

文章编号:0253-4339(2019)05-0044-08
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2019.05.044

耦合双循环冰箱运行参数与耗电量实验研究

蒋若恒¹ 唐黎明¹ 陈光明¹ 陈 琪¹ 韩斌斌²

(1 浙江大学制冷与低温研究所 浙江省制冷与低温技术重点实验室 杭州 310027; 2 杭州华日家电有限公司 杭州 311411)

摘 要 本文研究了耦合双回路冰箱样机在不同工作状态下的运行参数,同时在标准工况下测量了系统耗电量,并与现有产品进行对比。结果表明:系统在耦合运行后,冷藏循环负荷增加导致两台样机冷藏循环的冷凝压力比耦合前分别上升 23 kPa 和 40 kPa,蒸发压力比耦合前分别上升 18 kPa 和 32 kPa,同时还造成冷凝器和蒸发器出口温度的上升;耦合运行对于冷冻循环的影响主要表现在冷凝压力及冷凝器出口过冷度的下降。其中样机 I 冷冻循环的冷凝压力下降 27 kPa,过冷度下降 1.4 ℃。样机 II 由于独立运行时冷凝器出口过冷度较小,耦合运行后冷凝压力下降超过 160 kPa,导致冷凝压力低于环境温度对应的饱和压力,冷凝器中没有潜热交换。标准条件下的耗电量实验表明,耦合双循环冰箱系统比改造前的传统冰箱系统节能 8%。

关键词 冰箱;节能;双循环;过冷度

中图分类号:TB657.4; TB61[†]1 **文献标识码**:A

Experimental Research on Operating Parameters and Power-consumption of
Coupled Dual-loop Refrigerator/Freezer

Jiang Ruoheng¹ Tang Liming¹ Chen Guangming¹ Chen Qi¹ Han Binbin²

(1. Key Laboratory of Refrigeration and Cryogenic of Zhejiang Province, Institute of Refrigeration and Cryogenics, Zhejiang University, Hangzhou, 310027, China; 2. Hangzhou Huari Household Electric Appliance Co., Ltd., Hangzhou, 311411, China)

Abstract Coupled dual-loop system has been shown to possess energy-saving potential in the domestic refrigerator domain. However, whether the system could operate steadily under designed conditions and how efficiently the system performs under national standard testing condition have not been taken into account. This study investigated the operating parameters of two refrigerator prototypes, wherein the power consumption of one prototype was tested and compared to an existing product. Results revealed that when the system was operated with coupled dual-loop, the condensing pressure of two refrigerators would increase by 23 and 40 kPa, respectively, in comparison with the case prior to the coupling. Moreover, increments of 18 and 32 kPa for the evaporating pressure of the separate refrigerators were obtained, which were accompanied by the corresponding increases in the outlet temperatures of condenser and evaporator. These increments were attributed to the cooling load of the refrigerators. From the viewpoint of the freezer, the coupling operation would decrease the condensing pressure and degree of subcooling at the condenser outlet. The condensing pressure and degree of subcooling of the freezer with prototype I decreased by 27 kPa and 1.4 ℃ after coupling, respectively. Furthermore, as the initial degree of subcooling of the freezer with prototype II was insufficiently large, the condensing pressure of the freezer decreased by approximately 160 kPa after the coupling operation, which was even lower than the saturated pressure of the ambient temperature which finally resulted in a no-latent heat exchange in the condenser. Under standard conditions, the energy-consumption tests showed that the efficiency of the new refrigerator is 8% higher than that before the alternation.

Keywords refrigerator/freezer; energy saving; dual-loop; degree of subcooling

随着经济的快速发展,冰箱早已成为人们生活中不可或缺的电器,而冰箱的耗电量在居民用电中的占比超过 10%^[1-2],因此提高冰箱性能、减少冰箱能耗对缓解当前能源危机具有重要意义。

许多学者在传统冰箱系统的基础上提出了一些更加高效的改进型系统。1975 年,A. Lorenz 等^[3]将 R22/R11 混合制冷剂用于串联蒸发器系统,利用混合工质两相区的温度滑移特性,减小传热过程的不可

基金项目:国家重点研发计划(2016YFB0901404)资助项目。(The project was supported by the National Key R & D Program (No. 2016 YFB0901404).)

