研究论文

DOI：10.11949/j.issn.0438-1157.20160706

高热通量水平管外池沸腾传热

冀文涛[1]，张定才[2]，赵创要[1]，何雅玲[1]，陶文铨[1]
（[1] 西安交通大学能源与动力工程学院，热流科学与工程教育部重点实验室，陕西 西安 710049；
[2] 中原工学院能源与环境学院，河南 郑州 450007）

摘要：在制冷空调的满液式蒸发器中，制冷剂在壳侧沸腾蒸发，管内为水的单相对流传热。实验研究了高热通量下 R134a 在一根光管和一根强化管（No. 1）外的池沸腾传热，并将光管实验结果和 Cooper 公式进行了比较。在不同的饱和温度下，热通量 10～250 kW·m^{-2}的范围内，研究了 R134a 在光管和强化管外的沸腾传热系数随热通量的变化关系。光管和强化管外径分别为 15.93 mm 和 25.36 mm。通过研究发现，在热通量 10～250 kW·m^{-2}的范围内，光管的池沸腾传热系数和 Cooper 公式符合较好，偏差小于±15%。在双对数坐标下传热系数和热通量实验结果拟合直线斜率为 0.67。在较高热通量，即热通量大于 250 kW·m^{-2}时，光管的传热系数相对 Cooper 公式偏差开始增大。对于高效管，在小于 40 kW·m^{-2}热通量下的传热效果最好。强化管的强化倍率随热通量增加一直减小，在较高热通量 250 kW·m^{-2}下，强化管的传热系数和光管相同，甚至比光管小。

关键词：池沸腾；热通量；饱和温度；传热系数；强化管
中图分类号：TK 124　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0438—1157（2016）S1—0028—05

Pool boiling heat transfer outside horizontal tubes at higher heat flux

JI Wentao[1], ZHANG Dingcai[2], ZHAO Chuangyao[1], HE Yaling[1], TAO Wenquan[1]

([1] *Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering, Ministry of Education, School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an* 710049, *Shaanxi, China*; [2] *School of Energy & Environment, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou* 450007, *Henan, China*)

Abstract: For the flooded evaporator in refrigeration or air conditioning systems, refrigerant is boiling on the shell side and water is flowing in the tube side. The pool boiling heat transfer coefficient of R134a outside one smooth tube and one reentrant cavity enhanced tube No. 1 is investigated with an experimental approach. At the saturate temperature of 6, 10 and 16℃, the heat flux of 10—250 kW·m^{-2}, the heat transfer coefficient *versus* heat flux of smooth tube is investigated and compared with Cooper correlation. The external diameter of smooth tube and enhanced tube are 15.93 mm and 25.36 mm, respectively. At the heat flux of 10—250 kW·m^{-2}, it is found that the deviation of experimental result and Cooper correlation is within ±15%. the average value of m in $h \propto q^m$, is 0.67. For the enhanced tube, the enhanced ratio is the largest at the heat flux less than 40 kW·m^{-2}. The enhanced ratio is decreasing as the increment of heat flux. At the heat flux larger than 250 kW·m^{-2}, the heat transfer coefficient of

2016-05-24 收到初稿，2016-06-01 收到修改稿。
联系人及第一作者：冀文涛（1983—），男，博士研究生，副教授。
基金项目：国家自然科学基金项目（51306140）；高等学校博士学科点专项科研基金项目（20130201120057）。

Received date: 2016-05-24.
Corresponding author: JI Wentao, wentaoji@xjtu.edu.cn
Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (51306140) and the Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (20130201120057).

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

enhanced tube is approaching the smooth tube, and even smaller than smooth tube.

