

苹果差压预冷均匀性的实验研究

解海卫,张晶*,张艳,邓尚洵

(天津商业大学 机械工程学院,天津 300134)

摘要: 通过搭建差压预冷实验台研究送风速度、送风温度、开孔大小以及开孔方式4个因素对差压预冷冷却均匀性的影响。利用混合正交试验分析法研究以上4个因素对冷却均匀性的影响程度。结果表明:送风速度越大、送风温度越高预冷均匀性越好,预冷过程中均匀度峰值最低;对于圆形开孔,孔径越大,均匀度越好;对于椭圆形开孔,孔径越小,均匀度越好;孔径大小不同时,均匀性变化过程相似,峰值出现所需预冷时间相同(峰值出现的位置相同);不同送风速度、送风温度、开孔大小和开孔方式,均匀度均呈先增大后减小的趋势;不同送风速度、送风温度、开孔大小和开孔方式对均匀度影响程度大小依次为送风温度、送风速度、开孔大小、开孔方式。

关键词: 差压预冷;均匀度;送风速度;送风温度;开孔方式;开孔大小

Experimental Research on Uniformity of Differential Pressure Precooling of Apple

XIE Hai-wei, ZHANG Jing*, ZHANG Yan, DENG Shang-xun

(School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

Abstract: For study the effects of air velocity, air temperature, aperture size and opening mode on the uniformity of differential pressure precooling that set up the test-bed, the influence of the four factors on the uniformity of cooling were analyzed by means of mixed orthogonal experimental analysis. The results showed that: the greater air supply speed and the higher air supply temperature caused the good precooling uniformity effect, which the evenness degree was the lowest value in the process of precooling. For circular openings, the greater aperture size, the better uniformity. For elliptical apertures, the smaller aperture size, the better uniformity. When the aperture was different, the uniformity change process was similar, and the peak value of evenness degree appeared at the same pre-cooling time (the location where the peak appears was the same). For different factors of air velocity, air temperature, aperture size and opening mode, the evenness value increased first and then decreased. For different air velocity, air temperature, aperture size and aperture opening mode, the order of the degree of influence on uniformity was air temperature, air velocity, aperture size and opening mode.

Key words: differential pressure precooling; uniformity; air velocity; air temperature; opening mode; aperture size

引文格式:

解海卫,张晶,张艳,等. 苹果差压预冷均匀性的实验研究[J].食品研究与开发,2019,40(5):42-47

XIE Haiwei, ZHANG Jing, ZHANG Yan, et al. Experimental Research on Uniformity of Differential Pressure Precooling of Apple[J].Food Research and Development,2019,40(5):42-47

预冷是果蔬冷链中的第一个重要环节,研究表明

不经过预冷的果蔬在流通中损失率是经过预冷果蔬的2倍~6倍^[1]。将果蔬采后迅速对其进行预冷,在短时间内去除其田间热、降低果蔬呼吸强度,可在一定程度上延长果蔬的储运时间并提升果蔬品质^[2]。差压预冷为强制通风预冷的一种,是利用轴流风机抽吸作用在包装箱两侧形成压差,通过强制对流换热带走果蔬

基金项目:天津市高等学校科技发展基金计划(20120429)

作者简介:解海卫(1976—),男(汉),副教授,博士,研究方向:制冷系统节能及优化。

*通信作者:张晶(1994—),女,硕士研究生,研究方向:制冷系统节能及优化。

田间热的一种预冷方式,具有降温速度快、冷却均匀性好、效率高等优点,受到学者们的广泛关注^[3-6]。

预冷时间和预冷均匀性是表征差压预冷效果的重要指标^[7]。送风温度、送风速度、开孔方式以及开孔率是差压预冷的主要影响因素,王强等^[8]研究了黄金梨送风速度、开孔形式、开孔率以及摆放方式对预冷时间的影响。季丽丽等^[9]对西葫芦在不同温度条件下差压预冷后的冷藏品质进行分析研究。郭兆峰等^[10]对杏在差压预冷的基础上进行加湿差压预冷,利用正交试验对预冷时间、送风温度、加湿器水量及果实失水率等因素进行分析得出最佳预冷设备参数。许如楠等^[11]关于差压预冷风速对蒜薹品质的影响进行了试验研究。众多学者关于差压预冷效果^[8-10]与经过差压预冷后的食品品质^[11-18]等因素进行了大量以预冷时间为主要评定指标的试验及模拟研究,但鲜有关于预冷均匀性指标的研究。本文通过搭建差压预冷实验台研究送风速度、送风温度、开孔大小以及开孔方式等因素对差压预冷冷却均匀性的影响,利用混合正交试验分析法研究以上4个因素对冷却均匀性的影响程度。

