

# 替代工质应用于冰箱毛细管的特性研究及优化方法

刘海峰 何茂刚 阴建民

(西安交通大学, 710049, 西安)

**摘要** 按照冰箱实际运行工况,对冰箱毛细管建立了比较完善的物理与数学模型,运用非线性解法,得出了一定情况下毛细管内工质 R12以及 R134a的流动特性;在此基础上,提出了一种对具有回热的毛细管的优化方法,并计算出了一定工况下不同的替代工质的毛细管与回气管的最佳匹配。

**关键词** 毛细管 R12 R134a 优化

中国图书资料分类法分类号 TB615

## 符号表

$c_p$	定压比热	$\nu$	比容
$D$	直径	$\bar{\nu}$	两相比容
$f$	摩擦系数	$x$	干度
$G$	质量流量	$z$	从入口处的距离
$h$	换热系数	$\mu$	粘度
$\bar{h}$	两相焓	$\mu_2$	两相粘度
$\dot{M}$	质量流率	$X$	制冷循环性能系数

## 下标

amb	环境	c	毛细管	s	回气管	g	气相
f	液相	w	管壁	in	内部	out	外部

在大多数小型制冷系统如家用电冰箱、冷柜、家用空调中,以及供热系统如热泵中,都是采用毛细管作为节流膨胀元件,这主要是因为它具有结构紧凑、简单、造价低廉,压缩机停运后冷凝器与蒸发器之间的压力很快自动达到平衡等特点。为了防止在运行过程中压缩机在

其入口处出现结露,以及因来自蒸发器出口处没有蒸发完的液体而出现液击现象,一般采用回热装置.

对于原有的工质 R12, H. A. Whitesel 已经作过比较详细的研究<sup>[1]</sup>,得出了理想情况下毛细管内工质流动的一些基本性质.在实际情况下,毛细管内的流动十分复杂,由于管径太小,给测量带来不方便,但仍然有不少的文献对其特性进行研究<sup>[2-5]</sup>.在计算过程当中,将毛细管分为绝热毛细管与非绝热毛细管 2 种模型.对于非绝热毛细管的解法,采用线性干度法与非线性干度法;对于绝热毛细管的解法,在文献 [6]中已有较为详尽的理论解.但是,对于如何去选取电冰箱的毛细管的长度,特别是具有回气管的如何去分配它们的长度,理论上一直未得到解决.在实际生产当中,一般先查图估算再运用试验试凑法,试验周期较长.

由于众所周知的原因,现有的制冷工质 R12 在近期内将被禁止使用,世界上对其替代方案也基本确定,纯质 R134a 以及混合工质 R22/R152a 的希望性最大.对于这些新工质的毛细管特性研究仍然较少,本文从研究工质 R12 出发,利用非线性干度法结合提出的优化方法,解决了在一定工况下冰箱毛细管的长度分配;这些结果对 R134a 电冰箱的生产及其它具有潜力的替代工质冰箱的毛细管优化具有一定指导意义.

## 1 冰箱毛细管 回气管模型

图 1 是一般冰箱实际运行时毛细管的模型.将此模型简化为 3 个部分:(1)工质从冷凝器出来之后进入干燥过滤器,然后进入毛细管,毛细管部分缠绕在压缩机的吸气管上,这部分长度较长,相对换热量较小,近似取为绝热;(2)毛细管穿插在回气管当中,组成 1 个复杂的换热器,毛细管内的工质处于过冷或气液两相状态,回气管中的工质是过热气;(3)毛细管从回气管出来之后,进入发泡层,取为绝热.

## 2 数学模型

在建立数学模型之前,作出以下假设:(1)管内工质是均质的一维连续流动;(2)毛细管内径一致,内壁粗糙度均匀;(3)回气管内轴向与径向的压力均一;(4)在同一截面上管壁的温度均匀.

