果核空隙、果核物性)所造成的。将不同试验组结果进行对比,模拟结果同试验结果所反映的趋势吻合,冷却速率均为试验组 3>试验组 2>试验组 1,因此,利用模拟方法探究不同因素对差压预冷效果的影响是可行的。

2.2 单一因素对预冷效果的影响

2.2.1 送风速度 选用开孔直径为 35 mm 的包装箱,以中果径苹果为研究对象,设定送风温度为 2°C ,对送风风速分别为 0.75,1.00,1.25 m/s 的 3 种情况进行模拟。不同风速对苹果果心平均温度和均匀度的影响如图 6 所示。苹果果心的平均温度降温速度(斜率)先增大后减小,是由于预冷开始时苹果外层冷量尚未传递到果心需要一段时间,随着预冷过程的进行,苹果与送风温差减小、热阻增大导致降温速率减小。风速的增加会减少差压预冷的时间,当风速为 0.75,1.00,1.25 m/s 时 7/8 冷却时间降温速率分别为 11.25,12.12,12.67 $^{\circ}\text{C}/\text{h}$,1.25 m/s

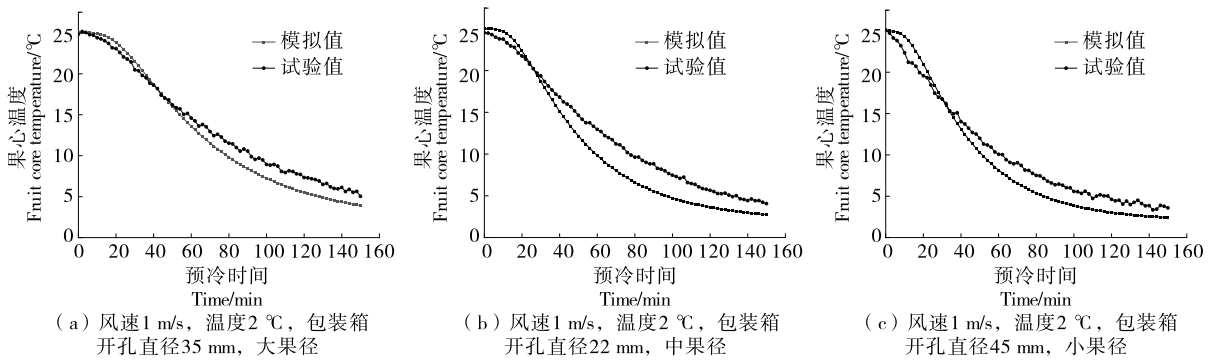


图4 仿真验证实验果心平均温度模拟与试验值对比图

Figure 4 Simulation verification of the average temperature of the experimental fruit core simulation and the comparison of the experimental results

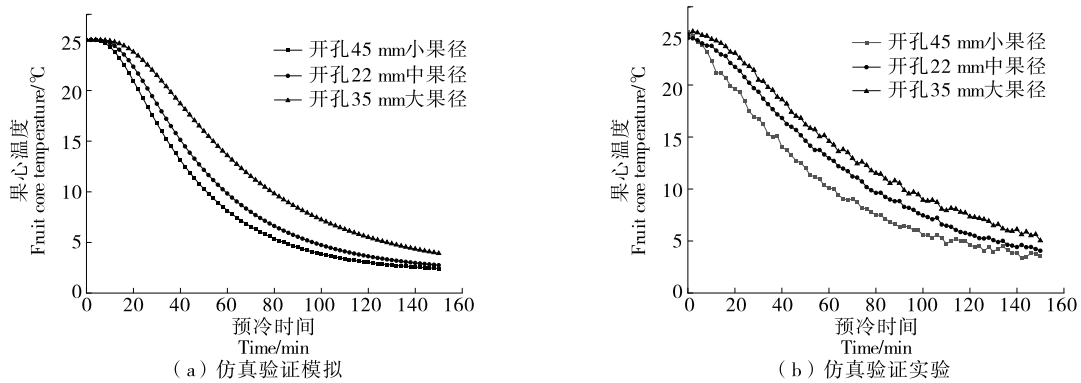


图5 仿真验证实验各组结果对比

Figure 5 Comparison of results of each experimental group in the simulation verification experiment

