

草莓保鲜运输中强制通风预冷与温度分布的相关性

Study on correlation between forced ventilation precooling and temperature distribution of strawberry in fresh-keeping transportation

程丽丽

CHENG Li-li

(山西交通职业技术学院, 山西 太原 030031)

(Shanxi Traffic Vocational and Technical College, Taiyuan, Shanxi 030031, China)

摘要:通过分析草莓在商用保鲜运输期间的温度分布,研究了量化环境和产品温度之间的关系,并评估预冷却持续时间。研究表明,预冷通道内部的半冷却时间(HCT)约为外部的 2 倍,通道外部的 HCT 与内部的 HCT 密切相关。通过传感器进行温度检测,预冷却结束时的温度差异高达 7 °C,表明在某些情况下应延长预冷时间以提高冷却温度的均匀性。

关键词:生鲜食品;保鲜;预冷;温度

Abstract: Studied the temperature distribution of strawberry during commercial forced air pre-cooling, quantifies the relationship between environment and product temperature, and evaluated the pre-cooling duration. Results: the half-cooling time (HCT) inside the pre-cooled tunnel was about twice the external semi-cooling time, and the HCT outside the tunnel was closely related to the internal HCT. The temperature prediction from a limited number of sensors detected a temperature change of up to 7 °C at the end of pre-cooling, indicating that in some cases the pre-cooling time should be extended to increase the uniformity of the cooling temperature.

Keywords: fresh food; preservation; pre-cooling; temperature

预冷是生鲜食品完成加工后进行冷链运输的第一步,同时也是最关键的一步^[1]。温度是影响生鲜食品质量和安全性的最重要因素,预冷至最低安全温度可延长食品的保质期,最大限度地减少新鲜农产品的呼吸活动和相关热量的产生,防止常见病原体滋生^[2-5]。草莓在

收获时已经成熟或接近成熟,必须在短期内预冷、运输及销售^[6-8]。强制空气预冷是在收获水果蔬菜等生鲜食品后最常用的保鲜运输方法^[9]。根据食品、包装和操作条件的不同,强制空气预冷速度大约是室温冷却速度的 5~10 倍^[10]。然而,使所有食品在预冷后达到同一温度是一个重大挑战。例如,运输前单个冷藏拖车托盘之间的温度差异为 2 °C,在运输过程中,这一温度差异增加为 5.8 °C^[8]。导致这种不均匀预冷的原因比较复杂,通常由于收获和运输条件的不同,预冷开始时,与朝向风机的食物相比,外侧面向进入空气的食物冷却更快,导致托盘周围空气的温度不均匀;同时由于设计不当使气流受阻也是导致不均匀预冷的原因^[11-12]。

改善措施包括评估预冷设施内的产品和周围空气的温度分布,对温度条件的评估可以预知预冷期间和预冷之后的不均匀程度,提前识别冷却室内的冷暖区域,并可用于验证不同的温度预测模型。在目前的文献中,可以找到一些关于冷却通道中温度分布的试验研究^[13-15],该通道由一个托盘或几个托盘或容器组成,然而在初始温度均匀的实验室级冷却通道上进行的测量与在大型商业设施进行的测量有很大的偏差。与实验室的冷却通道中平行于气流的侧壁相比,托盘中心的预冷速度更快。在实际生产中,由于温度和气流的不均匀性、频繁的开关门,人员和铲车在设施内的移动以及托盘运输过程中的温度不均匀,都会对实际结果造成重大影响。因此,商用强制空气预冷是一个高度动态和复杂的过程,需要对托盘、通道、冷却室和周围环境条件之间的相互作用进行研究。试验拟对工业条件下强制空气预冷过程中的初始温度分布、冷却通道内不同位置的温度变化、适当的预冷时间以及不同位置的温度关系进行量化研究,评估预冷持

作者简介:程丽丽(1981—),女,山西交通职业技术学院讲师,硕士。E-mail:381596177@qq.com

收稿日期:2019-12-20

续时间,以期为生鲜食品保鲜商用运输期间的温度分布研究提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

草莓:上海托特食品储备与加工公司,并于该公司大型仓储内完成该模拟试验项目;

