

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2017.06.006

抽气速率对真空冷却机捕水效果的影响

范昌浩, 陆颖, 余晓明, 夏元通

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要:真空泵的抽气速率和捕水器的捕水能力是决定真空冷却效果的关键因素。为了找到二者的最佳配合方式,课题组基于自主设计的变频真空预冷机(配有一个气流路径可调的捕水器),采用3种抽速方案进行实验。结果发现:适当地改变抽速对捕水效率和失水率有显著影响($P < 0.05$),尤其是采用慢抽速方案可以使捕水效率提高3倍,使失水率减小78.75%。该研究可为真空冷却泵进一步降低能耗、提高产品冷却效果提供参考依据。

关键词:真空冷却;失水率;捕水器;捕水效率;抽速

中图分类号:TB752

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2017)06-0027-05

Effect of pumping rate on water capture efficiency of vacuum cooling machine

FAN Changhao, LU Ying, YU Xiaoming, XIA Yuantong

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

Abstract: The pumping speed of the vacuum pump and the water capturing capacity of the water catcher are the key factors to determine the effect of vacuum cooling. In order to find the best combination of the two, a self designed frequency conversion vacuum refrigerator (with a water path adjustable water collector) was adopted, and 3 pumping speed schemes were adopted to carry out the experiment. The results showed that the pumping speed and water loss rate were significantly affected by the change of pumping speed ($P < 0.05$), especially the slow pumping rate, and the water harvesting efficiency was increased by 3 times, and the water loss rate was reduced by 78.75%. The influence of vacuum pumping speed on water capture effect is studied, which provides a basis reference for vacuum cooling to further reduce energy consumption and improve product cooling effect.

Keywords: vacuum cooling; moisture loss rate; water catcher; water capture efficiency; pumping rate

农产品冷链物流发展规划显示,我国农产品中果蔬、肉类和水产品流通腐损率分别达到20%~30%、12%和15%,仅果蔬一类每年损失就达到1000亿元以上^[1]。温度过高是造成食品腐烂的主要原因^[2]。研究表明,采用冷链运输可以有效保持农产品品质,延长货架期^[3],因此,发展农产品冷链技术迫在眉睫。目前常用的冷却方式有空气冷却、水冷却、冰冷却和真空冷却等。其中,真空冷却不仅降温速率最快,而且能效比最高^[4],对于保持食品品质有利。姜莎等^[5]发现草莓经真空冷却后腐败速率明显降低。但真空冷却是利用食品内部水分在低压下蒸发吸热而降温,因此会

增加食品的质量损失^[6]。很多研究表明,采用合适的降压速率不仅可以减少失水,也可以提高食品品质^[7-8]。但这些研究中,控制降压速率的方法是通过调节渗气阀或者改变真空泵数量实现的,造成了很大的能源浪费。宋晓燕等^[9-10]尝试了通过调节真空泵抽速来控制降压速率的方法,结果表明在闪点附近降低抽速不仅可以降低火腿的真空冷却失重,还有助于降低能耗。

然而,以上研究仅侧重分析了抽速对食品品质及失水率的影响,没有考虑抽速对捕水器捕水效果的影响。刘洋等^[11]在假设制冷系统提供冷量足够的前提

收稿日期:2017-07-26;修回日期:2017-09-17

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

第一作者简介:范昌浩(1991),男,山东栖霞人,硕士研究生,主要研究方向为制冷与低温工程。E-mail:370858284@qq.com

下,通过数值计算得到了捕水器的捕水量,但未实验验证。

为此,笔者根据宋晓燕等的实验结果,选定3种抽速方案(1.2,1.6和2.0 L/s)对捕水量进行量化,从而进一步为真空泵抽速和捕水器表面温度的优化匹配提供参考。

1 实验设备和方法

1.1 实验设备及工作原理

1.1.1 实验设备

自制变频真空预冷机,如图1所示。本设备配有1个气流路径可调的捕水器(本实验中仅采用了常用的S形路径),可通过改变折流片的数量和位置调节气流路径,其实物结构如图2所示。