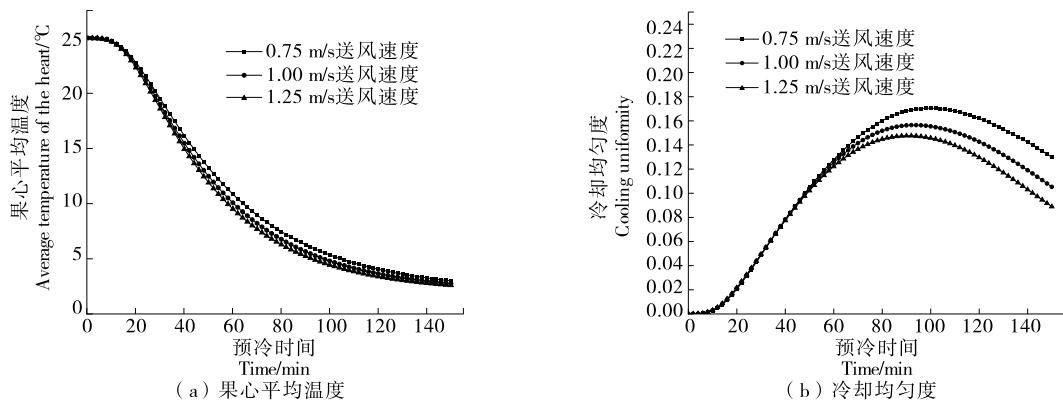


图6 不同风速下苹果差压预冷效果随时间的变化

Figure 6 Changes of differential pressure precooling effects of apple under different wind speeds

送风速度的冷却均匀度最小,0.75 m/s 送风速度的冷却均匀度最大。风速的增大会增强对流传热,及时地带走苹果的热量,从而减少其预冷时间。先冷却的苹果随着温差减小、热阻增大,风速增加对其降温速度的影响小于温差较大的苹果,故整体的均匀性随风速增加而增加。

2.2.2 送风温度 选用开孔直径为35 mm的包装箱,以中果径苹果作为研究对象,设定送风风速为1 m/s,对送风温度分别为2,4,6 °C 3种情况进行模拟。图7为不同

送风温度下苹果预冷效果随时间的变化,送风温度为2,4,6 °C时,计算7/8冷却时间的平均降温速率分别为12.12,11.07,10.02 °C/h,送风温度越低,降温速度越快。送风温度升高会提高预冷的均匀性,这是由于苹果与送风温度的温差减小,换热效果减弱,使温度分布得更加均匀。

2.2.3 开孔大小 设定送风风速为1 m/s,送风温度为2 °C,以中果径苹果作为研究对象,对包装箱开孔直径为

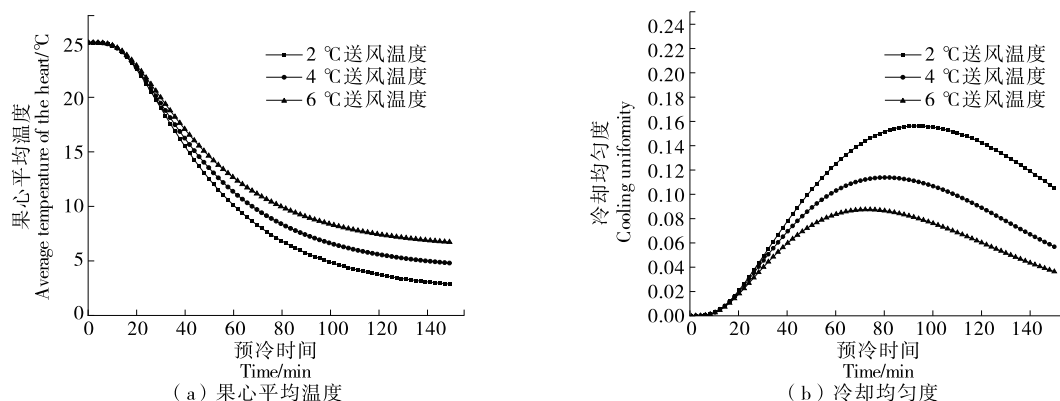


图 7 不同温度下苹果差压预冷效果随时间的变化

Figure 7 Changes of differential pressure precooling effects of apple at different temperatures