收稿日期:2018-07-13;修回日期:2018-10-29

逆损失,使系统性能提升 20%。目前研究较多的冰箱用混合制冷剂为 R290/R600a 混合物^[4-7]。Lu Zhili 等^[8-10]提出一种蒸发器交替工作的旁通双循环系统,研究表明该系统比传统串联蒸发器系统节能 13%。张成全等^[11]利用微通道冷凝器使冰箱耗电量降低 2.6%。Liu Xiaoqin 等^[12-15]将喷射器用于冰箱系统以减小节流过程的不可逆损失,研究表明喷射器的引入能使系统性能提高 10% 以上。A. C. Marques 等^[16-17]从冰箱的实际运行过程入手,提出将相变材料用于冰箱系统来减小压缩机的启停频率,结果表明改进后的系统可比原系统节能 8%。

唐黎明等^[18-21]将冷变换器原理运用于双压缩机双循环系统,提出了耦合双循环系统。通过理论及稳态实验研究,证明该系统具有较大的节能潜力。此后,又通过一种新的控制策略,使该系统能更好地适应实际冰箱的运行过程。虽然新的控制策略可使冰箱尽可能的耦合运行,但在实际工作过程中,仍会出现冷藏循环单独运行、冷冻循环单独运行和循环耦合运行 3 种不同的状态。耦合运行给系统带来的影响及实际冰箱的耗电量情况在之前研究中均未涉及。

本研究在传统 BCD-580 冰箱的基础上搭建了耦合双循环冰箱样机。通过实验研究了样机在不同工作状态下系统运行参数的变化,同时测试了样机的耗电量,并与现有产品进行了对比。

1 耦合双循环冰箱的基本原理

图 1 所示为耦合双循环冰箱的系统原理。该系统在传统双循环系统的基础上,引入一个耦合过冷器,将冷藏循环的一部分制冷量用于对冷冻循环冷凝器出口的制冷剂进行过冷,实现了两个系统的能量耦合。

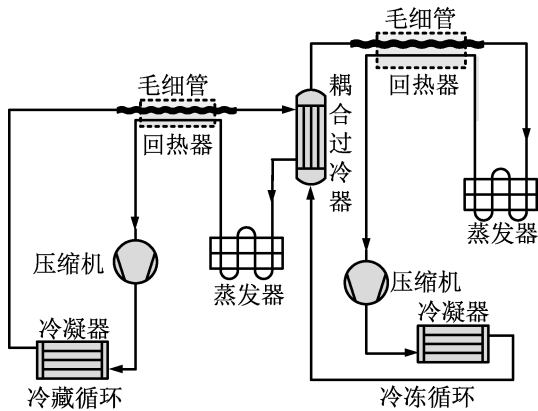


图 1 耦合双循环冰箱系统原理

Fig.1 The principle of coupled dual-loop refrigerator system

图 2 所示为耦合双循环冰箱系统压焓图。图中

冷藏子循环为 $0_R-1_R-2_R-3_R-4_R-5_R-0_R$, 冷冻子循环为 $0_F-1_F-2_F-3_F-4_F-5_F-0_F$ 。由图 2 可知,在耦合过冷器的作用下,冷藏循环中的部分制冷量(4_R-5_R)被用于对冷冻循环冷凝器出口的制冷剂进行过冷(3_F-4_F),由于节流过程的等焓特性,这部分过冷量(3_F-4_F)将等量转化为冷冻循环的蒸发冷量($5_F-5'_F$)。该过程实现了低品位冷量向高品位冷量的转化,同时没有增加系统功耗。

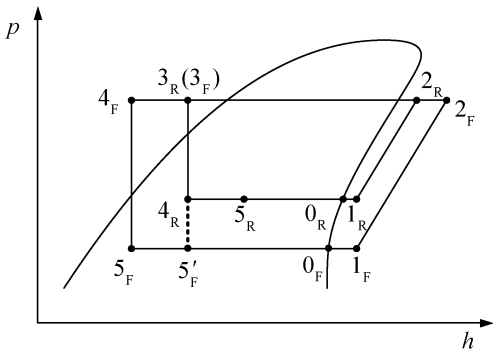


图 2 耦合双循环冰箱系统 $p-h$ 图

Fig.2 $p-h$ diagram of coupled dual-loop refrigerator system

2 样机及实验装置

本研究所用的样机在 BCD-580 冰箱的基础上改造完成。考虑到今后冰箱的产品化及能够与现有冰箱效果进行对比,样机的设计完全参照国家标准 GB/T 8059. 2—1995 进行^[22]。设计完成的样机结构如图 3 所示。制冷系统由冷藏循环和冷冻循环构成,冷藏循环和冷冻循环均采用 R600a 作为制冷剂,保温材料采用硬质聚氨酯。

根据不同的设计需求,本文共搭建两台冰箱样机,记为样机 I 和样机 II。样机 I 的设计主要考虑到系统的稳定运行,且要求运行过程中的各项参数基本合理。样机 II 是在样机 I 的基础上进行改造优化,通过将独立冷凝器的形式从旋翅式改为微通道式,同时缩短毛细管长度来减少制冷剂充注量,降低冷凝压力。此外,样机 II 还选用了效率更高的压缩机来提升系统综合性能。表 1 所示为两台样机的具体部件参数。

冰箱样机的实验测试在电冰箱有限公司的冰箱性能实验室完成,实验室可实现环境温、湿度和气流组织的控制和调节。测试过程按照冰箱测试相关国家标准完成^[22]。若无特殊说明,实验时的环境温度为 25 ℃,相对湿度为 70%。

