

# R404A 在低导热系数管外凝结传热的实验研究

赵创要 冀文涛 陶文铨

(西安交通大学动力工程多相流国家实验室, 能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要** 强化管材质的导热系数对膜状凝结传热过程具有重要的影响, 本文通过实验对比了铝黄铜和白铜两种材料制成的三维高效管和低肋管的凝结传热特性。结果表明对于同种材质的强化管, 三维高效管比低肋管强化效果好; 当强化管类型相同时, 较低导热系数管冷凝管传热系数较低, 即铝黄铜的凝结传热强化效果优于白铜。

**关键词** R404A; 低导热系数; 凝结传热

**中图分类号** TK124

**文献标识码** A

**文章编号** 0253 231X(2014)01 0132 04

## Experimental Studies on Condensation Heat Transfer of R404A Outside Horizontal Low Thermal Conductivity Tubes

ZHAO Chuang-Yao JI Wen-Tao TAO Wen-Quan

(Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering of MOE, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract** The thermal conductivity of tube material has a significant effect on heat transfer coefficient of film condensation outside horizontal tube. Experimental studies of film condensation of R404A on single horizontal two- and three-dimensional finned tubes have been conducted. The results indicate that for the same tube material, the condensation heat transfer coefficient of R404A on three-dimensional finned tubes is larger than on two-dimensional finned tubes. And for the same surface structure, the lower thermal conductivity tubes obtain smaller condensation heat transfer coefficient.

**Key words** R404A; low thermal conductivity; condensation heat transfer

## 0 引言

为了提高换热设备的抗腐蚀性能, 往往采用铜合金管作为制冷系统的强化换热管。与纯铜管相比, 铜合金管的导热系数较低。对于相变换热这种比较剧烈的换热方式, 材料导热系数对换热管传热特性具有很大影响<sup>[1]</sup>。

Mitrou<sup>[2]</sup>研究了水蒸气在外螺纹铜管、铝管、铜镍合金管和不锈钢管外表面的凝结特性, 结果表明随着导热系数减小, 管壁热阻增大, 凝结传热系数随之减小。Mills等<sup>[3]</sup>和Shklover等<sup>[4]</sup>也得到了类似结果。强化管的最佳翅片间距随材料导热系数的改变而不同<sup>[5]</sup>。Koch等<sup>[6]</sup>运用数值方法研究了钢管和铜管材料对滴状凝结的影响, 作者假设了两种极端情况: 一是液滴之间完全没有液膜, 二是液滴之间完全被液膜覆盖。研究发现, 对于第二种情况, 当液膜很薄时, 材质导热系数只影响膜状凝结; 当液膜厚度较大时, 材质导热系数的影响可以忽略, 因为此时液膜的热阻比管壁的导热热阻大得多。Yun<sup>[7]</sup>

研究了小热流下管材对膜状凝结换热的影响。张定才等<sup>[8]</sup>对铜镍合金强化管外的凝结实验发现其换热系数只有铜管的约33%~42%。

本文采用R404A作为工质, 通过实验研究了铝黄铜(HAL77-2)和白铜(BFe30-1-1)强化管的凝结换热特性, 其中低肋管及三维高效管各两根, 分别由铝黄铜和白铜制成。

## 1 实验系统及方法

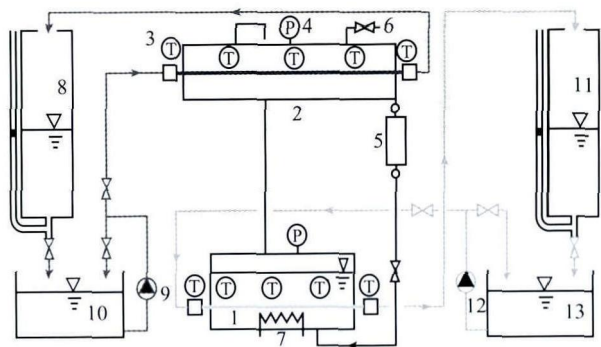
实验系统如图1所示, 整个系统由三个循环构成, 即制冷剂循环系统, 加热水和冷却水循环系统。蒸发器中的制冷剂被通有加热水的蒸发管加热后蒸发, 气态的制冷剂沿上升管进入冷凝器中, 再被通有冷却水的冷凝管冷却凝结成液态, 由重力作用沿下降管返回蒸发器。加热水和冷却水分别由水泵输送, 经由自制的称重式流量计, 再分别流经蒸发管和冷凝管, 最后返回储水箱。冷却水箱和加热水箱均配

