

文章编号:0253 – 4339(2015) 02 – 0113 – 06
doi:10. 3969/j. issn. 0253 – 4339. 2015. 02. 113

变送风参数对西红柿差压预冷节能效果研究

申 江 丁 峰 张现红

(天津商业大学 天津市制冷技术重点实验室 天津 300134)

摘 要 差压预冷送风参数直接影响差压预冷效果和预冷装置的能耗,本文搭建差压预冷实验台,选取西红柿为研究对象,测得不同送风速度、不同送风温度工况下西红柿中心温度随时间的变化特点,分析不同预冷条件下西红柿预冷时间规律,对不同工况下西红柿预冷效果和装置能耗进行分析。根据分析结果提出变送风速度和变送风温度的优化方案,发现西红柿由 27 ℃ 降到 15 ℃ 过程采用风速 0.9 m/s,由 15 ℃ 降到 5 ℃ 采用风速 0.57 m/s 预冷,对比定送风速度预冷,差压风机可节能 14.5% ~ 17.7%;西红柿由 27 ℃ 降到 10 ℃ 过程采取送风温度为 4 ℃,由 10 ℃ 降到 5 ℃ 采取送风温度为 2 ℃,对比定送风温度预冷,制冷系统可节能 5.6% ~ 10.5%。

关键词 差压预冷;节能;变送风参数;送风速度;送风温度

中图分类号:TB61⁺1; TS255.3

文献标识码: A

Research on Energy Saving of Tomato Pressure Pre-cooling
by Changing the Supply Air Parameter

Shen Jiang Ding Feng Zhang Xianhong

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

Abstract The supply air parameter of pressure pre-cooling directly influence the energy consumption of pre-cooling device. In this paper, an experimental platform for pressure pre-cooling is set up, and tomatoes are chosen as experimental objects. The relationship between the tomato center temperature and the time is obtained under the condition of different supply air parameter. By analyzing the principle of tomato pre-cooling time, the tomato pre-cooling results and energy consumption of the pre-cooling device, the optimization scheme of variable supply air speed and temperature is proposed. It is shown that the supply air speed remains 0.9 m/s while the tomato temperature drops from 27 ℃ to 15 ℃, and remains 0.57 m/s while the tomato temperature drops from 15 ℃ to 5 ℃, the energy consumption of the fan can be reduced by 14.5% ~ 17.7%; The supply air temperature remains 4 ℃ while the tomato temperature drops from 27 ℃ to 10 ℃, and remains 2 ℃ while the tomato temperature drops from 10 ℃ to 5 ℃, the energy consumption of the refrigeration system can be reduced by 5.6% ~ 10.5%.

Keywords pressure pre-cooling; energy saving; variable supply air parameter; air supply velocity; air supply temperature

差压预冷是一种优良的空气预冷方式,其利用差压风机的抽吸作用,在包装箱两侧形成一定的压差,湿冷空气在压差的作用下通过包装箱的开孔进入包装箱,与果蔬对流换热,使果蔬快速、均匀地冷却到工艺要求温度范围^[1]。国内多位学者分别对不同果蔬进行了差压预冷实验,发现果蔬预冷效果好但是能耗较大,并对差压预冷节能进行了初步探索^[2-9]。差压预冷过程中的送风参数,直接影响果蔬预冷效果和预冷装置的能耗,国内外学者对此进行了大量的研究。Baird C D 等^[10]通过实验数据分析发现增加送风速度可降低冷却时间,但送风速度超过 1.5 m/s 后,冷却时间没有显著变化。Emond J P 等^[11]对影响

草莓预冷速度和温度分布的参数进行研究,实验结果表明冷空气流量从 2 L/(s·kg) 增加到 4 L/(s·kg),7/8 预冷时间减少 30% ~ 44%。Lambrinos G 等^[12]针对预冷风速进行研究,结果表明预冷风速从 0.2 m/s 增大到 3.6 m/s,预冷时间缩短 2 到 3 倍,但是风速的增大会增加风机能耗。邓超^[13]开发了一体化高湿差压预冷装置,并研究了不同工况下果蔬预冷效果和装置能耗,结果表明蒸发温度越低预冷速率越大,但预冷均匀性降低,压缩机功耗增加。喷淋加湿湿度越大预冷时间越长,果蔬失水率下降但系统能耗增加。何晖等^[14]、刘斌等^[15]根据果蔬在预冷过程中温度变化的规律,提出