1 材料与方法

1.1 试验材料

苹果:挑选大小均匀(平均直径为70 mm)、外形规则、无病虫害的同一品种苹果作为试验样本;包装箱:选用三层瓦楞纸箱,外形尺寸为长×宽×高=445 mm×295 mm×300 mm,纸箱厚度为5 mm。

1.2 试验装置

搭建差压预冷实验台如图1所示。

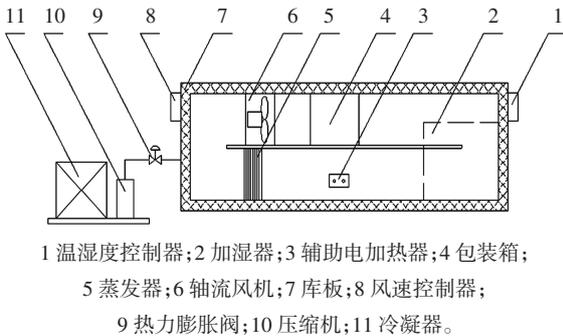


图1 差压预冷实验台

Fig.1 Experiment rig of differential pressure precooling

实验台主要由制冷装置、轴流风机、辅助电加热器和加湿器组成。通过制冷装置给库内降温,利用辅助电加热器和加湿器维持库内温湿度恒定,通过轴流风机的抽吸作用使开孔包装箱两侧形成压差,冷风与箱内果蔬进行强制对流换热,达到预冷果蔬的目的。

1.3 温度采集装置

装置由铜-康铜热电偶、MX100 温度巡测仪和计算机组成。利用热电偶一端插入苹果靠近中心处,另一端连接 MX100 温度巡测仪测得包装箱内苹果温度,将 MX100 温度巡测仪所采集数据连接计算机传输至 PC 端。

1.4 试验方案

对44个苹果采用叉排的方式码垛为4层,第一层码放14颗,第二层码放8颗,第三层码放14颗,第四层码放8颗。将热电偶一端插入苹果中心处,另一端连接至温度采集装置。试验选取送风速度分别为:1、1.5、2 m/s;送风温度为:0、2、4 °C;开孔当量直径为:30 mm 和 40 mm(保证开孔率均为30%);开孔方式为:圆形和椭圆形,进行试验,对预冷冷却均匀性过程及以上4个主要因素对冷却均匀性影响程度进行分析。

冷却均匀性的判断指标:

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

式中: σ 为冷却均匀度; \bar{t} 为各测点平均温度; t_i 为各测点苹果中心温度; n 为测点个数。

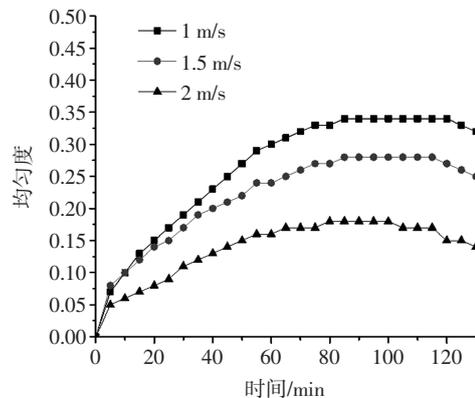
冷却均匀度又称温度变异系数是基于数学方差基础上提出的计算公式^[9],衡量出各测点温度值与平均温度值的偏离程度。 σ 的范围为0~1,均匀度数值越小,表明各测点温度值越相近,冷却预冷均匀性越好。