实验中使用的测量和数据采集装置包括:1) 温度测量装置选用 T 型热电偶,由标准铂电阻标定,精

度为±0.5℃;2)压力测量装置选用 PTX5072 压力变送器,量程为 0~1 MPa,精度为 0.2 % FS;3)功率测量装置选用 HB404P 智能功率表,精度等级为 0.5

级;4)数据采集采用安捷伦 34970A 数据采集器,温度信号、压力信号、功率信号均转换成直流电压信号输入采集器并输出在计算机端。

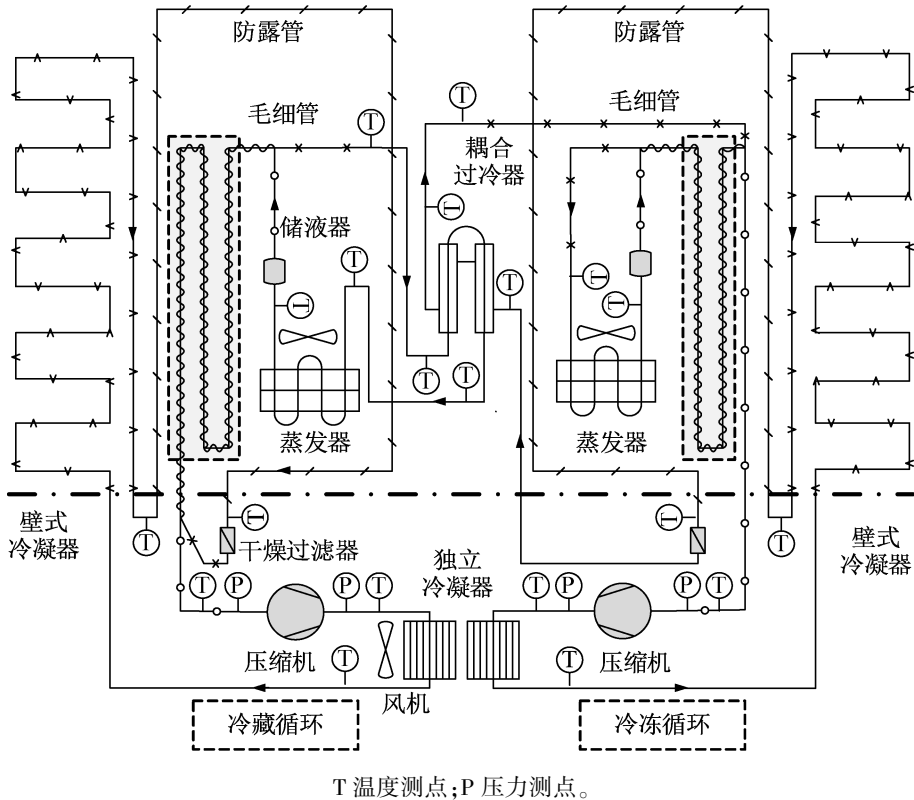


图 3 冰箱样机结构

Fig.3 Structure of the refrigerator/freezer prototype

表 1 样机主要部件参数

Tab.1 The parameters of prototype main components

参数	压缩机型号	冷凝器形式	蒸发器形式	毛细管长度/mm	毛细管内径/mm	充注量/g
样机 I	冷藏循环	MH1060Y	翅片管式	2 940	0.65	45
	冷冻循环	NX1112Y		3 250		90
样机 II	冷藏循环	ND1070Y	翅片管式	2 500	0.65	55
	冷冻循环	ND1112Y		3 000		60

3 运行参数实验

为获得不同工作状态下系统的运行参数,设计了顺序为冷冻循环独立运行、耦合运行、冷藏循环独立运行的开停机过程。文中出现的饱和状态参数均通过 REFPROP v9.0 获得。

3.1 冷凝蒸发压力分析

图 4 所示为样机 I 冷藏循环的冷凝、蒸发压力随时间的变化。由于样机 II 冷藏循环的压力变化趋势与样机 I 几乎相同,因此此处没有给出其压力变化曲线。图 4~图 10 中,运行参数曲线下方的功率曲线用

于辨别系统的运行状态,即冷藏单独运行、冷冻单独运行及耦合运行。

由图 4 可知,系统耦合运行时,冷藏循环的冷凝、蒸发压力均高于系统独立运行时,原因是耦合过冷器的工作增大了冷藏系统的蒸发负荷,导致冷藏蒸发压力升高^[23],系统流量增大,冷凝负荷增大,最终引起冷凝压力的增大。

图 5 所示为样机 I 和样机 II 冷冻循环压力随时间的变化。由图 5 可知,在耦合运行和独立运行两种状态下,样机 I 冷冻循环的冷凝压力略有下降,而蒸发压力几乎不变;样机 II 的蒸发压力也几乎不变,但

