

冷凝温度变化对两相射流泵供液平板速冻机的影响

The effects of condensing temperature changes on plate freezer with two-phase ejector

田晓雨

万金庆

曹晓程

厉建国

TIAN Xiao-yu WAN Jin-qing CAO Xiao-chen LI Jian-guo

(上海海洋大学食品学院, 上海 201306)

(College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

摘要:研究了在不同冷凝温度下平板速冻用两相射流泵的工作性能,分析了冷凝温度对模拟食品的冻结速率和平板速冻机系统总能耗的影响。通过改变冷凝温度,在稳定工况下测试引射系数,探究对射流泵性能的影响。结果表明:冷凝温度 25℃时,引射系数最大为 1.58,系统能耗比冷凝温度 30、40℃时分别降低 3.3%和 10%,冻结速率提高 12.5%和 17.5%。

关键词:平板速冻机;食品冷冻;冷凝温度;射流泵;冻结速率;能耗

Abstract: The working performance of plate freezer with two-phase ejector in different condensing temperature was investigated in this study. Moreover, the effects of condensing temperature on freezing rate and total energy consumption of plate freezer was also studied. Then the entrainment coefficient in stable conditions and explores the effects on Jet pumps were analyzed by changing the condensing temperature. The results showed that when the condensing temperature was 25℃, the ejecting coefficient was the highest about 1.58. Compared with 40℃ and 30℃, the energy consumption was lowered by about 3.3% and 10% at 25℃, and the freezing time was shortened by about 12.5% and 17.5%, respectively.

Keywords: plate freezer; frozen food; condensing temperature; ejector; freezing-rate; energy consumption

近年来中国经济持续快速增长,能源消耗加快,面临着资源不断减少,发展方式急需改革的问题。推行节能减排,提高资源利用率势在必行。制冷行业是高能耗产业,其节能方面的研究具有重大意义^[1-3]。中国的海洋捕捞业和水产

养殖业规模庞大,水产品的冷藏保鲜显得尤为重要。平板速冻机多数应用于船舶制冷,其能减少冻品干耗,提高冻品质量,同时常温下即可操作^[4]。随着冻结机数值模拟技术的发展,其应用范围逐渐广泛^[5]。平板冻结机供液方式主要有 3 种:热力膨胀阀供液、重力供液和液泵供液。其中,热力膨胀阀供液和重力供液为自然对流换热,制冷剂在平板内换热效果差,冻结时间较长,液泵供液属于强制对流换热,虽然提升了换热系数,降低了冻结时间,但由于液泵需要电力驱动而增加了系统电能的消耗^[6]。

射流泵具有结构简单,寿命长,无需电力驱动等优点。制冷系统中,射流泵最早应用于喷射式制冷,利用低位热源驱动制冷系统^[7],随后这方面研究逐渐增多。从 20 世纪 80 年代开始,射流泵作为节流装置应用到压缩式制冷系统中,起到蒸发器的倍量供液和回气增压的作用。射流泵代替节流装置,减少节流损失,驱动蒸发器的制冷剂液体再循环,以提高蒸发器的性能^[8]。目前射流泵正成为国内外研究热点之一:两相射流泵用作蒸汽压缩式制冷循环中的膨胀装置,优化制冷系统^[9]。采用数值模拟技术,分析射流泵工作性能及其内部复杂的工质流动,指导射流泵的实际设计与应用^[10-12]。Besagni G 等^[13]详细描述了制冷剂性质及其对喷射器性能的影响,并概述了工作流体和喷射器性能之间的关系。多级喷射器的研究也逐渐增多^[14-15]。

文献^[6]中已经证实,射流泵用作节流装置应用到平板速冻机制冷系统中是可行的。在此基础上,本研究拟测试并分析不同冷凝温度对两相射流泵供液平板速冻机的影响,探究在射流泵几何尺寸确定的条件下,是否存在最适冷凝温度,旨在为实际应用提供理论依据。