2 结果与分析

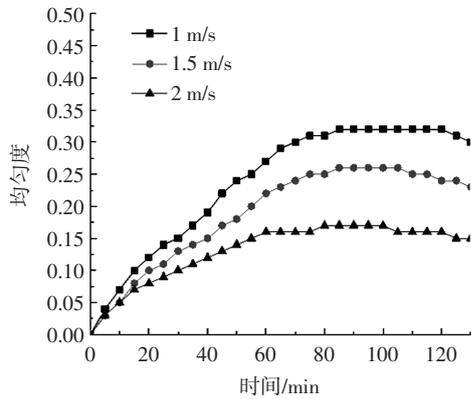
2.1 送风速度对预冷均匀性的影响

不同送风速度对均匀性的影响见图2。

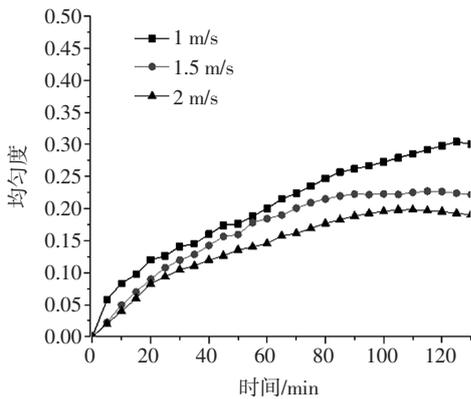
如图2所示,随着送风速度的增大,预冷结束时各测点苹果冷却均匀度降低。在一定范围内送风速度越大冷却均匀性越好,原因是送风速度的增大使得包装



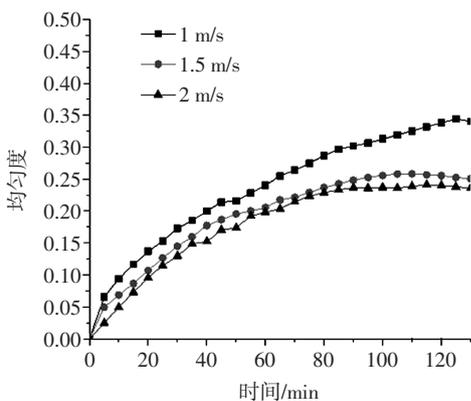
(a) 圆形孔径 30 mm,送风温度 2 °C



(b) 圆形孔径 40 mm, 送风温度 2 °C



(c) 椭圆形孔径 30 mm, 送风温度 2 °C



(d) 椭圆形孔径 40 mm, 送风温度 2 °C

图 2 不同送风速度对均匀性的影响

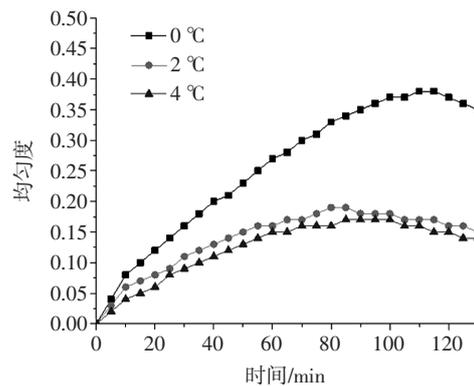
Fig.2 The influence of different air velocity on uniformity

箱两侧压差增大, 包装箱入口处径向风速变大, 进入包装箱内的冷空气紊流程度增强, 使: 1) 箱内冷空气与箱内苹果间的表面换热系数增大; 2) 减少流场分布死角, 库内冷空气流动率增大, 使得各测点苹果中心降温速率差别减小, 从而提高了预冷冷却均匀性程度。不同送风速度下冷却均匀度呈先增大后减小的趋势。这是因为预冷初期, 在轴流风机的作用下冷空气通过开孔包装箱进入箱内, 靠近入风口处冷风强度高于出

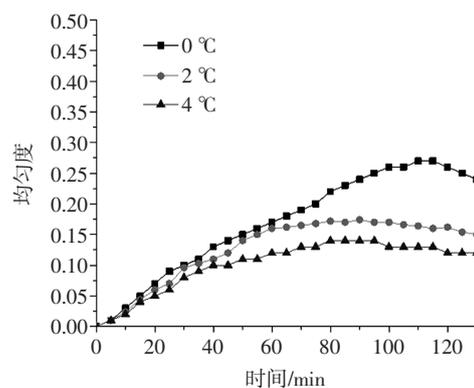
口处并且冷风径向扩散强度高于横向扩散, 使得各测点苹果中心降温速率差别变大, 预冷均匀性变差; 之后, 一部分降温速度快的苹果会与降温速度慢的苹果的进行热传导及热辐射作用并且冷风横向渗透力增强使得均匀性越来越好。送风速度越大均匀度的峰值越小, 在整个预冷过程中均匀度数值均处于最低。送风速度是影响果蔬中心降温速率的重要因素, 送风速度的增大可以增加换热效率, 不仅提高预冷均匀性而且可缩短预冷时间, 增大送风速度在一定程度上可以提高预冷均匀性。

