

文章编号: 1006-2467(2004)10-1686-05

# 二次冷媒无霜电冰箱的理论分析

卢智利, 丁良

(上海交通大学 制冷与低温工程研究所, 上海 200030)

**摘要:** 为了降低无霜冰箱采用可燃性制冷剂燃烧爆炸的危险性,提出了“二次冷媒无霜电冰箱”。对于该型式的电冰箱,箱内空气只与二次冷媒进行热交换,与可燃性制冷剂不直接接触,因此,大大降低了电冰箱采用可燃性制冷剂燃烧爆炸的危险性。同时,二次冷媒电冰箱可以很容易地采用大滑移温差的非共沸制冷剂,大大提高了系统的制冷系数(COP)。对二次冷媒冰箱采用 R32/R600a(0.35:0.65)、R22/R123(0.45:0.55)、R32/R600(0.40:0.60)、R170/R600a(0.08:0.92)、R32/R245fa(0.40:0.60)、R290/R123(0.40:0.60)等混合工质(上述混合工质均为质量比)的理论循环计算表明,其 COP 比传统无霜冰箱采用 R134a 的 COP 提高 10% 以上。

**关键词:** 二次冷媒; 电冰箱; 无霜; 制冷系数; 非共沸制冷剂

**中图分类号:** TB 65 **文献标识码:** A

## Theoretical Analysis of Frost Free Refrigerator Freezer with Secondary Cooling Medium

LU Zhi-li, DING Guo-liang

(Inst. of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiaotong Univ., Shanghai 200030, China)

**Abstract:** A kind of refrigerator-freezer (RF) termed frost-free refrigerator-freezer with secondary cooling medium was presented. For this kind of RF, the compartment air only has direct heat exchange with the secondary cooling medium, and does not contact with the refrigerant, so the risk of inflammation and explosion is reduced to the least. At the same time, the non-azeotropic refrigerants are easy used in the RF with secondary cooling medium, so the COP can be increased greatly for the frost-free RF with secondary cooling medium. The cycle performances of frost-free RF with secondary cooling medium are calculated when it is charged with non-azeotropic refrigerants with large gliding temperature. The calculation results show that the COPs are very high when the refrigerants R32/R600a(0.35:0.65), R22/R123(0.45:0.55), R32/R600(0.40:0.60), R170/R600a(0.08:0.92), R32/R245fa(0.40:0.60), R290/R123(0.40:0.60) are used in the frost-free RF with secondary cooling medium. The COPs increase by a factor of 1/10 compared with the conventional frost-free RF charged with R134a refrigerant.

**Key words:** secondary cooling medium; refrigerator-freezer; frost-free; coefficient of performance (COP); non-azeotropic refrigerants

可燃性制冷剂,如纯工质 HC600s(异丁烷)、HC290、HC600(正丁烷)/HC290、HFC152a/HFC290(丙烷)、HFC152a,以及混合工质 HC600a/HFC600a/HFC600等,已经在家用制冷中享有了重要

收稿日期: 2003-08-14

作者简介: 卢智利(1976-),男,江西崇仁人,博士生,主要研究制冷空调系统的数值仿真与换热器的换热强化。丁国良(联系人),男,教授,博士生导师,电话(Tel.): 021-62932110; E-mail: gliding@sjtu.edu.cn

的地位.在可燃性制冷剂电冰箱的使用过程中,可能由于蒸发器发生泄漏,而引起可燃性制冷剂在制冷室(即冷冻室、冷藏室等)中的积聚;如果这时在制冷室中发生一电弧或火星,就存在燃烧、爆炸的危险.因此,从设计上确保可燃性制冷剂电冰箱的安全使用是非常重要的.

近年来,欧洲已经开始了在无霜电冰箱上使用可燃性制冷剂的试验和实践.对于翅片管蒸发器采用双层铜管的设计方式,以减少制冷剂的泄露.对于换热风机,采用了风扇和电机分离的方式,即把可能打火的电机部分移到制冷室外.对于电热化霜元件,则尝试采用了防爆型的设计.但目前双层铜管蒸发器加工工艺复杂,成本较高,国内尚不具备生产能力.防爆型的电热化霜元件存在制造复杂、价格昂贵和化霜效果下降等问题,要被普遍接受和广泛应用尚有待技术上的进一步提高、完善<sup>[1,2]</sup>.

