

文章编号:0253 - 4339(2018) 04 - 0049 - 08

doi:10. 3969/j. issn. 0253 - 4339. 2018. 04. 049

# 不同因素对白萝卜差压预冷效果的影响

申江 吴冬夏 李帅

(天津商业大学 制冷技术重点实验室 天津 300134)

**摘要** 为研究不同因素对白萝卜差压预冷的效果,引入 Pearson 相关系数及正交试验法,计算得到白萝卜差压预冷过程中温度和均匀度二者相关度较高,Pearson 相关系数绝对值为 0.875。基于正交试验法,以降温速率和冷却均匀度为评价指标,计算并分析可得:对降温速率的影响程度由大到小的因素依次为孔隙率、送风温度、开孔率、风速;对冷却均匀度的影响程度由大到小依次为送风温度、孔隙率、风速、开孔率。正交试验结果表明:送风温度越小、风速和开孔率及孔隙率越大,降温速率越大;送风温度和孔隙率越大、风速和开孔率越小,均匀度越小。实验的优化预冷条件为:送风温度 3 ℃、风速 0.32 m/s、包装箱开孔率 0.08、孔隙率 0.48。

**关键词** 差压预冷;温度均匀度;降温速率;正交试验法;白萝卜

**中图分类号**:TB61<sup>+</sup>1; TS255.3

**文献标识码**:A

## Effect of Different Factors on Differential Pressure Pre-cooling of White Radish

Shen Jiang Wu Dongxia Li Shuai

(Tianjin Key Lab of Refrigeration Technology, Tianjin University of Commerce, Tianjin, 300134, China)

**Abstract** To study the effect of different factors on the differential pressure pre-cooling of white radish, we use the Pearson correlation coefficient and the orthogonal experimental method. The absolute value of the Pearson correlation coefficient between temperature and uniformity in differential pressure pre-cooling of white radish was 0.875, and the two were strongly correlated. Based on the orthogonal experimental method, taking cooling rate and cooling uniformity as evaluation indexes, the degree of influence on the cooling rate in decreasing order is porosity, air supply temperature, opening rate, and wind speed; the degree of influence on cooling uniformity in decreasing order is air supply temperature, porosity, wind speed, and opening rate. The orthogonal test results show that the smaller the air supply temperature, the greater the wind speed, opening rate, and porosity, and the greater is the cooling rate; the greater the supply air temperature and porosity, the smaller the wind speed and opening rate, and the smaller is the uniformity. The optimized experimental pre-cooling conditions are as follows: the air supply temperature is 3 ℃, the wind speed is 0.32 m/s, the packing box opening rate is 0.08, and the porosity is 0.48. The application of the orthogonal test method and the reference of Pearson correlation coefficient improve the efficiency of the experiment and the accuracy of variable analysis.

**Keywords** differential pressure pre-cooling; temperature uniformity; cooling rate; orthogonal experimental method; white radish

白萝卜为根茎类蔬菜,十字花科萝卜属植物,营养丰富,富含 B 族维生素和多种矿物质,在我国有悠久的食用历史<sup>[1-3]</sup>。差压预冷是一种在预冷包装箱两端产生压差,强迫冷空气与包装箱内果蔬发生热量交换的技术,与普通的预冷方式相比,差压预冷具有快速、均匀预冷的特点,是一种普遍而高效的预冷方法,现已广泛应用于农业和商业<sup>[4-8]</sup>。

近年来,很多学者对差压预冷进行了研究。申江等<sup>[9-10]</sup>研究了不同送风风速下差压预冷的效果,蔡景辉等<sup>[11]</sup>研究了不同外部遮挡方式下差压预冷的效果,王强等<sup>[12-13]</sup>研究了差压预冷的模拟。本文通过

正交试验法减少实验次数,研究了四种因素对白萝卜差压预冷效果的影响程度;通过引入 Pearson 相关系数研究了温度和均匀度之间的相关性,定量分析了二者的相关程度,这两种方法为多因素影响程度的研究及不同结果之间相关性的定量分析提供了参考。实验研究了单一因素对白萝卜差压预冷效果的影响,得到了实验的优化预冷条件。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

