

## 冰箱毛细管的计算机辅助设计

刘楚芸 严文明

(浙江大学能源系 杭州 310027)

**摘要** 根据两相流动的均相流动模型,对采用 R134a作为工质的冰箱毛细管进行了理论研究,设计开发了一个毛细管计算程序;介绍了有回热的毛细管计算方法,子程序功能;计算数据与有关实验数据较为吻合。

**主题词** 冰箱 毛细管 CAD

### 符号表

$G$ — 质量流率;	$\bar{h}$ — 两相流体比焓;	$v_l$ — 液态比容;
$M$ — 质量流量;	$\bar{v}$ — 平均比容;	$v_{fg}$ — 液态和气态比容之差;
$k$ — 流速;	$T_c$ — 毛细管温度;	$h_l$ — 液态比焓;
$v$ — 比容;	$T_w$ — 毛细管管壁温度;	$h_{fg}$ — 液态和气态比焓之差;
$p$ — 压力;	$\alpha$ — 对流换热系数;	$\bar{\mu}$ — 平均粘度;
$\lambda$ — 阻力系数;	$T_s$ — 吸气管内的温度;	$\mu_g, \mu_l$ — 气相和液相的粘度
$d$ — 毛细管内径;	$T_{amb}$ — 周围环境的温度	脚标: $c$ — 毛细管; $s$ — 吸
$l$ — 毛细管管长;	$U$ — $U = ac^2dc$ ;	气管; $amb$ — 环境; $w$ — 管
$\rho$ — 制冷剂密度	$X$ — 干度;	壁; $f$ — 液态; $g$ — 气态。
$V$ — 制冷剂运动粘度		

### 1 引言

毛细管是广泛使用于小型制冷设备的节流装置,它对于制冷系统的连续运动起着重要的作用。同时,结构简单,价格低廉,无运动部件,故而对家用冰箱是非常适合的<sup>[1]</sup>。由于毛细管的理论计算比较复杂,对其内部气液两相流动的研究尚不充分,因此,目前选配毛细管的方法一般是用图解法或类比法初步估算内径和长度,再用试验方法调整。但是,前者误差很大,后者需要成熟的使用经验<sup>[2]</sup>。现在,国际上公认 CFC-12的替代物 HFC-134a,在采用

了新工质的系统中毛细管的匹配至关重要,但用上述方法不能定量确定毛细管的长度,它对改型后冰箱的正常运行和能耗水平都起着举足轻重的作用。为解决原来两种方法存在的不足和现在替代工作的困难,本文还设计开发了一个毛细管计算程序,介绍了有回热的毛细管计算方法,主要采用了两相流动的均相流动模型。

## 2 毛细管的物理模型

毛细管中的流动形式分为过冷段、亚稳段和热力平衡段<sup>[3]</sup>,其中亚稳段存在单相液体亚稳段和气液两相亚稳段

为了便于计算,一般将毛细管中的流动形态分为单相流动和气液两相平衡两个阶段

图1为简化的毛细管物理形态,在整个的流动过程中,由于环境空气和制冷剂传热量对整个流动过程影响很小,故忽略和空气的自然对流传热。流动过程分为三个区域: I 区为绝热单相流动; II 区为有回热的两相流动,此时毛细管和压缩机回气管有回热; III区为绝热的两相流动。



图1 毛细管传热图示

## 3 毛细管的数学模型

由于毛细管的内径很细,因此,忽略沿着径向的参数变化,把流动看成为一元流动,只考虑流动方向上的参数变化。

毛细管的数学模型主要依据均相流动模型。在均相流动模型中,做了两个假定<sup>[4]</sup>:

- (1) 液相和气相的流速相等;
- (2) 两相介质已达到热力学平衡。

毛细管的流动数学模型主要依据为流体流动的基本方程和传热的基本方程。包括连续方程、动量方程、能量方程、开口系的基本能量方程等。由于单相流动模型已比较成熟,这里仅介绍双相流动的数学模型。

回热段的两相流动模型<sup>[5]</sup>

对于有回热的毛细管段,可看成一个逆流的圆管传热问题。毛细管和回气管中的制冷剂流动方向相反,这样可以加强换热效果。它的计算数学模型如下:

连续方程:

$$G = \frac{M}{A} = \frac{k_1}{v_1} = \frac{k_2}{v_2} \quad (1)$$

动量方程:

$$-\frac{dp}{dl} = \frac{f \bar{v} G_c^2}{2d_c} + G_c^2 \frac{d\bar{v}}{dl} \quad (2)$$

能量方程:

$$\frac{d\bar{h}}{dl} = -\frac{h_c c_d c (T_c - T_w)}{M_c} - \frac{G_c^2}{2} \frac{d\bar{v}^2}{dl} \quad (3)$$