为了降低冰箱燃烧爆炸的危险性,本文提出了二次冷媒无霜冰箱的设计形式.

## 1 二次冷媒冰箱

### 1.1 原理

本文提出的二次冷媒无霜冰箱的循环流程图如图 1 所示.该冰箱是在制冷剂与空气之间增加一个

二次冷媒(载冷剂)循环,通过二次冷媒把空气的热量传给制冷剂.二次冷媒是载冷剂,可以选择丙二醇(甘油)溶液或 CaCl<sub>2</sub> 溶液.由于二次冷媒不易燃且不挥发,因此,风机风扇与电机不用分离,可以布置在风道内;电加热除霜装置也可直接布置在翅片管换热器表面.

### 1.2 与传统无霜冰箱的比较

由图 1 可知,二次冷媒无霜冰箱包括制冷剂循环、二次冷媒循环和箱内空气循环;而传统无霜冰箱只有制冷剂循环和箱内空气循环.

与现有的无霜冰箱相比,二次冷媒无霜冰箱增加了套管式换热器、中间过冷器、液体泵及二次冷媒循环,这将为二次冷媒冰箱带来以下缺陷:

(1) 多增加的套管式换热器及中间冷却器可以布置在冰箱的底板内及冷藏室与冷冻室的分隔板内,不占用有效空间,因此基本不影响冰箱结构的紧凑性,但增加了成本.

(2) 增加了一个中间循环,为了达到与传统冰箱同样的效果,必须降低蒸发温度,从而降低了系统的 COP.

(3) 液体泵需要消耗能量,增加了成本与能源消耗.

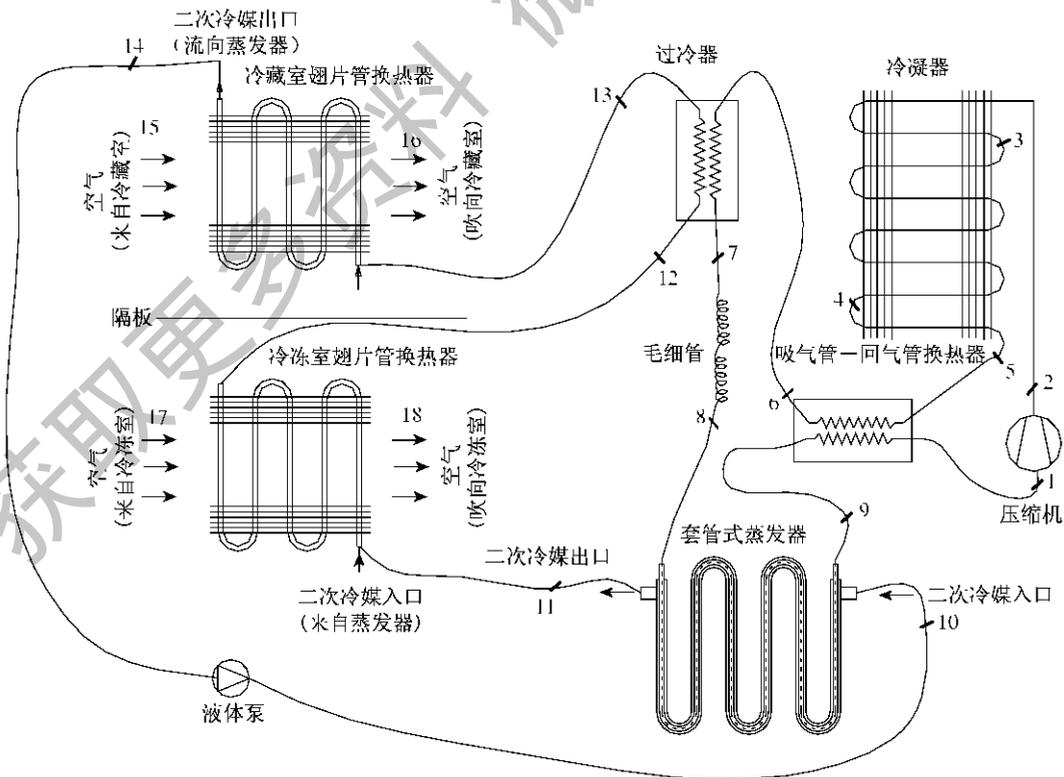


图 1 二次冷媒无霜冰箱的循环流程图

Fig. 1 Circuit schematic of frost-free refrigerator-freezer with secondary cooling medium