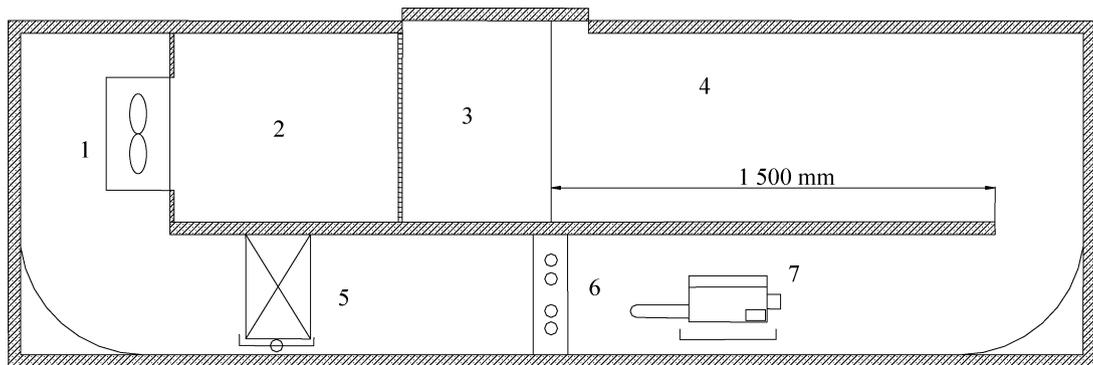
选用白萝卜作为实验材料,所选白萝卜大小相

近、形状规则、外观无损坏。

## 1.2 仪器设备

差压预冷设备由变频风机、加湿器、加热器、超声波加湿器、制冷装置和控制装置构成,如图 1 所示。

测量设备包括:MX100 多点温度数据采集器,SYSTEM6243-24 通道风速温湿度测试仪,WBG-O2 二等标准温度计。



1 变频风机;2 静压箱;3 周转箱;4 风道;5 蒸发器;6 加热器;7 加湿器。

图 1 差压预冷设备

Fig. 1 Pressure pre-cooling equipment

## 1.3 实验方法

### 1.3.1 基于正交试验法的各因素的影响

正交试验法是采取部分实验代替全面实验的方法,选择有代表性的实验点,并分析有代表性的实验结果,了解全面的实验情况<sup>[14]</sup>。本文对四个因素进行实验分析,每个实验因素各取三个变量,如表 1 所示。

表 1 四因素三水平表

Tab. 1 Table of four factors and three levels

送风温度 $t/^\circ\text{C}$	风速/(m/s)	开孔率	孔隙率
3	0.26	0.08	0.61
5	0.31	0.10	0.57
7	0.33	0.11	0.58

若按常规的实验方法,共需做  $3^4 = 81$  组实验。而通过正交试验法可以对试验工况条件进行优化<sup>[15]</sup>,只需做 9 组实验,研究各因素对预冷速率和预冷均匀度的影响,如表 2 所示。

### 1.3.2 单一影响因素对预冷效果的研究方法

1) 送风温度对预冷效果的影响:包装箱迎风面开孔率为 8%,孔隙率为 0.46,风速为 0.31 m/s 时,对送风温度分别为 2、3、5、6 °C 的四种情况进行实验。

2) 风速对预冷效果的影响:包装箱迎风面开孔率为 8%,孔隙率为 0.46,送风温度为 3 °C 时,对风速分别为 0.32、0.35、0.21 m/s 的三种情况进行实验。

3) 开孔率对预冷效果的影响:送风温度为 3 °C,孔隙率为 0.46,风速为 0.31 m/s 时,对包装箱迎

表 2 差压预冷正交试验表

Tab. 2 Pressure pre-cooling orthogonal experimental table

因素	送风温度 $t/^\circ\text{C}$	风速/(m/s)	开孔率	孔隙率
1	3	0.26	0.08	0.61
2	3	0.31	0.10	0.57
3	3	0.33	0.11	0.58
4	5	0.26	0.10	0.58
5	5	0.31	0.11	0.61
6	5	0.33	0.08	0.57
7	7	0.26	0.11	0.57
8	7	0.31	0.08	0.58
9	7	0.33	0.10	0.61

风面开孔率分别为 8%、10%、11% 的三种情况进行实验。

4) 孔隙率对预冷效果的影响:当包装箱迎风面开孔率为 8%,送风温度为 3 °C,风速为 0.29 m/s,对孔隙率分别为 0.40、0.44、0.46、0.48 的四种情况进行实验。

## 1.4 评价指标

### 1.4.1 降温速率

7/8 冷却时间是指果蔬温度与冷风温度差值为果蔬初始温度与冷风温度差值的 1/8 时所对应的冷却时间<sup>[16]</sup>,计算公式为:

$$\frac{T_p - T_{ma}}{T_{p0} - T_{ma}} = \frac{1}{8} \quad (1)$$

式中:  $T_p$  为预冷对象温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{ma}$  为送风温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{p0}$  为预冷对象初始温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

