文章编号：0253-4339(2012)05-0066-04
doi：10.3969/j.issn. 0253-4339. 2012. 05. 066

基于板式冰蓄冷的冷藏库恒温特性的实验研究

吴丽媛[1,2]　宋文吉[2]　高日新[2]　冯自平[2]

（1中国科学院研究生院　北京　100010；2 中国科学院广州能源研究所　广州　510640）

摘　要　冷库中增加蓄冷系统可以起到稳定库内温度、延长保鲜时间的效果，与峰谷电价结合，还可以实现良好的经济性。利用保温箱模拟冷库，在保温箱安放相变蓄冷板，板内充注水作为蓄冷液，所用蓄冷液体积与保温箱的容积比为1:30。通过测试分析蓄冷保温箱内的保温效果、空间温度分布及传热温差，验证了内部采用蓄冷板系统的冷库，在电价高峰期的8小时之内，温度波动小于0.6℃，库内各点最大温差为1.1℃，能够达到货物保存的要求及节能的效果，为冰蓄冷技术在冷库系统中的应用奠定理论和实验基础。

关键词　热工学；相变；蓄冷板；实验研究
中图分类号：TK02; TB657　　**文献标识码**：A

Experimental Study on Insulation Characteristics of Cold Storage with the Phase Change Storage System

Wu Liyuan[1,2]　Song Wenji[2]　Gao Rixin[2]　Feng Ziping[2]

（1.Graduate University of Chinese Academy of sciences, Beijing,100010,China; 2.GuangZhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of sciences, Guangzhou, 510640, China）

Abstract　Phase change storage(PCS) system added into the cold storage can stabilize the temperature of the cold storage, extend the preservation time, and achieve a good economical efficiency combined with the peak-valley price. Storage boards were installed as a test system in an incubator, which are filled with water, and the volume ratio between the PCM and the incubator is 1:30. By analyzing the insulation effect, the temperature distribution and the temperature difference between the PCM and air, the experimental data showed that the cold storage with phase change storage system had a temperature fluctuation of 0.6℃ and the maximum temperature difference is 1.1℃, so it can satisfy food fresh-keeping demands and achieve good economical efficiency. This result is important for the phase change storage system to be used in the cold storage.

Keywords　Pyrology; Phase-change; Storage board; Experimental study

蓄冷技术是制冷技术的补充和调节，主要目的是缓解峰谷时段电力负荷不平衡的矛盾[1]。冷藏链行业用电量很大[2]，目前应用于冷库系统的蓄冷技术主要包括有冷凝水蓄冷技术和高温冷库冰蓄冷技术[3]。

冷凝水蓄冷技术的理论依据是冷凝温度与制冷量、制冷系数成反比。在夜间低谷电价时，将池中冷却水降温蓄冷，第二天峰期电价时，用于冷凝器的冷却。但是，由于冷凝水蓄冷系统采用的是显热蓄冷，存在蓄能密度低、蓄冷槽体积庞大的缺点，在城市中的推广应用受到严重限制。高温冷库冰蓄冷技术是主要应用于温度要求高于0℃的冷库[4]。但是，由于蓄冰时存在一定的过冷度，因此蓄冰槽内温度一般为−4℃~−6℃，与室外温差太大，在蓄冷阶段，冷量损失巨大。

采用蓄冷板的冷库蓄冷系统，是将蓄冷板直接安装于冷库内部，能够克服以上两种技术的缺点。首先，可以充分利用冷库内部有效容积之外的空间，不占用冷库以外的空间，为蓄冷技术大范围推广奠定了基础。另外，放置于冷库内部的蓄冷板，直接向冷库供冷，不存在蓄冷期间的冷量损失。

通过在保温箱顶部内置10个蓄冷板，利用数据采集系统，监控保温箱内部空气温度波动、各点温度分布情况及蓄冷液与空气之间的传热温差，对冷库内部采用蓄冷板供冷的技术进行可行性验证分析。

1 冷库蓄冷系统

1.1 蓄冷板的封装结构

蓄冷设备中，单一设备的蓄冷及释冷过程伴随着相变的导热过程。这类问题的特点是由于固液两态的相界面位置是移动的，因此界面位置未知，

收稿日期：2011年11月2日

并在相界面出伴有潜热的释放与吸收[5]。随着蓄冷及放冷过程的进行，固、液相变温度场边界移动的问题，可以理解为空间边界固定，固相、液相物性值的边界移动。

平板式蓄冷器是相变蓄冷换热器结构的主要形式之一[6]。通过研究可知，方形蓄冷板(条)比圆形蓄冷槽(罐)的相界面推进速度快，蓄冷效率高[7]。另外，方形蓄冷板还存在加工容易、内部盘管易于布置等优点。因此，在实验和实际应用中，选用方形蓄冷板作为储存和释放冷量的设备。