图 1 为用于试验的草莓盒(0.220 m×0.100 m×

0.080 m)、包装盒(0.495 m×0.394 m×0.070 m)和波纹托盘(1.500 m×1.000 m×2.500 m)。每个包装盒中放置有 8 个 0.454 kg 盒装草莓。这些包装盒堆叠在一起,置于托盘上,每个托盘放置 18 层或 19 层包装盒。所有温度测量均采用 USB 数据记录器(测量精度±0.5 ℃),记录器配备有外部探针,其尖头能够穿透食物并测量食物中心的温度,以 1 min 的采样间隔记录温度。

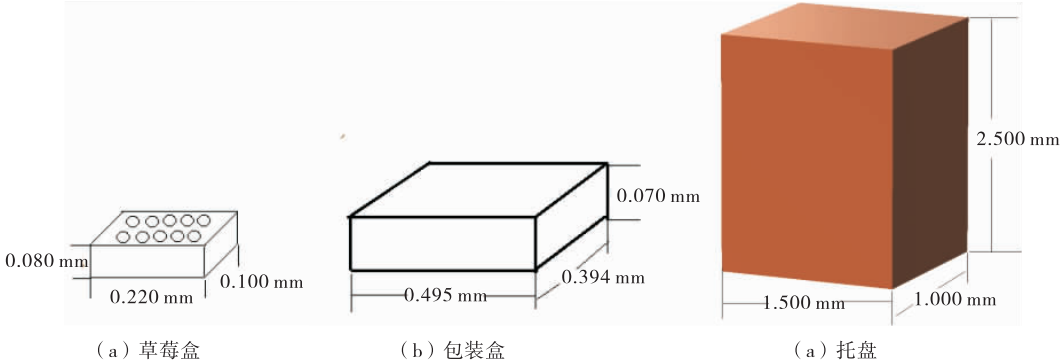


图 1 试验中的草莓盒、包装盒和托盘示意图

Figure 1 Boxed strawberries, boxes and trays in the trial

1.2 预冷设备

在设有多个冷却通道的冷却室内进行强制空气预冷,冷却通道由平行排列的托盘组成,两排托盘之间的空间由防水布覆盖(见图 2)。风机将室内空气吸入通风室,通过管道将空气喷射回房间,从而在托盘的内部通道侧产生较低的压力,压力差迫使冷空气通过托盘内部流动。冷却室温度控制系统的目标温度设定为 0 ℃。强制空气预冷设施由两个连接的冷却室组成,每个冷却室包含 3 个冷却通道。右边的冷却室有一个滑动门,托盘通过滑动门进出外部装卸平台。在冷却通道运行期间,滑动门通常是关闭的。两个冷却室由一个条形门隔开。每个冷却室的长度、宽度和高度为 13.4 m×9.2 m×3.0 m。两排货盘之间的通道宽度和相邻冷却通道之间的距离约为 1 m。

1.3 传感器的位置

半冷却时间(half cooling time, HCT)是通过计算通

道内每个位置的测量温度得到的^[16-17]。在预冷开始之前,将带有温度传感器探头的数据记录器放置在通道内。在冷却通道左侧 3 个托盘的中间点安装了 6 个温度记录器,以测量通道内外表面附近的水果温度。另外两个数据记录器连接到中间托盘的内外表面,以测量空气温度。在图 2 中,将一个记录器插入距离风机最近的托盘中部的草莓中心,第二个记录器插入到距离风机最远的托盘中部的草莓中心。测量环境温度的记录器放置在每行中间,悬挂测量空气温度,探头离托盘表面 0.5~1.0 cm。