因此, 7/8 冷却时间内的平均降温速率为:

$$v = \frac{T_{p0} - T_p}{\tau} \quad (2)$$

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

### 1.4.2 温度均匀度

温度均匀度较差的果蔬在流通过程中温度会产生波动而造成二次腐烂, 因此也是预冷效果的评价指标之一, 计算公式为<sup>[12]</sup>:

$$\sigma = \frac{1}{\bar{t}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2} \quad (3)$$

式中:  $\sigma$  为包装箱内白萝卜温度均匀度;  $t_i$  为第  $i$  个白萝卜的温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $n$  为白萝卜的个数;  $\bar{t}$  为箱内白萝卜的总平均温度,  $^{\circ}\text{C}$ ,  $\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i$ 。

由公式(3)可以看出, 温度均匀度  $\sigma$  越小, 包装箱内果蔬温度分布越均匀。

### 1.5 数据处理

通过 Excel 软件处理数据, 采用 Origin 软件绘图并进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 差压预冷过程中平均温度及温度均匀度的变化

按照表 2 中第二组的实验方法(送风温度为  $3^{\circ}\text{C}$ 、风速为  $0.31 \text{ m/s}$ 、开孔率为  $0.10$ 、孔隙率为  $0.57$ ), 得到白萝卜平均温度及温度均匀度随时间的变化如图 2 所示。可知预冷过程中平均温度和温度均匀度的变化过程可分为两个阶段: 第一阶段, 平均温度近似直线下降, 均匀度近似直线上升; 第二阶段平均温度波动下降, 均匀度波动升高再逐渐降低。

为得到平均温度与温度均匀度之间的相关性, 引入 Pearson 相关系数, 其大小可以定量地衡量变量之间的相关性及相关强弱, 可以提高数据处理的效率<sup>[17-19]</sup>:

$$r = \frac{\sum XY - \frac{\sum X \sum Y}{N}}{\sqrt{\sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{N}} \cdot \sqrt{\sum Y^2 - \frac{(\sum Y)^2}{N}}} \quad (4)$$

式中:  $r$  为 Pearson 相关系数;  $X$  为变量, 表示平均温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $Y$  为另一个变量, 表示均匀度;  $N$  为变量的总数。

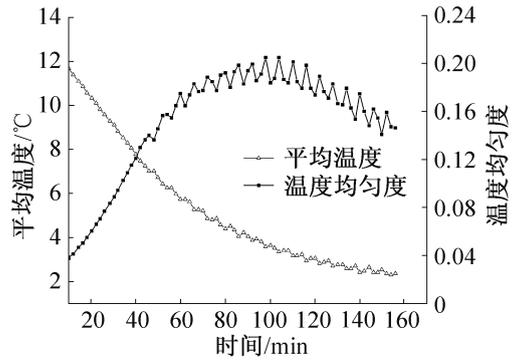


图 2 白萝卜平均温度和温度均匀度随时间的变化  
Fig. 2 The average temperature and temperature uniformity of white radish change with time

Pearson 相关系数  $r \in [-1, 1]$ , 且  $r > 0$  时, 两个变量正相关;  $r < 0$  时, 两个变量负相关;  $|r| = 1$  时, 两个变量完全线性相关。  $|r|$  越接近于 1, 两个变量线性相关越密切, 如表 3 所示。

表 3 相关强度  
Tab.3 Relative intensity

$ r $	相关强度
0.8 ~ 1.0	极强相关
0.6 ~ 0.8	强相关
0.4 ~ 0.6	中等强度相关
0.2 ~ 0.4	弱相关
0 ~ 0.2	极弱相关或无相关

通过计算得到  $r \approx -0.875$ ,  $|r| = 0.875$ , 说明平均温度与均匀度呈负相关且极强相关。

现结合图像分析相关性, 在第一阶段, 白萝卜自身带有较大热负荷, 放入预冷设备之后, 箱内温度上升。当机组开启后白萝卜和箱内冷空气温度一起稳定下降, 因此温度近似直线降低, 温度的变化导致箱内各处温度差异变大, 均匀程度变低, 所以均匀度线性上升。第二阶段, 其波动变化是由于压缩机受到温控器的控制而周期性的启停: 随着压缩机的开启, 白萝卜的温度随通道内冷空气温度一同降低, 当通道内冷空气温度下降至设定温度以下  $0.4^{\circ}\text{C}$  后, 压缩机受控停机, 此时白萝卜的呼吸作用产生的热量使白萝卜和通道内空气的温度上升, 期间白萝卜的温度更均匀, 因此均匀度降低; 随后, 温度回升至设定温度以上  $0.4^{\circ}\text{C}$  后, 压缩机受控重新启动, 通道内空气的温度继续降低, 白萝卜的平均温度也降低, 而温度的变化导致均匀度升高, 随着压缩机的启停而周期性的波

