

供液方式对蒸发平板温度场的影响

Influence of different mode of liquid supply on the temperature field of evaporated plate

贺卫东^{1,2}

万金庆^{1,2}

黄明磊^{1,2}

葛瑞^{1,2}

HE Wei-dong^{1,2}

WAN Jin-qing^{1,2}

HUANG Ming-lei^{1,2}

GE Rui^{1,2}

(1. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306; 2. 上海冷链装备性能与节能评价专业技术服务平台, 上海 201306)

(1. College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Professional Technology Service Platform on Cold Chain Equipment Performance and Energy Saving Evaluation, Shanghai 201306, China)

摘要:研究相同工况下平板速冻机不同供液方式的温度场分布,分析造成平板冻结速率不均的原因。分别进行冷凝温度为 35℃ 时射流泵和膨胀阀供液的速冻试验。结果表明:冻结结束时,使用膨胀阀供液冻品最低温度达到 -35.9℃,冻品最大温差 17.55℃,各层平板温差都较大,平板温度分布较为混乱;射流泵供液时,冻品的温度各层分布均匀,冻结结束时所有冻品最大温差 5.54℃,同时各层冻品的温差由上至下逐渐减小,平板冻结速率逐渐增加,其中最底层平板冻结时间比最上层约短 9.1%。证明蒸发平板的温度分布对系统冻结时间和能耗有影响。

关键词:供液方式;温度场;冻结速率;能耗

Abstract: This paper studied the temperature distribution of different mode of liquid supply in plate freezer under the same working condition, and analyzed the reasons for the inequality freezing rate of the flat plate. The freezing experiment of the fluid supply with ejector and the expansion valve at the same condense temperature in 35℃ was carried out respectively. The results showed that: at the end of freezing, the minimum temperature reached to -35.9℃ by using expansion valve, and the maximum temperature difference of frozen products was 17.55℃. The temperature difference of each layer was large, and the temperature distribution of plate was chaotic. In mode of ejector supplying liquid, frozen temperature distribution was uniform, the maximum temperature difference was 5.54℃ at the end of experiment. Meanwhile, each layer plate of temperature decreases gradually from top to bottom, freezing rate increases gradually, and the bottom plate freezing time was shorter than the top about 9.1%.

基金项目:国家高技术研究发展计划(编号:2012AA092301);上海市教育委员会产学研项目(编号:助推计划 15cxy68)

作者简介:贺卫东,男,上海海洋大学在读硕士研究生。

通信作者:万金庆(1964—),男,上海海洋大学教授,博士。

E-mail: jqwan@shou.edu.cn

收稿日期:2017-12-22

To a certain extent, this study can prove the effect of the temperature difference distribution of the evaporated plate on the freezing time and energy consumption.

Keywords: liquid supply; temperature field; freezing rate; energy consumption

中国经济的快速发展加剧了能源的消耗,其中制冷行业属于高耗能产业,其节能方面的研究意义重大^[1-2]。同时水产业迅猛发展,水产品的加工、运输和贮藏等环节的冷冻与保藏非常重要,而平板速冻机以冻结速度快,操作简便等优点在水产业得到了广泛应用^[3]。

在制冷系统的设计中,节流元件的选择非常重要,节流元件应用错误或选型不当,通常会造成系统运行困难和性能下降。制冷系统流量控制元件一般有 4 种:毛细管、节流孔、热力膨胀阀和电子膨胀阀^[4]。其中热力膨胀阀因为综合性能和价格的优势,在中小型制冷系统中得到了广泛应用,如应用于食品陈列柜、鼓风冻结装置、制冰设备、冰淇淋柜和空调装置^[5]。射流泵结构简单,不需要任何电力驱动。射流泵首次用作节流装置的研究是在 20 世纪 80 年代, Lorentzen 等^[6]用射流泵代替节流阀,优化蒸发器性能。随着数值模拟技术的发展,近年来射流泵的研究逐渐变成热点。张棣等^[7]使用不同的网格划分方法研究了射流泵性能的数值模拟与试验结果的适应程度; Dopazo 等^[8]在 NH₃/CO₂ 复叠系统中使用射流泵供液得到了一个 3.1 倍的循环倍率; Lawrence 等^[9]针对制冷剂节流损失的不同,研究了不同制冷剂在射流泵系统中的节能效果差异; Jeon 等^[10]研究了 COS 射流泵循环系统中最佳的射流泵几何参数和工况变化对射流泵性能的影响;肖欣等^[11]利用数值模拟分析了射流泵内部压力的分布,并对结构进行了优化;田晓雨等^[12]研究了不同冷凝温度对射流泵供液的速冻机性能的影响; Arun 等^[13]使用三维模型模拟了喷嘴的最优位置和内部流场的分布。