在差压预冷生产中采用变频调速方法,实验结果表明采用变风速预冷节能效果显著。闫国琦等^[16]通过对预冷风机能耗最小优化控制的分析,发现在限定预冷时间的要求下,采用不同温度段匹配不同风量的控制方法可实现风机能耗最小的效果。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

西红柿:采购于天津市北辰区韩家墅果蔬批发市场,挑选大小均匀、外形规则、平均直径为80 mm、八成成熟的西红柿作实验材料。

包装箱:三层瓦楞纸箱,长、宽、高分别为445 mm、295 mm、300 mm,纸箱厚度为5 mm。包装箱两个相对的295 mm×300 mm侧面上分别开9个圆形孔,孔径为60 mm,开孔面积占箱侧面积的28.7%。开孔位置在包装箱侧壁的相对位置如图1所示。

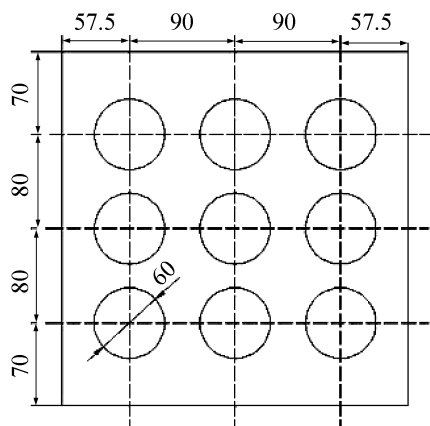


图1 包装箱开孔方式

Fig.1 The trepanning way of packing box

电子计重秤:预冷前后果蔬失重的测量采用上海友声衡器有限公司 ACS-30A 电子计重秤。

微电脑恒温恒湿实验箱:宏联(上海)科技有限公司 H-TH-1BP-E 微电脑恒温恒湿实验箱,温度范围-70~100℃,湿度范围20%~98% RH。

多点温度数据采集器:日本横河仪器有限公司 MX100 多点温度数据采集器。

热电偶:铜-康铜热电偶测量各测点温度,测温范围为-200~300℃,铜-康铜丝测点端用电弧焊焊接,用标准二级水银温度计进行标定,控制误差范围为0.2℃。

多通道风速温湿度测试仪:差压预冷送风速度的测量采用日本 KANOMAX 株式会社 SYSTEM6243 MODEL 1560 型24通道风速温湿度测试仪。

压差计:预冷过程包装箱前后压差的测量采用法

国 KIMO 公司 CP101 压差计。

实验采用的差压预冷实验装置如图2所示,实验装置由制冷系统、加湿系统、加热系统、控制系统和差压风机组成。制冷系统主要用来提供预冷所需的冷量,压缩冷凝机组置于预冷装置外部,蒸发器置于预冷装置内部,制冷工质采用 R22,制冷量为3500 W。电加热器采用 U 型带翅片的空气干烧型电热管,功率为1000 W,置于蒸发器后方,电加热器的电源接线连接实验台之外的调压器(调压范围为0~250 V)。加湿器采用无锡洛社华盛电机厂 CJ-30 加湿器,加湿量为3 kg/h。温湿度控制装置采用余姚市长江温度仪表厂 XMT-9007D 系列温湿度仪,温度控制范围是-50~200℃,精度为±0.5℃;湿度控制范围是5%~90% RH,精度为±3.0% RH。差压风机采用伦登风机(天津)有限公司 ADT280 轴流风机,风机风量2500 m³/h,静压为200 Pa,功率为550 W。风机外接北京同森科技有限公司 TS2904PT2M 变频器,频率调节范围为0~50 Hz。

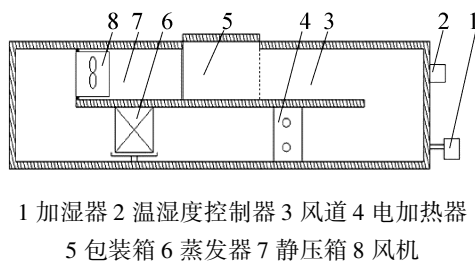


图2 实验用差压预冷装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of pressure pre-cooling device

