

冰箱回热毛细管内部流动特性研究

杨智辉, 刘益才, 刘振利, 曹立宏, 黄 谦
(中南大学 制冷与低温研究所, 湖南 长沙 410083)

摘 要: 通过对冰箱回热毛细管的“六段流阻”模型物理意义的描述, 模拟了 3 种不同工况对冰箱回热毛细管运行性能的影响, 即: 不同的冷凝器温度、不同的蒸发器温度及不同的回热段相对位置。从仿真结果可以看出冷凝温度的变化对毛细管内部流动特性的影响最大, 并对此进行了初步的实验验证。从对比结果可以看出, 该模型能够较好地描述冰箱回热毛细管内部的流动特性。

关键词: 制冷; 回热毛细管; 数值仿真; 实验研究; 冰箱

中图分类号: TB651

文献标识码: A

文章编号: 1006-7086(2006)04-0210-05

RESEARCH ON FLOW CHARACTERISTICS OF THE REFRIGERATOR NON-ADIABATIC CAPILLARY

YANG Zhi-hui, LIU Yi-cai, LIU Zhen-li, CAO Li-hong, HUANG Qian

(Institute of Refrigeration and Cryogenics, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The physical meaning of the refrigerator non-adiabatic capillary model that considered six flow residence parts, was discussed. The performance of non-adiabatic capillary in refrigerator under different conditions was study by numerical method according to a new model of non-adiabatic capillary. The effect of three different working conditions, including condensation temperature, evaporation temperature, reheater locations, was considered to simulate the influence of the function performance of the capillary. The simulation result shows that the condensation temperature is of the most influential to the function performance. Finally, from a preliminary experiment, it was found the this model is of high precision.

Key words: refrigerator; reheat capillary; mathematical simulation; experiment research; refrigerator

1 引 言

小型制冷装置如冰箱、家用空调等是目前应用最为广泛的制冷系统。由于毛细管具有结构简单、成本低廉、制冷剂难泄漏、无运动部件、系统充液量少、在停机时能平衡系统中的压力而使电动机的启动力矩小等优点^[1], 因此非常适合于制冷量在 10 kW 以下的小型制冷装置; 其缺点是变工况时调节能力弱、易被杂质阻塞和对制冷剂充注量要求严格等。

由于毛细管的理论计算非常复杂, 并且对毛细管内气液两相流动的研究也很不充分, 所以在以前一直是采用图解法和类比法选配毛细管。先初步确定毛细管内径和长度, 然后再用实验方法调整, 但前者误差非常大, 后者则需要成熟的使用经验。总体来说效率都不是很高。

为了解决传统设计方法的缺陷和新型制冷系统开发中性能匹配的困难, 最近几年, 开始提出采用数值方法进行毛细管的理论计算。其思路是, 先提出毛细管内流动的数学模型, 然后用计算机进行数值计算, 得出毛

收稿日期: 2006-06-01.

基金项目: 中南大学博士后科学基金(20040708)资助。

作者简介: 杨智辉 (1982-), 男, 福建省莆田市人, 在读硕士, 从事制冷与空调系统的研究。

细管的理论内径和长度。而目前大部分毛细管的研究都是针对绝热毛细管而言^[2-5],对于非绝热两相流的研究较少,且大部分文献都只是笼统地将制冷剂的流动分为过冷液体区和气液两相流动区^[6,7],因此文献[8]就在较全面分析现有毛细管理论计算模型的基础上,针对电冰箱制冷系统实际使用的非绝热毛细管,从数学上对每段流阻模型进行描述,进而建立了“六段流阻”理论计算模型,并进行了一定的理论计算。作者将从回热毛细管内部流动的物理意义的角度来系统地描述“六段流阻”模型的划分依据,并对影响毛细管内部流动特性的主要因素——冷凝温度、蒸发温度和回热区的长度等进行了仿真研究,最后通过初步的实验进行验证。

2 回热毛细管内流动状态描述

图1是电冰箱设计工况下制冷剂沿毛细管的流动示意图,箭头所指为制冷剂流动方向。可分为以下6个阻力损失阶段:入口突缩段(1—C—2)、绝热单相流段(2—3)、有回热的单相流段(3—4)、绝热单相流段(4—5)、绝热两相流段(5—6)、出口突扩段(6—7)^[8]。