动。随后,白萝卜的温度越来越低,均匀度越来越高直至最大值,而当白萝卜与通道内冷空气的温差越来越小、换热效果越来越弱时,箱内白萝卜温度均匀性越来越好,最后均匀度呈波动下降趋势。分析可知,温度均匀度的变化受温度的变化而改变,且二者呈负相关。

## 2.2 各因素对白萝卜差压预冷效果的影响

表 4 为表 2 的 9 组实验结果,表 5 所示为实验结果的极差分析,表中的  $k_i$  和  $k'_i$  为因素值为  $i$  ( $i$  值的

选取参考表 1) 时所得结果的算数平均值。

$R$  为平均降温速率的极差:

$$R = \max(k_1, k_2, k_3) - \min(k_1, k_2, k_3) \quad (5)$$

$R'$  为最大温度均匀度的极差:

$$R' = \max(k'_1, k'_2, k'_3) - \min(k'_1, k'_2, k'_3) \quad (6)$$

极差数值的大小与各因素对实验结果的影响程度呈正相关,即极差越大,该因素对实验结果的影响程度越大;极差越小,该因素对实验结果的影响程度越小。

表 4 正交试验结果

Tab. 4 Results of the orthogonal experiment

参数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
平均降温速率/( $^{\circ}\text{C}/\text{h}$ )	3.84	6.21	8.84	5.94	4.59	3.55	3.8	5.9	3.8
最大温度均匀度	0.117	0.197	0.221	0.079	0.061	0.110	0.063	0.072	0.039

表 5 正交试验极差分析

Tab. 5 Range analysis of the orthogonal experiment

$k_1$	$k_2$	$k_3$	$R$	$k'_1$	$k'_2$	$k'_3$	$R'$
6.177	4.693	4.500	1.677	0.178	0.083	0.058	0.120
4.407	5.567	5.539	1.160	0.086	0.110	0.123	0.037
4.310	5.317	5.754	1.433	0.105	0.105	0.115	0.015
3.957	4.520	6.893	2.936	0.073	0.123	0.124	0.051

由表 5 可知,  $R$  (孔隙率)  $>$   $R$  (送风温度)  $>$   $R$  (开孔率)  $>$   $R$  (风速);  $R'$  (送风温度)  $>$   $R'$  (孔隙率)  $>$   $R'$  (风速)  $>$   $R'$  (开孔率)。因此,对白萝卜差压预冷降温速率的影响由大到小依次为孔隙率、送风温度、开孔率、风速,对温度均匀度的影响由大到小依次为送风温度、孔隙率、风速、开孔率。

## 2.3 单一影响因素对预冷效果的影响

### 2.3.1 送风温度对差压预冷效果的影响

图 3 所示为不同送风温度下白萝卜温度随时间的变化。由图 3 可知当送风温度较低时 ( $2^{\circ}\text{C}$  和  $3^{\circ}\text{C}$ ), 降温过程分为两个阶段, 第一阶段为接近平滑的直线, 第二阶段为波动下降的曲线, 与图 2 的平均温度变化情况及原因相同。当送风温度较高时 ( $5^{\circ}\text{C}$  和  $6^{\circ}\text{C}$ ), 白萝卜温度很快呈波动下降的趋势, 这是因为通道内送风温度较高时, 通道受白萝卜自身热负荷的影响较小, 因此白萝卜温度很快就随压缩机的启停而波动下降。当送风温度为  $2, 3, 5, 6^{\circ}\text{C}$  时, 计算  $7/8$  冷却时间内的平均降温速率分别为  $4.31, 4.05, 3.21, 2.51^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 。因此, 整个预冷过程中, 送风温度越低, 白萝卜的降温速率越大, 降温越快。

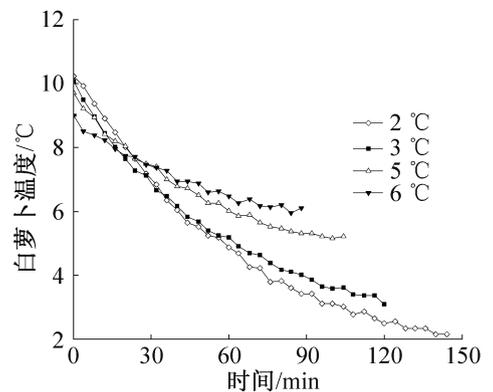


图 3 不同送风温度下白萝卜温度随时间的变化

Fig. 3 The temperature of white radish changes with time under different air supply temperatures

