

食品真空冷却技术研究进展

宋晓燕, 刘宝林*

(上海理工大学低温生物与食品冷冻研究所, 上海 200093)

摘要: 真空冷却是一种快速、清洁的食品冷却技术, 已经被广泛地应用于蔬菜、水果、焙烤食品、黏性食品、海鲜、小块熟肉以及切花的冷处理。然而, 与传统的冷却方式(例如风冷和水冷等)相比, 真空冷却却有失重率大和初投资大等缺点。随着社会的快速发展, 人们对食品的质量安全要求越来越高。真空冷却技术作为最具潜力的高温食品快速冷却技术之一, 在食品安全方面扮演的角色越来越重要。为促进真空冷却技术的进一步研究, 本文综述了国内外近些年来部分研究成果。

关键词: 食品科学; 预冷技术; 真空冷却; 传热传质; 失水率

Recent Advances in Vacuum Cooling Technology for Food Processing

SONG Xiao-yan, LIU Bao-lin*

(Institute of Cryobiology and Food Freezing, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Vacuum cooling is a clean and rapid technology for cooling the porous and moist foods, and has been widely applied to vegetables, fruits, bakery food, viscous foods, fishery products, minced meat and cut flowers. However, it has a number of inherent limitations (e.g. high weight loss and big initial cost) compared to traditional cooling methods such as air-blast cooling, hydrocooling and so on, which have not yet been solved thoroughly. With the rapid development of the modern society, higher standards related to food safety are required by consumers. The role played by the vacuum cooling technology in the food safety field is becoming more and more important, because it is the best alternative method for rapid cooling hot food. With the aim of promoting further study on vacuum cooling, this paper reviews recently published literature regarding this technology and puts forward some suggestions.

Key words: food science; pre-cooling technology; vacuum cooling; heat and mass transfer; weight loss

中图分类号: TS205.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2014)11-0319-06

doi:10.7506/spkx1002-6630-201411062

温度是影响食品质量安全最重要的参数之一。例如, 在41~46℃之间, 肉类产品中的病原性产芽孢厌氧菌微生物会快速繁殖产生毒素^[1]。而果蔬等新鲜农业产品, 在它们采摘的时候品质就开始衰败, 只有及时采取降温措施才能得到缓解。为了尽快将食品冷却到安全的温度范围内, 美国、英国和爱尔兰等国均对食品的冷却时间提出了严格的规定。尤其是对于西方国家的主要饮食之一——熟肉的冷却提出了特殊的规定。例如, 美国农业部(United States Department of Agriculture, USDA)建议将未腌制的熟肉从54.4℃冷却到4℃的最长时间为300 min^[2]。而对于大块的熟肉, 使用风冷、冷库降温以及水冷等传统方法根本无法实现, 因此, 寻找新型冷却技术成为了关键。

真空冷却是一种新型的快速冷却方法, 它主要是依

靠蒸发水分来获取冷量。真空冷却中的食品不仅温度分布均匀, 而且降温很快。之前的研究表明, 真空冷却不仅仅适用于生菜、蘑菇、卷心菜、菠菜等蔬菜, 也适用于切花、烘焙食品、米饭、小块熟肉、水产品。后来, 茶叶蛋、豆腐、草莓、水果切片、面制品、水煮汤圆等生产商也都尝试着将真空冷却技术作为冷却替代技术之一^[3-7]。然而, 真空冷却带来的质量损失等问题却一直不能被商业上接受, 大大阻碍了这项技术的全面推广。

随着食品行业生产力的快速提高以及高质量食品需求的急速增加, 许多科学家和相关专业人员都希望尽快找到一种失重小、降温更快且食品品质更高的新型真空冷却工艺。为此, 本文综述了国内外近些年来在真空冷却方面的部分研究成果, 并对今后的发展提出一些见解。