1—C—2是突然收缩段。在该段中,单相制冷剂从冷凝器后面的干燥过滤器中流出进入毛细管,由于流道截面积的突然减小,故制冷剂流速会增加。由流体力学的分析可知,该段中存在突缩压力损失。这部分的静压损失主要是由截面C—C到截面2—2间流动扩展阻力造成的。

2—3是绝热单相流动段。单相制冷剂从冷凝器进入毛细管后,由于高速流体与毛细管内表面的剧烈摩擦,导致制冷剂压力不断下降,但此时制冷剂的温度几乎保持不变。

3—4是毛细管与回气管的回热流动段。该段模型可作如下假定:毛细管内制冷剂流动稳定,回气管内制冷剂为完全气态,同时忽略毛细管与回气管的接触热阻和轴向导热。如图1中3—4段所示,在毛细管-回气管热交换的过程中,由于制冷剂向回气管传递热量,使得毛细管中的制冷剂干度变化很小,同时也有可能发生反向传热现象^[9]。

4—5是为绝热单相流动段。由于回热流动段的存在,使得毛细管内制冷剂温度进一步降低,需要更低的压力才能达到饱和状态,因此单相流动段长度大大延长。

5—6是当毛细管中制冷剂压力达到过冷温度所对应的饱和压力后,进入两相流区。由于实际冰箱毛细管系统中,不一定在回热段即达到两相流,因此计算时仍然用绝热模型。5截面处的饱和液体继续向前流动时,由于与壁面的摩擦依然存在,因此其压力会继续下降并开始低于流体温度对应的饱和压力,这时制冷剂会发生闪蒸,成为两相流体。两相流体继续向前流动的过程中其压力都会因摩擦而比流体温度所对应的饱和压力低,因此闪蒸现象会持续发生。制冷剂干度将会不断上升,其密度会不断减小,而速度也会不断上升,并可能达到临界流动状态,这使得流体与壁面的摩擦加剧,流体压力在这一阶段会迅速降低。

6—7是突然扩张段。两相制冷剂从毛细管流出进入蒸发器。由于流道截面积的突然扩张,制冷剂流速会降低。同样,由流体力学的分析可知,该段中存在突扩压力损失。

毛细管出口与蒸发器入口采用突扩接口进行过渡联接。制冷剂流经该管段时,一方面流体与管壁发生脱离,产生大涡团运动,引起不可逆的内部摩擦耗散损失;另一方面由于流速降低,使得动能转变为压力能,这部分能量是可以恢复的。在实际过程中,由于局部压降大,因此截面7的干度 x_7 可能会大于截面6处的值 x_6 ,这一变化很难估计,一般令 $x=x_7=x_6$ ^[8,9]。

上述流动阶段的划分是较为简化的划分方式,事实上,还可能存在着2个亚稳态段。在第一个亚稳态段中,虽然制冷剂压力已经降低到了所对应的饱和压力下,但是制冷剂仍然保持液态而没有发生闪蒸;在第二个亚稳态段中,在毛细管中出现第一个气泡后,制冷剂的温度急剧下降并迅速达到热力平衡态。这2个阶段都是不确定的部分,其中的物性参数很难确定,并且到目前为止对这2种流动状态都还没有理想的模型,因此在处理过程中一般不将这2个阶段单独进行考虑,而是把它们分别划入单相流动段和两相流动段。

