

苹果垂直送风式压差预冷性能模拟与分析

金 滔^{1,2} 李 博^{1,2} 朱宗升³ 韩思雨³ 魏健健^{1,2}

(1. 浙江大学制冷与低温研究所, 杭州 310027; 2. 浙江大学浙江省制冷与低温技术重点实验室, 杭州 310027;
3. 天津商业大学天津市制冷技术重点实验室, 天津 300134)

摘要: 压差预冷是广泛应用于果蔬保鲜的预冷措施,采用垂直送风方式相较于传统的水平送风方式具有更好的冷却效果。通过建立单箱苹果垂直送风式压差预冷过程的数值模型,分析了送风速度、送风温度及箱体开孔率对预冷性能的影响。模拟结果表明,当送风速度由 0.5 m/s 增大至 2.5 m/s 时,苹果的冷却时间由 127 min 下降至 90 min,苹果中心温度平均偏差由 0.51℃ 下降至 0.20℃;当送风温度由 2℃ 升高至 6℃ 时,7/8 冷却时间不变,冷却终温与送风温度接近;当箱体开孔率由 15% 增大至 30% 时,冷却速率相近,压降由 418 Pa 降低至 86.8 Pa,苹果中心温度平均偏差由 0.73℃ 上升至 1.11℃。结合实际情况,在 15% 开孔率下垂直送风式压差预冷的最佳送风速度约为 2.0 m/s,低于相同工况下水平送风的最佳送风速度;在压降满足设计要求的前提下,出于结构强度考虑,宜采用较小的箱体开孔面积;为了减小质量损失率,应使气流均匀流过所有苹果表面,从而使其表面温度快速下降。

关键词: 苹果; 压差预冷; 垂直送风; 冷却性能; 数值模拟

中图分类号: TS255.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)09-0369-07 OSID: 

Simulation and Analysis of Forced-air Precooling of Apples with Vertical Air Supply

JIN Tao^{1,2} LI Bo^{1,2} ZHU Zongsheng³ HAN Siyu³ WEI Jianjian^{1,2}

(1. Institute of Refrigeration and Cryogenics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China
2. Key Laboratory of Refrigeration and Cryogenic Technology of Zhejiang Province, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China
3. Tianjin Key Laboratory of Refrigeration Technology, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

Abstract: Forced-air precooling is helpful in preserving the quality of fruits and vegetables. Compared with the traditional horizontal pattern, the vertical forced-air precooling has higher cooling efficiency. Computational fluid dynamics model of vertical forced-air precooling of apples was built to analyze the influence of air-inflow velocity, air-inflow temperature and the ratio of vessel aperture area on the performance of vertical forced-air precooling. It was found that when the air-inflow velocity was increased from 0.5 m/s to 2.5 m/s, the cooling time of apple was decreased from 127 min to 90 min, the main variation of the center of apples was decreased from 0.51℃ to 0.20℃, and the weight loss rate was decreased from 0.007 86% to 0.005 70%. When the air-inflow temperature was increased from 2℃ to 6℃, the cooling time remained unchanged and the finishing temperature was close to the air supply temperature. When the opening area of box was increased from 15% to 30%, the cooling rate was almost unchanged, the pressure drop was decreased from 418 Pa to 86.8 Pa, the mean variation of the center of apples was increased from 0.73℃ to 1.11℃, and the weight loss rate was about 0.006%. Concerned with the actual situation, the optimal pre-cooling air-inflow velocity of vertical forced-air precooling was about 2.0 m/s, which was lower than that of horizontal forced-air precooling. It was advisable to adopt the smaller box opening area to ensure the structural strength if the pressure drop was acceptable. In order to reduce the weight loss rate, air should flow evenly over all apple surfaces to ensure the surface temperatures drop as quickly as possible. By comparing with the experimental data, it was found that the

收稿日期: 2020-09-14 修回日期: 2020-11-03
基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目
作者简介: 金滔(1975—),男,教授,博士生导师,主要从事低温制冷技术研究,E-mail: jintao@zju.edu.cn
通信作者: 魏健健(1988—),男,讲师,主要从事低温流体和冷链物流研究,E-mail: weijzju@zju.edu.cn

results obtained by the model adopted were basically consistent with the trend of the experimental results, and the maximum temperature difference did not exceed 1.5℃, which can be used to evaluate the performance of precooling with air pressure difference in vertical delivery of apples.