收稿日期: 2013-07-19

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2013BAD19B00); 东方学者跟踪计划项目

作者简介: 宋晓燕(1985—), 男, 讲师, 博士, 研究方向为食品冷藏保鲜。E-mail: xishi.rujin@163.com

*通信作者: 刘宝林(1968—), 男, 教授, 博士, 研究方向为食品科学。E-mail: bliuk@163.com

1 真空冷却原理与设备

1.1 真空冷却的原理

真空冷却是通过制造低压环境强迫水分从食品表面和内部快速蒸发以获取冷量的一种快速制冷技术^[8]。标准的真空冷却过程为：1) 把食品放进真空室，关上真空门并开启真空泵；2) 当压力达到与食品初始温度对应的饱和压力时（“闪点”），水分开始快速蒸发，并吸收大量热量使得食品迅速被冷却。“闪点”之前的制冷量很小，通常被忽略；3) 当真空室压力降到终压并维持一段时间之后，食品的最高温部分达到目标温度，真空冷却过程结束。

1.2 真空冷却设备

真空冷却设备的核心部件是真空室和真空泵。由于水分蒸发时的比体积会剧增，还须配备水汽凝结器将水蒸气从真空室及时除去。必要时，也会在真空室上安装喷水装置和渗气装置。对于鱼香肉丝等熟食快餐的快速冷却，必须安装油过滤装置和易更换的快速清洗装置，必要时可以考虑安装紫外线杀菌装置。

2 真空冷却优缺点

2.1 真空冷却的优点

真空冷却的最大优点是降温速度极快。例如，将6 kg的火腿从70℃降到4℃只需要2 h，而风冷却要9.4 h。因此，它给食品加工行业带来很多好处，例如缩短食品的滞留时间、增加生产能力、节能、减小冷却设备的占地面积以及提高卫生标准等。真空冷却的另一个优点是降温均匀，即便是一堆食品在一起真空冷却，任何部位的降温速率都基本相同。这对食品加工也有好处。例如，真空冷却后的面包要比其他方法冷却过的面包的结构好，收缩和塌陷现象明显减少。因为真空冷却过程中食品不受强空气流的冲击，无论怎么放置都不会影响食品的冷却效果，所以减小了很多劳动量，同时也避免了很多不必要的机械损伤。

尽管真空冷却的初投资比较大，但是用电能效比较低。Thompson等^[9]比较了真空冷却、水冷、风冷以及喷水后真空冷却的用电能效比（冷却负荷与用电量之比）。结果是真空冷却最好（为1.8），其次是水冷（1.4），接着是喷水后真空冷却（1.1），最后是风冷（0.4）。

2.2 真空冷却的缺点

高失重率一直是制约真空冷却技术推广的最主要因素之一。将蔬菜从25℃降到4℃的失重大约3%，而将刚加工好的熟肉从75℃冷却到4℃则会失重10%左右。此外，真空冷却设备的初投资较大，对于小型的加工作坊是一笔不小的开支。因此，国外有专门的机构租赁真空冷却机或者几个加工作坊共用一套设备，以降低生产成本。

真空冷却食品获得的温度均匀性仅仅是相对于传统方法而言，并非绝对均匀。例如，真空冷却叶类蔬菜和切花时，单支蔬菜或者切花的表面温度分布是不均匀的，而且呈现出明显的规律，如果操作不当，会使得叶子局部枯萎严重，甚至冻伤，严重影响销售时的品相^[10-11]。对于面包，如果真空冷却时因操作上的不慎而造成面包壳和面包心的温差多大，会导致水分在真空冷却结束的时候聚集在外壳或者包装材料上，缩短面包壳的寿命。如果对熟肉不加措施直接真空冷却，它会变硬而且降低多汁性。

3 真空冷却前的准备工作

3.1 待处理样品的挑选

食品的品质状态和外形特征有时对真空冷却效果也有很大的影响。因此，在真空冷却前需要对食品做认真地筛选。例如，对于原先有局部缺陷的蘑菇，真空冷却会加速蘑菇盖的酶性褐变^[12]。局部破损严重的叶类蔬菜经真空冷却后会被冻伤^[13]。而真空冷却尺寸过大的整块肉时，不仅失重过大而且处理时间过长。

3.2 包装

将要真空冷却的食品既可以装在箱子里也可以分开摆放，既可以直接处理也可以采用薄膜外包。但是，箱子和薄膜都必须均匀地打上足够数量的孔。而且，在用薄膜捆包芹菜、莴苣等蔬菜时，不能捆得太紧。在对汤汁类食品真空冷却的时候，在容器上面加一层纱布或者微孔金属丝网较好。也有研究对冬枣、黄瓜和苹果等原本不适合于真空冷却的食品采用了吸附膜包裹的方法，但是效果并不是特别明显，而且工作量比较大。