22, 35, 45 mm 3 种情况进行模拟。图 8 为不同开孔直径对差压预冷效果的影响, 开孔直径大小的改变对果心平均温度的影响并不明显, 到达 7/8 冷却时间的平均冷却速率分别为 12.16, 12.12, 11.92 °C/h, 平均冷却速率随开孔直径增大逐渐减小。结合不同开孔大小的冷空气流场图 9 分析, 这是由于虽然开孔直径变化, 但送风量不变。将纸箱看成一个整体, 单位时间内 22, 35, 45 mm 孔径并不影响箱体冷空气流量, 但对于靠近开孔处的苹果来说, 孔径的减小会增加其周围的风速, 从而强化其对流换热使其预冷得更快, 这也导致其均匀性降低。孔径增大会

减小开孔进口的风速, 使靠近进口处的苹果对流减弱, 从而降低其换热强度, 提高整体的均匀性。

2.2.4 果径 选用开孔直径为 35 mm 的包装箱, 设定送风风速为 1 m/s, 送风温度为 2 °C, 分别对 95, 82, 72 mm 3 种果径的情况进行模拟。不同果径苹果差压预冷效果如图 10 所示, 72, 82, 95 mm 果径的苹果到达 7/8 差压预冷时间的平均速率分别为 14.43, 12.12, 9.19 °C/h, 随着果径的增加苹果的平均冷却速率降低, 根据傅里叶导热定律热阻同苹果的厚度成反比, 随着预冷过程的进行, 温差逐渐减小, 热阻进一步增大, 果心温度降温越来越慢。冷

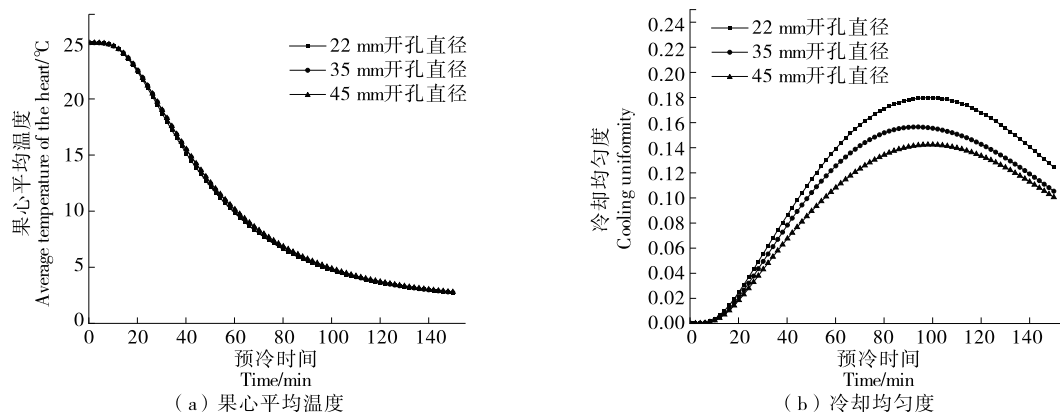


图 8 不同包装箱开孔直径下苹果差压预冷效果随时间的变化

Figure 8 Changes of apple differential pressure precooling effects with time under different box opening diameters

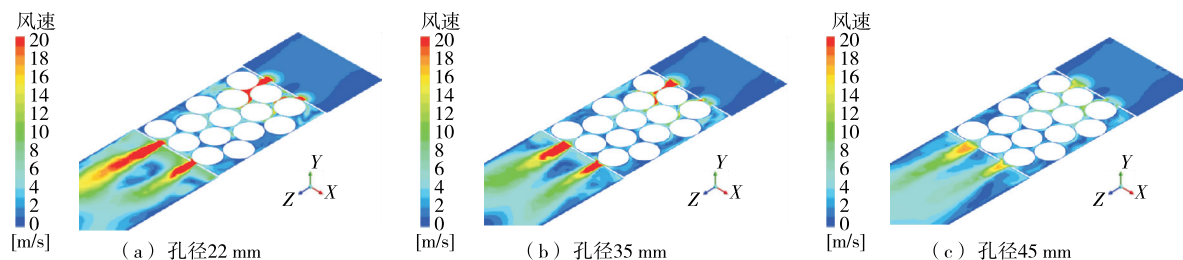


图 9 不同开孔直径下箱内高度 Y=60 mm 平面流场图

Figure 9 Plane flow field diagram of the height of the box Y=60 mm under different opening diameters