Key words: apples; forced-air precooling; vertical air supply; cooling performance; numerical simulation

0 引言

在夏秋季采摘后,新鲜苹果新陈代谢仍非常旺盛,若不及时对苹果进行降温处理,则会造成苹果品质快速下降,甚至导致变质、腐烂等不良结果^[1]。因此,及时高效的预冷是苹果采摘后进行长期保存的必要措施。常用的果蔬预冷方式包括冷水预冷、真空预冷和压差预冷等。相较于其他预冷方式,压差预冷具有设备工艺简单、成本较低的特点,因此得到了广泛应用。目前,压差预冷研究主要关注各工艺参数对不同类型果蔬从单体到箱装再到堆垛层面上冷却性能的影响^[2-6]。文献[7-9]研究柑橘类水果在商业冷链中品质降低的情况,结果表明,在压差预冷过程中冷却不均匀性主要体现在气流流动方向上,而在垂直于流动的方向上冷却不均匀程度较小。

根据送风方式的不同,压差预冷又可以分为水平送风式压差预冷和垂直送风式压差预冷。由于果品自重以及搬运、堆码过程中的振荡,顶层果品与顶盖间会出现顶端空隙,容易造成冷空气送风短路与利用率低等问题。而垂直送风式压差预冷方式则不存在此问题,其冷却效率有比较明显的提升,预冷时间较水平送风压差预冷低 25%~50%^[10]。文献[10-11]对纵向送风压差预冷进行了实验研究,发现采用垂直送风方式有利于缩短预冷时长、提高预冷效果。文献[12]研究了不同送风参数下垂直送风式压差预冷对柑橘的预冷效果,结果显示,垂直送风式压差预冷可以使冷空气更好地进入包装箱内部进行换热。文献[13]研究发现,水平送风过程的顶端空隙会导致包装箱内部顶部风速远大于果蔬内部风速,使冷空气利用率降低,从而降低了冷却速度,造成包装箱顶层、中层与底层温度分布不均匀。

垂直送风式差压预冷可以有效改善气流组织、提高冷却速度,但其压降较水平送风方式最多高出 30%,其失水量也略大于水平送风方式。因此,通过 CFD 方法综合评估垂直送风式压差预冷对冷却过程中冷却速率、均匀性、压降以及失水量等性能的影响,对垂直送风式压差预冷的实际应用具有现实意义。

本文通过建立单箱苹果的垂直送风式压差预冷数值模型,研究送风速度、送风温度以及箱体开孔面积等参数对系统性能的影响,以期垂直送风式压差预冷系统的优化设计提供参考。

1 模型与计算方法

1.1 物理模型

本文所研究的垂直送风式差压预冷包装箱为预冷过程中常用的塑料周转箱,外形尺寸为 350 mm×210 mm×210 mm,周转箱的下部及四周开有相同尺寸的孔,如图 1a 所示。进行垂直送风式压差预冷时,用塑料薄膜封堵其四周侧面开孔,如图 1b 所示。苹果(直径 68 mm,高度 58 mm)在包装箱中摆放整齐,顶部留有 30 mm 的空隙。冷空气从包装箱的下部开孔进入,流经待冷却的苹果后由上部开孔流出。苹果及空气、包装的物性见表 1^[4]。

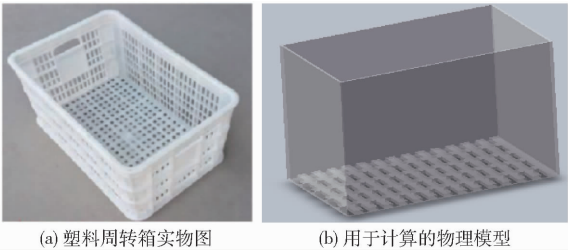


图 1 垂直送风式压差预冷箱体及物理模型示意图

Fig.1 Schematics of physical model for vertical differential precooling

表 1 冷却工况下空气、苹果、箱体和表皮物性参数

Tab.1 Physical properties of air, apple, cardboard box and its cutex under cooling conditions

类别	密度 $\rho/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	粘度 $\mu/$ ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	比热容 $c_p/$ ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	导热系数 $\lambda/$ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
空气	1.225	1.789×10^{-5}	1 006	0.024 2
苹果	837		3 822	0.38
箱体	930		1 800	0.12
表皮	770		2 300	0.13

1.2 数学模型

1.2.1 模型假设

由于包装箱与内部果品水力直径之比小于 10,多孔介质模型的连续性假设已不成立,内部的非均匀气流会对传热传质造成较大影响,因此需对内部果品建立实际模型进行求解。

由于苹果预冷过程中的传热传质过程较为复

杂,对模型作下列简化:苹果大小均匀,相邻苹果间留有 2 mm 的狭缝;苹果在冷却前后热物性变化不大,苹果及空气的热物性视为常数;不考虑苹果内部水分浓度梯度;苹果与箱体间温差不大,忽略辐射传热;苹果表面的空气层处于饱和状态,表面温度与空气温度相等;有研究表明,呼吸热对冷却速率的影响很小^[14],因而忽略苹果在预冷过程中的呼吸热。

