

文章编号:0253-4339(2015)03-0092-06

doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2015.03.092

蒸发式冷凝器顺流式和逆流式换热性能实验

申江 张聪 路坤仑 刘丽

(天津商业大学 天津市制冷技术重点实验室 天津 300134)

摘要 对蒸发式冷凝器顺流式和逆流式两种不同方式的换热性能进行实验研究。搭建了蒸发式冷凝器换热性能实验台,分别在顺流式和逆流式条件下,对冷凝器喷淋密度和迎面风速对换热性能的影响进行理论和实验研究。结果表明:随着迎面风速的提高,喷淋密度增大,在顺流和逆流条件下,总换热系数均呈现上升的趋势,最后达到一个最大值,逆流式条件下的换热性能高于顺流式;在迎面风速为 3.28 m/s,喷淋密度为 0.057 kg/(m·s)条件下,顺流式的总传热系数最大为 616 W/(m²·K),逆流式总传热系数可达到 628 W/(m²·K)。在相同条件下,逆流式的传质系数及能效比 EER 均优于顺流式。

关键词 蒸发式冷凝器;顺流式;逆流式;性能

中图分类号:TQ051.6⁺1;TK124

文献标识码:A

Experimental Investigation on Heat Transfer Performance of Evaporative Condenser with Parallel and Counter Flow

Shen Jiang Zhang Cong Lu Kunlun Liu Li

(Tianjin Key Laboratory of Refrigeration, Tianjin University of Commerce, Tianjin, 300134, China)

Abstract In this paper, an experimental investigation is conducted on the heat transfer performance of evaporative condenser with parallel flow and counter flow. An experimental platform which test heat transfer performance of evaporative condenser is built, which can present theoretical and experimental study on the influence of condenser's spray density and face velocity under the condition of parallel flow and counter flow. The results showed that: the total heat transfer increases with the increase of face velocity and spray density under the condition of parallel flow and counter flow, and finally reaches a maximum value; the heat transfer performance under the condition of counter flow is better than that of parallel flow. When the face velocity and spray density are 3.28 m/s and 0.057 kg/(m·s) respectively, the maximum value of total heat transfer is 616 W/(m²·K) for parallel flow, and 628 W/(m²·K) for counter flow. At the same condition, the mass transfer coefficient and EER of counter flow is better than that of parallel flow.

Keywords evaporative condensers; parallel flow; counter flow; performance

随着人们对舒适性生活的要求,空调制冷系统成为日常生活中必不可少的一部分。应用于空调系统的能耗占全球总能源消耗的 30%^[1]。目前蒸气压缩循环系统广泛的应用于全球空调制冷系统,根据理论基础分析,制冷循环系统能效比 EER 的提高,可以通过降低冷凝温度实现^[2-3]。蒸发式冷凝器是目前一种有效的换热设备,蒸发式冷凝器的冷凝温度是由空气的湿球温度决定,在相同的环境条件下蒸发式冷凝器的冷凝器温度要比风冷式低 8~14℃,比水冷式低 3~6℃。而且由于其结构简单紧凑节省空间等优点,得到广泛的推广应用^[4-5]。

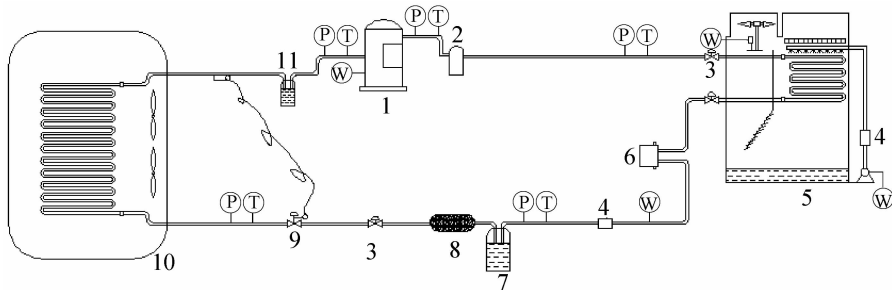
国内外许多学者对蒸发式冷凝器的性能及结构进行研究。在实验基础上,结合数值模拟对蒸发式冷凝器制冷系统的传热传质进行研究^[6-9]。Jahangeer