却均匀度最差的为 82 mm 果径的苹果,其次为 95 mm 果径的苹果,72 mm 果径的苹果在预冷过程中均匀性最好,结合图 11 中的流场图分析,95 mm 与 72 mm 果径苹果的码放方式为对称结构,苹果并未阻挡进气孔,同时相较于 82 mm 的两层码垛来看,95 mm 与 72 mm 果径的堆码方式使得包装箱上层的空隙更小;而 82 mm 果径的堆码更不均匀,A3 与 C3 苹果也会妨碍进风口的通风,其码垛的上层空隙也更大,造成送风的不均匀加剧。

2.3 正交试验结果

由表 4 可知,各因素对不同果径苹果平均冷却速率影响程度由大到小依次是果径大小、送风温度、送风速度、开孔大小,对均匀度影响由大到小依次为果径大小、温度、风速、开孔大小。根据表 4 中的各指标结果进行分析确定各因素的优化水平组合:基于预冷速率的为 $A_1B_3C_1D_1$,基于冷却均匀度的为 $A_3B_2C_2D_1$ 。其中 D 因素对预冷速度和预冷均匀性的影响最大,就结果来看,果径大小直接影响苹果的预冷速度,F4 的包装箱更适合作为小果径和大果径苹果的差压预冷包装箱;送风温度因素 A 是除果径外对差压预冷效果影响最大的因素,结合前人的经验,在不发生冷害的前提下,可以选择更低的送风温度使果蔬更快地降至最佳贮藏温度,故送风温度选择 2 °C;结合图 6 进行分析,因素 B 风速,随着风速的增

加,苹果的降温速率及均匀性的增幅减小,故 1 m/s 的风速最佳;因素 C 开孔大小对冷却速度和冷却均匀度的影响均为最小,为次要因素,但考虑到包装箱的机械结构开孔大小选择 35 mm 最为合适。在此工况下,3 种不同果径苹果差压预冷的结果如图 10、图 11 所示。72, 82, 95 mm 果径的苹果到达 7/8 差压预冷时间的平均速率分别为 14.43, 12.12, 9.19 °C/h。其中 72 mm 果径苹果最大冷却均匀度仅为 0.045, 95 mm 果径苹果次之为 0.089, 两者远小于错落码放的 82 mm 苹果的最大冷却均匀度。

3 结论

利用 CFD 技术对苹果的差压预冷过程进行分析,能有效地探究各种因素对差压预冷效果的影响,同试验相比 CFD 技术能够清晰地反映出包装箱中的气流流动情况,从而更加清晰地发现遇冷过程中存在的问题。但是 CFD 技术同试验相比还存在误差,减少两者之间的误差是 CFD 未来的发展方向之一。

在差压预冷过程中,风速增加,预冷速度加快,预冷更加均匀,但随着风速的增加,苹果的降温速率幅度是减小的,可利用 CFD 技术进行多组模拟,寻找送风速度同降温速率的关系,进而同风机能耗进行归一化处理获取最佳风速。随着电商的发展以及“打冷鲜销”模式的普及,