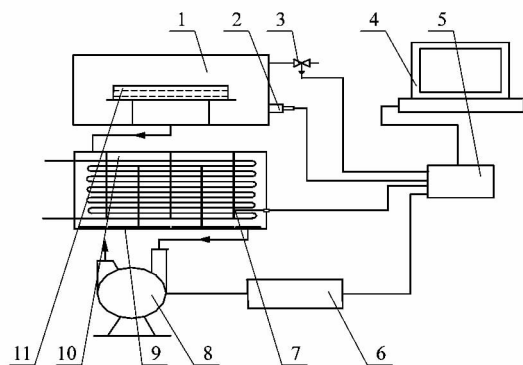
FA2204B精密电子天平,精度0.001 g,上海越平科学仪器有限公司出品;HH-1恒温水浴锅,精度0.1℃,常州博远实验分析仪器厂出品;T型热电偶,测温范围-200~350℃,精度等级I级,美国OMEGA公司出品。

1.1.2 工作原理

图1中的设备由真空系统、制冷系统、控制系统和数据采集系统组成。

真空室内盛放样品,真空泵用于抽除真空室内的气体。制冷系统的蒸发器作为捕水器,其作用是将实验过程中产生的水蒸气凝结为水滴,并由排水口排出。

控制系统由PLC、计算机和电气系统组成。由PLC采集各测点的温度和压力信号,并调节变频器的输出频率,进而改变真空泵的抽速。



1—真空室;2—压力计(Testo 435);3—电磁渗气阀;4—计算机;5—PLC(SIMATIC S7-200);6—变频器;7—T型热电偶;8—真空泵;9—吸水纸;10—捕水器;11—样品。

图1 变频真空预冷机原理图

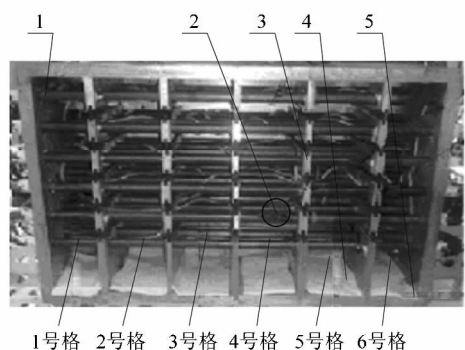
Figure 1 Schematic diagram of variable frequency vacuum pre-cooler

1.2 实验材料

实验材料包括自来水、强吸水纸和600 mL盛水容器(直径65 mm)。

1.3 实验方法

1) 打开捕水器门,确保捕水器内干燥后将事先准备好的6块吸水纸称质量,记为 $m_{i,1}$ ($i=1,2,\dots,6$, i 代表与捕水器格子号码对应的吸水纸的编号),依次放在捕水器的1~6号格子底部(如图2),关闭捕水器门。



1—水蒸气入口;2—T型热电偶;3—可调折流片;4—吸水纸;5—水蒸气出口。

图2 气流路径可调的捕水器实物图

Figure 2 Material drawing of water catcher with adjustable air flow path

2) 将加热好的55℃的水取出连同容器一起称质量(记为 $m_{w,0}$)并置于真空室中,然后将T型热电偶固定于水面下约3 cm处,关闭真空室门。

3) 整个冷却过程由PLC自动控制。首先启动制冷系统,当捕水器温度达到3℃时真空泵启动。在真空泵运行过程中,PLC通过改变变频器的输出频率改变真空泵的抽速,3种抽速方案如表1所示。

表1 3种降压速率方案

Table 1 Rate scheme of three pressure drops

抽速 方案	抽速/(L·s ⁻¹)		
	101 325 ~ 20 000 Pa	20 000 ~ 2 000 Pa	2 000 ~ 800 Pa
1	2.0	1.2	2.0
2	2.0	1.6	2.0
3	2.0	2.0	2.0