2 结果和讨论

2.1 预冷温度的时间控制

食品在预冷开始时的温度受室外温度、预冷延迟以及延迟期间的储存和运输条件等的影响。产品初始温度的差异很大,因此有必要调整每批产品的预冷时间,对于

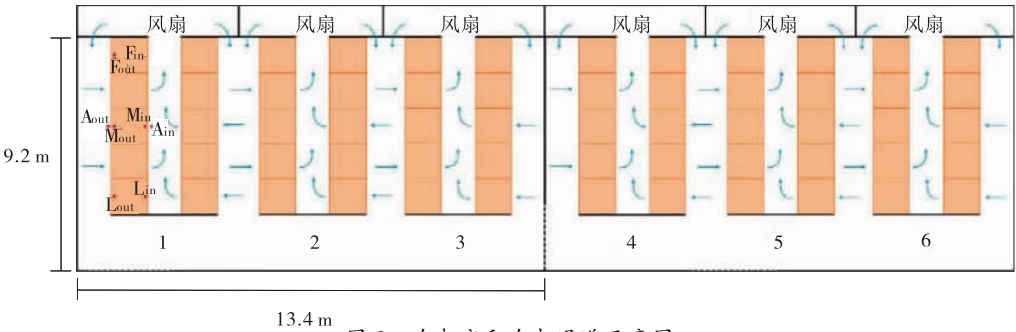


图 2 冷却室和冷却通道示意图

Figure 2 Schematic for cooling chamber and cooling channel

初始温度较低的批次,应避免过多的预冷时间,以降低冻伤风险和降低能源消耗,而对于初始温度较高的批次,则需要足够长的预冷时间^[18]。

在同一批草莓中观察到温度存在显著变化,如在对6号通道进行预冷时,观察到最高温度和最低温度草莓之间的温度差异高达8.1℃,可能是在预冷开始时,同一托盘两侧的温度差异显著,例如,面对进入空气的中间托盘中的草莓比2号通道的相对侧的草莓温度高6.2℃。托盘的一侧受到灯照辐射的影响而升温。草莓达到所需温度范围的预冷时间取决于预冷开始时的热稳定性。

2.2 预冷过程的温度变化

根据在实验室冷却通道测量的结果发现,面对进入空气一侧温度的下降速度比面对风机一侧的更快,当空气流过托盘时,与草莓交换热量,空气温度升高。因此,对流换热的驱动力,即草莓表面的空气温度与果肉温度之间的差,在面对进入空气一侧进行预冷时的温差比靠近风机一侧预冷时的高。由于驱动力更大,迎面进入空气一侧的温度降低更多。因此,面对进入空气一侧的草莓的HCT平均在25~30 min,比风机附近一侧的草莓的HCT显著缩短(图3)。随着预冷过程中朝向进风侧的草莓温度的降低,空气在流经托盘时不会变热,在朝向风机侧的预冷后段,热传递的驱动力变大^[19]。

在通道中沿托盘一排的草莓HCT之间未观察到显著差异(图3)。在两排货盘之间通道宽度过窄的情况下,风机附近托盘的气流可能更高。同一排托盘上的HCT无显著差异,表明通道非常宽,强制空气预冷主要是由从冷却室到通道的气流驱动,而不是从通道后部到前部。第一条通道测得的平均HCT(39.2 min)与第二条通道的(40.6 min)相似,表明两条通道的冷却性能相当。然而,这两个通道彼此相邻,并且距离较大,对于商业设施中通道间预冷温度的变化则需要额外的全面评估。

对于环境温度为0℃的冷却室,将草莓温度从20℃降低到10℃所需的时间与将温度从10℃降低到5℃所需的时间相似。这种性质表明温度下降遵循一阶动力学,

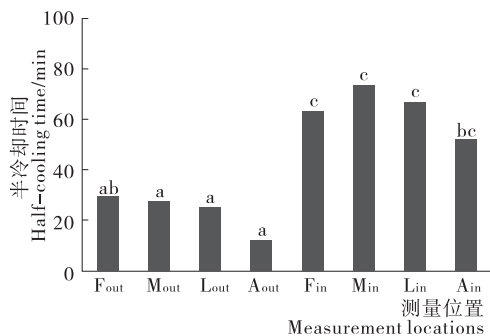


图3 不同测量位置的半冷却时间

Figure 3 HCT for different measurement locations

符合指数衰减的规律^[20]。一阶动力学还表明,非线性现象,如托盘和冷却室之间的辐射能量交换,以及托盘周围和内部空气速度的不均匀性,不足以造成系统的偏差。

2.3 最佳预冷时间

如前所述,收获生鲜产品时温度的异性非常显著,预冷是减少这种异质性、保证食品质量的首要操作环节,可以大大提升并简化后续的库存管理。预冷时间应足够长,以便通道内每个位置的食物达到所需的温度范围。预冷后草莓温度的异质性在随后的配送过程中可能还会增加,因为运输系统的制冷能力和空气流量不足,而理想运输系统的设计只能维持最适宜的温度。然而,在大量采购的季节,食品的进料量大于冷却设施的容量时,有必要缩短冷却过程以减少后续批次预冷的延迟。

