

文章编号:0253 – 4339(2014) 04 – 0034 – 08
doi:10. 3969/j. issn. 0253 – 4339. 2014. 04. 034

果蔬用敞开式制冷陈列柜温湿度场分布特性实验

傅 涛^{1,2} 李 君^{1,2} 王海林^{1,2} 岑康华^{1,2} 唐本源^{1,2}

(1 华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室 广州 510642;2 华南农业大学工程学院 广州 510642)

摘 要 为研究带单层风幕的敞开式果蔬制冷陈列柜(以下简称陈列柜)温湿度分布规律,采用了一种立式敞开式陈列柜实验平台作为研究对象,分析陈列柜稳态运行阶段回温、降温 and 节能帘对温湿度场分布特性的影响。实验结果表明:在无节能帘条件下,回温工况结束时温湿度场比降温工况均匀,其温度、相对湿度分布的变异系数分别为 0.25、0.08。陈列柜左部温度和相对湿度均低于右部;4 层搁架温度、相对湿度分布差异显著($P < 0.05$)。稳态运行阶段,搁架温度和相对湿度分布呈周期性振荡,周期约为 17 min;运用线性回归方法建立各测点相对湿度关于温度的函数模型,回归方程表明:相对湿度与温度呈线性正相关;与无节能帘时相比,节能帘条件下的柜内平均相对湿度高 5.74% RH,平均温度低 0.43 ℃,温度、相对湿度的波动幅度小,降温时间短和回温时间长。研究结果为果蔬用敞开式陈列柜性能的优化提供参考。

关键词 陈列柜;温度;湿度;分布

中图分类号:TB658; TB61⁺¹ 文献标识码:A

Experimental Study on Distribution of Temperature and Humidity Field in Vertical Open Display Cabinet for Fruits and Vegetables

Fu Tao^{1,2} Li Jun^{1,2} Wang Hailin^{1,2} Cen Kanghua^{1,2} Tang Benyuan^{1,2}

(1. Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou, 510642, China; 2. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou, 510642, China)

Abstract In order to investigate the distribution of temperature and relative humidity of the fruit and vegetable open display cabinet with single-band air curtain, an experimental platform of the vertical open display cabinet was used for refrigeration test. The distribution characteristics of temperature and relative humidity of the testing display cabinet under the cooling and temperature raising conditions was analyzed. The effect of night covers was also explored. The experimental results showed that the temperature and humidity are well-distributed under temperature raising condition, and the coefficient variation (CV) of temperature and the relative humidity distribution is 0.25 and 0.08 respectively. The temperature and relative humidity of the right of the display cabinet are higher than those of the left horizontally. The distribution of temperature and relative humidity in four shelves differs significantly ($P < 0.05$) in the orthogonal direction. During the steady-state operation the temperature and relative humidity distribution in four shelves is periodic oscillation and the period is about 17 min. To study the overall temperature and relative humidity of the display cabinet, the linear regression method was used to predict the effect of the relative humidity on the temperature. The regression model showed that temperature is linear with the relative humidity. Night covers can keep the relative humidity and the amplitude of temperature with minor changes, shorten the cooling time and prolong the temperature raising time. Compared with no night covers, the average relative humidity is higher by 5.74% RH and average temperature is lower by 0.43 ℃. The results will provide references to optimize the performance design of the fruit and vegetable open display cabinet.

Keywords display cabinet; temperature; relative humidity; distribution

随着生活节奏的加快,消费者对冷藏食品品质的要求越来越高,而冷藏销售是食品冷藏链中的一个重要环节^[1]。目前,陈列柜是冷藏销售的主要设备,用于冷饮、果蔬和肉类等食品的保温^[2-5]。根据柜门结构不同,陈列柜可分为封闭式和敞开式。敞开式陈列柜取货区敞开,由冷风幕将食品与柜外环境隔开。

基金项目:国家科技支撑计划(2013BAD19B01),国家自然科学基金(31101363)资助项目。(The project was supported by Key Technologies R&D Program of China (No. 2013BAD19B01) and the National Natural Science Foundation of China (No. 31101363).)

收稿日期:2013 年 9 月 8 日

温度、相对湿度是保证冷藏食品品质的两大关键因素^[6-9]。敞开式陈列柜的柜内温湿度分布对食品冷藏效果产生影响,因此有必要对柜内温湿度场的分布特性进行研究,目前国内外有学者研究了多种陈列柜的温度分布,例如:文献[10]针对卧式低温陈列柜开展了温度分布均匀性方面的研究,指出靠近出风口部的温度梯度大,靠近回风口部的温度梯度小且温度分布均匀。文献[11]通过实验对带三层风幕的低温陈列柜进行研究,分析了各层风幕送风速度对货架温度的影响。文献[12]对带双层风幕立式陈列柜搁架外侧和回风口部的温度场分布特性进行数值模拟和实验验证,指出陈列柜外侧有温度分层现象。文献[13-17]通过测量柜内 M 包(模拟食品)温度,分析食品温度与其摆放位置的关系。文献[18]研究了节能帘对陈列柜热负荷的影响,指出节能帘可减少 25%~40% 的热负荷。文献[19-21]分析了商场环境湿度变化对冷藏陈列柜热负荷的影响。暂未发现有学者针对带单层风幕的敞开式陈列柜在有、无节能帘两种条件下,开展柜内搁架区的温湿度场分布特性和温湿度之间关系方面的研究。

