

文章编号:1000-582X(2003)01-0126-04

HC600a 含油混合物水平微肋管内冷凝换热特性试验

龙建佑¹, 童明伟², 陈礼¹

(1. 顺德职业技术学院, 广东 顺德 528300; 2. 重庆大学 动力工程学院, 重庆 400044)

摘要:实验研究了环保替代制冷工质 HC600a 和润滑油 Suniso 3GS 的混合物在水平微肋管内的冷凝换热特性,探索了含油率、饱和压力和质量流量对冷凝换热的影响。根据实验结果拟合的冷凝换热关系式较好地反映了该工质的换热特性。通过与其它工质的比较,可以得出结论:制冷工质 HC600 不但对臭氧层无破坏作用,而且传热特性优于 CFC12 及 HCFC134a,是一种很有前途的替代制冷工质。

关键词:HC600a; 冷凝平均换热系数; 含油率; 质量流量

中图分类号:TS124

文献标识码:A

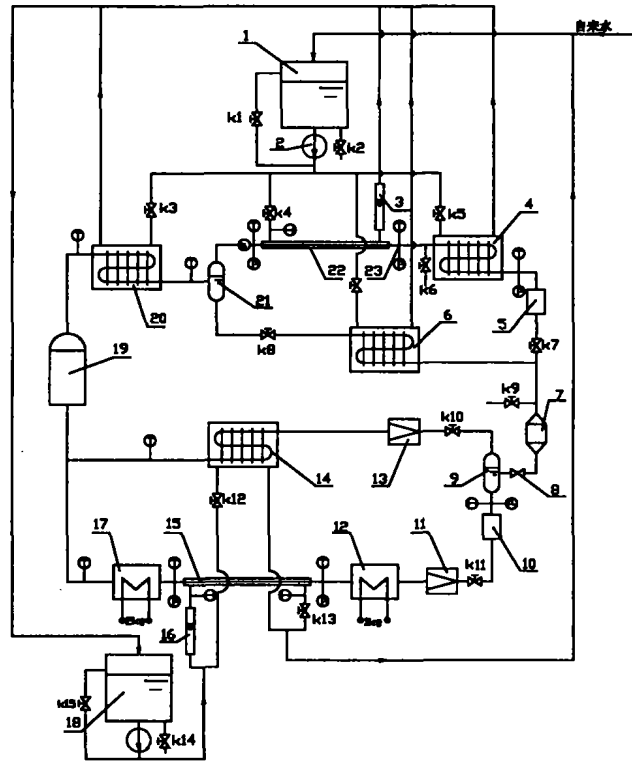
研究表明最常用的制冷剂 CFC 及哈龙类物质是破坏臭氧层的元凶^[1]。自 1974 年科学家莫利纳 (M.J. Molina) 和罗兰 (F.S. Rowland) 教授发表臭氧层遭破坏的论文后,保护臭氧层已成为环境保护的主要任务之一^[2]。R12 的替代制冷剂主要是 R134a 和 R600a^[3]。目前, R600a 方案在我国已得到迅速的推广。然而,在公开发表的文献中,关于 R600a 在管内冷凝过程的换热特性的研究还很少,特别是 R600a 含油情况下的凝结换热特性的研究还没有看到相关报道,而这些数据又是制冷系统设计和运行测试的重要依据,因此笔者对新型环保工质 R600a 含油情况下在微肋管内凝结过程的换热特性进行系统的实验研究分析。

1 实验设备和方法

图 1 给出了实验装置的示意图。该实验装置包括一个制冷剂循环系统,一个蒸发水系统,一个冷凝水系统和一个数据采集系统。制冷剂系统中循环有 R600a 和油的混合物。

为了达到制冷剂系统中实验段的设定温度,需控制循环水的温度及制冷剂系统的总流量;通过汽液分离器及控制进入预冷器的水流量,来使冷凝试验段入口处质量含汽率达到 1。

冷凝测试段为一水平套管冷凝器,有效长度为 3.0 m。内管为微肋铜管,其外径为 12.7 mm,最大内径 11.44 mm,肋高 0.25 mm,肋宽 0.25 mm,螺旋角 20°,肋数为 60。外



