

文章编号: 0253-4339(2012)03-0054-04
doi: 10.3969/j.issn.0253-4339.2012.03.054

关于真空冷却实验中的一些问题

华泽钊 宋晓燕

(上海理工大学 食品冷冻技术研究所 上海 200093)

摘要 近年来,不少有关真空冷却的文章讨论了用小型真空冷却机组进行的实验研究。其中有些论文在实验设计上可能存在问题,包括实验的对象、样品的数量、真空度、样品的失水量等。因此实验所得到的数据和结论,能否用于指导实际的真空冷却,是需要斟酌的。这里从真空冷却的机理出发,介绍了真空冷却的主要应用场合,讨论了真空腔的压力,食品的降温效率和失水量等问题,并给出了水、菠菜、牛肉、面包的最大理论温降和最小理论失水率。

关键词 食品包装与贮藏;真空冷却;预冷;热力学分析;失水率

中图分类号: TS205.7

文献标识码: A

Some Problems about the Vacuum Cooling Experiments

Hua Zezhao Song Xiaoyan

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

Abstract In recent years, some papers have studied the vacuum cooling of food using small experimental devices. However there are some inappropriate measures in these experiments, such as improper food applications, unsuitable sample number of food, inadequate vacuum degree and too much water loss. Therefore, whether the obtained data and conclusions can be applied to actual production still need further consideration. Based on the thermodynamic analyses of vacuum cooling, this paper introduces its main applications, and analyses the vacuum pressure, cooling rate and water loss of foods.

Keywords Food package and preservation; Vacuum cooling; Pre-cooling; Thermo dynamical analysis; Water loss rate

1 真空冷却的对象和应用场合

1.1 真空冷却系统的主要组成及其功能

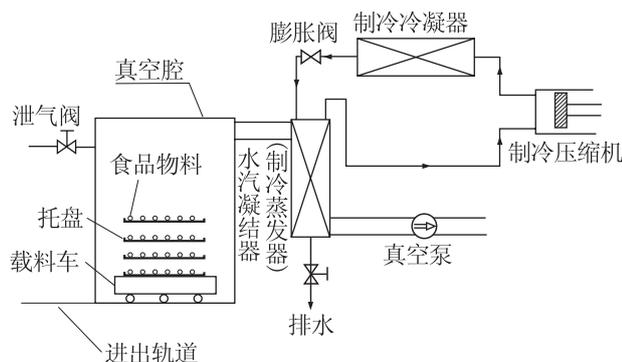


图1 食品真空冷却系统的示意图

Fig.1 Schematic diagram of vacuum cooling system

食品真空冷却系统如图1所示,主要由真空腔、水汽凝结器、制冷系统和真空泵等4部件组成。水汽凝结器(又称为“捕水器”, condenser; 冷阱, cold trap),其作用是对食品物料中蒸发出来的水蒸汽,进行降温、冷凝成水,由排水管排出。

在食品真空冷却过程中,蒸发出来的水蒸气的体积流量很大。如在10℃时,饱和水蒸汽的比体积高达106.3m³/kg(见表1)。因此,不仅要求水汽凝结器的温度较低(如-15℃),而且要求它具有较大的传热面积,以提供足够的冷量。应当说,食品物料中的饱和水蒸气压与水汽凝结器表面的饱和水蒸气压之间的压差,是食品物料中水蒸气蒸发逸出的传质驱动力。真空冷却系统中的水汽冷凝器,可以串联于真空腔和真空泵之间,如图1所示;也可以置于真空腔内,如图2所示。

真空泵的作用是形成和维持真空腔中所需要的真空度。即使在-15℃时冰的饱和蒸汽压也只有0.165kPa,这在真空技术中属于“低真空”的范畴,可以用一般的机械真空泵实现。

1.2 真空冷却的机理

食品的真空冷却是使食品冷却的一种制冷方法。习惯将制冷过程分为制冷剂的“降温”和“吸热”2个过程。在真空冷却中,“制冷剂”就是食

品中含的水；它的“降温”是靠真空减压；而水由食品中“吸热”，是靠水在低压低温下蒸发实现的^[1]。

在物质的气-液两相共存状态下，压力与温度是单值对应的，减压就会引起降温。对各种不同物质的减压降温，在制冷中已被广泛应用，是一种应用最广的降温方法。水的减压降温可以达到0.01℃^[1]。表1显示出了水的饱和压力、蒸发潜热与温度的关系。

表1 与水相平衡的饱和蒸汽压、蒸汽比容和蒸发潜热^[5]

Tab.1 The saturated vapor pressure, special volume and latent heat of water with temperature^[5]