对于绝热毛细管

动量方程

$$-\frac{dp}{dz} = \frac{f\bar{v}G^2}{2D_c} + \frac{G^2}{dz}d\bar{v}$$

能量方程

$$d\bar{h} = -\frac{1}{2}G^2d\bar{v}^2$$

对于非绝热毛细管

动量方程

$$-\frac{dp}{dz} = \frac{f\bar{v}G^2}{2D_c} + \frac{G^2}{dz}d\bar{v}$$

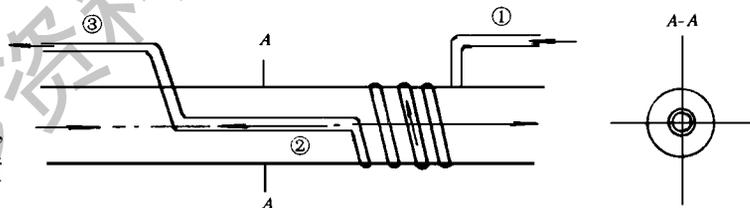


图 1 毛细管 回气管模型

动量方程 
$$\frac{d\bar{h}}{dz} = \frac{-h\pi D_c(T_c - T_{c,w})}{M_c} - \frac{G_c^2 d\bar{v}^2}{2dz}$$

周围环境 管壁与工质之间的换热

$$h_{c,ou}\pi D_{c,out} dz (T_{c,w} - T_s) + h_{s,ir}\pi D_{s,in} dz (T_{s,w} - T_s) = \dot{M}_s c_p dT_s$$

$$h\pi D_c(T_c - T_{c,w}) = h_{s,ou}\pi D_{c,out} (T_{c,w} - T_s)$$

$$h_{s,in} D_{s,in} (T_s - T_{s,w}) = h_{s,ir} D_{s,ir} (T_{s,w} - T_{amb})$$

在计算气液两相时

$$\bar{h} = \bar{h}_l(1-x) + \bar{h}_g x$$

$$\bar{v} = [v_l(1-x) + v_g x] / \bar{v}$$

$$\bar{v} = v_l(1-x) + v_g x$$

$$f = 3.49 / Re^{0.47}$$

在计算工质热力参数时采用精度较高的 CSD 方程<sup>[6]</sup>, R134a 的输运参数选自文献 [7, 8].

### 3 毛细管的优化方法

图 2 中的 1-2-3-4 是一般家用电冰箱制冷循环示意图, 其中 1-2 是压缩机压缩做功阶段, 3-4 是工质在毛细管内绝热膨胀阶段. 当采用有回热的毛细管时, 其工作区间变为 3-a-4 或 3-b-4'. 对于绝热毛细管作出如下定义:  $X = q/w$ ; 非绝热毛细管  $X' = (q + \Delta q)/(w + \Delta w)$ .

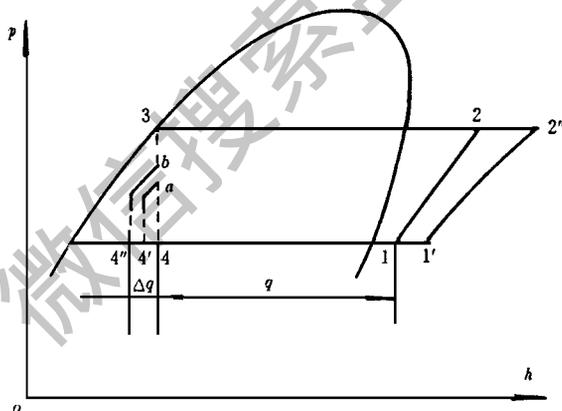


图 2 普通电冰箱压缩制冷循环图

$$\frac{X'}{X} = \frac{(q + \Delta q)/(w + \Delta w)}{q/w} = (1 + \frac{\Delta q}{q}) / (1 + \frac{\Delta w}{w}) \approx 1 + \frac{\Delta q}{q} - \frac{\Delta w}{w}$$

其中  $q = h_1 - h_4$ ;  $\Delta q = h_4 - h_4'$ ;  $\Delta q/q = (h_4 - h_4') / (h_1 - h_4)$

$$w = \frac{v}{v-1} p_1 v_1 [(\frac{p_2}{p_1})^{\frac{v-1}{v}} - 1]; \quad w' = \frac{v}{v-1} p_1 v_1' [(\frac{p_2}{p_1})^{\frac{v-1}{v}} - 1]$$

$$\frac{\Delta q}{q} = \frac{w' - w}{w} = \frac{v_1' - v_1}{v_1}$$

当制冷工质一定时, 改变毛细管与回气管之间的不同配比, 就得到不同的  $X'$  值, 总有一值能使之达到最大, 这时的毛细管与回气管的长度之间的组合就使系统的性能达到最佳.