Key words: pool boiling; heat flux; saturate temperature; heat transfer coefficient; enhanced tube

引　言

池沸腾传热广泛应用于制冷空调领域。在空调的满液式蒸发器中，制冷剂在壳侧沸腾蒸发，管内为水的单相对流传热。三维高效管强化表面可以有效地增加汽化核心数目，传热系数可比光管强化 2～5 倍[1-3]。常见的池沸腾三维高效管包括 Thermoexcel-E、Turbo-B 和 Gewa-B。Webb 等[4-6]对池沸腾传热三维高效管的发展进行了综述。高效传热管一般为双侧强化，Ji 等[7-9]对管内对流传热的强化方式进行了综述。

文献中针对三维强化传热管表面不同工质的传热进行了大量研究[1,6,10-16]。但是文献中针对双侧强化三维管的研究，热通量常在 10～100 kW·m^{-2}的范围内。热通量大于 100 kW·m^{-2}时针对三维强化表面换热的研究相对较少。本文实验测定了热通量 10～250 kW·m^{-2}，R134a 在一根光管和一根典型的三维强化管（No. 1）表面的池沸腾传热。

1　实验系统

实验系统如图 1 所示，主要由 3 部分组成：制冷剂循环系统、冷却水循环系统和蒸发水循环系统。R134a 在蒸发器内被实验管加热蒸发，饱和蒸气上升进入冷凝器内，在冷凝器内被冷凝成液体，最后返回蒸发器。加热水由蓄水箱流过实验管加热制冷剂后返回水箱。冷却水循环系统可冷凝蒸发后的制冷剂和保持系统内的饱和温度。恒温水箱中配有制冷和电加热系统以维持水箱内水温恒定[17]。

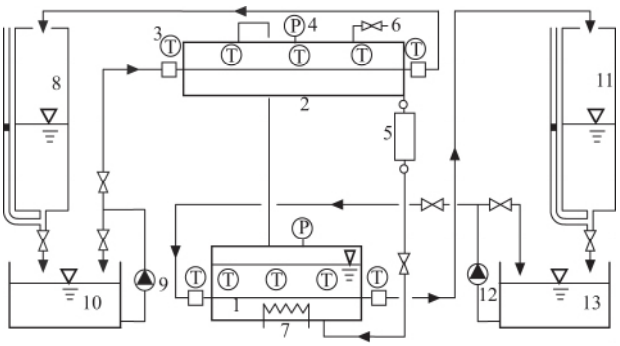

图 1　实验系统

Fig. 1　Schematic diagram of experimental apparatus

1—evaporator; 2—condenser; 3—thermocouple; 4—pressure gauge; 5—condensate measurement cylinder; 6—exhaust valve; 7—auxiliary heater; 8—flow meter; 9—cooling water pump; 10—water tank; 11—flow meter; 12—heating water pump; 13—water tank

实验系统内压力由精度 0.25 级、量程 0～2.5 MPa的压力表测定。蒸发器以及冷凝器系统内温度由 5 个 A 级精度铂电阻温度传感器测量。加热和冷却水进出口温度由铜-康铜热电偶测量，进出口温差各由 6 对铜-康铜组成的热电堆测量。热电偶以及热电堆均经过二等标准水银温度计标定，测量精度 ±0.2℃。测试光管和三维强化高效管（No. 1）的几何参数见表 1。

表 1　传热管几何参数

Table 1　Specifications of test tubes

Tube	d_o/mm	Fin height e(mm)/Fin density(fpi) Fin thickness δ(mm)/Internal fin height H (mm)/Lenght L(mm)
smooth	15.93	1100(length)
No. 1	25.36	0.574/45/0.336/0.320/1065

2　数据处理

2.1　总传热系数

总传热系数 k 按式（1）计算得出

$$k=\frac{\varphi}{A_o\Delta t_m} \tag{1}$$

式中，φ 为换热量；A_o 为实验胚管外表面面积；Δt_m 为对数平均温差；热通量 $q=\varphi/A_o$。实验中确保各测点的蒸发与冷凝换热的热平衡偏差小于 3%，以二者的平均数作为计算总传热系数的换热量。

2.2　管外沸腾传热系数

由热阻分离法式（2）分离出管外表面沸腾传热系数[1,18]