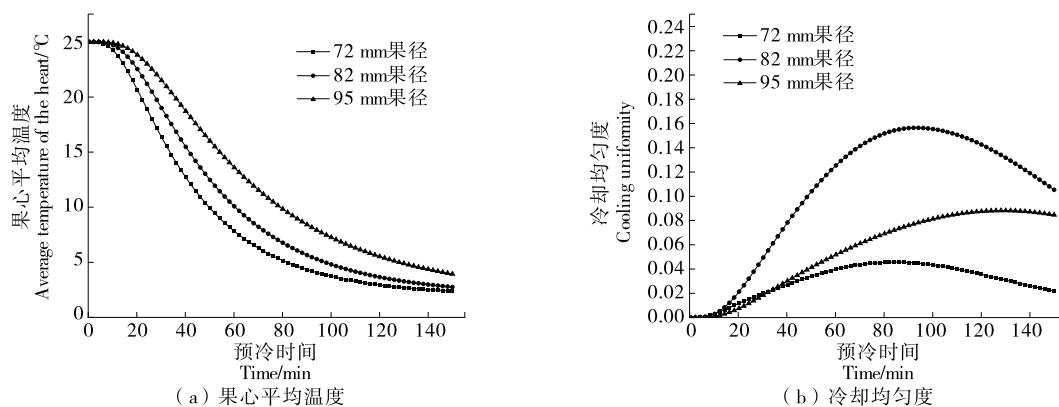


图 10 不同果径苹果差压预冷效果随时间的变化

Figure 10 Changes of differential pressure precooling effects of apples with different fruit diameters over time

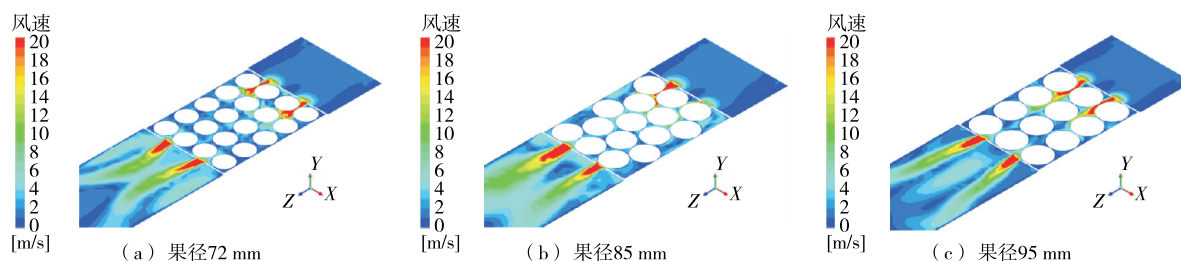


图 11 不同果径苹果在送风速度 1 m/s、包装箱开孔直径 35 mm 情况下高度 $Y=60$ mm 的平面流场图

Figure 11 Planar flow field diagram of apples with different fruit diameters with a height of $Y=60$ mm at a supply air speed of 1 m/s and a box opening diameter of 35 mm

表 4 差压预冷正交试验模拟结果

Table 4 Forced air pre-cooling orthogonal experimental table

试验号		A	B	C	D	7/8 冷却时间平均降温 速率/(℃·h ⁻¹)	最大温度 均匀度
1		1	1	3	2	11.20	0.156
2		1	2	1	1	15.12	0.048
3		1	3	2	3	9.79	0.085
4		2	1	2	1	12.26	0.037
5		2	2	3	3	8.26	0.052
6		2	3	1	2	11.77	0.116
7		3	1	1	3	7.37	0.069
8		3	2	2	2	10.02	0.088
9		3	3	3	1	12.48	0.021
7/8 冷却时间	k_1	12.04	10.28	11.42	13.29		
平均降温	k_2	10.76	11.13	10.69	11.00		
速率	k_3	9.86	11.35	10.65	8.47		
	极差 R	2.18	1.07	0.77	4.82		
冷却均匀度	k'_1	0.096	0.087	0.084	0.035		
	k'_2	0.068	0.063	0.070	0.120		
	k'_3	0.059	0.074	0.076	0.069		
	极差 R	0.037	0.024	0.014	0.085		

在不造成生鲜产品冻害的情况下,采用更低的送风温度可以使果蔬更快地达到贮藏温度。箱体的开孔率需要同时考虑预冷效果和箱体本身机械强度的影响,需要平衡两者之间的关系进行优化。

就此研究而言,果径大小对差压预冷的影响显著,一方面果径大小影响着传热热阻;另一方面果径影响着苹果的摆放方式,72 mm 与 95 mm 苹果堆码更加整齐其冷却更加均匀性,82 mm 苹果交叉摆放导致风场更加紊乱整体均匀性下降。故包装箱需要根据果品的差压预冷摆放进行合理的设计,减少送风短路现象保证送风均匀。利用 CFD 技术进行差压预冷包装的设计也是未来预冷技术发展的重点。

参考文献

[1] ZHAO C J, HAN J W, YANG X T, et al. A review of computational fluid dynamics for forced-air cooling process[J]. Applied Energy, 2016, 168: 314-331.

