

西红柿变温预冷传热特性与系统能耗分析

Heat transfer characteristic and pre-cooling system power consumption analysis of variable temperature pre-cooling process of tomato

王明涛¹ 刘焕卫² 贡汉生¹

WANG Ming-tao¹ LIU Huan-wei² GONG Han-sheng¹

(1. 鲁东大学食品工程学院, 山东 烟台 264025; 2. 天津大学机械工程学院, 天津 300072)

(1. College of Food Engineering, Ludong University, Yantai, Shandong 264025, China;

2. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

摘要:蒸发温度是影响果蔬预冷效果和预冷装置能耗的重要因素。文章利用传热学理论,建立圆形果蔬的传热模型,模拟果蔬在预冷过程中的组织温度变化规律;构建预冷库试验台,选取西红柿为研究对象,对果蔬传热模型进行验证,研究不同蒸发温度及不同果蔬尺寸工况下,西红柿中心温度的动态响应特点及预冷装置能耗变化规律。结果表明:该模型可以用于预测西红柿预冷过程中的组织温度变化,中心处实测值和模拟值平均温度偏差为 0.685℃;预冷时间随着蒸发温度和果蔬尺寸的增加而增加;系统能耗随着蒸发温度的降低而增大。根据分析结果提出果蔬变温预冷方案,西红柿由 26℃ 降至 15℃ 过程采用 4℃ 送风温度,由 15℃ 降至 10℃ 过程采用 2℃ 送风温度,由 10℃ 降至 5℃ 过程采用 0℃ 送风温度。与定温预冷方案相比,变温预冷方案可节能 9.7%~14.8%。

关键词:热传递;模型;西红柿;预冷;送风温度;蒸发温度

Abstract: The fruits and vegetables pre-cooling effect and power consumption are greatly influenced by the supply air temperature of pre-cooling process. The heat transfer model of tomato was developed by theory of heat transfer and used to predict tomatoes of different diameters temperature change during the different temperature pre-cooling process. Then pre-cooling experiments of tomato were performed with the developed pre-cooling experiment setup. The relationships between supply air temperature, tomato diameter and temperature change rate of tomato, pre-cooling system power consumption were studied based on theoretical analysis and experimental data. The results show that the mean error between simulated and measured tem-

peratures of tomato center was 0.685℃, so that the heat transfer model of tomato can be used to predict pre-cooling time effectively. Besides, pre-cooling time of tomato increases with the increase of supply air temperature and tomato diameter, pre-cooling system power consumption increases with the decrease of supply air temperature. Finally, the optimization pre-cooling scheme of variable supply air temperature is proposed according to the above analysis results. The supply air temperature remains 4℃, 2℃, 0℃ during process of the tomato center temperature dropping from 26℃ to 15℃, 15℃ to 10℃ and 10℃ to 5℃, respectively. The optimized scheme can save energy 9.7% to 14.8%, compared to constant temperature pre-cooling schemes.

Keywords: heat transfer; model; tomato; pre-cooling; supply air temperature; evaporating temperature

为有效抑制果蔬采后新陈代谢,果蔬采后需进行预冷处理,迅速将其降低至规定温度^[1-2]。果蔬采后入库预冷间隔时间越短越有利于其品质的保持^[3-4]。在整个冷藏链中,不经预冷处理的果蔬在流通中损失约为 25%~30%,而预冷果蔬的损失率为 5%~10%^[5]。

果蔬预冷过程与果蔬内部的热量传递密切相关,预冷过程果蔬组织的温升速率、温度分布规律对果蔬的贮藏品质具有重要影响^[6-9]。在工作范围内,制冷系统蒸发温度越低,果蔬预冷时间越短,而系统能效越低,反之,蒸发温度越高,果蔬预冷时间越长,而系统能效越高^[10-11]。因此,根据果蔬的热物性及传热特性,研究不同蒸发温度预冷过程中果蔬组织温度分布规律及其传热特性,合理优化预冷过程的时间和温度,是提高果蔬的贮藏品质和降低系统能耗的有效途径。

