

DOI: 10.7652/xjtuxb201403004

并联双循环风冷冰箱冷冻/冷藏切换时 制冷剂迁移研究

刘云, 赵日晶, 黄东

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对并联双循环风冷冰箱在冷冻/冷藏切换时的制冷剂迁移特性进行了实验研究, 该冰箱主要由压缩机、蒸发器、节流装置及冷凝器组成。冷藏、冷冻空间分别拥有独立的蒸发器、风机及主风道, 冷藏、冷冻室有各自的感温包。依据蒸发器温度变化, 冷冻向冷藏切换时的制冷剂迁移过程依次分压力平衡、制冷剂迁出冷冻蒸发、制冷剂迁移至冷藏蒸发这3个阶段。研究表明: 阶段1, 低压压力由冷冻蒸发压力向冷藏蒸发压力攀升; 阶段2, 冷藏蒸发器内基本无两相段, 制冷量较少; 阶段3, 冷藏蒸发器出现稳定的两相段, 且两相段长度不断增大, 制冷量逐渐增多; 冷冻向冷藏切换的过渡过程时长约为冷藏运行的23%, 耗电量为20%, 获取的冷量仅约3.4%, 即存在较大的制冷剂迁移损失; 冷藏向冷冻切换的过渡过程对冰箱整体性能几乎无影响。该结果可为风冷变频多门冰箱设计提供参考。

关键词: 并联双循环; 风冷冰箱; 制冷剂迁移

中图分类号: TB 657.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)03-0017-05

Refrigerant Migration During Switching of a Parallel Cycle Frost-Free Refrigerator-Freezer

LIU Yun, ZHAO Rijing, HUANG Dong

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The refrigerant migration during the operation switching of a parallel cycle frost-free refrigerator-freezer was experimentally studied. The refrigerator-freezer mainly consists of a compressor, two evaporators, two capillary tubes and a condenser. The refrigeration zone and the freezing zone have separate evaporators, fans, wind tunnels, and temperature wraps. The results show that the process of the freezing operation switching to the refrigeration operation can be divided into three stages according to the temperature of two evaporators, i. e., pressure equilibrium, refrigerant emigrating from the F-evaporator, and refrigerant immigrating to the R-evaporator. In the first stage, the pressure of the low side begins to rise from the freezing evaporating pressure to the refrigeration evaporating pressure. In the second stage, the two-phase state of the refrigerant occurs slightly in the R-evaporator most of the time and the capacity is very small. In the third stage, the refrigerant in the R-evaporator begins to keep the stable two-phase state and the capacity increases with the extending of the two-phase. The switching from the freezing operation to the refrigeration operation possesses 23% of the whole refrigeration operation time while the energy consumption and the capacity in this process are 20% and 3.4%

of the total, respectively, indicating that the process has great migrating loss. In addition, the effect of the refrigerant migration switching from the refrigeration operation to the freezing operation on the system performance can be ignored.

Keywords: parallel cycle; frost-free refrigerator-freezer; refrigerant migration

风冷变频多门冰箱具有大容量、多温区、自动除霜等优点,是未来冰箱发展的趋势。并联双循环制冷系统的冷藏、冷冻空间的蒸发器和风道系统相互独立,具有冷藏保湿效果好、不串味等优点,主要应用于各品牌高端系列冰箱。冷藏、冷冻蒸发器并联且蒸发温度不同,冷藏/冷冻切换时必然伴随着制冷剂迁移,迁移过程中功耗较大,制冷量很小,会增大冰箱的耗电量。Erik Björk 等实验结果表明^[1],直冷冰箱在启/停过程中的制冷剂迁移和再分配会使制冷量和能效分别降低约 11%和 9%;Rubas 等实验结果表明^[2],单循环风冷冰箱在停机期间的制冷剂迁移会使冷冻空间热负荷增加约 4%~7%,再次启动时制冷剂再分配过程会使制冷量损失 2.3%。对于并联双循环风冷冰箱,Won Jae Yoon 等指出^[3],停机之后、冷藏运行前先进行 P/D 运行可以缩短制冷剂再分配的时间,可降低能耗约 4.1%;卢智利等指出^[4-5],采用温度与分时运行控制策略可以有效控制箱温,但是频繁的冷冻/冷藏切换造成的制冷剂迁移会使耗电量增大 0.99%。国内外关于并联双循环风冷冰箱在稳定运行期间,冷藏/冷冻切换时制冷剂迁移的研究非常匮乏,本文通过实验研究了并联双循环风冷冰箱的制冷剂迁移的动态特性及其对耗电量的影响。