1.2 实验方法

1) 测点布置

包装箱内西红柿摆放方式采用平方间隔摆放,摆放时避免西红柿堵住包装箱的侧面开孔。包装箱内西红柿最底层为第一层,依次往上摆放第二、三、四层,西红柿排列方式及测点编号如图3所示。每个西红柿中心位置插入两个热电偶探头,取两者平均值作为该西红柿中心温度值。

冷风在进入包装箱前经过一段水平静压箱,在距包装箱入口200 mm 截面处冷空气流速均匀、稳定,以此处测得的风速值作为送风速度值,同时在此处布置温度探头,将此处测得的温度值作为送风温度值。

2) 实验方案

经过多次测试,测得风机频率25 Hz、35 Hz、40 Hz 所对应的送风速度分别为0.57 m/s、0.76 m/s、0.9 m/s,每次实验用西红柿重量为20 kg,换算成西红柿单位质量冷空气流量分别为9.234 m³/(h·kg)、12.312 m³/(h·kg)、14.58 m³/(h·kg);送风温度为0

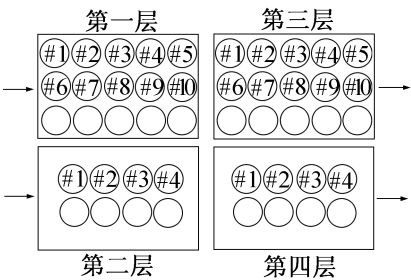


图 3 热电偶布置图

Fig.3 Diagram of thermocouple layout

℃、2℃、4℃时,实验装置获得的实验数据较理想。据此确定不同送风参数对西红柿预冷效果影响的实验方案见表 1,变送风速度压差预冷实验方案见表 3,变送风温度压差预冷实验方案见表 4。

表 1 不同送风参数差压预冷实验方案

Tab.1 Experiment design scheme for pressure pre-cooling of different supply air parameter		
方案	送风温度/℃	送风速度/(m/s)
1	0	0.57,0.76,0.9
2	2	0.57,0.76,0.9
3	4	0.57,0.76,0.9
4	0,2,4	0.57
5	0,2,4	0.76
6	0,2,4	0.9

3)操作方法

预冷实验前,先开启压缩机、差压风机、加湿器,将装置内湿度维持在 80%,让湿冷空气在风道内循环一段时间,当装置内温度、湿度达到实验要求时,将盛有西红柿的包装箱放入压差预冷实验装置。实验过程中压缩机一直处于开机状态,当送风温度低于设定温度时,通过电加热器进行热补偿,调节电加热器连接的变压器的输出功率,可调节加热量以保证送风温度恒定。通过调节轴流风机所连接的变频器可调节风机转速,以满足实验对不同送风速度的要求。当西红柿中心温度从初始温度 27℃降低到 5℃时,停止实验,将西红柿从装置中取出。为保证每次实验西红柿的初始温度相同,将取出的西红柿置于恒温恒湿箱内加热到 27℃后再进行下次实验,如此循环实现采用同一批西红柿完成多次实验。

2 结果与讨论

2.1 送风风速对西红柿预冷效果的影响

研究表明,位于包装箱底层靠壁面附近的果蔬降

温特点具有代表性^[17]。选取方案 2 所获得的实验数据,以第一层#1、#3、#5 测点西红柿为研究对象,分析不同风速对西红柿预冷速率的影响。图 4 给出了三种送风速度下第一层#5 测点西红柿中心温度随时间变化的测量结果。

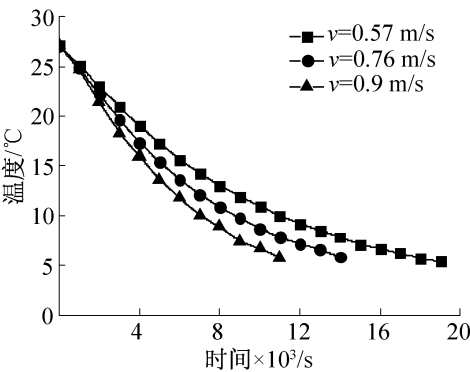


图 4 $T=2\text{℃}$ 工况下,不同送风速度下第一层#5 西红柿中心温度随时间的变化曲线

Fig.4 The relationship between 1 layer#5 center temperature and time under the condition of different air supply velocity and $T=2\text{℃}$

