

Experimental Investigation on Household Refrigerator with Cold Storage

Shuang Yang¹, Zhongbao Liu¹, Ting Liu²

1. Beijing University of Technology, Beijing, China, 100124

2. China Household Electric Appliance Research Institute, Beijing, China 100037

pna_yangshuang@emails.bjut.edu.cn, liuzhongbao@bjut.edu.cn

Abstract: This paper conducted an experiment to investigate the operation performances of a refrigerator using phase change materials (PCM), and analyzed the energy efficiency and the market prospect of household refrigerator with cold storage. According to the experimental results, under the harsh condition of high temperature between 30°C to 35°C, the temperature of each chamber of the refrigerator with cold storage can keep normal during the experimental cycle, and power consumption decreased around 10.5% compared to the conventional one working in the same condition also. In the light of the present situation of that the electric resource is in short supply day by day, the refrigerator with cold storage will have strong practical value.

Keywords: refrigerator; cold storage; phase change material; experimental investigation

家用蓄冷冰箱的实验研究

杨 双¹, 刘忠宝¹, 刘 挺²

1. 北京工业大学, 北京, 中国, 100124

2. 中国家用电器研究院, 北京, 中国, 100137

pna_yangshuang@emails.bjut.edu.cn, liuzhongbao@bjut.edu.cn

摘 要: 本文针对利用相变材料蓄冷的冰箱系统的运行特性进行了实验研究, 分析了带蓄冷功能的家用冰箱的节能优势以及所具有的市场前景。根据实验结果我们可以发现, 在 30-35°C 的恶劣高温条件下, 试验周期内蓄冷冰箱各室的工作温度基本能够维持正常, 耗电量比同条件下工作的常规冰箱减少 10.5% 左右。在电力资源日趋紧张的背景下, 蓄冷冰箱将具有较强的实用价值。

关键词: 冰箱; 蓄冷; 相变材料; 实验研究

1 引言

据相关资料统计, 2010 年一季度, 我国冰箱整体市场零售量高达 667 万台, 零售额达到 164 亿元。如此大的市场发展势头, 为现代社会最为广泛使用的能源--电能又提出了更高的挑战。随着节能环保的呼声日趋高涨, 民众的节能环保意识也得到较大加强, 冰箱节能已经超越了冰箱冷藏功能, 上升为居民家庭购买的首要关注点。据专家测算, 如果我国冰箱企业全部生产节能冰箱, 平均每年可减少的耗电量约 120 亿度。

节能化已经是世界各国电冰箱发展的趋势。在美国, 由于其能源部将电冰箱能耗标准每三年提高一次, 提高幅度高达 10%-25%, 而且各产品的能耗情况必须

贴在电冰箱上, 实行优质优价, 以供顾客选择, 因而迫使各制造厂不断优化设计, 进行节能技术研究。选用高效节能型压缩机、采用真空隔热面板 (VIP) 技术都是实现节能的有效途径。但是冰箱这样的小功率家电采用变频机组和真空绝热材料成本较高, 实际使用和推广上受到极大的局限。

由于高效相变潜热蓄冷技术能够有效地实现冷量的储存和转移, 可在不影响冰箱内温度的情况下减少压缩机启停频率, 达到节能的目的。因此, 目前将相变蓄冷用于冰箱实现电量的移峰填谷利用的研究已经越来越受国内外研究者们的关注。本文总结了相变蓄冷技术在冰箱中的使用现状, 并针对室内高温环境下, 采用相变材料蓄冷的冰箱的性能及运行情况进行了实验研究。

2 冰箱用相变蓄冷技术研究现状

相变蓄冷是指利用将相变材料 (Phase change material, PCM) 在相变过程中吸收 (释放) 的大量热能储存起来而实现能量的时空转换。相变潜热储能远比显热储能大, 且蓄冷温区适应范围广, 对于缓解电力紧张, 平衡峰谷用电具有重要的研究意义。

用于蓄冷的相变材料主要分为无机物和有机物两大类。无机物相变蓄冷材料主要是结晶水合盐类, 但这类物质存在过冷现象和相分离, 对蓄冷能力有较大影响。有机相变蓄冷材料常用的则有脂肪酸、烃、脂、醇及高分子聚合物类等。冰箱中使用蓄冷技术, 可以延缓冰箱温度回升时间、减少冰箱内温度的波动; 减少冰箱压缩机的启动次数, 节约能源^[1]。

作为冰箱用相变蓄冷材料, 首先要满足以下几方面的要求^[2]:

1) 热力学方面的要求: 合适的相变温度; 较高的相变潜热; 比热容较大; 导热率较大; 密度较大; 较小的膨胀系数, 融化一致;

2) 相变动力学方面的要求: 过冷度小; 较好的相平衡特性; 较好的固化结晶速率;