3.3 样品的装载

不同的产品对装载率的要求差别较大。例如，对于月季切花而言，以50枝为一簇真空冷却后的失重最小、寿命最长^[14]。而对于非洲菊切花，单枝花要比一束花的冷却效果好^[15]。

4 真空冷却的改进方案

4.1 预冷前补水

因为增加食品内部或者表面的水分均可以减小食品的失重率，很多研究均从此角度改进现有真空冷却技术。例如，在真空冷却黏性食品之前，按照一定比例加入纯水，不仅不用担心失重现象，也不用担心其他组分的浓度等问题。在预冷前或者预冷中对果蔬均匀洒水，不仅可以减小失重，还可以加快冷却速率、提高温度的均匀性。此方法对熟肉也非常有效，尤其是小块的熟肉，可以大大减小失重。

4.2 预冷前注射盐水

此法主要用于真空冷却熟肉的前处理, 目的在于增加其吸水能力和减小失重。一些研究证明, 随着生肉中盐水注射量(20%~45%)的增加, 失重率不断减小, 甚至获得的产品质量比原先的生肉质量还大^[16]。同时, 增加注射量还可以使肉更软、增加多汁性以及使颜色变浅, 这对于肉的品质十分有利, 但也会导致肉的味道太咸。

4.3 预冷前用传统冷却方法处理

Jackman等^[17]研究了真空冷却前风冷预处理对熟肉真空冷却效果的影响。结果证明, 先将熟肉用风冷冷却到35℃, 然后再真空冷却到4℃, 可以使失重率最小(6.5%), 远小于单独使用真空冷时的失重(10%~11%), 因为真空冷却的失重主要发生在中高温阶段(大于15℃)。此法也可以用于昂贵而且适合于真空冷却的食品, 例如盘装鳕鱼片。

4.4 将食品放在热加工液体中真空冷却

无论肉块大小, 在汤剂中真空冷却后的失重均比单独使用真空冷却有所减少, 有时质量反而有所增加。都柏林大学的食物制冷和计算机食品技术研究组将大块猪肉火腿和牛肉块分别与煮肉时所用的部分汤汁在一起真空冷却。结果表明平均失重仅为6.99%, 相当于单独对肉真空冷却后失重的一半^[18]。Houska等^[19]将不同类型的小块熟牛肉片放在不同的汤中真空冷却到5℃。结果证明, 无论牛肉取自牛的哪个部位, 在汤剂中真空冷却的失重均比单独使用真空冷却时的失重小很多, 但是处理时间会有所延长。为此, Dong等^[20]先将熟猪肉单独真空冷却到25℃, 然后放在汤剂中真空冷却到10℃。结果表明, 不仅处理时间缩短, 而且含水量和咀嚼感都比单独使用真空冷却好。

对于果蔬, 可以直接将它放在冷水中真空冷却。例如, Cheng^[21]发明了竹笋的真空冷却与水冷混合冷却法, 不仅可以缩短冷却时间, 还可以减少细菌数量、获得稳定性高的良好感官指标。但是, 竹笋的半浸没式真空冷却能否适用于大规模的生产和加工还有待考证, 因为更换冷却槽中的水也是一项很繁琐的工作, 而且设备初投资比较大。

4.5 冷热加工设备一体化

通常, 在真空冷却之前, 需要把加热好(或煮熟)的食品从烹饪设备中取出, 然后放在真空冷却设备中。如果将真空冷却设备和加热装置(蒸汽加热或者水加热)一体化设计, 不仅可以省去食品的中间转移环节, 还可以降低食品接触细菌的机率, 大大提高生产效率。实验结果证明, 熟鸡胸块(180~230g)在水中加热之后直接在水中被真空冷却的失重率最小, 仅为(3.0%), 而且质地松软^[22]。然而, 如果先用蒸汽加热, 再用真空冷却的失重却非常大, 为45.8%, 在商业上无法被接受。

这一设计对于黏性食品也极有好处。因为黏性食品

容易黏附在容器壁上, 在转移热食品或者清洗加工室的时候, 需要用特殊刮刀将这些黏附食品及时清除。如果将冷热加工设备一体化设计, 不仅可以省略一套刮刀装置, 还可以省略一道刮壁程序, 增加产出率。