K A 等^[1]对蒸发式冷凝器进行数值研究,分析水膜厚度对传热传质的影响。朱冬生等^[10-12]对蒸发式冷凝器的喷淋水量、迎面风速、风向等对传热传质影响进行实验研究及理论分析。Chengqin Ren 等^[13]对顺流式和逆流式间接蒸发冷却传热传质过程进行了建模分析。华南理工大学尹应德^[14]对蒸发式冷凝器水平换热管顺流和逆流换热性能采用 VOF (volume of fluid) 模型研究,得知在气液顺流过程,潜热传热占气液界面总传热量的 90%,在气液逆流过程,其潜热换热所占比例比顺流过程高。在气液两相交界面的换热主要是由于水的蒸发潜热带走热量为主,以温差显热换热为辅,所以逆流换热效果优于顺流换热。目前许多专家通过改变盘管管型及配水方式进行性能研究^[15-17]。

蒸发式冷凝器的传热传质过程复杂,影响因素很多,实际应用没有统一参照标准。通过对水平管蒸发式冷凝器逆流和顺流两种不同方式进行实验研究,分析比较两种方式传热传质性能。实验过程采用实际运行状态测试,从整个制冷系统性能方面分析两种方式最佳的喷淋密度和迎面风速,对于实际设备生产设计具有指导意义。

1 实验装置和方法

实验台采用一套蒸发式冷凝器的速冻机制冷循



G 流量传感器 T 铂热电阻 P 压力变送器 W 功率表

- 1 压缩机 2 油分离器 3 热力膨胀阀 4 流量计 5 蒸发式冷凝器 6 壳管式换热器 7 储液器 8 干燥过滤器
9 热力膨胀阀 10 蒸发器 11 回气罐

图 1 实验装置系统流程图

Fig. 1 Experimental device system flow chart

实验研究需要测量冷凝器盘管表面的水膜温度、制冷剂温度、风进出口温度、湿度及进出口风速、喷淋水量等。在实验过程主要采用测量设备及传感器与计算机配套使用,随时记录测试值。采用铜-康铜热电偶进行温度测量,其测量误差在 $\pm 0.2\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内,制冷剂流量采用上海中隆生产的转子流量计计量,测量精度可达 0.15%。实验风速主要由蒸发式冷凝器出风口的空气风速探头测量平均值确定,喷淋密度由喷淋水量确定。

2 实验数据处理计算及整理

冷凝热负荷计算,由能量守恒定律得知,蒸发式冷凝器的热负荷 Q_k 等于制冷量 Q_0 和压缩机耗能 P_c 与效率 η_c 乘积之和,公式:

$$Q_k = Q_0 + \eta_c P_c \quad (1)$$

式中: η_c 为效率。

从制冷剂到水膜再到空气总传热系数计算公式为:

$$K = \frac{Q_k}{F_0(t_k - t_{wa,m})} \quad (2)$$

式中: t_k 为制冷剂平均冷凝温度, $^\circ\text{C}$; $t_{wa,m}$ 为湿球平均温度, $^\circ\text{C}$;

环系统,如图 1 所示。制冷剂选取 R404A,设备主要包括压缩机、蒸发式冷凝器、流态隧道速冻机以及膨胀阀。实验台还包括辅助设备和实验过程测量记录仪器。冷凝盘管是实验的核心部件,实验台的蒸发冷凝盘管采用管径为 25 mm 的 304 不锈钢椭圆管,管排数为 10 排,横向和纵向的间距分别为 50 mm 和 48 mm,总换热面积为 22.6 m^2 。蒸发式冷凝器搭建在室外,实验环境温度 ($35 \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$),环境相对湿度 ($60 \pm 5\%$),隧道速冻机内设温度为 ($-25 \pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$)。

空气对流传质系数计算式:

$$\alpha_m = \frac{\alpha_{wa}}{c_{p,wa}} \quad (3)$$

$$\alpha_{wa} = 0.88 \frac{C\lambda_{wa} Re_{wa}^B Pr_{wa}^{0.036}}{d_0} \quad (4)$$