2.2 送风温度对预冷均匀性的影响

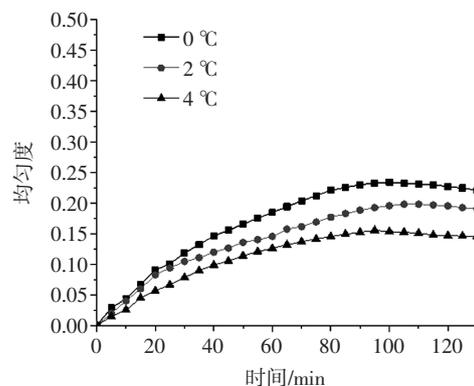
不同送风温度对预冷均匀性的影响见图 3。



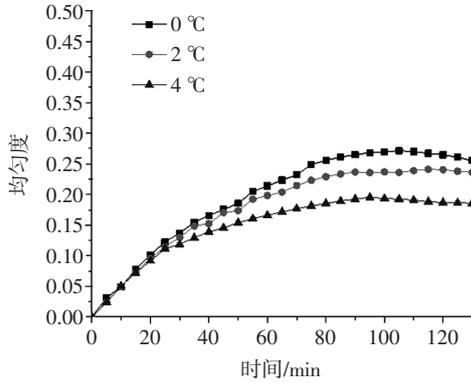
(a) 圆形孔径 30 mm, 送风速度 2 m/s



(b) 圆形孔径 40 mm, 送风速度 2 m/s



(c) 椭圆形孔径 30 mm, 送风速度 2 m/s



(d) 椭圆形孔径 40 mm, 送风速度 2 m/s

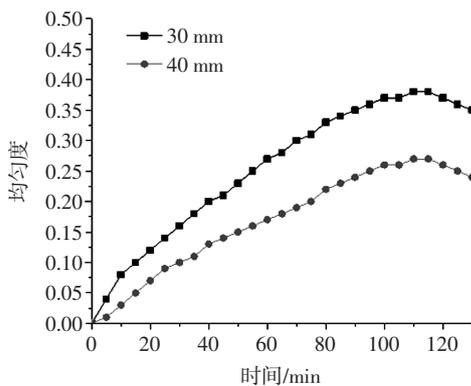
图 3 不同送风温度对预冷均匀性的影响

Fig.3 The influence of different air temperature on uniformity

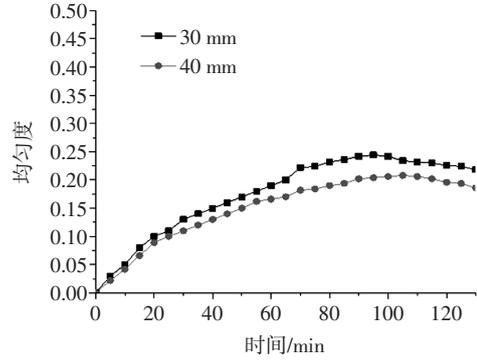
如图 3 所示, 送风温度越高预冷结束时各测点苹果冷却均匀度越低。这是因为送风温度越高, 冷空气与各测点苹果之间的换热温差越小, 在换热过程中各个测点苹果中心降温速率越慢, 各测点苹果中心温度越接近, 故冷却均匀性越好。不同送风温度下冷却均匀度呈先增大后减小的趋势。这是因为预冷开始时, 各测点苹果中心温度与送风温度之间的换热温差大, 由于开孔方式、开孔大小、箱内苹果码放等因素使得温度场分布不均, 冷却均匀性变差。随着预冷的进行, 由于包装箱的热阻小于苹果热阻, 包装箱内一部分降温速率快的苹果会与降温速率慢的苹果进行热传导和热辐射作用使得冷却均匀性越来越好。送风温度越高冷却均匀度峰值越低, 在整个预冷过程中均匀度均处于最低。这是因为送风温度的增大减小了与各测点苹果间的温差, 各测点苹果中心温度下降速率减缓, 预冷时间会增长, 但预冷均匀性会有相应的提高。因此单纯的追求低温送风, 虽然会缩短预冷时间, 但会加大能耗, 对于果蔬易产生冷害, 使得果实预冷均匀性变差。