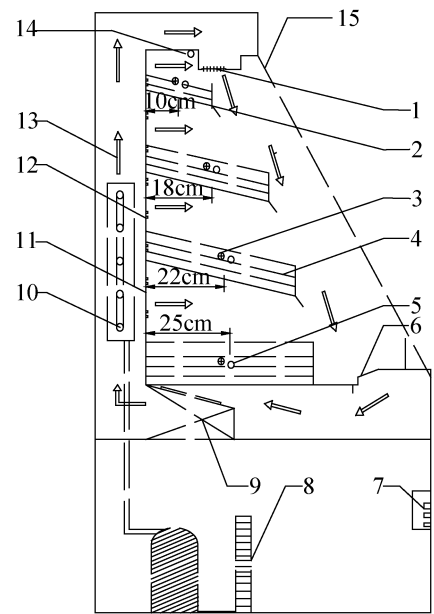
本文采用一种带单层风幕的敞开式陈列柜实验平台,对其柜内温湿度分布进行研究,分析陈列柜温湿度场的分布特性和节能帘对温湿度分布的影响,研究结果为不同果蔬在各层搁架的摆放及果蔬用敞开式陈列柜性能的改进提供可靠的依据。

1 材料与方法

1.1 实验平台

敞开式陈列柜平台总体结构如图 1 所示。陈列柜整体规格(长×宽×高)为 2.00 m×0.99 m×1.54 m,有效容积约 0.81 m³,前部敞开采用单层风幕,敞口面积 1.67 m²。节能帘为帘布状材料,开孔率为 4.36%,利用拉环控制帘的伸缩来覆盖敞口区域,通过阻隔柜内外环境间热交换,减少陈列柜热负荷,达到节能目的。使用 3 层搁架将货物陈列区分割为 4 层,搁架自上而下依次分为第 1、2、3、4 层。控制制冷机组停开的控制温度传感器位于顶板内侧,其受陈列柜外部环境的辐射影响较小。陈列柜主要由制冷系统和通风系统组成,通风系统中风的循环分为两路,一路是通过陈列柜背板上的出风孔吹出以保证柜内低温并使温度分布均匀;另一路是通过蜂窝式送风隔栅吹出以形成冷风幕,通过冷风幕来隔绝与外界热空气间的热质传递。底部搁架下风机安装板上固定有(3 个)轴流风机(杭州微光电子股份有限公司生

产),风机型号为 Y2F513,最大风量为 460 m³/h,最大转速为 1300 r/min。采用 AZ8901 型风速仪(台湾衡欣科技股份有限公司生产)测定室内环境风速,准确度为 2%。采用 PT100 温度传感器(量程: -200~500 ℃,精度: ±0.15 ℃)测定柜内温度分布,采用相对湿度传感器(量程: 0~100% RH,精度: ±3% RH)测定柜内相对湿度分布,测点布置如图 2 所示。无纸记录仪与计算机通过串口相连,记录 PT100 温度传感器和相对湿度传感器的测量值。



1 蜂窝式送风隔栅 2 搁架 3 温度传感器测点 4 脐橙 5 相对湿度传感器监控测点 6 回风格栅 7 控制器 8 制冷机组 9 轴流风机 10 蒸发器盘管 11 背板 12 侧壁出风孔 13 风道 14 控制温度传感器测点 15 节能帘

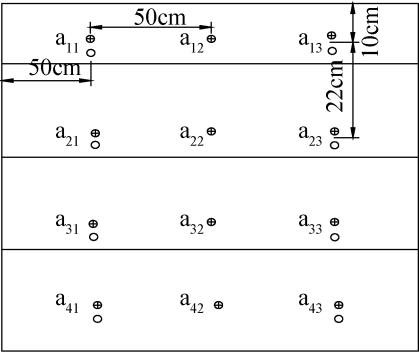
图 1 敞开式陈列柜总体结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of open display cabinet structure

1.2 实验材料及方法

实验材料选用江西省脐橙,购于水果批发市场,果实规则,无病虫害,无损伤,总质量约 65 kg。在实际货架展示销售中,江西脐橙一般不采用包装销售,为切合实际,在实验中对脐橙不采用包装处理。将预冷后的脐橙并排摆满于陈列柜各层搁架上,第 1 层搁架由于展示空间小,摆放一层脐橙,其他搁架分别摆放三层脐橙。脐橙与背板间距约为 25 mm。

实验在室内进行,室内环境温度约 22 ℃,相对湿度约 80% RH,风速小于 0.1 m/s。蜂窝式送风隔栅平均送风风速约为 0.65 m/s,背板出风孔平均送风风速约为 0.1 m/s。陈列柜制冷过程分为两个阶段:一是首次制冷阶段,即陈列柜从初始温度降至设置的温度下限值,初始温度接近室内环境温度;二是稳态运行阶段,即首次制冷阶段结束后,当柜