[2] WANG X F, FAN Z Y, LI B G, et al. Forced-air cooling of iceberg lettuces: Cooling efficiency in relation to commercial operating strategies[J]. International Journal of Refrigeration, 2022, 139: 84-92.

[3] SAMUEL M, JEFFREY K, ISMAIL U, et al. Commercial forced-air precooling of strawberries: A temperature distribution and correlation study[J]. Journal of Food Engineering, 2019, 242: 47-54.

[4] ZHANG C, YANG L W, LIN W U, et al. Experimental investigation and life-cycle cost analysis of a cold storage enhanced vacuum cooling system using ice slurry[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2021, 45: 101074.

[5] 胡适发. 压差预冷工艺优化及其控制系统设计[D]. 天津: 天津商业大学, 2022: 2-3.

HU S F. Optimization of forced-air precooling process and design of its control system[D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2022: 2-3.

[6] 王晓冉, 马笑巍, 刘岳, 等. 不同因素对国光苹果差压预冷效果的影响[J]. 食品科技, 2022, 47(12): 20-26.

WANG X R, MA X K, LIU Y, et al. Effects of different factors on differential pressure pre-cooling of Guoguang apple [J]. Food Science and Technology, 2022, 47(12): 20-26.

[7] 申江, 吴冬夏, 李帅. 不同因素对白萝卜差压预冷效果的影响[J]. 制冷学报, 2018, 39(4): 49-56.

SHEN J, WU D X, LI S. Effect of different factors on differential pressure pre-cooling of white radish[J]. Journal of Refrigeration, 2018, 39(4): 49-56.

[8] 金滔, 李博, 朱宗升, 等. 苹果垂直送风式压差预冷性能模拟与分析[J]. 农业机械学报, 2021, 52(9): 369-375.

JIN T, LI B, ZHU Z S, et al. Simulation and analysis of forced-air precooling of apples with vertical air supply[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 369-375.

(下转第 176 页)