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

式中，R_f 为污垢热阻（由于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；h_o 为管外表面传热系数；h_i 为光管管内传热系数，$h_i=c_ih_{ip}$，c_i 为强化倍率，由 Wilson 热阻分

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

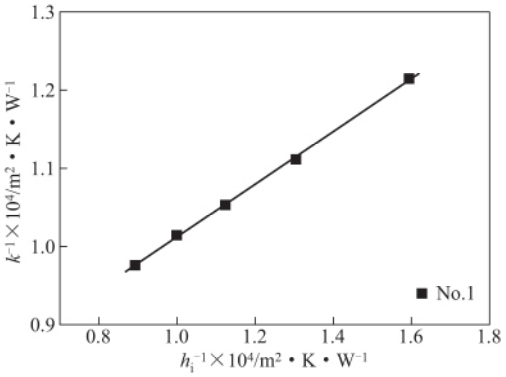

图 2 高效强化管 No. 1 的 Wilson 图

Fig. 2 Wilson plot of enhanced tube No. 1

离法得出，h_{ip} 为光管内水侧传热系数，由 Gnielinski 公式[19]计算得出。强化管的 Wilson 图如图 2 所示。强化管的管内强化倍率为 2.86。

3 实验结果

3.1 实验系统可靠性验证

为了验证实验系统的可靠性，首先将不同饱和温度 6、10 和 16℃下光管外的池沸腾传热系数和 Cooper 公式[20]做了对比。影响光滑管池沸腾传热的因素包括换热工质、热通量、饱和压力和传热管的表面粗糙度等。本文取光管的表面粗糙度为 0.3 μm，测试了制冷工质 R134a 在饱和温度 6、10 和 16℃时的沸腾传热系数。如图 3 所示，在热通量 20～300 kW · m^{-2} 的范围内，实验结果和 Cooper 公式偏差在±15%以内。通过对比验证了实验系统的可靠性。

3.2 高效管实验结果

在饱和温度 16℃，热通量 10～250 kW · m^{-2} 范围内，R134a 在强化管外的沸腾传热系数随热通量的变化关系如图 4 所示。

从图中可见：①随着热通量的增加，高效管的传热系数变化范围较小，强化管的沸腾传热系数在 15～20 kW · m^{-2} K 的范围内变化。②相比于光管，强化管的传热强化倍率不断减小。在饱和温度 16℃，热通量 15 kW · m^{-2}，传热管的强化倍率为 4.3。在相同饱和温度下，热通量 230 kW · m^{-2}，传热管的强化倍率减小为 0.91。强化管的传热系数甚至比光管低。图 5 为饱和温度为 16℃时，强化管的强化倍率随热通量的变化。从图中可见，随着热通量的增加，传热管的强化倍率一直减小。

