

集合包装水果的差压预冷研究进展

陈秀勤¹, 卢立新^{1,2}

(1. 江南大学, 无锡 214122; 2. 中国包装总公司食品包装技术与安全重点实验室, 无锡 214122)

摘要: **目的** 综述国内外关于集合包装水果差压预冷的研究,并分析了存在的问题。**方法** 从差压预冷技术在果品保鲜领域的应用背景出发,分析预冷的基本原理、特点及意义,归纳了目前差压预冷果品在理论和实验两方面的研究内容及成果。**结果** 水果差压预冷的研究主要集中在包装箱内水果预冷的数值模型、送风工艺参数及通气包装结构设计等方面,包装箱上的开孔对调节预冷气流,促进热质交换具有重要的作用。**结论** 果品预冷数学模型的系统性、可靠性及新型实验验证技术的精准性有待进一步研究,送风工况、预冷包装系统的结构及适用性须兼顾经济、强度因素进行优化。

关键词: 水果保鲜;差压预冷;数值模型;送风工艺;包装结构

中图分类号: S121; S609+.3; TS206 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2014)01-0141-07

Research Advances of Forced-air Precooling for Multi-packed Fruits

CHEN Xiu-qin¹, LU Li-xin^{1,2}

(1. Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

2. Key Laboratory of Food Packaging Technology and Safety, Wuxi 214122, China)

ABSTRACT: **Objective** To review researches on forced-air precooling of multi-packed fruits and put forward relevant problems. **Methods** The application background, working principles, advantages and significance of forced-air precooling technology for fresh foods were introduced, and both theoretical and experimental studies were summarized. **Results** Recent researches mainly focused on numerical modeling, cooling parameters and ventilation packaging design during forced-air cooling process, openings on the packages effected the airflow, heat and mass transfer greatly. **Conclusion** Future research efforts should be directed to develop a more systematic and reliable mathematical model and more accurate experimental verification technology. The optimization of airflow condition and packaging structure should balance the economic and mechanical strength factors.

KEY WORDS: fruit preservation; forced-air precooling; numerical model; cooling air; packaging structure

我国是世界果蔬“生产大国”,但并非“生产强国”。因农产品运输量大,运输时间长,每年30%以上的果蔬在流通中损失,其价值近800亿元^[1]。在很多国家,预冷是果蔬采后处理的第1道工序,它能够有效去除田间热、抑制呼吸、缓解蒸腾、防止微生物侵蚀,并能增强产品的低温抗性。国内预冷技术的使用率仅为5%,贮藏能力为25%,而日本高达90%^[2],因此加强果蔬采后预冷技术的研究,提高“源头保鲜”的

质量和数量,对于改变我国农产品“丰产不丰收”的局面将产生关键性的意义。

1960年美国Guillon发明了差压预冷技术,之后便被广泛应用于果蔬的预处理。日本于20世纪70年代开始研究并大力推广,国内在“九五”期间率先组织科技攻关项目进行相关的试验研究^[3-4]。差压预冷也称强制通风预冷,即利用风机在包装箱两侧形成一定的压力差,迫使冷空气通过包装箱上的开孔,流

收稿日期: 2013-05-19

作者简介: 陈秀勤(1988—),女,云南曲靖人,江南大学硕士生,主攻运输包装。

通讯作者: 卢立新(1966—),男,江苏宜兴人,江南大学教授、博士生导师,主要研究方向为运输包装、食品农产品包装技术等。

经货物将内部热量快速带走的过程。它成本低、操作简单、降温快、冷却均匀,是商业生产中应用最多的预冷方式。笔者对近年来集合包装水果差压预冷的研究现状进行了综述,主要涉及预冷数值模型的建立、送风工艺参数的优化和通气包装系统的结构设计等3个方面,并就其中存在的问题及以后的研究展望进行探讨。

1 包装箱内水果差压预冷的数值模型

在预冷过程中,包装系统中的空气流动比较复杂,单凭试验数据无法了解整个过程中产品温度、质量变化的内在规律,目前尚有高效的实验技术可以精准测定包装内气流的速度。数值模拟无需投入较高的人力、物力、财力,且稳定性高,能够将流场可视化,有效测定相关物理量。随着计算机技术的发展,数值模拟在预冷控制研究领域备受青睐,它在一定程度上为试验提供理论依据,大大缩短设计周期。国内外的研究主要有以下几种模型。