注：a₁₁、a₂₁、a₃₁、a₄₁ 为左部的传感器测点，a₁₂、a₂₂、a₃₂、a₄₂ 为中部的传感器测点，a₁₃、a₂₃、a₃₃、a₄₃ 为右部的传感器测点。

图 2 陈列柜温湿度场测点分布
Fig. 2 Temperature and humidity field distribution points in cabinet

内环境通过与外界环境进行热交换使柜内温度回升，控制温度传感器温度值升至设置的上限值时，开启制冷机组，直至控制温度传感器温度值降至下限值。在两个阶段中，全部风机始终保持稳定运转。

12 路温度传感器、8 路相对湿度传感器分别用于测量陈列柜 4 层搁架的左、中、右部温度值和左、右部相对湿度值。各路温度传感器、相对湿度传感器连接至无纸记录仪，记录仪每隔 10 s 采集一组数据。

1.3 数据处理和分析

陈列柜稳态运行阶段的回温、降温 2 种工况实验中，记录 2 种工况结束时刻的 12 路温度传感器和 8 路相对湿度传感器的数值进行实验分析。采用 4 层搁架左、中、右部温度测点的平均值计算各部温度值；采用各层搁架温湿度测点的平均值计算该层搁架温湿度值；对稳态运行阶段进行分析的数据均采用 5 个稳定振荡周期的平均值。通过 SPSS、Matlab 软件分析柜内温湿度分布的显著性和均匀性。

温度、相对湿度分布的均衡性以变异系数表示。计算式为：

$$CV = SD/S \tag{1}$$

式中：CV 为变异系数；SD 为标准差；S 为平均值^[22]。

1.4 柜内温度与控制温度差异性分析

根据国家标准^[23]的要求，控制温度传感器测点位于陈列柜顶板内侧，避免受到外界环境的辐射。在陈列柜运行过程中，制冷机组根据控制温度传感器监测的温度值进行停开工作。实际运行中各层搁架的果蔬展示空间受柜内外环境间热交换的影响较大，造成柜内实际温度高于控制温度传感器监测的温度值。

为了研究柜内实际温度与控制温度传感器监测的温度差异性，将陈列柜温度档位设为 -2 ~ 3 ℃ 进行实验，即在稳态运行阶段，当控制温度传感器温度值达到 3 ℃ 时，制冷机组开始制冷；当控制温度传感器温度值为 -2 ℃ 时，制冷机组停止制冷。在一个降温回温周期内，计算各测点温度的均值作为柜内温度值，分析柜内温度随时间的变化，结果如下图 3 所示。

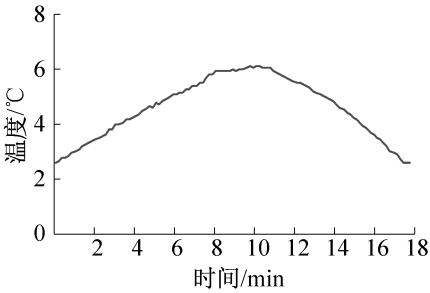


图 3 一周期内柜内温度变化
Fig. 3 Temperature variation in a cycle of cabinet

从图 3 可以看出，在一定的室内环境条件下，当陈列柜运行温度档位设为 -2 ~ 3 ℃，降温结束时陈列柜平均温度为 2.58 ℃，回温结束时为 6.13 ℃。可知在降温结束时柜内温度与控制温度传感器温度的偏移量为 + 4.58 ℃，回温结束时的偏移量为 + 3.13 ℃。

由于大多数果蔬产品适宜贮藏的环境温度为 0 ~ 10 ℃^[24-25]，因此将陈列柜运行温度档位设为 -2 ~ 3 ℃ 进行实验研究，所对应的陈列柜运行温度范围合理可行。

2 结果与分析

2.1 陈列柜温度场分布特性

1) 不同工况温度场分布特性

在无节能帘条件下，分析陈列柜稳态运行阶段回温、降温两种工况结束时的瞬态温度分布规律，结果如表 1 所示。

从表 1 可以看出，回温工况结束时与降温工况结束时的瞬态温度分布差异显著 ($P < 0.05$)。降温工况结束时平均温度较低 (平均值为 3.68 ± 2.03 ℃) 且温度分布较不均匀 (变异系数为 0.55)；回温工况结束时平均温度较高 (平均值为 6.75 ± 1.65 ℃)，温度分布较均匀 (变异系数为 0.25)。

用 Matlab 软件分别对两种工况结束时的瞬态温度测量值进行曲面拟合，坐标“柜内高度”是指陈列柜底部搁架到顶部方向，坐标“柜内宽度”是指陈列柜搁架左端到右端方向 (从陈列柜正面看)，如图 4 所示。

表 1 两种工况对陈列柜温度场的影响

Tab.1 Effect of Temperature field in two conditions of cabinet

传感器序号	工况	
	回温/℃	降温/℃
1	5.3	3.0
2	6.2	4.6
3	5.2	1.6
4	5.1	2.6
5	7.4	4.5
6	5.8	0.8
7	5.7	2.6
8	9.3	5.5
9	5.6	1.5
10	7.3	3.7
11	8.3	6.7
12	9.8	7.0
平均值	6.75	3.68
标准差	1.65	2.03
变异系数	0.25	0.55
t	-4.08	
显著性	P=0.000*	