图 4 所示为不同送风温度下白萝卜温度均匀度随时间的变化。可知当送风温度为  $2^{\circ}\text{C}$ 、 $3^{\circ}\text{C}$  时, 均匀度的变化过程与温度的变化规律类似, 先是类似平滑的直线, 然后是波动的曲线。而当送风温度为  $5^{\circ}\text{C}$ 、 $6^{\circ}\text{C}$  时, 则很快呈波动变化趋势, 并且小于  $2^{\circ}\text{C}$ 、 $3^{\circ}\text{C}$  时的均匀度, 这也是由于温度较高时, 白萝卜与通道内温差较小, 换热效果较弱, 因此温度分布

更均匀,波动变化受到压缩机启停的影响。均匀度由大到小对应的送风温度分别为 2、3、5、6 °C。因此送风温度越高,均匀度越低,箱内温度分布越均匀。

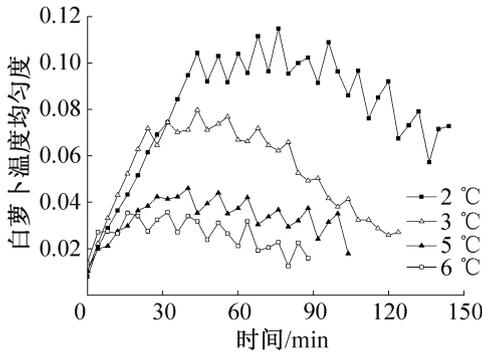


图 4 不同送风温度下白萝卜温度均匀度随时间的变化

Fig. 4 The temperature uniformity of white radish changes with time under different air supply temperatures

综合降温速率和温度均匀度,当送风温度为 3 °C 时,预冷效果较好。

### 2. 3. 2 风速对差压预冷效果的影响

图 5 所示为不同风速下白萝卜温度随时间的变化。可知不同送风温度下白萝卜的温度依然分为两个阶段,第一阶段为接近平滑的直线,第二阶段受压缩机启停的影响为波动下降的曲线。第一阶段,三种风速下温度变化的斜率相近,说明第一阶段不同风速对降温速率的影响较小。第二阶段,风速对降温速率影响较弱。通过计算,风速为 0.34、0.32、0.21 m/s 时,7/8 冷却时间内的平均降温速率分别为 3.34、3.27、3.16 °C/h。因此在整个预冷过程中,风速越大,降温速率越大,降温越快。

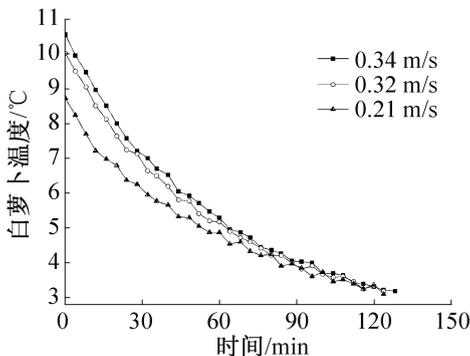


图 5 不同风速下白萝卜温度随时间的变化

Fig. 5 The temperature of white radish changes with time under different wind speed

图 6 所示为不同风速下白萝卜均匀度随时间的变化。可知均匀度的变化同样有两个阶段,第一阶段为接近平滑的直线,第二阶段为波动变化的曲线。在第一阶段,风速越大,均匀度变化越小,这是由于随着

风速的增大,白萝卜之间的传热效果增强,使各点温度分布更加均匀。在第二阶段,0.32 m/s 和 0.34 m/s 时的均匀度接近且明显低于 0.21 m/s 时的均匀度。对比温度平稳时的最终均匀度,发现 0.32 m/s 时的最终均匀度最低,箱内分布最均匀,0.34 m/s 时的最终均匀度次之,0.21 m/s 时的最终均匀度最差。

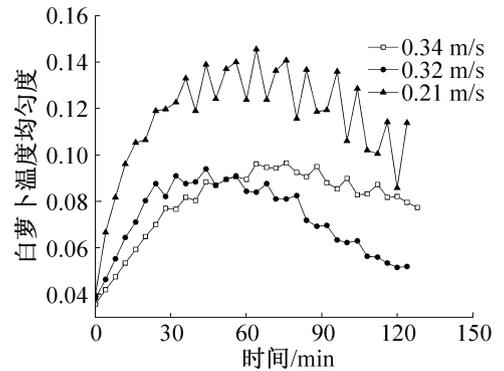


图 6 不同风速下白萝卜温度均匀度随时间的变化

Fig. 6 The temperature uniformity of white radish changes with time under different wind speed