1.1 集总参数模型

预冷过程中,当产品的内部热阻远小于表面对流换热热阻时,毕渥数趋于0,此时内部热阻忽略不计的简化传热分析即构成集总参数模型。杨昭建立集总参数模型研究了巨峰葡萄的预冷发现,当冷空气流达到一定速度时,采用定性尺寸 R 能够很好地估算葡萄的预冷时间。对于苹果的预冷实验,由于内部热阻的作用,苹果的降温曲线在刚开始有一段相对明显的滞后期,不能用集总参数法来表述预冷过程^[5-7]。其实,果品内部的温度梯度还受本身热性能的影响,对于导热系数大且体积较小、风速较低的情况,内部热阻可忽略,可采用集总参数法求解。

1.2 多孔介质模型

1988年Talbot^[8]引入多孔介质渗透流体模型,用Darcy-Forchheimer和Ergun等式模拟桔子 in 包装箱内的温度分布。Van der^[9]采用多孔介质方法联合Darcy-Forchheimer-Brinkman等式建立模型预测了包装箱内的气流分布。Hoang等人^[10]运用连续的多孔介质模型研究莴苣的预冷传热传质过程,但由于产品相对于外包装尺寸较大,因而模拟结果与试验数据有一定的差距。Zou等人^[11-12]将包装箱内每层水果看

作一个整体,创立“伪多孔介质模型”研究包装箱内的气流分布和热传递过程。王强等人^[13]建立了渗透多孔介质流动模型研究空气流过三维葡萄包装箱时压力和速度分布,利用有限差分法编写FORTRAN程序计算求解。郭亚丽等人^[14]用多孔介质方法建立了番茄差压预冷箱内空气流动的数学模型,采用有限元法求解得到预冷箱内的流场分布。

多孔介质模型的动量方程中具有附加的源项,上述模型都是基于不同方法对添加项的简化,其中Darcy定律适用于层流,Darcy-Forchheimer等式用于湍流,Darcy-Forchheimer-Brinkman等式用于有边界限制的流动,而Brinkman条件用于处理边界层。多孔介质运用了平均化理论,不能反映流动的局部细节,当果品与包装的水力直径比小于10时,连续假设不再成立。模型中引入的很多经验参数不确定,多孔介质模型用于预冷的研究还处于尝试阶段^[15-16]。

1.3 直接数值模型

直接数值模拟(DNS)不用任何湍流模型直接数值求解完整的三维瞬态Navier-Stokes方程组。Ferrua^[17]基于PIV(粒子图像测速)技术采用直接数值模型,研究了预冷时草莓通气包装中的局部气流分布。Dehghannya等人^[18]分别建立了流体区和球形果品区的传热传质控制方程,借助COMSOL Multiphysics软件采用有限元法进行了数值模拟。王强等人^[19]建立了三维的 $\kappa-\varepsilon$ 湍流模型,利用Fluent软件采用有限容积法模拟了包装箱内黄金梨的温度场。直接数值模型克服了产品与包装相对大小的束缚,不受几何形状的限制,但它对网格划分精度要求高,现在仅在低、中Re的流体介质中进行研究,还无法用于实际的工程计算。

此外,也有学者引进其他领域的数值分析方法对果蔬预冷进行研究,李帅^[20]以实验数据作为样本,选用神经网络模型建立了风速、孔隙率、开孔率、送风温度等参数与类圆柱形果蔬预冷过程平均温度和均匀度之间的非线性映射关系。刘峻等人^[21-22]将电气网络理论应用到差压预冷研究中,建立包装箱群流体网络模型对流动特性进行求解。

2 送风工艺参数的优化

预冷时冷媒的状态对包装系统内部气流和温度

分布的影响是直属性的,送风速度、温度、湿度以及送风形式的改变都会产生不同的流场响应。这些可控参数的设定须兼顾产品预冷的质量和经济成本。与部分水果预冷工艺参数相关的研究见表 1^[23—26]。