1 平板速冻系统

基于射流泵能够减少节流损失及引射低压流体的特点,本研究小组发明专利^[16],提出了一种新型的射流泵节流供液制冷系统(见图 1)。

基金项目:国家高技术研究发展计划(编号:2012AA092301)

作者简介:田晓雨,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:2016—09—12

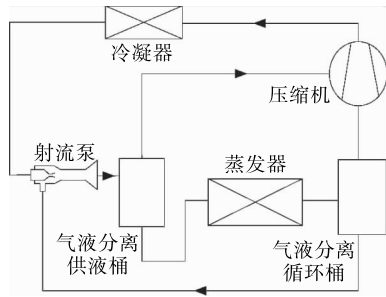
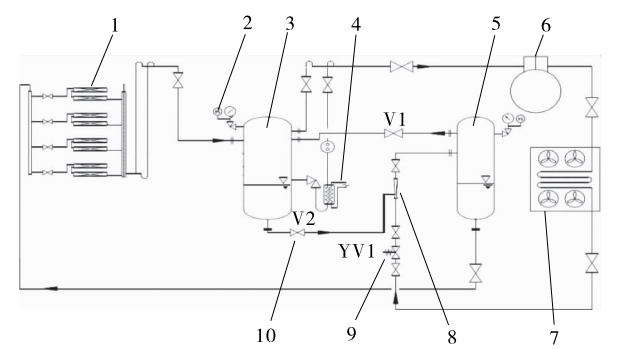


图 1 两相射流泵供液系统原理图

Figure 1 Schematic diagram of the two-phase ejector system

该系统具有以下优点：① 能够及时将气液分离桶和气液循环桶内的气体返回压缩机，避免浪费制冷剂气体所获得的膨胀功；② 制冷剂纯液体进入蒸发器，提高了换热效率；③ 实现无电力驱动条件下蒸发器的倍量供液，减少了系统电能的消耗；④ 系统结构简单，易于推广应用，提高了运行经济性。

基于文献[16]，搭建了平板冻结机实验台，该系统采用射流泵供液方式，其系统原理见图 2。



1. 速冻平板 2. 压力传感器 3. 气液分离循环桶 4. 回油加热器
5. 气液分离供液桶 6. 压缩机 7. 冷凝器 8. 射流泵 9. 电磁阀
10. 手动截止阀

图 2 两相射流泵供液制冷系统原理图

Figure 2 Schematic diagram of the two-phase ejector for cooling system

本研究在射流泵供液方式下，研究平板冻结机的工作性能。冻结机：PF-420 型，冻结能力为 500 kg/次，冻结平板为 7 层，有效蒸发面积为 25 m²，南通星诺冷冻设备有限公司；压缩机：BITZER-S6F-30.2-40P 型，系统制冷剂为 R22，功率为 22 kW，比泽尔(中国)有限公司；系统安装空气冷却式冷凝器；气液分离循环桶容积为 0.24 m³，气液分离供液桶容积为 0.086 m³，均由上海特艺压力容器有限公司加工。冻品温度采用 T 型热电偶进行测量，精度为 ±0.5 °C，温度记录仪表型号为安捷伦 34972A，扫描频率为 30 s/次，是德科技(中国)有限公司；涡街流量计测量制冷剂流量；采用 DZFC-1 型的电能综合分析测试仪测量系统能耗。试验分别在上海的春、夏、冬季进行，分别对应冷凝温度 30, 40, 25 °C。速冻机每层平板放置 6 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，当所有测点均降至 -18 °C 以下时，冻结过程完成。春、夏、冬三季室外环境温度不同，风冷式冷凝器在不同冷凝压力下运行。试验系统运行时，打开电磁阀 YV1 和手动截止阀 V2，射流泵引射气液分离循环桶内的低压制冷剂进入气液分离供液桶，再次进入蒸发平板内蒸发，同时调整调节阀 V1，维持气液分离循环桶和气液分离供液桶的压力差，保证射流泵正常工作。