注：* 表示 $\alpha=0.05$ 显著性水平检验,下同。

从图 4 可以看出,在陈列柜稳态运行阶段的回温、降温两种工况下,回温工况结束时,陈列柜左部温度比右部略低,底层搁架温度高于顶层;降温工况结束时,陈列柜左部温度比右部略高,底层搁架温度高于顶层。从回温工况结束时温度分布来看,左、右部的最大温差为 4.7℃,标准差为 1.60℃;底层搁架与顶层搁架的最大温差为 4.6℃,标准差为 1.81℃。从降温工况结束时的温度分布来看,左、右部的最大温差为 4.4℃,标准差为 1.92℃;底层搁架与顶层搁架的最大温差为 5.4℃,标准差为 2.12℃。

2) 稳态运行阶段温度场分布特性

在无节能帘条件下,对陈列柜稳态运行阶段的温度分布特性进行研究,分析柜内温度分布规律。分别取一个振荡周期内左、右部和及各层搁架的平均温度随时间的变化值,从图 5 可以看出,在一周期内,随着回温和降温工况的进行,柜内温度左部小于右部。这是因为陈列柜冷风幕出风速度左部小于右部 0.05 m/s,引起陈列柜左部敞口区受热交换影响较大。

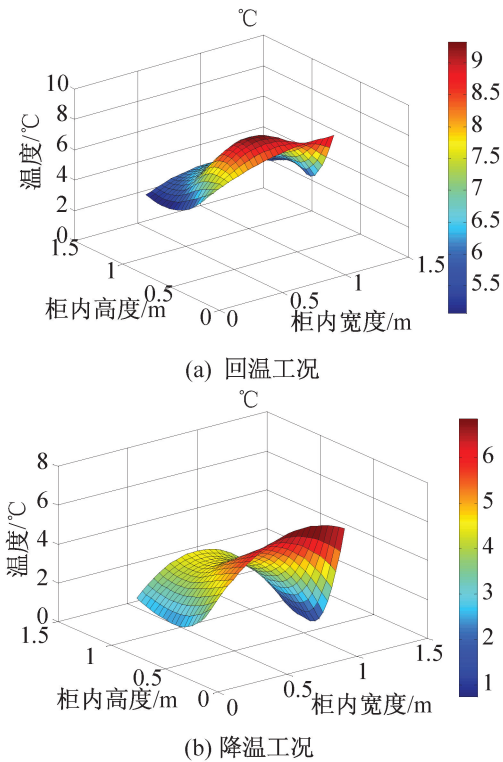


图 4 两种工况下陈列柜的温度分布
Fig.4 Temperature distribution in two conditions of cabinet

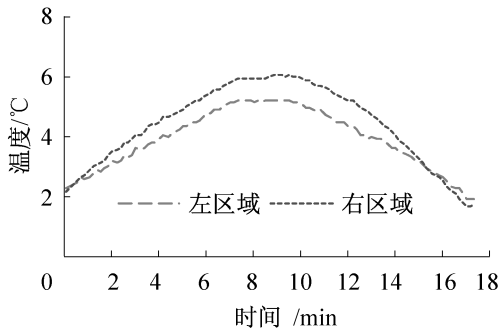


图 5 一周期内温度分布
Fig.5 Temperature distribution in a cycle

用 Matlab 软件对瞬态温度测量值进行曲面拟合,如图 6 所示。

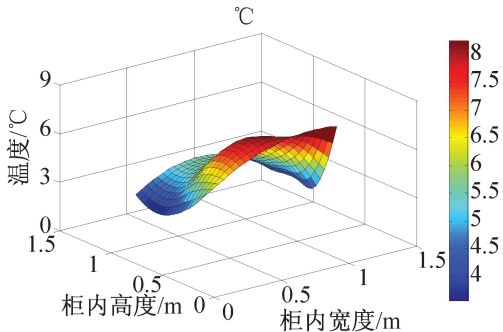


图 6 陈列柜温度场分布
Fig.6 Temperature field distribution in cabinet

从图 6 可以看出,在陈列柜稳态运行阶段,柜内中部温度高于左、右部,底层温度高于顶层温度。从水平方向来看,左、中、右部温度分布差异显著($P < 0.05$),中部温度平均值分别高于左、右部温度平均值 $2.30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $1.79\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这是因为背板中部的开孔率较小,使得柜内中部的气流循环较慢,热交换差。从垂直方向来看,4 层搁架的温度分布具有梯度性,温度上低下高。第 1 层搁架与第 2 层搁架温度分布差异不显著($P > 0.05$),第 2、3、4 层搁架之间温度分布存在差异显著($P < 0.05$)。这是因为第 1、2 层搁架靠近出风区,从送风隔栅吹出的冷射流具有良好的单向性,可以在重力及惯性力作用下平稳流动,隔热效果较好;而在第 3、4 层搁架,由于陈列柜背板处水平气流和风机压降的影响,风幕气流方向略向外倾斜,气流方向不一致,且靠近回风区,由于抽吸作用,造成隔热效果变差。在稳态运行阶段,第 1 层搁架与第 4 层搁架的平均温差可达 $4.97\text{ }^{\circ}\text{C}$,第 4 层搁架温度(平均值为 $7.49 \pm 1.84\text{ }^{\circ}\text{C}$)比第 3 层搁架高 $2.06\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。随着降温、回温工况的进行,各层搁架瞬态温度表现出振荡性,振荡周期约为 17 min ;从变异系数来看,第 1、2、3、4 层搁架温度的变异系数分别为 0.29 、 0.33 、 0.28 、 0.18 ,表明各层搁架间的温度波动存在较大差异。