1) 送风速度。通常风速越大,预冷时间越短,但增大风速要求增大风机的功率,投资成本必然提高。较低速度的送风虽然耗能少,均一性好,但会大大延长预冷时间,因而风速的选择要综合权衡预冷效率和经济因素。

2) 送风温度。它对冷时间的影响较大,由于果品散失的热量与送风初始温度和预冷环境的温差成正比,送风温度的降低将有利于减少预冷时间。为了避免发生冷害,送风温度一般不宜低于果蔬的冷藏适温。

3) 送风湿度。随着相对湿度增加,果蔬表面的水分向周围冷空气的扩散能力降低,单位时间内由于蒸腾作用带走的热量降低,预冷时间延长,而过低的湿度又会导致果蔬水分散失严重,影响水果品质,因此实际预冷中送风气流要保持一定的相对湿度,一般在 80% 以上。

4) 送风形式。水平送风时由于搬运等流通操作,果蔬与包装箱及包装箱之间会产生间隙,形成失效的气流通道,垂直送风能大大提高冷风的利用率,但其阻力较水平送风大 30% ~ 40%。间隔改变送风方向可以提高预冷的速率和均一性,但这种方法无疑要追加更大的成本,因此提高水平送风中冷媒的利用率将具有重要的意义。

表 1 不同产品的冷藏条件及其差压预冷工艺参数优化

Tab.1 Refrigerated conditions and optimal forced-air precooling technology of different products				
研究对象	冷藏条件(温湿度)	预冷条件(送风参数)	优化结论	研究者
番茄	0 ~ 2 ℃	速度:0.8,1.0,1.2,1.5,1.8 m/s	预冷风速在 0.9 ~ 1.5 m/s 时,预冷	刘斌 (2004)
	85% ~ 90%	温度:0,4,7 ℃	方式能取得最好的效果	
黄金梨	0 ~ 2 ℃	速度:1.0,1.5,2.0 m/s	建议送风速度为 1.5 ~ 2.0 m/s,冷却	王强 (2008,2011)
	85% ~ 90%	温度:1 ℃	较快,较均匀	
王林苹果	0 ~ 2 ℃	速度:0.75,1.0,1.5,1.75,2.0 m/s	预冷的最佳操作风速为 1.5 m/s,采	谭晶莹 (2008)
	90% ~ 95%	温度:2,4,6 ℃ 相对湿度:60%,70%,80%,90%	用低温高湿(4 ℃,相对湿度为 80% 以上)的气流能得到良好的效果	
草莓	±0.5 ℃	速度:0.5 ~ 2.0 L/(s · kg)	间隔改变送风方向可提高预冷速率	Ferrua (2009)
	90%	温度:-2 ~ 4 ℃ 相对湿度:85% ~ 95%	和均一性,且改变频率越高,预冷越快越均匀	
龙眼	1 ~ 4 ℃	速度:0.5,1.0,1.5,2.0 m/s	风速为 1 m/s 时冷却速度较快,能量	孟志锋 (2010)
	90% ~ 95%	温度:5,6,7 ℃	损耗较少,冷风温为 5 ℃ 较为适宜	

果品的物性差异导致它们的低温适应能力不同,最佳预冷条件也不一样,还需进行大量系统的研究。预冷不仅要保护产品的完整性,避免送风温度过低产生二次损伤,还要利于实现均匀、快速的降温,减少能耗。

3 通气包装系统的结构设计

包装作为果品保鲜的有机组成部分,一方面本身能够缓解蒸腾作用,减少水分散失,而另一方面包装箱上的开孔为预冷提供气流通道,其结构直接影响预冷的速率和均匀性,二者对于提高果品的舒适度乃至货架期都是至关重要的,预冷不均匀会造成产品回温的二次污染。大量研究证明开孔的形状、面积、数目、位置,包装物形成的孔隙率,包装箱的三维尺寸、