式中: α_{wa} 为空气对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; $c_{p,wa}$ 为定压比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; λ 为湿空气的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; Re 为雷诺数; Pr 为普朗特数; C, B 为常数。

能效比 EER 计算公式:

$$\text{EER} = \frac{Q_0}{P_c + P_f + P_p} \quad (5)$$

式中: P_f 为风机的消耗功率, W ; P_p 为水泵的消耗功率, W 。

由实验数据分析气液两相顺流与逆流两种情况下,分别达到最佳换热状态的风水量配比值。得出两种状况下随风水量变换的换热性能曲线,对比两种情况下换热效果。

3 实验结果与分析

蒸发式冷凝器主要是以潜热换热为主,显热换热为辅,根据文献研究发现潜热换热的的能力大约为显热

换热的6~7倍^[15]。蒸发式冷凝器的换热主要是喷淋水和空气流的相互作用,水蒸发潜热带走制冷剂的热量。

根据实验数据处理,对数据进行筛选,选取风速3.28 m/s时不同喷淋密度的换热效果,及喷淋密度0.057 kg/(m·s)时不同风速对应的换热效果。比较在相同情况下顺流式和逆流式的换热性能。

喷淋密度 Γ 为单位管长的喷淋水量,kg/(m·h),表达式为:

$$\Gamma = \frac{\rho V_w}{4nl} \quad (6)$$

式中: V_w 为循环水体积流量,m³/h; n 为每排管数; l 为蛇形管一程的长度,m。

3.1 风速影响对比

空气与水的相互作用决定了最终的蒸发换热效果,在一定的范围内,增加风速可以有效的提高水膜表面的扰动,增强传热传质。但是风速不能无限的增大,要考虑整个制冷系统能效比 EER,达到经济节约,能源有效利用。选取喷淋密度 0.057 kg/(m·s)时,分析风速对蒸发式冷凝器顺流和逆流情况的换热性能影响。

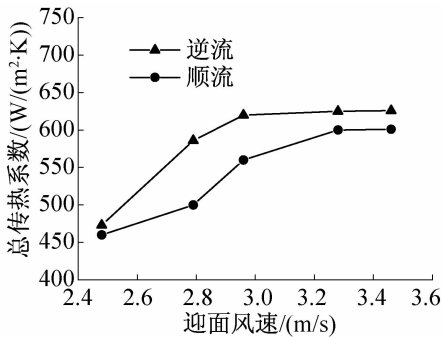


图2 逆流式和顺流式风速与总传热系数关系
Fig. 2 The relationship between total heat transfer coefficient and wind speed of parallel and counter flow

图2给出顺流和逆流两种情况下,总传热系数随迎面风速变化的趋势。由图2可知:随着迎面风速的增大,顺流和逆流的总传热系数均增大,当风速增大到最佳值后,总传热系数趋于稳定。蒸发式冷凝器顺流式总传热系数随风速的增大趋势比逆流式缓慢,且在迎面风速达到3.28 m/s时,换热性能达到稳定,继续增大风速,总传热系数基本保持恒定。风速较小的时候随风速的增大,蒸发式冷凝器逆流式总传热系数变化较快,在风速到达2.96 m/s以后,随着风速的增大,总传热系数基本稳定。由于逆流式时,水膜受到空气向上吹动的切应力,水膜表面的扰动加强,水膜

与空气间的热湿交换增大,提高潜热换热量,总的传热系数加强。顺流式时,风速对水膜的扰动相对较小,导致水膜与空气的热湿交换作用比逆流式小,总的传热系数小于逆流式的传热系数。

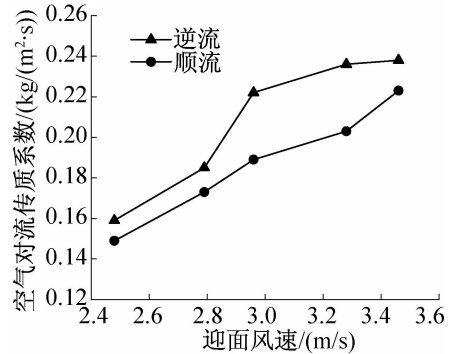


图3 逆流式和顺流式风速与空气对流传质系数
Fig. 3 The relationship between mass transfer coefficient and wind speed of parallel and counter flow