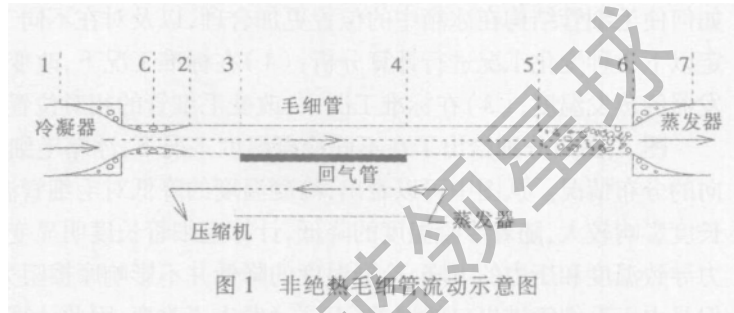


图1 非绝热毛细管流动示意图

3 回热毛细管的数值计算及其分析

选用伊莱克斯某型号冰箱设计工况: 冷凝温度 $t_{\text{con}}=54$ ($p_{\text{con}}=1.45 \times 10^5$ Pa); 冷凝器过冷度 $t_{\text{sup}}=32$; 蒸发温度 $t_{\text{eva}}=-23$ ($p_{\text{eva}}=1.45 \times 10^5$ Pa); 冷凝器铜管内径 4 mm; 蒸发器铜管内径 6 mm; 毛细管内径 0.9 mm; 回气管内径 6 mm; 设计标准流量 0.000 23 kg/s; 回热段管长 1 300 mm; 毛细管总长 3 900 mm, 其中入口单相绝热段管长 360 mm; 制冷剂为 R134a。

根据“六段流阻”模型描述进行数值计算, 详细的数学模型参见文献[8]。在此主要针对现有设计工况下, 如何使毛细管结构在冰箱中的位置更加合理, 以及对在不同工况下运行时毛细管内部的流动特性的研究。选定以下 3 种变化工况进行计算分析: (1) 在标准工况下, 改变冷凝器的冷凝温度; (2) 在标准工况下, 改变蒸发器的蒸发温度; (3) 在标准工况下, 改变毛细管的相对位置, 但是保持回热段毛细管不变。

图 2、图 3 分别给出了在不同冷凝温度工况下, 冰箱毛细管中制冷剂流动的温度和压力沿毛细管长度方向的分布情况。从图中可以看出, 冷凝温度的降低对毛细管温度及压力变化没有明显的影响, 但是对毛细管长度影响较大, 随着冷凝温度的降低, 计算毛细管长度明显变长。这是由于在毛细管内部主要是由于摩擦阻力导致温度和压力的下降, 冷凝温度的降低并不影响摩擦阻力的大小, 因此管内温度、压力的变化不受影响。但是由于毛细管进出口的温差(压差)发生了改变, 因此计算总长必然受到影响。