1.2.2 控制方程

模型可以分为空气所在的流体域和苹果以及箱体所在的固体域。对于流体域,采用雷诺平均 N-S 方程对流场进行求解,连续性方程、动量方程和能量方程分别为

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

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

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

式中 t ——时间 p ——流体压力
 T ——温度 u_i, u_j ——空气时均速度
 u'_i, u'_j ——空气脉动速度
 $\overline{u'_i u'_j}$ ——雷诺应力分量
 x_i, x_j ——笛卡尔坐标的张量表示形式

其他参数见表 1,下标 a 和 p 分别指空气和苹果。对于固体域,由非稳态导热定律进行求解,即

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

式中 S_e ——能量源项

由于忽略呼吸产热量 Q_r ,固体域的源项仅为蒸发吸热量 Q_e ,即

$$S_e = \frac{Q_e - Q_r}{V_p} = \frac{Q_e}{V_p} = \frac{L_p m_t A_p}{V_p} \tag{5}$$

其中 $L_p = C_1 T_p^2 + C_2 T_p + C_3$ $\tag{6}$

式中, $C_1 = 0.0091 \times 10^3, C_2 = -7.5129 \times 10^3, C_3 = 3875.1 \times 10^3, A_p$ 和 V_p 为单个苹果的总表面积和体积, m_t 为苹果的单位时间单位面积损失的质量。

当苹果表面饱和水蒸气分压 p_s 高于冷却气流中的水蒸气分压 p_h 时有

$$m_t = k_t (p_s - p_h) = k_t (R_H p_{w,a} - \psi p_{w,p}) \tag{7}$$

其中, ψ 为苹果的表面蒸汽压降低系数,取 0.98^[14]。 p_w 为对应温度下的水蒸气饱和压力,可由拟合计算得到。此外,传质系数 k_t 由苹果侧和空气侧共同决

定^[15],空气侧可由经验关联式算得 $k_a = 4.33 \times 10^{-9} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$,苹果侧由实验测得 $k_s = 1.67 \times 10^{-10} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$, R_H 为冷空气相对湿度。

将苹果单位时间内损失的质量对冷却时间进行积分,即可得到苹果在预冷过程中损失的质量

$$\Delta m = \int_0^{t_{se}} m_t A_p dt \tag{8}$$

其中, t_{se} 为 7/8 冷却时间。在具体的计算过程中,可以将此积分式按时间步长进行离散。预冷过程中损失的质量与冷却前的总质量 m 相除,即可得到苹果在预冷过程中的质量损失率 W ,计算式为

$$W = \frac{\Delta m}{m} \times 100\% \tag{9}$$

1.2.3 边界条件

分别在入口处设置长度为 200 mm 的入口段,在出口处设置长度为 100 mm 的出口段,以保证出入口的气流均匀,在模拟过程中边界条件设置如下^[16]:

(1)模拟中设置为速度入口,湍流强度 5%,送风速度、送风温度与相对湿度由具体工况决定;入口水力直径为 0.26 m,本研究入口处雷诺数范围为 9 000 ~ 54 000。

(2)由于设置了出口段,出口处设置为出流边界条件,此处冷空气流动同样已经是充分发展的,没有返流现象发生。

(3)在空气-苹果以及空气-纸箱界面,设置壁面无滑移,能量方面设置为耦合边界条件,即界面处速度为零,壁温与近壁面处流体温度相等, $(\lambda_a \nabla T_a - \lambda_p \nabla T_p) \cdot \mathbf{n}_{ap} = m_t L_p$ (其中, $\mathbf{n}_{ap}$ 为界面法向)。由于壁面处网格不能设置得过小,为了反映边界层处的流动与热量传递,采用标准壁面函数进行计算。由于实际压差预冷过程中箱体与其他箱体的热量交换极少,在模拟过程中将箱子的四周界面设置为绝热边界条件。

1.3 数值计算方法

1.3.1 网格划分

利用 ICEM 划分网格,全局网格尺寸为 10 mm,苹果表面为 4 mm。网格独立性分析显示:当最小网格尺寸由 4 mm 下降至 3 mm 时,计算得到箱体内压力随位置变化的最大偏差不超过 1.35% (图 2),因而可认为 4 mm 的网格尺寸已经能够充分反映箱体内部的流动情况。在此网格尺寸下,在两苹果相距最近的位置也有至少 2 层网格,得到的总网格数目为 2.3×10^6 。