与现有的无霜冰箱相比,二次冷媒冰箱具有以下优点:

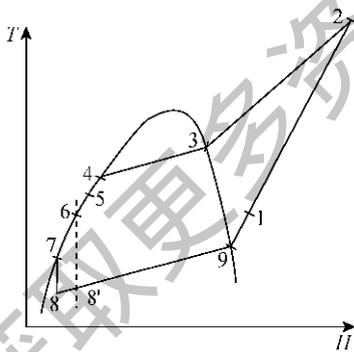
(1) 由于冰箱翅片管换热器内侧压力低(如 R600a 的蒸发压力在 0.05 MPa 左右),为了防止泄漏,翅片管换热器的加工工艺非常严格.采用二次冷媒系统后,二次冷媒循环为常压,泄漏也影响不大,因此翅片管换热器的制造工艺将简化,从而降低生产成本.而且翅片管的结构可以做得非常复杂,以强化翅片管的热交换效果.

(2) 由于二次冷媒与制冷剂在套管式蒸发器内进行逆流热交换,同时套管式蒸发器两侧的对流换热系数都比较大,因此蒸发器的换热温差较小( $2^{\circ}\text{C}$ 左右).

(3) 对于一个实际系统而言,系统的 COP 高低,不仅与循环形式有关,而且与所使用的制冷工质有关.普通双温无霜冰箱,特别是大容量(350 L 以上)无霜冰箱,目前一般采用不可燃的 R134a 作为制冷剂,系统 COP 偏低,而二次冷媒冰箱比较容易应用各种高效率的制冷剂,弥补了多一层循环带来的弊端,提高制冷循环的 COP.而且由于采用了套管式蒸发器,二次冷媒与制冷剂进行逆流热交换,因此,可以方便地采用大滑移温差的非共沸制冷剂.

### 1.3 循环分析

如图 1 所示,压缩机压缩过程 1-2 按等熵过程计算,毛细管节流过程 7-8 按等焓过程计算.制冷剂循环的  $T-H$  图如图 2 所示.



1-压缩机入口 2-压缩机出口 3-冷凝器饱和气体点 4-冷凝器饱和液体点 5-冷凝器出口 6 7-毛细管入口(7也为二次冷媒冰箱过热器出口) 8 8'-毛细管出口(蒸发器入口) 9-蒸发器出口

图 2 制冷剂循环的  $T-H$  图

Fig. 2  $T-H$  diagram of refrigerant circulation

对于采用纯工质的传统无霜冰箱而言,制冷剂的循环回路为:1-2-3-4-5-6-8'-9-1.由于纯工质蒸发、冷凝过程均为等温过程,因此,如果忽略管道的阻力,则图 2 中过程 3-4 及 8'-9 均为水

平直线.对于采用非共沸工质的二次冷媒冰箱而言,制冷剂的循环回路为:1-2-3-4-5-6-7-8-9-1.由于非共沸工质的蒸发及冷凝过程为变温过程,因此,图 2 中过程 3-4 及 8'-9 均为斜线.

在冰箱的设计计算中,一般都假定毛细管入口处的制冷剂为环境温度,即点 6 状态为环境温度.然后,毛细管按绝热毛细管计算,一般毛细管节流过程按等焓过程计算.对于压缩机入口,制冷剂的温度一般也在环境温度,即点 1 状态为环境温度.

对于非共沸制冷剂,由于 6-7 过程中制冷剂是在过热器中与二次冷媒进行热交换,因此,这部分冷量属于无效冷量.因此,图 2 所示的循环理论 COP 计算式如下:

$$\text{COP} = \frac{(H_9 - H_8) - (H_6 - H_7)}{H_2 - H_1} = \frac{(H_9 - H_8) - (H_8' - H_7)}{H_2 - H_1} = \frac{H_8' - H_8}{H_2 - H_1}$$

## 2 理论计算

二次冷媒与制冷剂在套管式蒸发器内进行逆流热交换,制冷剂的进出口温度由二次冷媒的出口温度决定.为了节能,可以应用大滑移温度的非共沸制冷剂,降低换热器的换热温差,提高系统的热力完善度<sup>[3]</sup>.