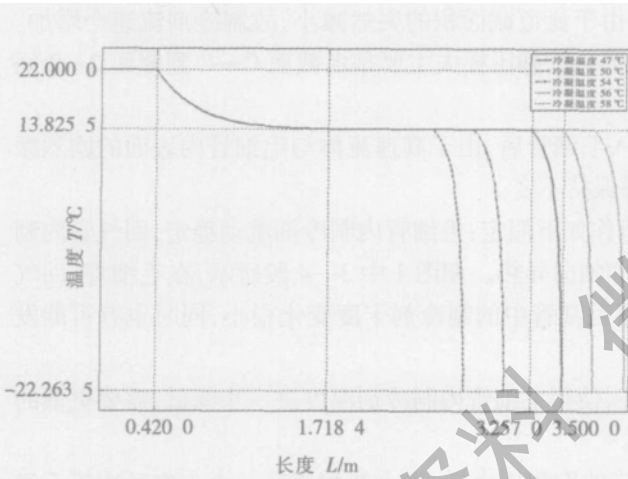


图 2 不同冷凝温度下制冷剂温度图

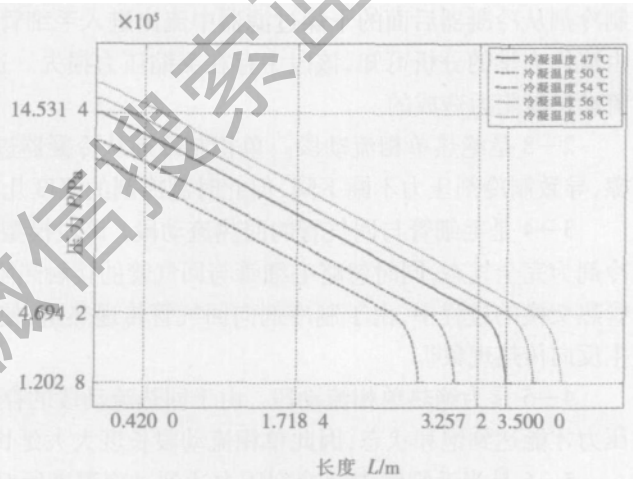


图 3 不同冷凝温度下制冷剂压力图

图 4、图 5 和图 6 分别给出了在不同蒸发温度下, 冰箱毛细管中制冷剂流动的压力、温度和干度沿毛细管长度方向的分布情况。从图中可以看出, 蒸发温度的变化对毛细管长度、温度及压力变化没有明显的影响, 但是对毛细管干度影响较大, 随着蒸发温度的降低, 计算毛细管出口处干度变大。表 1 列出了计算结果。从表中可以看出: 与冷凝温度改变时相比, 毛细管进口突缩段变化相似, 而出口突扩段变化却有所不同。这是由于蒸发温度的改变引起出口干度变化的结果。但是由于出口干度变化不大, 因此这一变化也并不明显。从中可以看出, 制冷剂在毛细管出口达到阻塞流状态后, 整个计算长度已经不受毛细管背压的影响, 但是背压的降低也加大了毛细管出口“跳空压差”, 从而加剧了毛细管出口的不稳定性。

图 7、图 8 分别给出了当加长(2—3)段后, 冰箱毛细管中制冷剂流动的温度和压力沿毛细管长度方向的分布情况。从中可以看出: (1) 增加(2—3)段长度对毛细管压力、温度以及两相流长度没有明显

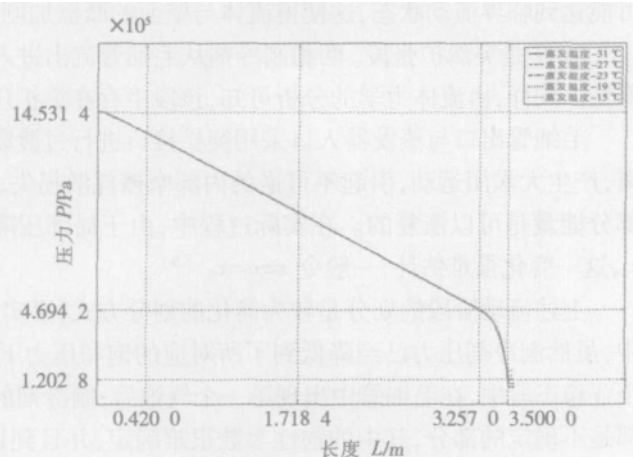


图 4 不同蒸发温度时制冷剂压力图

影响;(2) 随着(2—3)段长度的增加,计算毛细管总长相应有所增加,但增幅并不明显(从模拟的结果看,2—3段长度从0.36 m增加到1.56 m时,计算总长增加了0.11 m)。这是由于在回热段内毛细管中制冷剂的状态是单相液态,因此即使相对位置有所改变,但是管内的摩擦状况并没有很大的差别,因此回热段布置在毛细管的不同部位对管内制冷剂的流动状态没有起决定性的作用(前提是回热段内制冷剂为单相流状态)。