由图 4 可知,不同风速条件下西红柿降温曲线走势相同,预冷前期西红柿中心温度迅速下降,之后趋于平缓,且风速越大降温越快。这是由于预冷初期西红柿内外温差较大,单位时间换热量大,降温快;而随着西红柿温度的降低,西红柿内外温差减少,单位时间换热量减少,降温速率减缓。

综合分析方案 1~方案 3 所获得的实验数据,可获得送风速度对预冷时间的影响,图 5 给出了第一层#5 测点西红柿中心温度达到 6℃时,预冷时间随风速的变化。由图可知,预冷时间随风速的增加而减少。由于风速越大,果蔬表面空气扰动也越大,对流表面传热系数大,降温速率快,从而缩短预冷时间。送风温度为 2℃时,风速的变化对预冷时间影响显著,预冷风量由 $9.234\text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{kg})$ 增加到 $12.312\text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{kg})$,预冷时间缩短 19.9%,风量从 $12.312\text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{kg})$ 增加到 $14.58\text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{kg})$,预冷时间缩短 21.6%。

表 2 列出了不同送风速度下包装箱两端的压差及风机能耗,由表可知,在其他条件不变情况下,包装箱两端的压差随风速的增加而增大,预冷时间随风速的增加而缩短,但风机能耗随风速的增加而增大。

2.2 送风温度对西红柿预冷效果的影响

以第一层#1、#3、#5 测点西红柿为研究对象,分析不同送风温度对西红柿预冷速率的影响。选取方案 6 所获得的实验数据分析发现,送风温度 0℃、2℃、4℃条件下的西红柿降温曲线走势相同,图 6 给

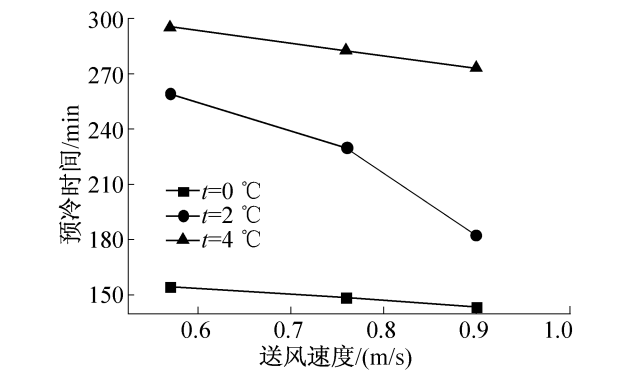


图5 送风速度对预冷时间的影响

Fig. 5 Effect of air supply velocity on pre-cooling time

出了三种送风温度下,第一层#3 测点西红柿中心温度随时间变化的测量结果。

表2 不同风速下包装箱两端的压差及风机能耗

Tab. 2 The differential pressure at the ends of the packing and the fan power consumption under the condition of different air supply speed

风速/ (m/s)	预冷时 间/min	风机电 流/A	压差/ Pa	电能消耗/ (kW·h)
0.57	323	0.46	45.1	0.54
0.76	235	0.82	48.8	0.71
0.9	199	1.08	50.8	0.78

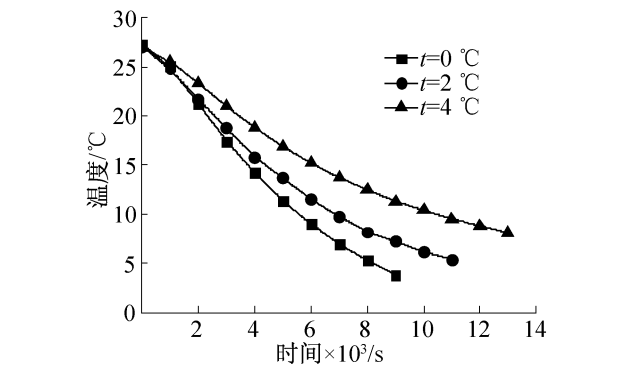


图6 $v=0.9\text{m/s}$ 工况下,不同送风温度下第一层#3 西红柿中心温度随时间的变化曲线

Fig. 6 The relationship between 1 layer#3 center temperature and time under the condition of different air supply temperature and $v=0.9\text{m/s}$