样机 II 的冷凝压力在耦合运行后突然下降,降幅超过 160 kPa,偏离了设计工况。冷凝压力的降低表面上可以减小压比,降低冷冻循环的功耗,但事实上,压力的降低对系统整体性能的影响是不利的,具体原因会在后文中结合温度参数进行说明。

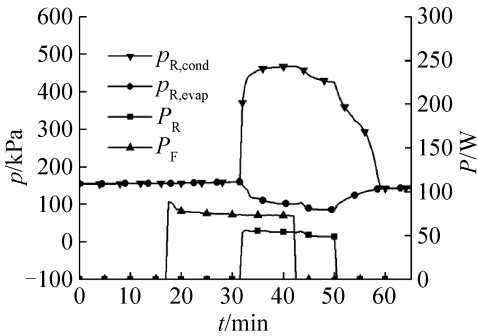


图 4 样机 I 冷藏循环冷凝、蒸发压力随时间的变化
Fig.4 Variation of condensing and evaporating pressure of refrigerator (Prototype I) with time

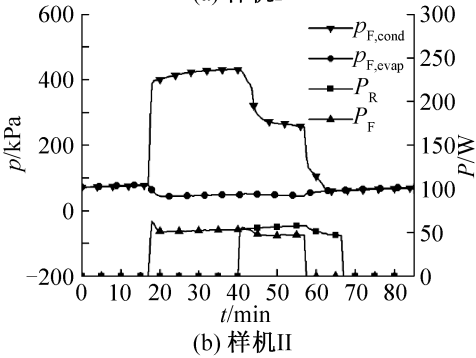
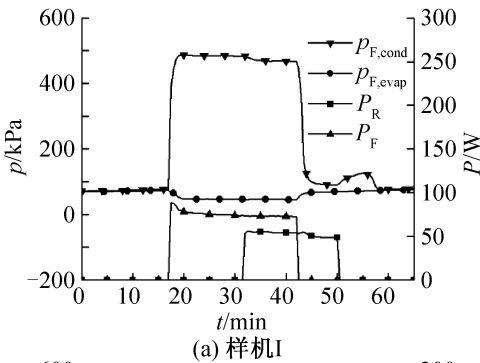


图 5 样机冷冻循环冷凝、蒸发压力随时间的变化
Fig.5 Variation of condensing and evaporating pressure of freezer with time

两台样机冷冻循环的冷凝压力在两种运行状态下的变化规律不同,这是因系统结构不同导致。过冷需要在远离冷凝过程相变界面处进行^[24],若过冷靠近相变界面将引起冷凝压力的降低。样机 II 在设计过程中缩短了毛细管长度,减少了制冷剂充注量,这导致冷冻循环冷凝器出口的过冷度减小,过冷靠近相变界面。当系统中产生一定扰动界面移动到过冷段

时,系统就会出现冷凝压力降低的现象。

3.2 冷凝过程温度分析

图 6 所示为样机 I 和样机 II 在不同运行状态下冷凝器出口温度随时间的变化。实验数据如表 2 所示。

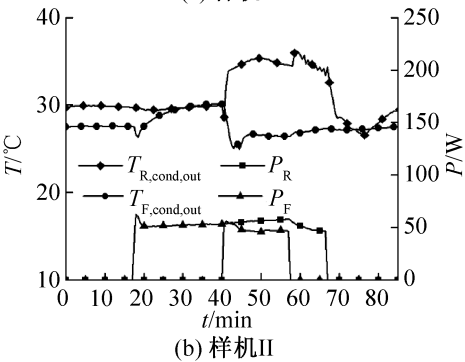
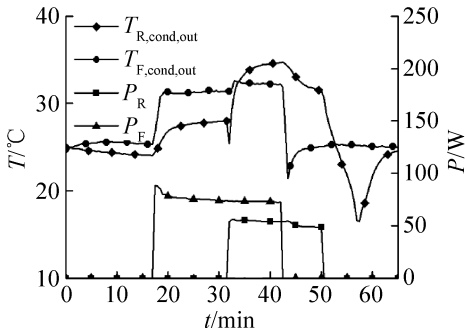


图 6 样机冷凝器出口温度随时间的变化
Fig.6 Variation of condenser outlet temperature of prototype with time

样机 I 冷藏循环在耦合运行时,冷凝器出口温度升高,这之前描述的的压力变化相匹配,主要由于冷凝负荷增大导致。而冷冻循环在过冷运行后,由于节流后制冷剂干度减小,导致蒸发器中制冷剂平均密度变大,蒸发器需液量增大,冷凝器中的过冷段液体减少,过冷度下降,冷凝器出口温度升高。