综合降温速率和温度均匀度,选择 0.32 m/s 的风速时,预冷效果最好。

### 2. 3. 3 开孔率对差压预冷效果的影响

图 7 所示为不同开孔率下白萝卜温度随时间的变化。不同开孔率下白萝卜的温度变化也分为两个阶段,第一阶段是温度和时间近似一次函数的直线,第二阶段是受压缩机启停影响呈现波动下降的曲线。通过图像的斜率可知,在第一阶段,开孔率越大,降温速率越快。通过计算,开孔率为 0.11、0.10、0.08 时,7/8 冷却时间内的平均降温速率分别为 3.97、3.91、3.87 °C/h,这是由于开孔率的增大增强了白萝卜之间的换热。因此在整个预冷过程中,开孔率越大,降温速率越大,降温越快。

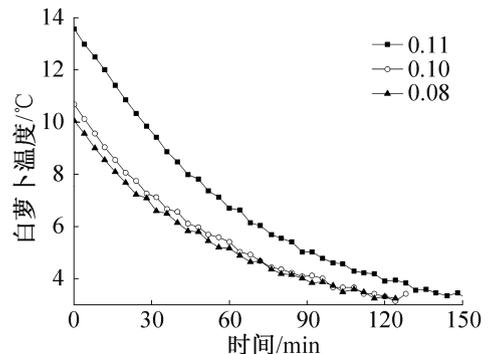


图 7 不同开孔率下白萝卜温度随时间的变化

Fig. 7 The temperature of white radish changes with time under different opening rate

图 8 所示为不同开孔率下白萝卜温度均匀度随时间的变化。开孔率为 0.10 和 0.08 时的均匀度略低于开孔率为 0.11 时的均匀度,温度逐渐平稳时,开孔率为 0.08 时的最终均匀度又低于开孔率为 0.10 时的最终均匀度。因此包装箱开孔率越小,均匀度越小。此外,对比不同送风温度和不同风速下的最大均匀度,不同开孔率下的最大均匀度差别较小,说明开孔率对均匀度的影响弱于送风温度和风速,与之前正交试验得出的结果一致。

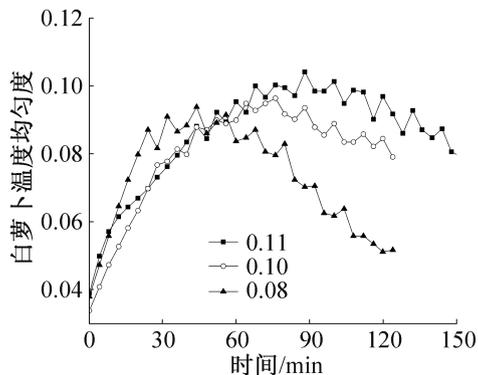


图 8 不同开孔率下白萝卜温度均匀度随时间的变化

Fig. 8 The temperature uniformity of white radish changes with time under different opening rate

根据不同开孔率对降温速率和均匀度的影响可知,以预冷速率为主时,选择 0.11 的开孔率;以均匀度为主时,选择 0.08 的开孔率。但由于开孔率不是影响预冷速率的主要因素,而且均匀度对白萝卜预冷很重要,因此选择开孔率为 0.08 的包装箱。

### 2.3.4 孔隙率对差压预冷效果的影响

图 9 所示为不同孔隙率下白萝卜温度随时间的变化。不同孔隙率下温度的变化也分为两个阶段,第一阶段类似平滑的直线,第二阶段由于压缩机启停的关系呈波动下降的曲线。通过计算,孔隙率为 0.40、

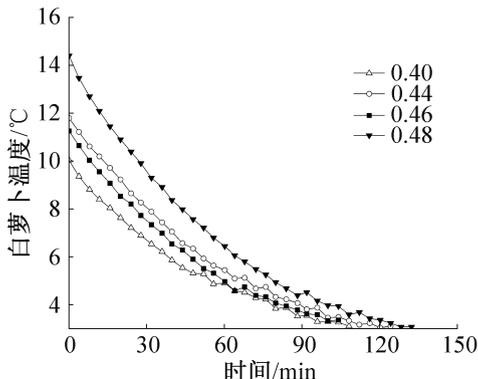


图 9 不同孔隙率下白萝卜温度随时间的变化

Fig. 9 The temperature of white radish changes with time under different porosity

0.44、0.46、0.48 时,对应的 7/8 冷却时间内的平均降温速率分别为 4.63、4.70、4.94、5.11  $^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 。这是由于孔隙率越大,白萝卜之间的换热越强。因此,白萝卜预冷过程中,孔隙率越大,降温速率越大,降温越快。

图 10 所示为不同孔隙率下白萝卜温度均匀度随时间的变化。从预冷结果可知,均匀度由大到小所对应的孔隙率分别为 0.40、0.44、0.46、0.48,这是由于孔隙率越大,冷空气与白萝卜的换热效果越强,各处温度越均匀,因此,孔隙率越大,均匀度越低。随着温度的逐渐稳定,孔隙率为 0.48 时的最终均匀度越来越低,温度越来越均匀。