对于大容量无霜冰箱,传统冰箱基本采用两个蒸发器串联的设计型式.一个蒸发器为冷冻室供冷,另一个为冷藏室供冷.因此,减少了冷藏室的结霜量,减少了除霜损失,同时也提高了冷藏室空气的湿度,提高了冷藏室的保鲜质量.本文对二次冷媒冰箱采用两个翅片管换热器串联的形式(见图 1),以此达到双蒸发器减少结霜量,提高冷藏室保鲜质量的功能.

### 2.1 工况的确定

先假定纯工质的工况.国标规定冰箱冷冻室平均温度不得高于  $-18^{\circ}\text{C}$ ,冷藏室平均温度不得高于  $5^{\circ}\text{C}$ .目前冰箱的设计计算参数为:环境温度  $32^{\circ}\text{C}$ ,蒸发温度  $-25^{\circ}\text{C}$ ,冷凝温度  $55^{\circ}\text{C}$ ,毛细管入口及压缩机入口制冷剂均为环境温度.

为了具有可比性,假定二次冷媒在冷冻室换热器的换热温差与目前冰箱相同,因此,二次冷媒在冷冻室换热器的平均温度为  $-25^{\circ}\text{C}$ .假定二次冷媒离开冷冻室翅片管换热器的温度为  $-20^{\circ}\text{C}$ ,则二次冷媒进入冷冻室翅片管换热器的温度为  $-30^{\circ}\text{C}$ .假定二次冷媒与制冷剂在过热器进行热交换后,二次冷媒温度升高  $10^{\circ}\text{C}$ .那么,二次冷媒进入冷藏室翅片管

换热器的温度为  $-10^{\circ}\text{C}$ ,通常情况下冷藏室与冷冻室的负荷比为 1:1,则冷藏室翅片管换热器出口处二次冷媒的温度为  $0^{\circ}\text{C}$ .由于二次冷媒与制冷剂在套管式换热器内进行逆流热交换,换热器两侧的换热系数又都比较大,因此,制冷剂与二次冷媒的换热温差可以较小,在此假定换热温差为  $2^{\circ}\text{C}$ ,那么制冷剂进入套管式蒸发器的温度为  $-32^{\circ}\text{C}$ ,而且制冷剂离开套管式蒸发器的温度必须大于进入套管式蒸发器的二次冷媒的温度 ( $0^{\circ}\text{C}$ ).混合工质冷凝平均温度取与纯工质冷凝温度相同,为  $55^{\circ}\text{C}$ ,毛细管入口及压缩机入口制冷剂均为环境温度  $32^{\circ}\text{C}$ .

根据上述分析,混合工质应该满足如下约束:

- ① 混合工质进入套管式蒸发器的温度不得高于  $-32^{\circ}\text{C}$ ;
- ② 混合工质离开套管式蒸发器的温度不得

高于  $0^{\circ}\text{C}$ .

### 2.2 理论制冷循环性能

由上述分析可知,混合工质的滑移温差在  $30^{\circ}\text{C}$  左右.滑移温差在  $30^{\circ}\text{C}$  左右的非共沸混合工质有 R22/R123 R32/R123 R170/R600a R32/R600 等.

表 1 表 2 分别为传统冰箱采用纯工质的理论循环性能计算和二次冷媒冰箱采用非共沸混合工质的理论循环性能计算.表中:  $Q_v$  为容积制冷量;  $\theta_d$  为压缩机排温;  $p_e$  为蒸发压力;  $p_c$  为冷凝压力;  $\theta_{e,b}$ ,  $\theta_{e,d}$  分别为蒸发压力下工质的泡、露点温度;  $\theta_{c,b}$ ,  $\theta_{c,d}$  分别为冷凝压力下工质的泡、露点温度.各纯工质及其混合工质的物性由美国 NIST 技术研究院开发物性软件 RefProp6.0 计算而得.