此外,由强制空气预冷引起的后果是造成草莓等易损伤产品的冻伤,因此,有效的强制空气预冷要选择合适的预冷时间和温度,并设计一个良好的冷却室,保持均匀的环境温度。为了确定何时停止预冷,通常使用的方法是监测通道最热区域(朝向风机的一侧)的食品温度,同时监测最冷位置(朝向进入空气的一侧)的食品温度,以避免冻结产品。测量结果表明,利用通道内不同位置的温度之间的相关性,可以确定适当的预冷时间。表1给出了试验中各个位置的HCT之间的相关性系数。面对进入空气(F_{out}、M_{out}和L_{out})一侧的托盘温度变化不显著。这种相关性的缺失可以解释为冷却室内的局部冷暖空气流,影响了朝向进入空气的通道一侧特定位置的冷却速度。然而,在M位置测得的HCT与朝向风机一侧(F_{in}、M_{in}和L_{in})附近的草莓的HCT显著相关^[21]。通道F_{in}-M_{in}-L_{in}-M_{out}区域内存在多个显著相关性,并通过7次预冷试验计算,有力地证明通道内不同位置的HCT是相关的,因此可以使用预测法估计。图4为7次预冷试验中M_{in}和M_{out}位置处测得的HCT。HCT遵循线性模式,如果在预冷过程中测量在M_{out}位置温度,可以将其转换为数学模型,用于预测M_{in}位置的HCT。通道内的温度可以通过有限数量的温度传感器进行预测,并可以实时改进,以适应对预冷却时间的选择。

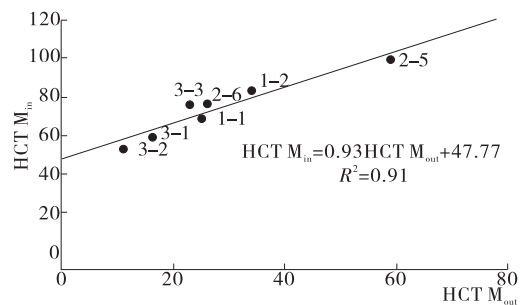


图4 M_{in}和M_{out}测量位置的半冷却时间

Figure 4 HCT for M_{in} and M_{out} locations

表 1 温度测量位置的半冷却时间 HCT 相关系数[†]
Table 1 HCT correlation coefficient of temperature measurement position

位置	F _{out}	M _{out}	L _{out}	A _{out}	F _{in}	M _{in}	L _{in}	A _{in}
F _{out}	1.000							
M _{out}	0.331	1.000						
L _{out}	-0.090	0.432	1.000					
A _{out}	0.496	0.903 *	0.614	1.000				
F _{in}	0.600	0.821 *	0.342	0.834 *	1.000			
M _{in}	0.437	0.953 *	0.190	0.813 *	0.737 *	1.000		
L _{in}	-0.053	0.768 *	0.144	0.592	0.320	0.801 *	1.000	
A _{in}	-0.390	0.252	0.812 *	0.270	-0.020	0.108	0.142	1.000