3) 化学性质方面的要求: 稳定性好, 无化学分解; 无腐蚀性; 不然、不爆、无毒、对环境无污染;

4) 经济方面的要求: 大量易得, 价格便宜, 制备方便。

目前国内外针对相变蓄冷材料的研究已经比较深入。杨颖、沈海英等^[3]根据相变材料的相变温度应符合冰箱蒸发器工作温度的要求, 通过对大量相变温度在 $-20 \sim -40^{\circ}\text{C}$ 的有机物和无机物材料的筛选, 选择采用氯化铵溶液和乙二醇两种相变材料混合搅拌而成的复合低温相变材料作为冰箱的储能介质。对混合溶液的热物性进行了研究, 并且利用 FLUENT 软件对冰箱内敷管蓄冷板的凝固融化过程及冰箱体内的温度场、流场进行了数值模拟研究。新飞公司的王蕾蕾等^[4]对利用蓄冷材料储能的冰箱的蓄放冷过程进行了实验研究, 证实了蓄冷冰箱可较好的发挥移峰填谷作用。樊栓狮^[5]等应用蓄冷节能原理, 在样机上安装了敷管蓄冷板和箱壁蓄冷板, 采用一定比例的 NH_4Cl 、 NaCl/KCl 的混合溶液作为蓄冷材料, 实验结果表明蓄冷冰箱与普通冰箱相比, 温度均匀、波动小, 压缩机启停频率减少, 节能达到 5%-13%。

法国的 Azzouz, K, D. Leducq 和 D. Gobin^[6-7]建立了具有相变蓄冷能力的蒸汽压缩式制冷系统的动态模型, 对不同相变温度 (-9 、 -7 、 -5 、 -3 和 -1°C)、

不同相变材料厚度 (0.25, 0.35, 0.5cm) 和不同热负荷条件下的系统性能进行了仿真, 系统的 COP 可以比传统冰箱提高 5-15%, 压缩机的启停次数也大大减少了, 制冷单元的温度波动也就随之降低了。日本的 Yamada, M 等^[8]对冰浆储能系统的性能进行了分析, 他们在换热盘管表面涂上了聚乙烯薄膜以保证冰浆的流动性。

在冰箱中采用相变蓄冷技术是利用夜间低谷电制冷, 蓄冷材料吸收多余的能量发生相变储存冷量; 当白天电价较高时, 则由蓄冷材料发生相变释放冷量, 保证冰箱工作空间的温度要求。这种工作模式, 能够有效地转移用电高峰负荷, 实现经济可靠运行。目前蓄冷技术在冰箱上的应用主要是在车载冰箱上, 一般是将蓄冷盒先冷冻 12 小时左右, 再移至车载冰箱中, 保证车上食品保存的温度需求, 而真正意义上的家用蓄冷冰箱还并没有市场化。

3 实验方法及结果分析

3.1 实验方法

本实验用冰箱选用容积为 208L 的冷藏冷冻箱, 冷冻室具有一个 12L 的“二星”级部分。

箱内蓄冷盒以及各测点的布置结构如图 1 所示。箱内共布置有 8 个测点: 测点 1-3 测量的是冷藏室各层的工作温度, 测点 4 为二星级室的工作温度, 5-7 为冷冻室各层工作温度, 测点 8 为冷藏室后壁的温度。

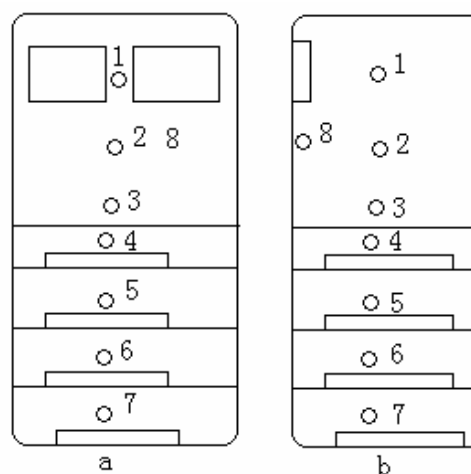


Figure 1. The layout of cold storage boxes and each station
a- view with door open (cross section),
b- side view (cross section)

图 1 蓄冷盒以及各测点布置图
a-正视剖面图, b-侧视剖面图

根据冰箱各室工作温度的变化情况，冷藏室采用相变温度为 0.5℃的 1#蓄冷剂，冷冻室采用相变温度为-18℃的 2#蓄冷剂。蓄冷剂的相关性质及用量如表 1 所示。蓄冷剂采用符合食品行业卫生标准的高密度聚乙烯（HDPE）、超级复合材料包装。HDPE 具有良好的耐热性和耐寒性，化学稳定性好；还具有较高的刚性和韧性，机械强度好；介电性能，耐环境应力开裂性亦较好。用作蓄冷包装材料，不易泄漏，安全卫生。