1. 冷凝水箱; 2. 水泵; 3. 水流量计; 4. 再冷器; 5. 工质流量计; 6. 辅助冷凝器; 7. 干燥过滤器; 8. 电磁阀; 9. 汽液分离器; 10. 工质流量计; 11. 膨胀阀; 12. 预加热器; 13. 膨胀阀; 14. 辅助蒸发器; 15. 蒸发试验段; 16. 水流量计; 17. 再热器; 18. 蒸发水箱; 19. 压缩机; 20. 预冷器; 21. 汽液分离器; 22. 冷凝试验段; 23. 测试点; K1 - K15 为阀门; K9 为取样阀; T 温度测点; P 压力测点; S 观察窗;

图 1 试验设计示意图

• 收稿日期:2002-08-23

作者简介:龙建佑(1974-),男,重庆大足人,广东顺德职业技术学院助教,重庆大学硕士研究生。主要从事制冷技术的研究。

套管是一光滑铜管,其内径为 19 mm。

润滑油的取样。首先,用已抽过真空的取样罐从制冷剂回路的取样阀处取出正在循环的制冷剂、油混合物;之后,将取样罐中的制冷剂通过过滤器缓慢放出,使得放出的制冷剂带有的润滑油全部留在过滤器上;放完后,将取样罐抽真空,从而去除残留在润滑油中的制冷剂。由空取样罐及过滤器系统的重量,取样后系统的总重和放尽制冷剂后系统的重量,就可以算出制冷剂含油混合物中油的浓度。整个称重过程是用一个精度为 0.1 g(满量程 3 kg)的电子称进行的。

温度的测量包括工质温度和冷凝水温度的测量。这些温度都采用 $\Phi 0.2$ mm 的铜-康铜热电偶作为温度传感器。对于用于系统调试观察的温度,精度要求不太高,实验中采取把热电偶敷设在管壁上,并用在外包保温材料的方法进行测量;而对于实验段中温度的测量,精度要求较高,均采用自制套管式热电偶进行测温,将套管暴露于流体中,尽量使热电偶的感温头处于管道的中心轴线上,并在管壁外铺设保温材料。图 2 表示了这两种测温方法。

热电偶所得温度信号直接通过研发工控生产的型号为 Adas-4018 A/D 转换模块输入计算机,得到相应的温度值。在测温前,每个热电偶及输出温度都用冰水混合物进行了标定,其测温误差为 ± 0.15 K。

试验段入口工质压力及工质流量计处压力均采用 MC-01000127 型精密压力表测量,其量程范围是 0~2.5 MPa,精度等级为 0.25 级,绝对误差小于 6.25 kPa。

试验段差压的测量采用 STCC-5500DP 型差压变送器进行测量,并配有数字表头进行读数,其量程为 0~50

kPa,精度等级为 0.25 级,测量绝对误差小于 125 Pa。

工质流量和冷凝水流量的测量则采用玻璃转子流量计进行测量。该流量计的刻度也是以一个标准大气压下,20 °C 的水标定的。进行计算时,根据试验的具体条件,按使用说明上提供的流量修正公式进行了修正。

2 实验结果及分析

选取了 3 组不同含油率,不同冷凝温度,在质量流率为 50~180 之间进行了多组 R600a-oil(Suniso 3Gs) 的详细资料可参见文献[4])混合物微肋管内的凝结换热实验,得到冷凝平均换热系数实验数据点 70 多个。图 3 到图 5 分别给出了油的质量含量分别为 1.81%, 3.68%, 5.54% 时,不同冷凝温度下混合物冷凝平均换热系数随质量流率的变化关系。图 6 到图 8 分别给出了冷凝温度为 36 °C、39 °C、42 °C 下,不同含油率下,冷凝平均换热系数随质量流率的变化关系。

从图 3~图 8 中可以清楚地看到以下规律,图中 h_i ——换热系数 $W/(m^2 \cdot K)$; G ——质量流率 $kg/(m^2 \cdot s)$; ω ——含油率 %。