收稿日期: 2013-01-15; 修订日期: 2013-12-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.51136004)和国家重点基础研究(973)项目(No.G2013CB228304)

作者简介: 赵创要(1983-), 男, 河南许昌人, 博士生, 主要从事相变强化传热研究; 通信作者: 陶文铨, 男, 教授, wqtao@mail.xjtu.edu.cn

有加热和冷却装置, 以使冷却水或加热水达到所需要的温度。



1. 蒸发器 2. 冷凝器 3. 热电偶 4. 压力表 5. 冷凝液量筒 6. 排气阀  
7. 辅助加热器 8. 流量计 9. 冷却水泵 10. 冷却水箱 11. 流量计  
12. 蒸发水泵 13. 蒸发水箱

图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

实验管进出口水温由自制铜-康铜热电偶测量, 进出口水温差由 6 对铜-康铜热电偶组成的热电堆测定。实验管进出口水温由自制铜-康铜热电偶测量, 进出口水温差由 6 对铜-康铜热电偶组成的热电堆测定。热电偶以及热电堆均由二等标准水银温度计标定。蒸发器和冷凝器内的温度由 A 级精度的铂电阻温度计监测。系统内压力与实验工况下的饱和压力对应, 它由量程为 2.5 MPa, 精度 0.25 级的

压力表测定。

铝黄铜管和白铜管的导热系数分别为  $104.7, 28.9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ <sup>[9]</sup>。为了保证所扣除的热阻计算的精度, 实验管采用光滑内表面管。为研究不同材料对强化结构的影响, 分别用每种材料制作了低肋管和三维高效管, 实验管的照片见图 2, 相关参数见表 1。

本文实验在饱和温度为  $30^\circ\text{C}$  或  $40^\circ\text{C}$  下进行, 相关热物性参数从文献 [10] 中查取。实验热流密度范围为  $20\sim 100 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

## 2 数据处理

### 2.1 总传热系数

总传热系数由式 (1) 获得:

$$k = \Phi / A_o \Delta t_m \quad (1)$$

式中,  $\Phi$  为热流量;  $A_o$  为实验管外表面面积,  $\Delta t_m$  为对数平均温差, 热流密度  $q = \Phi / A_o$ 。实验中确保各测点的蒸发与冷凝换热的热平衡偏差小于 5%, 以二者的平均数作为计算总传热系数的换热量。

### 2.2 管内对流传热系数

管内强制对流传热系数由 Wilson 热阻分离法分离得出<sup>[11]</sup>,  $h_i = c_i \cdot h_{ip}$ ,  $c_i$  为强化倍率, 即强化管与同管径的光滑管传热系数之比, 文中换热管内表面为光滑表面, 强化倍率为 1,  $h_{ip}$  为光管内水侧传热系数, 由 Gnielinski 公式<sup>[12]</sup>求得。这里, 无论内外有否强化换热系数的计算面积均为胚管的相应面积。