目前对于射流泵在制冷系统中应用的研究大部分停留在数值模拟阶段,而实际应用中的试验数据较少。在已有的射流泵研究基础上,本试验拟在相同工况时,研究膨胀阀和射流泵2种供液方式下速冻机蒸发平板的温度分布,旨在为从冻结均匀性方面解释射流泵供液的优越性,为进一步优化平板供液提供理论依据。

1 试验台系统

基于本试验小组提出的射流泵节流供液循环系统专利^[14],搭建平板速冻机综合实验台,其中包含热力膨胀阀供液和射流泵供液2种循环,系统原理简图见图1。

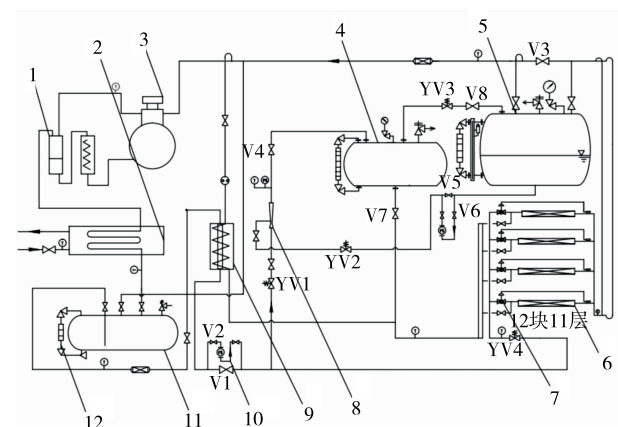


图1 2种不同供液方式系统原理图
1. 油分离器 2. 冷凝器 3. 压缩机 4. 气液分离供液桶 5. 低气液分离循环桶 6. 平板蒸发器 7. 热力膨胀阀 8. 射流泵 9. 回油换热器 10. 流量计 11. 高压储液桶 12. 磁翻板液位计

Figure 1 Schematic diagram of different fluid supply systems

(1) 热力膨胀阀供液:该系统由压缩机、冷凝器、高压贮液桶、热力膨胀阀、蒸发平板组成。根据图1,热力膨胀阀供液时,打开阀门V2、V3、电磁阀YV4,其他阀门全部关闭(未标注阀门均为打开状态)。冷凝后的制冷剂通过热力膨胀阀直接进入平板内蒸发。膨胀阀供液系统原理图见图2。

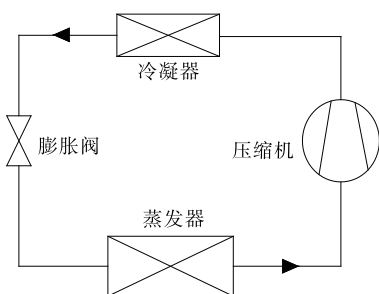


图2 膨胀阀供液系统原理图
Figure 2 Schematic diagram of expansion valve system

(2) 射流泵供液:该系统由压缩机、冷凝器、高压贮液桶、气液分离循环桶、气液分离供液桶、平板蒸发器组成。根据图1,射流泵供液系统运行时,关闭截止阀V1、V3、V5、电磁阀YV4,其他阀门全部打开(未标注阀门均为打开状态)。气液分离循环桶的液态制冷剂会被射流泵抽回,经过气液分