图3给出蒸发式冷凝器顺流和逆流情况下,风速对空气对流传质系数的影响。由图3可知:传质系数受风速的影响较大,逆流式传质系数受到迎面风速的影响大于顺流式。随着风速的增大,加大气液界面的扰动,水膜波动频率加强,增大空气水膜界面热质交换的剧烈程度。在逆流过程中,气液界面受到反向的切应力,而顺流式气液界面的受到同向的切应力,逆流式水膜表面受到的扰动作用强于顺流式,逆流式传质系数高于顺流式的传热系数。

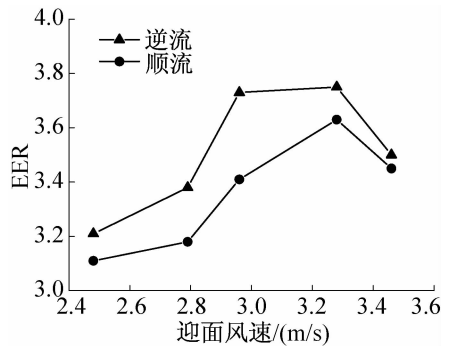


图4 逆流式和顺流式风速与EER关系
Fig. 4 The relationship between EER and wind speed of parallel and counter flow

图4给出蒸发式冷凝器顺流和逆流两种情况下能效比 EER 随迎面风速变化的曲线。当迎面风速从2.48 m/s增加到3.46 m/s时,两者能效比均是随着风速的增大先增大而后减小。对于顺流式迎面风速从2.48 m/s达到3.28 m/s,制冷量增大,总能效比增大,从图2看出随着风速的继续增大传热系数趋于稳

定,制冷量变化不明显而风机的能耗不断增大,导致能效降低。即风速为 3.28 m/s 时能效比达到最大。对于逆流式蒸发式冷凝器当迎面风速由 2.48 m/s 增加到 2.96 m/s 后,能效比趋于稳定,随着风量增大到 3.28 m/s,能效比几乎不变,然后迅速下降,这是由于增大风速耗能比获得的制冷量大。由于逆流式增大风速产生“液泛”现象,当风速过大的时候,能效比下降很快,即逆流式能效比随风速的变化总趋势大于顺流式。

3.2 喷淋密度影响对比

喷淋水量会直接影响盘管表面水膜的覆盖率、厚度、水膜温度以及流动状态等,这将影响盘管的传热传质性能。水膜厚度主要由喷淋水量决定,水量过小,不能很好地包裹冷凝盘管,出现“干斑”,变为风冷式冷凝器,当水量过大,盘管表面的水膜较厚,会增大换热热阻。

采用迎面风速 3.28 m/s,分析顺流式和逆流式两种情况换热性能随喷淋密度的变化。

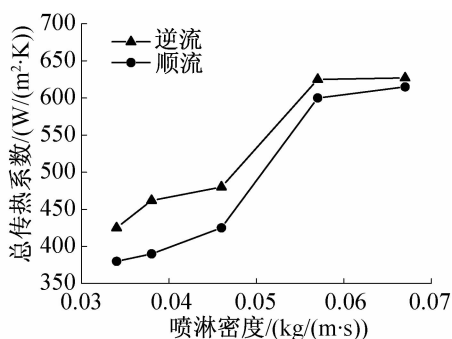


图5 逆流式和顺流式喷淋密度与总传热系数关系

Fig.5 The relationship between total heat transfer coefficient and spray density of parallel and counter flow

图5给出蒸发式冷凝器顺流和逆流总传热系数随喷淋密度的变化。由图5可知:顺流和逆流两种状态总传热系数随喷淋密度变化的趋势相同,随着喷淋密度的增加而增大,且增幅不断的变化,最后趋于稳定。顺流和逆流两种方式的区分,从总体分析,逆流式蒸发换热系数优于顺流式。在喷淋水量较小的时候,逆流的气液界面的热质交换相对于顺流较为剧烈,传热系数增加较快,逆流式喷淋密度增大到 0.63 kg/(m²·h)即 0.057 kg/(m·s)时,总传热系数趋于平衡,随喷淋密度的增大变化不大。顺流式喷淋密度增大到 0.75 kg/(m²·h),即 0.068 kg/(m·s),随着喷淋密度的增大总传热系数趋于稳定。逆流式最佳喷淋密度小于顺流式的最佳喷淋密度。