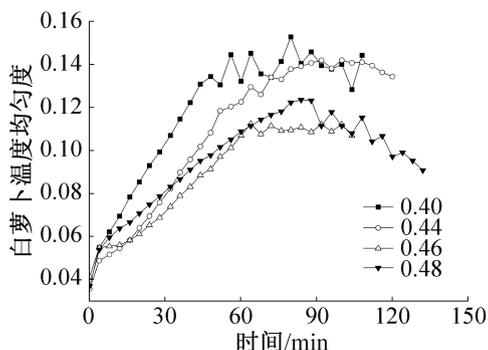


图 10 不同孔隙率下白萝卜温度均匀度随时间的变化

Fig. 10 The temperature uniformity change of white radish changes with time under different porosity

综合降温速率和温度均匀度,选择孔隙率为 0.48 的包装箱,预冷效果最好。

## 3 结论

本文通过 Pearson 相关系数分析了温度和温度均匀度之间的相关性,采用正交试验法分析了各因素的影响,并进行了单一因素对白萝卜差压预冷效果的实验,提出了本实验的优化预冷条件,得到如下结论:

1) 白萝卜差压预冷过程中,温度和均匀度的变化过程均分为两个阶段,其中第二段的波动变化与压缩机的启停有关。温度和均匀度之间的 Pearson 相关系数的绝对值为 0.875,二者极强相关。

2) 正交试验法将 81 组实验减少为 9 组实验,对这 9 组实验结果进行极差计算、分析得到:对降温速率的影响由大到小依次为孔隙率、送风温度、开孔率、风速;对温度均匀度的影响由大到小依次是送风温度、孔隙率、风速、开孔率。

3) 在单一因素对白萝卜差压预冷效果的实验中,控制其他三个因素不变,以温度和均匀度为评价指标,通过改变单一因素进行实验研究,可得:送风温

度越低,降温速率越大,送风温度为 2 ℃ 时,7/8 冷却时间内的平均降温速率最高,为 4.31 ℃/h;送风温度越高,均匀度越小,即送风温度为 6 ℃ 时,均匀度最小。风速越大,降温速率越大,当风速为 0.34 m/s 时,7/8 冷却时间内的平均降温速率最高,为 3.34 ℃/h;风速为 0.32 m/s 和 0.21 m/s 时的均匀度较低,但 0.32 m/s 时的最终均匀度最低。开孔率越大,降温速率越大,开孔率为 0.11 时,7/8 冷却时间内的平均降温速率最高,为 3.97 ℃/h;开孔率越小,均匀度越小,开孔率为 0.08 时均匀度最小。孔隙率越大,降温速率越大,孔隙率为 0.48 时,7/8 冷却时间内的平均降温速率最高,为 5.11 ℃/h;孔隙率越大,均匀度越小,孔隙率为 0.48 时均匀度最小。

4) 综合考虑 7/8 冷却时间内的平均降温速率、整体均匀度、最高均匀度和最终均匀度,得到本实验的优化预冷条件为:送风温度 3 ℃、风速 0.32 m/s、包装箱开孔率 0.08、孔隙率 0.48。

#### 参考文献

[1] 朱信阳,李军民,唐浩,等. 白萝卜的开发价值及其栽培技术[J]. 中国果菜,2010(3):28-30. (ZHU Xinyang, LI Junmin, TANG Hao, et al. Development value of white radish and its cultivation techniques [J]. China Fruit & Vegetable, 2010(3):28-30.)

[2] 杨恩升. 白萝卜的药用价值[J]. 农村新技术,2016(4):60-61. (YANG Ensheng. The medicinal value of white radish[J]. New Rural Technology, 2016(4):60-61.)

[3] 彭章蒙,孟晓伟,刘朋朋,等. 白萝卜促消化功能的研究[J]. 食品研究与开发,2013,34(16):105-106. (PENG Zhangmeng, MENG Xiaowei, LIU Pengpeng, et al. Study of raphanus sativus L. on improving digestion function[J]. Food Research and Development, 2013, 34(16):105-106.)

[4] 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(11):280-289. (HAN Jiawei, ZHAO Chunjiang, YANG Xinting, 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(11):280-289.)

[5] 彭苗,陈华,杜建通,等. 果蔬差压预冷技术[J]. 保鲜与加工,2000(1):15-17. (PENG Miao, CHEN Hua, DU Jiantong, et al. Precooling technique under differential pressure for fruit and vegetable[J]. Storage and Process, 2000(1):15-17.)