4.6 调节降压模式

在真空冷却烘烤类食品的时候, 一定要很准确地监测和控制压力变化速率, 以尽量减小真空冷却可能给食品的结构和体积带来的不良影响, 因为面包内部有的地方渗水性差, 容易产生相对高压, 从而导致结构塌陷或者崩裂。控制降压速率的另一个好处是降低失重率。McDonald等的研究发现, 熟肉在真空冷却中的失重随着抽气速率的降低明显减小^[23]。此外, 适当减小真空泵的容积排气量也可以起到降低失重的作用。

通常, 在真空冷却过程中真空室的压力不能有大的回升。然而, 在浸没式真空冷却的基础上, 脉动式地调节真空室内的压力却会减小火腿的失重。研究发现, 在真空冷却火腿的时候, 将真空室的压力平均的恢复到大气压4次以上可以明显降低火腿的失重率并增加火腿的柔软度^[19]。因为当压力突增时, 水分会渗入火腿的孔隙中。然而, 脉动次数也不能过多, 因为肉的细胞总是存在一个吸水上限值。

另一种比较典型的压力调节模式是多级降压。Chen等^[24]发明的多级降压工艺可以提高卷心菜心的降温速率并降低总体能耗。此外, 有研究还证明, 压力波动次数的改变对卷心菜的真空冷却效果有显著影响^[25]。

4.7 真空冷却后处理

真空冷却后的贮藏技术也对实际货架期有很大的影响。例如, 对于水仙花, 真空冷却后先在2℃下贮藏7d, 再放在19~20℃的水中贮藏的保质期最长^[26]。真空冷却后的豆腐和火龙果切片均在4℃环境下保存的时间最长^[6-7]。

4.8 真空冷却的节能技术

目前, 针对真空冷却机的节能技术研究的还非常少。但是有学者认为, 利用烟囱中的废弃烟气作为动力驱动泵系统来真空冷却小型鱼类或者虾等甲壳类动物^[27], 不仅能够节约能源, 还可以弥补真空冷却海鲜时因失重而带来的经济损失。此外, 太阳能、风能是农场最为丰富的天然能源之一, 今后的真空泵可以将太阳能或者风能作为一部分驱动力。

5 真空冷却的基础理论研究

5.1 真空冷却过程中的水分蒸发驱动力

1991年, Tambunan利用蒸汽压力扩散公式(vapor pressure difference, VPD)计算了真空冷却过程中莴苣表面的水分蒸发效率, 估计值与实验值吻合较好^[28]。此文献中的压力驱动力为与莴苣表面温度对应的饱和蒸汽

压与距离莴苣表面1厘米处的压力之间的差值。而在2006年, Sun等^[29]在对熟肉真空冷却过程进行数值模拟时, 将饱和蒸汽压力乘上相对湿度作为修订系数, 取得了很好的预测效果。可见, 影响冷却效果的不仅是真空室的全压, 各组分的分压力也需要考虑在内。然而, 在达到闪点之前, 水蒸气会在其他两个因素的影响下发生迁移, 造成食品初步降温。尽管此部分降温比较慢, 但对于比较薄的叶菜而言, 此冷量也不可忽略。这两个因素为: 1) 食品表面与真空室的最大水蒸气浓度差。如果真空室内有局部的超低水蒸气浓度存在, 即便是食品温度较低而且真空室总压力较高, 水分一样会不断地从食品内部蒸发。例如, 内置冷阱会迫使食品在达到终温之后继续降温; 2) 真空室内的气流扰动。一般都认为真空室的压力均匀分布, 所以, 计算时将真空室的总压力直接带入VPD公式的居多。然而, 在较大的系统中, 放气阀与真空泵接口之间存在的压力差会迫使真空室内有明显的气流扰动。一旦发生扰动, 食品表面的静压便会减小, 降低了实际终压, 导致食品进一步降温。