2.3 孔径大小对预冷均匀性的影响

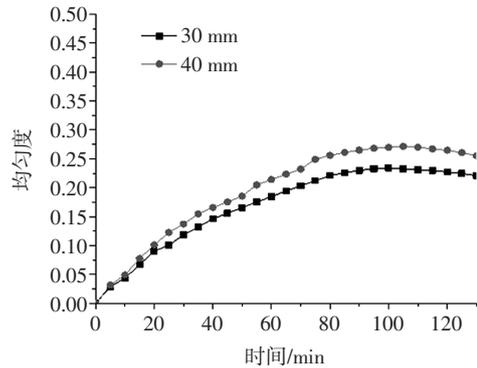
不同开孔大小对预冷均匀性的影响见图 4。



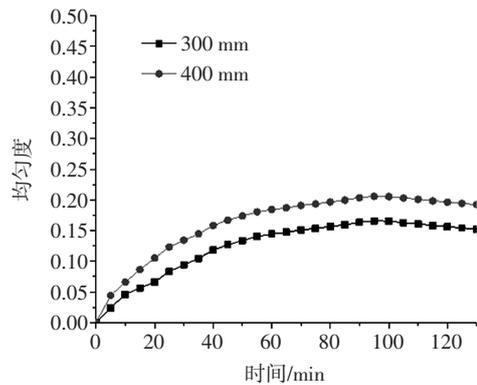
(a) 圆形开孔送风速度 2 m/s, 送风温度 0 °C



(b) 圆形开孔送风速度 1.5 m/s, 送风温度 4 °C



(c) 椭圆开孔送风速度 2 m/s, 送风温度 0 °C



(d) 椭圆开孔送风速度 1.5 m/s, 送风温度 4 °C

图 4 不同开孔大小对预冷均匀性的影响

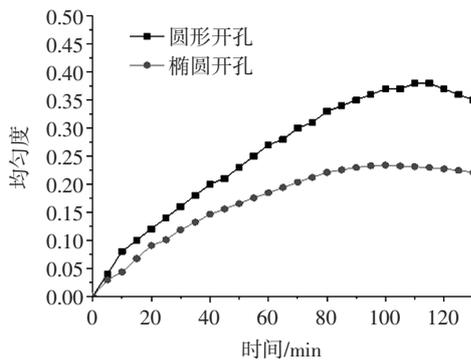
Fig.4 The influence of different aperture size on the uniformity

由图 4 所示, 对于圆形开孔, 在相同的开孔率下, 孔径越大, 均匀度越低, 预冷均匀性越好; 而对于椭圆形开孔, 在相同的开孔率下, 孔径越小, 均匀度越低, 预冷均匀性越好。这是由于在相同开孔率下, 圆形孔径增大, 使得通过包装箱内风速分布更加均匀, 从而冷空气温度分布更均匀, 故各测点苹果中心降温速率更接近预冷均匀性更好; 椭圆形孔径增大, 使得冷风横向扩散程度加强, 换热速率加快但箱内冷风气流组织分布不均匀性增强, 故各测点苹果中心降温速率差异变大冷却均匀性降低。不同孔径大小下均匀度呈先增

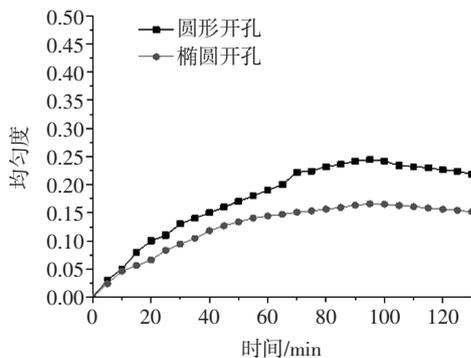
大后减小的趋势。这是因为预冷开始时在压差的作用下,冷风通过孔径时使流场分布不均,从而与各测点苹果换热强度不同致使均匀性变差;随着预冷时间的增加,箱内果蔬以及包装箱温度降低,由于孔径对箱内流场分布不均的影响程度减小,各测点苹果冷却均匀性越来越好。孔径大小不同时,均匀性变化过程相似,峰值出现所需预冷时间相同(峰值出现的位置相同)。这是因为在相同的开孔率下改变孔径大小,使得冷风通过不同大小孔径时径向渗透和横向渗透强度不同但所形成的流场分布相似。