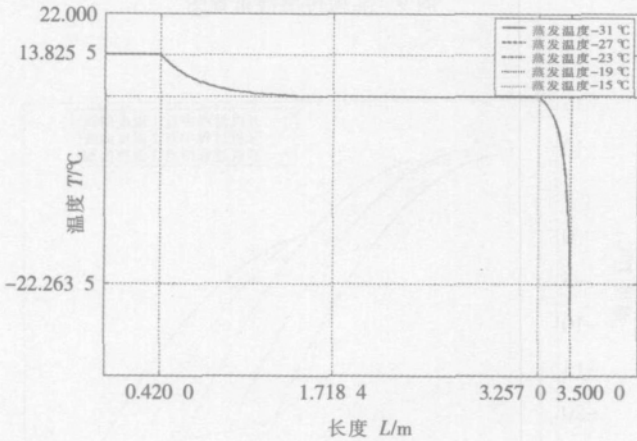


图5 不同蒸发温度时制冷剂温度图

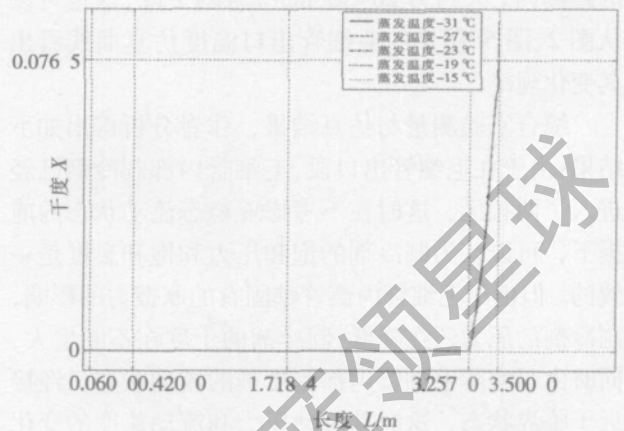


图6 不同蒸发温度时制冷剂干度图

表1 不同蒸发温度时计算结果

蒸发温度 /°C	4—5段毛细管长度/m	毛细管总长度/m	毛细管出口干度	突缩段静压降/Pa	突缩段摩擦压降/Pa	突扩段静压升/Pa	突扩段摩擦压降/Pa
-31	1.538 8	3.506 6	0.086 68	400	67.793	16	795.40
-27	1.538 8	3.500 4	0.081 38	400	67.793	20	656.00
-23	1.538 8	3.498 4	0.076 50	400	67.793	10	555.83
-19	1.538 8	3.495 5	0.072 45	400	67.793	10	485.69

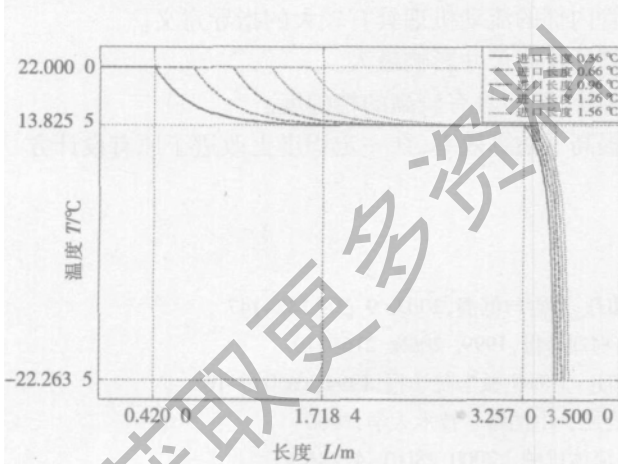


图7 改变(2—3)段长度制冷剂温度图

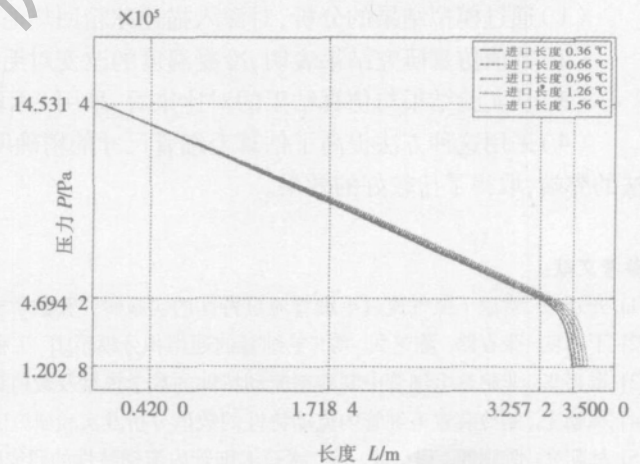


图8 改变(2—3)段长度制冷剂压力图

4 初步实验结果

针对模型仿真结果,作者做了相关实验加以验证。实验所选取的样机相关参数尽量与计算模型一致。实验传感器布置如图9所示。实验分别测量了3个布置点在冰箱稳定运行以后(经过了24 h以上的开停机稳定运行)一个开机期间温度的变化过程。

图10为实际冰箱制冷系统毛细管的出口部位的温度测量分布曲线。其中虚线部分给出了3个点在一个开机期间温度随时间的变化曲线;实线部分为开机过程的不同时刻制冷剂在流经毛细管出口段时的温降情

况:(1) 从图 10 中 3 条虚线可以看出,随着开机时间的不断延长,系统运行稳定后 3 个点的温度都呈下降趋势;(2) 从图 10 中几条实线可以看出,毛细管出口段由于制冷剂进入两相流状态,温度在很短的距离内(大约为 20~30 mm)急剧下降,这也可以从图 2、图 5、图 7 的毛细管出口温度仿真曲线看出其变化规律。