2.2 陈列柜湿度场分布特性

1) 不同工况湿度场分布特性

在无节能帘条件下,分析陈列柜稳态运行阶段回温、降温两种工况结束时的瞬态湿度分布规律,结果如表 2 所示。

从表 2 可以看出,回温与降温结束时的瞬态相对湿度分布差异显著($P < 0.05$),这是因为相比降温工况,回温阶段由于制冷停止和风幕的卷吸作用,柜外高温空气和柜内低温空气进行热交换,形成凝结水汽,湿度上升。回温工况下的相对湿度较高(平均值为 $73.63 \pm 5.94\%$ RH)且相对湿度分布较均匀(变异系数为 0.08)。

2) 稳态运行阶段湿度场分布特性

在无节能帘条件下,对陈列柜稳态运行阶段的湿度场分布特性进行研究。分别取一个振荡周期内左、右部平均相对湿度随时间的变化值,从图 7 可以看出,在一个周期内随着回温和降温工况的进行,受柜内右部温度高于左部的影响,柜内右部的相对湿度高于左部。

用 Matlab 软件对相对湿度测量值进行曲面拟合,坐标“柜内高度”是指陈列柜底部搁架到顶部方向,坐标“周期阶段”是指在一个振荡周期内从回温

开始阶段到降温停止阶段方向,如图 8 所示。

表 2 两种工况对陈列柜湿度场的影响
Tab.2 Effect of humidity field in two conditions of cabinet

传感器序号	工况	
	回温/% RH	降温/% RH
1	79.0	40.3
2	78.0	43.2
3	65.3	42.5
4	77.5	46.7
5	67.3	35.8
6	67.8	39.4
7	80.0	46.7
8	74.2	49.0
平均值	73.63	42.95
标准差	5.94	4.40
变异系数	0.08	0.10
t	11.73	
显著性	$P = 0.000^*$	

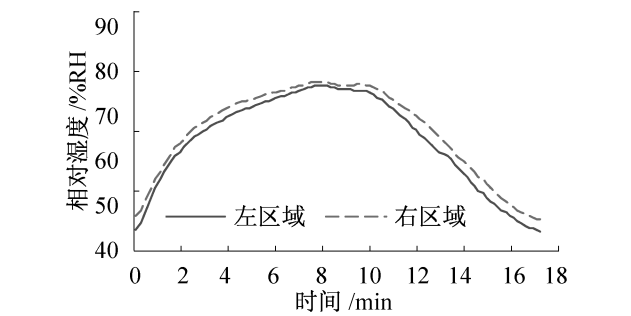


图 7 一个周期内相对湿度分布
Fig.7 Relative humidity distribution in a cycle

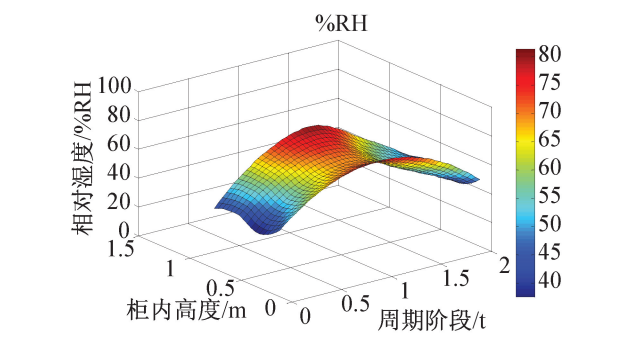


图 8 陈列柜湿度场分布
Fig.8 Humidity field distribution in cabinet

从图 8 可以看出,随着回温和降温工况的进行,

柜内相对湿度分布表现出周期性振荡。从振荡周期内不同时间段来看,回温结束时的柜内相对湿度较高(平均值为 $(75.57 \pm 6.14)\%$ RH)且分布较均匀(变异系数为 0.08),降温阶段中期的相对湿度分布较不均匀(变异系数为 0.13)。与回温阶段和降温中期相比,降温结束时相对湿度较低(平均值为 $(42.95 \pm 5.06)\%$ RH)。从搁架的相对湿度分布来看,各层搁架相对湿度分布差异性显著($P < 0.05$),相对湿度:第 4 层 > 第 1 层 > 第 2 层 > 第 3 层。各层搁架瞬态相对湿度表现出振荡性,振荡周期约为 17 min;从变异系数来看,第 4 层搁架相对湿度波动较小(变异系数为 0.15),第 1 层搁架相对湿度波动较大(变异系数为 0.26)。