温度 /℃	压力 /kPa	水蒸汽比容 / (m ³ /kg)	蒸发潜热 / (kJ/kg)
0.01	0.6106	206.356	2834.20
1	0.6571	192.456	2498.43
2	0.7060	179.770	2496.05
3	0.7580	168.027	2493.68
4	0.8135	157.138	2491.31
5	0.8725	147.033	2488.94
6	0.9353	137.645	2486.57
7	1.0020	128.948	2484.20
8	1.0728	120.851	2481.84
9	1.1481	113.327	2479.47
10	1.2280	106.329	2477.11
20	2.3388	57.773	2453.48
30	4.2460	32.889	2429.80
40	7.3835	19.521	2405.98
50	12.3499	12.029	2381.94
100	101.325	1.6718	2256.28

1.3 真空冷却的主要应用场合

目前有些论文研究的对象是将略高于10℃的蔬果，用真空冷却的方法降温。其实对于这样的物品，真空冷却并无明显的优点，但却有能耗大、失水量大等缺点。也有的研究，将直径较大、又有坚硬表皮的水果进行真空冷却，其效果远不如直接用冷水冷却^[2]。

根据真空冷却的特点，它的主要应用是对温度较高的蔬菜或食品进入冷库(如4℃)前的“预先”冷却。所以，真空冷却又常被称为“真空预冷”(Vacuum Pre-cooling)，其主要应用场合如下。

1.3.1 对刚收获的水果、蔬菜进行真空预冷以去除田间热

从收获后，果蔬的品质就开始进入降低的过程，而且温度越高，品质降低就越快。由于刚收获时，果蔬带有很高的田间热，温度较高，因而对品质的影响很大。故要求快速冷却，然后贮进冷库。

由于这一阶段的冷却主要是除去田间热和呼吸热。果蔬的预冷，可以采用多种方法，如风冷、水冷等。真空冷却方法特别适合于单位体积的表面积较大或结构疏松、多孔的果蔬。对于叶菜，因其单位体积的表面积很大，真空冷却的效果最好。对于蘑菇等，因其具有疏松的结构，水分易于蒸发出来，真空冷却的效果也很好。

对于无叶菜和直径较小的水果，如大葱、辣椒、茄子、草莓、葡萄等，真空冷却也有一定的效果。果蔬的真空冷却可以直接放在托盘上冷却，也可以用食品袋或纸盒包装后再放在托盘上冷却，但必须在袋或纸盒包上打上许多通气孔。

1.3.2 对经过高温加热的食品进行真空冷却

许多食品，如烘烤食品、大块熟肉、即食便餐等，都需要在高温加热后，迅速冷却，然后包装销售，或放进冷库。近年来，真空冷却已经开始广泛地用于这些场合，对经过高温加热的食品进行快速冷却。

近年来，也有将刚捕获的高档水产品，通过真空预冷，然后放入冷库，以满足快速冷却和卫生要求。

1.4 食品真空冷却的缺点和问题

1.4.1 真空冷却的高费用

由于真空冷却是在真空腔中进行的，需要配置制冷系统和真空泵，其初投资和运行费用都比风冷、水冷方法高。

1.4.2 真空冷却引起的失重(失水)问题

真空冷却引起的失重(失水)，要比一般风冷多。一些实验表明，对于蘑菇，从21℃降至1℃，真空冷却所引起的失水为3.6%，而一般强风冷却所引起的失水为2%^[3]；对于烘烤面包，从98℃降至3℃，某实验测得真空冷却所引起的失重(失水)为6.8%，而一般强风冷却所引起的失重为3%~5%；对于加热后的大块熟肉的冷却，真空冷却所引起的失水率达10%，而一般强风冷却所引起的失重约在6%左右^[4]。

1.4.3 真空冷却对食品品质的影响

一般说来，由于真空冷却能够大大缩短冷却的时间，使食品与外界空气接触的机会很少，因此对保证食品的质量是有利的。但也有关于真空冷却会引起食品品质降低的报道，这可能是由于在真空冷却的过程中，部分水分从食品内部渗透到表面，

加强了食品内部成分的扩散，同时有些致腐微生物的扩散也增强了^[3]。

2 关于真空腔的压力

表1显示出在不同温度下水的饱和压力值、水蒸汽的比容和蒸发潜热的数据。水的饱和压力是和温度对应的，如在5℃下，水的饱和蒸汽压是0.87kPa。但在一些具有实验的论文中，出现了测量得到的压力高于水温所对应的饱和压的情况。如测得的温度是5℃，而测得的真空腔的压力却高于1.0kPa。

出现这种现象，估计有三方面的原因：一是真空计不准确，或安装位置和方法有问题；二是真空腔的密封有问题，有过多的空气漏进腔内；三是真空泵运行不正常，或管路阻力过大。即使在这样的情况下，只要水汽凝结器的温度足够低，食品的冷却还是可能进行的。但是，这样得出的实验数据和结论无法用于指导实际的大型真空冷却工艺。

