

水滴真空冷却中降温特性的实验研究

刘 洋, 宋晓燕, 刘宝林, 李先明

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 为了探究果蔬表面水滴对其真空冷却冻伤的影响,选取不同质量的水滴为实验对象,首先研究了在特定终压下水滴的降温特性.进而研究了真空泵排量和真空冷却的终压对水滴降温特性的影响.结果表明:水滴的降温规律和已报道的食品降温规律差别很大,即使水滴没有沸腾现象,其温度也会迅速降低;改变水滴质量和真空泵排量无法阻止水滴结冰;终压低于 3 500 Pa 时水滴终温将低于 0 °C,低于 2 000 Pa 时水滴结冰.因此,向果蔬表面喷水时应喷洒均匀,避免出现较大的水滴,当喷水量大时,应适当提高终压,避免因水滴冻结造成果蔬冻伤.

关键词: 真空冷却; 冻伤; 终压; 水滴

中图分类号: TB 752 **文献标志码:** A

Experimental Study on Cooling Characteristics of Water Droplet During Vacuum Cooling

LIU Yang, SONG Xiaoyan, LIU Baolin, LI Xianming

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to explore the influence of water droplets on the frostbite of fresh product, experiments were performed on water droplets with different masses. The cooling characteristics of water droplets were studied under a specific final pressure. Then the effects of vacuum pump displacement and final pressure on water droplets cooling characteristics were studied. The results show that the cooling law of droplets cannot match well with the reported cooling law of food. The temperature of droplets decreases rapidly without boiling. Changing the water mass and vacuum pump displacement cannot prevent water droplets from freezing; the temperature will be lower than 0 °C if the final pressure goes down to 3 500 Pa, and droplets will freeze if the final pressure is lower than 2 000 Pa. So water should be sprayed to the surface of fresh product evenly. The final pressure should be raised appropriately with the increase of spraying water for avoiding frostbite.

Keywords: vacuum cooling; frostbite; final pressure; water droplet

收稿日期: 2015-07-27

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2013BAD19B01); 中国博士后科学基金面上项目(2014M561491)

第一作者: 刘 洋(1990-), 男, 硕士研究生. 研究方向: 食品真空冷却及冷藏. E-mail: ly12zss@126.com

通信作者: 刘宝林(1968-), 男, 教授. 研究方向: 食品冷冻冷藏. E-mail: bliuk@163.com

新鲜果蔬由于含水量和呼吸强度较大,如果采摘后不进行快速冷却,其品质会迅速下降.真空冷却可以有效去除果蔬田间热,延长保鲜期,是一种理想的快速冷却方法^[1-3].由于真空冷却是通过果蔬内部水分蒸发吸热而降温的方法,所以,失水量较大,这不仅会造成经济损失,严重时甚至会使果蔬萎蔫,失去销售价值^[4].为了避免这一问题,可以在冷却时向果蔬表面喷水或者在雨后采摘冷却,这样既能减少失水,又有利于提高降温速率^[5].鄂晓雪等^[6]发现对草莓进行真空喷水冷却可以有效提高降温速率,减少自由水损失,有助于草莓保鲜.但是,喷水量必须控制恰当,王雪芹等^[7]认为合适的喷水量应当使果蔬表面的水分在冷却结束时恰好蒸发完全.如果喷水量过大,会使冷量过剩,造成果蔬冻伤.终压是影响果蔬预冷效果的一个重要因素.终压设置过高,果蔬温度难以降低至冷藏所需温度^[8];反之,终压设置过低,会使果蔬温度过低,造成冻伤.宋晓燕等^[9]研究了不同终压时上海青的温度变化和冻伤现象,建议将预冷终压设置为 800 Pa.