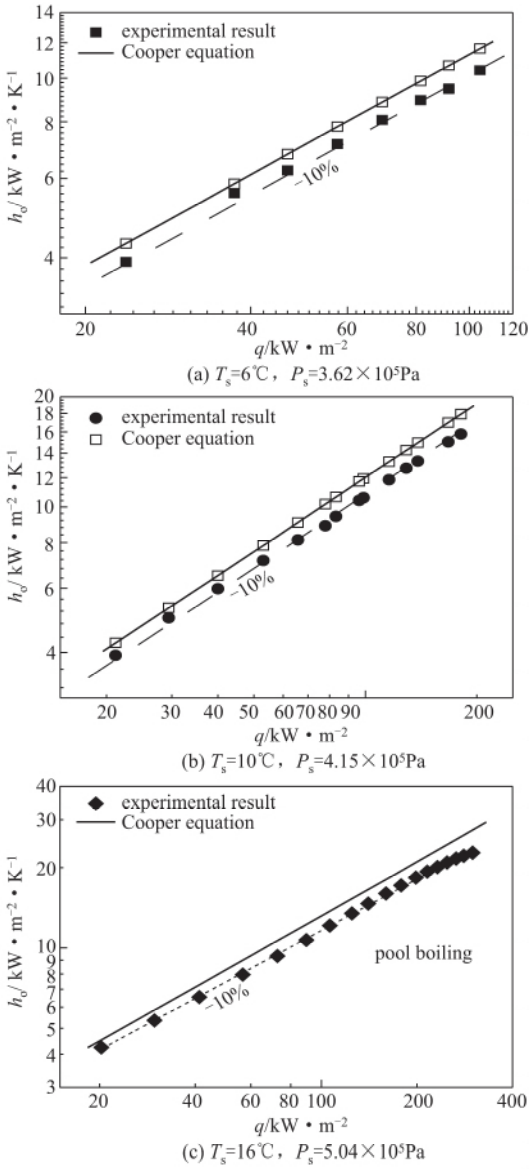

图 3 光管外池沸腾实验结果和 Cooper 公式的对比

Fig. 3 Comparison of experimental result and Cooper correlation

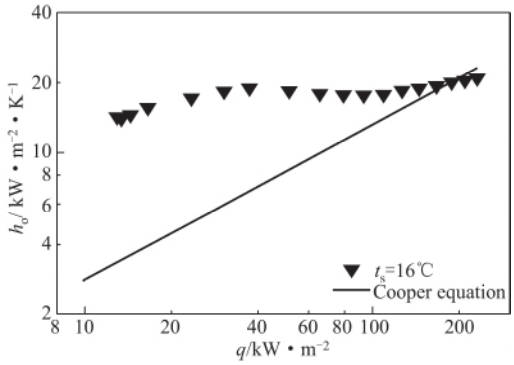

图 4 强化管沸腾传热系数随热通量的变化

Fig. 4 Pool boiling heat transfer coefficient *versus* heat flux of No. 1

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

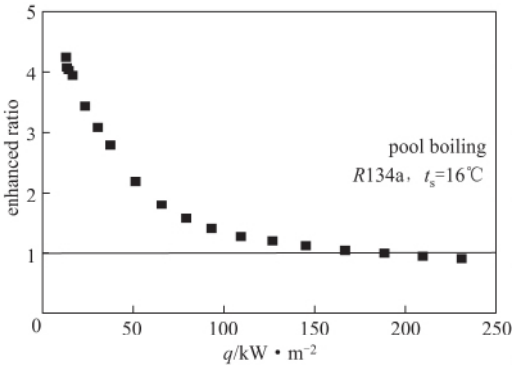

图 5　强化管的强化倍率随热通量的变化

Fig. 5　Enhanced ratio of enhanced tube No. 1 *versus* heat flux

从本文的实验数据可见，对于高效管，在较低热通量下，高效管可以很有效地强化池沸腾传热。但是在高热通量 250 kW · m^{-2} 以上，当传热管表面有大量气泡产生时，气泡变成块状或气柱，包围在传热管表面，将影响液相工质和传热管表面的接触。强化管表面的凹穴很难起到汽化核心的作用，因而高效管的传热系数和光管几乎相同。甚至比光管还小。

4　结　论

本文研究了高热通量下光管和高效管在不同饱和温度下 R134a 的池沸腾传热。主要结论如下。

（1）在热通量 10～250 kW · m^{-2} 的范围内，光管表面的池沸腾传热和 Cooper 公式符合较好。

（2）对于高效管，在小于 40 kW · m^{-2} 热通量下，强化传热效果最好。

（3）强化管的强化倍率随热通量增加一直减小，在较高热通量 250 kW · m^{-2}，强化管的传热系数和光管相同，甚至比光管小。

References

[1] JI W T, NUMATA M, HE Y L, *et al*. Nucleate pool boiling and filmwise condensation heat transfer of R134a on the same horizontal tubes [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, **86**: 744-754.

[2] JI W T, ZHAO C Y, HE Y L, *et al*. Experimental validation of Cooper correlation at higher heat flux [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, **90**: 1241-1243.

[3] ZHAO C Y, JI W T, JIN P H, *et al*. Heat transfer correlation of the falling film evaporation on a single horizontal smooth tube [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, **103**: 177-186.