3 关于食品的降温效果和失水量

为了分析的方便，可以将真空冷却的全过程分成两个阶段：水在真空下的降压降温；水的蒸发吸热，使食品冷却。在第一阶段，由于真空泵和水汽凝结器的作用，真空腔的压力降低，其对应的饱和温度也降低。如当压力降至0.87kPa时，水的饱和温度降至约5℃。在第二阶段，水分的蒸发吸收大量热量，从而使食品得到冷却。在实际的真空冷却过程中，上述两个阶段是同时进行的。

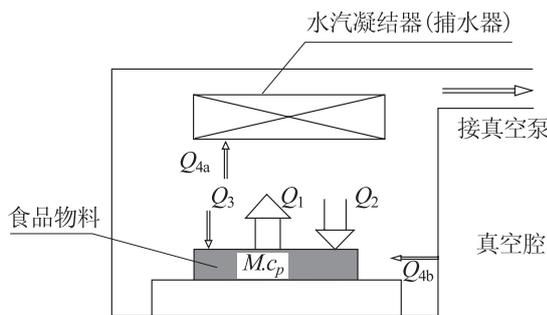


图2 食品物料在真空腔内真空冷却时的热学分析

Fig.2 Thermal analysis of food sample in a vacuum chamber

图2给出食品物料在真空腔内进行真空冷却时的热学分析。从物料中取走的热量的代数和 Q ，应当等于为食品物料降温所提供的冷量。即

$$Q = \sum_i Q_i = Q_1 - Q_2 - Q_3 \pm Q_4 = M \times c_p \times \Delta T \quad (1)$$

式中： Q —从物料中取走的总热量，或称制冷量，kJ； Q_1 —取走的水分在食品物料中完全蒸

发(即蒸发成100%的蒸汽)所提供的理论制冷量，kJ； Q_2 —由于取走的水分在食品物料中未能完全蒸发(即未能完全蒸发)所造成的制冷量的损失，kJ； Q_3 —食品呼吸所产生的热量，kJ； Q_4 —以其他途径传给食品物料的冷量(取“+”号)或热量(取“-”号)，kJ； M —食品物料的质量，kg； c_p —食品物料的比热容，kJ/(kg·K)； ΔT —食品物料的温降，K。

3.1 水分完全蒸发所提供的理论制冷量 Q_1

$$Q_1 = M_w \times L \quad (2)$$

式中： M_w —水分蒸发的质量，kg，即食品的失水量、失重量； L —水的蒸发潜热，可取为2430 kJ/kg。

3.2 由于水分未能完全蒸发所造成的制冷量损失 Q_2

在实际的真空冷却中，制冷量损失 Q_2 几乎是不可避免的。如设计不合理，或运行工况不理想，实际造成的制冷量损失 Q_2 是很大的，是不可忽略的。曾有人对一个只有玻璃可视盖板的真空腔，做过纯水的真空冷却实验，发现在有些情况下，可以观察到小气泡由液体内部冒出，很多水分会溅出盛放液体的容器，造成许多对降温没有贡献的“无用的”的失水(失重)。按其数据折算，最大时的 Q_2 可以达到 Q_1 的50%~90%。但是，对合理的设计、较理想的运行工况， Q_2 应当比 Q_1 小得多。

3.3 食品呼吸所产生的热量 Q_3

在多数情况下，这个 Q_3 比 Q_1 要小得多，可以忽略。

3.4 以其他途径传给食品物料的热量或冷量 Q_4

这里仅分析食品物料与水汽凝结器、真空腔壁之间的热量传递，在图2中分别示为 Q_{4a} 和 Q_{4b} 。在一般情况下，水汽凝结器的温度，低于物料的最终温度，它对食品物料起冷却作用， Q_{4a} 前取“+”号；而真空腔壁的温度，因其接近环境，高于物料的最终温度。对食品物料起加热作用， Q_{4b} 前取“-”号。它们与物料之间的热量交换，可以通过导热、对流和辐射三种方式进行。由于处于真空的条件下，对流传热可以忽略，而且温度差较小，辐射传热也很小。只要盛放物料的托盘与水汽凝结器、真空腔壁之间不直接接触，在多数情况下， Q_4 比 Q_1 要小得多，也可以忽略。