1.3.2 求解设置

利用商业 CFD 软件 ANSYS Fluent 18.2 模型进

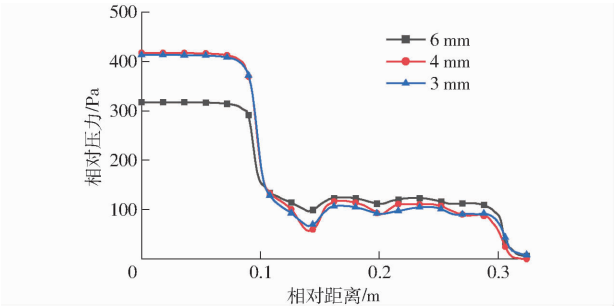


图2 不同网格尺寸下箱体内部压力随位置的变化曲线

Fig.2 Pressure change with position under different mesh sizes

行求解,计算过程中采用双精度求解器,动量、能量、湍动能、扩散率的离散格式为二阶迎风格式,湍流模型采用 SST $k-\omega$ 模型^[17-19],压力速度耦合采用 SIMPLEC 算法,利用 UDF (User-defined function) 接口将所有热源项加载到果品区域控制方程中,在开始计算时略调小动量的松弛因子为 0.3,稳定后修改为 0.7,时间步长为 20 s。

在对此模型进行求解时,由于在预冷过程中温度对物性的影响极小,可以认为物性为常数。速度场和温度场的耦合程度不高^[20],为了减少迭代次数,首先计算无能量传输的稳态流动过程,以得到的流场为初始流场进行预冷过程的模拟。由于出口处温升不大,初始温度场设置空气温度为送风温度,苹果与纸箱温度设置为冷却前温度。

1.4 模型验证

利用文献[10]中垂直送风式压差预冷的实验结果对该模型进行验证。实验中采用目前市场上普遍流通的 B4 型塑料周转箱,外部尺寸为 520 mm × 350 mm × 300 mm,箱体的四周壁面以及底部开有均匀的孔,果品在周转箱内按照 4 行 6 列 3 层整齐排布。在进行垂直送风式压差预冷实验时,采用塑料薄膜封住箱体侧面开孔,箱体开孔率为 15%,送风温度为 2℃,送风相对湿度为 90%,送风速度为 1.5 m/s。图 3 给出了第 2 层中心位置苹果的中心温度实验结果与模拟值的对比情况,可以发现,二者整体变化趋势吻合较好,最大误差不超过 2℃。冷却速度的模拟结果整体略快于实验值,这可能是由于模型未考虑苹果果核中的空隙所带来传热阻力的影响。可见,该模型通过计算对流换热和汽化潜热,能较好地反映垂直压差预冷过程的苹果冷却速率,可以用于垂直送风式压差预冷系统冷却过程的分析。

2 结果与分析

2.1 送风速度对预冷过程的影响

以每一层苹果的平均温度作为研究对象。保持

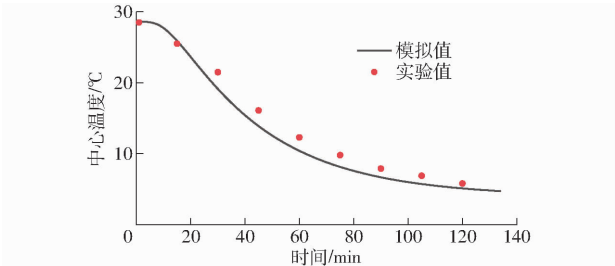


图3 苹果中心温度模拟值与实验值对比

Fig.3 Comparison of simulated and experimental core temperature

其他条件不变(送风温度 2℃,送风相对湿度 90%,箱体开孔率 15%),分别在常用的送风速度 0.5 ~ 2.5 m/s 范围内对平均温度变化趋势进行观察,如图 4 所示。与水平送风式压差预冷的结果类似^[21-22],随着送风速度的增大,苹果的冷却速率也明显提升,冷却时间由 127 min 下降至 90 min,中心温度平均偏差由 0.51℃降低至 0.20℃。但是,冷却速率的增长速率逐渐下降。当送风速度由 1.5 m/s 增大至 2.0 m/s 再至 2.5 m/s 的过程中,其 7/8 冷却时间仅缩短了 5 min 和 6 min,压降由 419.3 Pa 增长至 739.5 Pa 再至 1 138 Pa。

