

文章编号:0253 – 4339(2013) 06 – 0097 – 06
doi:10. 3969/j. issn. 0253 – 4339. 2013. 06. 097

降低液体真空冷却过程中失水量的方法研究

王 艳 周 前 杜建平 彭 展

(河南城建学院建筑环境与能源工程系 平顶山 467036)

摘 要 通过实验研究了不同形式的滤网在液体真空冷却过程中降低失水的效果。实验中采用圆柱形容器并控制液面高度为定值,通过改变片状滤网在容器中的位置来研究失水情况;同时研究了能够阻挡容器侧壁气泡的柱状滤网及综合状滤网对失水的影响;为便于有效比较失水量,提出过压度、实际失水率及失水效率等概念。实验结果表明:将片状滤网置于失水终了的液面处,其降低失水的效果最好;柱状及综合状滤网与片状滤网相比,能够进一步降低失水量。

关键词 真空冷却;失水率;过压度;失水效率

中图分类号:TB71⁺3; TB79 **文献标识码:**A

The Methods Research of Decreasing Water Loss during
Liquid Vacuum Cooling Process

Wang Yan Zhou Qian Du Jianping Peng Zhan

(Henan University of Urban Construction, Pingdingshan, 467036, China)

Abstract The effect of different forms of strainer on reducing water loss during liquid vacuum cooling process was studied. Using cylindrical containers and keeping the liquid height at a fixed value in the experiments, the situation of the water lose was studied by changing the position of the flaky strainer. The influence for water loss of the columnar and comprehensive-shaped strainers which can resist bubbles from the sidewall was also studied. To compare the water loss effectively, the concepts of overpressure degree, actual water lose rate and water lose efficiency were put forward. The experimental results show that when flaky strainer is located at the liquid surface at the end of the losing water process, the effect of decreasing water loss is the best, and the columnar and comprehensive-shaped strainers can further reduce the water loss compared with the flaky strainer.

Keywords vacuum cooling; water lose rate; overpressure degree; water lose efficiency

真空预冷是通过水分汽化吸收自身热量,从而使真空室内被冷物温度降低的一种方法。在欧美日等许多国家,为了获得高品质的果蔬,已经把真空预冷作为果蔬保存的第一道工序。真空预冷技术是一项新兴冷却技术,具有广泛的发展前景^[1-2]。

随着人民生活水平的提高,人们对液态食品的品质与口感要求越来越高。真空冷却具有降温速度快、温度分布均匀等优点,因此得到日益广泛的应用^[3-5]。但是汽化过程中,液态食品因剧烈沸腾导致飞溅失水,这部分水对降温不起作用,在实际应用中应该避免。现有文献对液体真空冷却过程中失水问题的研究较少^[6-8],对降低失水量的方法也鲜有提及。本文以水作为样品,研究不同形式的滤网对失水量的影响,寻找理想的降低失水量的方法。

1 实验装置介绍

实验采用 VFD-2000 型真空预冷实验机(上海鲜

绿真空保鲜设备有限公司生产),其结构如图 1 所示。它主要是由制冷系统、真空系统和采集控制系统组成。

真空室采用不锈钢材料,尺寸为 380 × 280 × 240mm,其外侧安装一块厚度为 32mm 的有机玻璃门,便于实验过程中进行实时观察、拍照或录像,真空室与有机玻璃门之间装有橡胶圈进行密封。真空室内设置四个热电偶进行温度测量,并安装有压力传感器来测量其真空度。真空系统采用 2XZ-4 型油封式旋片真空泵,抽气速率 14. 4m³/h,转速 1400r/min,功率 0. 55kW。

制冷系统的蒸发器作为外置式捕水器,其作用是把抽真空过程中产生的水蒸气凝结为水滴,并由排水口排出。真空室与外置式捕水器通过软管相连,真空室内的水蒸气由真空泵抽出后,一部分经过捕水器被冷凝,剩下的部分排到大气中。