1 实验装置及测试条件

被测机为一台并联双循环风冷变频冰箱,其主

要由压缩机、蒸发器、节流装置及冷凝器组成。图 1 为并联双循环风冷冰箱系统流程。冷藏、冷冻空间分别拥有独立的蒸发器、风机及主风道,冷藏、冷冻间歇运行,冷藏室和冷冻室有各自的感温包,共同通过三通电磁阀控制冷冻/冷藏切换。被测机主要部件参数如表 1 所示。

实验工况:环境温度为 $(25.0\pm0.8)^{\circ}\text{C}$,相对湿度为 65%。采用直径为 0.2 mm 的铜-康铜热电偶测量温度,精度为 $\pm0.2^{\circ}\text{C}$ 。在冷冻、冷藏蒸发器的进口、中部和出口,冷凝器的进口和出口,以及压缩机的吸气管和排气管上均布置有热电偶。采用青智 8775A 数字电参数测试仪测量冰箱的运行功率,并通过电能累计仪测得一定时间内的耗电量,精度为 0.5 级。

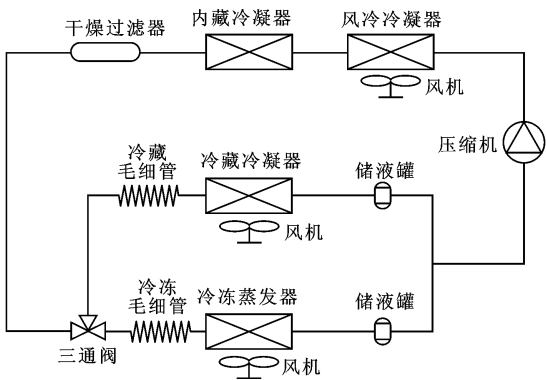


图 1 并联双循环风冷冰箱系统流程

表 1 被测机主要部件参数

项目		技术参数	
冰箱型号		BCD-440WTC	
能效等级数		2	
冰箱质量/kg		97	
气候类型		ST	
电动机额定功率/W		110	
节流方式		毛细管节流	
制冷剂		R600a	
制冷剂充灌质量/g		69	
冷藏蒸发器		翅片式,2(列)×4(排),下进下出	
冷冻蒸发器		翅片式,3(列)×3(排),上进下出	
星级数		3	
外形尺寸/mm×mm×mm		685×748×1818	
执行标准		GB/T8059.4	
发泡剂类型		环戊烷	
冷冻空间/L		355	
冷藏空间/L		85	
冷冻能力/kg·d ⁻¹		6	
耗电量/kW·h		0.92	
压缩机		松下 EKI100E13DAH,全封闭往复	
冷凝器		内藏式+翅片式	

2 实验结果分析

2.1 制冷剂迁移动态分析

并联双循环系统稳定运行时无停机,冷冻蒸发温度约为 -27°C ,冷藏蒸发温度约为 -10°C ,二者相差较大,因此在冷冻/冷藏切换,尤其是冷冻向冷藏切换时会出现复杂的过渡过程。

图2为单周期内冷冻和冷藏蒸发器的温度变化,所谓单周期是指稳定运行过程中进行了一次冷藏运行和一次冷冻运行。冷冻向冷藏切换时的时间记为0,27.5 min后为冷藏向冷冻切换。