2.3 陈列柜温度对相对湿度的影响

在无节能帘条件下,回温工况和降温工况的交替进行导致柜内温度变化,引起空气的饱和水蒸汽分压力改变,而相对湿度受饱和水蒸汽分压力的影响。同时,由于受柜内外环境之间热交换等的影响,柜内局部区域温湿度波动性较大。陈列柜第 1 层搁架内果蔬展示空间最小,受热交换过程中形成的冷凝水汽影响较大,造成相对湿度偏高。陈列柜背板中部区域开孔率较小,造成柜内中部温湿度偏大。为获得稳态运行时温度对相对湿度的影响规律,根据陈列柜左、右部各测点的实验数据,计算各测点温度和相对湿度的均值,以各测点温度和相对湿度的均值为样本,运用线性回归的方法建立相对湿度($Y, \% \text{ RH}$)关于温度($X, ^\circ\text{C}$)的函数模型,回归结果如下:

$$Y = 34.48 + 7.84X$$

(19.00)(17.41)

(2)

其中 () 中的数字表示对应系数的 t 统计量。从回归的结果看,模型拟合较好,拟合优度 $R^2 = 0.6434$,表明相对湿度变化的 63.34% 可由温度的变化来解释。斜率项的 t 统计量远大于 2 临界值,即在 95% 的置信水平下拒绝斜率项为零的原假设,意味着温度对相对湿度具有显著影响。从式(2)可以看出,温度对相对湿度的影响呈一元线性关系,柜内平均温度每升高 $1\text{ }^\circ\text{C}$,平均相对湿度增加 $7.84\% \text{ RH}$ 。

2.4 节能帘对陈列柜温湿度场的影响

在有节能帘条件下,对陈列柜温湿度的分布规律进行研究,对比分析有、无节能帘两种条件下柜内湿度的分布差异,结果如图 9 所示。

从图 9 可以看出,首次制冷过程中,在有、无节能帘条件下柜内温度分布无显著差异($P > 0.05$)。在稳态运行阶段,两种条件下柜内温度分布差异性显著($P < 0.05$);有节能帘条件下,柜内温度平均值为

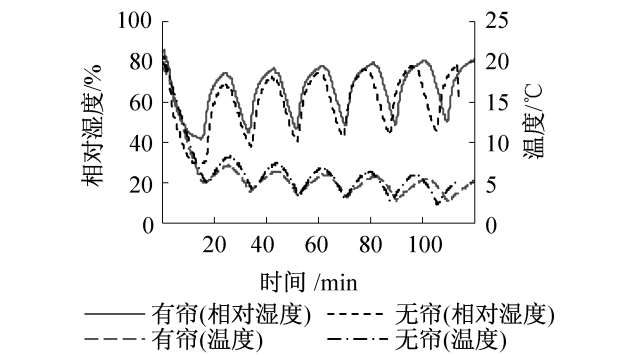


图 9 节能帘对温湿度场的影响
Fig.9 Effect of night covers on temperature and humidity field distribution

$5.07\text{ }^\circ\text{C}$,比无节能帘条件下的平均温度低 $0.43\text{ }^\circ\text{C}$,且有节能帘条件下柜内温度波动幅度较小(变异系数为 0.20)。

在有节能帘条件下,柜内相对湿度显著高于无节能帘条件下($P < 0.05$),其相对湿度平均值为 $67.52\% \text{ RH}$,无节能帘条件下相对湿度平均值为 $61.78\% \text{ RH}$;从变异系数看,在稳态运行阶段,有、无节能帘时的相对湿度变异系数分别为 0.14、0.18,表明节能帘可以减小柜内相对湿度的波动幅度。

针对节能帘对陈列柜降温 and 回温时间的影响进行分析,结果如表 3 所示。

表 3 节能帘对制冷和回温时间的影响
Tab.3 Effect of night covers on cooling and temperature raising time

工况	无节能帘	有节能帘
制冷耗时/min	9.9	8.9
回温耗时/min	7.7	9.8

从表 3 可以看出,在稳态运行阶段的一个振荡周期内,节能帘可以缩短 1 min 的制冷时间和延长 2.1 min 的回温时间。因此,当不需要存取果蔬产品的时候,可拉下节能帘以达到节能效果。

3 结论

为研究带单层风幕的敞开式果蔬陈列柜温湿度场分布特性,采用了一种敞开式陈列柜实验平台作为研究对象。研究了柜内温湿度分布特性、温度对相对湿度的影响关系和节能帘对温湿度分布的影响,研究结果表明:

1)在无节能帘条件下,陈列柜在稳态运行阶段,回温工况结束时与降温工况结束时的瞬态温湿度分布差异显著,回温工况结束时的瞬态温湿度分布较均

匀。

2) 在无节能帘条件下,陈列柜水平方向温湿度分布不均匀,左部温度和相对湿度均低于右部。在稳态运行阶段,4层搁架的温度分布差异显著,上层搁架平均温度低于下层搁架。第1层和第4层平均温度差可达4.97℃;搁架瞬态温湿度值表现出约17min的振荡周期;各层搁架相对湿度分布差异显著,相对湿度:第4层>第1层>第2层>第3层,其中第1层搁架相对湿度波动较大。