目前果蔬预冷的研究主要集中在果蔬生理特性^[3]、果蔬传热模型^[12]和预冷送风速度的优化^[13]研究方面,而对影响果蔬预冷过程的果蔬尺寸及预冷过程制冷系统总能耗方面研究较少。申江等^[14]试验研究了变送风参数对果蔬差压预

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:31301565);山东省自然科学基金资助项目(编号:ZR2014EEP026);鲁东大学科研基金资助项目(编号:27860301)

作者简介:王明涛(1983—),男,鲁东大学讲师,博士。

E-mail: wmtldu@163.com

收稿日期:2016-02-02

冷效果和变频风机能耗的影响。吕恩利等^[15]研究了风速和包装箱开口率等因素对包装箱两端压差和风机能耗的影响。由于果蔬的热物性及尺寸直接影响果蔬内部的传热过程,进而会影响果蔬的预冷效果和预冷速度。此外,改变送风参数,除了风机的能耗发生改变外,整个制冷系统的能耗(包括压缩机能耗、冷凝器风机的能耗和蒸发器风机的能耗)也会随着蒸发温度和预冷时间的变化而改变。针对上述问题,本试验拟根据果蔬生理结构建立球形果蔬的传热模型,并利用 CFD 软件模拟预冷过程中果蔬组织的温度变化,以此为基础分析果蔬预冷过程传热特点,并以西红柿为试材进行预冷试验,对不同送风温度及果蔬尺寸,从生物学传热角度分析预冷过程果蔬组织传热特点、温度变化的动态响应规律;理论分析不同蒸发温度下,西红柿预冷过程的系统整体能耗影响因素,旨在为果蔬采后预冷过程参数优化提供理论参考。

1 西红柿传热模型

1.1 模型假设

采后果蔬仍为生命体,其组织不同于常规工程材料。为简化模型,做如下假设:① 果蔬大小均匀、各向同性且内部质地均匀;② 果蔬简化为标准圆形、且组织温度仅沿半径方向变化;③ 预冷过程中果蔬及冷空气的热物性是常数,与温度无关;④ 忽略动态的传质潜热散热,只考虑显热交换;⑤ 由于预冷是在低温下进行的,忽略辐射传热;⑥ 由于果蔬呼吸热微小且预冷过程较短,忽略呼吸热。

1.2 球形果蔬的传热微分方程

通过以上假设可知,球形果蔬的预冷过程是一个无内热源的对流换热过程,其二维球形坐标下瞬态传热偏微分方程^[9]:

$$\lambda_{\rho}(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\cos\theta}{r^2 \sin\theta} \frac{\partial}{\partial \theta} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2}) = C_{\rho}\rho_{\rho} \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (1)$$

边界条件:

$$\begin{cases} r = 0, & \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0; \\ r = R, & -\lambda_{\rho} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = h(T_R - T_a), \end{cases} \quad (2)$$

初始条件:

$$\tau = 0, T = T_0, \quad (3)$$

式中:

- r ——果蔬内部组织半径,m;
- h ——果蔬表面对流换热系数,W/(m²·℃);
- λ_{ρ} ——果蔬的平均导热系数,W/(m·℃);
- C_{ρ} ——果蔬的比热容,J/(kg·℃);
- ρ_{ρ} ——果蔬的密度,kg/m³;
- T ——果蔬组织温度,℃;
- R ——果蔬半径,m;
- θ ——极半径,rad;
- τ ——预冷时间,s;
- T_0 ——果蔬初始温度,℃;
- T_a ——果蔬表面温度,℃;
- T_R ——果蔬中心温度,℃。

1.3 模型参数确定

对流换热系数通过努谢尔数 Nu 计算:

$$h = \frac{\lambda_f Nu}{d}, \quad (4)$$

$$Nu = c Re^n Pr^{1/3}, \quad (5)$$

式中:

- h ——果蔬表面对流换热系数,W/(m²·℃);
- Nu ——努谢尔数;
- λ_f ——冷却介质的导热系数,W/(m·℃);
- d ——果蔬特征尺寸,m;
- Pr ——普朗特数;
- Re ——雷诺数。

根据流动状况不同,系数 c 、 n 取值不同,对于热处理过程,以空气为处理介质时, Nu 系数可由关联式(6)计算^[16]:

$$\begin{cases} Nu = 1.263\,870 Re^{0.449\,284} Pr^{1/3}; \\ 1\,000 < Re < 70\,000, \end{cases} \quad (6)$$

本试验使用“齐达利”品种的西红柿,利用“果蔬热物性仪”和“差式扫描量热仪”对“齐达利”品种的西红柿的热物性进行测量。

1.4 模型建立及计算

采用 Gambit 作为前处理软件构建物理模型,以西红柿为试材,根据测试西红柿实际尺寸分别建立直径为 80,70,60 mm 的二维圆形模型,利用非结构化网格进行网格划分并导出网格文件备用。

利用 Fluent 读入上述导出网格文件,进行球状果蔬热处理非稳态传热过程模拟。依次检查模型网格质量,设置初始西红柿整体温度条件,并根据不同预冷温度(0,2,4℃)设置边界条件,选择能量方程及 wall 型边界,输入西红柿组织物性参数,并沿半径方向设置西红柿中心及距中心 $R/2$ 处为温度监测点,设置残差收敛标准为 0.001,计算时间步长为 1 s、步数为 10 800 次迭代求解。

1.5 预冷过程进程表征

参考文献[9],在预冷过程中用无因次过余温度来衡量果蔬的预冷速度:

$$\theta = \frac{T_m - T_f}{T_0 - T_f}, \quad (7)$$

式中:

- θ ——无因次过余温度;
- T_0 ——西红柿的初始温度,℃;
- T_m ——西红柿组织实时温度,℃;
- T_f ——送风温度,℃。

1.6 试验数据处理

记录预冷过程中西红柿不同组织处温度值,各测试点温度值取 2 次记录平均值。利用平均温度误差(mean error, MEE,℃)和最大绝对误差(maximum error, MAE,℃)对模型精度进行衡量,分别按式(8)和(9)计算:

$$MEE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [T_s(i) - T_m(i)]^2} \quad i = 0, 1, 2, \dots, n, \quad (8)$$

$$MAE = \text{Max} | T_s(i) - T_m(i) | \quad i = 0, 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

式中：
 T_s ——模拟计算值，℃；
 n ——采集数据数量。

2 试验材料及设备

2.1 试验材料

西红柿:品种齐达利,购于烟台文化路市场。挑选大小均匀、外观规则、无病虫害及机械损伤,平均直径为 80,70,60 mm 左右的西红柿作为试验材料。

2.2 试验仪器

可编程控制器 CPU: S7-226 型,西门子自动化与驱动集团;

热电阻输入模块(RTD): EM231 RTD 型,西门子自动化与驱动集团;

温度传感器: PT100 型,精度±0.1℃,北京天航自动化仪表有限公司;

风速仪: Testo 410-2 型,精度±2%,德图仪器国际贸易(上海)有限公司;

功率分析仪器: Aitek AWS2103 型,精度 0.2%FS,爱特科技有限公司;

变频器: BTV610 型,调节频率 0~60 Hz,深圳贝莱特电气技术有限公司;

预冷系统: 由制冷系统、加湿系统、数据采集系统和控制系统组成。制冷系统由压缩机、冷凝器、电子膨胀阀、顶排管和翅片管蒸发器组成,其中压缩机和风机由变频器实现转速的无级调速。冷库温度通过变频器改变压缩机转速,实现库温的无级调温。湿度调节采用加湿器启—停控制。本试验装置采用模糊控制策略对温、湿度进行控制。风速通过变频器改变风机转速,实现风速的无级调节。预冷试验库的工作原理见图 1。