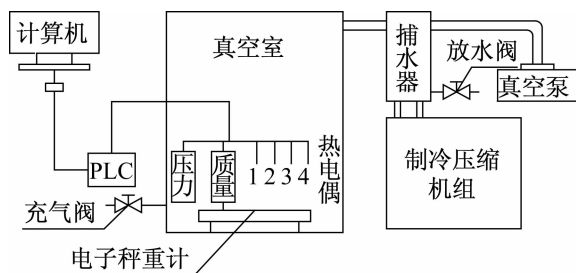


图1 真空冷却实验装置

Fig.1 Experiment equipment of vacuum cooling

控制系统由PLC、上位机和电气系统组成。由PLC实现对各测点温度、压力信号的采集和通信。在上位机中安装有组态软件,可以实现人机对话,如通过上位机设置真空泵开启的条件,样品的终温等参数。系统还可以对各数据参数进行采集、存储及生成对应的实时图像。

2 失水率计算依据及气泡形成机理分析

2.1 失水率计算依据

真空冷却是利用抽真空降压的方法,通过水分蒸发带走液体的热量从而实现降温,这部分因吸热而蒸发的水叫理论失水量。冷却过程中出现沸腾现象,大量液体飞溅出容器,这部分损失的水没有用来吸收液体的热量,对降温不起效果,称为无效失水量。引入理论失水率,实际失水率,失水效率的概念,其表达式为:

$$w_1 = \Delta m_1 / m \quad (1)$$

$$w_2 = \Delta m_2 / m \quad (2)$$

$$\eta = \frac{w_1}{w_2} \quad (3)$$

$$\Delta m_1 = Cm\Delta t / \gamma \quad (4)$$

式中: w_1 为理论失水率; w_2 为实际失水率; η 为失水效率; Δm_1 为理论失水量, g; Δm_2 为实际失水量, g; m 为预冷前样品质量, g; γ 为样品中水的平均气化潜热, kJ/kg; C 为冷却前样品的比热容, kJ/kg; Δt 为实验前后样品温度差, K。

由式(1)~(4)可以看出,理论失水率 w_1 是指单位质量样品的理论失水量,实际失水率 w_2 是指单位质量样品的实际失水量。失水效率 η 是理论失水率与实际失水率的比值,它衡量了实际失水率与理论失水率的接近程度。由于液体在真空冷却过程中, $w_1 < w_2$, 因此 $\eta < 1$ 。从失水效率的定义可知,它是一个无量纲数,它的大小与样品的质量和初终温无关,则在液面高度一定的情况下,求出的 η 具有可比性。

2.2 气泡形成机理分析

液体在真空冷却过程中,会因沸腾产生大量的气

泡。气泡在液面处破裂引起剧烈飞溅,从而造成大量失水,因此分析气泡的形成及破裂过程,对研究降低失水量的方法具有重要意义。

在真空冷却过程中,液体温度对应的饱和蒸汽压力与真空室内压力之差是沸腾的驱动力,定义此压差为过压度。与加热沸腾汽化核心仅形成于容器底部不同,真空冷却过程中在容器的侧壁与底部有凹坑、细缝、裂穴处均形成汽化核心。若真空室内压力为 p_n , 液体温度对应的饱和压力为 p_b , 只有当过压度 $\Delta p = p_b - p_n > 0$ 时,才会形成气泡。

假设流体中存在一个球形气泡,如图2所示^[9]。气泡内压力为 p_v , 温度为 t_v , 液面处的压力为 p_s , 温度为 t_s , 周围液体的压力为 p_l , 温度为 t_l 。若忽略液柱静压力,则有 $p_s = p_l$, 根据气泡存在的力平衡条件可得:

$$\pi R^2 (p_v - p_s) \geq 2\pi R \lambda \quad (5)$$

式中: R 为气泡半径, m; λ 为单位长度的表面张力, N/m。

则气泡存在所需的最小半径为:

$$R_{\min} = \frac{2\lambda}{p_v - p_s} \quad (6)$$

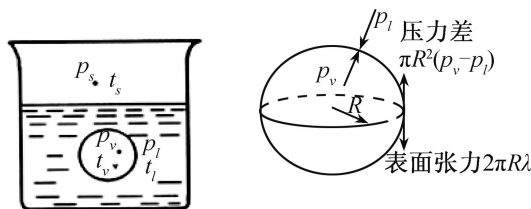


图2 气泡形成机理示意图

Fig.2 The schematic diagram of air bubble formation mechanism

由公式(5)和(6)可知,只有当气泡半径大于 $R_{\min}$ 时,内外压差大于表面张力,气泡才能形成并长大;且随着液面处压力 p_s 的增大,气泡最小半径 $R_{\min}$ 增大,气泡形成条件恶化;反之,随着液面处的压力 p_s 的减小,气泡形成条件会好转。