3) 建立的各测点相对湿度关于温度的函数模型表明:在稳态运行阶段,温度对相对湿度的影响呈一元线性关系,柜内平均温度每升高1℃,平均相对湿度增加7.84%RH。

4) 与无节能帘相比,在有节能帘条件下陈列柜平均相对湿度高5.74%RH,平均温度低0.43℃,节能帘可减小温度和相对湿度的波动幅度;在稳态运行阶段的一个振荡周期内,节能帘可缩短降温时间和延长回温时间。

由于柜内环境温湿度存在差异性,在实际摆放果蔬产品的过程中可利用该特点,依据果蔬产品适宜贮藏的温湿度条件,参照各区域、各层搁架温湿度的波动范围进行分类摆放,以达到较好的保鲜效果。值得讨论的是,在陈列柜稳态运行阶段中,外界环境的温湿度水平可能对陈列柜温湿度的分布特性产生影响,本课题组正对此进行深入的研究。

参考文献

[1] 余克志,丁国良,陈天及. 陈列柜及风幕数值模拟的研究进展[J]. 制冷学报, 2011, 32(2): 39-44. (Yu Kezhi, Ding Guoliang, Chen Tianji. Research Development of Numerical Simulation for Display Cabinets and Air Curtains [J]. Journal of Refrigeration, 2011, 32(2): 39-44.)

[2] Amin M, Dabiri D, Navaz H K. Experimental Investigation of the Effect of Various Parameters on the Infiltration Rates of Single Band Open Vertical Refrigerated Display Cases with Zero Back Panel Flow[J]. ASHRAE Transactions, 2009, 115(2): 255-265.

[3] Laguerre O, Hoang M H, Osswald V, et al. Experimental study of heat transfer and air flow in a refrigerated display cabinet[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 113(2): 310-321.

[4] Yu K Z, Ding G L, Chen T J. A correlation model of thermal entrainment factor for air curtain in a vertical open display cabinet[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(14/15): 2904-2913.

[5] 蔡新梅,宋文吉,冯自平. 基于冰浆蓄冷的集中制冷冷藏陈列柜的实验研究[J]. 制冷学报, 2011, 32(4): 63-

66. (Cai Xinmei, Song Wenji, Feng Ziping. Experimental Study on Ice Slurry Vertical Open Display Cabinet with Central Refrigeration[J]. Journal of Refrigeration, 2011, 32(4): 63-66.)

[6] 韩谓,吕恩利,陆华忠,等. 液氮充注气调保鲜运输厢内环境因素间耦合关系[J]. 农业工程学报, 2012, 28(17): 275-280. (Han Xu, Lü Enli, Lu Huazhong, et al. Coupling effect of environmental factors in fresh-keeping transportation container with controlled atmosphere by liquid nitrogen injection [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(17): 275-280.)

[7] Mahajan P V, Oliveira F A R, Macedo I. Effect of temperature and humidity on the transpiration rate of the whole mushrooms[J]. Journal of Food Engineering, 2008(84): 281-288.

[8] 关文强,陶晓彦,张娜,等. 高湿度冰箱对青菜和西芹的保鲜效果[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 265-269. (Guan Wenqiang, Tao Xiaoyan, Zhang Na, et al. Effects of high-humidity refrigerator on quality of fresh Tai-tsai and celery[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(4): 265-269.)

[9] Laguerre O, Derens E, Flick D. Temperature prediction in a refrigerated display cabinet: deterministic and stochastic approaches[J]. Electronic Journal of Applied Statistical Analysis, 2011, 4(2): 191-202.

[10] 刘东毓,吴业正,程松. 陈列柜内空气流动与换热的研究[J]. 制冷学报, 2000, 21(1): 51-55. (Liu Dongyu, Wu Yezheng, Cheng Song. A Study of Air Flow and Heat Transfer in an Open Display Cabinet[J]. Journal of Refrigeration, 2000, 21(1): 51-55.)

[11] 陈天及,李玉红,余克志. 风幕特性对立式低温陈列柜运行性能影响的实验研究[J]. 制冷学报, 2004, 25(3): 1-4. (Chen Tianji, Li Yuhong, Yu Kezhi. Experimental Investigations on the Influence of Air Curtain Characteristic on the Operation Performance of Vertical Low Temperature Display Case [J]. Journal of Refrigeration, 2004, 25(3): 1-4.)

[12] 余克志. 立式敞开式集中送风式陈列柜模拟与实验研究[D]. 上海: 上海交通大学机械与动力工程学院, 2009年9月.

[13] 薛牡丹,吕彦力,石海军,等. 柜外环境对立式冷藏陈列柜食品温度影响的研究[J]. 现代食品科技, 2007, 23(12): 13-14. (Xue Mudan, Lü Yanli, Shi Haijun, et al. Study on the Influence of the External Environment of Vertical Refrigerated Display Cabinet on the Food Temperature [J]. Modern Food Science and Technology, 2007, 23(12): 13-14.)