堆码方式等都会影响果蔬预冷的效果。

3.1 开孔的形状

刘凤珍等人^[27]引入开孔形状因子,研究了圆形、椭圆形、键槽形和矩形等 4 种开孔形式对草莓冷却速度及压降的影响。结果表明,圆形孔对压降的影响最小,矩形反之,在低风速工况下,孔的形状对冷却时间的影响较明显,送风速度为 0.5 m/s 时,圆形开孔较之矩形开孔,草莓的 7/8 冷却时间缩短 20% 以上。王强等人基于方差分析研究了包装箱开孔形状对冷却均匀性的影响,结果表明圆形孔时的预冷均匀性最好,方形、椭圆形孔次之,键槽形孔最差。Furra^[28]在草莓的二级预冷包装箱上采用倒草莓形开孔,可有效调节气流,提高了冷风的利用率。Han 采用有限元方法对不

同开孔进行结构分析发现,包装箱侧面竖直对称的键槽形开孔最稳定,能最大限度地维持纸箱强度,包装箱棱角上的脊孔对设计没有太多要求,对强度削弱小,常用于方便堆码的生鲜食品包装箱中作通气孔^[29—30]。

3.2 开孔的大小和面积

开孔的大小和面积直接影响进气量的多少。刘学亭等人^[31]对黄金梨进行了预冷试验,结果表明增大孔径降温加快,但增到 40 mm 以后增幅减慢,到 45 mm 时,增大孔径均匀性反而降低。Anderson, Tutar 等人^[32—33]发现,预冷时间并非与开孔面积成反比关系,且开孔面积的增加势必造成预冷后产品升温加快,包装本身的强度也受到削弱。已有研究中果蔬预冷的优化包装开孔面积见表 2^[34—40]。

表 2 不同产品预冷包装的优化开孔面积

Tab.2 Recommended optimal packaging vent area of different precooling products

研究对象	包装条件	研究内容	研究结论	研究者
桔子	瓦楞纸箱 (500 mm×300 mm×300 mm)	预冷速率	侧面开孔率为 6% 预冷最快	Ladaniya (2000)
中空 PVC 球 模拟器	孔板可拆式预冷箱 (760 mm×600 mm×600 mm)	预冷效率	开孔率为 14% 最佳	Castro (2004b)
实心球 模拟器	可拆式丙烯酸孔板预冷箱 (420 mm×420 mm×420 mm)	能量损耗	开孔率为 8% ~ 16% 可用于能量的优化	Castro (2005b)
黄金梨	瓦楞纸箱 (356 mm×285 mm×214 mm)	冷却速率 和均匀性	开孔率在 12% ~ 16% 范围内变化时,果蔬降温的速度和均匀性比较好	董德发 (2008)
草莓	由塑料盒及开口托盘箱 组成的二级包装	压降和 预冷效果	侧面开孔率增加到 14%, 预冷速度大大提高	Ferrua (2011)
球形果蔬	双层瓦楞纸箱 (380 mm×300 mm×300 mm)	流场分布	容积开孔率为 42.3% 时, 预冷效果最佳	李超 (2011)

3.3 开孔的数目和位置

Castro 等人^[41]利用模拟器代替球形果蔬试验发现,孔沿高度方向的位置对气流的影响不大,面积相同时,开孔从角落到中心再到上下分布时预冷均匀性加强。Opara 等人^[42]通过对层装苹果的热敏性分析发现,开孔位置会影响包装箱内气流分布和层间传热。Dehghannya 等人^[43]通过 DNS 模拟得出温度均一性随开孔数目的增加而增强,合理布置一定数目的通气孔可以提高预冷速率的结论。蔡景辉等人^[44]发现靠近压差风机侧的开孔率低,底部的孔径稍大于上部能够充分利用冷风进行快速而均匀的预冷。

3.4 水果的排列方式

包装箱内水果的排列方式不同,会形成不同的孔隙率和气流通道。郭亚丽等人的研究表明,平方间隔排列时孔隙率大,内部阻力小,冷却较快。陈天及等人^[45]却发现间隔排列更快,但均匀性稍差,与王强的研究结果一致。孔隙率的影响要综合考虑传热传质系数的变化、包装物最外层的气流状态以及果蔬的热

负荷,仅在低速范围内比较明显。

3.5 包装箱的外形尺寸

目前的预冷箱多是在 0201 型瓦楞纸箱上增加不同的开孔,对外形和尺寸没有统一的标准。Ferrua 等人^[46]提出预冷果品的内外包装应相互协调,在草莓二级包装箱内靠近出口处增加带孔隔板能使气流趋于缓和。杨洲等人^[47]拟合得到预冷压差与包装箱长度呈线性正相关趋势。在实际应用中,包装箱的设计要综合包装材料的利用率、堆码的稳定性及机械强度,还须考虑对流通托盘的适应性,包装箱的长、宽比为 1.5 : 1 是市场最能接受的^[48—49]。