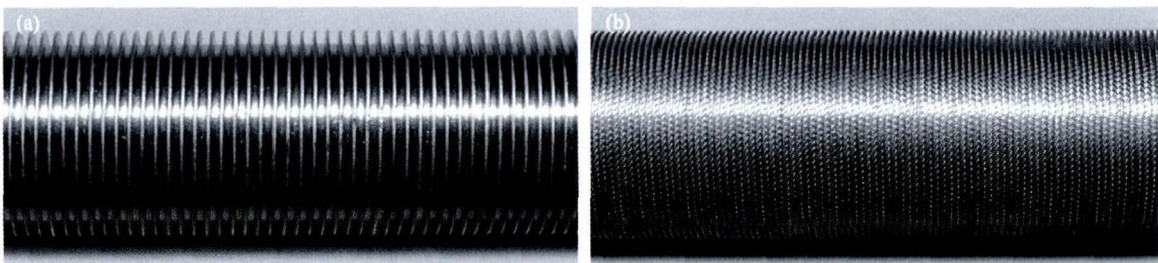


图 2 强化管照片 (a) 低肋管 (b) 三维高效管

Fig. 2 Photograph of enhanced tubes

表 1 传热管的相关参数

Table 1 Specifications of test tubes

编号	类型	材质	外径 $d_o/\text{mm}$	内径 $d_i/\text{mm}$	测试长度 $L/\text{mm}$
No.1	1	1	18.90	15.16	1450
No.2	1	2	18.93	16.48	1500
No.3	2	1	19.01	16.58	1471
No.4	2	2	19.07	16.59	1464

注: 1 表示三维高效管和铝黄铜, 2 表示低肋管和白铜。

### 2.3 管外表面传热系数

由热阻分离法式 (2) 分离出管外表面传热系数:

$$\frac{1}{h_o} = \frac{1}{k} - \frac{A_o}{A_i} \frac{1}{h_i} - R_f - R_w \quad (2)$$

式中,  $h_o$  为管外表面传热系数,  $k$  为总传热系数,  $h_i$  为管内侧表面传热系数,  $R_f$  为污垢热阻 (在实验前对管路进行了清洗, 运行时间短, 可忽略),  $R_w$  为管壁热阻,  $A_i$  和  $A_o$  分别为强化管胚管内表面积和外表面积。

### 2.4 实验不确定度分析

根据文献 [13]~[15] 的方法对实验结果进行不确定度分析, 对于本文所有传热管, 总传热系数  $k$  的不确定度小于 5.3%, 管外凝结传热系数的不确定度小于 30%。

## 3 实验结果及分析

### 3.1 实验系统可靠性验证

为了验证实验系统的可靠性, 本文首先将 R134a 在光滑铜管表面的凝结传热的实验结果和 Nusselt 理论解 [16] 进行了对比, 结果如图 3 所示, 在饱和温度 40°C ( $P_s = 1.01$  MPa), 实验结果和 Nusselt 理论解偏差小于 10%, 因此本文实验结果是可信的。

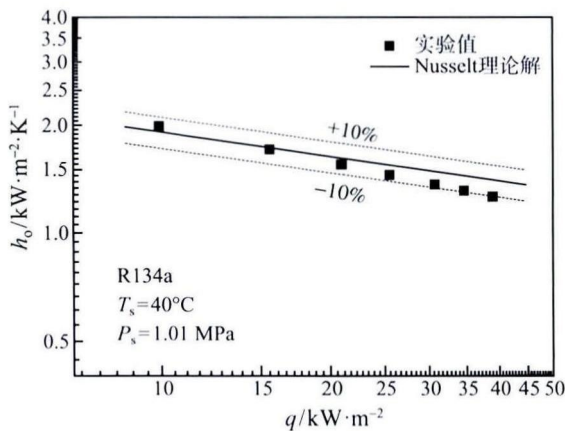


图 3 光管外凝结传热系数实验结果和 Nusselt 理论解的比较  
Fig. 3 Comparisons of the experimental results and Nusselt predictions for smooth tube

### 3.2 总传热系数比较

图 4 给出了管内冷却水流速对强化管总传热系数的影响。从图中可以看出, 随着流速的增大, 每根管的总传热系数增大, 此时总传热系数增大是由于管内对流传热系数的增大所致。