由图6可知:不同送风温度下西红柿降温曲线走势相同,预冷初期西红柿中心温度迅速下降,之后趋于平缓;随着送风温度的降低,西红柿降温速率越快。送风温度较低时,西红柿内外温差较大,单位时间内从西红柿单位表面带走的热量多,因此降温速率快。为缩短预冷时间,送风温度越低越好,但送风温度也

不能过低。一方面过低的温度会造成果蔬冷害;另一方面送风温度越低,制冷系统蒸发温度也越低,系统制冷效率降低能耗增大。

图7给出了第一层#5 测点西红柿中心温度达到6 °C时,预冷时间随送风温度的变化趋势。由图可知,随着送风温度的降低,预冷时间减少幅度增大。送风温度从4 °C降低到2 °C,预冷时间最大缩短33.9%,送风温度从2 °C降低到0 °C,预冷时间最大缩短46.36%。

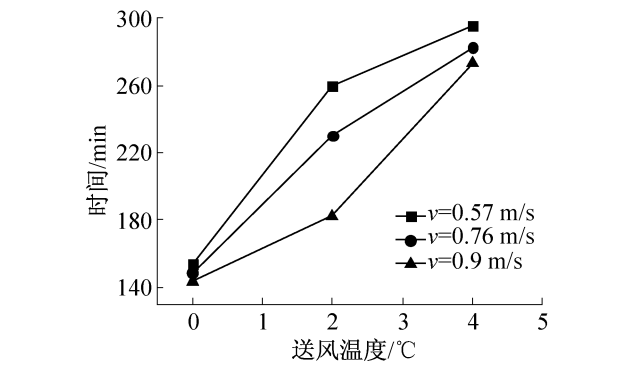


图7 送风温度对预冷时间的影响

Fig. 7 Effect of air supply temperature on the pre-cooling time

2.3 变送风风速对西红柿预冷过程节能效果的讨论

由以上分析可知:预冷初期西红柿降温速率较快,风速对降温速率的影响较大,而预冷后期,当西红柿温度降低到一定程度时,风速对降温幅度影响不明显。故在预冷后期,仍采用高速对预冷速率影响不大,却增加了风机能耗,因此可采用变风速调节技术。对西红柿进行预冷实验时,不同预冷期采用不同的风速,设计多种实验方案进行对比实验,实验中固定送风温度为2 °C。表3列出了不同方案下的实验结果。

从表3可以看出:方案8 能耗最大而且预冷时间过长,可将方案8 排除,其它方案能耗由高到低依次是方案4、方案3、方案6 和方案7,方案1、方案2 和方案5 能耗较小。相对于方案6 和方案7,方案2 分别节能17.7%、14.5%。方案3 和方案4 也是采用变风速的预冷方案,预冷后半段采用较高的送风速度,虽然预冷时间有所减少,但单位时间功耗大,因此并不节能。方案4 是在预冷过程中采用三段送风速度进行预冷,节能效果不显著且操作相对复杂,所以实际中选择两段送风速度进行即可,综合考虑,方案2 是最优的预冷方案。

表 3 不同方案下风机能耗对比

Tab. 3 Comparison of fan energy consumption under different scheme					
方 案	西红柿温 度变化/℃	送风速 度/(m/s)	所需时 间/min	所需总 时间/min	风机总能 耗/(kW·h)
1	27 ~ 10	0.9	118.25	257.1	0.7
	10 ~ 5	0.57	138.83		
2	27 ~ 15	0.9	71.75	286.6	0.65
	15 ~ 5	0.57	214.83		
3	27 ~ 10	0.9	118.25	225.1	0.79
	10 ~ 5	0.76	106.83		
4	27 ~ 15	0.9	71.75	252.6	0.83
	15 ~ 5	0.76	180.83		
5	27 ~ 15	0.9	71.75	269.7	0.7
	15 ~ 10	0.76	59.1		
	10 ~ 5	0.57	138.83		
6	27 ~ 5	0.9	199.2	0.79	0.79
7	27 ~ 5	0.76	253.2	0.76	0.76
8	27 ~ 5	0.57	322.5	1.18	1.18

