

文章编号:0253-4339(2014)01-0077-05

doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2014.01.077

水平管外 R404A 降膜蒸发传热的实验研究

欧阳新萍 邱雪松 姜帆

(上海理工大学 上海 200093)

摘要 搭建了降膜蒸发实验台,研究了水平单管外的降膜蒸发传热特性。测试管为外径 19mm、有效实验长度为 2500mm 的光滑管和强化管。实验采用 R404A 作为管外降膜蒸发工质,与管内热水进行换热。布液采用喷嘴喷淋的方式,通过 21 个喷嘴当量直径为 2mm 的喷嘴完成。分别在变饱和温度(0、5、10、15℃)、变热流密度(从 8 到 30kW/m²)和变喷淋量(从 0.07 到 0.11kg/(m·s))时进行实验,研究了降膜蒸发换热性能相应的变化情况,得到 R404A 的管外降膜蒸发换热的一些规律,这对降膜蒸发器的设计及应用具有一定的参考作用。

关键词 降膜蒸发;换热强化;水平管

中图分类号:TK172;TQ051.5

文献标识码:A

Experimental Investigation on the Falling Film Evaporation of R404A Outside a Horizontal Tube

Ouyang Xinping Qiu Xuesong Jiang Fan

(Institute of Refrigeration Techniques, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093, China)

Abstract An experimental study was carried out in order to investigate the heat transfer performance of falling film outside a single horizontal tube with a new test facility. Two types of commercial evaporation tubes were tested: a plain tube and an enhanced tube, which have the same outer diameter of 19 mm and the same effective test length of 2500 mm. Refrigerant 404A was used as working fluid to transfer heat with heating water inside the tube. Spraying feeding method was adopted by using 21 spray nozzles with the equivalent diameter of 2 millimeters. Experiments were performed at saturation temperatures of 0, 5, 10 and 15℃, heat fluxes from 8 to 30 kW/m² and mass flow rate per unit length of tube from 0.07 to 0.11 kg/(m·s). The regularity of falling film heat transfer performance of R404A outside a horizontal tube was obtained which is meaningful for the design and application of falling film evaporator.

Keywords falling film evaporation; heat transfer enhancement; horizontal tube

降膜式蒸发器相比于满液式蒸发器而言在某些方面更具优势,如可达到更高的传热系数、在温差较小的情况下拥有较高的换热能力,并且根据系统的设计可减少 20% 到 90% 的制冷剂充注量^[1]等。很多学者对水平管降膜蒸发器进行了大量的实验和理论研究。Thome^[2]以及 Ribatski 和 Jacobi^[3]对降膜蒸发换热器的诸多优点与可能的操作问题进行了综合论述。

一般来说,降膜蒸发器根据布液方式的不同分为两种:喷淋式和滴淋式。诸多学者就热流密度、饱和温度、喷淋流量和喷嘴形式对喷淋式降膜蒸发器的换热性能的影响进行了大量的研究。关于喷淋降膜蒸发的基本原理^[4-5]、喷淋布液的影响^[6]以及单管与管束的影响^[7-8]等很多方面的论文已经发表了很多。

加热管上干斑的产生是降膜蒸发研究中的一个重要议题。这种现象是由很多因素引起的,比如:蒸气剪切、热毛细效应、蒸发和沸腾等。干斑的产生会减少管壁上液膜的有效湿润面积,从而导致换热性能的降低。Ribatski 和 Thome^[9]研究了水平光管表面制冷剂 R134a 降膜干斑特性,认为在一定热流密度下,当液膜流量减小至换热系数急剧下降时就预示干斑出现。另外也提出用来预测因干斑出现而导致换热恶化的通用方法。随后 Roques 和 Thome^[10]研究了强化管外 R134a 降膜干斑特性。最近,Christians 和 Thome^[11]通过实验研究了两种不同的制冷剂 R134a 和 R236fa 在强化管外的干斑特性。强化管相比光管而言,换热性能好,而液膜临界雷诺数(继续减小液膜流量会导致干斑出现)小,这主要是由于强化表面