2.4 开孔方式对预冷均匀性的影响

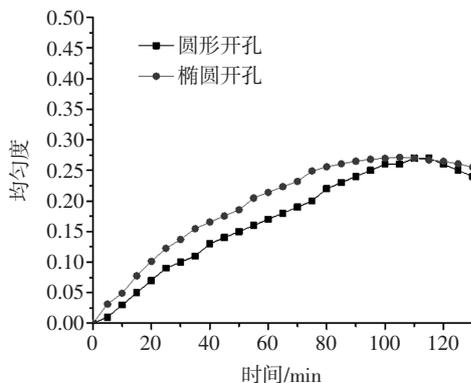
开孔方式对预冷均匀性的影响见图 5。



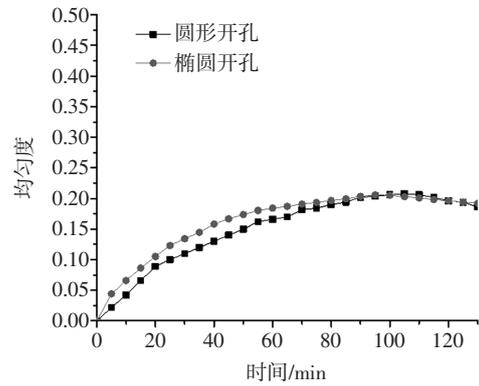
(a) 孔径 30 mm, 送风速度 2 m/s, 送风温度 0 °C



(b) 孔径 30 mm, 送风速度 1.5 m/s, 送风温度 4 °C



(c) 孔径 40 mm, 送风速度 2 m/s, 送风温度 0 °C



(d) 孔径为 40 mm, 送风速度 1.5 m/s, 送风温度 4 °C

图 5 开孔方式对预冷均匀性的影响

Fig.5 The influence of different opening modes on the uniformity

由图 5 所示, 预冷结束时椭圆开孔和圆形开孔均匀度各有优劣。这是因为冷风通过不同开孔方式的孔径对箱内流场分布影响程度小于送风温度、送风速度以及开孔大等因素的影响, 故开孔方式对于预冷均匀性的影响程度不大。不同开孔方式下冷却均匀度呈先增大后减小的趋势。这是因为预冷开始时冷风通过不同开孔方式的箱体, 扰动其内部流场分布, 使得各测点苹果换热强度不同致使均匀性变差。随着预冷时间的增加, 箱内果蔬以及包装箱温度降低, 由于开孔方式对箱内流场分布不均的影响程度减小, 各测点苹果冷却均匀性越来越好。

2.5 不同因素对均匀度影响程度大小

为研究 4 个主要因素对冷却均匀性的影响程度, 采取混合正交试验分析法, 对以上 4 个因素拟水平化处理为 $L_9(3^4)$ 进行分析, 如下表 1、表 2、表 3 所示。

表 1 因素水平表

Table 1 Factor level table

水平数	因素			
	送风速度/(m/s)	送风温度/°C	开孔大小/mm	开孔方式
1	1	0	30	椭圆形
2	1.5	2	40	圆形
3	2	4	40	圆形

表 2 试验方案

Table 2 Experimental scheme

试验号	因素				试验结果 (均匀度)
	送风速度	送风温度	开孔大小	开孔方式	
1	1	1	1	1	0.37
2	1	2	2	2	0.3
3	1	3	3	3	0.22
4	2	1	2	3	0.32

续表 2 试验方案
Continue table 2 Experimental scheme

试验号	因素				试验结果 (均匀度)
	送风速度	送风温度	开孔大小	开孔方式	
5	2	2	3	1	0.25
6	2	3	1	2	0.21
7	3	1	3	2	0.24
8	3	2	1	3	0.25
9	3	3	2	1	0.19