3.6 包装箱的堆码方式

包装箱堆码时要避免相互干扰,使气流形成稳定的压差。由于堆码箱群之间必然存在缝隙,会产生窜流、内外流场的耦合,使预测难度加大,相关的研究很少。Ladaniya 等人^[36]在柑橘的坑道式强制通风预冷研究中发现,包装箱堆码的宽度越大,高度越低,预冷越快,能耗越少。

4 结语

由于水果差压预冷过程中包装箱内气流比较复杂,加上产品本身的物性差异和后生命活动,导致对预冷过程中气流微环境的精密控制比较困难。预冷流场的数值模拟及对应的实验验证技术、通气包装设计都有待进一步进行深入而系统的研究。

1) 预冷数学模型。已有的很多研究模型仅适用于特定的简化系统,通常不考虑水果采后生命活动的影响,模型中用到的经验参数没有一致的规定,因此有必要建立一个普适度更高、更可靠的数值模型,涵盖包装箱、堆码系统、外部环境间及它们之间的交互作用,同时体现预冷过程中关键因素变化的影响。

2) 新型实验测试技术。预冷数学模型的有效性最终需要通过试验数据来验证,而在传统的测试方法中,测试仪器直接与流体接触或者插入产品内部,那么其介入本身就会影响气流的分布。现在发展起来的激光多普勒测速技术(LDV)、核磁共振技术(NMR)和粒子图像测速技术(PIV)等非接触性测试方法都有各自的局限性^[50]。新型的实验测试方法、高精度的数据采集传感器与数值模拟相结合,将使得复杂通气包装水果预冷中流场和传热过程的研究更加深入。

3) 通气包装结构。包装箱上开孔的设计须兼顾本身的机械强度、预冷效果及能耗。目前很多研究者都只是针对特定的产品给出了优化的开孔结构,冷链流通中的包装箱多凭经验设计,没有科学规范的指导,很大程度上制约了预冷效率的提升。利用CFD软件模拟果蔬预冷的同时采用有限元法进行包装结构分析,全面考虑通气孔及手提孔的影响,这将提供一种全新的研究思路。

4) 预冷系统的节能优化。预冷过程的能耗与送风的速度、包装箱两侧的压差和预冷时间直接相关,一般风速越大,冷却越快。由于风速的提高意味着更多的能耗,因此需要找到最佳预冷风速,或者采用变频预冷,开始时采用大风速,随着温度的降低减小风速。

参考文献:

- [1] 瓦楞纸箱在果品包装中的应用[J]. 全球瓦楞工业,2011(6):74—79.
Application of Corrugated Boxes in Fruit Packaging[J]. Journal of Global Corrugated Industry,2011(6):74—79.
- [2] 孟艳玲,汪洋.我国果品贮藏保鲜技术的应用与发展[J]. 果农之友,2005(10):6—10.
MENG Yan-ling, WANG Yang. Application and Development of Fruit Storage and Preservation Technology In China[J]. Fruit Growers' Friend,2005(10):6—10.
- [3] BROSAN T, SUN D. Precooling Techniques and Applications for Horticultural Products—A Review[J]. International Journal of Refrigeration,2001,24(2):154—170.
- [4] 日本食品流通系统协会. 食品流通技术指南[M]. 北京: 中国商业出版社,2006.
Japan Association of Food Circulation Systems. Food Circulation Technology Guide[M]. Beijing: China Business Press,2006.
- [5] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社,2006.
YANG Shi-ming, TAO Wen-quan. Heat Transfer[M]. Beijing: Higher Education Press,2006.
- [6] 杨昭,刘斌,谭晶莹,等. 准球形葡萄预冷时间的研究[J]. 制冷学报,2003,24(3):52—54.
YANG Zhao, LIU Bin, TAN Jing-ying, et al. Study on the Definition of Time of the Grape Pre-cooling[J]. Refrigeration Journal,2003,24(3):52—54.
- [7] 谭晶莹,杨昭. 苹果强制通风预冷实验[J]. 农业机械学报,2008,39(7):95—99.
TAN Jing-ying, YANG Zhao. Experimental Study on Forced-air Precooling of Apples in Bulk[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2008,39(7):95—99.
- [8] TALBOT M T, OLIVER C C, GAFFNEY P E. Pressure and Velocity Distribution for Airflow Through Fruits Packed in Shipping Containers Using Porous Media Flow Analysis[J]. ASHRAE Transactions,1988,86(1):406—417.
- [9] SMAN R G M. Prediction of Airflow Through a Vented Box by the Darcy-Forchheimer-Brinkman Equation[J]. Journal of Food Engineering,2002,55(1):49—57.
- [10] HOANG M L, VERBOVEN P, BAELEMAN M, et al. A Continuum Model for Airflow, Heat and Mass Transfer in Bulk of Chicory Roots[J]. Transactions of ASAE,2003,46(6):1603—1611.
- [11] ZOU Q, OPARA L U, MCKIBBIN R. A CFD Modeling System for Airflow and Heat Transfer in Ventilated Packaging for Fresh Foods: I Initial Analysis and Development of Mathematical Models[J]. Journal of Food Engineering,2006,77(4):1037—1047.
- [12] ZOU Q, OPARA L U, MCKIBBIN R. A CFD Modeling System for Airflow and Heat Transfer in Ventilated Packaging for Fresh Foods: II Computational Solution, Software Development, and Model Testing[J]. Journal of Food Engineering,2006,77(4):1048—1058.
- [13] 王强,刘凤珍,连添达. 葡萄差压预冷的数值分析研究[J]. 天津商学院学报,2001,12(6):6—9.