5.2 真空冷却过程中食品微结构的变化

Sun等^[30]对真空冷却过程中熟肉的孔隙率、孔隙尺寸以及分布做了研究。真空冷却过程中熟肉的孔隙一般在0.2~10 μm之间。随着真空冷却过程的进行, 孔的生长和水分传输速度互相促进。如果在冷却时对熟肉加以翻滚, 更能促进这些孔隙的生长。Jin等^[31]发现经真空冷却后的熟肉会发生肌肉纤维分离以及细胞间隙增大等现象, 这些都有利于水分在肉内部的快速迁移, 从而提高真空冷却速率。贺素艳等^[32]发现甘蓝在真空冷却过程中会出现内部膜系统和细胞器的损坏现象, 但是, 可以通过调节降压速率减小这一损坏程度, 并建议试用312 Pa/min。

5.3 食品真空冷却的数值模拟

在食品加工和研究领域, 数学模型可以大大促进技术的改进和发明速度。在真空冷却方面, 也有一些很成功的数值模型已经被建立起来, 并且取得了很好的预测效果。Tambunan利用VPD计算了真空冷却过程中莴苣表面的水分蒸发效率, 与实验结合后发现莴苣的表面有效蒸发率是纯水的1/4^[28]。Wang等^[33-34]建立了一个三维有限元模型去模拟和分析描述熟肉的真空冷却, 温度预测误差最大为2.5 °C, 失重预测误差仅为7.5%。Hu等^[35]利用一个CFD模型模拟了多孔食品在真空冷却过程中的温度分布和失重变化, 估计值与实验值相差很小, 尤其对于温度的预测, 与实验值最大误差为0.5 °C。Dostal等^[36]基于膜理论建立了纯水的真空冷却模型, 并提出真空冷却时的传质阻力主要在液体一侧。2006—2007年, Jin等^[37-38]利用有限差分法描述了真空冷却过程中熟肉内部的水分迁移情况, 预测值与实验值之间的温度偏差和失重偏差最大为

5 °C和4%。他们推断出蒸汽移动主要是靠压力差, 而非是液体扩散, 而且水分是先从内部到外部, 然后再到真空室内。除此之外, Jin等^[31,39]还通过模拟得出失重主要发生在早期阶段、沸腾首先发生在肉的表层等结论。Drummond等^[40]也使用有限差分法描述了浸没式真空冷却中液体和肉的不同点的温度值, 合理的预测到了冷却时间和失重, 最大表面温度预测误差为±5 °C, 最大中心温度预测误差为±2 °C。然而, 对于肉的预测值比实验值高(绝对误差0.5%~1.2%); 周围液体的失重预测值比实验值要小(最大绝对误差为4%)。Drummond等^[41]又建立了牛肉的浸没式真空冷却新模型, 预测了牛肉中心和水的温度变化趋势以及牛肉在不同压力变化方案下的失重, 预测结果与实际结果吻合非常好。Cepeda等^[42]也建立了即食食品的3D有限元冷却模型, 此模型的几何框架来自于CT扫描得到的真空模型。它不仅没有对样品形状做任何简化, 还使用了真实空气流速、真实空气相对湿度以及真实热物性参数。虽然, 此模型没有考虑即食食品在冷却过程中的内部水分迁移情况, 然而, 得出的结果却与实际值非常吻合, 而且可以将模型改进后用于预测微生物生长。

6 展望

6.1 从微观角度研究失重的基本原理

根据上述讨论可知, 失重是真空冷却最大的缺点。为了尽量减少真空冷却后的失重率, 尤其是大块肉的失重率, 研究人员尝试了很多种方法, 例如压力控制、浸没式真空冷却、真空冷却与传统冷却方法组合、生肉注射盐水等。然而, 在补偿失重的同时, 却带来了交叉污染和延长加工时间等负面问题。究其原因, 还没有形成完整系统的有关真空冷却失水的基本理论。例如, 水分在食品的内部运动究竟是怎样、真空冷却过程中食品孔隙内的水蒸气流态与外界压力之间的关系会对失重造成什么影响等众多问题还没有解决。因此, 对真空冷却过程中食品微通道内的蒸汽产生与流动过程进行模拟分析和实验验证非常有必要, 这将对设备优化和工艺优化提供最基础的参考依据。

气体是食品在热加工的时候进入的外来物。然而它却在真空冷却的时候会随着其他可挥发性气体逃逸出来。在逃逸的时候, 随着内外压力的变化, 气体的膨胀和流动必然会对食品内部的结构变化和水分迁移带来很大的影响。然而, 目前的文献中很少提及气体释放与真空冷却时间、失重以及食品结构与品质之间的关系。因此, 在今后建立熟肉真空冷却的数学模型时, 引入气体因素也许会得到更加准确的结果。