1.2 蓄冷板的安装方式

冷库的容积利用系数(η)表示冷库内占用空间与库容的比值，在《冷库设计规范 GB 50072—2001》中，规定的η的值在0.4~0.65之间。采用蓄冷板的蓄冷系统充分利用了冷库的空余容积，从而达到节省外部容积、减少冷量损失的目的。

将蓄冷板直接应用于冷库内部，从而达到最直接的蓄冷和放冷的效果。图1为蓄冷板和制冷剂管道的安装方式。

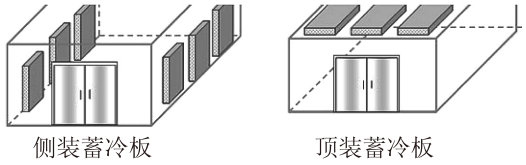


图1 蓄冷板安装示意图

Fig.1 Schematic diagram for the arrangement of storage boards

将预制的蓄冷板置于冷库内部(装配式冷库)或直接作为冷库的内墙体材料(土建式冷库)，利用夜间低谷电力和机组的富余能力蓄冷，所储存的冷量一方面可以用于调节白天的负荷尖峰，另一方面也可以作为断电情况下的备用冷源。

1.3 系统运行策略

冷库运行的蒸发端为冷风机或排管，制冷机组的冷量通过冷风机的强制对流或排管自然对流，直接送入冷库内部。由于冷库用电的峰谷期与电价的峰谷期正好重合，因此采用单一的供冷方式不节能。

在蓄冷冷库中，蒸发端采用蓄冷板与冷风机联合运行的方式。图2是运行的示意图。

冷库夜间需要的冷量少，采用自动控制系统可将制冷机组制出的冷量一部分通过冷风机组用于向冷库供冷，另一部分冷量送入蓄冷板中，使蓄冷液发生相变，储存冷量；白天室外温度高，人工活动频繁，冷库内需要的冷量大，蓄冷板中储存的冷量完全用于向冷库供冷[8]。

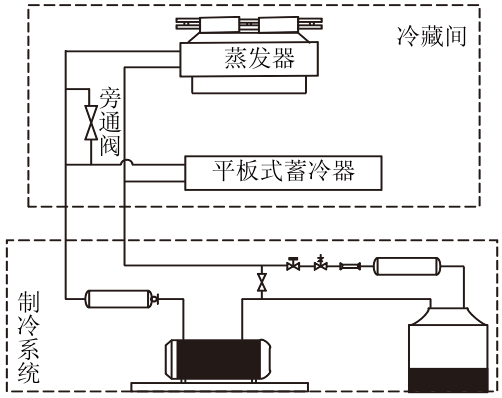


图2 蓄冷冷库运行示意图

Fig.2 Schematic diagram of the cold storage running with the storage boards

2 实验系统

采用保温箱模拟冷库，得到采用蓄冷板供冷后的基本运行参数。

主要内容包括：电价高峰期的8小时内，保温箱内部的温度波动情况；释冷时段保温箱内部的温度分布情况；蓄冷液放冷阶段，蓄冷液-蓄冷板表面-保温箱内部空气之间的传热温差。

2.1 实验装置

实验系统主要包括制冷机组、保温箱、蓄冷板、温度传感器及数据采集仪。表1为各实验装置的性能及作用。

表1 主要实验装置

Tab.1 Instruments list

设备	基本性能/规格	功能
制冷机组	比泽尔2CC-3.2-40S压缩机 最大制冷量3000W 最低蒸发温度−40℃	为蓄冷板充冷
保温箱	1700mm×2100mm×2200mm 保温层厚度100mm， 材料为聚氨酯	内部空载保温装置
平板式蓄冷器	1500mm×180mm×80mm 铝质板材，内部管道为铜管	相变材料容器
温度传感器	铜-铜镍热电偶 精度±0.5℃	感应温度信号
数据采集仪	Agilent 34970/34972A 数据记录仪	收集温度信号

2.2 蓄冷液的物性

蓄冷液为纯净水，内含碘化银作为成核剂。该溶液的相变潜热为334kJ/kg，相变温度为0℃[9]。

2.3 实验系统

实验由三个系统组成，分别为数据采集系统、制冷系统和蓄冷系统。

数据采集系统包括温度传感器及数据采集仪。将T型热电偶在保温箱及蓄冷系统内部感应到的温度信号，通过数据记录仪转化为数字信号，得到实验数据。

制冷系统包括制冷机组和制冷剂管道等。

蓄冷系统包括蓄冷板、蓄冷液和恒温箱。根据逐时负荷计算，确定恒温箱的负荷变化，结合水的相变潜热，蓄冷液与箱体的体积比采用1:30。

3 实验结果与分析

根据实验的目的，将实验分为三方面来进行：保温箱内部温度波动，温度分布，传热温差。

3.1 保冷效果

不同的库存商品和不同的商品贮存期，对库房的温度及其控制精度都有不同的要求。冷库的控制精度是冷库的一个重要指标。对库存商品来说，控制精度越小越好；从节能的角度来说，只要不影响商品的品质，冷库的控制精度不宜过低，这样能够充分利用冷量并避免设备的频繁启停。