4) 当T型热电偶测得温度达到试验预设温度时,关闭掉预冷机,打开电磁渗气阀。当系统压力慢慢降到常压后,将样品和容器一同取出进行称质量(记为 $m_{w,1}$)。

5) 将补水器门打开,分别取出6个格子中的吸水纸,并将格子对应的铜管表面进行擦拭,要确保铜管表面的水分完全被吸水纸吸收,并对吸水纸进行称质量,记为 $m_{i,2}$ ($i=1,2,\dots,6$, i 为吸水纸编号)。

整个实验过程中,电脑将会采集样品温度、铜管表面温度以及系统压力并记录成表,数据采集周期为5 s。

1.4 参数计算

1.4.1 失水率的计算^[12]

样品的失水率利用下式计算:

$$A = (m_{w,0} - m_{w,1}) / (m_{w,0} - m) \times 100\%$$

式中: A 为失水率,%; m 为容器质量,kg; $m_{w,0}$ 为冷却前容器及内部水分总质量,kg; $m_{w,1}$ 为冷却后容器及内部水分总质量,kg。

1.4.2 补水率的计算

每块吸水纸在实验前后质量的变化为:

$$\Delta m_i = m_{i,2} - m_{i,1} \quad (i=1,2,\dots,6)$$

补水器补水效率即补水器捕集到的水的质量与样品失水量之比,利用下式计算:

$$\varepsilon = \frac{\sum_{i=1}^6 \Delta m_i}{(m_{w,0} - m_{w,1})} \times 100\%$$

式中 ε 为补水器的补水率,%。

1.5 数据分析

每组实验重复3次,测定值以平均值 $\pm$ 标准差表示。组间分析采用 t 检验,显著性界值以 $P < 0.05$ 为显著, $P > 0.05$ 为不显著。

2 实验结果及分析

2.1 不同抽速方案对样品降温速率的影响

由图3可知,无论采用哪种抽速方案,样品温度都经历了平缓、快速和平缓3个阶段。采用的抽速越大,样品进入快速降温阶段所需时间越短。这是因为抽速的增大缩短了真空室内压力达到闪点的时间。如图4所示,采用快速、中速、慢速方案达到闪点压力的时间分别为50、65和75 s。在快速降温阶段,抽速越大,降温越快,样品达到设定终温的时间越短。这是因为抽速越大,样品沸腾越剧烈,单位时间内蒸发带走的潜热越大。在快速、中速、慢速3种抽速方案中,样品达到预设温度所用的时间分别为300、780和1 015 s,可见增加抽速可以显著减少冷却时间。

2.2 不同抽速方案对补水器铜管表面温度的影响

补水器铜管的表面温度(下文中,简称为补水器的表面温度、或补水器温度)是影响补水效果的重要因素。当表面温度过高时,水蒸气无法凝结,将导致系

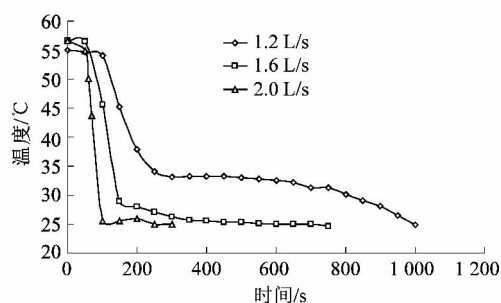


图3 不同抽速方案中样品温度变化曲线
Figure 3 Curves of sample temperature in different pumping speed schemes

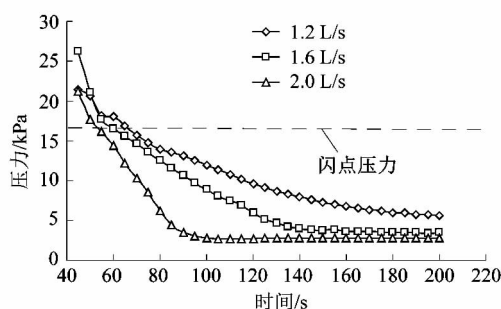


图4 3种抽速方案的压力变化曲线
Figure 4 Pressure variation curves of three pumping speed schemes