根据上述气泡形成机理的分析可知,在真空冷却过程中,容器底部和侧壁均生成气泡,且真空室内压力越低,气泡形成越剧烈。因此,抑制失水应从气泡形成位置和形成条件着手。

3 降低失水量的实验研究

3.1 片状滤网对失水率的影响

3.1.1 实验方法

采用圆柱形开口容器,容器直径 6.5cm,高度 16.5cm。保持容器内液面高度为 13.5cm,测点位置

固定。容器中放入直径为 5.5 cm 的片状滤网,其目数为 24,经纬线的直径为 0.1mm,如图 3 所示。

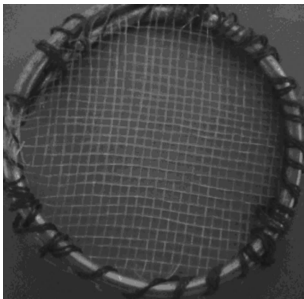


图 3 滤网示意图

Fig.3 The schematic diagram of strainer

改变片状滤网的位置,使其分别处于液面下 8cm、6cm、4cm、2cm、1cm、液面处及液面上 1cm 进行实验。当捕水器温度降至 -20℃ 时开启真空泵,水温降至 5℃ 时结束实验。为了对比分析,在相同条件下对无滤网的情况进行实验。为了提高实验数据的准确性、降低误差,每组实验均做两次并取各数据平均值。

3.1.2 实验现象

不加滤网时,抽真空一段时间后,容器壁面和底部开始有气泡生成,并有少量气泡上升。随着压力进一步降低,大量气泡形成并脱离壁面,液体开始剧烈沸腾,导致大量液体飞溅。实验最后阶段,气泡生成

速度变慢,偶尔有大气泡形成。实验结束后,在有机玻璃门上能看到大量残留的液滴,如图 4 所示。

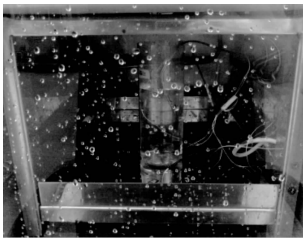


图 4 实验现象示意图

Fig.4 The schematic diagram of experimental phenomenon

加入片状滤网后,气泡最先在滤网处形成。当液体剧烈沸腾时,大量气泡上升,其中大部分被滤网阻挡。被阻挡的气泡穿过滤网再次上升时,因速度减小,到达液面时引起的飞溅失水减少。但由于容器壁面与滤网间存在间隙,仍有少量气泡穿过该间隙到达液面处。滤网的位置不同,飞溅引起的失水量也不同。

3.1.3 实验分析

因为滤网表面粗糙易成为气化核心,故在滤网处最先形成气泡。在剧烈沸腾时,由于滤网的阻挡,削减了气泡上升的能量,降低了液体的飞溅损失。各组实验结果记录及失水效率计算如表 1 所示。