图6给出顺流式和逆流式蒸发式冷凝器空气对

流传质系数随喷淋密度的变化情况,由图6可知:喷淋密度对空气对流传质系数影响较小,而且在两种方式下,逆流式水膜表面的波动剧烈程度大于顺流式,水膜与空气的接触面积增大促进传质,导致逆流式传质系数高于顺流式传热系数。

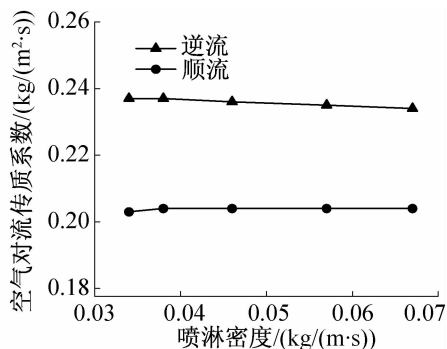


图6 逆流式和顺流式喷淋密度与空气对流传质系数关系

Fig.6 The relationship between mass transfer coefficient and spray density of parallel and counter flow

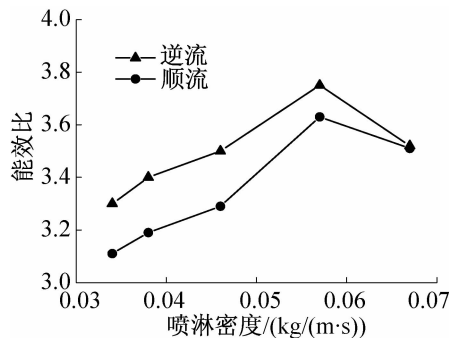


图7 逆流式和顺流式喷淋密度与能效比关系

Fig.7 The relationship between EER and spray density of parallel and counter flow

图7给出顺流式和逆流式蒸发式冷凝器制冷系统喷淋密度与能效比的关系图。由图7可知:对于两种情况,喷淋密度由 0.034 kg/(m·s)增加到 0.057 kg/(m·s)时,能效比 EER 随着喷淋密度的增大而增大,当两者喷淋密度达到 0.057 kg/(m·s)后,随着喷淋密度的增大出现急剧下降,且逆流式能效比下降的趋势大于顺流式。原因是当喷淋密度小的时候,随着喷淋密度的增大,水膜很好的包裹盘管,水膜不断地更新,盘管的换热性能增大,系统的总换热量增大。此时随着喷淋密度的增大,获得的制冷量收益大于水泵耗能量的增加值,所以能效比不断增大。当喷淋密度大于 0.057 kg/(m·s)时,随着喷淋密度的增大,水膜的热阻增大,不仅造成蒸发式冷凝器的换热性能降低,而且水泵的耗能随着喷淋密度的增大而增大,整体系统的能效比急剧下降,且由于逆流式切应力使盘

管表面水膜厚度增大,而顺流式水膜厚度的增加较小,顺流式能效比的下降趋势小于逆流式。

综上所述:相同的风速和喷淋密度条件下,逆流式的传热传质系数以及能效比均要高于顺流式。顺流式总传热系数达到 $601 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,逆流式总传热系数相同条件下达到 $626 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。逆流式蒸发式冷凝器的最佳迎面风速比顺流式的小,逆流式最佳风速为 2.96 m/s ,顺流式最佳风速为 3.28 m/s 。迎面风速是影响换热的主要因素,其对总传热系数、传质系数以及能效比的影响都很大。喷淋密度对总传热系数和能效比的影响较大,而对空气对流传质系数影响很小。

4 结论

本文对蒸发式冷凝器顺流和逆流两种方式进行实验研究,得出传热传质系数及能效比变化情况以及相同条件下两种方式的性能对比情况:

1)总传热系数随着迎面风速和喷淋密度的增大而增大,实验范围逆流式的总传热系数从 $473 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 增加到 $626 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。顺流式的总传热系数从 $460 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 增加到 $601 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

