

文章编号: 1001- 5167(2001)01-0065-06

# 丙烷作为冰箱、空调制冷工质毛细管最佳长度的计算\*

唐汝宁, 马广兴

(内蒙古工业大学建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010062)

**摘要:** 本文以计算传热学、流体力学为研究手段, 利用数值计算的方法模拟出所需毛细管的最佳几何尺寸及随工况变化时的情况, 建立相应的物理模型和模型, 编制程序, 计算出以丙烷 (R290) 作工质的小型制冷设备毛细管的长度, 为毛细管的选择建立一定的理论依据。

**关键词:** 制冷剂替代; 毛细管; 长度计算

**中图分类号:** TB657 **文献标识码:** A

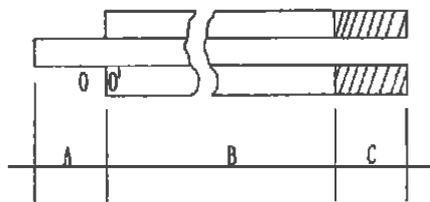
## 1 概 述

由于臭氧破坏效应日趋严重, CFCs 类制冷剂替代已势在必行. 丙烷 (R290) 的基本物理性质及热物理性质与 R22 极其相似, 因此目前在家用冰箱及空调器等小型制冷装置中已尝试用丙烷 (R290) 作为制冷工质替代 R22.

在冰箱、空调器等小型制冷装置中, 由于其蒸发压力几乎恒定, 冷凝器和蒸发器之间的压差比较稳定, 所以毛细管以其结构简单、制造方便、价格低廉、运行可靠等优点代替热力膨胀阀作为节流装置.

毛细管的作用之一是提供系统所需压降, 在一定工况范围内可很好满足系统的要求. 其缺点是不适应于变载荷情况. 在某些情况下它的效率低于最大值, 而且毛细管又是小型制冷系统的四大部件之一, 选用好坏直接影响到机组的制冷量与电动机功率的匹配, 也会影响到流体工作噪声的大小, 所以, 设计时应更为接近实际, 以期得到更满意的效果.

以往在毛细管设计时, 很多厂家和设计者大多还是先查图再通过实验的试凑方法来确定毛细管的长度, 实验周期及费用较大, 结果也不一定精确. 而所查之诺莫图也主要是针对 R1 和 R2 的. 在丙烷做制冷工质的小型制冷设备上毛细管的长度计算则更是空白, 所以本文利用方法, 编制程序, 以计算机为工具计算出毛细管的长度, 为以丙烷做工质的小型制冷设备的毛细管的选择建立一定的理论依据.



A 绝热单相流段; B 有热交换两相流段;  
C 绝热两相流段

## 2 毛细管节流机构的计算

在进行设计计算以前首先要清楚的是毛细管内工质的流动状况, 通过对毛细管节流机构机理的研

\* 收稿日期: 2000-05-25

作者简介: 唐汝宁 (1965-), 女 (汉族), 内蒙古工业大学建筑工程学院讲师, 硕士.

究发现,由于毛细管直径很小,制冷剂流速较大,通常会出现亚稳定状态的液体,由于过冷液体的存在,使闪点的温度和压力并不对应,一般使闪点延迟  $2 \sim 5^{\circ}\text{C}$  (图 1).从  $O'$ 点压力降低,由于节流的作用温度明显下降,气态开始生成,使摩擦压降有所增加,所以从  $O'$ 点以后压力呈明显下降趋势.

工质的流动进入两相区,对饱和气液两相流动当背压较低时在管道出口截面上就会达到临界状态.而本文在计算时研究的是毛细管的两相流动.同样,毛细管内的气液两相流动也是可压缩流体.一般对于小型制冷系统,此背压即为蒸发器内的压力  $P_e$ .当管径  $D$  管长  $L$  及制冷剂在进口前的状态参数均已给定的情况下,制冷剂的流量密度及出口压力是随  $P_e$  而改变的.当  $P_e$  不太低时,出口压力始终和  $P_e$  相连,流量密度  $G$  也随着  $P_e$  的降低而不断增大.但当  $P_e$  降低到某一数值以下时,在管道出口将出现临界状态,此时,毛细管出口处的状态参数保持不变(出口压力  $P_c$ ,且  $P_c > P_e$ ),流速等于当地音速,而流量密度达最大值且不随  $P_e$  的降低而变化,也就是说:通过毛细管的流量随着毛细管进口压力的增加而增加,但出口压力降低到某一数值以下,流量就不再增加了,即出现临界现象.这也是用毛细管来控制流量的主要特性.以后制冷剂将在管外自由膨胀到  $P_e$  随后即进入到蒸发器之中.毛细管内气流两相流动过程存在有临界状况这一点,已多次为实验研究及理论分析所证实.经过分析其原因一方面是由于两相的流动使当地音速降低,另一方面则是由于出口处的两相混合物中气态比容的增加使得出口速度增加,这样当出口速度与当地音速相等时,也就达到了临界状态.所以在进行毛细管计算时,首先需要确定出口截面上是否达到临界状态.