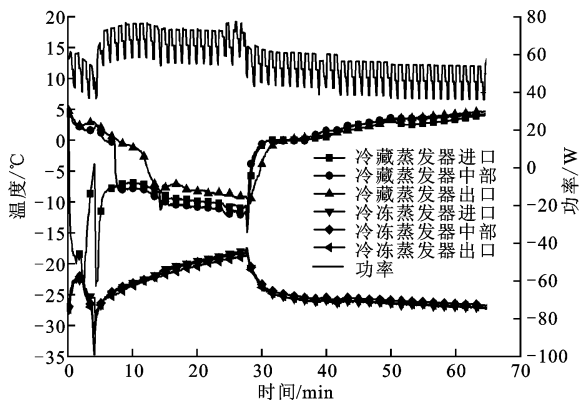


图2 单周期内冷冻和冷藏蒸发器的温度变化

2.1.1 冷冻向冷藏切换 冷冻运行时冷藏蒸发器中的压力与冷冻蒸发器的蒸发压力相同,因此由冷冻向冷藏切换后系统低压侧的压力升高。图3为冷冻向冷藏切换时蒸发器的温度变化。依据蒸发器温度变化,冷冻向冷藏切换时的制冷剂迁移过程可以分为以下3个阶段。

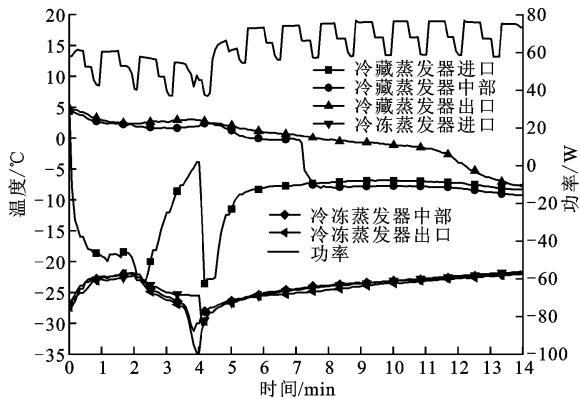


图3 冷冻向冷藏切换时蒸发器的温度变化

阶段1 在0~1.83 min期间,属于压力平衡阶段。

从冷冻切换至冷藏时,三通电磁阀从冷冻蒸发器供液切换成冷藏蒸发器供液,由于冷藏毛细管比冷冻毛细管短,节流后压力升高,冷藏蒸发器中的压

力升高,所以冷藏蒸发器表面温度较高,约为 4.2°C 。受冷藏蒸发器自身热容的影响,初始供液量主要用于冷藏蒸发器进口段降温,所以冷藏蒸发器进口温度在切换的瞬间由 4.2°C 急剧下降至 -8.2°C ,见图3。此时,冷冻蒸发器中的制冷剂积存其中,使得冷藏蒸发器供液量较小,0.75 min时冷藏蒸发器的进口温度降至 -19.0°C ,中部和出口的温度很高且制冷剂均维持在过热状态。

由于冷藏、冷冻蒸发器的出口处相通,所以冷冻蒸发器压力必然会随冷藏蒸发压力的升高而升高,其中的制冷剂饱和温度相应上升。由图3可见,冷冻蒸发器进口、中部和出口的温度在0 min时分别为 -27.8°C 、 -27.3°C 、 -27.8°C ,在0.75 min时分别上升为 -23.3°C 、 -23.2°C 、 -23.5°C 。

冷藏蒸发器进口降温后出现短暂的气液两相段,冷藏蒸发压力逐渐稳定。由图3还可知:0.75~1.83 min期间,冷藏蒸发器进口温度基本维持在 -19.3°C 附近,中部和出口温度仍然很高;冷冻蒸发器进口、中部、出口温度基本重合,且与冷藏温度同步趋于稳定,65 s内进口、中部和出口温度分别上升了 0.5°C 、 0.9°C 、 1.2°C ,变化很小。