### 4 计算结果及讨论

在进行模拟计算时, 选定毛细管的内径  $D_c = 0.71 \text{ mm}$ , 外径  $D_{c,out} = 1.85 \text{ mm}$ , 环境温度  $t_{amb} = 32^\circ\text{C}$ , 冷凝温度  $t_c = 54.4^\circ\text{C}$ .

#### 4.1 R134a 的计算结果与参考文献的比较

图3是按文献[2]中的工况计算工质R12的物性参数沿毛细管长度 $L$ 方向的变化曲线.图中给出了毛细管内干度的沿程变化与回气管内工质的温度变化与文献值的比较.可以看出,本文的结果与文献中的数值吻合良好,这说明了所采用解法的可靠性.

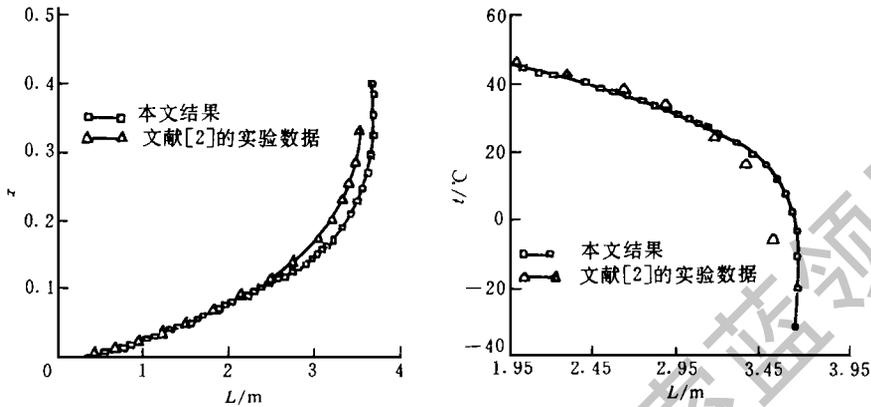


图3 工质R12的特性参数沿毛细管长度 $L$ 的变化曲线

#### 4.2 R12与R134a的毛细管特性比较

由于R12与R134a的基本物性相差较大,导致在毛细管内流动的差异也较大.从计算结果可知,在相同的条件下,R134a的毛细管明显要比R12的长.

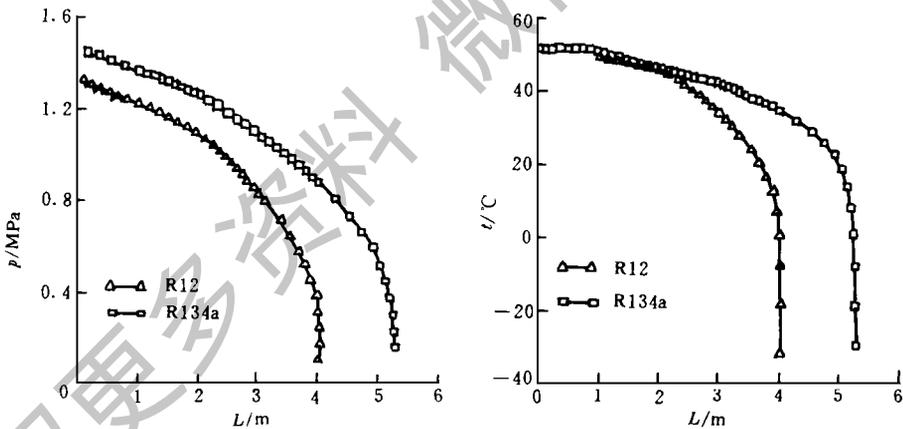


图4 R12与R134a的特性(温度、压力)比较

#### 4.3 R12、R134a毛细管的优化

表1是当毛细管的质量流量为 $0.897 \text{ kg}$ 、过冷度为 $3^\circ\text{C}$ 时的一组优化结果.从表中可以看出,固定毛细管的第一段长度 $L_1$ (即毛细管的出口温度保持不变),不同的回气管长度 $L_s$ (即回气管的入口温度改变)时, $X/\lambda$ 的值有所变化.在回热度适当的情况下,可以稍微提高循环的 $X$ 值.如果回气管的长度太长, $X/\lambda$ 就可能下降.在上述情况下, $L_1=1.4 \text{ m}$ , $L_s=1.2 \text{ m}$ ,整个毛细管长度为 $4.22 \text{ m}$ 时的 $\epsilon'/k$ 较高.