制冷剂在毛细管中的运动比较复杂,本文以计算传热学、流体力学做为研究手段,利用数学的方法模拟出所需要的毛细管最佳几何尺寸及随工况变化时的状况,建立相应的物理模型和数学模型.

## 2.1 物理模型

对于带回热的毛细管,本文以冰箱实际运行情况为例,如图 1.该物理模型可分三个部分,两种流态来考虑:

- 2.1.1 绝热单相流段.毛细管从干燥器出来之后,暴露于空气中,并缠绕在压缩机吸气管上,这部分由于长度较长,相对传热量较小,将之取为绝热段.
- 2.1.2 有热交换两相流段.毛细管穿插于回气管当中,组成一个复杂的毛细管—回气管换热器.
- 2.1.3 绝热两相流段.毛细管从回气管出来之后进入发泡层取做绝热毛细管.

而对于不带回热的毛细管如空调器毛细管则没有中间的换热部分,只有绝热单相流段和绝热两相流段.

## 2.2 数学模型

2.2.1 在毛细管中有液体单相流和气液两相流两种情况,而气液两相流是一个极其复杂的流动过程.因此,在研究中有必要做一些简化:

- 2.2.1.1 毛细管内径一致,内壁粗糙度均匀.
- 2.2.1.2 流动是稳定的,即  $\partial X / \partial T = 0$ .
- 2.2.1.3 在垂直于流动方向的给定平面上气化潜各相都有一个密度的平均值.
- 2.2.1.4 垂直于通道轴线的任一平面上的压力都是均匀的,液相和气相占有的面积总和等于通道的横截面积.
- 2.2.1.5 两相流为均匀两相流.即  $w' = w''$ ,气液两相达到热力平衡,在同一截面上气相和液相的速度相等.
- 2.2.1.6 传热仅发生于整个毛细管的回气管部分.
- 2.2.1.7 忽略毛细管与空气之间的传热,即理想保温.
- 2.2.1.8 毛细管内出现的沸腾换热为泡状沸腾.
- 2.2.1.9 本文研究的是水平圆管内的流动,故忽略重力的影响.
- 2.2.2 数学模型按绝热流动区域和有热交换区域两种来分,绝热流动区又可分为绝热单相区和绝热两相区.

对以上模型的具体分析有:

2.2.2.1 绝热单相区模型—绝热单相流 A 段的毛细管长度,可直接用通常的单相流阻力计算公式进行计算:

$$\Delta p = f \cdot \frac{1}{2} \cdot d \cdot k^2 \cdot \frac{\Delta L}{D_c}$$

经过变换:  $\Delta L = \frac{2 \Delta p D_c}{f \cdot d k^2}$

### 2.2.2.2 有热交换两相流数学模型

B 段的数学模型为:

连续性方程: 
$$\frac{d(dAk)}{dL} = 0$$

动量方程:

$$-\frac{dp}{dL} = \frac{G^2}{g} \cdot \frac{dV}{dL} \cdot \frac{2G}{g} \cdot V \cdot \frac{f_{TP}}{D_c}$$

能量方程:

毛细管内制冷剂:

$$\frac{dh}{dL} + \frac{d(k^2/2)}{dL} + \frac{T_c c D_c \cdot (T_c - T_w)}{G} = 0$$

回气管内制冷剂:

$$C_{ps} \cdot \frac{dT_s}{dL} + \frac{T_s \cdot c \cdot D_s}{G} (T_w - T_s) = 0$$

热平衡方程:

$$T_c \cdot c \cdot D_c \cdot (T_c - T_w) + T_s \cdot c \cdot D_s \cdot (T_s - T_w) = 0$$

### 2.2.2.3 绝热两相流数学模型

绝热两相流 C 段的管长,可根据出现阻塞流这一特点来确定,其控制方程如下:

连续性方程: 
$$\frac{d(dAk)}{dL} = 0$$

动量方程:

$$-\frac{dp}{dL} = \frac{G^2}{g} \cdot \frac{dV}{dL} \cdot \frac{2G}{g} \cdot V \cdot \frac{f_{TP}}{D_c}$$

能量方程: 
$$\frac{d(h + k^2/2)}{dL} = 0$$

2.2.2.4 为了实现上述方程计算,需用到下列参数和辅助方程.