[6] CASTRO L R D, VIGNEAULT C, CORTEZ L A B. Container opening design for horticultural produce cooling effi-

ciency[J]. Journal of Food Agriculture & Environment, 2004, 2(1):135-140.

[7] TUTAR M, ERDOGDU F, TOKA B. Computational modeling of airflow patterns and heat transfer prediction through stacked layers' products in a vented box during cooling[J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 32(2):295-306.

[8] VIGNEAULT C. Design of plastic container opening to optimize forced-air pre-cooling of fruits and vegetables[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2002, 18(1):73-76.

[9] 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. (SHEN Jiang, DING Feng, ZHANG Xianhong. Research on energy saving of tomato pressure pre-cooling by changing the supply air parameter [J]. Journal of Refrigeration, 2015, 36(2):113-118.)

[10] 王强,陈焕新,董德发. 黄金梨差压预冷送风速度的选择[J]. 制冷学报,2008,29(4):59-62. (WANG Qiang, CHEN Huanxin, DONG Defa. Determination of airflow rate in pressure pre-cooling of golden-pear[J]. Journal of Refrigeration, 2008, 29(4):59-62.)

[11] 蔡景辉,刘斌,王艳红,等. 差压预冷外部遮挡开孔方式数值研究及实验验证[J]. 制冷学报,2011,32(1):51-57. (CAI Jinghui, LIU Bin, WANG Yanhong, et al. Numeral study and experimental verification of vent-hole type of external cover on differential pressure cooling[J]. Journal of Refrigeration, 2011, 32(1):51-57.)

[12] 王强,王伟锋,杨静. 果蔬差压通风预冷冷却均匀性研究[J]. 制冷学报,2011,32(5):75-78. (WANG Qiang, WANG Weifeng, YANG Jing. Study on cooling uniformity of fruits and vegetables in pressure[J]. Journal of Refrigeration, 2011, 32(5):75-78.)

[13] ZHAO Chunjiang, HAN Jiawei, YANG Xinting, et al. A review of computational fluid dynamics for forced-air cooling process[J]. Applied Energy, 2016, 168:314-331.

[14] 刘瑞江,张业旺,闻崇炜,等. 正交试验设计和分析方法研究[J]. 实验技术与管理,2010,27(9):52-55. (LIU Ruijiang, ZHANG Yewang, WEN Chongwei, et al. Study on the design and analysis methods of orthogonal experiment [J]. Experimental Technology and Management, 2010, 27(9):52-55.)

[15] 周玉珠. 正交试验设计的矩阵分析方法[J]. 数学的实践与认识,2009,39(2):202-207. (ZHOU Yuzhu. Matrix analysis method of orthogonal experimental design[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2009, 39(2):202-207.)

[16] 许建,廖亮,杜娟,等. 差压预冷对哈密瓜的预冷效果[J]. 江苏农业科学,2013,41(8):255-256. (XU Jian,

LIAO Liang, DU Juan, et al. Pre-cooling effect of differential pressure pre-cooling on cantaloupe [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2013, 41(8):255–256. )

[17] 张宇镭, 党琰, 贺平安. 利用 Pearson 相关系数定量分析生物亲缘关系 [J]. *计算机工程与应用*, 2005(33):83–86, 103. (ZHANG Yulei, DANG Yan, HE Pingan. Quantitative analysis of the relationship of biology species using Pearson correlation coefficient [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2005(33):83–86, 103. )

[18] 蒋辉, 邓伟民, 陈晓青. 基于 Pearson 系数与多元核支持向量分类的葡萄酒分析 [J]. *农业机械学报*, 2014(1):203–208. (JIANG Hui, DENG Weimin, CHEN Xiaoqing. Analysis of wine based on Pearson coefficients and multi kernel support vector classification [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014(1):203–208. )

[19] 王凯, 冯晖, 刘财. Pearson 相关系数法快慢横波波场分离 [J]. *世界地质*, 2012, 31(2):371–376. (WANG Kai, FENG Xuan, LIU Cai. Wave field separation of fast-slow shear waves by Pearson correlation coefficient method [J]. *Global Geology*, 2012, 31(2):371–376. )

#### 通信作者简介

申江, 男, 教授, 天津商业大学机械工程学院, 13920461021, E-mail: 13920461021@139.com。研究方向: 食品冷链技术、制冷系统节能与优化。

#### About the corresponding author

Shen Jiang, male, professor, Mechanical Engineering School, Tianjin University of Commerce, + 86 13920461021, E-mail: 13920461021@139.com. Research fields: food cold chain technology, energy saving and optimization of refrigeration system.