- Elements and Health, 2011, 28(6): 61-62.
- [23] 陈晓麟, 王强. 不同干制方式对香菇甲醛及复水性的影响研究[J]. 食品科技, 2013, 38(9): 61-64.
- CHEN X L, WANG Q. Analysis of rehydration and formaldehyde in the *Lentinus edodes* by different dried methods[J]. Food Science and Technology, 2013, 38(9): 61-64.
- [24] YIN M, MATSUOKA R, YANAGISAWA T, et al. Effect of different drying methods on free amino acid and flavor nucleotides of scallop (*Patinopecten yessoensis*) adductor muscle[J]. Food Chemistry, 2022, 396: 133620.
- [25] FAO/WHO, Hoc Expert Committee. Energy and protein requirement[R]. Rome: World Health Organization, FAO, 1973: 3-6.
- [26] 石芳, 李瑶, 杨雅轩, 等. 不同干燥方式对松茸品质的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(5): 141-147.
- SHI F, LI Y, YANG Y X, et al. Effect of different drying methods on the quality of *Tricholoma matsutake*[J]. Food Science, 2018, 39(5): 141-147.
- [27] BOUDHRIOUA N, BAHLOUL N, BEN SLIMEN I, et al. Comparison on the total phenol contents and the color of fresh and infrared dried olive leaves[J]. Industrial Crops and Products, 2009, 29(2): 412-419.
- [28] MÉLANIE N F, MATTEO C, SONIA D, et al. Heat pump drying of lavender flowers leads to decoctions richer in bioactive compounds[J]. Agronomy, 2022, 12(12): 122-129.
- [29] ZHANG M, WANG F, LIU R, et al. Effects of superfine grinding on physicochemical and antioxidant properties of *Lycium barbarum* polysaccharides[J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 58(2): 594-601.
- [30] XU K, MARTINEZ M M, YANG B, et al. Finestructure, physicochemical and antioxidant properties of LM-pectins from okra pods dried under different techniques [J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 241: 116272.
- [31] XIN X, LEI Z, YAGOUR A E A, et al. Effects of ultrasound, freeze-thaw pretreatments and drying methods on structure and functional properties of pectin during the processing of okra[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 120: 106965.
- [32] ONWUDE D I, HASHIM N, CHEN G. Recent advances of novel thermal combined hot air drying of agricultural crops[J]. Trends in Food Science & Technology, 2016, 57: 132-145.
- [33] FERNANDES A, BARROS L, BARREIRA J C M, et al. Effects of different processing technologies on chemical and antioxidant parameters of *Macrolepota procera* wild mushroom[J]. LWT-Food Science and Technology, 2013, 54(2): 493-499.
- [34] ZHANG J, YAGOUR A E A, SUN Y, et al. Role of thermal and non-thermal drying techniques on drying kinetics and the physicochemical properties of shiitake mushroom[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2022, 102(1): 214-222.
- [35] 李佳霖, 杨焱, 李文, 等. 大球盖菇干制过程香气变化规律及与关键酶促反应的关联性[J]. 食品科学技术学报, 2023, 41(1): 30-42.
- LI J L, YANG Y, LI W, et al. Aroma change and its relationship with key enzymatic reactions in drying process of *Stropharia rugoso-annulata*[J]. Journal of Food Science and Technology, 2023, 41(1): 30-42.
- [36] 唐秋实, 刘学铭, 池建伟, 等. 不同干燥工艺对杏鲍菇品质和挥发性风味成分的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(4): 25-30.
- TANG S Q, LIU X M, CHI J W, et al. Effects of different drying methods on quality and volatile components of *Pleurotus eryngii* [J]. Food Science, 2016, 37(4): 25-30.
- [37] 张乐, 李鹏, 王赵改, 等. 不同干燥方式对香菇品质的影响[J]. 天津农业科学, 2015, 21(7): 149-154.
- ZHANG L, LI P, WANG Z G, et al. Effects of different drying methods on quality of *Lentinus edodes* [J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2015, 21(7): 149-154.
-
- (上接第 124 页)
- [9] 韩佳伟, 赵春江, 杨信廷, 等. 送风风速对苹果差压预冷性能的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 280-289.
- HAN J W, ZHAO C J, YANG X T, et al. Effect of air-inflow velocity on cooling efficiency during forced-air precooling of apples [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 280-289.
- [10] AMIT K, RAVI K, SUDHAKAR S. Numerical modeling of forced-air pre-cooling of fruits and vegetables: A review[J]. International Journal of Refrigeration, 2023, 145: 217-232.
- [11] 李博. 苹果的垂直送风差压预冷数值模拟研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021: 4-6.
- LI B. Numerical simulation of the forced-air precooling of apple with vertical air supply[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021: 4-6.
- [12] 胡时发, 张晨阳, 王达. 荔枝差压预冷的数值模拟与实验研究[J]. 中国果菜, 2021, 41(9): 21-26.
- HU S F, ZHANG C Y, WANG D. Simulation and experimental study of Litchi's forced-air pre-cooling [J]. China Fruit & Vegetable, 2021, 41(9): 21-26.
- [13] 宫亚芳. 苹果差压预冷过程模拟及包装箱优化[D]. 北京: 中国科学院大学, 2020: 20-74.
- GONG Y F. A numerical study on the forced-air precooling of apple and the optimization of packaging box [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2020: 20-74.
- [14] HAN J W, QIAN J P, ZHAO C J, et al. Mathematical modelling of cooling efficiency of ventilated packaging: Integral performance evaluation[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 111(8): 386-397.
- [15] 贺红霞. 垂直送风差压预冷技术研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2019: 5-10.
- HE H X. Research on forced-air precooling technology of vertical air supply [D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2019: 5-10.