虽然很多学者证明了在真空冷却时为果蔬补水有很多优点,但是,关于补水后果蔬表面水分的均匀性问题对真空冷却效果的影响其研究较少.如果喷水不均匀,或冷却前表面已经有很多水滴时,会使果蔬表面只有一部分被水覆盖,甚至出现较大的水滴.由于水和果蔬的热物性差别很大,当压力降低时,被水覆盖的区域的降温速率会大于未被水覆盖的区域,造成降温不均.当未被覆盖的区域温度降至设定温度时,被水覆盖的区域可能已被冻伤.因此,研究不同质量的水滴在真空冷却中不同压力下的降温规律,对优化果蔬真空预冷工艺及实际生产具有指导意义.

本文首先研究了终压为 800 Pa 时水滴的降温规律,并和已有文献中食品的降温规律进行对比,之后研究了水滴质量和终压对水滴降温规律的影响.

1 设备和方法

1.1 实验设备

自制真空预冷机,其工作原理如图 1 所示.FA2204B 精密电子天平,精度 0.001 g,上海越平科学仪器有限公司;T 型热电偶,测温范围 -200~350 ℃,精度等级 I 级,美国 OMEGA.

实验材料:自来水、滴管、胶带、塑料培养皿.

1.2 实验方法

1.2.1 实验 1

实验步骤如下:

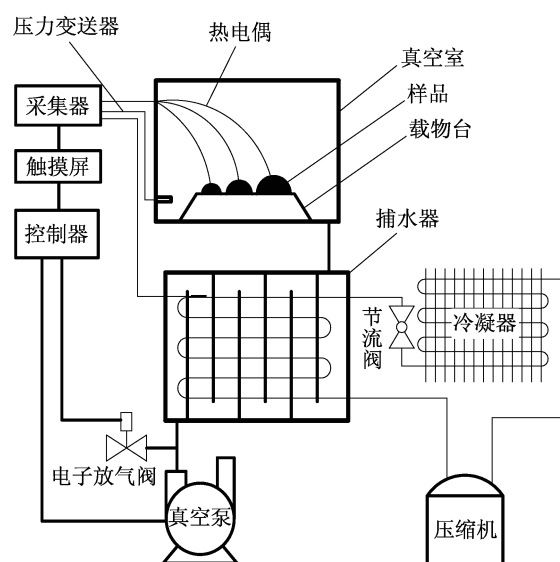


图1 真空冷却装置原理图

Fig.1 Schematic diagram of the cooling equipment

a. 取 3 个培养皿分别编号为 1,2,3 号,记录每个培养皿的质量.

b. 用滴管在 1,2,3 号培养皿中心分别滴加 0.1,0.2,0.3 g 自来水.

c. 将 3 个培养皿同时放入真空室中,将 3 根热电偶的测温端分别放入 3 个水滴中,并用胶带固定.

d. 关闭真空室门,预冷终压为 800 Pa,真空泵排量为 2 L/s.打开真空预冷机,采集并记录热电偶和压力变送器的测量数据,间隔为 2 s.当水滴温度稳定之后关闭真空预冷机.

1.2.2 实验 2

实验步骤 a—c 同实验 1. d. 关闭真空室门,预冷终压为 800 Pa.分别设定当真空室内压力降至 5 000,10 000,15 000,20 000 Pa 时真空泵排量从 2 L/s 减小到 1 L/s.采集并记录热电偶和压力变送器的测量数据,采集间隔为 2 s.水滴温度稳定之后关闭真空预冷机.

1.2.3 实验 3

将实验 1 步骤 d 中的终压改为 1 000,1 500,2 000,2 500,3 000,3 500 Pa,分别进行实验,其余步骤与实验 1 相同.

2 结果分析

2.1 水滴的降温特性分析

图 2(见下页)分别给出了终压 800 Pa 时 1 号培养皿中水滴的温度(T_1)曲线、真空室内压力(P)曲

线和水滴温度对应的饱和蒸发压力(P_s)曲线.其中,饱和蒸发压力 P_s 根据下式计算得出^[10]:

$$P_s = \exp\left(23.209 - \frac{3816.44}{T - 46.44}\right)$$

式中, T 为水滴的温度,K.