表 1 R12毛细管的优化 ( $M=0.987\text{ g}$ ,  $L_1=1.4\text{ m}$ , 过冷度为  $3^\circ\text{C}$ )

$L_s/m$	$t_{s,out}/^\circ\text{C}$	$t_{s,in}/^\circ\text{C}$	$X'/X$	$L_{1\alpha}/m$
0.3	36.37	33.89	1.029	3.85
0.6	36.37	32.57	1.034	3.98
0.9	36.37	26.82	1.037	4.10
1.2	36.37	22.24	1.0375	4.22
1.5	36.37	26.16	1.035	4.37
1.8	36.37	7.89	1.026	4.53
2.1	36.37	-3.56	1.006	4.75
2.4	36.37	-19.6	0.966	5.10

根据同样的道理,选取不同的  $L_k$ 、 $L_s$ ,可以获得不同的回热度.从 R12来看,回热对其影响较小,但回气管太长时, $X'/X$ 的值小于 1,降低了循环的  $X$ 而对 R134a,尽管  $X'/X$ 也有极值,但却有良好的回热性能,回气管长度的改变, $X'$ 仍然提高较大.有过冷度时,系统的回热性能明显改善.

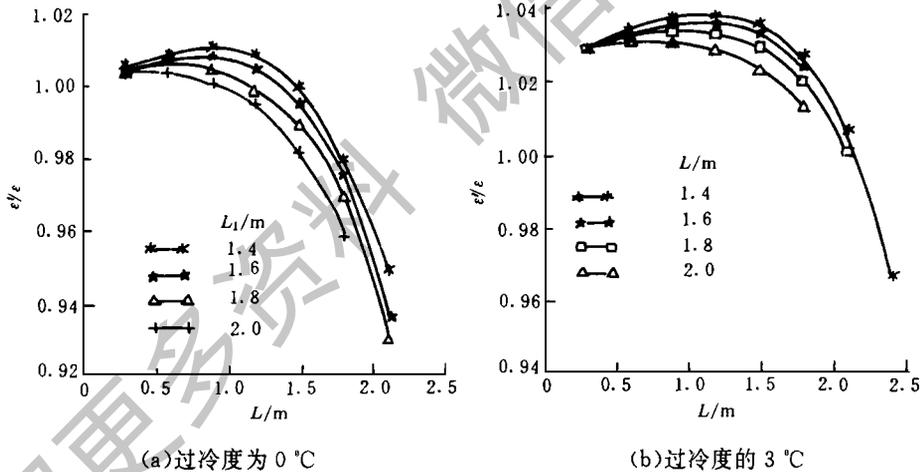


图 5 R12毛细管与回气管之间的配比优化

## 5 结束语

本文根据冰箱的实际情况,对工质 R12以及极具有希望的替代工质 R134a的毛细管特性进行了模拟计算,其计算结果与文献值吻合较好;提出了对冰箱毛细管的优化方法,得出了过冷度为  $0^\circ\text{C}$ 和  $3^\circ\text{C}$ 时,在一定工况下 R12及 2种替代工质的最佳毛细管与回气管的长度分配.