#### 2.2.2.4.1 丙烷的热力性质方程式

计算纯质的热力性质除了状态方程外,尚需饱和蒸汽压方程和理想气体定压比热方程辅以计算.而对于单质工质,这些方程均可拟合成饱和温度的函数.本文拟采用下列方程:

##### 1. 状态方程

本文所用的状态方程是经 R-K-S 推导而得.

$$p = \frac{RT}{v - b} - \frac{a(T)}{v(v + b)}$$

其中:

$$b = 0.08664 \frac{RT_c}{P_c}$$

$$a(T) = a \cdot T(T)$$

$$a_c = 0.42748 \frac{R^2 T_c^2}{P_c}$$

$$T(T) = (1 + m(10T^{0.5}))^2$$

$$m = 0.480 + 1.574k - 0.176k^2$$

把丙烷的压缩因子、临界参数带入以下公式,即可进行计算.

## 2. 饱和蒸汽压方程

$$\ln P_r = \frac{1}{T_r} [A(1 - T_r) + B(1 - T_r)^{1.5} + C(1 - T_r)^3 + D(1 - T_r)^6]$$

## 3. 理想气体定压比热方程

$$C_p = d_0 + d_1 T + d_2 T^2 + d_3 T^3 \quad (\text{KJ/kg} \cdot \text{K})$$

## 4. 焓的方程

$$h = d_0 T + d_1 T^2 / 2 + d_2 T^3 / 3 + d_3 T^4 / 4 - \frac{1}{b} T - \frac{U_a T - ab}{b^2} \ln \frac{V}{V + b} - \frac{R U_f^2 (V^2 - 0.125 b V)}{(V - 0.25 b)^3} - RT + PV + \frac{T U T}{b(V + b)} + X$$

## 5. 比容的计算

给定一组  $T, P$  用状态方程就可以求出丙烷的液体比容和饱和蒸汽比容也可求出过热蒸汽的比容. 以上方程中的系数及单位见参考文献〔7〕.

### 2.2.2.4.2 计算所需的基本参数

由于毛细管的管径和管壁都以进行了标准化,因此,对毛细管的设计实质上就是对毛细管的长度进行设计.管长的设计与对流换热系数、摩擦系数、动力粘滞系数等物理参数有关,这些数据的选取直接影响到计算结果的准确性.

#### 1. 对流换热系数

因为经过闪点以后,工质在毛细管内处于两相受迫对流换热区,其  $T$  值实际上是沸腾换热和受迫对流换热的叠加,即:

$$T = T_{mic} + T_{mac}$$

$T_{mic}$  和  $T_{mac}$  分别称为微观对流与宏观对流换热系数,前者与泡态沸腾相联系,后者与整体流体有关.可以分别用池内沸腾公式和单相受迫对流换热的公式进行计算.

$$T_{mac} = 0.023 \frac{\lambda_l}{d} Re_l^{0.8} Pr_l^{0.4} F$$

$$T_{mic} = 0.00122 \left[ \frac{\lambda_l^{0.79} C_{pl}^{0.45} d_g^{0.49}}{e^{0.5} r^{0.29} d_g^{0.24}} \right] (t_w - t_s)^{0.24} \Delta p^{0.7}$$

式中:  $Re_l = \frac{(\dot{m}_l)(1-x)d}{\mu_l}$  为按液相流量计算的  $Re$ ;

$\Delta p$ ——相应于  $\Delta t_w = t_w - t_s$  这一温差的饱和压差;

$S$ ——核沸腾因子  $S = Re_l F^{1.25}$

#### 2. 摩擦系数

毛细管进口前丙烷为液体过冷状态时直到闪点滞后以前,管内流动为液体,其阻力系数:

$$F = \left[ \frac{Re_{FP}}{Re} \right]^{0.8}$$

闪点之后进入两相区后:

#### 3. 两相区的密度 $d$ 由下列关系式求出:

$$d = U \cdot d' + (1 - U) \cdot d$$

$$U = \frac{d' / d''}{\frac{1}{x} + \frac{d'}{d''} - 1}$$

#### 4. 两相区运动粘滞系数如下所求:

$$v = \frac{\mu}{d}$$

#### 5. 两相区动力粘滞系数如下所求:

$$\frac{1}{\mu} = \frac{x}{\mu_1} + \frac{1-x}{\mu_2}$$

### 2.3 毛细管设计计算方法及步骤

从以上数学模型看,这些都是一阶线性微分方程,同时附加一些代数方程,要求其精确解是不可能的,只有运用数值解法求解.本文选择龙格-库塔法,采用在毛细管长度方向上,将其分成许多微段,然后连续计算,反复迭代,直至达到一定的精度为止.