统压力降低缓慢,延长冷却时间,严重时会影响真空泵的正常运转;如果表面温度过低,凝结的水分会在铜管表面结霜或结冰,使换热系数降低^[13],不仅不利于水蒸气凝结,还会使制冷系统的能耗增加^[14]。因此,补水器表面温度是决定补水效果的重要因素。

从图5可以看出:在2.0 L/s抽速方案中,补水器温度在75 s时快速上升,过15 s后达到最高20.2 °C,随后温度逐渐下降;在1.6 L/s抽速方案中,补水器温度在115 s时迅速上升,此时温度为4.4 °C,在时间到达205 s时温度达到最高,此时温度为12.2 °C,后续温度基本保持不变,在385 s时温度开始降低;在1.2 L/s的抽速方案中,前期温度一直变化不大,一直维持在5.0 °C以内,时间到达900 s时温度才逐渐上升,待到实验结束,温度为7.7 °C。在抽速为2.0 L/s和1.6 L/s方案中,由于真空室中的样品沸腾产生水蒸气,然后迅速进入补水器冷凝,放出大量热量,补水器温度迅速升高。当补水器提供的冷量小于水蒸气冷凝产生的冷凝热时,温度就会升高^[15]。而在抽速为1.2 L/s方案中,样品也处于慢速沸腾状态,水蒸气产生速度慢,补水器能完全吸收掉冷凝产生的冷凝热,从而使补水

器温度变化不大。

由此可见,当初始捕水器提供的冷量一定时,过快的抽速会使捕水器温度剧烈升高而降低捕水能力。因此在实际生产中应该使捕水器冷量和真空泵的抽速相匹配,避免捕水器表面温度的大幅度升高。

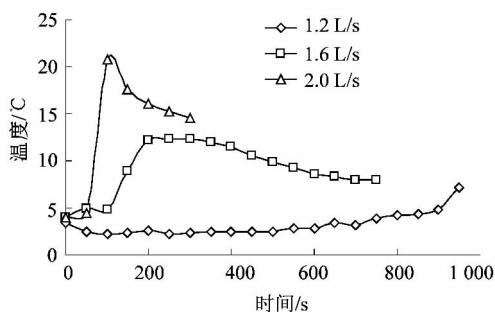


图5 不同降压速率下捕水器温度的曲线
Figure 5 Temperature curve of water catcher under different pressure drop rate

2.3 不同抽速方案对样品失重率的影响

由图6可知,失水率随着抽速的增加呈现显著增加的趋势。采用1.2 L/s的抽速失水率仅为5.6%,与采用传统的自然冷却的失水率相当(4.8%)^[16]。而采用2.0 L/s的抽速时失水率高达26.35%,是采用1.2 L/s抽速的失水率的4.7倍。可见,采用过大的抽速会使食品的失水率显著增加,在实际生产中采用合适的抽速是非常必要的。

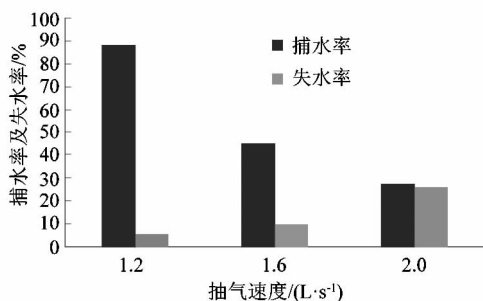


图6 不同抽速下失水率和捕水效率的变化
Figure 6 Variation of water loss rate and water holding efficiency under different pumping speeds

表2 不同抽速方案下捕水器各部分的捕水量和样品失水量

Table 2 Water capture and water loss of each part of water catcher under different pumping speed schemes