离供液桶分离后,液态制冷剂继续循环供给蒸发器,而气态制冷剂则被压缩机抽回。射流泵供液系统原理图见图3。

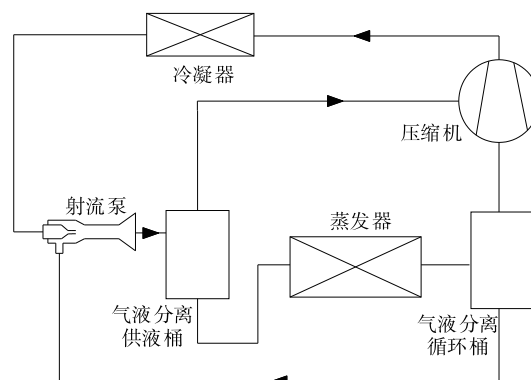


图3 射流泵供液系统原理图
Figure 3 Schematic diagram of ejector system

2 试验装置与结果分析

试验在南通的春季进行。试验台单级半封闭螺杆压缩机:型号 HSN7471-75,功率 55 kW,比泽尔压缩机(北京)有限公司;机组配置水冷式冷凝器,平板尺寸 2 000 mm × 1 260 mm,数量 12 块(22 个面),层间距 55~100 mm,冻结能力 1 300 kg/批;制冷剂:R507,上海锐一贸易有限公司;冻品温度采用 T 型热电偶进行测量,精度为 ±0.5 °C,温度记录仪型号为安捷 34972A,扫描频率为 10 s/次,华仪仪表有限公司;采用 DZFC-1 型的电能综合分析测试仪测量系统能耗,德科技有限公司。速冻机每层平板放置 8 个托盘,将海绵放入托盘并加适量纯水,使海绵和平板充分接触,以此模拟冻品。选取平板中心处的托盘布置温度测点,并置于托盘中心位置。本次试验冷凝温度为 35 °C,当所有测点均降至 -18 °C 以下时,冻结过程完成。本次试验选取第 1、6、11 层 3 个最有代表性平板的进出口 4 个托盘布置测点,平板速冻机分别在膨胀阀和射流泵供液方式下,各测点的冻结曲线见图 4、5。

冻品初始温度以 10 °C 为基准,2 种供液方式下平板速冻机冻结性能见表 1。

从图 4、5 和表 1 看出,膨胀阀供液时,冻品整体温度分布比较混乱,各层平板温差较大,冻结结束时最大温差可达 17.5 °C,最低冻品温度达到了 -35.9 °C,远远超过了一 18 °C 的目标温度。射流泵供液时,各层冻品温度分布均匀,冻结结束时最低冻品温度为 -23.68 °C;从整体上看射流泵供液时的平板温差有从下到上逐渐增大的规律。从冻结时间上分析,膨胀阀供液第 1 个达到 -18 °C 的冻品只用了 89 min,距离整个试验结束相差 42 min,因为温度分布不均极大地拉长了冻结时间和冻结结束时的温差,增大了能耗。射流泵供液在 111 min 时第 1 个测点达到目标温度,10 min 后所有测点冻结完毕,相比膨胀阀不会因为已经达到目标温度的测点温度一直下降而导致太多电能的浪费。分析原因有:

(1) 经过膨胀阀节流的制冷剂因为存在一定的闪发,导致供到平板内的制冷剂分布不均,从而使温度场混乱;而射

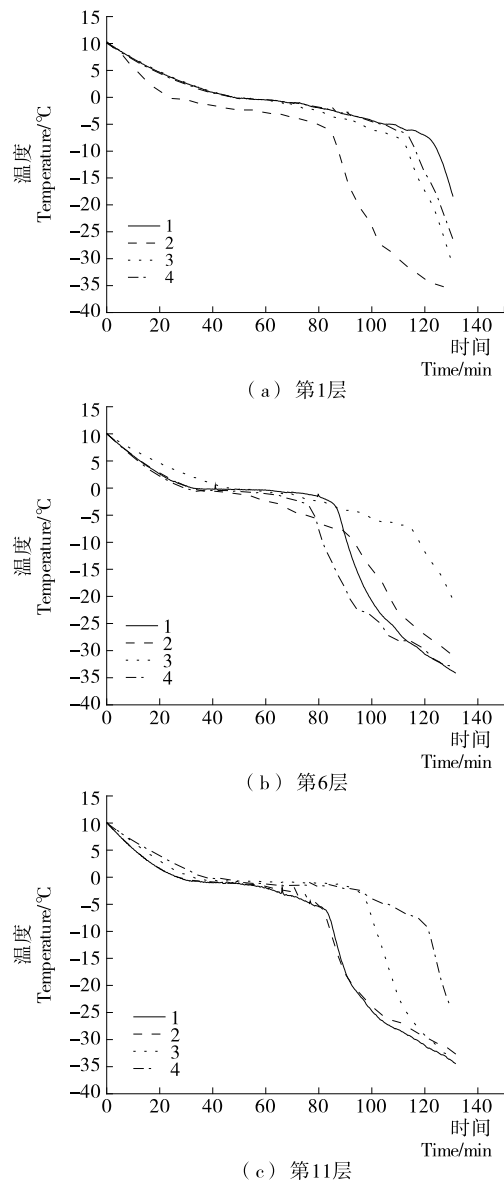


图 4 膨胀阀供液不同平板冻品温度曲线
Figure 4 The freezing curve of expansion valve system

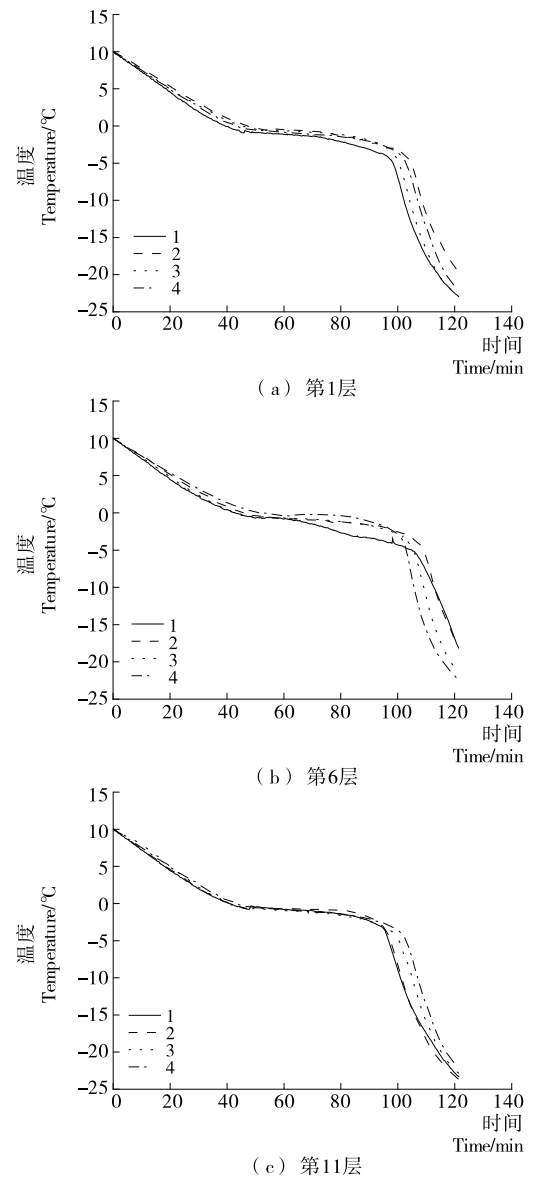


图 5 射流泵供液不同平板冻品温度曲线
Figure 5 The freezing curve of ejector system

表 1 2 种供液方式冻结性能对比

Table 1 The freezing performance of two fluid supply system

供液方式	第 1 层温差/ ℃	第 6 层温差/ ℃	第 11 层温差/ ℃	测点最高 温差/℃	冻结时间 t/min	能耗 $E/\text{(kW} \cdot \text{h)}$
膨胀阀	8.99	17.55	12.49	17.55	131	78.7
射流泵	4.25	3.45	1.11	5.54	121	72.9