样机 II 的冷藏循环温度变化与样机 I 类似,但样机 II 冷冻循环冷凝器出口温度有约 10 °C 的过热度,说明冷冻冷凝器并未起到冷凝的作用。这是由于冷冻循环的冷凝压力在耦合运行时大幅度降低所致。由图 6 可知,在耦合运行后冷冻循环冷凝压力低于 300 kPa,此压力对应的饱和温度低于环境温度。此时冷凝器的作用只是将制冷剂温度降至环境温度,不能起到冷凝的作用。实际的冷凝过程靠消耗大量冷藏循环的制冷量来实现。该现象使系统从设计的过冷循环转变为复叠循环,而复叠循环的整体效率低于过冷循环,因此,此处的压力降低不利于系统的整体性能。

表 2 样机冷凝过程温度参数
Tab.2 Temperature parameters of condensing process

参数		$T_{R,cond,out}/^{\circ}\text{C}$	$T_{R,cond,sat}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta T_{R,sc}/^{\circ}\text{C}$	$T_{F,cond,out}/^{\circ}\text{C}$	$T_{F,cond,sat}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta T_{F,sc}/^{\circ}\text{C}$
样机 I	单独运行	30.6	33.1	2.5	31.4	36.1	4.7
	耦合运行	31.6	34.9	3.3	32.2	35.6	3.3
样机 II	单独运行	34.6	38.0	3.4	30.0	32.1	2.1
	耦合运行	35.2	40.9	5.6	26.6	15.7	10.9

注: $T_{cond,sat}$ 表示冷凝压力对应的饱和温度, ΔT_{sc} 表示冷凝器出口过冷度。

3.3 蒸发过程温度分析

样机 I 和样机 II 不同运行状态下蒸发器进出口

温度随时间的变化如图 7 所示, $T_{evap,in}$ 和 $T_{evap,out}$ 分别表示蒸发器进、出口温度。具体实验数据如表 3 所示。

表 3 样机蒸发过程温度参数
Tab.3 Temperature parameters of evaporating process

参数		$T_{R,evap,in}/^{\circ}\text{C}$	$T_{R,evap,out}/^{\circ}\text{C}$	$T_{R,evap,sat}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta T_{R,in\&out}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta T_{R,sh}/^{\circ}\text{C}$	$T_{F,evap,in}/^{\circ}\text{C}$	$T_{F,evap,out}/^{\circ}\text{C}$	$T_{F,evap,sat}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta T_{F,in\&out}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta T_{F,sh}/^{\circ}\text{C}$
样机 I	单独运行	12.4	9.5	15.2	3.0	7.7	26.9	24.9	29.8	2.0	5.0
	耦合运行	8.1	4.9	10.4	3.2	5.5	30.5	26.9	30.2	3.6	3.3
样机 II	单独运行	10.4	11.0	12.8	0.6	1.9	25.7	22.7	29.7	3.0	7.0
	耦合运行	3.0	0.0	5.4	3.0	5.4	23.2	28.7	30.1	-5.5	1.4

注: $T_{evap,sat}$ 表示蒸发压力对应的饱和温度, $\Delta T_{in\&out}$ 表示蒸发器进出口温差, ΔT_{sh} 表示蒸发器出口过热度。

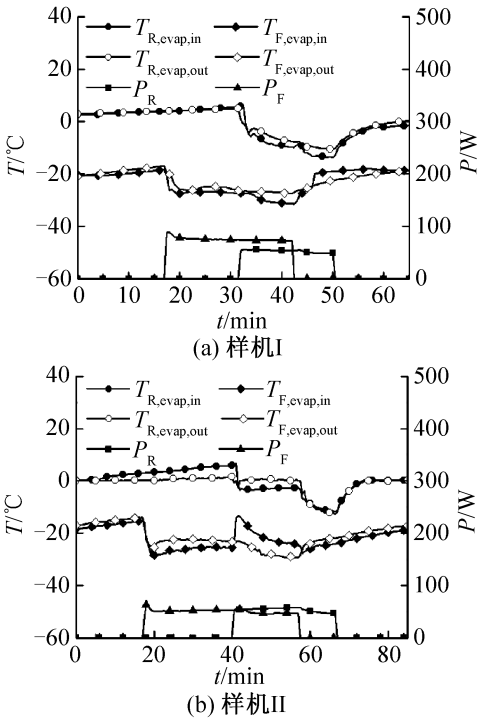


图 7 样机蒸发器进出口温度随时间的变化
Fig.7 Variation of evaporator inlet and outlet temperature of prototype with time

对比图 7(a) 和图 7(b) 可知,冷藏蒸发器的进出

口温度在由耦合运行变为独立运行过程中有明显的下降,这与前文中所描述的压力变化规律一致。由图 7 可知,样机 I 冷冻蒸发器的进出口温度在耦合运行后有一定的下降,其原因也与负荷相关。即当系统耦合运行后,冷冻循环的制冷量增大,但由于间室温度不变,此时的冷冻负荷不变,因此系统将通过降低蒸发温度来减小制冷量,使其与负荷相匹配。样机 II 的冷冻蒸发器进出口温度变化较为紊乱,由独立运行变为耦合运行时,蒸发器进口温度突然上升,原因是过冷后,毛细管中液体段增加,流动阻力下降,流量增大导致。此后进口温度逐渐下降。