[14] 谢堃,陈天及,余克志,等. 环境温湿度对制冷陈列柜性能影响的实验研究[J]. 制冷学报, 2007, 28(2): 19-22.

- (Xie Kun, Chen Tianji, Yu Kezhi, et al. Experimental Investigation on Effect of Ambient Temperature and Relative Humidity on Performance of Refrigerated Display Cabinet[J]. Journal of Refrigeration, 2007, 28(2): 19-22.)
- [15] 周颖. 立式敞开式制冷陈列柜的性能分析和改进[D]. 上海: 上海交通大学机械与动力工程学院, 2008 年 2 月.
- [16] Laguerre O, Hoang M H, Flick D. Heat transfer modeling in a refrigerated display cabinet: The influence of operating conditions[J]. Journal of Food Engineering, 2012 (108): 353-364.
- [17] Gaspar P D, Goncalves C C L, Pitarma R A. Experimental analysis of the thermal entrainment factor of air curtains in vertical open display cabinets for different ambient air conditions[J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(5): 961-969.
- [18] Chen Y G, Yuan X L. Experimental study of the performance of single-band air curtains for a multi-deck refrigerated display cabinet[J]. Journal of Food Engineering, 2005 (69): 261-267.
- [19] Howell R H. Effects of store relative humidity on refrigerated display case performance[J]. ASHRAE Transactions, 1993, 99(1): 667-670.
- [20] Howell R H, Rosario L, Bula A. Effects of indoor relative humidity on refrigerated display case performance[J]. ASHRAE Transactions, 1999, 105(1): 275-282.
- [21] Faramarzi R. Efficient display case refrigeration[J]. ASHRAE Journal, 1999, 41(11): 46-52.
- [22] 王国梁, 刘国彬, 党小虎. 黄土丘陵区不同土地利用方式对土壤含水率的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(2): 31-35. (Wang Guoliang, Liu Guobin, Dang Xiaohu. Effects of land use on soil moisture in loess hilly and gully region of China[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(2): 31-35.)
- [23] 中国制冷学会. GB/T21001.2—2007 冷藏陈列柜第 2 部分: 分类、要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007 年 8 月.
- [24] 冯双庆. 果蔬贮运学[M]. 第 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2003: 60-61.
- [25] 曾志雄, 吕恩利, 陆华忠, 等. 叶菜保鲜环境参数的研究现状与分析[J]. 广东农业科学, 2012, 39(23): 75-77. (Zeng Zhixiong, Lü Enli, Lu Huazhong, et al. Research and analysis of environmental parameters in fresh-keeping of leafy vegetables[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2012, 39(23): 75-77.)

通信作者简介

王海林, 男(1972-), 教授, 华南农业大学工程学院副院长, 华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, (020) 85283652, E-mail: hlwang@scau.edu.cn。研究方向: 农产品冷链物流、农业工程研究。现在进行的研究项目有: 国家科技支撑计划课题——物流农产品品质维持与质量安全技术研究与应用等。

About the corresponding author

Wang Hailin (1972-), male, Ph. D./Professor, Vice-dean, College of Engineering, South China Agricultural University, (020) 85283652, E-mail: hlwang@scau.edu.cn. Research fields: agricultural products cold-chain logistics, agricultural engineering. The author takes on project supported by the project was supported by Key Technologies R&D Program of China: keeping quality of agricultural products cold-chain logistics, the research and application of safety and quality technology.

(上接第 7 页)

- [14] Zhang Dongliang, Zhang Xu, Liu Jun. Experimental study of performance of digital variable multiple air conditioning system under part load conditions[J]. Energy and Buildings, 2011, 43(6): 1175-1178.
- [15] Tu Qiu, Dong Kaijun, Zou Deqiu, et al. Experimental study on multi-split air conditioner with digital scroll compressor[J]. Applied thermal engineering, 2011, 31: 2449-2457.
- [16] 吴双, 季秀成. 基于变容量技术的风冷冷水热泵机组制冷系统试验研究[C]//中国制冷学会学术年会, 2011.
- [17] 中华人民共和国国家制冷监督检验检疫总局, 中国国家标注化管理委员会. GB/T 18430.2-2008 蒸发压缩循环冷水(热泵)机组第 2 部分: 户用及类似用途的冷(热泵)机组[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

作者简介

吴静怡, 女(1963-), 博士生导师、教授, 上海交通大学机械与动力工程学院党委书记, 021-34206776, E-mail: jywu@sjtu.edu.cn。研究方向: 制冷空调系统的能源管理与自动控制, 能源的综合利用。现在进行的研究项目有: 国家自然科学基金——基于动态负荷预测的建筑冷热电联供系统动态特性研究等。

About the author

Wu Jingyi (1963-), female, Ph. D./Professor, 021-34206776, E-mail: jywu@sjtu.edu.cn. Research fields: Energy management and control of refrigeration and air-conditioning system. Energy complex utilization. The author takes on project supported by the National Natural Science Foundation of China: Dynamic characteristics study of combined cooling, heating and power system based building load prediction.