

冰箱系统毛细管计算模型

赵晓宇 韩礼钟 朱明善

(清华大学热能工程系 北京 100084)

关键词: 计算模型, 毛细管, 冰箱。

1 研究背景

毛细管是普遍使用于小型制冷设备中的节流装置, 它对制冷系统的连续运行起着重要作用, 又有结构简单、价格低廉、无运动部件、系统充液量少等优点, 因此对家用冰箱、小型空调器是非常适合的。

由于毛细管的理论计算比较繁复, 对其内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。现在, 国际上公认 CFC-12 的替代物为 HFC-134a, 新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。这样, 替代工作的难点和重点都往往集中在毛细管上, 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, 我们开发了一套毛细管计算的软件。

2 物理模型

制冷剂在毛细管中的流动状态, 沿管长方向的压力和温度变化如图 1^[1] 所示:

I. 过冷段, 单相液体: 压力降呈线性变化, 温度保持为定值。

II. 亚稳段, 单相液体: 温度仍保持不变, 虽压力已降到对应的饱和压力以下, 但制冷剂仍保持液态。

III. 亚稳段, 气液两相: 管中开始出现第一个气泡, 随后温度急剧下降, 压力降也变为非线性。

IV. 热力平衡段, 气液两相: 压力降为非线性变化, 而温度始终是对应于各点压力的饱和温度。

II、III 两个亚稳态段是不确定的部分, 其中物性状态很难确定。为简化计算, 将这两段分别归入前、后两部分, 即将整个毛细管内的流动分为单相液和气液平衡两个稳定的过程。

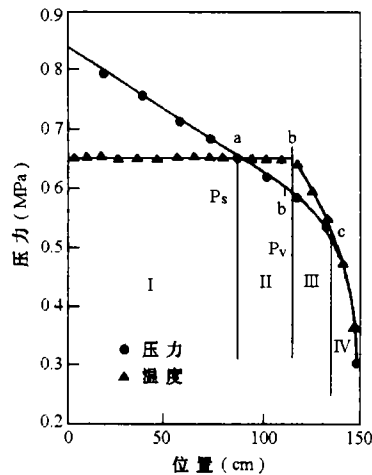


图 1 沿毛细管长度方向的压力和温度变化

本课题为国家计委“八五”重点攻关项目, 特此致谢。

本文曾于 1994 年 10 月在浙江宁波召开的中国工程热物理学会工程热力学与能源利用学术会议上宣读。

3 数学模型

选取毛细管内的微元控制体如图 2^[2] 所示:

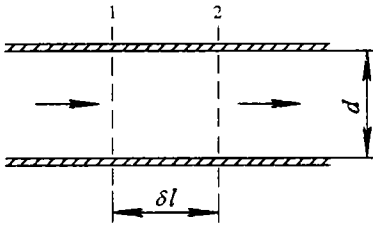


图 2 毛细管的微元控制体

在研究中采用简化的一元流动模型, 即只考虑各参数沿流向的变化, 这样处理既便于分析, 又可抓住问题的主要特点。

3.1 单相流动

连续性方程: $\rho_1 v_1 A_1 = \rho_2 v_2 A_2$

因为管路截面积不变, 化为

$$G = \frac{M}{A} = \frac{v_1}{V_1} = \frac{v_2}{V_2} \quad (1)$$

式中 G 为质量流率, M 为质量流量, v 为流速, V 为比容。

动量方程: $\delta p + \delta h_f + \rho v \delta v = 0$, 即

$$\delta p + \lambda \frac{\delta l}{d} \frac{\rho v^2}{2} + \rho v \delta v = 0 \quad (2)$$

能量方程:

$$\frac{\delta p}{\rho} + v \delta v + \frac{\lambda}{2d} v^2 \delta l = 0 \quad (3)$$

3.2 两相流动

为了应用按单相流推导的公式, 采用均相流动模型, 即把气、液两相混合物看作一种均匀介质, 其流动物理参数采用两相介质的相应参数的平均值。这里有两个假设: 液相和气相的流速相等 (无相对滑动); 两相介质达到热力学平衡。

$$h = x h_g + (1 - x) h_l \quad (4)$$

$$V = x V_g + (1 - x) V_l \quad (5)$$

$$\frac{1}{\mu} = \frac{x}{\mu_g} + \frac{1 - x}{\mu_l} \quad (6)$$

3.3 阻力系数 λ 的选取^[3]

直管: 单相 $\lambda_l = \frac{17.24}{(\text{Re}_l)^{0.82}} \quad \lambda_g = \frac{17.24}{(\text{Re}_g)^{0.62}} \quad (7)$

$$\text{Re}_l = \frac{Gd}{\mu_l} \quad \text{Re}_g = \frac{Gd}{\mu_g}$$

两相 $\lambda_{TP} = x \lambda_g + (1 - x) \lambda_l \quad (8)$

盘管: 单相 $\lambda_l = \frac{0.300 \left(\frac{d}{D}\right)^{0.5}}{[\text{Re}_l \left(\frac{d}{D}\right)^2]^{0.2}} \times \left\{ 1 + \frac{0.112}{[\text{Re}_l \left(\frac{d}{D}\right)^2]^{0.2}} \right\} \quad (9)$