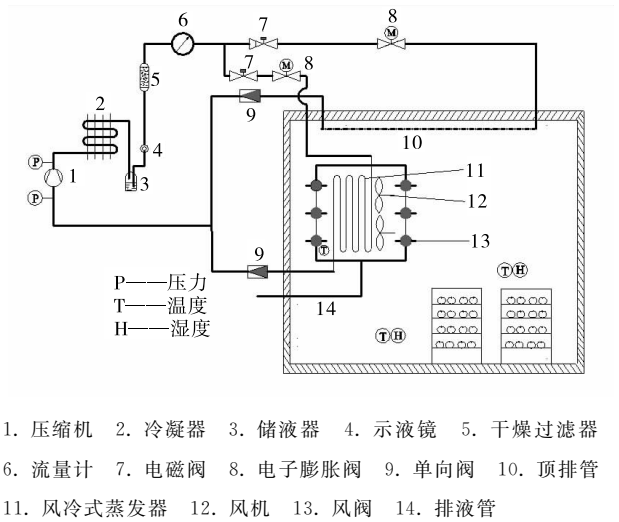


图 1 预冷试验库的工作原理图

Figure 1 Experiment set-up and schematic diagram of pre-cooling storage

3 预冷过程制冷负荷及系统能耗

3.1 制冷负荷

制冷系统承载的制冷负荷 Q 包括三部分: 果蔬热量 Q_1 、维护结构的传热量 Q_2 和电动机运转热量 Q_3 , 分别按式 (10)~(12) 计算:

$$Q_1 = cm\Delta T/\tau \quad (10)$$

$$Q_2 = KA(t_w - t_n) \quad (11)$$

$$Q_3 = P \quad (12)$$

式中:

Q_1 ——维护结构的传热量, W;

K ——维护结构的传热系数, W/(m·℃);

A ——维护机构的表面积, m²;

t_n ——冷库内空气温度, ℃;

t_w ——环境温度, ℃;

Q_2 ——果蔬的热量, W;

c ——果蔬的比热, kJ/(kg·℃);

m ——果蔬质量, kg;

ΔT ——果蔬预冷前后温差, ℃;

τ ——为预冷时间, s;

Q_3 ——电动机运转的热量, W;

P ——蒸发器电动机的功率, W。

3.2 制冷系统能耗

利用 EES(engineering equation solver) 软件对制冷剂 R22 理论循环进行热力计算, 取冷凝温度 45℃, 过热度为 5℃, 过冷度为 5℃, 计算过程中送风温度和蒸发温度相差 8℃, 蒸发温度分别为 -8, -6, -4℃, 对应的送风温度为 0, 2, 4℃, 制冷循环压—焓图见图 2。

4 结果分析

试验前将西红柿于温度为 26℃, 相对湿度为 60% 的恒温恒湿箱中静置 6 h, 使西红柿内外温度相对均匀, 然后放入上述果蔬预冷库中进行预冷试验。通过改变压缩机转速调节系统送风温度, 送风温度分别设定为: 0, 2, 4℃; 选取平均直径为 80, 70, 60 mm 的西红柿若干, 将标定后的 PT100 铂电阻温度传感器沿径向插至西红柿中心和距中心 $R/2$ 处。西红柿平铺在长、宽、高分别为 320, 400, 120 mm 的塑料包装