这样，在理想的情况下，即不考虑 Q_2 ，和忽

略 Q_3 和 Q_4 , 就可以得到:

$$Q \approx Q_1 = M_w \times L = M \times c_p \times \Delta T \quad (3)$$

则理想温降为:

$$\Delta T = (M_w \times L) / (M \times c_p) \quad (4)$$

而食品的失水量为:

$$M_w = (M \times c_p \times \Delta T) / L \quad (5)$$

食品的比热容数据, 可参见参考文献[3,6]。为估算方便, 这里仅讨论近似计算方法。食品主要由水、蛋白质、碳水化合物、脂肪和灰分组成。食品的比热容可以按照它们的组分进行估算, 不同的研究者提出了多种近似公式。这里取用Y. Choi and M. R. Okos的公式^[6], 设某食品中各组分的质量分数 (mass percent) 分别为: 水 w_w 、蛋白质 w_p 、碳水化合物 w_c 、脂肪 w_f 和灰分 w_a , 该食品比热容可以按照组分的线性组合计算, 而各组分前的系数为该组分的比热容值, kJ/(kg·K)。

$$c_p = 4.180 \times w_w + 1.711 \times w_p + 1.574 \times w_c + 1.928 \times w_f + 0.908 w_a \quad (6)$$

通过进一步分析和简化, 对于果蔬类食品, 主要是碳水化合物, 不含脂肪。其比热容计算可以近似示为

$$c_p = 4.180 \times w_w + 1.6 \times (1 - w_w) = 1.6 + 2.58 w_w \quad (7)$$

对于肉类食品, 主要含蛋白质和脂肪, 其比热容计算可以近似示为

$$c_p = 4.180 \times w_w + 1.85 \times (1 - w_w) = 1.85 + 2.33 w_w \quad (8)$$

3.5 真空冷却的最大理论降温 and 最小理论失水量

现计算4种较典型物料真空冷却的情况, 并将结果汇总于表2。其中包括失水1%和5%的最大理论温降, 和降低1K所需的最小理论失水量。

表2 几种食品真空冷却的最大理论降温 and 最小理论失重量
Tab.2 The maximum temperature drops and the minimum water losses of foods during the vacuum cooling

食品	初始含水量/%	比热容 c_p /(kJ/(kg·K))	失水5%的最大理论温降 $\Delta T/K$	失水1%的最大理论温降 $\Delta T/K$	降低1K所需的最小理论失水量/(g/(kg·K))
水	100	4.18	30.60	6.1	1.63
菠菜	90	3.91	32.71	6.5	1.53
牛肉	50	2.95	43.35	8.7	1.15
面包	40	2.55	50.15	10.0	1.10

在所有的液体和固体物质中, 水的比热容是最大的。在食品的所有组分中, 水的比热容

($c_p=4.18\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$) 要比其他组分的比热容高得多。因此, 一般说来, 食品的含水量越低, 真空冷却失重5%的理论温降值越大, 每降低1K所需的理论失水量越小。

在已经发表的食品真空冷却实验论文中, 有的失水量要比这里给出的最小理论失水量要大得多, 其原因是实验的样品数量过少。有的实验中只放上几片蔬菜或水果; 而真空泵的抽力太大, 许多失去的水量并非蒸发用于食品冷却, 而是未蒸发就被真空泵直接抽走的。因此, 这样的实验数据并不能真正用于指导真空冷却的实际工艺。

本文受上海市教育委员会重点学科建设项目 (J50502) 资助。(The project was supported by Leading Academic Discipline Project of Shanghai Municipal Education Commission (No.J50502).)

参考文献

- [1] Hua Z Zh, Zhang H, Liu B L, et al. Refrigeration Technology[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [2] Nguyen Van Luu, 刘宝林, 宋晓燕. 火龙果的冷却方式选择[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(17): 10706-10707. (Nguyen Van Luu, Liu Baolin, Song Xiaoyan. The Chose of Cooling Method for Dragon Fruit[J]. Journal of Anhui Agri, 2011,39(17): 10706-10707.)
- [3] Burton K S, Frost C E, Atkey P T. Effect of vacuum cooling on mushroom browning[J]. International Journal of Food Science and Technology, 1987, 22: 599-606.
- [4] Sun D W. Vacuum cooling of foods[M]// Emerging Technologies for Food Processing. San Diego:Elsevier Academic Press, 2005: 579-583.
- [5] ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers). ASHRAE Handbook[S]. New York: ASHRAE Publisher, 2005.
- [6] Rao M A. Engineering Properties of Foods[M]. 2nd ed. Marcel Dekker Inc., 1995.

作者简介

华泽钊, 男(1938-), 教授, 上海理工大学, 021-55271291, E-mail: tchua@usst.edu.cn. 研究方向: 制冷、低温生物医学技术、食品和药品的冷冻干燥。

About the author

Hua Zezhao, (1938-), male, Professor, University of Shanghai for Science and Technology, 021-55271291, E-mail: tchua@usst.edu.cn. Research fields: Refrigeration, Cryo-biomedical techniques, Freeze-Drying.