1) 随着质量流率的增加,冷凝平均换热系数增加。例如在质量含油率为 1.81%, 冷凝温度 36 °C 时,质量流率约为 74 及 156 时,冷凝平均换热系数分别为 3.18, 4.48。

对于水平管内的凝结,凝结液膜受到重力和蒸汽剪切力的共同作用,在大的质量流率下,蒸汽流对液膜表面产生明显的粘滞应力,拉薄凝结液膜,使得凝结换热系数增大,冷凝平均换热系数随质量流率的增加而增大。

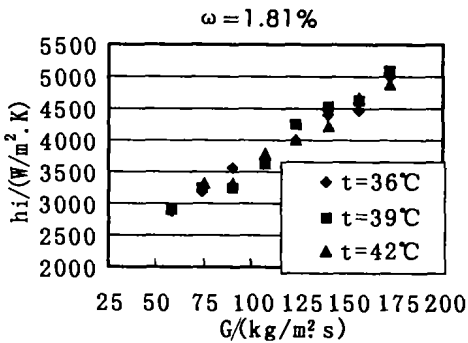


图 3 含油率 1.81% 时不同温度下冷凝平均换热系数随质量流率的变化

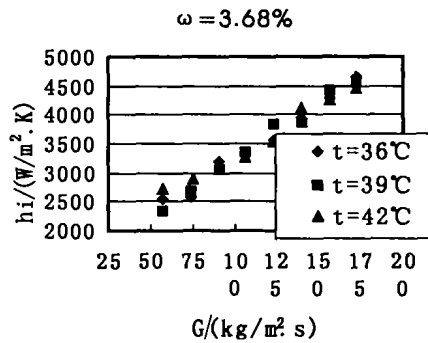


图 4 含油率 3.68% 时不同温度下冷凝平均换热系数随质量流率的变化

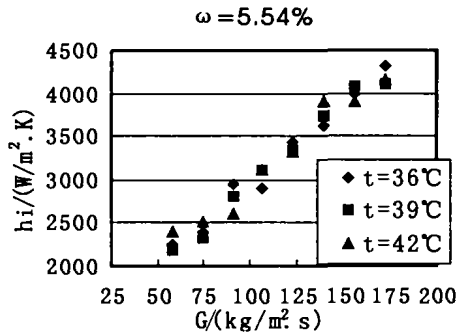


图5 含油率5.54%时不同温度下冷凝平均换热系数随质量流率的变化

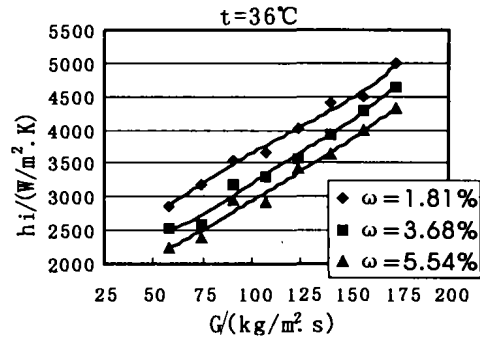


图6 36℃时不同含油率下冷凝平均换热系数随质量流率的变化

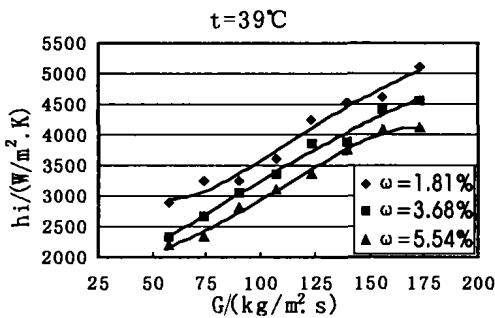


图7 39℃时不同含油率下冷凝平均换热系数随质量流率的变化

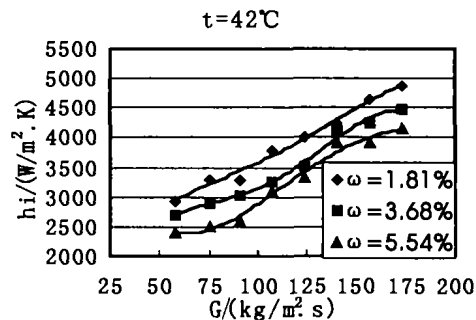


图8 42℃时不同含油率下冷凝平均换热系数随质量流率的变化

2)同一含油率下,冷凝温度对平均换热系数几乎没有影响。例如在质量含油率为1.81%,质量流率约为74,冷凝温度36℃、39℃、42℃时,冷凝平均换热系数分别为3.18 kW/(m²·k),3.24 kW/(m²·k),3.30 kW/(m²·k)。