4 耗电量实验

考虑到标准耗电量实验耗时较长,操作较为繁琐,本文首先对两台样机进行了非标准耗电量实验,然后选取其中一台性能较为出色的样机进行标准耗电量实验。

4.1 非标准条件实验

非标准条件实验时,控制环境温度为 25 °C,冷藏室和冷冻室设定温度分别为 5 °C 和 -18 °C。统计样机在一个化霜周期内的耗电量,然后将其转化为 24 小时耗电量进行对比。图 8 所示为样机在一个化霜

周期内的运行曲线。

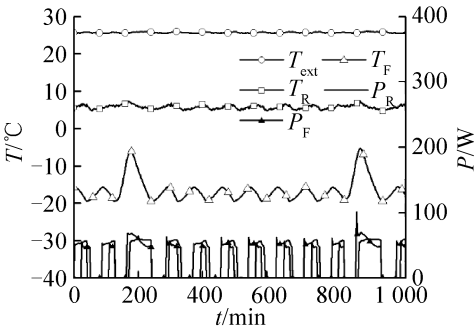


图 8 一个化霜周期内样机的运行曲线

Fig.8 Operating curve of the prototype in a deforest period

两台样机非标准条件下耗电量统计结果如表 4 所示。可知样机Ⅱ的耗电量相比样机Ⅰ大幅减少,这是对样机进行优化的结果。通过分别对比两台样机冷冻和冷藏循环的耗电量,可知样机Ⅰ冷藏循环耗电量低于样机Ⅱ,原因是样机Ⅱ在耦合运行过程中出现的压力降低导致,该变化导致冷藏循环制冷量的大量浪费,样机Ⅱ冷藏压缩机开机时间增加。而样机Ⅱ的冷冻循环耗电量相比样机Ⅰ大幅减少,原因是减小系统高压侧容积减少制冷剂充注量,从而减小了压缩机功耗,同时耦合运行时冷凝压力的大幅下降也有一定的影响,但这种影响不利于系统的综合性能,在后期改进中应避免。

表 4 样机耗电量测试结果

Tab.4 The results of energy-consumption test

样机	$E_R/$ (kW·h/24 h)	$E_F/$ (kW·h/24 h)	$E/$ (kW·h/24 h)
I	0.34	0.91	1.25
II	0.46	0.59	1.05

4.2 标准条件实验

非标准条件下的实验说明样机Ⅱ的性能优于样机Ⅰ,因此对样机Ⅱ按照冷藏冷冻箱耗电量国家标准进行了耗电量实验^[22]。实验中,首先完成一次强制化霜过程,然后经过两次压缩机启停,进入 73 h 的耗电量测试过程。

实验得到样机Ⅱ的标准耗电量为 1.15 kW·h/24 h。而改造前,该 BCD-580 冰箱的标准耗电量为 1.57 kW·h/24 h,考虑到样机选用了性能较好的压缩机(样机Ⅱ压缩机 COP≈1.96,而原产品压缩机 COP=1.73)以及压缩机小型化带来的性能下降(制冷量减少 50%,COP 下降约 10%^[16]),本文将原产品压缩机

COP 用 2.18 进行折算,此时的耗电量约为 1.25 kW·h/24 h,样机Ⅱ节能约 8%,耦合运行时冷凝压力的降低一定程度上限制了样机Ⅱ节能潜力的发挥。

5 结论

本文实验研究了两台耦合双循环冰箱样机的运行参数,同时在标准条件下测量了其中一台冰箱的耗电量,并与市场上现有冰箱进行对比,得到如下结论:

- 1)在耦合运行状态下,冷藏循环相比独立运行时具有更高的冷凝、蒸发压力,冷凝蒸发温度也更高。冷冻循环在耦合运行后,冷凝压力降低,冷凝器出口过冷度减小,当系统在独立运行时过冷度较小的情况下,耦合运行将导致冷凝压力大幅降低。冷凝和过冷均在过冷器中发生,不能充分发挥系统节能潜力。
 - 2)非标准条件下的耗电量实验表明:经过优化,样机Ⅱ比样机Ⅰ节能 16%。在标准条件下,测得样机Ⅱ的日耗电量为 1.15 kW·h,比改造前的系统节能 8%,证明耦合双循环冰箱具有一定的节能潜力。
- 因当前冰箱节能效果一定程度上受冷凝压力降低的影响,下一步研究需在稳定运行参数的前提下优化系统,进一步提升冰箱的性能。

符号说明

- p ——压力, kPa
- P ——功率, W
- T ——温度, °C
- E ——耗电量, kW·h/24 h

下标

- cond——冷凝
- evap——蒸发
- R——冷藏循环
- F——冷冻循环
- in——进口
- out——出口
- sc——过冷
- sh——过热
- sat——饱和
- ext——环境

参考文献

[1] FENG Dianshu, SOVACOO B K, KHUONG M V. The barriers to energy efficiency in China: assessing household electricity savings and consumer behavior in Liaoning Province[J]. Energy Policy, 2010, 38(2): 1202-1209.