2)迎面风速对传质系数的影响很大,喷淋密度对传质系数的影响很小。相同情况下,逆流式传质系数高于顺流式传质系数。

3)对于给定的蒸发式冷凝器相同条件下逆流式换热性能优于顺流式;逆流式的传热系数比顺流式的传热系数高 17.2% 。

4)实际设计过程中不仅考虑蒸发式冷凝器的传热性能,还要考虑整个系统的能效比,满足节能优化。

本文受天津市高等学校科技发展基金项目(2013ZD02)资助。(The project was supported by the Science & Technology Development Fund of Colleges in Tianjin (No. 2013ZD02).)

参考文献

[1] Jahangeer K A, Tay A A O, Islam M R. Numerical investigation of transfer coefficients of an evaporatively-cooled condenser[J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(10): 1655-1663.

[2] Vakiloroya V, Samali B, Pishghadam K. A comparative study on the effect of different strategies for energy saving of air-cooled vapor compression air conditioning systems[J]. Energy and Buildings, 2014, 74: 163-172.

[3] Huynh Thi Minh Thu, Haruki Sato. Proposal of an eco-friendly high-performance air-conditioning system. Part 1. Possibility of improving existing air-conditioning system by

an evapo-transpiration condenser[J]. International Journal of Refrigeration, 2013, 36(6): 1589-1595.

[4] 朱冬生,涂爱民,蒋翔,等. 蒸发式冷凝冷却设备的研究状况及其应用前景分析[J]. 化工进展, 2007, 26(10): 1404-1410. (Zhu Dongsheng, Tu Aimin, Jiang Xiang, et al. Research progress and application prospect analysis of evaporative condensing/cooling equipment[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2007, 26(10): 1404-1410.)

[5] 徐鑫祥,娄锦培,徐灿根. 蒸发式冷凝器在制冷系统中的节能[J]. 制冷学报, 1993(3): 29-32. (Xu Xinxiang, Lou Jinpei, Xu Cangen. Saving energy of evaporative condenser in refrigeration system[J]. Journal of Refrigeration, 1993(3): 29-32.)

[6] Heyns J, Kröger D G. Experimental investigation into the thermal-flow performance characteristics of an evaporative cooler[J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30(5): 492-498.

[7] Wu J M, Huang X, Zhang H. Numerical investigation on the heat and mass transfer in a direct evaporative cooler[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(1): 195-201.

[8] 郑伟业. 蒸发式冷却器传热传质的试验研究及数值模拟[D]. 上海:华东理工大学, 2012.

[9] 朱宏达. 基于CFD的蒸发式冷凝器模拟及二次开发探讨[D]. 南京:东南大学, 2009.

[10] 涂爱民,朱冬生,蒋翔. 水平管蒸发式冷凝器性能研究[J]. 暖通空调, 2011, 41(5): 98-103. (Tu Aimin, Zhu Dongsheng, Jiang Xiang. Performances of horizontal tube evaporative condenser[J]. Journal of HV&AC, 2011, 41(5): 98-103.)

[11] 蒋翔,朱冬生,唐广栋. 蒸发式冷凝器管外流体流动与传热传质强化[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(10): 1698-1702. (Jiang Xiang, Zhu Dongsheng, Tang Guangdong. Enhanced flow and heat-mass of evaporative condenser[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(10): 1698-1702.)

[12] 朱冬生,沈家龙,蒋翔,等. 蒸发式冷凝器性能研究及强化[J]. 制冷学报, 2006, 27(3): 45-49. (Zhu Dongsheng, Shen Jialong, Jiang Xiang, et al. Study on performance enhancement for evaporative condenser[J]. Journal of Refrigeration, 2006, 27(3): 45-49.)

[13] Chengqin Ren, Hongxing Yang. An analytical model for the heat and mass transfer processes in indirect evaporative cooling with parallel/counter flow configurations[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, 49(3/4): 617-627.

[14] 尹应德. 蒸发式冷凝制冷系统的模拟、实验及节能应用研究[D]. 广州:华南理工大学, 2012.