Table 1. Performances of the cold storage materials
表 1 蓄冷剂相关性质

蓄冷剂	相变温度 ℃	相变潜热 kJ/kg	用量 g
冷藏室 1#	0.5	338.7	2*750
冷冻室 2#	-18	266.3	4*1000

本实验所测试的各点温度由多点温度记录仪完成，传感器为数字式温度传感器，精度为±0.5℃，该记录仪可以自动扫描和保存数据，通过数据线将其和电脑连接后，能够随时导出需要时间段的数据，方便快捷。

3.2 实验结果分析

实验在室内环境温度为 30-35℃的恶劣条件下进行，实验周期为 48h 的时间，冰箱温控档设置在 4 档。各测试点的温度随时间的变化情况如图 2 所示，各点特征温度值如表 2 所示。

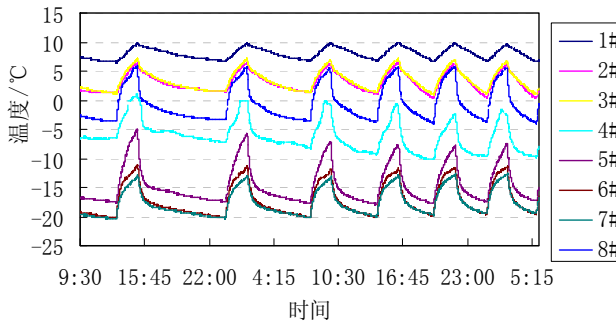


Figure 2. Curve: temperature of each station in the refrigerator

图 2 冰箱内各测点温度变化曲线

Table 2.Characteristic temperature of each station
表 2 各测点特征温度值（℃）

测点	1#	2#	3#	8#
最大值	10	6.5	7.1	5.9
最小值	6.5	0.3	0.9	-4

平均值	8.0	3.1	3.4	-0.6
测点	4#	5#	6#	7#
最大值	1.1	-5	-11.2	-12.5
最小值	-10.1	-18	-20.2	-20.4
平均值	-6.2	-14.5	-17.1	-17.6

对于常规的家用电冰箱，当环境温度高达 30-35℃时，若冰箱温控档设定在 4 档，则冰箱压缩机可能会出现长时间运行而不停机的情况，停机后温度回升快，导致压缩机运行时间远远大于停机时间，耗电量大幅度增加。

实验周期的前 24 个小时内，冰箱所处的室内环境温度维持在 35±1℃的高温环境中，压缩机运行时间相对较长，箱内温升大，在之后的 24h 内，室内环境温度维持在 30±1℃的环境中，压缩机开停比相对增加了，箱内温度波动范围也得到降低。由此可知，冰箱的工作环境对于冰箱的运行性能有较大影响，环境温度过高将导致箱内温度升高快，因此，为保证冰箱的正常工作条件，降低其耗电量，冰箱壳体的绝热性能和门缝等的气密性都应非常良好。

由图 2 和表 2 可知，箱内冷藏室测点 2、3 和冷冻室测点 6、7 完全满足冰箱工作温度的要求，而冷藏室测点 1、二星级室测点 4 以及冷冻室测点 5 的温度相对于常规运行情况偏高。造成这种结果的原因以及相应的改进措施分析如下：

1、对于测点 1 而言，由于冷藏室蓄冷盒敷设在最上层，这部分的传热受到蓄冷盒的阻碍，传热热阻增大，导致 1 部分的温度偏高；但是由图我们也可以看到，1 点的温度波动相对于其他各点而言也更小，这一方面是因为 1 处温度最高，温升小，另一原因则是因为蓄冷剂发挥了作用的结果。

如果要使测点 1 的温度能够保持得更低，可以根据冷空气下降的原理将蓄冷盒的位置相应布置的靠近冷藏室下部一点，或者设计成条缝型的，这样既可以保证各层温度，又能够较好的发挥蓄冷盒的作用，保证蓄冷剂释放冷要求。

2、二星级室测点 4 的温度相对于常规情况偏差较大，造成这种结果主要有两个方面的原因：一是二星级上部没有布置蒸发盘管，在下部蒸发盘管上放置了蓄冷盒以后，冷量的传递受到影响；二是蓄冷盒里的蓄冷剂相变温度为-18℃，在二星级室中不能较好的发挥蓄冷作用。

