

混合工质在制冷机节流元件毛细管中的流动特性^{*}

齐延峰 公茂琼 孙兆虎 罗二仓 吴剑峰

(中国科学院理化技术研究所制冷与低温研究中心)

齐延峰等.混合工质在制冷机节流元件毛细管中的流动特性.天然气工业,2004;24(12):139~141

摘要 可用于天然气液化的深冷多元混合工质节流制冷技术由于其固有的优点以及其制冷温区跨度大的特点,近年来得到了前所未有的重视和发展。随着这项技术的不断成熟,对混合工质在深冷制冷机节流元件内的流动特性的研究也显得日益重要。纵观现有的众多节流毛细管的研究文献,内容主要涉及普冷工质的流动特性,而且其中大多采用的是均相模型。而深冷多元混合工质由于其本身的特点,与普冷工质有着很大的不同。为此,文章旨在研究混合工质在毛细管内的流量特性,尝试使用了分相流动模型来计算深冷多元混合工质在绝热毛细管中的流量特性,建立了深冷混合制冷剂在毛细管中流动的控制方程,并依此编制了计算程序;同时搭建了深冷混合工质在绝热毛细管中流动特性实验台,进行了深冷多元混合工质在绝热毛细管中的流动特性实验研究。理论计算结果与实验结果符合度较好,其偏差均在10%以内,基本满足了工程上的需要;另外还讨论了毛细管结构参数以及混合工质配比等关键特征参数对制冷剂流量的影响。

主题词 天然气液化 深冷多元混合工质 制冷机 阻流器 毛细管 流动模型 流动特性

一、引言

毛细管是小型制冷装置的常见节流部件,它的几何特性将直接影响到制冷系统的性能。众多学者对制冷剂在毛细管中的流动进行了详尽的研究,但纵观其研究成果^[1,2],内容主要集中在普冷工质领域,而且大部分都采用了均相模型的假设。均相模型将气液两相看成为均匀混合而成为“一相”,但在实际情况中,气相的速度显然比液相大,因而均相模型会带来较大误差,只能在一定范围内对制冷系统设计起到参考作用。

最近十几年来,深冷多元混合工质节流制冷机的研究得到了迅速发展,通过充配不同工质可以实现不同的制冷温度(80~230 K),故在LNG工业、低温生物材料储存、红外器件冷却等领域得到了广泛应用。同时由于该种制冷机可以采用普冷领域广泛应用的油润滑压缩机驱动,降低了生产成本、提高了可靠性;同时深冷混合工质节流制冷机具有低温端无运动部件、结构形式简单、易于集成等优点,成为低温乃至普冷领域一个热点研究课题^[3,4]。

相对于普冷领域广泛应用的纯工质或近共沸混

合工质而言,深冷多元混合工质具有不同的特征:深冷混合工质相变温区大,其泡露点温度可以相差几十K到100K以上;物性变化剧烈,尤其是在两相区;流形变化复杂等。到目前为止,很少见到有关多元混合工质在毛细管内流动特性研究内容的公开报道。在此,笔者首先建立了深冷多元混合工质的分相流动方程,同时编制相应计算程序,对多元混合工质在毛细管内的流动特性进行了模拟计算;同时建立了在真实混合工质节流制冷机基础上的多元混合工质在毛细管中流动特性实验台;进而利用分相计算模型考察了毛细管结构参数以及混合工质配比等关键特征参数对制冷剂流量的影响。

二、理论模型

1. 控制方程

分相流动模型是将气、液两相都当作连续流体来处理,并考虑了两相之间的相互作用,需要分别对气、液两相列出方程。此外,制冷剂的状态方程(pR 方程)决定制冷剂所处的状态。在模型中,不管是几种制冷工质,或处于哪个区域,都遵守这些方程及第二热力学方程。同时针对混合工质在毛细管内的流

^{*} 本成果为国家自然科学基金资助项目(No. 50206024)。

作者简介: 齐延峰,1977年生,博士,研究方向是多元混合工质制冷机节流系统的理论和实验研究。地址:(100080)北京中关村北一条2711号信箱。电话:(010)62534065。E-mail: qiyanfeng@163.com