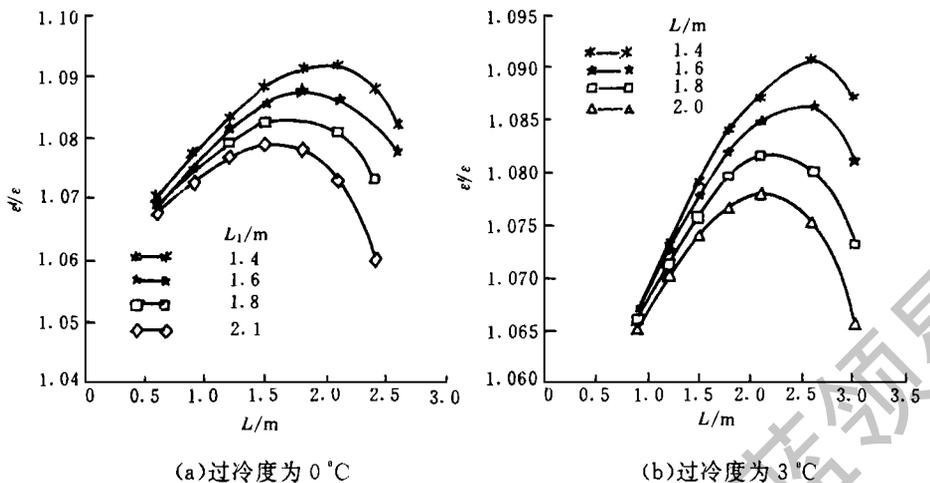


图6 R134a毛细管与回气管之间的配比优化

### 参 考 文 献

- 1 Copper L, Chu C K, Briskin W R. Simple selection method for capillaries from physical flow conditions. Refri Eng, 1957, (7): 37~ 90
- 2 Pate M B, Tree D R. A linear quality model for capillary tube-suction line heat exchangers. ASHRE Trans, 1984, 90(Part 2): 3~ 16
- 3 Yin J M, Liu H F, He M G. Two-phase flow in capillary tube of refrigerators and its simulation for alternative refrigerants R22/R152a. In: Chen X J, Chen T K, Zhou F D, eds. Proc of 3rd Int Symp Multi-phase Flow and Heat Transfer 94-Xi'an, Xi'an, China. Xi'an Jiaotong University Press and Begell House Inc, 1994
- 4 Zhai Y M. The optimization of HFC-134a in domestic refrigeration/freezer from real experiments demonstration. In: The Federation of Engineering Society of China Association for Science and Technology ed. Proc of Int Conf on CFC and Halon Alternatives. Beijing, 1993
- 5 彦启森, 王小玲. 小型制冷系统中毛细管特性的研究. 制冷学报, 1989, (2): 31~ 37
- 6 Desantis R. Vapor-liquid equilibrium from a hard-sphere equation of state. Ind Eng Chem Fundam, 1976, 15(3): 183~ 189
- 7 Domanski P A, Didion D A. Evaluation of suction line/liquid-line heat exchanger in the refrigeration cycle. Int J Refrig, 1994, 17(7): 487~ 493
- 8 Piao C C, Sato H, Watanabe K. An experimental study for PVT properties of CFC alternatives refrigerant 1,1,1,2-tetrafluoroethane (R134a). ASHRAE Trans, 1990, 96(Part 1): 132~ 138
- 9 朱明善, 韩礼钟, 李立等. 绿色环保制冷剂 HFC-134a热物理性质. 北京: 科学出版社, 1995

(编辑 蒋慧姝)

(下转第76页)

## Thermal Pattern of Stuck-at-Faults on Printed Circuit Board

Hou Chenggang Wang Yuwen Qu Liangsheng

(Xi'an Jiaotong University, 710049, Xi'an)

**Abstract** Based on the investigation of the dissipated power of TTL integrated circuit and CMOS integrated circuit, a novel fault representation of printed circuit board (PCB), i. e. thermal pattern of fault, is presented. After discussing the thermal patterns of two kinds of PCB's Stuck-At-Fault (SAF), Stuck-At-Open (SAO) and Stuck-At-Short(SAS), we conclude that the SAFs of PCB can be verified and diagnosed by the difference between the faulty thermal pattern of PCB and that under normal condition.

**Keywords** *printed circuit board (PCB) fault detection stuck-at-fault (SAF) thermal pattern of fault*

(上接第44页)

## A Simulation and Optimization on the Alternative Refrigerant Capillary Tube of Refrigerators

Liu Haifeng He Maogang Yin Jianmin

(Xi'an Jiaotong University, 710049, Xi'an)

**Abstract** According to the actual refrigerator operating conditions, a physical and mathematical model has been set up and solved with a non-linear method. The simulation result is in good agreement with the reference. A way is discussed for how to optimize the length of the capillary tube and the suction line for R12 and R134a. The optimized length of the capillary tube and suction line has been calculated for refrigerant R12 and alternative R134a.

**Keywords** *capillary tube R12 R134a optimization*