射流泵由喷嘴、吸入室、混合室和扩散室组成。本试验用射流泵由上海逐源机械科技有限公司加工，其主要尺寸为：喷嘴最小直径 5.06 mm，入口管径 20 mm；吸入室入口管径 40 mm；混合室长度 216 mm，直径 18 mm；扩散室长度 181 mm，全角 16°。

2 结果与分析

平板冻结机在射流泵供液方式下，冷凝温度分别为 25, 30, 40 °C，测得 7 层冻品温度曲线见图 3。

随着冻品温度的下降，平板冻结机制冷系统工况随时改变，由图 3 可知，当 0 °C 时，冻品温度在较长时间内保持不变，此时蒸发温度基本不变，系统工况近似稳定。该条件下通过改变冷凝温度，可以较为准确地测得射流泵的引射系数。空气冷却式冷凝器的冷凝温度主要由环境温度决定。

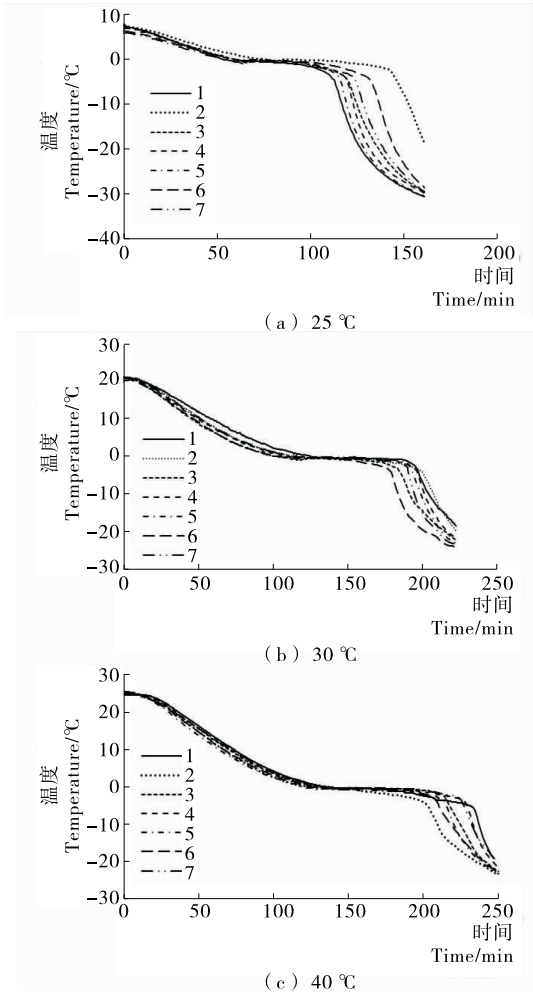


图 3 冻品温度曲线

Figure 3 The freezing curve of sample

春夏季环境温度较高,冻品初始温度为 21 ℃ 和 25 ℃,冬季环境温度较低,冻品初始温度 8 ℃。由于冻品初始温度不同,比较系统冻结性能时,以冬季冷凝温度 25 ℃,冻品初始温度 8 ℃ 为基准,将冷凝温度 30 ℃ 和 40 ℃ 的冻结时间和能耗进行修正,扣除冻品降至 8 ℃ 的时间与能耗。不同冷凝温度下平板速冻机冻结性能见表 1。

表 1 冻结性能比较

Table 1 The freezing performance of system

冷凝温度 <i>T</i> /℃	引射 系数	试验时间 <i>t</i> /min	系统能耗 <i>E</i> ₂ / (kW·h)	单位质量冻品耗电 <i>P</i> /(kW·h)
25	1.58	160	59	0.118
30	1.38	180	61	0.122
40	0.68	188	65	0.130

由图 3 还可以看出:平板冻结机在射流泵供液方式循环下,冻结曲线较为集中,冻品温度下降较为一致。由表 1 可知,随着冷凝温度的提高,引射系数减小,冻结时间和系统能耗增加。这是因为:① 冷凝温度的升高,工作流体在喷嘴出口处的速度越来越大,工作流体不能与引射流体充分混合便高速喷出,使得射流泵的性能下降;② 冷凝温度升高导致冷凝压力升高,压缩比增大,压缩机的压缩功增加,制冷效率降低;③ 冷凝温度为 25 ℃ 时,射流泵引射系数较大,能够较多的引射气液分离循环桶内的制冷剂再次进入平板内蒸发,增加了平板供液量,提升冻结速率,减少了系统能耗;④ 冷凝温度过高会使压缩机排气温度增高,润滑油粘度降低,润滑效果下降,气阀密封性能降低,影响压缩机运行的可靠性和寿命。