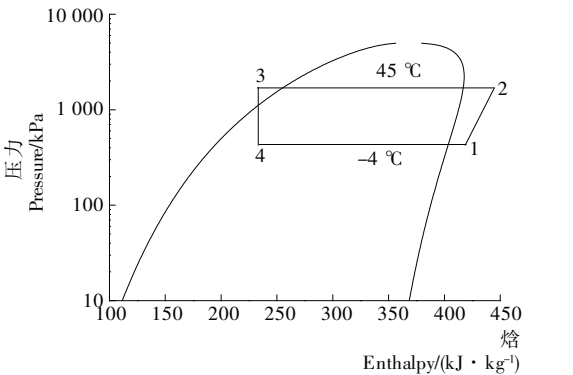


图 2 制冷循环压焓图

Figure 2 Pressure-enthalpy chart of refrigeration cycle

箱中,置于预冷库中。

4.1 西红柿传热模型精度

图3是将初始温度为27℃左右,直径为70 mm左右的西红柿,放入库温为5℃的预冷库中,西红柿、各处的测试温度和利用所建模型模拟所得预冷过程温度对比曲线。由图3可知,西红柿中心位置的温度变化速率比距中心R/2处的温度变化速率慢,表明果蔬组织对外界温度变化的影响具有时滞效应。预冷过程的前1/3时间(64 min),西红柿内部温度变化较快,后2/3时间温度变化较为缓慢,主要原因是西红柿内部温度梯度越来越小,传热速率越来越慢。

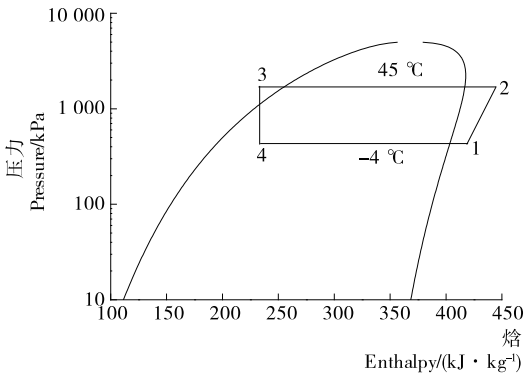


图3 预冷过程西红柿组织温度变化

Figure 3 Temperature response of tomato tissue during the pre-cooling process

所建模型与试验偏差见表1。由于西红柿的形状是椭圆形,而所建模型是圆型,因此造成模拟数值和试验数值间存在一定偏差;此外,插入的热电阻和西红柿之间会存在一定的间隙,且金属本身的导热性能优于西红柿,因此造成测试温度比模拟温度要低。

表1 传热模型误差

Table 1 Errors of heat transfer model °C		
误差	中心处	距中心 R/2 处
平均温度差	0.685	0.752
最大温度差	2.000	2.340

4.2 送风温度和果蔬尺寸对预冷时间影响

图4是对初始温度为26℃的西红柿进行预冷,送风速度为1.5 m/s,西红柿直径为80 mm左右,送风温度分别为0,2,4℃,西红柿中心温度的响应曲线。由图4可知,西红柿中心温度降至5℃时分别为101,121,195 min。送风温度由4℃变为2℃和0℃时,预冷时间分别缩短了37.9%和48.2%。预冷开始时,西红柿降温速率快,在最后阶段降温速率很缓慢。主要原因是在预冷开始阶段,果蔬温度高,与冷空气之间的温度梯度大,而在预冷后期,果蔬与冷空气之间的温度梯度变小,换热速率变慢。果蔬个体尺寸存在一定差异,同样会影响果蔬预冷效果。图5是以4℃冷空气(1.5 m/s)对初始温度为26℃,不同直径的西红柿进行预冷的西红柿中心温度变化曲线。由图5可知,不同直径(80, 70, 60 mm)的西红柿无因次过余温度达到0.125的时间分