表 1 不同滤网位置的实验计算结果

Tab.1 Experimental calculation results of different strainer position

滤网的 位置	预冷前后水 的质量/g	预冷前后 水温/℃	理论失 水量/g	实际失 水量/g	理论失 水率/%	实际失 水率/%	平均理论 失水率/%	平均实际 失水率/%	失水效 率/%
液面下 8 cm	405.12/331.68	14/5	6.20	73.44	1.53	18.13	1.62	19.47	8.32
	404.84/320.60	14/4	6.89	84.24	1.70	20.81			
液面下 6 cm	404.07/335.43	14/5	6.19	68.64	1.53	16.99	1.53	16.59	9.22
	404.43/339.01	14/5	6.19	65.42	1.53	16.18			
液面下 4 cm	406.09/348.05	14/4	6.91	58.04	1.70	14.29	1.70	14.35	11.85
	404.66/346.38	14/4	6.88	58.28	1.70	14.40			
液面下 2 cm	404.29/359.02	14/6	5.50	45.27	1.36	11.20	1.53	11.09	13.80
	404.04/359.67	14/4	6.87	44.37	1.70	10.98			
液面下 1 cm	407.97/378.55	14/4	6.94	29.42	1.70	7.21	1.70	6.90	24.64
	405.40/378.67	14/4	6.90	26.73	1.70	6.59			
液面下 0 cm	410.66/380.59	14/5	6.29	30.07	1.53	7.32	1.62	7.78	20.82
	405.65/372.21	14/4	6.90	33.44	1.70	8.24			
液面上 1 cm	410.12/361.29	14/4	6.98	48.83	1.70	11.91	1.70	12.40	13.71
	410.76/375.81	14/4	6.99	52.95	1.70	12.89			

由表1可知,随着滤网位置的升高,实际失水率先减小后增大,而失水效率先增大后减小。这是因为前五组实验在失水后,滤网均位于液面下,故滤网在整个过程中,均能对气泡起到阻挡作用,使其能量减小,从而有效降低失水,此时滤网距液面越近,实际失水率越小,失水效率越大;后两组实验过程中,滤网均位于液面以上,无法起到阻挡气泡上升至液面的作用,仅能在气泡破裂时阻挡一部分飞溅的液体,故降低失水的效果不明显。此时滤网距液面越近,实际失水率越大,失水效率越小。实际失水率和失水效率随滤网位置的变化如图5和图6所示。

由图5和图6可知,当滤网被放置在液面下距液面较远时,实际失水率较大,失水效率较小,且二者随滤网位置的变化趋势较平缓。这是由于滤网位置较低时,无法阻挡滤网上部容器壁处形成的大量气泡,另外部分气泡穿过滤网再上升至液面,能量仍较大,造成较多液体飞溅。但当滤网位置在液面下距液面较近时,滤网不但能阻止气泡上升至液面,还可以降低液面处气泡破裂产生的能量,从而有效减少水分的溅失,故随滤网位置的升高,实际失水率明显降低,失水效率明显增加。

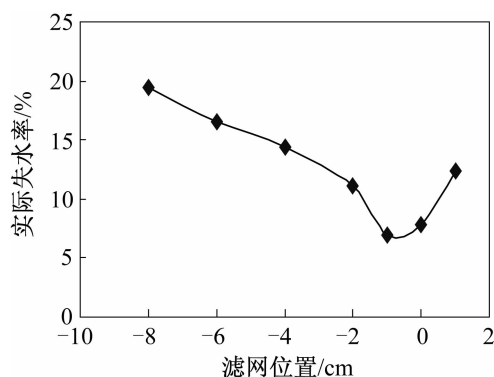


图5 实际失水率随滤网位置变化曲线

Fig. 5 Actual water lose rate curve with the change of the strainer position

当滤网位于液面之上时,随着与液面距离的增大,实际失水率增大,失水效率降低。可见对某一具有固定液面的容器,存在一个放置滤网的最佳位置,使得实际失水率最小,失水效率最高。从图5和图6可看出本实验滤网放置的最佳位置为液面下1cm附近。实验表明,失水后液面恰好降至该位置。