的结构有助于液膜在管壁上的分布,从而可以减小干斑面积。

最近的实验研究中采用了多种强化管, Kim 和 Kang^[12]用等离子处理方法得到亲水表面,实验发现等离子处理的管子比没有处理的管子获得了较高的润适度和更大的换热系数。Liu 等^[13]用水和 R11 测试一种滚压强化管,结果显示这种经济的管子拥有较高的降膜蒸发换热性能。Lee 等^[14]实验研究了水平管表面微尺度多孔层对液膜润湿度和换热性能的影响。实验中发现,毛细作用使得工质在管外形成了完全的较薄的液膜,管子即使在较小流量下仍能被液膜完全覆盖,从而能够获得较大的换热系数。

诸多的研究采用了多种工质,但未见采用新型环保制冷剂 R404A 的管外降膜蒸发研究的报道。文章就是针对 R404A 在光管和强化管外表面的降膜蒸发换热特性展开论述。

1 实验装置和实验方法

1.1 实验装置

实验装置如图 1 所示,实验对单管进行测试,工质为 R404A。装置包含三个独立的循环回路:制冷剂 R404A 的循环系统、蒸发管热水循环系统和冷凝管乙二醇溶液的循环系统。

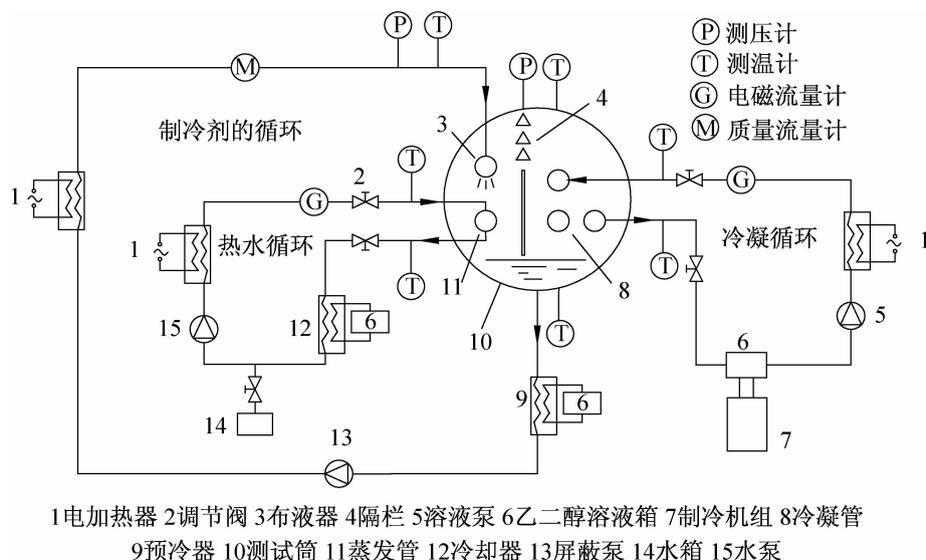


图 1 实验原理图

Fig. 1 Schematic of the experimental setup

蒸发管(测试管)和冷凝管布置在在同一实验筒体内,中间由丁字板隔开,左侧为蒸发侧,右侧为冷凝侧。制冷剂循环系统主要包括布液器、测试管、冷凝管、预冷器、屏蔽泵、电加热和质量流量计等。制冷剂由预冷器预冷后由屏蔽泵输送到电加热器控制喷淋温度,为避免闪蒸,制冷剂要有一定的过冷度。制冷剂喷淋到测试管表面后蒸发,然后绕过隔栏在冷凝管表面冷凝成液体,再流入预冷器。

蒸发管水循环系统主要包括水箱、水泵、电加热器、电磁流量计、冷却器等,为蒸发管内提供一定温度和流量的加热水。冷凝管乙二醇溶液的循环系统与蒸发管水循环系统的设备构成相似,为冷凝管内提供一定温度和流量的冷却乙二醇溶液。不同点是,乙二醇溶液水箱与一个制冷机组相连,以保持乙二醇溶液的温度维持在设定温度。