流泵供液系统保证了平板的纯液体供液,而且供液量大于平板的蒸发量,充分地浸润平板使其温度场更加均匀。

(2) 射流泵供液冻结效果底部平板优于上部,是因为制冷剂进入平板前经过了竖管的分配,由于重力的作用使下方平板的制冷剂量大于上方平板,过量的制冷剂加快了平板的冻结速率,同时平板各处温度均匀下降,提升了冻结的质量。

3 结论

(1) 使用膨胀阀供液时,平板中所有测点的最高温差达

到了 17.55℃,与-18℃的目标温度相比,过高的温差导致了能耗的增加;而使用射流泵供液使平板温度分布更加均匀,冻结结束时,平板中测点的最高温差只有 5.54℃,一定程度上保证了冻品的品质。

(2) 使用射流泵供液时各层平板温度分布较为一致,但是整体的冻结效果从上到下逐渐变优,底层的冻结时间比最上层大约减少 9.1%,同时,系统的最高温差也分布在最上层的平板上。

(下转第 197 页)

- [4] 尹乐斌, 张臣飞, 孙菁, 等. 一株产细菌素乳酸菌的分离、鉴定及生物学特性研究[J]. 食品与机械, 2016, 32(3): 12-15.
- [5] 努丽艳·阿布都米力克, 沙吉坦穆·克依斯尔, 阿依古扎·伊布拉音, 等. 新疆传统发酵乳骆驼乳乳酸菌粘附特性及益生特性研究[J]. 食品与机械, 2016, 32(4): 42-46.
- [6] MOHAMMED S A, BALTASAR M. Selection criteria for lactic acid bacteria to be used as functional starter cultures in dry sausage production: a update[J]. Meat Science, 2007, 76(3): 138-146.
- [7] 张聪, 周光宏, 徐幸莲, 等. 一种复合微生物发酵剂对发酵香肠品质的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(1): 182-188.
- [8] 杨菊. 益生菌发酵鱼糜制品的安全品质的研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2017: 8-21.
- [9] 孟繁博, 张万萍, 吴康云. 接种发酵对酸菜品质的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(3): 179-183.
- [10] 龚钢明, 管世敏. 乳酸菌降解亚硝酸盐的因素探讨[J]. 食品工业, 2010(5): 6-8.
- [11] 刘丛丛, 纪凤娣, 李博. 接种与调酸发酵对白菜中亚硝酸盐含量的影响[J]. 食品工业科技, 2013, 34(10): 215-218.
- [12] 张露, 张雅玮, 惠腾, 等. 低钠干腌肉制品研究进展[J]. 肉类研究, 2013, 27(11): 45-49.
- [13] 闫晓蕾. 山梨糖醇在香肠制品中的持水作用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2012: 8-12.
- [14] 邹霞, 林爱华. 高血压知识、健康信念对食盐和烹调油摄入量影响的研究[J]. 现代预防医学, 2012, 39(11): 2 679-2 681.
- [15] 谢诚, 刘忠义, 周宇峰, 等. 混合菌种发酵对草鱼肉微生物和生物胺变化的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2010(3): 167-172.
- [16] 王璐. 盐胁迫下乳酸菌的高密度培养及冻干保护的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010: 30-42.
- [17] 朱迎春, 杜智慧, 马俪珍, 等. 发酵剂对发酵香肠微生物及理化特性的影响[J]. 现代食品科技, 2015, 31(9): 198-204.
- [18] HU YONG-JIN, XIA Wen-shui, GE Chang-rong. Effect of mixed starter cultures fermentation on the characteristics of silver carp sausages[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2007, 23(7): 1 021-1031.
- [19] 沈清武. 发酵干香肠成熟过程中的菌相变化及发酵剂对产品质量的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2004: 25-36.
- [20] 熊潮慧, 陈一资. 香肠制品中降低亚硝酸盐残留量的方法[J]. 肉品卫生, 2005(5): 31-35.
- [21] 陈影, 王锦慧, 张文菱子, 等. 乳酸菌发酵黄瓜泡菜品质的研究[J]. 食品与机械, 2015, 31(4): 208-211.
- [22] 葛焱, 郭双霜, 陈安均. 泡菜中亚硝酸盐消长规律及调控技术研究进展[J]. 食品工业科技, 2015, 36(4): 382-385.
- [23] 中华人民共和国卫生部, 中国国家标准化管理委员会. GB 2707—2005 鲜(冻)畜肉卫生标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005: 1-2.
- [24] CONTRERAS B G, DE V L, DEVREESE B, et al. Isolation, purification, and amino acid sequence of lactobin A, one of the two bacteriocins produced by *Lactobacillus amylovorus* LMG P-13139[J]. Applied & Environmental Microbiology, 1997, 63(1): 13-20.
- [25] 马汉军, 周光宏, 余小领, 等. 中式发酵香肠 pH 与 A_w 的关系及其对产品风味的影响[J]. 食品研究与开发, 2009, 30(1): 87-91.