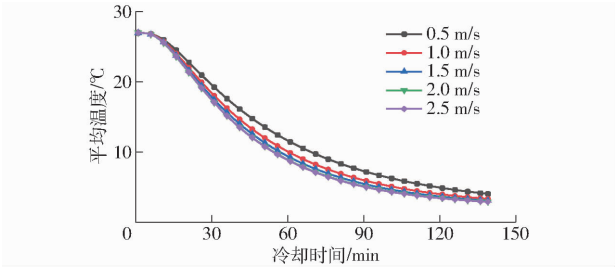


图4 不同送风速度下苹果平均温度变化曲线

Fig.4 Average temperature profile at different air-inflow velocities

冷却均匀性是衡量压差预冷性能的另一个重要指标,采用各苹果中心温度偏离均值的平均偏差对冷却均匀性进行衡量。在整个预冷过程中,苹果中心温度的平均偏差随着冷却过程先增大后减小,如图 5 所示。当送风速度增高时,冷却均匀程度也随之提升,且苹果中心温度平均偏差最大值也提前出现。

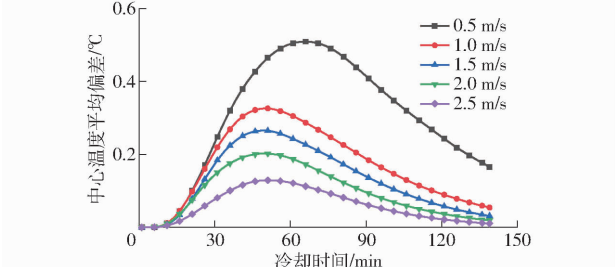


图5 不同送风速度下苹果中心温度平均偏差变化曲线

Fig.5 Mean variation of core temperatures at different air-inflow velocities

以各层苹果的平均温度为参数观察 3 层之间(迎风侧为第 1 层)的冷却程度差异,结果见图 6,第 1 层的冷却速率最快,而第 2 层最慢。通过观察图 7 所示的苹果周围气流组织形式可以发现,冷却速率与苹果表面的空气流速呈明显的正相关性:由于入口射流效应的存在,第 1 层的风速最快;由于靠近出口,流道截面剧烈变化导致气流扰动,第 3 层的苹果表面风速略慢于第 1 层,但较流动均匀的第 2 层更快。此外,在单个箱体层面上,空气流经上一层苹果后温度升高引起的冷却速率下降较小,流经整个箱体后空气的平均温度仅升高了 0.3℃,因而几乎可以忽略不计。

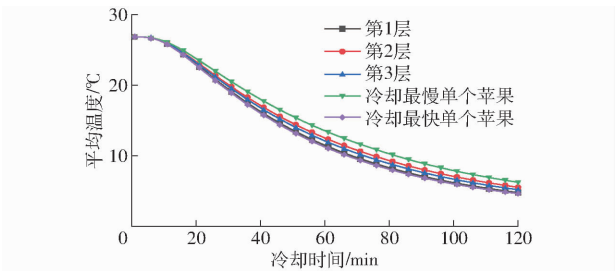


图 6 送风速度 0.5 m/s 下每层苹果平均温度变化曲线

Fig. 6 Average core temperature of different layers at 0.5 m/s air-inflow velocity

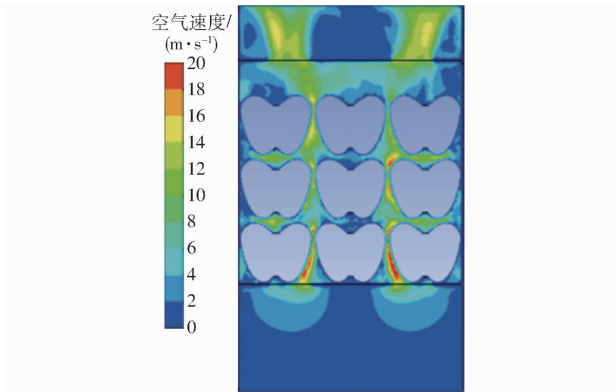


图 7 不同层苹果周围流场截面

Fig. 7 Profile of air-flow around apples of different layers

水果的质量损失率会影响其观感及口感,因此在预冷过程中应尽可能降低其质量损失率。从表 2 可以发现,随着送风速度的增大,苹果的质量损失率逐渐下降。

表 2 不同送风速度下苹果质量损失率

Tab. 2 Weight loss rate of apples at different air-inflow velocities

送风速度/(m·s ⁻¹)	损失的质量/g	质量损失率/%
0.5	0.739	0.007 86
1.0	0.623	0.006 69
1.5	0.563	0.006 04
2.0	0.531	0.005 70
2.5	0.469	0.004 99

苹果在整个预冷过程中质量损失率可由式(9)计算得到。由于在此工况下苹果的表面传质系数 $k_s = 1.67 \times 10^{-10} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$,远小于送风速度为零时空气侧传质系数($4.33 \times 10^{-9} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$),表面传质系数 k_s 受苹果周围气体流速变化的影响极小,几乎为一定值,传质阻力主要在苹果表皮侧,苹果的质量损失率与蒸气压差 $p_s - p_h$ 和冷却时间相关^[23]。