动,有以下几个合理的假设,可以不失真地简化问题:①毛细管截面尺寸沿管长方向不变;②忽略重力的影响;③毛细管内流动为一维定常绝热稳定流动;④两相区域内均达到热力平衡和相平衡。于是,连续方程、动量方程、能量方程和制冷剂状态方程分别为:

$$M = \text{const} \quad (1)$$

$$\frac{dp}{dz} = \left(\frac{dp}{dz} \right)_{fr} + \left(\frac{dp}{dz} \right)_a \quad (2)$$

$$\frac{d}{dz} \left[\left((1-x) \left(h_L + \frac{V_L^2}{2} \right) \right) + \left(x \left(h_G + \frac{V_G^2}{2} \right) \right) \right] = 0 \quad (3)$$

$$p = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v(v+b) + b(v-b)} \quad (4)$$

制冷剂在绝热毛细管内的流动是一个由于降压而自蒸发的由单相液体到气液两相的复杂的流动过程,整个过程主要由两个区域组成:过冷区和两相区。在此重点讨论两相区。

2. 气液两相区

对于混合工质,处于气液两相状态时,其混合物的物性参数例如焓和比容等都是压力和温度的参数,同时引入以下几个参数:等压热膨胀系数、等温热膨胀系数、等压比热、Joule-Thomson 系数,利用一定的微分关系,整理动量方程(2)和能量方程(3),可得

$$\frac{dp}{dz} A + \frac{dT}{dz} B = 0 \quad (5)$$

$$\frac{dp}{dz} C + \frac{dT}{dz} D - \left(\frac{dp}{dz} \right)_{fr} = 0 \quad (6)$$

式中:系数 A、B、C 和 D 均可表示为上述几个参数的函数(表达式复杂,在此不再列出),由制冷剂的压力和温度就可以相应算出。

3. 两相区摩擦因子^[6]

方程(6)中摩擦压降梯度 $(dp/dz)_{fr}$ 可由下式计算

$$\left(\frac{dp}{dz} \right)_{fr} = \left(\frac{dp}{dz} \right)_{fr,L} \varphi^2 \quad (7)$$

式中:全液相摩擦阻压降梯度 $(dp/dz)_{fr,L}$ 表示液相质量流量与两相流总质量流量相同时的压降; φ^2 表示全液相折算系数,可通过实验数据的整理而得到^[6]。

4. 气液滑动比

滑动比是气相与液相的速度之比,关于这方面的实验数据较少,故笔者选用了 Zivi 公式^[6]:

$$S = (\rho/\rho')^{1/3} \quad (8)$$

5. 计算程序的编写

计算程序以 1 mm 长的控制容积为计算单元,采用四阶龙格—库塔法计算。分别编写了 2 个程序。第一个程序已知条件是毛细管的内径、混合工质的组成、制冷剂的质量流量和入口状态,计算结果为毛细管的长度和出口温度;另一个程序已知条件为毛细管的长度和内径、混合工质的组成和入口状态,计算结果为制冷剂流量。

三、理论模拟计算结果的实验验证

1. 实验装置^[7]

制冷单元实物图见本期彩色插页(彩页图 7)。实验系统是建立在一套真正的深冷多元混合工质节流制冷机的基础上的,主要包括两个部分:一是压缩机单元,包括一台商用的油润滑制冷压缩机,一台风冷后冷却器,以及一个油分离器用来分离从压缩机排气口出来的润滑油;另外一个单元就是放置于真空罩中的制冷器部分,主要包括一个管套管式逆流热交换器,节流元件毛细管和蒸发器。在毛细管延程布置了 20 个铜—康铜热电偶来测量温度,热电偶的精度为 ± 1 K。在压缩机吸气口处安装了一个精度为 1.5 级的浮子式流量计用来测量系统内制冷剂的流量。此外在毛细管的前后分别测量相应的压力,采用的机械式压力表的精度为 0.25 级。混合工质的循环配比使用气相色谱仪在线测量。

2. 实验结果与理论对比分析

为了证实所建分相模型的可靠性,笔者将数值模拟的结果与实验数据进行了对比。实验温区是 120 K。其计算结果为毛细管长度是 1.609 m,相对偏差是 7%。图 1 是计算得出的毛细管延程温度分布与实验的对比,其中最大的偏差约为 4%。由此可以认为,这个模型较好地反映了毛细管中的实际流