针对以上两种原因分别可以做相应的改进：一是在二星级上部增设蒸发盘管，保证温度要求；二是改用相变温度为-12℃的蓄冷材料。同时从图中我们也可

以看出,随着室内环境温度的降低以及冰箱工作时间的延长,二星级室的温度也逐渐趋于稳定,温度波动减小,能够基本满足夏季食物储存要求。

3、冷冻室测点 5 的温度偏高,且温度波动较大,主要是受到二星级室的影响,针对二星级室做相应的改进即可。

此外,由测点 8 的温度变化曲线可以知道,冷藏室蓄冷盒的布置以及蓄冷剂的选择能够满足相变温度的要求;由冷冻室测点 5-7 的温度变化曲线也可知道,冷冻室蓄冷盒的布置以及蓄冷剂的选择基本能够满足相变温度的要求,实现高效相变潜热蓄冷。二星级室则应选用相变温度相对较低的蓄冷剂作为蓄冷材料,以保证能够有效利用潜热能蓄冷,以免只利用显热蓄冷,效果差,反而增大了冰箱运行负荷。

实验用带蓄冷的家用冰箱与不带蓄冷的家用冰箱在相近的环境条件下运行 48h 的耗电量对比结果如图 3 所示,蓄冷冰箱在高温环境下工作,比近似条件下工作的常规冰箱节电 10.5%。

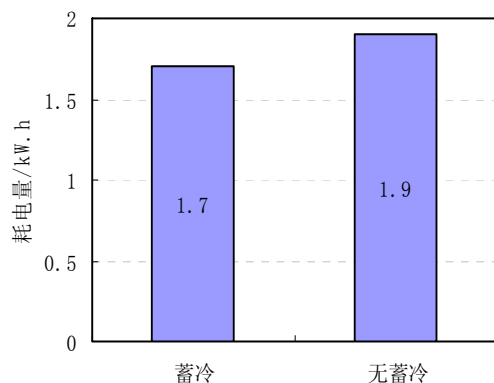


Figure 3. Power consumption of the refrigerator with/without cold storage during the experimental cycle of 48h

图 3 实验周期 48h 内有/无蓄冷的冰箱耗电量对比图

4 结论

本文初步探讨了相变潜热蓄冷技术在家用冰箱上的应用效果,实验测试了冰箱各室的工作温度情况,

检验了蓄冷冰箱的节能特性。实验结果表明:将相变潜热蓄冷技术应用在家用电冰箱上是行之有效的,在高温环境条件下,冰箱内各室的工作温度能够基本满足食品冷冻保鲜的要求,冰箱耗电量得到有效降低。在电力资源日趋紧张,人们节能意识不断强化的背景下,家用蓄冷冰箱一定会具有巨大的市场推广价值和应用前景。

References (参考文献)

- [1] Yang Yin, Shen Haiying. Investigation cryogenics cool thermal energy storage phase change composition material [J]. Chinese Journal of Low Temperature Physics. 2009(02): 144-147.
杨颖, 沈海英. 复合低温相变蓄冷材料的实验研究[J]. 低温物理学报. 2009(02): 144-147.
- [2] Chen Yingzi, Liu Yicai, Liu Zhihui. Experimental investigation on refrigerator employing phase changeable compound materials[J]. Refrigeration Technology. 2006(02): 13-16.
陈英姿, 刘益才, 杨智辉. 冰箱组合式相变材料蓄冷的实验研究[J]. 制冷技术. 2006(02): 13-16.
- [3] Shen Haiying. Thermal Properties of Compound Low-temperature Phase Change Materials and Application in Numeric Simulation of Refrigerator[D]. Chongqing University. 2008.
沈海英. 复合相变蓄冷材料热物性研究及其在冰箱数值模拟中的应用[D]. 硕士毕业论文. 重庆大学. 2008.
- [4] Wang Leilei, Yan Jia, Xiao Jianjun etc. Experimental Study on Cold Accumulation and Release of Peak Load Shifting Refrigerator. Journal of Refrigeration. 2008(02): 39-41.
王蕾蕾, 严嘉, 肖建军等. 削峰填谷式冰箱蓄放冷实验研究. 制冷学报. 2008(02): 39-41.
- [5] Fan Shuanshi, Sun Shicai, Liang Deqing etc. A Novel Cool-storage Refrigerator and Its Appliancation. Refrigeration. 2005(01): 1-4.
樊栓狮, 孙始财, 梁德青等. 一种新型蓄冷冰箱及其运行过程研究. 制冷. 2005(01): 1-4.
- [6] Azzouz K, Leducq D, Gobin D. Enhancing the performance of household refrigerators with latent heat storage: An experimental investigation [J]. International Journal of Refrigeration. 2009, 32(7): 1634-1644.
- [7] Azzouz K, Leducq D, Gobin D. Performance enhancement of a household refrigerator by addition of latent heat storage [J]. International Journal of Refrigeration. 2008, 31(5): 892-901.
- [8] Yamada M, Fukusako S, Kawanami T. Performance analysis on the liquid-ice thermal storage system for optimum operation [J]. International Journal of Refrigeration. 2002, 25(2): 267-277.