在更高的送风速度下,苹果冷却速率增大,表面温度快速下降,从而 $p_s - p_h$ 也快速下降至一个较低的水平;同时,预冷过程的冷却总时间也缩短,因此当送风速度在 0.5 ~ 2.5 m/s 之间变化时,苹果的质量损失率随送风速度升高而下降。为了尽量降低苹果的质量损失,应让气流尽可能均匀地流过所有苹果的表面,使所有苹果的表面温度尽快降低至接近送风温度。

综上,在苹果的垂直送风式压差预冷过程中,保持送风速度在 2.0 m/s 左右较为经济,低于水平送风式压差预冷所推荐经济送风速度 2.5 m/s^[21-22]。这是因为在水平式送风压差预冷过程中,有可观的风量经由上部空隙旁通,掠过苹果表面的真实风速较低。因此,采用垂直送风式压差预冷有利于降低送风速度,起到提高冷却效率的作用。

2.2 送风温度对预冷过程的影响

以迎风侧中心位置苹果的中心温度作为观察对象,保持送风速度 1.5 m/s,送风相对湿度 90%,箱体开孔率 15%,在送风温度 2、4、6℃下苹果的冷却情况如图 8 所示。在冷却初始阶段特别是热弛豫时间内,送风温度对冷却速率的影响较小。随着中心温度的下降,送风温度的影响逐渐显现。但是,送风温度的下降会带来更高的冷害发生率以及制冷系统更高的能耗。

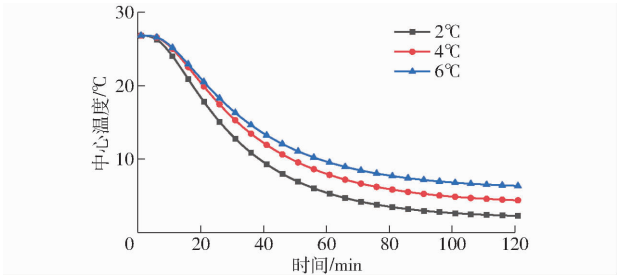


图 8 不同送风温度下苹果中心温度变化曲线

Fig. 8 Changing curves of central temperatures of apples with different air-inflow temperatures

苹果的质量损失率在送风温度 2、4、6℃下分别为 0.060 9%、0.054 9%、0.050 2%,这是由于空气中的水蒸气分压会随送风温度升高,且冷却所需的时间缩短。与水平送风式压差预冷过程类似^[24],采

用合适的送风温度可以在不损失冷却速率的情况下降低预冷过程能耗。

2.3 箱体开孔率对预冷过程的影响

考虑到第 1 层中心位置的苹果会受到入口射流的影响,以第 2 层中心位置苹果中心温度作为观察对象,保持送风速度 1.5 m/s,送风相对湿度 90%,送风温度 2℃,箱体开孔率 15%、20% 和 30% 下其变化趋势如图 9、10 所示。

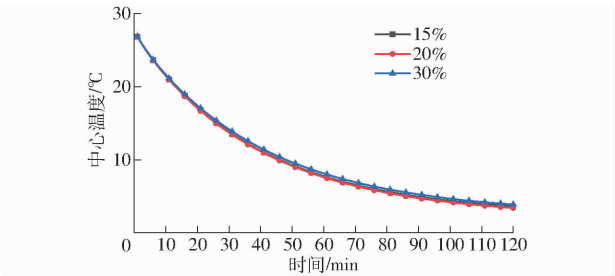


图 9 不同开孔率下苹果中心温度变化曲线
Fig. 9 Central temperatures with vessel opening rates

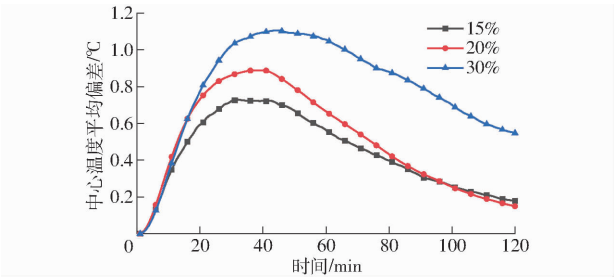


图 10 不同开孔率下苹果中心温度平均偏差变化曲线
Fig. 10 Mean variation of central temperatures with different vessel opening rates

与水平送风式压差预冷过程类似^[25],开孔率对于垂直送风式压差预冷的过程影响较小,增大开孔率对冷却速率几乎没有影响,开孔率 15%、20%、30% 下的 7/8 预冷时间分别为 95、90、95 min (见图 10)。同时,由于冷却速率几乎不变,苹果的质量损失率也较为接近,均在 0.006% 左右。当开孔率在 15% ~ 30% 内变化时,开孔面积增大会导致冷却均匀性恶化^[14],苹果中心温度平均偏差由 0.73℃ 上升至 1.11℃,这是由于开孔面积增大时入口射流减