因此,适当降低冷凝温度可以提升射流泵的引射系数,减少系统功率消耗,提高运行的经济性。在实际运行过程中,必须密切注意冷凝温度,必要时也应给予调整。

3 结论

本试验测试并分析了不同冷凝温度下射流泵的引射系数和平板冻结机射流泵供液系统的运行状况,得出以下结论:

(1) 平板速冻机采用射流泵供液,冻结曲线较为集中,冻品温度下降较为一致。冷凝温度 25 ℃ 时,系统能耗比冷凝温度 30,40 ℃ 时分别降低 3.3% 和 10%,冻结速率提高 12.5% 和 17.5%。因此,适当降低冷凝温度可以提高系统运行的经济性。

(2) 在射流泵几何尺寸确定的条件下,当冷凝温度 25 ℃ 时,射流泵引射系数最大为 1.58。合适的冷凝温度能够提升射流泵的引射系数,有益于射流泵的工作。

平板速冻机在合适的冷凝温度下能够提升系统运行的经济性。随着射流泵数值模拟的发展和自动化程度的提升,其应用将逐渐广泛。

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] 周永安,王云芳. 节能型真空冷冻干燥机[J]. 食品与机械, 1996 (3): 24-24.
[3] 杜子峥,谢晶. 冷库节能减排研究进展[J]. 冷藏技术, 2015(1): 4-11.
[4] 陈依水,陈福贵.关于引射泵供液平板冻结机[J]. 福建水产, 1990(4): 28-30.
[5] 梁亚星,陶乐仁,郑志皋. 新型流态化食品速冻机内风道流场的数值模拟[J]. 食品与机械, 2005, 21(2): 37-40.
[6] 曹晓程,王金庆,宋立尧,等. 平板速冻机三种供液方式的实验比较[J]. 制冷学报, 2015, 36(6): 78-82.
[7] CHUNNANOND K, APHORN RATANA S. Ejectors: applications in refrigeration technology[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2004, 8(2): 129-155.
[8] 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.
[9] SUMERU K, NASUTION H, ANI F N. A review on two-phase ejector as an expansion device in vapor compression refrigeration cycle[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2012, 16 (7): 4 927-4 937.
[10] LAWRENCE N, ELBEL S. Analysis of two-phase ejector performance metrics and comparison of R134a and CO ejector performance[J]. Science & Technology for the Built Environment, 2015, 21(5): 515-525.
[11] PALACZ M, SMOLKA J, FIC A, et al. Application range of the HEM approach for CO₂ expansion inside two-phase ejectors for supermarket refrigeration systems[J]. International Journal of Refrigeration, 2015(59): 251-258.
[12] ZEGENHAGEN M T, ZIEGLER F. A one-dimensional model of a jet-ejector in critical double choking operation with R134a as a refrigerant including real gas effects[J]. International Journal of Refrigeration, 2015(55): 72-84.
[13] BESAGNI G, MEREU R, INZOLI F. Ejector refrigeration: A comprehensive review[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016(53): 373-407.
[14] HAIDA M, BANASIAK K, SMOLKA J, et al. Experimental analysis of the R744 vapour compression rack equipped with the multi-ejector expansion work recovery module[J]. International Journal of Refrigeration, 2016(64): 93-107.
[15] 党新安,郑晨升. 多级蒸汽喷射器在真空干燥设备中的应用[J]. 食品与机械, 2000(3): 31-32.
[16] 王金庆,宋立尧,卞华,等. 一种射流泵节流供液制冷系统: 中国, CN102878715A[P]. 2013-01-16.