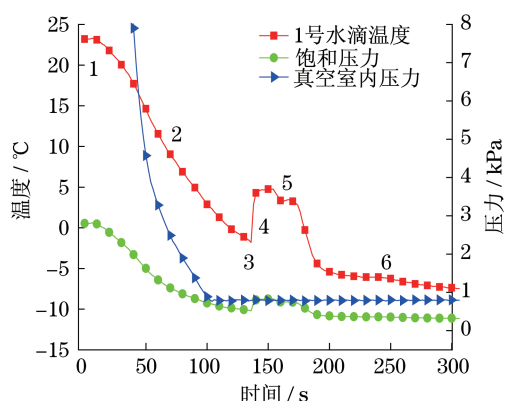


图2 1号水滴的温度变化曲线(终压800 Pa)

Fig.2 Temperature curves of the No.1 droplet (final pressure is 800 Pa)

由图2可知,水滴温度经历了缓慢降温、快速降温过冷、初始晶核生成、释放潜热、冻结过程和降温至环境平衡温度这6个阶段^[11].可以发现,在冷却过程中真空室内实测压力 P 高于水滴温度对应的饱和压力 P_s ,实验中未发现水滴沸腾,但温度却一直降低至0℃以下并且结冰,终温降到了-7.4℃.说明水滴在真空条件下,即使不发生沸腾,温度也会迅速降低.但这和已报道的食品真空冷却的降温规律差别很大.例如,研究人员发现水分沸腾前食品的降温幅度很小,降温主要发生在沸腾阶段^[12].Ozturk等^[8]发现终压设置越高,卷心菜的终温越高,终压低于700 Pa可以使菜温降至6℃以下,而终压高于1500 Pa时菜温无法降至10℃.造成这种差别的原因可能有以下3个方面:

a. 水分沸腾前只能靠表面蒸发带走热量.食品表面的水分很少,大部分水都在食品孔隙中,增加了水分蒸发的传质阻力,减小了蒸发速率,而水滴的蒸发速率不会受到这方面的影响.

b. 水分蒸发产生的冷量必须靠导热传递到食品内部.食品的体积和内能较大,表面水分蒸发产生的冷量被食品内部热量迅速抵消,温度难以降低.因此,必须不断降低真空室压力使食品内部水分沸腾,达到降温的目的.而水滴质量很小,水分蒸发带走的热量就足以使水滴温度迅速降低.例如,华泽钊等^[13]通过计算得出纯水每失水1%大约可以产生

6.1℃的降温.因此,即使水滴不沸腾,仅蒸发产生的冷量也会使温度迅速降低.

c. 真空室中的水蒸气分压力受食品装载量的影响.食品真空冷却时真空室的装载量较大,食品表面的水分蒸发量大,这些水分进入真空室中,使水蒸气分压力升高,减小了食品表面水分蒸发的传质驱动力,使蒸发速率降低.而本实验中真空室中仅放入3个水滴,其蒸发量对真空室的水蒸气分压力影响很小,随着真空泵的抽气,真空室内水蒸气分压力迅速减小,使水分更容易蒸发吸热.

根据以上分析可知,如果在真空冷却中,真空室的装载量很小,而食品表面含水量很大或有水滴时,应适当调整工艺参数,避免水滴结冰造成食品冻伤.

2.2 水滴质量对温度变化的影响

图3为终压800 Pa时3个培养皿中水滴的温度变化曲线,由图3可知,3个水滴的温度都很快降至0℃以下并且出现结冰现象.由于本实验中的水滴为自来水,其中含有杂质,因此,存在一定的过冷度.当温度降至冰点时,水滴表面首先冻结放热,温度迅速回升至5℃左右,随后内部逐渐冻结.冻结之前3个水滴的降温速率基本一致,这是因为水滴质量增加的同时其表面积也在增加,水分蒸发带走的热量增加,因此,冻结点之前在一定范围内改变水滴质量对水滴温度的影响不大.