弱,导致流经角落位置的气流减少,层内的冷却更加不均匀。开孔面积增大还会使压降迅速降低:当开孔率由 15% 增大至 20% 和 30% 时,压降分别下降至原来的约 3/5 和 1/5,由 418 Pa 降低至 86.8 Pa,这是因为压降主要源于流道截面的突变,开孔较大时流道截面的变化更小^[26-27]。综上,当开孔率在 15% ~ 30% 之间变化时,其对冷却速率与苹果质量损失率的影响较小,但是能够明显降低压降,进而节约能耗。

虽然箱体开孔率的增大使系统压降减小,但也会对箱体的结构强度产生较大的影响^[28]。因此,在保证压降满足系统设计要求的前提下,垂直送风式压差预冷箱体宜采用较小的开孔面积。

3 结论

(1) 苹果的冷却速率随送风速度的升高显著加快,7/8 冷却时间由 127 min 下降至 90 min,箱体内的冷却均匀程度也随之提升,中心温度平均偏差由 0.51℃ 下降至 0.20℃。在 15% 开孔率下的最佳送风速度约为 2.0 m/s,较水平送风式压差预冷的推荐风速更低。

(2) 苹果的冷却速率随送风温度的降低而增大,但是其冷却终温也随之下降,故其 7/8 冷却时间变化不大。因此,在实际应用中,应根据水果冷害情况以及制冷系统的能耗设置合适的送风温度。

(3) 开孔率由 15% 增大至 30% 时苹果的冷却速率变化较小,压降由 418 Pa 降低至 86.8 Pa,但是开孔面积增大会导致冷却均匀性的降低,箱体强度也会受到影响。

(4) 苹果在冷却过程中,其传质阻力主要集中在表皮侧,其单位时间、单位面积损失的质量主要由苹果表面蒸汽压与空气中水蒸气分压之差决定,与送风参数及开孔面积关联不大。为了减少苹果质量损失率,应使气流尽可能均匀流过所有苹果的表面,从而使所有苹果的表面温度尽快降低至接近送风温度。

参 考 文 献

[1] 贺红霞,申江,朱宗升. 果蔬预冷技术研究现状与发展趋势[J]. 食品科技, 2019, 44(2): 46-52.
HE Hongxia, SHEN Jiang, ZHU Zongsheng. Research status and development trends on precooling technology of fruits and vegetables[J]. Food Science and Technology, 2019, 44(2): 46-52. (in Chinese)

[2] DUAN Yuan, WANG Guanbang, OLANIYI A F. Postharvest precooling of fruit and vegetables; a review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 100(4): 278-291.

[3] HAN Jiawei, BADIA-MELIS R, ZHAO Chunjiang. CFD simulation of airflow and heat transfer during forced-air precooling of apples[J]. Journal of Food Process Engineering, 2017, 40(2): 230-241.

[4] HAN Jiawei, QIAN Jianping, ZHAO Chunjiang, 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.

[5] HAN Jiawei, ZHAO Chunjiang, QIAN Jianping, et al. Numerical modeling of forced-air cooling of palletized apple: integral evaluation of cooling efficiency[J]. International Journal of Refrigeration, 2018, 89(5): 131-141.

[6] DEFRAEYE T, LAMBRECHT R, DELELE M A, et al. Forced-convective cooling of citrus fruit: cooling conditions and energy