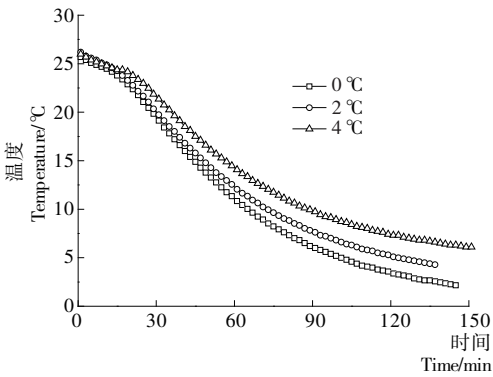


图4 送风温度对西红柿中心温度的影响

Figure 4 Temperature response of tomato at different air temperature

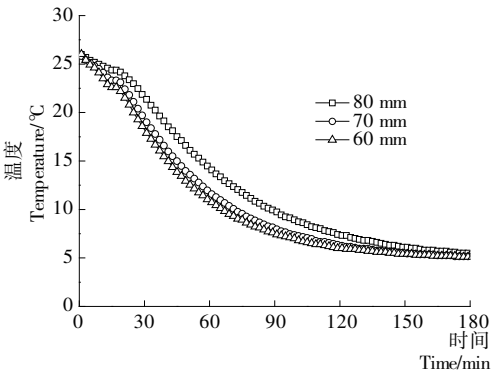


图5 不同直径西红柿中心温度的变化

Figure 5 Temperature response of different diameter of tomato

别为134,109,102 min,果蔬尺寸越大,降温速率越慢。因此预冷过程应根据果蔬尺寸进行分类,避免预冷不均匀以及处理时间过长,导致系统能耗增大。

4.3 送风温度对系统能耗的影响

送风温度越低,预冷时间越短,送风温度越高,预冷时间越长(见图4),因此有必要对不同蒸发温度下的预冷效果及制冷系统能耗进行分析。此外,果蔬在预冷过程中温度不断降低,所需冷量也不断减少,果蔬的预冷效果和制冷系统能耗也不相同。由于进行制冷系统能耗试验需要将西红柿平铺装满冷库,数量较大,因此本节通过理论分析计算制冷系统的总体能耗随着蒸发温度的变化情况。计算过程中送风温度和蒸发温度相差8℃,风速1.5 m/s,西红柿从26℃降到5℃,冷凝温度35℃,每次预冷西红柿300 kg,西红柿直径80 mm。

在预冷初始阶段,西红柿与冷空气之间存在较大的温度梯度,西红柿降温速率较快,因此可以考虑在预冷初始阶段利用较高的蒸发温度,此时制冷系统具有较高的制冷系数。当预冷至某一温度值时再降低蒸发温度,增大西红柿与冷空气的温度梯度,达到加快预冷速度的目的。根据上述思路,设计了6种不同的试验方案见表2,对每种方案的系统能耗进行了分析。

表 2 不同预冷方案制冷系统的能耗

Table 2 Comparisons of energy consumption of different pre-cooling schemes

方案	$\Delta T/^\circ\text{C}$	送风温度/ $^\circ\text{C}$	时间/min	Q_1/kW	Q_2/kW	Q_3/kW	总时间/min	系统能耗/ $(\text{kW}\cdot\text{h})$
1	26—5	4	195	3.13	0.421	0.50	195	2.170
2	26—5	2	121	4.51	0.448	0.50	121	2.223
3	26—5	0	101	5.24	0.475	0.50	101	2.302
4	26—15	4	56	4.95	0.421	0.50	133	2.150
	15—5	2	77	2.66	0.448	0.50		
5	26—15	4	56	4.95	0.421	0.50	113	2.152
	15—5	0	57	3.42	0.475	0.50		
6	26—15	4	56	4.95	0.421	0.50	117	1.960
	15—10	2	25	4.46	0.448	0.50		
	10—5	0	36	2.93	0.475	0.50		

表 2 中不同预冷阶段的时间通过预冷试验测定。方案 1、2、3 对应的蒸发温度分别为 -4 、 -6 、 $-8\text{ }^\circ\text{C}$ ，从表 2 中可以看出，系统能耗随着蒸发温度的降低而增大，因此变蒸发温度预冷果蔬具有节能效果。方案 1 中，制冷系统的制冷系数最高，但是预冷时间最长，达 195 min。方案 3 预冷时间最短(101 min)，但系统能耗最高。方案 4~6 是不同的预冷阶段采用不同的蒸发温度，通过对比发现，方案 6 随着果蔬温度的降低，采用了阶梯式的三温段蒸发温度预冷，兼顾了制冷系数和传热速率，因此表现出较好的预冷效果，预冷时间为 117 min，系统能耗最低，为 $1.96\text{ kW}\cdot\text{h}$ 。与定蒸发温度预冷方案 1、2、3 相比，方案 6 分别节能 9.7%，11.7%，14.8%。