(上接第 100 页)

平板温度的分布可以影响到系统的冻结时间和能耗。针对射流泵供液整体上下不均匀的问题,如果在平板前使用分液头分配制冷剂,可以进一步优化温度场分布,提升冻结效果。

参考文献

- [1] 胡俊, 蒲彪, 何锦风. 真空冷冻干燥过程中节能措施探讨[J]. 食品与机械, 2007, 23(2): 122-125.
- [2] 杜子峥, 谢晶. 冷库节能减排研究进展[J]. 食品与机械, 2014, 30(1): 4-11.
- [3] 陈依水. 引射泵在平板速冻机制冷系统中的应用[J]. 渔业现代化, 1990(4): 19-21.
- [4] 李丽芬. 热力膨胀阀选型方法研究及对系统可靠性的影响[D]. 上海: 上海交通大学, 2008: 2-4.
- [5] 张剑萍. 制冷的基本装置——“膨胀阀”(上)[J]. 商场现代化, 1981(4): 18-22.
- [6] LORENTZEN G. Throttling, the internal haemorrhage of the refrigeration process[C]// The Plenary Session of the 16th IIR Congress. Paris: Proceedings of the Institute of Refrigeration, 1983: 39-47.
- [7] 张棣, 董祥伟, 李增亮, 等. 射流泵内流场数值计算的结构化网格划分方法[J]. 石油矿场机械, 2016, 42(11): 1-7.
- [8] DOPAZO J A, FERNÁNDEZ-SEARA J, SIERES J, et al. Theoretical analysis of a $\text{CO}_2\text{-NH}_3$ cascade refrigeration system for cooling applications at low temperatures[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(8): 1 577-1 583.
- [9] LAWRENCE N, ELBEL S. Experimental investigation of a two-phase ejector cycle suitable for use with low-pressure refrigerants R134a and R1234yf[J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 38(1): 310-322.
- [10] JEON Y, KIM S, KIM D, et al. Performance characteristics of an R600a household refrigeration cycle with a modified two-phase ejector for various ejector geometries and operating conditions[J]. Applied Energy, 2017, 205: 1 059-1 067.
- [11] 肖颀, 林原胜, 魏志国, 等. 射流泵内压力分布研究[J]. 舰船科学技术, 2017, 39(1): 85-89.
- [12] 田晓雨, 王金庆, 曹晓程, 等. 冷凝温度变化对两相射流泵供液平板速冻机的影响[J]. 食品与机械, 2016, 32(11): 71-73.
- [13] ARUN K M, TIWARI S, MANI A. Three-dimensional numerical investigations on rectangular cross-section ejector[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2017, 122: 257-265.
- [14] 王金庆, 宋立尧, 曹晓程, 等. 一种射流泵节流供液制冷系统: 中国, 102878715 B[P]. 2013-01-16.