综合实验测量与仿真结果,作者分析得出如下结果:由于在毛细管出口段,毛细管内部制冷剂已经进入了两相区,这时在不考虑亚稳态流动状态的前提下,可以认为制冷剂的饱和压力和饱和温度是一致的。但由于毛细管内部管壁固有的摩擦力的影响,制冷剂的压力还在降低,制冷剂的干度在不断增大,同时由于实际毛细管内部制冷剂的流动状态已经接近于临界状态,这时其流动压力和流动速度的变化均非常剧烈。这些因素都会造成制冷剂的温度和制冷剂压力在很短的距离内急剧降低,同时这时制冷剂的压力仍然高于蒸发器中的制冷剂实际蒸发压力,造成了毛细管出口流动状态的极不稳定,加剧毛细管出口部位的振动,产生附加的噪声。

5 结 论

对冰箱回热毛细管的“六段流阻”模型进行了较详细的理论描述,并对其进行了 3 种工况下的数值仿真研究和初步的实验验证,得出一些结论:

- (1) 通过模拟结果的分析,对深入描述冰箱回热毛细管内部的流动机理具有较大的指导意义。
- (2) 数值仿真研究结果表明,冷凝温度的改变对毛细管的长度尺寸影响最大。
- (3) 从实验结果与仿真结果的对比来看,采用“六段流阻”模型具有较高的精确度。
- (4) 采用这种方法提高了估算毛细管尺寸的精确度,提高了估算效率,在一定程度上改进了原有设计方法的弊端,取得了比较好的效果。

参考文献:

- [1] 齐延峰. 常温下氮气流过毛细管流量特性的实验研究和数学模拟[J]. 真空与低温, 2003, 9 (3): 142~147.
- [2] 丁国良, 张春路, 陈芝久, 等. 毛细管的通用积分模型[J]. 工程热物理学报, 1999, 20(2): 216~219.
- [3] 崔兴华. 非绝热毛细管中制冷剂流动特性的数学模型及数值计算[J]. 上海机械学院学报, 1994, 16(4): 9~16.
- [4] 林朝光. 制冷装置毛细管内流动特性的数值分析及实验研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2000
- [5] 林朝光, 陈则韶, 程文龙, 等. 冰箱毛细管内流动特性的研究[J]. 流体机械, 2000, 28(10): 42~46.
- [6] BANSAL P K, WANG G. Reverse heat transfer and re-condensation phenomena in non-adiabatic capillary tubes[J]. Applied Thermal Engineering, 2005, 25:3187~3202.
- [7] BANSAL P K, WANG G. Numerical analysis of choked refrigerant flow in adiabatic capillary tubes[J]. Applied Thermal Engineering, 2004, 24: 851~863
- [8] 刘益才, 杨智辉. 冰箱回热毛细管的计算模型[J]. 华中科技大学学报, 2006, 35(3): 56~62.
- [9] 徐济黎. 沸腾传热和气液两相流[M]. 北京: 原子能出版社, 2001.

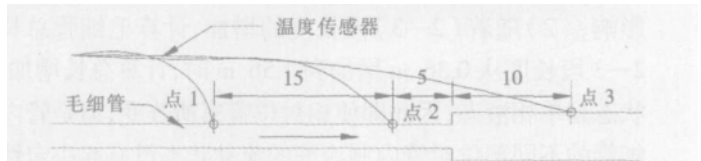


图 9 实验传感器布置图

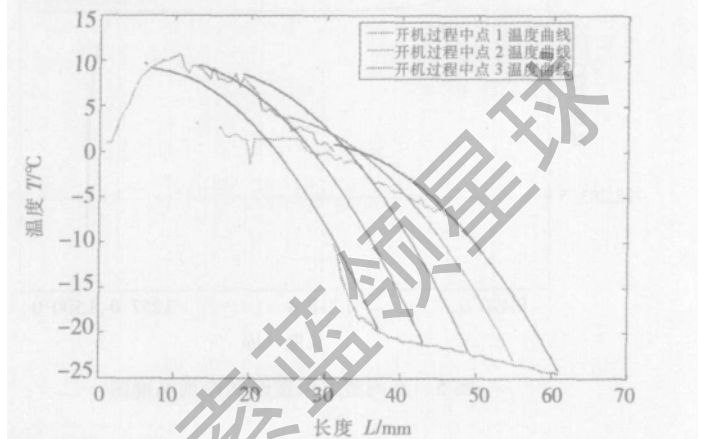


图 10 毛细管出口段实验温度曲线