5 结论

(1) 本研究建立了适用于圆形果蔬的数学传热模型，模拟了西红柿预冷过程内部组织的温度变化，并通过预冷试验验证了传热模型的精度，仿真数据和试验数据最大绝对误差为 $2.34\text{ }^\circ\text{C}$ ，大部分绝对误差小于 $1\text{ }^\circ\text{C}$ ，该传热模型可以用于分析圆形果蔬预冷过程中的组织温度变化。

(2) 送风温度和果蔬尺寸是影响果蔬预冷效果的重要因素。在避免果蔬冻伤的前提下，送风温度越低，预冷时间越短，但制冷系统能耗越大。根据果蔬预冷过程内部组织的温度变化，不同的阶段采用不同的送风温度进行预冷，具有较快的预冷速度和较好的节能效果。

(3) 本试验只考虑了送风温度对制冷系统能耗的影响，后续将通过研究更多因素，例如送风速度、果蔬包装尺寸及开口方式等因素对制冷系统能耗的影响。

参考文献

[1] 束菲娅, 吴时敏, 黄丹枫, 等. 都市蔬菜冷链及装备现状调查与分析[J]. 食品与机械, 2012, 28(2): 225-228.

[2] Defraeye T, Lambrecht R, Delele A M, 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: 118-127.

[3] Tao Fei, Zhang Mim, Yu Hang-qing, et al. Effects of different storage conditions on chemical and physical properties of white mushrooms after vacuum cooling[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 77: 545-549.

[4] 颜丽萍, 刘升, 饶先军. 预冷、冷藏运输和销售方法对青花菜品质的影响[J]. 食品与机械, 2012, 28(2): 174-177.

[5] 胡云峰, 李喜宏, 朱志强, 等. 果蔬保鲜温度梯度试验冷库的设计与效果分析[J]. 农业机械学报, 2005, 21(7): 132-135.

[6] Betta G, Rinaldi M, Barbanti D, et al. A quick method for thermal diffusivity estimation: Application to several foods[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 91(1): 34-41.

[7] Olsson E E M, Janestad H, Ahrnel M, et al. Determination of local heat-transfer coefficients around a circular cylinder under an impinging air jet[J]. International Journal of Food Properties, 2008, 11(3): 600-612.

[8] 蒋巧俊, 郑永华, 徐静, 等. 杨梅气调贮藏及运输包装研究进展[J]. 食品与机械, 2015, 31(5): 261-265

[9] 尹海蛟, 杨昭, 陈爱强. 果蔬热处理传热过程的数值模拟及验证[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 344-348.

[10] East A R, Smal J N, Trujillo J F. Potential for energy cost savings by utilising alternative temperature control strategies for controlled atmosphere stored apples[J]. International Journal of Refrigeration, 2013, 36(3): 1 109-1 117.

[11] 唐霞, 张明, 马俊莲, 等. 适宜贮藏温度保持鲜食无花果品质[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 282-287.

[12] 闫沙沙, 段续, 任广跃, 等. 微波冷冻干燥传热传质模型的研究进展[J]. 食品与机械, 2015, 31(1): 244-248.

[13] 高恩元, 刘升, 李晓燕, 等. 开孔面积和包装方式对甜玉米差压预冷效果的影响[J]. 食品与机械, 2013, 29(5): 179-182.

[14] 吕恩利, 陆华忠, 杨洲, 等. 番茄差压预冷过程中的通风阻力特性[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 341-345.

[15] 申江, 丁峰, 张现红. 变送风参数对西红柿差压预冷节能效果研究[J]. 制冷学报, 2015, 36(2): 113-118.

[16] 王娟, 谭金翠, 王相友. 风速对双孢蘑菇预冷过程的影响[J]. 农业机械学报, 2013, 44(10): 203-208.