2.4 变送风温度对西红柿预冷过程节能效果的讨论

由以上分析可知:预冷初期送风温度对西红柿降温速率影响较大,而预冷后期,当西红柿温度降低到一定程度时,风温对西红柿降温速率影响不大。故可以适当提高预冷初期的送风温度,从而提高蒸发温度,减少系统能耗。也可降低预冷后期的送风温度,从而缩短预冷时间,减少整个预冷过程的能耗。实验不同预冷阶段采用不同的送风温度,设计多种方案进行对比实验,实验固定送风速度为 0.9 m/s。表 4 列出了不同方案下的实验和理论计算结果。

表 4 中不同预冷阶段所需时间通过实验测定,与之对应的压缩机功耗为理论计算值,计算时送风温度和蒸发温度温差取 8 ℃。对比工况 6、工况 7 和工况 8 可知,随着蒸发温度的提高,压缩机消耗减少,因此采用变蒸发温度预冷有节能效果。各方案中,方案 8 预冷时间过长,首先排除,其它方案能耗由高到低依次是方案 6、工况 7、工况 4 和工况 5,方案 1、工况 2 和工况 3 能耗较小,而方案 1 能耗最小,相对于方案 6 和工况 7,方案 1 分别节能 10.5%、5.6%,且方案 1 预冷时间不到 4 h。方案 4 采用三段送风温度预冷,但节能效果不显著且操作复杂。综合考虑,在本实验预冷条件下,方案 1 是最优的预冷方案。

表 4 不同方案下压缩机能耗对比

Tab. 4 Comparison of compressor energy consumption under different scheme					
方 案	西红柿温 度变化/℃	送风速 度/(m/s)	所需时 间/min	所需总 时间/min	风机总能 耗/(kW·h)
1	27 ~ 10	4	157.75	239.7	0.17
	10 ~ 5	2	81.9		
2	27 ~ 15	4	89.25	216.7	0.175
	15 ~ 5	2	127.4		
3	27 ~ 10	4	157.75	218.3	0.173
	10 ~ 5	0	60.5		
4	27 ~ 15	4	89.25	186.7	0.18
	15 ~ 5	0	97.42		
5	27 ~ 15	4	89.25	195.3	0.177
	15 ~ 10	2	45.5		
	10 ~ 5	0	60.5		
6	27 ~ 5	0	159.9	159.9	0.19
7	27 ~ 5	2	199.2	199.2	0.18
8	27 ~ 5	4	329.8	329.8	0.17

3 结论

西红柿压差预冷过程,送风风量越大,西红柿降温速率越快,当风速增加到一定程度后,风速的变化对预冷时间和预冷均匀性影响不大,但风速继续增大,风机能耗增加。送风温度对预冷时间影响显著,送风温度越低,西红柿降温越快,预冷时间越短,为缩短预冷时间,送风温度越低越好,但送风温度也不能过低。

根据西红柿降温特点,提出变风速调节和变送风温度调节技术。西红柿由 27 ℃降到 15 ℃过程采用风速 0.9 m/s,由 15 ℃降到 5 ℃采用风速 0.57 m/s 预冷,对比定送风速度预冷,差压风机节能 14.5% ~ 17.7%;西红柿由 27 ℃降到 10 ℃过程采取送风温度为 4 ℃,由 10 ℃降到 5 ℃采取送风温度为 2 ℃,对比定送风温度预冷,制冷系统可节能 5.6% ~ 10.5%。

参考文献

[1] 刘斌,郭亚丽,关文强. 果蔬差压预冷方式研究[J]. 保鲜与加工, 2003, 19(6): 16-18. (Liu Bin, Guo Yali, Guan Wenqiang. Study on forced air pre-cooling mode of fruit and vegetable[J]. Storage and Process, 2003, 19 (6): 16-18.)