表 3 是二次冷媒冰箱与传统冰箱的性能比较.

表 1 传统冰箱采用纯工质的理论循环性能计算

Tab. 1 Theoretical performances of conventional refrigerators charged with pure refrigerants

工质	COP	$Q_v / (\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3})$	$\theta_d / ^{\circ}\text{C}$	$p_e / \text{MPa}$	$\theta_{e,d} / ^{\circ}\text{C}$	$\theta_{e,b} / ^{\circ}\text{C}$	$p_c / \text{MPa}$	$\theta_{c,d} / ^{\circ}\text{C}$	$\theta_{c,b} / ^{\circ}\text{C}$
R12	2.004	662.90	129.1	0.124	-25	-25	1.363	55	55
R134a	1.966	605.86	121.6	0.106	-25	-25	1.492	55	55
R600a	2.031	330.06	104.7	0.058	-25	-25	0.772	55	55

表 2 二次冷媒冰箱采用非共沸混合工质的理论循环性能计算

Tab. 2 Theoretical performances of frost-free RF with secondary cooling medium charged with non-azeotropic refrigerants

工质	质量比	COP	$Q_v / (\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3})$	$\theta_d / ^{\circ}\text{C}$	$p_e / \text{MPa}$	$\theta_{e,d} / ^{\circ}\text{C}$	$\theta_{e,b} / ^{\circ}\text{C}$	$p_c / \text{MPa}$	$\theta_{c,d} / ^{\circ}\text{C}$	$\theta_{c,b} / ^{\circ}\text{C}$
R32/R600a	0.35: 0.65	2.284	1183.5	114.3	0.222	-38.02	-3.593	1.94	39.50	70.66
R22/R123	0.45: 0.55	2.355	468.2	131.5	0.067	-41.05	-3.058	0.93	38.09	71.93
R32/R600	0.40: 0.60	2.263	905.3	121.6	0.156	-40.75	-3.988	1.62	37.81	72.60
R170/R600a	0.08: 0.92	2.788	928.4	96.2	0.156	-40.06	-4.316	1.19	43.33	66.65
R32/R245fa	0.40: 0.60	2.208	775.1	136.2	0.120	-40.59	-3.676	1.61	40.76	69.28
R290/R123	0.40: 0.60	2.180	524.0	118.0	0.086	-40.05	-4.261	1.09	42.41	67.59

表 3 二次冷媒冰箱与传统无霜冰箱制冷循环的 COP 比较

Tab. 3 Comparison of COP between frost-free RF with secondary cooling medium refrigerants and conventional frost-free RF

工质	质量比	COP	COP 增量 / %		
			与 R12 比	与 R134a 比	与 R600a 比
R32/R600a	0.35: 0.65	2.284	13.97	16.17	12.46
R22/R123	0.45: 0.55	2.355	17.51	19.79	15.95
R32/R600	0.40: 0.60	2.263	12.92	15.11	11.42
R170/R600a	0.08: 0.92	2.788	39.12	41.81	37.27
R32/R245fa	0.40: 0.60	2.208	10.18	12.31	8.71
R290/R123	0.40: 0.60	2.180	8.78	10.88	7.34

从表 3 可以看出,二次冷媒冰箱采用混合工质作为制冷剂时,COP 比传统冰箱采用纯工质 R134a

提高 10% 以上;而 R170/R600a(0.08: 0.92) 的增量更为明显,在 40% 以上.

### 2.3 液体泵的计算

由于在二次冷媒循环侧增加了一个液体泵,液体泵要消耗额外的能量.液体泵的能耗与二次冷媒的流量有很大的关系.以某厂生产的传统 BCD-380W A 无霜冰箱为例,该冰箱采用 R134<sub>a</sub> 为制冷剂,2个蒸发器,蒸发器为串联.冷藏室容积 200 L,冷冻室容积 160 L.通过 EPA 软件计算得到冷藏室热负荷为 79 W,冷冻室热负荷为 75 W.冰箱测试耗电量为 1.7 kW·h.

假设二次冷媒采用氯化钙溶液,其比热容约为 3.0 kJ/(kg·°C).二次冷媒的温升虽然在 30°C 左右,但在冷藏室、冷冻室换热器内的温升约在 20°C,所以其流量为 2.57 g/s 左右.