图3为采用蓄冷板的保温箱，在负荷高峰8小时内的保温效果。

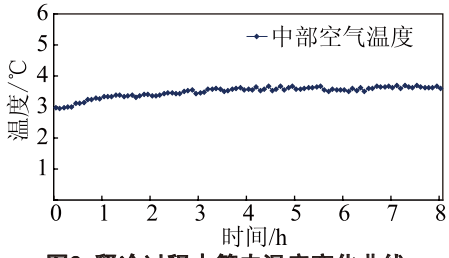


图3 释冷过程中箱内温度变化曲线

Fig.3 Curve of center temperature of incubator during cold releasing

图3所示，在蓄冷液释放冷量的8小时内，温度最低为2.97℃，最高为3.54℃，即温度波动在0.6℃，低于目前冷库普遍采用的±0.5℃的温度范围[10]。

3.2 温度分布

为了测试保温箱内部的温度分布，在保温箱内设置左-中-右，上-中-下，外-中-内各一个热电偶。布置方式如图4所示。

各热电偶的位置为：分别取恒温箱的长、宽、高的中点，作为恒温箱的中部热电偶布置点；上、下两个热电偶距中部热电偶的距离均为1m；左、右两个热电偶距中部热电偶的距离均为0.8m；内、外两个热电偶距中部热电偶的距离均为1.1m。

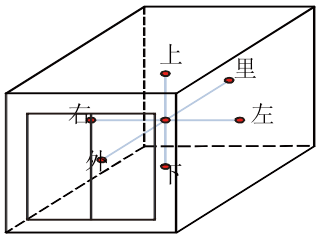
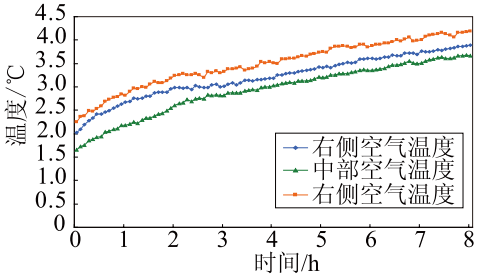


图4 保温箱内部热电偶布置方式

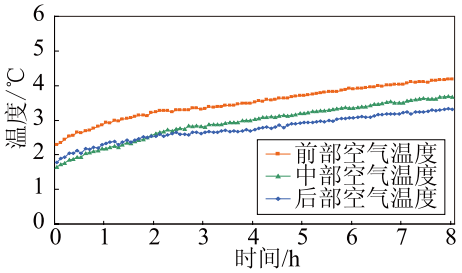
Fig.4 Arrangement of the thermocouple in incubator

实验中，在保温箱顶部吊装10个蓄冷板。温度分布如图5所示。

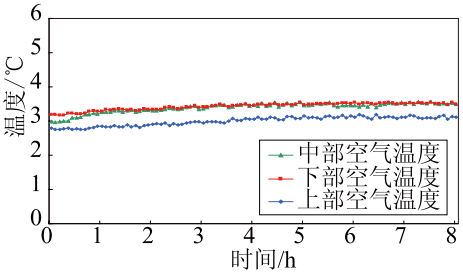
由图5可知，保温箱左右两侧温度均高于中部温度，最大温差为1.04℃；前后温度的分布为前部温度最高、后部温度最低，这主要是由门的保温效果较差及后部制冷剂盘管温度较低决定的，最大温差达到1.1℃；上下温度比较均匀，最大温差0.5℃，由于蓄冷板采用吊顶式，因此上部温度较低。



(a) 左-中-右温度分布



(b) 前-中-后温度分布



(c) 上-中-下温度分布

图5 保温箱内部温度分布

Fig.5 Temperature distribution in the incubator

通过分析可知，保温箱内部的温度分布，主要由维护结构保温效果、蓄冷板排列方式以及制冷剂管道的布置方式共同决定。而且，与冷风机送风不同，采用蓄冷板的冷藏库主要依靠自然对流，因此容易出现温度分布不均匀的情况。通过风扇送风，通过扰乱内部的气流，可以改善温度分布的不均匀性。