- WANG Qiang, LIU Feng-zhen, LIAN Tian-da. Numerical Analysis of Pressure-drop Precooling of Grapes[J]. Journal of Tianjin University of Commerce, 2001, 12(6): 6—9.
- [14] 郭亚丽, 徐士鸣. 番茄压差预冷箱内流场分析[J]. 大连理工大学学报, 2002, 42(3): 306—309.
- GUO Ya-li, XU Shi-ming. Analysis of Cold Air Fluid Field in Precooling-box for Pressure-difference Precooling of Tomatoes[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2002, 42(3): 306—309.
- [15] DEHGHANNYA J, NGADI M, VIGNEAULT C. Mathematical Modeling Procedures for Airflow, Heat and Mass Transfer During Forced Convection Cooling of Produce: A Review[J]. Food Engineering, 2010(2): 227—243.
- [16] VERBOVEN P, FLICK D, NICOLAI B, et al. Modeling Transport Phenomena in Refrigerated Food Bulks, Packages and Stacks: Basics and Advances[J]. International Journal of Refrigeration, 2006, 29(6): 985—997.
- [17] FERRUA M J, SINGH R P. A Nonintrusive Flow Measurement Technique to Validate the Simulated Laminar Fluid Flow in a Packed Container with Vented Walls[J]. International Journal of Refrigeration, 2008, 31(2): 242—255.
- [18] DEHGHANNYA J, NGADI M, VIGNEAULT C. Simultaneous Aerodynamic and Thermal Analysis During Cooling of Stacked Spheres Inside Ventilated Packages[J]. Chem Eng Technol, 2008, 31(11): 1651—1659.
- [19] 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.
- WANG Qiang, CHEN Huan-xin, DONG De-fa, et al. Numerical Analysis and Experimental Verification of Pressure Pre-cooling of Golden Pears[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(8): 262—266.
- [20] 李帅. 类圆柱形果蔬差压预冷实验研究及模拟仿真[D]. 天津: 天津商业大学, 2012.
- LI Shuai. The Study of Processing of Cylindrical Fruit and Vegetable Forced-Air Pre-Cooling[D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2012.
- [21] 刘峻, 黄健, 邹同华. 差压遇冷系统流体网络模型及其流动特性的求解[J]. 食品研究与开发, 2006, 27(3): 183—186.
- LIU Jun, HUANG Jian, ZOU Tong-hua. Mathematic Model of Fluid Network is Established and Solved in Pressure-Difference pre-cooling System[J]. Food Research and Development, 2006, 27(3): 183—186.
- [22] 吴志勇, 毕德纯. 果蔬箱群压差预冷流体网络模型构建[J]. 广东农业科学, 2011, 38(6): 194—196.
- WU Zhi-yong, BI De-chun. Fluid Network Model of Pressure-difference Pre-cooling System on Fruit and Vegetable 'packing Boxes[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2011, 38(6): 194—196.
- [23] 刘斌, 郭亚丽, 邹同华. 强制通风预冷风速选择研究[J]. 食品科学, 2004, 25(7): 181—183.
- LIU Bin, GUO Ya-li, ZOU Tong-hua. Study on Selection of Supplying Air Velocity of the Forced-air Pre-Cooling[J]. Food Science, 2004, 25(7): 181—183.
- [24] 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 Wei-feng, YANG Jing. Study on Cooling Uniformity of Fruits and Vegetables in Pressure Pre-cooling[J]. Refrigeration, 2011, 32(5): 75—78.
- [25] FERRUA M J, SINGH R P. Design Guidelines for the Forced-air Cooling Process of Strawberries[J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 32(8): 1932—1943.
- [26] 孟志锋, 沈五雄, 向红, 等. 小型包装箱内龙眼果实预冷过程数值模拟研究[J]. 食品科学, 2010(12): 288—292.
- MENG Zhi-feng, SHENG Wu-xiong, XIANG Hong, et al. Numerical Simulation of Pre-cooling Process of Longan in Small Packing Box[J]. Food Science, 2010(12): 288—292.
- [27] 刘凤珍. 草莓差压通风预冷过程中影响参数的研究[J]. 制冷学报, 2001(4): 49—53.
- LIU Feng-zhen. Study of Parameters Affecting Cooling Rate in Forced-air Precooling of Strawberry[J]. Refrigeration, 2001(4): 49—53.
- [28] FERRUA M J, SINGH R P. Modeling the Forced-air Cooling Process of Fresh Strawberry Packages. Part I: Numerical Model[J]. Int J Refrigeration, 2009, 32(2): 335—348.
- [29] HAN J, PARK J M. Finite Element Analysis of Vent/Hand Hole Designs for Corrugated Fiberboard Boxes[J]. Packaging Technology and Science, 2007, 20(1): 39—47.
- [30] SINGH J, OLSEN E, SINGH S, et al. The Effect of Ventilation and Hand Holes on Loss of Compression Strength in Corrugated Boxes[J]. Journal of Applied Packaging Research, 2008, 2(4): 227—238.
- [31] 刘学亭, 张从菊, 董德发, 等. 果蔬差压预冷包装箱开孔大小的选择[J]. 节能技术, 2008, 26(3): 213—214, 250.
- LIU Xue-ting, ZAHNG Cong-ju, DONG De-fa, et al. Choice of Vent Hole Size of Fruit and Vegetable Canton in Pressure Pre-cooling[J]. Energy Conservation Technology, 2008, 26(3): 213—214, 250.
- [32] ANDERSON B, SARKAR A, THOMPSON J, et al. Commercial-scale Forced-air Cooling of Packaged Strawberries[J]. Transactions of ASAE, 2004, 47(1): 183—190.
- [33] 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.
- [34] 李帅, 申江, 李超. 结球甘蓝差压预冷周转箱开孔方式研究[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(35): 21772—21774.
- LI Shuai, SHEN Jiang, LI Chao. Experimental Study on the Different Opening Ways of Differential Pressure Precooling