方案	捕水量/g					
	1号格	2号格	3号格	4号格	5号格	6号格
快速	7.62 ± 0.38	5.45 ± 0.28	4.14 ± 0.16	3.09 ± 0.13	1.77 ± 0.09	0.98 ± 0.07
中速	7.50 ± 0.50	3.15 ± 0.09	1.26 ± 0.04	1.18 ± 0.05	1.03 ± 0.04	0.85 ± 0.10
慢速	8.41 ± 0.19	5.28 ± 0.05	2.23 ± 0.13	1.17 ± 0.15	0.01 ± 0.01	0.00 ± 0.00

2.4 不同抽速方案对捕水器捕水效果的影响

捕水器表面温度的变化势必会影响到捕水量。但由于捕水器一般是密封在真空容器中,很难对其捕集的水量进行量化。本实验设计了可拆卸的捕水器,能够测出捕水器各部分的捕水量。

表2中列出了3种抽速方案中捕水器不同部分的捕水量。从表中可以看出捕水器中各部分的捕水量差别很大,而且随着格子距蒸气入口距离的增加逐渐减少。表2表明,抽速变化对第1格的捕水量无明显影响,但对第2格和第3格的影响非常显著。这是因为捕水器初始表面温度较低,蒸气刚进入时被迅速凝结,随后由于抽速不同,蒸气在捕水器中的流动速度也不同,与铜管表面的接触几率不同,导致第2格和第3格的捕水量出现较大差异。

对比同一抽速方案时不同格子的捕水量可以发现,前4个格子捕集了大部分水蒸气,后面2个格子捕集到的水量很少,特别是在慢抽速方案中,后面2个格子几乎没有捕集到水蒸气。因此在捕水器提供冷量不变的情况下,降低抽速可以提高捕水器的冷量利用率。一些关于捕水器设计计算的文献中都是在假设冷量足够(水分被完全捕集)的前提下,按照普通换热器的计算方法进行的。但实际操作中真空泵抽速会影响捕水效果,因此在设计捕水器时应当考虑真空泵抽速的影响,而不能完全按照普通换热器进行计算,否则将直接影响到企业的经济效益^[17]。

从图6可以看出,抽速高时,捕水效率低,随着抽速的降低,捕水效率显著提高。这是因为高抽速时,样品会发生飞溅,会在真空室中残留一部分水分,并且捕水器时水蒸气流速很快,一部分水蒸气还没有完全冷凝,就会被真空泵抽走^[18]。而将抽气速度降低后,上述情况就会得到很好的解决,样品飞溅的水分减少,水蒸气在通过捕水器时有充分的时间冷凝。但也应注意到,即使采用慢抽速方案,捕水率也仅为88.4%,有一部分水没有被冷凝。原因可能是捕水器初始表面温度过高,即使采用慢抽速也无法使水蒸气完全凝结。

3 结论

真空冷却方式是目前能效最高、降温最快的一种冷却方式,真空泵的抽气速率是影响真空冷却效果的关键因素。笔者基于自主设计的变频真空预冷机,对3种抽气速率进行了试验。试验发现,降低真空泵的抽气速度可以减少样品的失水量。采用1.2 L/s的低速抽气时,实际失水量和理论失水量非常接近。并且抽气速度降低也会减小补水器内温度回升,提高补水器的补水效率。但是降低真空泵抽速也会延长真空冷却的时间。因此,对于要求温降速率快而不关注失水量的食品应采用快抽速进行冷却。而对于价格高的食品,大量失水会降低经济效益,此时可以在关键指定的压力范围内采用慢抽速进行冷却。本课题组选用了3种抽速方案,以1.2 L/s为慢抽速,会在后续工作中选择多组慢抽速进行比较,选出最优抽速。

参考文献:

- [1] 国家发展和改革委员会. 农产品冷链物流发展规划[EB/OL]. (2010-07-28) [2017-07-10]. http://www.gov.cn/gzdt/2010-07/28/content_1665704.htm.
- [2] Food Safety and Inspection Service. Performance standards for the production of certain meat and poultry products[G]. Washington D C; Office of Federal Register, National Archives and Records Administration, 1999.
- [3] 高恩元,荆华乾. 番茄冷链运输保鲜技术研究[J]. 制冷技术, 2014, 34(5): 49-53.
- [4] THOMPSON J F, CHEN Y L. Comparative energy use of vacuum, hydro, and forced air coolers for fruits and vegetables[J]. American society of heating, refrigeration and air conditioning engineers transactions, 1988, 94: 1427-1433.
- [5] 姜莎,刘颖,刘宝林,等. 草莓真空预冷及冷藏实验研究[J]. 制冷技术, 2012, 32(1): 32-36.
- [6] 苏树强,肖洪海,华泽钊. 食品真空冷却的机制、特性与实验装置[J]. 制冷技术, 2002, 22(2): 7-11.
- [7] FENG Chaohui, DRUMMOND L, ZHANG Zhihang, 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.
- [8] FENG Chaohui, DRUMMOND L, ZHANG Zhihang, et al. Effects of processing parameters on immersion vacuum cooling time and physico-chemical properties of pork hams[J]. Meat science, 2013, 95(2): 425-432.
- [9] SONG Xiaoyan, LIU Baolin. The optimization of volumetric displacement can uniformize the temperature distribution of heated ham during a vacuum cooling process [J]. Food science and technology research, 2014, 20(1): 43-49.
- [10] 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.
- [11] 刘洋,申江,邹同华,等. 真空预冷中补水器的理论研究[J]. 真空与低温, 2004, 10(4): 230-234.
- [12] 刘洋,宋晓燕,刘宝林. 真空冷却中降压速率对失水量和冷阱补水效率的影响[C]. 第九届全国食品冷藏链大会暨第六届全国冷冻冷藏产业创新发展年会论文集. 广州:中国制冷协会, 2014: 275-279.
- [13] JIN Tingxiang, LI Gailian, HU Chunxia. Influences of temperature of vapor-condenser and pressure in the vacuum chamber on the cooling rate during vacuum cooling [C]// Computer and Computing Technologies in Agriculture IV. Nanchang: IFIP, 2010: 41-52.
- [14] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社, 2006: 302-303.
- [15] 陈儿同,张华,徐彬凯,等. 真空冷却中能耗问题的分析研究[J]. 制冷学报, 2010, 31(3): 30-32.
- [16] SUN Dawen, WANG Lijun. Heat transfer characteristics of cooked meats using different cooling methods[J]. International journal of refrigeration, 2000, 23(7): 508-516.
- [17] 宋晓燕,刘宝林. 食品真空冷却技术研究进展[J]. 食品科学, 2014, 35(11): 319-323.
- [18] 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.

(上接第26页)

- [4] 刘焕宝,周惠兴,刘小龙,等. 3D打印在食品行业中的应用[J]. 中国农业文摘:农业工程, 2017, 29(2): 36-37.
- [5] 王博. 浅谈3D打印技术的发展与应用[J]. 机电技术, 2014(5): 158-160.
- [6] 古丽萍. 蓄势待发的3D打印机及其发展[J]. 数码印刷, 2011(10): 64-67.
- [7] 柴春祥,杜利农. 动力学模型在鱼肉品质变化中的应用[J]. 食品工业科技, 2006, 27(1): 75-76.
- [8] 张申林. 同步齿形带传动的可靠性优化设计[J]. 西安公路交通大学学报, 2000, 20(1): 105-107.
- [9] 曹国强,梁冰,包明宇. 基于FLUENT的叶轮机械三维紊流场数值模拟[J]. 机械设计与制造, 2005(8): 22-24.
- [10] 汤积仁,卢义玉,欧阳梦迪,等. 水力喷射压裂新型喷嘴设计优化及性能评价[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2015(1): 72-78.