[2] CHENG Wenlong, MEI Baojun, LIU Yining, et al. A novel household refrigerator with shape-stabilized PCM (phase

- change material) heat storage condensers: an experimental investigation[J]. *Energy*, 2011, 36(10): 5797–5804.
- [3] LORENZ A, MEUTZNER K. On application of nonazeotropic two-component refrigerants in domestic refrigerators and home freezers[C]//Proceedings of 12th International Congress of Refrigeration. Moscow, 1975:1005–1015.
- [4] YAN Gang, CUI Chengfeng, YU Jianlin. Energy and exergy analysis of zeotropic mixture R290/R600a vapor-compression refrigeration cycle with separation condensation[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2015, 53:155–162.
- [5] YOON W J, SEO K, CHUNG H J, et al. Performance optimization of a Lorenz-Meutzner cycle charged with hydrocarbon mixtures for a domestic refrigerator-freezer[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2012, 35(1):36–46.
- [6] AGRAWAL N, PATIL S, NANDA P. Experimental studies of a domestic refrigerator using R290/R600a zeotropic blends[J]. *Energy Procedia*, 2017, 109:425–430.
- [7] MOHANRAJ M, JAYARAJ S, MURALEEDHARAN C, et al. Experimental investigation of R290/R600a mixture as an alternative to R134a in a domestic refrigerator[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2009, 48(5):1036–1042.
- [8] LU Zhili, DING Guoliang, ZHANG Chunlu. Dynamic simulation of natural convection bypass two-circuit cycle refrigerator-freezer and its application: part I: system simulation and application[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2004, 24(10):1513–1524.
- [9] 卢智利, 丁国良, 张春路. 冷藏蒸发器面积可变的旁通双循环冰箱[J]. *工程热物理论*, 2004(增刊1): 5–8. (LU Zhili, DING Guoliang, ZHANG Chunlu. Bypass two-circuit RF with alternative areas of food compartment evaporator[J]. *Journal of Engineering Thermalphysics*, 2004 (Suppl. 1): 5–8.)
- [10] SIMMONS K E, HAIDER I, RADERMACHER R. Independent compartment temperature control of Lorenz-Meutzner and modified Lorenz-Meutzner cycle refrigerators[J]. *ASHRAE Trans*, 1996, 102(1):1085–1092.
- [11] 张成全, 施骏业, 陈江平. 采用微通道冷凝器的无霜风冷冰箱系统性能提升[J]. *制冷学报*, 2017, 38(3):43–49. (ZHANG Chengquan, SHI Junye, CHEN Jiangping, Optimal performance research of frost-free air-cooled refrigerator with microchannel condenser[J]. *Journal of Refrigeration*, 2017, 38(3):43–49.)
- [12] LIU Xiaoqin, YU Jianlin, YAN Gang. Theoretical investigation on an ejector-expansion refrigeration cycle using zeotropic mixture R290/R600a for applications in domestic refrigerator/freezers[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 90:703–710.
- [13] WANG Xiao, YU Jianlin, ZHOU Mengliu, et al. Comparative studies of ejector-expansion vapor compression refrigeration cycles for applications in domestic refrigerator-freezers[J]. *Energy*, 2014, 70(3):635–642.
- [14] WANG Xiao, YU Jianlin. An experimental investigation on a novel ejector enhanced refrigeration cycle applied in the domestic refrigerator-freezer[J]. *Energy*, 2015, 93:202–209.
- [15] 王骁, 周梦柳, 鱼剑琳, 等. 一种适用于冰箱的新型两相流喷射器压缩/喷射复合制冷循环[C]//2013 中国制冷学会学术年会论文集. 武汉:中国制冷学会, 2013. (WANG Xiao, ZHOU Mengliu, YU Jianlin, et al. Theoretical study on a novel two-phase ejector enhanced refrigerator cycle for household refrigerator-freezers[C]//Proceedings of Academic Annual Conference of Chinese Association of Refrigeration. Wuhan: Chinese Association of Refrigeration, 2013.)
- [16] MARQUES A C, DAVIES G F, MAIDMENT G G, et al. Novel design and performance enhancement of domestic refrigerators with thermal storage[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 63(2):511–519.
- [17] ELAREM R, MELLOULI S, ABHILASH E, et al. Performance analysis of a household refrigerator integrating a PCM heat exchanger[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 125: 1320–1333.
- [18] 唐黎明, 周苏明, 陈光明, 等. 带有冷变换器的双压缩机耦合冰箱[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2013, 47(11): 1983–1986. (TANG Liming, ZHOU Suming, CHENG Guangming, et al. A two-combined-compressor refrigerator/freezer with cooling transformer[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2013, 47(11):1983–1986.)
- [19] 周苏明. 基于冷变换器原理冰箱的理论和实验研究[D]. 杭州:浙江大学, 2014. (ZHOU Suming. Theoretical and experimental research on R/Fs based on cooling transfer[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.)
- [20] 沈燕, 陈光明, 唐黎明, 等. 双循环耦合冰箱不同控制方案性能模拟[J]. *工程热物理论*, 2016, 37(2): 250–254. (SHEN Yan, CHEN Guangming, TANG Liming, et al. Performance simulation of the dual-loop coupled refrigerator under different control schemes[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2016, 37(2):250–254.)
- [21] 何万基, 沈燕, 陈光明, 等. 耦合双循环冰箱的温度及耦合运行控制策略[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2016, 50(8): 1521–1528. (HE Wanji, SHEN Yan, CHEN Guangming, et al. Temperature and coupling running combination control scheme of dual-loop coupled refrigerator/freezer[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2016, 50(8):1521–1528.)