[†] * 表示显著(P=0.05)。

3 结论

预冷通道内部的半冷却时间约为外部的 2 倍,通道外部的 HCT 与内部的 HCT 密切相关。使用传感器进行温度预测,预冷却结束时检测到 7℃ 的温度变化,表明在某些情况下应该延长预冷时间以提高冷却温度的均匀性。强制空气预冷期间产品温度的降低呈指数下降,在面向空气的托盘侧比靠近风机的一侧预冷更快。但是,沿着通道中的托盘没有观察到温度的明显差异;通道内不同位置的 HCT 之间的相关性很大,包括面向进入空气一侧中间的 HCT 和面向风机一侧附近的 HCT,可以合理地调整每批食品的预冷却持续时间。该模型可用于改进冷却室的设计,操作条件和控制系统,以及研究适当预冷持续时间的问题。试验拟研究工业条件下强制空气预冷过程中的温度初始分布、冷却通道内不同位置的温度变化、适当的预冷时间以及不同位置的温度关系进行量化研究,并评估预冷却持续时间,以期为生鲜食品保鲜商用运输期间的温度分布研究提供理论支持。

参考文献

[1] 朱文颖,史策,韩帅,等. 基于 CFD 的苹果隔板包装预冷温度场研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 338-345.
[2] 申江,张川,刘升,等. 多功能果蔬保鲜装置的研制及大白菜真空预冷实验[J]. 制冷学报, 2017(1): 11-15.
[3] 杨松夏,吕恩利,朱立学,等. 模拟运输条件下保鲜模式对菜心品质的影响[J]. 食品与机械, 2018, 34(3): 127-131.
[4] 陈皓琪. 我国生鲜食品冷链物流发展现状与思考[J]. 现代食品, 2018(8): 186-188.
[5] 肖蕾,蓝蔚青,孙晓红,等. 金枪鱼常用保鲜方式及品质检测技术研究进展[J]. 包装工程, 2017(5): 125-130.
[6] 杨艳芬. 预冷对气调包装樱桃保鲜效果的研究[J]. 江苏科技信息, 2017(19): 43-45.
[7] 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.
[8] 王利斌,林晨,罗海波,等. 预冷时机对四季豆和豇豆品质和生理生化特性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(9): 232-238.
[9] 刘恩海,石卫光,潘嘉信. 不同蔬菜真空预冷效果对比及鲜切生姜预冷保鲜试验研究[J]. 食品科技, 2017(7): 44-49.
[10] 吕凤艳,王亮,郭衍银,等. O₂/CO₂ 气调对西兰花保鲜的后续效应[J]. 食品科学, 2017(21): 248-251.
[11] 严灿,刘升,贾丽娥,等. 蔬菜冷链物流技术研究进展[J]. 食品与机械, 2015, 31(4): 260-265.
[12] 昌玥,范佳雯,卢文静,等. 猕猴桃减振包装在模拟运输中的使用效果[J]. 保鲜与加工, 2017(5): 20-25.
[13] 张新,张继明,李喜宏,等. 模拟果蔬余热制冷控温库的设计与性能研究[J]. 食品工业, 2017(7): 193-197.
[14] 高雅,陈玉成,王琛,等. 包装与运输方式对低温贮藏番茄货架期品质的影响[J]. 北方园艺, 2017(23): 176-182.
[15] 姜洋,高悦明,丁秋雷. 苹果快递运输中的保鲜瓦楞纸箱研究[J]. 包装工程, 2018, 39(23): 51-55.
[16] 付焕森,王郭全,夏华凤,等. 农产品保鲜冷库的 PLC 控制与关键技术研究[J]. 江苏农业科学, 2017(18): 155-162.
[17] 冯琪,刘清倦,杨杰,等. 强制通风温度传感器计算流体动力学设计与分析[J]. 仪表技术与传感器, 2017(11): 20-23, 32.
[18] 杨慧,毛维林,赵守焕,等. 冰温结合开孔调湿包装对香椿嫩芽的保鲜效应[J]. 食品与机械, 2017, 33(9): 127-131, 146.
[19] 韩冬梅,朱春宇,郑伊琪,等. 低温预冷对常温 SO₂ 保鲜纸处理龙眼果温和质量损失的影响[J]. 广东农业科学, 2018, 45(9): 44-53.
[20] 郭嘉明,魏鑫钰,杜县南,等. 基于传热传质的荔枝预冷果温和质量损失率预测[J]. 农业机械学报, 2019, 50(3): 330-336.
[21] 叶佳琪,李露,薛淑静,等. 不同温度预冷处理对冻藏豆皮品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(5): 192-197.