表 3 极差分析
Table 3 Range analysis

	因素			
	送风速度	送风温度	开孔大小	开孔方式
均值 1	0.290	0.310	0.277	0.270
均值 2	0.260	0.267	0.270	0.250
均值 3	0.227	0.103	0.237	0.263
R	0.07	0.103	0.04	0.02
R'	0.063	0.092	0.04	0.02

混合正交试验对 R 进行调整,用调整后的 R' 来进行比较:

$$R' = dR\sqrt{r}$$

式中:r 为因素每个水平试验数;d 为折算系数(r=2, d=0.71; r=3, d=0.52)。

由表 3 可知四因素对均匀度影响程度大小依次为送风温度、送风速度、开孔大小、开孔方式。

3 结论

对于不同送风速度、送风温度、开孔大小和开孔方式 4 个因素对均匀度影响程度大小依次为送风温度、送风速度、开孔大小、开孔方式。送风速度越大、送风温度越高预冷均匀性越好,预冷过程中均匀度峰值最低。对于圆形开孔,孔径越大,均匀度越好;对于椭圆形开孔,孔径越小,均匀度越好。孔径大小不同时均匀性变化过程相同,峰值出现所需预冷时间相同。开孔方式对于预冷均匀性的影响程度不大。对于不同送风速度、送风温度、开孔大小和开孔方式 4 个因素,均匀性变化过程均可分为两个阶段:第一阶段时各测点均匀度数值随着预冷时间的增加而升高,且升高速率越来越缓慢;第二阶段时各测点均匀度数值随着预冷

时间的增加而减小。

参考文献:

- [1] 王明涛,刘焕卫,贡汉生.西红柿变温预冷传热特性与系统能耗分析[J].食品与机械,2016,32(4): 131-135
- [2] 王文生,杨少桢,闫师杰.我国果蔬冷链发展现状与节能降耗主要途径[J].保鲜与加工,2016,16(2): 1-5
- [3] 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
- [4] 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
- [5] Justin L O'Sullivan, Maria J Ferrua, Richard Love, et al.Forced-air cooling of polylined horticultural produce: Optimal cooling conditions and package design[J]. Postharvest Biology and Technology, 2017, 126: 67-75
- [6] Jiawei Han, R Badía-melis, Xin-ting Yang. CFD Simulation of Air-flow and Heat Transfer During Forced-Air Precooling of Apples[J]. Journal of Food Process Engineering, 2017, 40(2): 1-17
- [7] 王强,连添达.葡萄差压通风预冷影响参数的实验研究[J].农业工程学报,2016,22(4): 212-215
- [8] 王强,陈焕新,董德发,等.黄金梨差压通风预冷数值分析与实验验证[J].农业工程学报,2008,24(8): 262-266
- [9] 季丽丽,梁芸志,陈存坤,等.不同温度差压预冷及其对西葫芦冷藏效果的影响[J].农业工程学报,2018,34(1): 287-293
- [10] 郭兆峰,刘向东,刘旋峰,等.新疆赛买提杏加湿差压预冷试验研究[J].保鲜与加工,2017,17(4): 1-5
- [11] 许茹楠,于晋哲,刘斌,等.不同差压预冷风速对贮藏期蒜薹品质的影响[J].制冷学报,2018,39(4): 38-41
- [12] 马宏飞,卢生有,韩秋菊,等.紫外分光光度法测定五种果蔬中维生素 C 的含量[J].化学与生物工程,2012,29(8): 92-94
- [13] 张润光,张有林.适温臭氧处理对番茄贮藏品质的影响[J].食品科学,2009,30(20): 442-446
- [14] 姚军,徐畅,耿新丽,等.差压预冷对哈密瓜采后乙烯释放和呼吸速率的影响[J].北方园艺,2016(21): 125-127
- [15] 吴昊,甄天元,陈存坤,等.壳聚糖没食子酸衍生物酶法制备及对鲜切苹果的保鲜效果[J].农业工程学报,2017,33(4): 285-292
- [16] 范林林,高丽朴,王清,等.预冷方式对豇豆采后生理特性的影响[J].北方园艺,2015(17): 115-119
- [17] 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): 381-386
- [18] 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
- [19] 庄楚强,何春雄.应用数理统计基础[M].广州:华南理工大学出版社,2006: 34

收稿日期:2018-11-09