- Turnover Box for Common Head Cabbage[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39(35): 21772—21774.
- [35] LADANIYA M, SINGH S. Influence of Ventilation and Stacking Pattern of Corrugated Fibre Board Containers on Forced-Air Precooling of 'Nagpur' Mandarins[J]. Journal of Food Science and Technology-Mysore, 2000, 37(3): 233—237.
- [36] DE CASTRO L R, VIGNEAULT C, CORTEZ L A B. Container Opening Design for Horticultural Produce Cooling Efficiency[J]. Journal of Food, Agriculture and Environment, 2004, 2(1): 135—140.
- [37] DE CASTRO L R, VIGNEAULT C, CORTEZ L A B. Effect of Container Openings and Airflow on Energy Required for Forced Air Cooling of Horticultural Produce[J]. Canadian Biosystems Engineering, 2005, 47: 1—9.
- [38] 董德发. 果蔬差压通风预冷理论与实验研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2008.
- DONG De-fa. Theoretical and Experimental Study on Pressure Precooling of Fruits and Vegetables[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2008.
- [39] FERRUA M J, SINGH R P. Improved Airflow Method and Packaging System for Forced-air Cooling of Strawberries[J]. International Journal of Refrigeration, 2011, 34(4): 1162—1173.
- [40] 李超. 不同容积开孔率对果蔬差压预冷效果影响的研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2011.
- LI Chao. The Study of the Influence on Different Volume Opening Rate to the Effect of Fruits and Vegetables Pressure Pre-cooling[D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2011.
- [41] De CASTRO L R, VIGNEAULT C, CORTEZ L A B. Cooling Performance of Horticultural Produce in Containers with Peripheral Openings[J]. Postharvest Biology and Technology, 2005, 38(3): 254—261.
- [42] OPARA L U, ZOU Q. Sensitivity Analysis of a CFD Modeling System for Airflow and Heat Transfer of Fresh Food Packaging: Inlet Air Flow Velocity and Inside-package Configurations[J]. International Journal of Food Engineering, 2007, 3(5): 1263.
- [43] DEGHANNYA J, NGADI M, VIGNEAULT C. Transport Phenomena Modelling During Produce Cooling for Optimal Package Design: Thermal Sensitivity Analysis[J]. Biosystems Engineering, 2012, 111(3): 315—324.
- [44] 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 Jing-hui, LIU Bin, WANG Yan-hong, et al. Numeral Study and Experimental Verification of Vent-Hole Type of External Cover on Differential Pressure Cooling[J]. Refrigeration, 2011, 32(1): 51—57.
- [45] 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 Tian-ji, GUO Ya-li, YU Ben-nong, et al. Experimental Study on the Pressure-difference Pre-cooling of Tomatoes in Cartons[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2001, 17(5): 105—107.
- [46] FERRUA M J, SINGH R P. Improved Airflow Method and Packaging System for Forced-air Cooling of Strawberries[J]. International Journal of Refrigeration, 2011, 34(4): 1162—1173.
- [47] 杨洲, 陈朝海, 段洁丽, 等. 荔枝压差预冷包装箱内气流场模拟与试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(S1): 215—217.
- YANG Zhou, CHEN Chao-hai, DUAN Jie-li, et al. Simulation and Experiment of Airflow Field in Cartons of Pressure-Difference Pre-cooling for Litchi[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(S1): 215—217.
- [48] 孙诚. 包装结构设计[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2008.
- SUN Cheng. Packaging Structure Design[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2008.
- [49] 成世杰. 欧洲果蔬运输瓦楞纸箱 CF 标准试解[J]. 印刷技术, 2010(10): 43—44.
- CHWNG Shi-jie. The Introduction of Common Footprint Standard[J]. Printing Technology, 2010(10): 43—44.
- [50] FERRUA M J, SINGH R P. Modelling Airflow Through Vented Packages Containing Horticultural Products[M]. Florida: CRC, 2007.

(上接第123页)

- [16] 黄敏, 刘浩学, 廖宁放. 基于匀色色块的色差主、客观评价[J]. 包装工程, 2007, 28(2): 69—74.
- HUANG Ming, LIU Hao-xue, LIAO Ning-fang. Subjective and Objective Evaluation of Color Difference Based on Uniform Color Patches[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(2): 69—74.
- [17] 刘浩学, 朱明, 黄敏. 从特性文件分析 ICC 色域映射机制[J]. 中国印刷与包装研究, 2010, 2(1): 14—19.
- LIU Hao-xue, ZHU Ming, HUANG Ming. Analysis of the ICC Color Gamut Mapping Mechanism From the Properties File[J]. Chinese Printing and Packaging Research, 2010, 2(1): 14—19.
- [18] 王志豪. 数码打样色彩控制技术的研究与实现[D]. 南京: 南京林业大学, 2011.
- WANG Zhi-hao. The Research and Implementation of Digital Proofing Color Control Technology[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2011.