3)不同含油率下,冷凝平均换热系数随着质量含油率的增加而降低。例如冷凝温度为36℃,制冷剂含油混合物质量流率为123 kW/(m²·s),含油率为1.81%及5.54%时冷凝平均换热系数分别为4.0 kW/(m²·k),3.4 kW/(m²·k)。含油率为5.54%时不同质量流率下的冷凝平均换热系数约比1.81%时降低10%~30%。

由于润滑油的加入,使得凝结液膜的粘度增加,而根据凝结过程的理论分析,粘度的增加会使凝结换热系数减小。再者,润滑油的导热系数较差,随着含油率的增加,凝结液膜中油的含量增加,从而使得凝结液膜的导热系数减小,最后导致冷凝平均换热系数减小。反映在关系式上是用一个负指数系数的形式来表示润滑油对冷凝换热系数的影响(参见文献[5])。

把实验数据经过回归分析得到准则关系式可以为工程设计提供可靠的依据。大量的文献资料显示,预测冷凝换热的方法主要有3类:两相乘子法(two-phase multiplier approaches),剪切法(shear-based approaches)和边界层法(boundary layer-based

approaches)。3种方法中又以两相乘子法最简单,其理论假设是:两相流的传热过程与液体单相流动相类似。因此,对两相流传热的预测只需要简单地用一个未知的参数去乘上单相对流传热关系式就行了。Dobson和Chao曾分析指出^[6]:此法与Traviss等基于剪切力或边界层分析得到的Nu数的分析模型存在等价性。本实验中,实验管壁面有微肋,无法分析壁面剪切力,故采用两相乘子法分析,关系式如下:

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{1/3} \Phi(X_{tt}) e^{C\omega}$$

$\Phi(X_{tt})$ 称为两相乘子,它是Lockhart-Martinelli参数 X_{tt} 的函数, X_{tt} 的表达式为: $X_{tt} = (\rho_v/\rho_l)^{0.5} (\mu_l/\mu_v)^{0.1} [(1-x)/x]^{0.9}$

不同的研究者在整理自己的关系式时,选取了不同的 $\Phi(X_{tt})$ 。通过分析比较,本文则采用如下函数形式: $\varphi(X_{tt}) = C_1 (1/X_{tt})^{C_2}$

使用实验得到的所有数据进行回归分析,得到如下结果:

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{1/3} \times 1.99 \times (1/X_{tt})^{0.478} \times e^{-5.29\omega} (Re = 7.2 \times 10^3 \sim 2.2 \times 10^4)$$