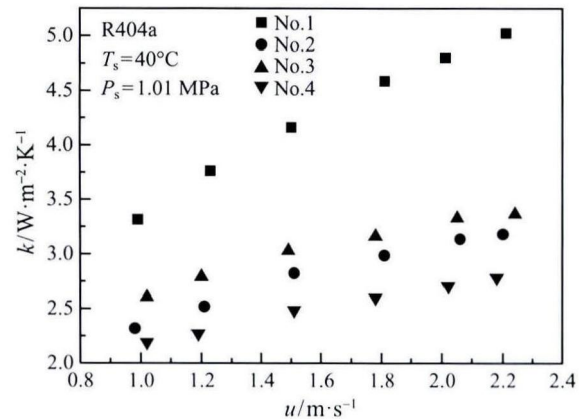


图 4 冷却水进口温度 32°C, No.1~No.4 管总传热系数随冷却水流速的变化关系

Fig. 4 The overall heat transfer coefficient of No.1~No.4 vs. the velocity of inside water with the inlet temperature of 32°C

图 5 还表明, 测试工况相同时, 同种强化结构的铝黄铜管比白铜管强化换热效果好; 同种材料的三维高效管比低肋管的强化换热效果好, 这一特性与纯工质 R134a 相似。

### 3.3 管外凝结传热系数比较

图 5 为四根强化管 (No.1~No.4) 管外凝结传热系数随热流密度的变化关系。从图中可以看出, 随着热流密度的变化, 三维高效管 (No.1~No.2) 和低肋管 (No.3~No.4) 表现出了不同的变化趋势。从图中还可以看出, 对于相同的强化结构, No.1 的管外传热系数比 No.2 大 70%~80%, No.3 的管外传热系数比 No.4 大 5%~15%, 造成这一差别的原因与不同材料的肋效率不同有关。有研究发现 [6], 较小导热系数导致较低的肋效率, 从而使管外凝结传热系数减小。

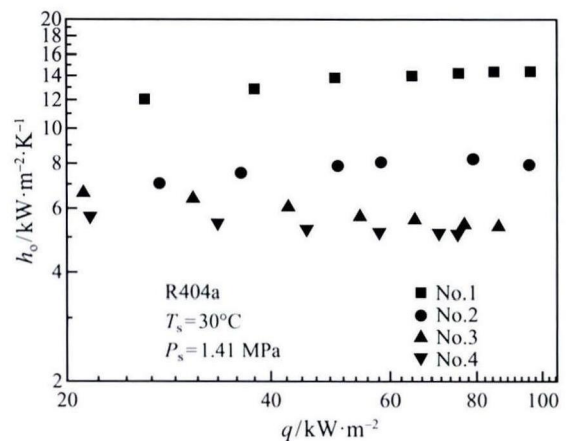


图 5 管内流速 5.0 m/s, No.1~No.4 管外凝结传热系数随热流密度变化关系

Fig. 5 The condensation heat transfer coefficient of No.1~No.4 vs. heat flux with an inside water velocity of 5.0 m/s

针对低肋高、小节距传热管, Rudy 和 Webb<sup>[17]</sup>建立了肋表面凝结换热系数的计算公式, 见式 (3)。

$$h_o = \left( \frac{A_h}{A_h + A_v} h_h + \frac{A_v}{A_h + A_v} h_v \eta_t \right) \left( \frac{180 - \theta}{180} \right) \quad (3)$$

式中,  $A_h$ 、 $A_v$  分别为低肋管肋根 (水平部分) 和肋侧 (垂直部分) 的面积,  $h_h$  和  $h_v$  分别是以上两部分对应的凝结换热系数, 二者均可由 Nusselt 水平管外和竖壁的冷凝换热公式计算所得,  $\eta_t$  为肋效率,  $\theta$  为表面张力作用下引起的凝结液集聚区对应的角度 (详见文献 [18])。由式 (3) 可知, 肋效率直接影响管外凝结换热系数, 并且低导热系数使肋效率降低, 从而导致凝结传热系数减小。因此, 不同材料的翅片管的凝结传热系数也不相同, 而光滑管的凝结传热系数与管材的导热系数无关。