由此可以选择合适的二次冷媒循环泵.文献 [4] 的样本目录表明,流量在 15 L/min (250 g/s 左右) 的磁力泵 (型号为 8CQ-1.2 转速为 2800 r/min) 能耗仅为 0.025 kW,根据泵的理论运行特性,功率与流量的 3 次方成正比,流量 3 g/s 左右的泵的功率几乎为 0,可以忽略不计.考虑到实际情况,泵的功率也不会超过 1 W.以压缩机开机率 0.75 计算,液体泵每日运行 18 h,日耗电量为 0.18 kW·h,占冰箱的日耗电量 1.06%.泵消耗的能量,完全可以通过提高系统的 COP 得到补偿.

## 3 结 语

无霜冰箱采用二次冷媒系统,能有效地避免制冷剂易燃易爆带来的缺点,能方便地设计多功能冰箱.同时,该循环能利用大滑移温差的非共沸制冷剂,从而提高制冷效率.本文给出的几种大滑移温差

的非共沸制冷剂大大提高了二次冷媒冰箱的 COP,与采用 R134<sub>a</sub> 作为制冷剂的传统无霜冰箱相比,COP 的增加在 10% 以上.由于增加的液体泵而消耗的能量,完全可以通过系统 COP 的提高得到补偿.与传统无霜冰箱比较,二次冷媒冰箱由于增加了一个液体泵及一个套管蒸发器,因此成本比传统无霜冰箱略高.

### 参考文献:

- [1] 徐敬东,周贻傅.使用异丁烷作电冰箱制冷剂的几个问题 [J].家用电器科技,1998,(2): 35-37.  
XU Jing-dong, ZHOU Yi-fu. Some problems for attention on the application of isobutene refrigerant used in refrigerators [J]. *Chinese Science and Technique of Household Appliance*, 1998, (2): 35-37.
- [2] 黄小池,吴世庆,顾中平,等.异丁烷 (R600a) 制冷剂在无霜电冰箱上的应用 [J].制冷学报,1999,(3): 5-11.  
HUANG Xiao-chi, WU Shi-qing, GU Zhong-ping. Isobutene refrigerant used in no-frost refrigerators [J]. *Chinese Journal of Refrigeration*, 1999, (3): 5-11.
- [3] 高志明,王怀信,蒯大秋,等.相变温差较大的非共沸混合工质在双门冰箱中的应用研究 [J].工程热物理学报,1999,17(增刊): 23-26.  
GAO Zhi-ming, WANG Huai-xin, KUAI Da-qiu, et al. A study of application to domestic double-door refrigerators of zeotropic refrigerant mixtures with wide gliding temperatures [J]. *Chinese Journal of Engineering Thermophysics*, 1999, 17(sup.): 23-26.
- [4] 上海菱宙特种磁力泵有限公司.产品目录 [EB/OL]. <http://www.lzpump.com/html/cq.htm>, 2003-03-25.

(上接第 1685 页)

- [7] 朱丽慧,马学鸣,赵凌.机械合金化制备 Fe-Ni 系纳米粉末的马氏体相变 [J].上海交通大学学报,2001,35(3): 440-443.  
ZHU Li-hui, MA Xue-ming, ZHAO Ling. Martensitic transformation study of nanometer-sized Fe-Ni powders prepared by mechanical alloying [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2001, 35(3): 440-443.
- [8] RONG Yong-hua, MENG Qing-ping, Hsu T Y. The structure and martensitic transformation of nano-sized particles in Fe-Ni films [A]. *Fourth Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing* [C]. Hawaii, USA [s. n.],

1999, 147-150.

- [9] Lonsdale K, Macgillarry C H, Rieck G D. International tables for X-ray crystallography III [M]. Holland Dordrecht D. Reidel Publishing Company, 1983. 201-244.
- [10] Jiang H G, Ruhle M, Lavernia E J. On the applicability of the X-ray diffraction line profile analysis in extracting grain size and microstrain in nanocrystalline materials [J]. *J Mater Res*, 1999, 14(2): 549-559.
- [11] 孟庆平,纳米金属和合金相变的初探 [D].上海:上海交通大学材料科学与工程学院,2002.