实验数据与经验关系式比较(如图9),全部实验数据的分散度在±15%以内。

1998 年 Gursaran D. Mathur^[7] 对 R - 290 管内换热系数进行计算, 并和 R - 12, R - 134a 管内凝结换热系

数做了比较, 结果如图 10。

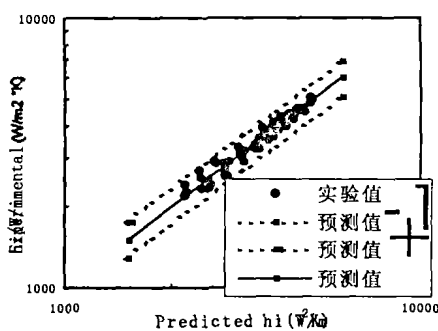


图 9 实验数据与经验关系式比较

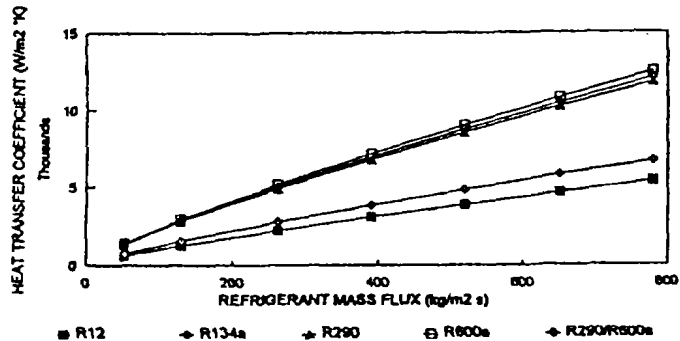


图 10 37.8°C 冷凝平均换热系数随制冷剂质量流率的变化

计算时所取的冷凝温度为 37.8 °C, 所设想的管径外径为 9.53 mm, 壁厚为 0.64 mm, 质量流率范围为 50 ~ 800 kg/m²s, 计算结果发现碳氢化合物的冷凝换热系数比 R - 12, R - 134a 高的多, 平均冷凝换热系数比 R - 12 高 220% ~ 233%, 比 R - 134a 高 177% ~ 187%。故 HC600a 传热特性优于 CFC12 及 HCFC134a, 是一种很有前途的替代制冷剂。

3 结论

通过 HC600a 含油 (Suniso 3GS) 混合物实验研究, 给出该混合物在 3 种含油率下, 3 种饱和压力下, 其冷凝换热系数随质量流量的关系曲线, 并拟合经验关系式。结果表明:

- 1) 随着质量流率的增加, 冷凝平均换热系数增加;
- 2) 同一含油率下, 冷凝温度对平均换热系数几乎没有影响;
- 3) 不同含油率下, 冷凝平均换热系数随着质量含油率的增加而降低;
- 4) 在实验条件下, Nu 的准则关系式为:

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{1/3} \times 1.99 \times (1/Xtu)^{0.478} \times e^{-5.29\omega}$$

该式适用于 $Re = 7.2 \times 10^3 \sim 2.2 \times 10^4$ 。计算值与实验数据的平均偏差在 $\pm 15\%$ 。

5) HC600a 传热特性优于 CFC12 及 HCFC134a, 是一种很有前途的替代制冷剂。

参考文献:

- [1] 徐雄冠. 制冷剂回顾及展望[J]. 暖通空调, 1996, 12(2): 13 - 16.
- [2] 吴铭哲. 制冷空调用制冷技术[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [3] 杨家骅, 周贻博. 电冰箱发泡剂制冷剂替代技术的发展与比较[J]. 家用电器科技, 1998, (1): 4 - 7.
- [4] FRIGI - TECH International. www.frigid.tech.com/spec - sheet
- [5] TCHY J A, MACKEN N A, DURAL W M B. An experimental investigation of heat transfer in forced convection of oil - refrigerant mixtures[J]. ASHRAE Trans., 1985, 91: 297 - 308.
- [6] DOBSON M K, CJATP J C. Condensation in smooth horizontal tubes[J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1998, 120: 193 - 213.
- [7] GURSARAN D, MATHUR PH D P E. Heat Transfer Coefficients for Propane (R - 290), Isobutane (R - 600a), and 50/50 Mixture of Propane and Isobutane[J]. ASHRAE Trans., 1998, 104: 1159 - 1172.

An Experimental Investigation of Condensation Heat Transfer of HC600a - Oil Mixture in a Horizontal Micro - fin Tube

LONG Jian-you, TONG Ming-wei, CHEN Li

(Shunde Polytechnic College, Shunde 528300, China)

Abstract: Experimental study of condensation heat transfer of HC600a - oil mixture in a horizontal micro-fin tube is performed to investigate the influence of oil percentage, saturated pressure and mass flux on condensation heat transfer. The empirical correlation according to this study is well correlated by the experimental data. By comparing with other refrigerants, HC600a has no influence on ozone depletion and better heat transfer characteristics than CFC12 and HCFC134a. It is a promising substitute for CFC12.

Key words: HC600a; mean condensation heat transfer coefficient; oil concentration; refrigerant mass flux

(责任编辑 陈移峰)