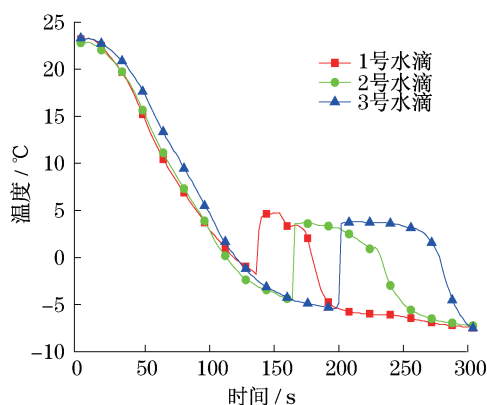


图3 不同质量水滴的温度变化曲线(终压800 Pa)

Fig.3 Temperature curves of droplets with different masses (final pressure is 800 Pa)

继续降温时,水滴质量越小,越先冻结,冻结过程持续的时间随水滴质量的增加而延长.这是因为水滴越大,冻结时释放的热量越多,水分蒸发带走这部分热量需要的时间越长.通过图3还可以发现,水滴质量对终温的影响不大,这是因为终压一定,随着水滴温度的降低,蒸发驱动力减小,

蒸发带走的热量减少,导致水滴温度无法继续降低.宋晓燕等^[14]认为上海青在真空预冷时应设定终压为 800 Pa,然而如果上海青表面有水滴时,水滴温度可能会迅速降低直至结冰,造成表面局部冻伤.因此,在真空预冷时,应避免果蔬表面出现大水珠,喷水时应喷洒均匀,尽可能使水以膜状覆盖在果蔬表面,这样可以使果蔬温度更加均匀且避免冻伤.当喷水量增大时,预冷终压也应适当提高,防止果蔬表面水分结冰.

为了进一步探究水滴真空冷却的降温规律,本文设计了实验 2 和实验 3,分别研究在不同压力下减小真空泵排量以及提高终压对水滴温度的影响.

2.3 不同降速起始压力对水滴温度的影响

表 1 为改变降速起始压力的实验结果,从表中数据可以看出,无论在哪个压力时降低排量都无法防止水滴结冰.宋晓燕等^[15]发现在水的闪点附近减小真空泵排量可以抑制气泡生长,减小失水量.但是,由于本实验中水滴一直没有发生沸腾,因此,改变排量对失水的影响很小,对防止水滴结冰没有明显作用.随着降速起始压力的增加,水滴降至 0℃ 需要的时间增加.在同样的降速起始压力下,水滴质量越大,降温速率越缓慢,降至 0℃ 需要的时间越长.因此,在真空冷却时减小真空泵排量虽然可以延缓水滴降温速率,但无法防止结冰.可见真空泵排量不

表 1 不同降速起始压力降温的实验结果

Tab.1 Experimental results of the displacement reduction under different pressures

降速起始压力/Pa	水滴质量/g	到 0℃ 用时/s	是否结冰
不降速	0.1	110	是
	0.2	126	是
	0.3	134	是
5 000	0.1	196	是
	0.2	202	是
	0.3	210	是
10 000	0.1	234	是
	0.2	248	是
	0.3	264	是
15 000	0.1	264	是
	0.2	274	是
	0.3	286	是
20 000	0.1	280	是
	0.2	288	是
	0.3	302	是

是造成水滴结冰的主要原因,在实际生产中仅降低排量对防止果蔬冻伤意义不大.

2.4 终压对温度的影响

终压是食品真空冷却的重要参数,不仅会影响食品终温,还会影响食品品质.图 4 为实验 3 测得的 2 号水滴在不同终压下的降温曲线.由图 4 可知,随着终压升高,水滴降温速率减小,降至 0℃ 需要的时间延长,终温升高.终压设置在 3 500 Pa 以下时水滴温度会低于 0℃,设置在 2 000 Pa 以下时水滴会结冰.可见终压是决定终温和降温速率的关键因素.这是因为随着终压的降低,水分蒸发的驱动力增大,水分蒸发产生的冷量增加,造成的温降增加.在实际生产中,如果果蔬表面有较大的水滴,真空预冷时假如水滴蒸发产生的冷量不能及时传递到食品内部,水滴温度就会迅速降低甚至结冰,造成果蔬冻伤.因此,为了避免冻伤,同时满足预冷要求,可以先对果蔬进行处理,使其表面的水滴铺开成膜.此外,冷却液体食品时可以通过搅拌强化食品内部换热.例如, Feng 等^[16]在对香肠进行浸没式真空冷却时,在浸没液中加入搅拌器,使香肠的降温速率大大提高.