## 4 结 论

本文对 R404A 在不同材质不同强化类型管外的凝结换热进行了实验研究, 主要结论如下:

1) 对于低导热系数管, 三维高效管比低肋管强化效果更好。

2) 材料的导热系数影响强化结构的肋效率。对于相同类型的强化管, 导热系数较大的铝黄铜管的强化效果比导热系数较小的白铜管好。

## 参 考 文 献

- [1] Marto P J. An Evaluation of Film Condensation on Horizontal Integral-Fin Tubes [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1988, 110(4b): 1287-1305
- [2] Mitrou E. Film Condensation Heat Transfer on Horizontal Finned Tubes [D]. Naval Postgraduate School, Monterey, CA, 1986
- [3] Mills A F, Hubbard G L, James R K, et al. Experimental Study of Film Condensation on Horizontal Grooved Tubes [J]. Desalination, 1975, 16(2): 121-133
- [4] Shklover G G, Mil'man O O, Baskov V S, et al. Heat Transfer in Condensation of Steam on Finely-Finned Horizontal Tubes [J]. Heat Transfer-Soviet Research, 1981, 13(2): 108-114
- [5] Briggs A, Rose J W. Effect of Fin Efficiency on a Model for Condensation Heat Transfer on a Horizontal, Integral-Fin Tube [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1994, 37(Supplement 1): 457-463
- [6] Koch G, Kraft K, Leipertz A. Parameter Study on the Performance of Dropwise Condensation [J]. Revue Générale de Thermique, 1998, 37(7): 539-548
- [7] Yun R, Heo J, Kim Y. Effects of Surface Roughness and Tube Materials on The Filmwise Condensation Heat Transfer Coefficient at Low Heat Transfer Rates [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2006, 33(4): 445-450
- [8] Zhang D C, Ji W T, Tao W Q. Condensation Heat Transfer of HFC134a on Horizontal Low Thermal Conductivity Tubes [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2007, 34(8): 917-923
- [9] Touloukian Y S, Powell R W, Cho C Y, et al. Thermophysical Properties of Matter. Vol.7 Thermal Conductivity: Metallic Elements and Alloys [M]. New York: IFI/Plenum Press, 1970
- [10] REFPROP. NIST Refrigerant Properties Database 23 [S]. Gaithersburg, MD, Version 8.0, 2010
- [11] 杨世铭, 陶文铨. 传热学 [M]. 第 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 505-506  
Yang Shiming, Tao Wenquan. Heat Transfer [M]. 4<sup>th</sup> Edition. Beijing: Higher Education Press, 2006: 505-506
- [12] Gnielinski V. New Equations for Heat and Mass Transfer in the Turbulent Flow in Pipes and Channels [J]. Int Chem Eng 1976, 16: 359-368
- [13] Kline S J and McClintock F A, Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments [J]. Mechanical Engineering, 1953, 75(7): 3-9
- [14] Cheng B, Tao W Q. Experimental Study of R-152a Film Condensation on Single Horizontal Smooth Tube and Enhanced Tubes [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1994, 116(1): 266-270
- [15] Ji W T, Zhang D C, Feng N, et al. Nucleate Pool Boiling Heat Transfer of R134a and R134a-PVE Lubricant Mixtures on Smooth and Five Enhanced Tubes [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 2010, 132(11): 111502.1-111502.8
- [16] Nusselt W. Die Oberflächencondensation Des Wasserdampfes [J]. VDI, 1916, 60: 541-569
- [17] Rudy T M, Webb R L. Theoretical Model for Condensation on Horizontal Integral-Fin Tubes [C]// In AIChE Symposium Series Heat Transfer-Sesttle, N.M. Farukhi, Editor 1983, 79: 11-18
- [18] 厉彦忠, 吴清金. 水平肋管外凝结换热的理论与实验研究 [J]. 西安交通大学学报, 1987, 21(4): 58-92  
Li Yangzhong and Wu Qingjin, Theoretical and Experimental Research on Condensation Heat Transfer outside a Fin-Tube [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1987, 21(4): 58-92