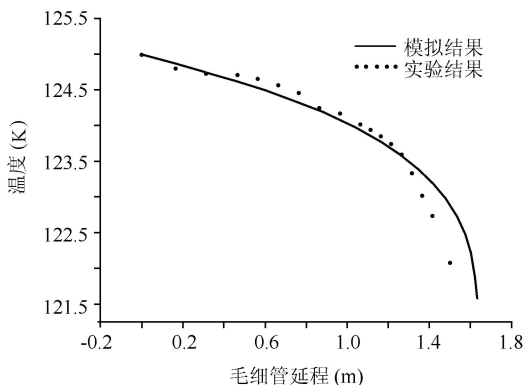


图 1 温度模拟与实验的对比图

动,也完全符合工程的精度需要。同时也对制冷剂流量的计算程序进行了验证,误差范围在8%以内。

四、深冷混合工质在绝热毛细管中流动特征参数变化趋势

在整个制冷循环过程中,节流元件起到了非常重要的作用,循环工质的降温过程主要是在节流元件中实现的,同时节流元件也是调节整套系统平衡的主要元件。因此节流元件的选择对整套制冷系统起着十分重要的作用。对于毛细管来说,其结构参数(长度和内径)直接影响着制冷循环的流量;同时对于多元混合工质来说,混合物的组成配比也对流量有影响,下面就对这些参数的影响进行分析。

首先讨论毛细管内径对流量的影响。采用一种五元混合工质,工况是毛细管入口压力为1.8 MPa,出口压力为0.5 MPa,入口温度为130 K。毛细管长度选为1 m,内径分别选取为1 mm、1.2 mm、1.5 mm和1.8 mm,计算得出的流量分别为1390、1700、2140、2570 kg/m²·s。可见毛细管的内径在相同的工况条件下对制冷剂的流量有着很大的影响。

另外,毛细管长度也同样对制冷剂流量有较大的影响。采用同样的混合工质,同样的工况,毛细管的内径选为1.5 mm,长度分别选取为1.0 m、1.5 m、2.0 m和2.5 m,计算得出的流量分别为2140、1495、1140、915 kg/m²·s,可见制冷剂流量随着毛细管长度的增加而减小。

最后,为了考察混合工质的组成配比对毛细管流量的影响,以文献[8]中的三种不同的配比为算例,毛细管长度1.5 m,内径1.2 mm,工况与上述条件相同进行计算。计算表明,随着低沸点组元量的增加以及高沸点组元的减少,制冷剂流量变小。

五、结 论

为了考察深冷多元混合工质在绝热毛细管中的流动特性,笔者从基本方程出发建立了分相模型来模拟混合工质在节流元件毛细管中的流动情况,另

外搭建了深冷多元混合工质在绝热毛细管中的流动特性实验台。通过实验,对理论计算模型进行了对比,其结果偏差在10%以内。同时,考察了毛细管特征参数的变化趋势。这些工作为深冷多元混合工质节流制冷机的工业化奠定了基础。深冷制冷机的温区覆盖范围广,相信会在LNG工业及其他相关领域取得其相应的地位。

参 考 文 献

- 1 Roert Rittle, Michael B Pate. A theoretical model for predicting adiabatic capillary tube performance with alternative refrigerants. ASHRAE Transactions, 1996; 102 (Part 2); 4—52
- 2 Escanes F *et al*. Numerical simulation of capillary-tube expansion devices. International Journal of Refrigeration, 1995; 8(2); 13—22
- 3 Boiarski M *et al*. Modern trends in designing small-scale throttle-cycle coolers operating with mixed refrigerants. Cryocooler, 2001; 11; 513—533
- 4 Luo E C, Gong M Q *et al*. The research and development of cryogenic mixed-refrigerant Joule-Thomson cryocoolers in CL/CAS. Adv Cryogenic Eng, 2000; 45; 299—06
- 5 Koizumi H, Yokoyama K. Characteristics of refrigerant flow in a capillary tube. ASHRAE Transactions, 1980; 86 (Part 2) (2586); 7—19
- 6 陈之航, 曹柏林, 赵在三. 气液双相流动和传热. 北京: 机械工业出版社, 1983
- 7 Qi Y F, Cao Y *et al*. Experimental study on the adiabatic capillary tube expansion device in mixed-refrigerant J-T cryocooler. Proceedings of ICEC 19, Grenoble, France, 2002; 339—342
- 8 Gong M Q, Luo E C *et al*. On the temperature distribution in the counter flow heat exchanger with multicomponent non-azeotropic mixtures. Cryogenics, 2002; 42; 795—804

(修改回稿日期 2004-10-12 编辑 居维清)