3.3 传热温差

采用蓄冷板的恒温箱实验所研究的传热温差包括蓄冷液温度、蓄冷板表面温度、保温箱内部空气温度。当采用的蓄冷材料为水时，实验结果如图6所示。

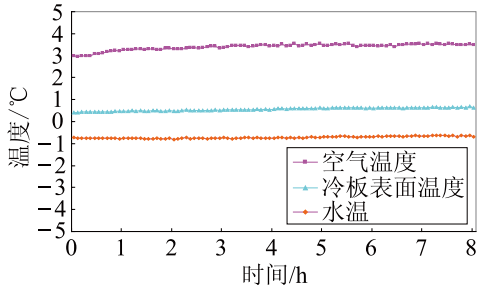


图6 释冷过程中的传热温差曲线

Fig.6 Curve of the temperature difference between the PCM and air during cold releasing

由实验结果可知，保温箱内部的空气温度与蓄冷液的温度之间的平均传热温差为4.3℃。水的相变温度0℃左右，因此，库内温度要求在4℃左右的冷库，适宜采用水作为相变材料。

4 结论

利用保温箱模拟冷藏库，基于板式冰蓄冷的条件下，对保温箱的恒温特性进行实验研究，得到的主要结论如下：

1）采用水作为相变材料，可以保证在蓄冷板供冷的8小时内，库内温度波动在±0.3℃的范围之内，冷藏库温度保持在4℃以下；

2）采用蓄冷板供冷的冷库内，容易出现温度分布不均匀的情况；

3）当蓄冷液为水时，与空气之间的传热温差为4℃；

4）在实验过程中发现，由于蓄冷板表面温度较低，会产生一定的凝水现象，库内湿度较低，不宜储存新鲜水果和蔬菜。板式冰蓄冷系统适用于箱式产品的冷藏。

蓄冷技术应用于冷库系统是行业发展的趋势。通过以上实验研究，为冷库系统应用蓄冷板供冷提供了比较可靠的实验基础。通过其他相关技术的研发，将会极大推动我国冷库技术水平的提升，间接实现冷链行业的节能减排。

本文受2010年广东省中国科学院全面战略合作计划重点项目（2010A090100011）资助。（The project was supported by Guangdong Province-Chinese Academy of Sciences strategic cooperative Program（No.2010A090100011）.）

参考文献

[1] 蔡新梅,宋文吉,冯自平.基于冰浆蓄冷的集中制冷冷藏陈列柜的实验研究[J].制冷学报,2011, 32（4）:63-66.（Cai Xinmei, Song Wenji, Feng Ziping. Experimental Study on Ice Slurry Vertical Open Display Cabinet with Central Refrigeration [J]. Journal of Refrigeration, 2011, 32（4）:63-66.）

[2] 申江,刘斌.冷藏链现状及进展[J].制冷学报，2009，30（6）:20-25.（Shen Jiang, Liu Bin. Status and progress of cold storage chain [J]. Journal of Refrigeration, 2009, 30（2）:20-25.）

[3] 苏文,陈汝东.蓄冷技术在冷库中的应用[J].制冷技术，2002（4）:31-35.（Su Wen, Chen Rudong. Application of cool storage technology in refrigerated warehouse[J]. Refrigeration Technology, 2002（4）:31-35.）

[4] 曾德范,周东一.蓄冷节能技术在冷库中的应用研究[J]. 节能，2009（5）:19-21.（Zeng Defan, Zhou Dongyi. Application research of cold storage technology used in cold storage[J]. Energy Saving, 2009（5）:19-21.）

[5] Horatio Scott Carslaw, John Conrad Jaeger. Conduction of Heat in Solids[M].London : Clarendon Press,1986.

[6] 杜雁霞，程宝义，贾代勇,等.相变材料蓄冷板凝固过程的传热研究[J].制冷学报,2005, 26（2）:44-46.（Du Yanxia, Cheng Baoyi, Jia Daiyong, et al. Study on heat transfer of phase-change cool-storage slab in solidification[J]. Journal of Refrigeration, 2005, 26（2）:44-46.）

[7] 张宝刚.新型立式封装板蓄冰设备性能的实验与理论研究[D].天津:天津大学,2007.

[8] 吴丽媛,宋文吉,肖睿,等.相变蓄冷技术在低温冷库系统的应用前景[C]//第七届全国食品冷藏链会议.青岛:2010:193.

[9] 张仁元.相变材料与相变储能技术[M].北京:科学出版社,2009.

[10] 耿德普.全数字冷库温度检测系统研究[D].大连:大连理工大学,2002.

通讯作者简介

冯自平，男（1968－），研究员，中国科学院“百人计划”引进国外杰出人才、团队首席科学家，（020）87057795，E-mail：fengzp@ms.giec.ac.cn。研究方向：相变蓄冷技术、先进储能技术在空调制冷领域的应用研究。

About the corresponding author

Feng Ziping（1968－）, male, Analyst, the introduction of foreign talents of Chinese Academy of Sciences "Hundred Talents Program", group chief scientist,（020）87057795, E-mail: fengzp@ms.giec.ac.cn. Research fields: Phase change storage technology, advanced energy storage technology used in air conditioning and refrigeration system.