此外, 当前比较成熟的真空冷却模型大多是针对于

熟肉,而有关果蔬的却很少。这是因为蔬菜的外形特征和内部结构极其复杂,导致目前的相关数值模型过于简化。因此,将来需要从微通道理论、果蔬的微结构与果蔬的宏观外形特征等多方面综合建模,而不能简单地视为规则几何体或者均质结构。

6.2 优化现有真空冷却技术

目前,相当一部分的研究都是针对熟肉的真空冷却展开。虽然小块肉(尤其是切碎的肉块)很适合用真空冷却技术处理,却还没有一项关于大块熟肉的真空冷却技术完全被工业上接受^[43-44]。正如前面所讨论的,在冷却火腿的时候,与真空冷却相比,浸没式真空冷却的失重率更小而且质量更好。然而,浸没式真空冷却的处理时间却比真空冷却长得多。因此,如何缩短浸没式真空冷却的时间是关键。但是,在缩短时间的同时,不能仅仅局限于实验室的设备,而应该适合大规模生产,否则还是难以应用于实际生产线。

快餐已经成为当前中国所有人口高度密集区的一大餐饮特色,随之而来的食品安全问题也越来越严重。例如送外卖用的塑料袋子和塑料盒子大多不是用耐热性材料加工而成,一旦受热就会变形并释放出有毒物质。此外,外卖一般都是加工完成便开始装袋,食物没有一个冷却的过程,在袋子里的温度大都处于细菌最佳生长带之内。无论从食物毒性和细菌生长速率考虑,这种做法都极不安全。因此,政府的管理和监督部门针对外卖装袋前的冷处理成立相应的法律法规迫在眉睫。但是,在国家立法的同时,加速设计和生产适用于小批量快餐的小型真空冷却设备非常关键。遗憾的是,我国目前生产的都是大中型真空冷却机,造价比较高,很难被小商小贩所接受,推广起来也几乎不可能。对于一台真空冷却机,除了真空室外,大部分的体积被制冷机组代替,因此,要想实现小型真空冷却机的批量生产,需要对捕水器的性能和外形尺寸进一步优化设计。此外,与快餐和外卖相关的多组分真空冷却技术也需要进一步研究。

果蔬的真空冷却技术已经非常成熟,但是,还有改进的空间。比如,多级降压系统可以发展为无级变速降压系统,不仅使整个冷却过程中的压力呈现出连续的有规律变化,还能使能耗、温度分布和处理时间三者之间达到最佳配合。此外,真空系统和制冷系统的配合也应该更进一步,真正达到冷凝器温度和真空泵抽速双变频的最佳效果。

7 结语

真空冷却是一项快速的食品冷却技术,传统上用它来处理莴苣和蘑菇,从而延长它们的货架期。后来,真空冷却也被成功地用于冷却焙烤食品、调味酱、浓缩

水果、黏性食品、切花等传统方法很难冷却或者冷却效果差的农业产品,均取得了非常好的效果,也得到了工业上的大规模推广。真空冷却已被认为是快速冷却熟肉的最佳选择,然而,却存在众多问题。例如真空冷却熟肉的失重率过大,工业上难以接受。尽管可以找到补偿的办法,但会带来交叉污染、延长处理时间等问题。因此,对于熟肉的真空冷却技术还需要进一步研究和改进。快餐是一种典型的多组分产品,与真空冷却的专项性冲突,如何找到一个同时适合于众多组分的真空冷却工艺需要进行深入研究。

真空冷却虽然能带来更加均匀的温度分布,但这只是相对于传统冷却方法而言。目前真空冷却中或者真空冷却后的食品的不同部位的温度还有一定的差别。例如,面包在真空冷却时,心部和外壳的温度差有时候过大,会导致外壳的寿命缩短;叶类蔬菜,尤其是大叶子蔬菜,在真空冷却的时候叶子的不同部位温度差异很大,这会冷却后的蔬菜带来极差的销售品相。如果通过调高压力来获取均匀的温度分布,则会导致蔬菜的实际货架期远小于理想货架期;熟肉在真空冷却过程中的表层和心部的温度差会导致表层过硬,影响咀嚼感和感官,降低其商品价值。因此从微观上研究其传热传质机理非常重要,必要时应建立或改进相关数值模型,为技术的改进做引导。在建立数学模型的时候,可挥发性气体对水蒸气的传递过程的影响也应该考虑在内。