为研究不同滤网位置对预冷时间的影响,在上述各实验过程中,记录真空泵开启到冷却至终温所需时间,如图7所示。

由图7可知,不同滤网位置时的预冷所需时间大致相当,因此滤网位置对冷却时间的影响可以忽略,

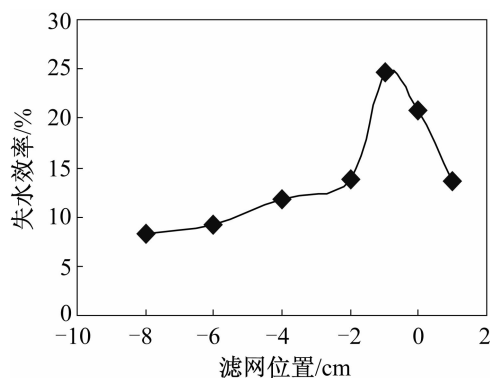


图6 失水效率随滤网位置变化曲线

Fig. 6 Water lose efficiency curve with the change of the strainer position

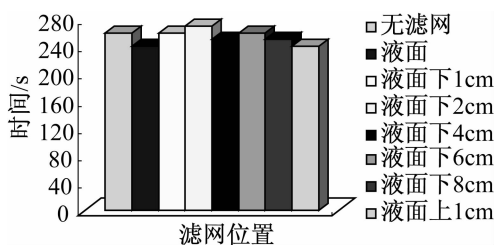


图7 不同滤网位置的预冷时间图

Fig. 7 The precooling time of different strainer position

所以液面下1cm附近为滤网降低失水率的最佳位置。

3.2 柱状及综合状滤网对失水率的影响

3.2.1 实验方法

由上述实验知,片状滤网能阻挡容器底部产生并上升的气泡,考虑到侧壁上产生的气泡对失水的作用,本组实验采用柱状滤网研究其对失水率的影响。保持实验条件与前述一致,用柱状滤网代替片状滤网。柱状滤网选用直径为5.5cm、高为10cm的不锈钢滤网,其目数为24,经纬线的直径为0.1mm,如图8所示,将其固定在容器口处。



图8 柱状滤网示意图

Fig. 8 The schematic diagram of columnar strainer

实验还将上述片状滤网置于柱状滤网中间,形成综合状滤网,用于进一步探究滤网形式与失水率的关系。

3.2.2 实验现象

采用柱状滤网,抽真空一段时间后,在容器壁面及滤网上开始形成小气泡。随着压力继续降低,水开始剧烈沸腾。当大量气泡形成并上升时,柱状滤网不仅能阻挡穿过其底部的气泡,还对形成于容器侧壁处的气泡有抑制作用。沸腾最后阶段几乎没有气泡能穿过滤网而到达液面。而对于综合状滤网,在整个沸腾过程中,水分的飞溅损失更少。

3.2.3 实验分析

与片状滤网相比,柱状滤网不仅可以阻挡穿过滤网底部的气泡,还会因滤网侧壁的存在而削减壁面处形成并上升的气泡的能量,从而减少液体飞溅。对于综合状滤网,可以进一步阻挡气泡上升,减小其到达

液面处的能量,最大程度上抑制飞溅失水。各组的实验结果记录及失水效率计算如表 2 所示。

据表 2 中的数据可以看出,无滤网时实际失水率最大,失水效率最低;采用片状滤网、柱状滤网及综合状滤网时,实际失水率依次降低,失水效率依次增加。这是因为无滤网时气泡上升过程不受任何影响,在液面处破裂时能量较大,可引起大量的液体飞溅;使用片状滤网可阻挡通过滤网底部的气泡,减少液体损失;柱状滤网不仅可以阻挡通过其底部的气泡,还会对容器侧壁产生的气泡进行破坏,从而进一步减少液体外溅;对于综合状滤网,由容器底部生成的气泡受到两层滤网的阻拦,故可以最大程度的抑制气泡上升至液面,减少飞溅失水。

表 2 不同形式滤网的失水率
Tab.2 The water lose rate of different forms of strainer

滤网的形式	预冷前后水的质量/g	预冷前后水温/℃	理论失水量/g	实际失水量/g	理论失水率/%	实际失水率/%	理论平均失水率/%	平均实际失水率/%	失水效率/%
无滤网	409.10/321.17	15/5	6.96	87.93	1.70	21.49	1.62	21.50	7.50
	406.31/318.84	14/5	6.22	87.47	1.53	21.52			
片状滤网 (液面下 1 cm)	407.97/378.55	14/4	6.94	29.42	1.70	7.21	1.70	6.90	24.64
	405.40/378.67	14/4	6.90	26.73	1.70	6.59			
柱状滤网	403.01/378.31	14/4	6.86	24.70	1.70	6.13	1.70	6.09	26.51
	405.82/381.27	14/5	6.21	24.55	1.70	6.05			
综合状滤网	402.07/381.76	14/4	6.84	20.31	1.70	5.05	1.70	5.00	34.00
	400.56/380.75	14/4	6.81	19.81	1.70	4.95			