- consumption in relation to package design[J]. *Journal of Food Engineering*, 2014, 121(2): 118–127.
- [7] WU Wentao, HALLER P, CRONJE P, et al. Full-scale experiments in forced-air precoolers for citrus fruit: impact of packaging design and fruit size on cooling rate and heterogeneity[J]. *Biosystem Engineering*, 2018, 169(5): 115–125.
- [8] WU Wentao, DEFRAEYE T. Identifying heterogeneities in cooling and quality evolution for a pallet of packed fresh fruit by using virtual cold chains[J]. *Applied Thermal Energy*, 2018, 133(3): 407–417.
- [9] WU Wentao, CRONJE P, NICOLAI B, et al. Virtual cold chain method to model the postharvest temperature history and quality evolution of fresh fruit—a case study for citrus fruit packed in a single carton[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, 144(1): 199–208.
- [10] 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.
- HE Hongxia. Research on forced-air precooling technology of vertical air supply [D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2019. (in Chinese)
- [11] 何晖. 苹果垂直送风式差压预冷的理论及实验研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2003.
- HE Hui. Theoretical and experimental research on forced-air precooling with vertical air supply of apple [D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2003. (in Chinese)
- [12] ELANSARI A M, MOSTAFA Y S. Vertical forced air pre-cooling of orange fruits on bin: effect of fruit size, air direction, and air velocity [J]. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 2018, 19(1): 92–98.
- [13] 刘晓东, 刘凤珍. 垂直送风式草莓差压通风预冷实验研究及数值模拟[J]. 制冷, 2001, 20(4): 20–23.
- LIU Xiaodong, LIU Fengzhen. Experimental study and numerical simulation of vertical air supply strawberry precooling with differential pressure ventilation[J]. *Refrigeration*, 2001, 20(4): 20–23. (in Chinese)
- [14] TANNER D J, CLELAND A C, OPARA L U. A generalized mathematical modelling methodology for the design of horticultural food packages exposed to refrigerated conditions part 2: heat transfer modelling and testing [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2002, 25(1): 43–53.
- [15] BECKER B R, MISRA A, FRICKE B A. Bulk refrigeration of fruits and vegetables part I: theoretical considerations of heat and mass transfer[J]. *HVAC Research*, 1996, 2(2): 122–134.
- [16] ANSYS Inc. ANSYS CFX manual[M]. Pittsburgh: ANSYS Inc., 2009.
- [17] DEFRAEYE T, VERBOVEN P, NICOLAI B. CFD modelling of flow and scalar exchange of spherical food products: turbulence and boundary-layer modelling[J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 114(4): 495–504.
- [18] KNOPP T, EISFELD B, CALVO J B. A new extension for $k-\omega$ turbulence models to account for wall roughness [J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2009, 30(1): 54–65.
- [19] 李鹏飞, 徐敏义, 王飞飞. 精通 CFD 工程仿真与案例实战[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011.
- [20] FERRUA M J, SINGH R P. Modeling the forced-air cooling process of fresh strawberry packages, part I: numerical model [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2009, 32(2): 335–348.
- [21] 韩佳伟, 杨信廷, 赵春江, 等. 送风风速对苹果差压预冷性能的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(11): 280–289.
- HAN Jiawei, YANG Xinting, ZHAO Chunjiang, et al. Effect of air-inflow velocity on cooling efficiency during forced-air precooling of apples [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(11): 280–289. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151138&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.038. (in Chinese)
- [22] 朱文颖, 史策, 韩帅, 等. 基于 CFD 的苹果隔板包装预冷温度场研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(1): 331–338.
- ZHU Wenying, SHI Ce, HAN Shuai, et al. Investigation on pre-cooling temperature field in partition packaging based on CFD [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(1): 331–338. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190137&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.037. (in Chinese)
- [23] 郭嘉明, 魏鑫珏, 杜县南, 等. 基于传热传质的荔枝预冷果温和质量损失率预测[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(3): 323–329.
- GUO Jiaming, WEI Xinjue, DU Xiannan, et al. Prediction on fruit temperature and weight loss rate for litchi pre-cooling based on heat and mass transfer [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(3): 323–329. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190336&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.036. (in Chinese)
- [24] 杨培志, 胡霞, 廖刚. 送风温度对苹果差压预冷降温效果的影响[J]. *热科学与技术*, 2017, 16(5): 41–46.
- YANG Peizhi, HU Xia, LIAO Gang. Effect of air supply temperature on cooling efficiency for pressure precooling of apples [J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2017, 16(5): 41–46. (in Chinese)
- [25] 贾斌广, 王达, 刘芳, 等. 蓝莓预冷箱的设计优化[J]. *制冷学报*, 2019, 40(2): 129–134, 147.
- JIA Binguang, WANG Da, LIU Fang, et al. Design optimization of blueberry pre-cooling box [J]. *Journal of Refrigeration*, 2019, 40(2): 129–134, 147. (in Chinese)
- [26] AMBAW A, MUKAMA M, OPARA U L. Analysis of the effects of package design on the rate and uniformity of cooling of stacked pomegranates: numerical and experimental studies[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2017, 136: 13–24.
- [27] 杨洲, 陈朝海, 段洁利, 等. 荔枝压差预冷包装箱内气流场模拟与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2012, 43(增刊): 215–217.
- YANG Zhou, CHEN Haichao, DUAN Jieli, et al. Simulation and experiment of airflow field in cartons of pressure-difference pre-cooling for litchi [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(Supp.): 215–217. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/create_pdf.aspx?file_no=2012s43&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.043. (in Chinese)
- [28] JONGKOO H, JONG M P. Finite element analysis of vent/hand hole designs for corrugated fiberboard boxes [J]. *Packaging Technology and Science*, 2007, 20(10): 39–47.