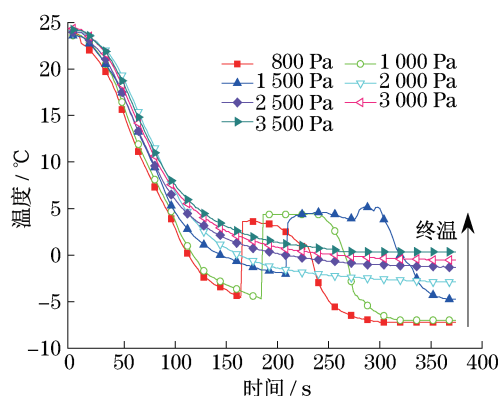


图 4 不同终压 2 号水滴的温度变化

Fig.4 Temperature curves of the No.2 droplet under different final pressures

3 结 论

讨论了水滴在真空冷却时的降温规律,探究了水滴质量、真空泵排量和终压对水滴温度变化的影响.根据实验结果得出结论:

a. 水滴和已报道食品降温规律差别很大,即使不发生沸腾,水滴温度也会迅速降低甚至结冰.

b. 在终压不变的情况下,改变水滴质量和真空泵排量不能阻止水滴结冰.

c. 真空冷却终压低于 3 500 Pa 会使水滴温度低于 0 ℃,低于 2 000 Pa 会使水滴结冰.

参考文献:

- [1] Sun D W, 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.
- [2] Martiinez J A, Artés F. Effect of packaging treatments and vacuum-cooling on quality of winter harvested iceberg lettuce[J]. Food Research International, 1999, 32(9): 621 - 627.
- [3] He S Y, Li Y F. Experimental study and process parameters analysis on the vacuum cooling of iceberg lettuce[J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49(10): 2720 - 2726.
- [4] 王雪芹, 刘宝林. 蔬菜真空预冷中降低失水率的方法研究[J]. 制冷学报, 2013, 34(2): 81 - 84.
- [5] 康平. 蔬菜真空冷却工艺的实验研究[J]. 制冷与空调, 2012, 12(6): 65 - 69.
- [6] 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.
- [7] 王雪芹, 陈儿同, 周冰. 蔬菜真空冷却喷水率的研究[J]. 食品工业科技, 2005, 26(4): 72 - 74.
- [8] Ozturk H M, Ozturk H K. Effect of pressure on the vacuum cooling of iceberg lettuce[J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 32(3): 402 - 410.
- [9] 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.
- [10] Houška M, Podlouck Š, Zitný R, et al. Mathematical model of the vacuum cooling of liquids[J]. Journal of Food Engineering, 1996, 29(3/4): 339 - 348.
- [11] 隋冬雨, 金哲岩, 杨志刚. 冷表面上水滴结冰问题的实验研究进展[J]. 制冷学报, 2015, 36(2): 14 - 20.
- [12] 范磊, 李保国, 雷海斌, 等. 真空冷却过程中飞溅现象分析及其防止研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(7): 127 - 129.
- [13] 华泽钊, 宋晓燕. 关于真空冷却实验中的一些问题[J]. 制冷学报, 2012, 33(3): 54 - 57.
- [14] 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.
- [15] 宋晓燕, 刘宝林. 真空冷却过程中气泡生长对水的失重率的影响[J]. 制冷学报, 2014, 35(3): 109 - 113.
- [16] Feng C H, Drummond L, Zhang Z H, et al. Evaluation of innovative immersion vacuum cooling with different pressure reduction rates and agitation for cooked sausages stuffed in natural or artificial casing[J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 59(1): 77 - 85.

(编辑:石 瑛)