综上所述,真空冷却技术是一项非常先进而且具有很大大推广空间的技术,但也存在很多不足,需要更多的科研人员一起努力做进一步研究,使其早日实现大规模的产业化。

参考文献:

- [1] GARCÍA S, HEREDIA N. Clostridium perfringens: a dynamic foodborne pathogen[J]. Food and Bioprocess Technology, 2011, 4(4): 624-630.
- [2] USDA. Performance standards for the production of certain meat and poultry products[S]. Washington DC: Office of Federal Register, National Archives and Records Administration, 1999.
- [3] 陈颖,刘宝林,宋晓燕.荷兰豆真空预冷及其对贮藏品质的影响[J].食品科学,2013,34(6): 276-279.
- [4] 胡文娟,姚中峰,赵晶晶,等.白煮整鸡浸泡真空冷却改进技术的研究[J].食品科技,2012,37(9): 121-125.
- [5] 施冰心,宋晓燕,刘宝林.不同真空预冷终温对豆腐品质的影响[J].食品科学,2013,34(4): 226-229.
- [6] NGUYEN V L, 宋晓燕,刘宝林,等.不同终压对火龙果切片真空预冷效果的影响[J].制冷学报,2012,33(1): 74-78.
- [7] 鄂晓雪,柳建华,王融,等.真空预冷处理提高草莓与蟠桃的冷藏品质[J].上海理工大学学报,2014,36(1): 75-80.
- [8] 陈儿同,王艳,徐彬凯,等.真空冷却中失水率问题研究[J].上海理工大学学报,2009,31(1): 95-98.
- [9] THOMPSON J F, CHEN Y L. Comparative energy use of vacuum,hydro, and forced air coolers for fruits and vegetables[J].