管壁与毛细管的传热方程:

$$T_c c_{dc}(T_c - T_w) - T_s c_{ds}(T_w - T_s) - U(T_w - T_{amb}) = 0 \quad (4)$$

对于两相流动部分,采用了均相模型,因此它的流动的物理参数采用了两相的平均值,它们的计算公式如下:

两相流体的比容:

$$\bar{v} = v_f + x v_{fg} \quad (5)$$

两相流体的比焓:

$$\bar{h} = h_f + x h_{fg} \quad (6)$$

两相流体的摩擦系数<sup>[6]</sup>:

$$\lambda = \frac{0.3164}{Re^{1/4}} \quad (7)$$

两相流体的粘度<sup>[7]</sup>:

$$\bar{\mu} = x \mu_g + (1 - x) \mu_f \quad (8)$$

毛细管内的努谢特数:

$$Nu_c = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.3} \quad (9)$$

吸气管内的努谢特数:

$$Nu_s = 0.0395 Re^{0.75} Pr^{0.333} \quad (10)$$

绝热段两相流动模型

绝热两相流动是上面所述有回热流动的特例,即在能量方程中缺少了传热能量项,同时由于毛细管内的流动是绝热等焓的,因此它的计算过程中的能量方程实际上和动量方程是同一个方程,计算过程中能量项作为一个定值.这个过程的数学模型除连续方程与方程(1)相同,动量方程和能量方程分别为

$$dp + \lambda \frac{dl}{d} \frac{dk}{2} + dk dk = 0 \quad (11)$$

$$\frac{dp}{d} + k dk + \frac{\lambda}{2d} k^2 dl = 0 \quad (12)$$

对于两相流体的流动物理参数,同样采用均相模型中的平均值法,计算过程中仅粘度与回热段两相流模型不同,其他参数的计算方法与有回热的模型计算一样.故只介绍如下的公式:

$$\bar{v} = \frac{x v_{g,g} + (1 - x) v_{f,f}}{v} \quad (13)$$

R134a 的状态方程

计算过程中对各个饱和状态点的状态参数计算,采用了热力性质参数方程直接计算和查表相结合的方法.计算时主要用到了 R134a 的下述两个热力性质参数方程:

饱和气体压力计算方程

$$\ln p = A + \frac{B}{T} + CT + DT + \frac{E(F - T)}{T} \ln(F - T) \quad (14)$$

$$A = 24.8033988; B = -0.3980408 \times 10^4; C = -0.02405332; D = 0.224521 \times 10^{-4};$$

$$E = 0.1995548; F = 0.374847 \times 10^3$$

状态方程

$$p = \frac{RT}{v-b} + \frac{A_2 + B_2 + C_2 e^{-KT_r}}{(v-b)^2} + \frac{A_3 + B_3 T + C_3 e^{-KT_r}}{(v-b)^3} + \frac{A_4}{(v-b)^4} + \frac{A_5 + B_5 C_5 e^{-KT_r}}{(v-b)^5} \quad (15)$$

$$b = 0.345546 \times 10^{-3}; K = 5.475; A_2 = -0.119505 \text{ l}; B_2 = 0.1137590 \times 10^{-3} \\ C_2 = -3.531592; A_3 = 0.144779 \times 10^{-3}; B_3 = -0.894255 \times 10^{-7}; C_3 = 0.6469248 \times 10^{-2}; \\ A_4 = -1.04900 \times 10^{-7}; A_5 = -6.953904 \times 10^{-12}; B_5 = 1.269806 \times 10^{-13}; C_5 = -2.051369 \times 10^{-9}$$

#### 4 计算方法

比较单相绝热、两相回热、两相绝热流动三个阶段的数学模型,可以看出第一、第三段的流动与第二段的差别在于少了一个传热项,因此三个过程的求解方式是相似的。同时以有回热的毛细管计算最为复杂,也可以把一、三两个阶段的求解过程看成是第二个阶段求解过程的特例。这里阐述第二个阶段即有回热的毛细管段的求解过程。

采用向前差分方法,经过重新组合、替代和消元,把微分方程 1, 2, 3化成以下有限差分方程:

$$p_{i+1} = p_i - G_c^2 (\bar{v}_{i+1} - \bar{v}_i) - \frac{f_{i+1} + f_i}{2} \cdot \frac{\bar{v}_{i+1} + \bar{v}_i}{2} \cdot \frac{G_c^2}{2d_c} \cdot (l_{i+1} - l_i) \quad (16)$$

$$T_{s_{i+1}} = T_{s_i} + \frac{M_c(h_{i+1} - h_i)}{M_s C_{ps}} + \frac{M_c G_c^2 (\bar{v}_{i+1}^2 - \bar{v}_i^2)}{2M_s C_{ps}} + \frac{(l_{i+1} - l_i)U}{M_s C_{ps}} \left[ \frac{(T_{c_{i+1}} + T_{c_i})}{2} - T_{amb} \right] \quad (17)$$

$$T_{w_{i+1}} = -T_{w_i} + T_{s_{i+1}} + T_{s_i} - \frac{2M_s C_{ps}}{c_d s \left[ \frac{T_{s_{i+1}} + T_{s_i}}{2} \right]} \cdot \frac{(T_{s_{i+1}} - T_{s_i})}{(l_{i+1} - l_i)} \quad (18)$$