由上述可见,阶段1中低压侧压力由冷冻蒸发压力向冷藏压力攀升,由于该阶段冷藏蒸发器的供液量较小,所以低压侧压力暂时介于冷冻、冷藏蒸发压力之间。

阶段2 在1.83~4 min期间,属于制冷剂迁出冷冻蒸发器的阶段。

压力平衡之后,压缩机对蒸发器的抽吸作用开始显现。1.83 min时冷冻、冷藏蒸发器内的制冷剂同时受到了压缩机抽吸的作用,蒸发器内压力下降,冷冻蒸发器中的气态制冷剂被抽出,但仍然存在大量的液态制冷剂,因此冷藏蒸发器供液量较小,进口段的气液两相制冷剂状态很快转变成过热状态;1.83~2.33 min时冷藏蒸发器进口温度由 -19.0°C 快速下降至 -23.7°C ;2.33 min时冷藏蒸发器内充满了过热气体,冷藏蒸发器表面温度较低,与回风之间的温差较大,换热加速,气态制冷剂温度快速上升;2.33~4 min时冷藏蒸发器进口温度由 -23.7°C 快速回升到 -4.1°C 。该阶段冷藏蒸发器中部和出口温度很高,制冷剂处于过热状态。

由上述分析可知,阶段2中蒸发器内压力不断降低,冷冻蒸发器中制冷剂的饱和温度不断下降(见图3),1.83~4 min时冷冻蒸发器进口、中部和出口温度均迅速下降。在此期间,即冷藏运行期间,冷冻

蒸发器并无供液,随着压缩机的不断抽吸,冷冻蒸发器中的液态制冷剂开始闪发,3.5 min 时冷冻蒸发器温度急剧下降。

3.5 min 时冷冻蒸发器出口温度由 -27.7°C 急剧下降,至3.92 min 时降至最低点 -35.3°C ;冷冻蒸发器中部温度由 -27.8°C 急剧下降,由于中部位置在蒸发器的上部,所以两相态制冷剂较少,闪发较快完成,3.83 min 时中部温度降至最低点 -31.7°C ;冷冻蒸发器为三排管结构,管道较长,其进口位置在蒸发器的上部,所以4 min 时进口处制冷剂开始闪发,5 s 内温度降至最低 -30.7°C 。至此,冷冻蒸发器中大部分制冷剂被迁出。

由上述可见,阶段2中冷冻蒸发器的制冷剂不断迁出,低压侧压力降低,由于冷藏蒸发器的供液量较少,所以随着压力的降低,冷冻蒸发器内制冷剂在约80%的时间里为过热气体,几乎无两相段,制冷量也很少。

阶段3 在4~6.33 min 期间,属于制冷剂迁移到冷藏蒸发器的阶段。

随着冷冻蒸发器中制冷剂被迁出,制冷剂迁移过程进入阶段3。因供液量增多,冷藏蒸发器进口的制冷剂再次变为气液两相态,其中液态制冷剂闪发,故进口温度急剧降低(见图3),在4~4.17 min 时温度由 -4.1°C 迅速下降至 -24.0°C 。此时,尽管冷藏蒸发器的供液量可以使进口的制冷剂暂时保持气液两相态,但却不足以使冷藏蒸发压力升高。因此,在4.17 min 时,冷藏蒸发器进口温度降至最低点 -24.0°C 后略有回升,在4.25~4.42 min 的15 s 内保持 -23.2°C 不变,而后随着冷藏蒸发器供液量的增多,蒸发压力迅速升高并最终稳定;在4.42 min 后,冷藏蒸发器进口温度迅速升高,至6.33 min 时基本稳定在 -8.0°C ,此时系统进入冷藏运行的稳定阶段。虽然冷藏蒸发器中部和出口温度在进口温度的影响下小幅波动下降,但制冷剂仍为过热状态。

在制冷剂大部分迁至冷凝器后,冷冻蒸发器的表面温度主要受回风加热的作用。开始时冷冻蒸发器表面温度较低,与冷冻回风温差较大,4~4.58 min 时温度上升较快,随着与冷冻回风温差的不断减小,温升速度减慢,4.58 min 后冷冻蒸发器温度回升非常平缓,该过程一直持续到下一个冷冻运行周期。