- ASHRAE Trans, 1988, 94(1): 1427-1433.
- [10] 宋晓燕, 刘宝林. 真空冷却中的上海青表面温度变化规律[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 266-269.
- [11] 宋小勇, 李云飞, 邓云, 等. 鲜切花真空预冷过程温度的红外热成像检测[J]. 农业机械学报, 2009, 40(11): 129-132.
- [12] 宋小勇, 李云飞, 陈家盛. 装载量对切花真空预冷温度和瓶插寿命的影响[J]. 制冷学报, 2010, 31(5): 58-62.
- [13] 宋晓燕, 刘宝林, 阮文疏, 等. 上海青在真空预冷过程中的冻伤研究[J]. 食品与发酵工业, 2011, 37(1): 211-214.
- [14] HARVEY J M. Improved techniques for vacuum cooling vegetables[J]. ASHRAE Journal, 1963, 5(11): 41-44.
- [15] FROST C E, BURTON K S, ATKEY P T. A fresh look at cooling mushroom[J]. Mushroom Journal, 1989, 193: 23-29.
- [16] MCDONALD K, SUN D W, KENNY T. The effect of injection level on the quality of a rapid vacuum cooled cooked beef product[J]. Journal of Food Engineering, 2001, 47(2): 139-147.
- [17] WANG L J, SUN D W. Effect of operating conditions of a vacuum cooler on cooling performance for large cooked meat joints[J]. Journal of Food Engineering, 2004, 61(2): 231-240.
- [18] DRUMMOND L, SUN D W, VILA C T, et al. Application of immersion vacuum cooling to water-cooked beef joints: quality and safety assessment[J]. LWT-Food Science and Technology, 2009, 42(1): 332-337.
- [19] HOUSKA M, SUN D W, LANDFELD A, et al. Experimental study of vacuum cooling of cooked beef in soup[J]. Journal of Food Engineering, 2003, 59(2): 105-110.
- [20] DONG X G, CHEN H, LIU Y, et al. Feasibility assessment of vacuum cooling followed by immersion vacuum cooling on water-cooked pork[J]. Meat Science, 2012, 90(1): 199-203.
- [21] CHENG H P. Vacuum cooling combined with hydrocooling and vacuum drying on bamboo shoots[J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26(17): 2168-2175.
- [22] SCHMIDT F C, ARAGA O G M F, LAURINDO J B. Integrated cooking and vacuum cooling of chicken breast cuts in a single vessel[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 100(2): 219-224.
- [23] WANG L J, SUN D W. Rapid cooling of porous and moisture foods by using vacuum cooling technology[J]. Trends in Food Science & Technology, 2001, 12(5): 174-184.
- [24] CHENG H P, HSUEH C F. Multi-stage vacuum cooling process of cabbage[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 79(1): 37-46.
- [25] 韩志, 谢晶, 潘迎捷. 压力波动对卷心菜真空冷却效果的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 313-317.
- [26] 宋小勇, 李云飞. 真空预冷对非洲菊切花温度和瓶插寿命的影响[J]. 农业机械学报, 2010, 41(1): 167-171.
- [27] CARVER C H. Vacuum cooling and thawing fishery products[J]. Marine Fisheries Review, 1975, 37(7): 15-21.
- [28] TAMBUNAN A H, SEO Y, SAGARA Y, et al. Measurement of evaporation coefficient of water during vacuum cooling of lettuce[M]// Developments in food engineering. Springer US, 1994: 328-330.
- [29] SUN D W, WANG L J. Development of a mathematical model for vacuum cooling of cooked meats[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 77(3): 379-385.
- [30] MCDONALD K, SUN D W. Pore size distribution and structure of a cooked beef product as affected by vacuum cooling[J]. Journal of Food Engineering, 2001, 24(6): 381-403.
- [31] JIN T X, ZHU H M, XU L. Moisture movement characteristics and their effect on the ultrastructure of cooked meat during vacuum cooling[J]. Biosystems Engineering, 2006, 95(1): 111-118.
- [32] 贺素艳, 张光存, 于永全, 等. 真空预冷后甘蓝组织显微结构和超微结构的改变[J]. 电子显微学报, 2013, 32(2): 168-172.
- [33] WANG L J, SUN D W. Modelling vacuum cooling process of cooked meat part 1: analysis of vacuum cooling system[J]. International Journal of Refrigeration, 2002, 25(7): 854-861.
- [34] WANG L J, SUN D W. Modelling vacuum cooling process of cooked meat part 2: mass and heat transfer of cooked meat under vacuum pressure[J]. International Journal of Refrigeration, 2002, 25(7): 862-871.
- [35] HU Z H, SUN D W. CFD simulation of coupled heat and mass transfer through porous foods during vacuum cooling process[J]. International Journal of Refrigeration, 2003, 26(1): 19-27.
- [36] DOSTAL M, PETERA K. Vacuum cooling of liquids: mathematical model[J]. Journal of Food Engineering, 2004, 61(4): 533-5339.
- [37] JIN T X, XU L. Development and validation of moisture movement model for vacuum cooling of cooked meat[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 75(3): 333-339.
- [38] JIN T X, XU L. Numerical study on the performance of vacuum cooler and evaporation-boiling phenomena during vacuum cooling of cooked meat[J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47(13): 1830-1842.
- [39] JIN T X. Experimental investigation of the temperature variation in the vacuum chamber during vacuum cooling[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 78(1): 333-339.
- [40] DRUMMOND L, SUN D W. Temperature evolution and mass losses during immersion vacuum cooling of cooked beef joints: A finite difference model[J]. Meat Science, 2008, 80(3): 885-891.
- [41] DRUMMOND L, SUN D W. Evaluation of the immersion vacuum cooling of cooked beef joints: mathematical simulation of variations in beef size and porosity and pressure reduction rates[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2012, 16: 205-210.
- [42] CEPEDA J F, WELLER C L, THIPPAREDDI H, et al. Modeling cooling of ready-to-eat meats by 3D finite element analysis: validation in meat processing facilities[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 116(2): 450-461.
- [43] FENG C H, DRUMMOND L, ZHANG Z H, et al. Vacuum cooling of meat products: current state-of-the-art research advances[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2012, 52(11): 1024-1038.
- [44] ZHANG Z, DRUMMOND L, SUN D W. Vacuum cooling in bulk of beef pieces of different sizes and shape- evaluation and comparison to conventional cooling methods[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 116(2): 581-587.