[4] WEBB R L. Odyssey of the enhanced boiling surface [J]. Journal of Heat Transfer, 2004, **126** (6): 1051-1059.

[5] WEBB R L, KIM N H. Principle of Enhanced Heat Transfer [M]. Boca Raton: Taylor & Francis, 2005.

[6] VAN ROOYEN E, THOME J. Pool boiling data and prediction method for enhanced boiling tubes with R-134a, R-236fa and R-1234ze (E) [J]. International Journal of Refrigeration, 2013, **36** (2): 447-455.

[7] JI W T, ZHANG D C, HE Y L, *et al*. Prediction of fully developed turbulent heat transfer of internal helically ribbed tubes—an extension of Gnielinski equation [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011, **55** (4): 1375-1384.

[8] MANGLIK R M. Current progress and new developments in enhanced heat and mass transfer [J]. Journal of Enhanced Heat Transfer, 2013, **20** (1): 1-15.

[9] JI W T, JACOBI A M, HE Y L, *et al*. Summary and evaluation on single-phase heat transfer enhancement techniques of liquid laminar and turbulent pipe flow [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, **88**: 735-754.

[10] 冀文涛，张定才，冯楠，等．水平管外含油及纯 R134a 池沸腾换热特性比较 [J]. 工程热物理学报，2008，**29** (7): 1195-1198.
JI W T, ZHANG D C, FENG N, *et al*. Pool boiling heat transfer comparison of pure R134a and R134a with oil additive outside horizontal tubes [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, **29** (7): 1195-1198.

[11] 冀文涛，冯楠，张定才，等．润滑油对水平管外 R134a 池沸腾换热的影响 [J]. 工程热物理学报，2009，**30** (5): 821-823.
JI W T, FENG N, ZHANG D C, *et al*. Influence of oil additive on pool boiling heat transfer of R134a outside horizontal tubes [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, **30** (5): 821-823.

[12] 冀文涛，屈治国，郭剑飞，等．水平管外开孔铜泡沫 R134a 池沸腾换热实验研究 [J]. 工程热物理学报，2010，**31** (7): 1185-1188.
JI W T, QU Z G, GUO J F, *et al*. Pool boiling heat transfer of R134a outside horizontal open-cell copper foam tubes [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, **31** (7): 1185-1188.

[13] 郭剑飞，李增耀，屈治国，等．水平金属泡沫管外 R134a 凝结传热实验研究 [J]. 工程热物理学报，2011，**32** (5): 839-842.
GUO J F, LI Z Y, QU Z G, *et al*. An experimental study of condensation heat transfer characteristics outside the horizontal metal foam tubes [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, **32** (5): 839-842.

[14] WANG C C, HAFNER A, KUO C S, *et al*. Influence of lubricant on the nucleate boiling heat transfer performance of refrigerant—a review [J]. Heat Transfer Engineering, 2014, **35** (6/7/8): 651-663.

[15] LEE Y, KANG D G, KIM J H, *et al*. Nucleate boiling heat transfer coefficients of HFO1234yf on various enhanced surfaces [J]. International Journal of Refrigeration, 2014, **38**: 198-205.

[16] JI W T, ZHAO C Y, ZHANG D C, *et al*. Effect of vapor

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

flow on the falling film evaporation of R134a outside a horizontal tube bundle [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, **92**: 1171-1181.

[17] 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]. Journal of Heat Transfer, 2010, **132** (11): 11502.

[18] JI W T, QU Z G, LI Z Y, *et al*. Pool boiling heat transfer of R134a on single horizontal tube surfaces sintered with open-celled copper foam [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2011, **50** (11): 2248-2255.

[19] GNIELINSKI V. New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flows [J]. Int. Chem. Eng., 1976, **16**: 359-368.

[20] COOPER M G. Saturation nucleate pool boiling—a simple correlation [J]. International Chemical Engineering Symposium Series, 1984, **86**: 785-792.

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net