由方程(4)得到下式:

$$T_{c_{i+1}} = \frac{T_{s_{i+1}} d_s (T_{w_{i+1}} + T_{s_{i+1}})}{d_c (T_{c_{i+1}} - T_{w_{i+1}})} + \frac{U(T_{q_{i+1}} - T_{amb})}{c d_c (T_{c_{i+1}} - T_{w_{i+1}})} \quad (19)$$

方程 16, 17, 18, 19中左侧的变量为要求解的四个变量,它的边界条件由毛细管节流前后两个点的状态参数确定。在这 4个方程中,摩擦系数、比容等参数可以通过此 4个变量间接表示出来。计算过程中采用逐步迭代法。当 4个变量的两次迭代误差不超过一个极小值  $\epsilon$  (0.01或 0.001)时,认为计算结果正确,此处取 0.001。图 2为程序的结构流程框图。程序采用 Visual C++ 语言编写。

#### 5 总结

本文中的毛细管计算机辅助设计软件,所采用的数学模型能很好地反映毛细管的性能,计算速度快,结果比较准确,为毛细管的设计提供了有效手段。

由于计算中采用的数学模型忽略了亚稳态的影响,因此汽化点的起始位置存在变化,会给计算精度带来误差。

计算软悠扬经过适当改进后可以用于毛细管的优化设计工作,也可以进行其他工质的毛细管计算。

。毛细管的内径对于毛细管的长度影响很大。这是因为毛细管的内径增大，流动阻力减小，从而使压力下降缓慢

### 参 考 文 献

- 1 赵晓宇等. 冰箱系统毛细管计算模型. 工程热物理学报, 1995, (3)
- 2 吴业正等. 小型制冷装置设计指导. 北京: 机械工业出版社.
- 3 Gorasia, J.N. Dibey N, Jain K K. Computer-Aided Design of Capillary of Different Configurations. ASHRAE Trans, 1991, 87(3451): 123~ 138
- 4 陈之航等. 气液两相流动和传热. 北京: 机械工业出版社
- 5 Pate M B, Tree D R. A Linear Quality Model for Capillary Tube-Suction Line Heat Exchangers. ASHRAE Trans, 1984, 90, Part 2 3~ 17.
- 6 姜正良等. 毛细管设计计算微分方程数值解. 流体工程, 1992, (3)
- 7 Cicchitti A, et al. Two-phase Cooling Experiments—Pressure Drop, Heat Transfer and Burnout Measurement. Energy Nuclear, 1960, 7(6)

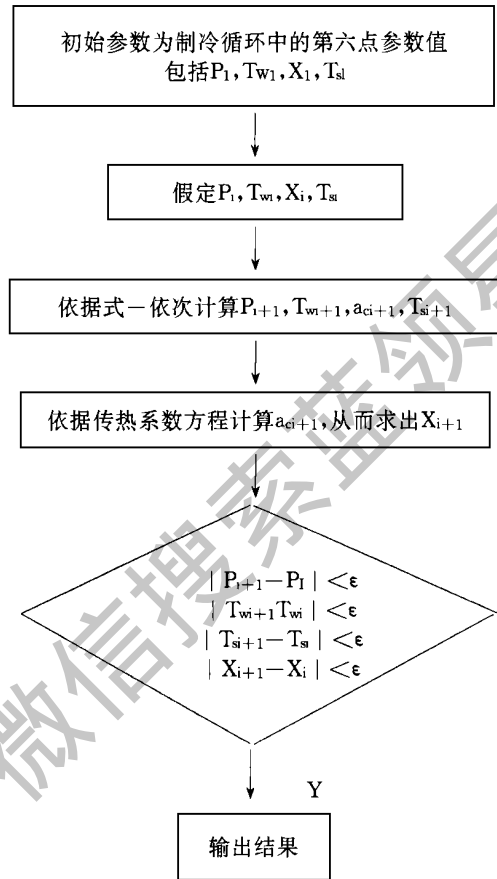


图 2 回热段毛细管的长度计算程序框图

## CAD OF CAPILLARY TUBE OF REFRIGERATOR

Liu Chuyun Yan Wenming

(Zhejiang University, Hangzhou 310027)

**ABSTRACT** This paper describes a model for capillary tube of refrigerator with refrigerant R134a that can be used for either simulation or design. According to the model, a program can calculate the lengths. Good agreement is found between the experimental results and the data calculated.

**KEYWORDS** refrigerator; capillary tube; CAD