4 结论

本文提出了过压度、实际失水率和失水效率等概念,通过实验研究得出以下结论:

- 1)片状滤网对容器底部生成的气泡具有阻挡作用,且将片状滤网置于失水结束后液面位置处,其抑制失水的效果最好;
- 2)柱状滤网和综合状滤网由于能够阻挡容器侧壁产生的气泡,其降低失水的效果优于片状滤网。

本文的研究结果对于减少液态食品和药品在真空冷却过程中的失水,具有重要借鉴意义和参考价值。

参考文献

[1] Tadhg Brosna, Da-Wen Sun. Compensation for water loss in vacuum pre-cooled lily flowers[J]. Agric Engineering Res, 2001, 79 (3): 299-305.

[2] 金听祥,张海川,成剑,等. 真空冷却技术的应用与研究进展[J]. 农业工程学报,2008,24 (S1): 234-238. (Jin Tingxiang, Zhang Haichuan, Cheng Jian, et al. Application and research development of vacuum cooling [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(S1): 234-238.)

[3] SUN DW, ZHENG L Y. Vacuum cooling technology for the agri-food industry: past, present and future [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 77(2): 203-214.

[4] 黄琛,蒋士龙,李云飞. 鱼香肉丝真空冷却工艺研究[J]. 上海交通大学学报,2007,25(6): 590-594. (Huang Chen, Jiang Shilong, Li Yunfei. Study on Vacuum Cooling of Yuxiangrousi [J]. Journal of Shanghai Jiao tong University, 2007, 25(6): 590-594.)

[5] 吴允才,李保国,石茂占. 真空预冷处理对小青菜品质影响的实验研究[J]. 食品科技, 2011, 36 (8): 36-39. (WuYunca, Li Baoguo, Shi Maozhan. Effect of vacuum pre-cooling treatment on the quality of greengrocery [J]. Food Science and technology, 2011, 36(8): 36-39.)

[6] 范磊,李保国,雷海斌,等. 带汤汁熟食真空预冷飞溅

现象分析及防止研究[J]. 制冷学报, 2012, 33(2): 68-72. (Fan Lei, Li Baoguo, Lei Haibin, et al. Research on the Splash of Cooked Food with Soup during Vacuum Cooling Process [J]. Journal of Refrigeration, 2012, 33(2): 68-72.)

[7] 陈儿同, 徐文强, 徐彬凯, 等. 降低真空冷却失水的方法研究[J]. 真空, 2009, 46(2): 70-73. (Chen Ertong, Xu Wenqiang, Xu Binkai, et al. Method study on debase water loss in the process of vacuum cooling [J]. VACUUM, 2009, 46(2): 70-73.)

[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. (Chen Ertong, Wang Yan, Xu Binkai, et al. Study on the water loss rate in the process of vacuum cooling[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2009, 31(1): 95-98.)

[9] 杨世铭, 陶文铨. 传热学(第四版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 318-320.

作者简介
王艳, 男(1985 -), 讲师, 河南城建学院建筑环境与能源工程系, 0375-2089069, E-mail: wyzhen311@163.com。研究方向: 食品冷冻冷藏。

About the author
Wang Yan (1985 -), male, lecturer, Faculty of Architecture Environment & Energy Engineering, Henan University of Urban Construction, 0375-2089069, E-mail: wyzhen311@163.com. Research fields: food freezing and cold storage.

制 冷 学 报
(1979 年创刊, 双月刊)
2013 年 12 月 16 日 第 34 卷 第 6 期

Journal of Refrigeration
(Started in 1979 , Bimonthly)
2013 - 12 - 16 Vol. 34 No. 6

主管单位: 中国科学技术协会
主办单位: 中国制冷学会
出版单位: 《制冷学报》编辑部
主 编: 吴元炜
印刷单位: 河北欣航测绘院印刷厂
发 行: 中国制冷学会秘书处

Responsible Institution: China Association for Science and Technology
Sponser: Chinese Association of Refrigeration
Published by: “Journal of Refrigeration” Editorial Department
Chief Editor: Wu Yuanwei
Printing by: Printing plant of Hebei Xinhang Surveying and Mapping Institute
Distributed by: Chinese Association of Refrigeration