由上述可见,在阶段3,冷藏蒸发器的供液量不断增多,可以维持稳定的两相段,制冷能力慢慢增强,系统逐渐进入稳定阶段。

2.1.2 冷藏向冷冻切换 冷藏向冷冻切换时蒸发

器温度变化如图4所示。由图4可见:27.5 min 时冷藏向冷冻切换,冷冻蒸发器内压力降低,冷藏蒸发器进口和中部的的气液两相制冷剂闪发;27.5 min 时冷藏蒸发器进口和中部温度分别为 -10.8°C 、 -11.8°C ,27.75 min 时分别下降至最低点 -15.2°C 、 -13.4°C ,此时冷藏蒸发器中制冷剂为过热气体。开始切换时,冷冻毛细管背压为冷藏时的蒸发压力,相对较高,故开始切换时冷冻蒸发器供液量很小;切换后冷冻风机启动,冷冻蒸发器侧的换热方式由自然对流变成强制对流,故在切换后的一小段时间内冷冻蒸发器温度小幅上升。

27.75 min 之后,冷藏蒸发器中的表面温度在冷藏回风加热下慢慢回升;随着冷冻蒸发器中供液量的不断增多,其中的制冷剂变为气液两相态;随着压力的降低,制冷剂饱和温度不断降低,直至冷冻运行结束。

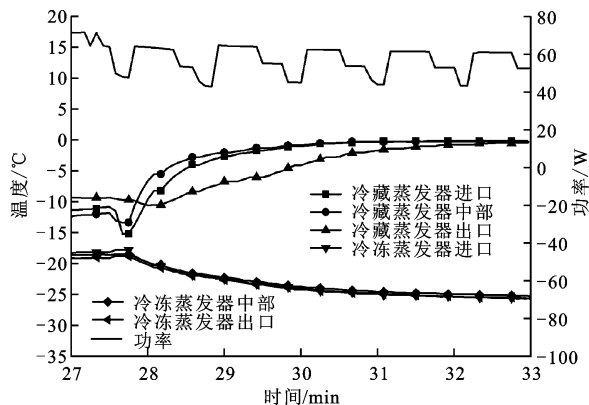


图4 冷藏向冷冻切换时蒸发器的温度变化

2.2 制冷剂迁移对冰箱整体性能的影响

在冷冻/冷藏切换过程中,制冷剂迁移对功率具有一定的影响。冰箱门体附近存在防止凝露的电加热器,风道内存在防结霜的电加热器,这些电加热器间歇运行,使图2~4中的功率曲线不太平滑。冷冻向冷藏切换时,虽然蒸发温度由冷冻蒸发温度开始上升,但由于制冷剂迁移的存在使得质量流量减小,功率降低,所以在4 min 时阶段2的结束点功率降至最低点;冷藏向冷冻切换时,制冷剂迁移时间较为短暂,功率随着蒸发温度的降低而下降。

为了评估制冷剂迁移造成的影响,冷冻向冷藏切换时,将冷藏蒸发器进口温度的启稳点作为制冷剂迁移的结束点(6.33 min 时);冷藏向冷冻切换时,将冷冻蒸发器进口温度开始下降点作为制冷剂迁移的结束点(27.75 min 时)。

Rubas 曾指出^[2],用蒸发器制冷量的衰减可以

评估启动初期制冷剂的再分配对系统性能的影响。本文采用类似的方法,用箱体得到的冷量和耗电量来评价制冷剂迁移对冰箱整体性能的影响。

风机转速一定,空气的体积流量 q_v 几乎不变,由于空气温度变化不大,在 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,所以空气密度 ρ 可为定值。一定时间内箱体得到的冷量

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} Q_0 dt = \int_{t_1}^{t_2} C_p m \Delta T dt = \int_{t_1}^{t_2} C_p \rho q_v \Delta T dt = C_p \rho q_v \int_{t_1}^{t_2} \Delta T dt \quad (1)$$

式中: Q_0 为箱体有效制冷量, kW ; C_p 为空气的定压比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$; m 为空气的质量流量, kg/s ; ΔT 为送风、回风温差, $^{\circ}\text{C}$ 。

ΔT 的函数关系式不易获得,所以可采用近似法处理,即将时间步长尽可能缩短,在一定时间步长下将直角梯形面积之和近似作为冷藏运行期间冷藏室送风、回风温差曲线(见图5)下对应的面积,即

$$Q \approx \sum C_p \rho q_v \left[\frac{1}{2} (\Delta T_n + \Delta T_{n+1}) \Delta t \right] = C_p \rho q_v \sum \left[\frac{1}{2} (\Delta T_n + \Delta T_{n+1}) \Delta t \right] \quad (2)$$