布液器是一根焊接了 21 个广角喷嘴的水平光管,这种喷嘴喷出的制冷剂是扇形的,在测试压力下

喷角为 100° , 如图 2 所示。

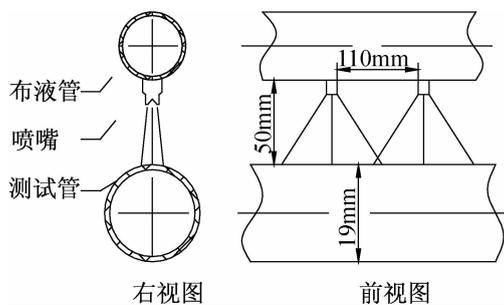


图 2 喷嘴结构图

Fig. 2 View of the structure of the nozzle

实验分别针对光管和一种强化换热管进行。强化管的外表面形状如图 3 所示。

1.2 实验方法

降膜蒸发换热系数通过热阻分离法来计算。实验测量蒸发管内水的流量和进出口温度,则总的热放水放热量 q_w 为:



图 3 强化管的外表面形状

Fig. 3 The outer structure of enhanced tube

$$q_w = \frac{c_{pw} M_w (T_{iw} - T_{ow})}{A_o} \quad (1)$$

式中： c_{pw} 为加热水的比热容， $J/(kg \cdot K)$ ； M_w 为热水质量流量， kg/s ； T_{iw} 为热水进口温度， K ； T_{ow} 为热水出口温度， K ； A_o 为测试管的外表面积， m^2 。

同样，实验测量冷凝管内乙二醇溶液的流量和进出口温度，则乙二醇溶液的吸热量 q_g 为：

$$q_g = \frac{c_{pg} M_g (T_{og} - T_{ig})}{A_o} \quad (2)$$

式中： c_{pg} 为乙二醇溶液的比热容， $J/(kg \cdot K)$ ； M_g 为乙二醇溶液质量流量， kg/s ； T_{ig} 为乙二醇溶液进口温度， K ； T_{og} 为乙二醇溶液出口温度， K 。

实验过程中，当放热量和吸热量之间的相对误差小于 5% 的时，认为数据可信予以采纳。降膜蒸发热量取两者的平均值：

$$q = \frac{q_w + q_g}{2} \quad (3)$$

降膜蒸发的总传热系数可由牛顿冷却公式得到：

$$U_o = \frac{q}{\Delta T_{LMTD}} \quad (4)$$

式中： ΔT_{LMTD} 为热水与饱和和液态制冷剂间的对数平均温差， K 。

管内的强制对流换热系数 h_i 采用 Sieder 和 Tate 方程^[15]求得：

$$h_i = STC_i \frac{\lambda_w}{D_i} Re_w^{0.8} Pr_w^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu_w}{\mu_{wall}} \right)^{0.14} \quad (5)$$

式中： STC_i 为不同表面的经验数值； λ_w 为热水导热系数， $W/(m \cdot K)$ ； D_i 为测试管内径， m ； Re_w 为热水雷诺数； Pr_w 为热水普朗特数； μ_w 为热水均温下热水动力黏度， $Pa \cdot s$ ； μ_{wall} 为壁温下的热水动力黏度， $Pa \cdot s$ 。

本文 STC_i 的值通过威尔逊图解法求得为 0.0643。然后通过热阻分离法可求得降膜蒸发换热系数 h_o ：

$$h_o = \frac{1}{\left(\frac{1}{U_o} - \frac{1}{h_i} \frac{A_o}{A_i} - R_{wall} - R_f \right)} \quad (6)$$

式中： R_{wall} 为管壁热阻， K ； R_f 为污垢热阻， $(m^2 \cdot K)/W$ ； A_i 为测试管的内表面积， m^2 。其中，污垢热阻 R_f 可忽略。