(下转第118页)

thoxylation on glass-forming ability and stability of vitrification solutions[J]. *Cryobiology*, 1999, 39(3): 215-231.

[9] 胡桐记, 周国燕, 高才, 等. 低温保护剂溶液固化性质的 DSC 研究[J]. 制冷学报, 2005, 26(3): 38-46. (Hu Tongji, Zhou Guoyan, Gao Cai, et al. Solidification properties of polyalcohols aqueous solution studied by DSC[J]. *Journal of Refrigeration*, 2005, 26(3): 38-46.

[10] Fahy G M, Levy D I, Ali S E. Some emerging principles underlying the physical properties biological actions and utility of vitrification solutions[J]. *Cryobiology*, 1987, 24(3): 196-213.

[11] 胡桐记, 高才, 周国燕, 等. 保护剂溶液水合和玻璃化性质的 DSC 研究[J]. 上海理工大学学报, 2005, 27(5): 381-384. (Hu Tongji, Gao Cai, Zhou Guoyan, et al. Hydration and glass transition properties of polyalcohols aqueous solution examined with DSC[J]. *Journal of University of Shanghai for Science and Technology*, 2005, 27(5): 381-384.

[12] Kasaim M. Cryopreservation of mammalian embryos[J]. *Molecular Biotechnology*, 1997, 7(2): 173-179.

[13] Cabrita E, Robles V, Chereguini O, et al. Effect of different cryoprotectants and vitrificant solutions on the hatching rate of turbot embryos (*Scophthalmus maximus*) [J]. *Cryo-*

biology, 2003, 47(3): 204-217.

[14] 高才, 王文华, 胡桐记, 等. 不同结晶度的乙二醇及其水溶液玻璃化转变与焓松弛[J]. 物理化学学报, 2004, 20(7): 701-706. (Gao Cai, Wang Wenhua, Hu Tongji, et al. Glass transition and enthalpy relaxation behavior of ethylene glycol and its aqueous solution with different crystallinity[J]. *Acta Phys-Chimica Sinica*, 2004, 20(7): 701-706.

[15] Brian W, Michael D. Effects of solute methoxylation on glass-forming ability and stability of vitrification solutions [J]. *Cryobiology*, 1999, 39(3): 215-231.

通信作者简介

杨波, 女, 高级实验师, 上海理工大学医疗器械与食品学院, (021)55271208, E-mail: yangbo6899@126.com。研究方向: 食品的低温冻存, 细胞及组织的低温保存。

About the corresponding author

Yang Bo, female, senior technician, School of Medical Instrument and Food Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, + 86 21-55271208, E-mail: yangbo6899@126.com. Research fields: keep fresh and cryopreservation of food, cryopreservation cell.

(上接第96页)

[15] 郭长青. 壳板式蒸发式冷凝器热质传递性能及机理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2009.

[16] 董俐言, 王宝龙, 石文星. 板式蒸发式冷凝器传热传质的数值模拟[J]. 制冷学报, 2013, 34(1): 10-17. (Dong Liyan, Wang Baolong, Shi Wenxing, et al. Numerical simulation on heat and mass transfer of plate evaporative condenser[J]. *Journal of Refrigeration*, 2013, 34(1): 10-17.)

[17] 李泰宇, 欧阳新萍. 一种全管束配水的蒸发式冷凝器及其风阻实验研究[J]. 制冷学报, 2014, 35(2): 30-35. (Li Taiyu, Ouyang Xinping. Experimental study on air flow resistance of an evaporative condenser with water distributed on every tube[J]. *Journal of Refrigeration*, 2014, 35(2):

30-35.)

通信作者简介

申江, 男, 教授, 天津商业大学机械工程学院院长, 机械工程学院制冷系, (022)26669745, E-mail: shenjiang@tjcu.edu.cn。研究方向: 食品冷链技术, 制冷系统优化及节能技术等。

About the corresponding author

Shen Jiang, male, professor, Dean of Mechanical Engineering School, Department of Refrigeration Technology, Tianjin University of Commerce, + 86 22-26669745, E-mail: shenjiang@tjcu.edu.cn. Research fields: food cold chain technology, optimization and conservation technology of refrigeration systems.