式中: Δt 为时间步长。

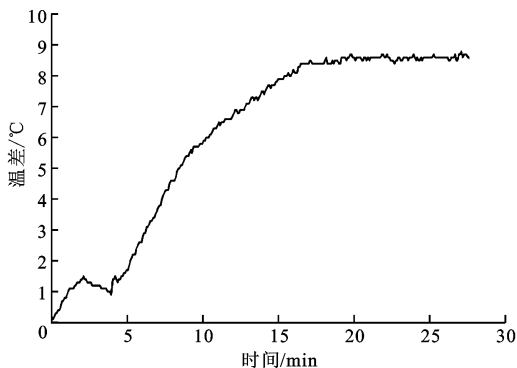


图5 冷藏运行期间冷藏室送风、回风温差曲线

根据式(2),冷藏期间制冷剂迁移段箱体获得的冷量占总冷量的比率为 3.4% ,迁移期间耗电量($0.006\text{ kW} \cdot \text{h}$)占冷藏运行总耗电量($0.03\text{ kW} \cdot \text{h}$)的比率为 20% ,可见切换过程中受制冷剂迁移的影响耗电量很大,制冷量很小,所以存在迁移损失。

冷藏向冷冻切换时,制冷剂迁移时间仅有 15 s ,占冷冻运行总时长的 0.7% ,该时间内送风、回风温差和耗电量几乎没有变化,所以制冷剂迁移对切换过程的影响可以忽略。

3 结 论

(1)冷冻向冷藏的切换时间占冷藏运行总时长

的 23% ,耗电量占冷藏运行总耗电量的 20% ,箱体得到的冷量仅占总冷量的 3.4% 。该过程耗时较长,冷藏蒸发器始终处于缺液状态,冷量输出较少,由此造成迁移损失。

(2)对于并联双循环风冷冰箱,冷冻向冷藏切换后,低压侧压力升高,该过渡过程可分为3个阶段:①压力平衡阶段,此阶段中低压侧压力由冷冻蒸发压力向冷藏蒸发压力攀升,但维持在两压力之间;②制冷剂迁出冷冻蒸发器阶段,此阶段中约 80% 的时间里冷藏蒸发器中制冷剂几乎无两相态,制冷量很小;③制冷剂迁移至冷藏蒸发器阶段,此阶段中冷藏蒸发器的供液量不断增多,制冷量慢慢增多。

(3)冷藏向冷冻切换时,低压侧压力沿冷藏蒸发压力向冷冻蒸发压力逐渐降低,该过渡过程仅有 15 s ,对冰箱整体性能几乎无影响。

参考文献:

- [1] ERIK B, PALM B. Refrigerant mass charge distribution in a domestic refrigerator: part I Transient conditions [J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26 (8/9): 829-837.
- [2] RUBAS P J, BULLARD C W. Factors contributing to refrigerator cycling losses [J]. Refrigeration, 1995, 18(3): 168-176.
- [3] YOON W J, JUNG H W, CHUNG H J. Performance optimization of a two-circuit cycle with parallel evaporators for a domestic refrigerator-freezer [J]. International Journal of Refrigeration, 2011, 34(1): 216-224.
- [4] 卢智利, 丁国良. 蒸发器并联双循环冰箱的温度与分时运行控制策略 I: 理论分析 [J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(2): 267-271.
LU Zhili, DING Guoliang. Temperature and time-sharing running combination control strategy of two-circuit cycle refrigerator-freezer with parallel evaporators I: theoretical analysis [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2006, 40(2): 267-271.
- [5] 卢智利, 丁国良. 蒸发器并联双循环冰箱的温度与分时运行控制策略 II: 实验验证 [J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(2): 272-281.
LU Zhili, DING Guoliang. Temperature and time-sharing running combination control strategy of two-circuit cycle refrigerator-freezer with parallel evaporators II: experimental verification [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2006, 40(2): 272-281.

(编辑 苗凌)