式中 D 为盘管曲率直径。

$$\text{两相} \quad \lambda_{TP} = \frac{1.1258}{[\text{Re}_{TP}^{0.1938} (\frac{D}{d})^{0.5391}]} \quad (10)$$

$$\text{Re}_{TP} = \frac{Gd}{\mu_{TP}}$$

根据以上模型和公式, 用差分格式编制了一套计算软件。

4 计算结果

4.1 设计计算

即根据系统循环计算中求得的流量和限定的工况来求毛细管的长度。

程序框图略。本程序可计算三种形式的毛细管: a. 直管、b. 盘管、c. 混合式。

输入参数: 毛细管入口压力 p_1 , 出口压力 p_2 , 入口过冷度 $DSUB$, 质量流量 M 和口径 d ; 若为 b、c 形式的毛细管还需输入 $Z = D/d$ 。输出结果为管长 L 。

下面以工质 CFC-12 为例, 计算工况: $p_1=1.18\text{MPa}$, $M=27.9\text{kg/h}$, $d=1.7657\text{mm}$, $DSUB=0^\circ\text{C}$, c 形式 $Z=20$ 。不同 p_2 值对管长的影响列于下表。

表 1

| p_2 (MPa) | 试验值 L (m) | 计算值 L (m) | 相差 (cm) | 误差 (%) |
|-------------|-------------|-------------|---------|--------|
| 1.18 | 0.0 | 0.0 | | |
| 1.13 | 0.6 | 0.615 | 1.5 | 2.50 |
| 1.08 | 1.2 | 1.118 | -8.2 | -6.83 |
| 0.99 | 1.8 | 1.830 | 3.0 | 1.67 |
| 0.88 | 2.4 | 2.462 | 6.2 | 2.58 |
| 0.71 | 3.0 | 3.135 | 13.5 | 4.50 |
| 0.43 | 3.6 | 3.630 | 3.0 | 0.83 |

4.2 校核计算

根据毛细管的结构尺寸和运行工况来求质量流量, 进而校核是否满足系统制冷量要求^[4,5]。

程序框图略。以工质 HCFC-22 系统为例, 将计算值与 Kuehl 和 Goldschmidt 的试验值及根据 1988 年《ASHRAE Handbook》的图表查出值进行对比, 见下表。

表 2

| 工 况 | | | | 流 量 (lbm/h) | | |
|----------|----------|--------------|------------|-------------|-----|-----|
| d (in) | L (in) | p_1 (psia) | $DSUB$ (F) | 试验值 | 查图值 | 计算值 |
| 0.049 | 30 | 180 | 10 | 79 | 61 | 66 |
| 0.049 | 30 | 240 | 20 | 101 | 84 | 102 |
| 0.064 | 60 | 180 | 20 | 130 | 125 | 115 |
| 0.064 | 30 | 180 | 10 | 165 | 126 | 143 |
| 0.054 | 20 | 240 | 15 | 146 | 124 | 153 |
| 0.054 | 60 | 240 | 15 | 98 | 81 | 83 |

4.3 指导冰箱制冷剂 CFC-12 的替代工作

对雪花电器集团公司生产的 BCD-171A 冰箱系统进行改造, 选用德国丹佛斯公司生产的 HFC-134a 专用压缩机, 蒸发器面积适当调整, 毛细管长度用本程序计算结果指导。冰箱热工性能试验结果: 各项指标均达到国家标准 (且达到“三星”级标准), 好多性能优于原 CFC-12 冰箱, 基本克服 HFC-134a 功耗大的缺点, 耗电量与 CFC-12 冰箱基本持平。

5 结 论

本文提供的毛细管计算软件, 计算速度快、结果较准确, 精度完全满足工程实用, 对理论分析和实际工作均有裨益。特别是在替代工作中, 为新工质系统毛细管的计算提供了快捷、准确的实用工具。

参 考 文 献

- [1] Chen Z. H., Li R. Y. et al, "A Correlation for Metastable Flow of Refrigerant 12 Through Capillary Tubes," *ASHRAE Trans.*, Vol.97, No.3364, 1991, pp.550-554.
- [2] 陈之航等, 《气液双相流动和传热》, 机械工业出版社, 北京, 1983, pp.14-24.
- [3] J. N. Gorasia, N. Dubey, K. K. Jain, "Computer-Aided Design of Capillary of Different Configurations," *ASHRAE Trans.*, Vol.97, No.3450, 1991, pp.132-138.
- [4] S. J. Kuehl, V. W. Goldschmidt, "Modeling of Steady Flow of R-22 Through Capillary Tubes," *ASHRAE Trans.*, Vol.87, No.3451, 1991, pp.139-148.
- [5] James M. Swweedyk, "Capillary Tube-Their Standardization and Use," *ASHRAE Trans.*, Vol.88, CH-81-16 No.1, 1982, pp.1059-1076.

MODEL FOR CAPILLARY TUBE

Zhao Xiaoyu Han Lizhong Zhu Mingshan

(Thermal Engineering Department, Tsinghua Univerisy, Beijing 100084)

Abstract

This paper describes a model for capillary tube that can be used for either simulation or design. For a given set of operational condition and mass flow rate, the model calculates the lengths and tube diameters. Alternatively in simulation mode, the model can calculates mass flow rate, for a given set of operational and geometric conditions. For adiabatic capillary tube, the relative dev. of length and mass flow rate are within 7% and 15% than the experimental ones respectively.

Keywords: computing model, capillary, refrigerator.