整个毛细管设计计算步骤如下:

#### 2.3.1 制冷剂在毛细管中有热交换的情况

2.3.1.1 给出设计工况下毛细管的工作条件,质量流量,毛细管内、外径,毛细管进、出口的压力等.

#### 2.3.1.2 有热交换两相流段的长度计算

计算过程分为两步:

一是过冷度 $\Delta t$ 引起的 $\Delta p$ 对应的 $\Delta L$ 长;

二是闪点滞后 $\Delta t'$ 引起的 $\Delta p'$ 对应的 $\Delta L'$ 长.

$\Delta L + \Delta L'$ 即为单相流部分毛细管的长度.

#### 2.3.1.3 绝热单相区的长度计算

取温度步长 $\Delta t$ ,通过动量方程可求得 $\Delta t$ 所对应的毛细管长度 $\Delta L$ ,再由毛细管内制冷剂的能量方程求出焓值的变化 $dh$ ,然后开始新的循环迭代过程,直到整个热交换两相流段计算完毕.

#### 2.3.1.4 绝热两相流段长度的计算

在计算中,仍取温度步长 $\Delta t$ 从进口段起,计算 $\Delta t$ 所对应的管长 $\Delta L$ ,随着计算的进行, $\Delta t$ 所对应的管长 $\Delta L$ 值将越来越小,最后出现负值,其原因是出现了阻塞流.因此,通过判断 $\Delta L$ 是否小于零来确定绝热两相流的长度.

#### 2.3.2 制冷剂在毛细管中绝热的情况

毛细管绝热的情况与前面分析的有热交换情况相比,绝热单相流和绝热两相流段所用的公式和方法是一样的,只是没有回气管的热交换段,因而数学模型相对简单.

按照以上方法编制程序,分别计算以丙烷为工质时:有回热的条件下,冰箱毛细管的长度;绝热条件下,空调毛细管的长度.

各参数和计算结果见表.

条件	工质	流量 kg/s	毛细管内径 mm	毛细管外径 mm	回气管内径 mm	过冷度 °C	闪点滞后 °C	计算结果 m
空调	绝热	R290 0.0125	1.4	2.4	-	5.0	3.0	0.37
冰箱	回热	R290 0.00125	0.663	1.9	6	3.0	3.0	1.20

经过空调毛细管最佳长度的实验验证,计算结果与实际情况基本相符.

### 参考文献:

- [1] Kattan, Nakhle. Thome, John R. Favrat Daniel R- 502 and two near-azeotropic alternatives part I-in tube flow-boiling tests [M]. ASHRAE Transactions nl 1995. ASHRAE Atlanta, GA, U.S.A. 491~ 508
- [2] Mongey B, Hewitt N J, McMullan J.T. R407C as an alternative to R22 in refrigeration
- [3] 彦启森,王小玲.小型制冷系统中毛细管特性的研究 [J].制冷学报,1989. 2.
- [4] 周兴嘉,晋欣桥.制冷系统中毛细管特性研究 [J].流体工程,1989. 4.
- [5] 钟震华.毛细管状况对制冷性能的影响 [J].制冷,1995. 2.
- [6] 罗棣安.传热应用与分析 [M].北京:清华大学出版社.
- [7] 董景山等.流体热物理性质的计算 [M].北京:清华大学出版社,1982
- [8] 吴正业,韩保琦等.制冷原理及设备 [M].西安交通大学出版社.

[9] 唐汝宁. 硕士论文: 自然制冷剂丙烷 (R290) 替代 R2 的理论及实验研究 [M]. 天津大学, 1998.

## CALCULATING METHOD OF PROXIMAL LENGTH OF PROPANE CAPILLARY-TUBE IN ICEBOX AND AIR CONDITIONER

TANG Ru-ning, MA Guang-xing

(College of Civil Engineering, Inner Mongolia Polytechnic University, Huhhot 010062, PRC)

**Abstract** Based on the heat transfer mechanism and hydrodynamics, a numerical method is used to simulate the proximal geometrical dimension of capillary-tube and the change of dimensions along with the change of working conditions. Corresponding physical and mathematical models are constructed. A computer program is developed, which uses the numerical method to solve the mathematical model and succeeds in calculating the capillary-tube length in propane refrigerating system. The study provides good references for the selection of capillary-tubes.

**Keywords** alternative capillary-tube; length calculation