- [2] 刘升, 张宏力, 武田吉弘. 青花菜差压预冷流通保鲜技术的研究[J]. 制冷学报, 1999, 3(3): 47-50. (Liu Sheng, Zhang Hongli, Wutian Jihong. The study of forced-air cooling and keeping freshness technique of broccoli[J]. *Journal of Refrigeration*, 1999, 3(3): 47-50.)
- [3] 宁静红, 彭苗, 申江, 等. 葡萄差压预冷保鲜技术的实验研究[J]. 制冷, 2005, 24(3): 19-23. (Ning Jinghong, Peng Miao, Shen Jiang, et al. Experimental study on pressure-difference pre-cooling of keeping grape fresh technique [J]. *Refrigeration*, 2005, 24(3): 19-23.)
- [4] 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.)
- [5] 杨洲, 赵春娥, 汪刘一, 等. 龙眼果实差压预冷过程中的阻力特性[J]. 农业机械学报, 2007, 38(1): 104-107. (Yang Zhou, Zhao Chun'e, Wang Liuyi, et al. Pressure drop characteristics in forced-air pre-cooling of longan fruits[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, 38(1): 104-107.)
- [6] 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. (Lü Enli, Lu Huazhong, Yang Zhou, et al. Pressure drop characteristics in forced-air pre-cooling of tomatoes [J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(7): 341-345.)
- [7] 高丽朴, 郑淑芳, 李武. 茄子、番茄、青椒差压预冷方法的研究[J]. 制冷学报, 2003, 24(1): 55-56. (Gao Lipu, Zheng Shufang, Li Wu. Preliminary study on air-forced pre-cooling of eggplant, tomato and sweet pepper [J]. *Journal of Refrigeration*, 2003, 24(1): 55-56.)
- [8] 陈天及, 郭亚丽, 余本农, 等. 番茄差压预冷速度影响因素的试验研究[J]. 农业工程学报, 2001, 17(5): 105-107. (Chen Tianji, Guo Yali, Yu Bennong, et al. Experimental study on the pressure-difference pre-cooling of tomatoes in cartons[J]. *Transactions of the CSAE*, 2001, 17(5): 105-107.)
- [9] 王强, 刘凤珍, 连添达. 葡萄差压通风预冷实验研究[J]. 食品科学, 2001, 22(10): 88-90. (Wang Qiang, Liu Fengzhen, Lian Tianda. Experimental study on the pressure-difference pre-cooling of grape[J]. *Food Science*, 2001, 22(10): 88-90.)
- [10] Baird C D, Gaffney J J, Talbot M T. Design criteria for efficient and cost effective forced air cooling systems for fruits and vegetables[J]. *ASHRAE Transactions*, 1988, 94(1): 1434-1454.
- [11] Emond J P, Mercier F, Sadfa S O, et al. Study of parameters affecting cooling rate and temperature distribution in forced-air pre-cooling of strawberry[J]. *Transactions of the ASAE*, 1996 39(6): 2185-2191.
- [12] Lambrinos G, Assimaki H, Manolopoulou H, et al. Air pre-cooling and hydro-cooling of Hayward kiwifruit [J]. *Acta Hort*, 1997, 24(7): 561-566.
- [13] 邓超. 一体化高湿差压预冷装置的开发和预冷效果的研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2012.
- [14] 何晖, 冯圣洪. 变频调速技术在差压预冷库的应用探讨[J]. 制冷与空调, 2003, 3(3): 30-32. (He Hui, Feng Shenghong. Application of the variable-frequency technique the pressure pre-cooling storage [J]. *Refrigeration and Air Conditioning*, 2003, 3(3): 30-32.)
- [15] 刘斌, 申江, 邹同华, 等. 果蔬预冷风速与风机能耗和预冷效果的实验研究及分析[J]. 制冷学报, 2005, 26(4): 17-20. (Liu Bin, Shen Jiang, Zou Tonghua, et al. Theoretical and experimental analyses of influences of pre-cooling air velocities on energy consumption of air fan and pre-cooling effects [J]. *Journal of Refrigeration*, 2005, 26(4): 17-20.)
- [16] 闫国琦, 杨洲, 马征. 龙眼压差通风预冷装置风速控制与能耗分析[J]. 农业机械学报, 2009, 40(3): 125-129. (Yan Guoqi, Yang Zhou, Ma Zheng. Air velocity control and energy analysis in forced-air pre-cooling device of longan [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(3): 125-129.)
- [17] 王永. 非结构化网格生成技术及在 SIMPLE 算法中的应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2005.

通信作者简介

丁峰, 男, 硕士研究生, 天津商业大学机械工程学院, 15522061855, E-mail: 1047496347@qq.com。研究方向: 食品冷链技术。

About the corresponding author

Ding Feng, male, master candidate, Mechanical Engineering School, Tianjin University of Commerce, +86 15522061855, E-mail: 1047496347@qq.com. Research fields: food cold chain technology.