[22] 家用制冷器具冷藏冷冻箱:GB/T 8059.2—1995[S]. 北京: 中国标准出版社, 1996. (Household refrigerating appliances refrigerator freezer; GB/T 8059.2—1995 [S]. Beijing: Standards Press of China, 1996.)

[23] BJÖRK E, PALM B. Refrigerant mass charge distribution in a domestic refrigerator. Part II: steady state conditions [J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26(8): 866–871.

[24] 吴业正. 小型制冷装置设计指导 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011. (WU Yezheng. Design guidance for small refrigerating equipment [M]. Beijing: China Machine

(上接第 36 页)

[13] 金鑫, 瞿晓华, 祁照岗, 等. 微通道型分离式热管传热性能实验研究[J]. 制冷学报, 2011, 32(3): 15–19. (JIN Xin, QU Xiaohua, QI Zhaogang, et al. Experimental investigation on heat transfer of microchannel separate heat pipe [J]. Journal of Refrigeration, 2011, 32(3): 15–19.)

[14] 金鑫, 瞿晓华, 施骏业, 等. 微通道型分离式热管基站节能特性实验研究[J]. 制冷学报, 2012, 33(6): 32–37. (JIN Xin, QU Xiaohua, SHI Junye, et al. Research on the performance of telecommunication base station with separated heat pipe [J]. Journal of Refrigeration, 2012, 33(6): 32–37.)

[15] 陶洁. 分离式热管型空调工作特性研究的试验研究[J]. 制冷, 2013, 32(3): 14–16. (TAO Jie. Experimental research of characteristics of separate heat pipe air conditioning units [J]. Refrigeration, 2013, 32(3): 14–16.)

[16] 方贵银, 张曼, 吴双茂, 等. 分离式热管蓄冷空调系统充冷性能实验研究[J]. 制冷学报, 2009, 30(4): 46–50. (FANG Guiyin, ZHANG Man, WU Shuangmao, et al. Experimental study on charging performance of cool storage air-conditioning system with separated-type heat pipe [J]. Journal of Refrigeration, 2009, 30(4): 46–50.)

[17] 陈岚, 苏俊林, 伍贻文. 分离式热管充液率实验研究

Press.)

通信作者简介

陈琪, 男, 博士, 副教授, 浙江大学制冷与低温研究所, (0571) 87951738, E-mail: zjuchenqi@zju.edu.cn。研究方向: 节能与低品位能源利用、流体热物性。

About the corresponding author

Chen Qi, male, Ph. D., associate professor, Institute of Refrigeration and Cryogenics, Zhejiang University, +86 571–87951738, E-mail: zjuchenqi@zju.edu.cn. Research fields: energy-saving and utilization of low-grade heat, physical properties of fluids.

[J]. 上海理工大学学报, 2003, 25(3): 285–288. (CHEN Lan, SU Junlin, WU Yiwen. Experimental study on the working fluid filling rates of a special separate type heat pipe [J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2003, 25(3): 285–288.)

[18] 唐志伟, 师明星, 韩雅芳, 等. 分离式热管换热器传热特性的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2012, 33(7): 1190–1192. (TANG Zhiwei, SHI Mingxing, HAN Yafang, et al. Experimental study to heat transfer characteristics of separated heat pipes [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 33(7): 1190–1192.)

通信作者简介

王文, 男, 教授, 上海交通大学机械与动力工程学院, 13641977909, E-mail: wenwang@sjtu.edu.cn。研究方向: 分离式热管技术。

About the corresponding author

Wang Wen, male, professor, School of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiao Tong University, +86 13641977909, E-mail: wenwang@sjtu.edu.cn. Research fields: thermosyphon heat pipe technology.