2 实验结果与分析

实验主要研究了热流密度、制冷剂喷淋量及蒸发温度对降膜蒸发换热的影响。

2.1 热流密度的影响

实验中将蒸发温度固定在 $5^\circ C$ ，蒸发管内热水流速固定在 $2m/s$ ，通过调节水的电加热器的功率以调节热流密度（从 8000 到 $30000 W/m^2$ ）。

图 4 显示了热流密度对 R404A 在光管和强化管外降膜蒸发的影响。由图可知，强化管外降膜蒸发的表面传热系数是光管的 $1.4 \sim 2.5$ 倍，但都随着热流密度的增大而减小；相比光管，强化管外 R404A 的表面传热系数下降幅度更大。分析认为导致这个趋势的主要原因是，随着热流密度的增加，管子外表面蒸发速率加快，局部液膜较薄的区域容易产生“干斑”，从而导致实际换热面积减小，总体表面传热系数下降。

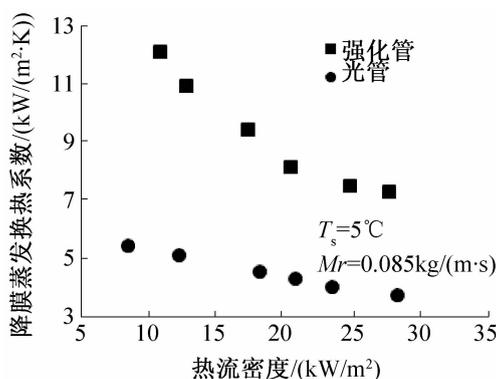


图 4 热流密度对管外降膜蒸发换热系数的影响

Fig. 4 Effects of heat flux on heat transfer coefficient of falling film evaporation

分析认为，强化管外 R404A 的表面传热系数之所以达到光管的两倍多，是因为强化表面不仅增加了传热面积、也对制冷剂的管外分布有利，可使得液膜更薄、波动增加，从而强化传热。而强化管外 R404A 的换热系数之所以会比光管下降的厉害，主要是因为强化管外制冷剂的表面传热系数高于光管，这使得管外制冷剂的蒸发量更多，因此干斑的面积比光管的更多，对换热影响更大。通过改进布液器的结构，如缩小喷嘴的间距，应该会改善降膜蒸发效果，即使得表

面传热系数不会随着热流密度的增加而下降,或下降很少。

2.2 制冷剂喷淋量的影响

实验参数:蒸发温度 5℃;蒸发管内水流速 2m/s;热流密度 25kW/m²。通过调节屏蔽泵的转速来调节单位管长制冷剂喷淋量(在 0.07 到 0.11kg/(m·s)之间)。

图 5 显示了喷淋量对管外降膜蒸发换热系数的影响。

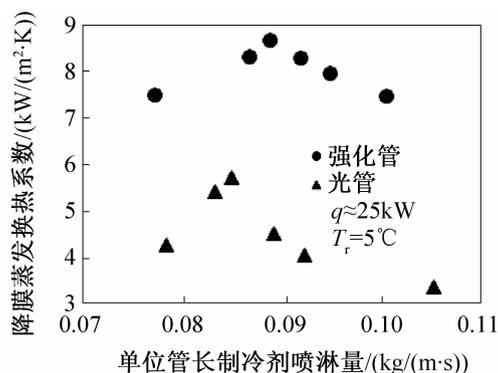


图 5 喷淋量对管外降膜蒸发换热系数的影响
Fig. 5 Effects of mass flux on heat transfer coefficient of falling film evaporation

可以看出,对强化管和光管,随着喷淋量的增加,管外降膜蒸发换热系数都呈先增大后减小的趋势。对光管与强化管,降膜蒸发换热系数的峰值分别是在单位管长质量流量为 0.0887kg/(m·s)和 0.0839kg/(m·s)时取得。当喷淋量较大时,管外表面被液膜全部覆盖,此时减小液膜流量使得液膜厚度减薄,因此,换热得到增强,表面传热系数增加。当表面传热系数达到峰值时,如果继续减小液膜流量会导致表面传热系数开始减小,因为此时管外表面会有“干斑”出现,引起换热减弱。

由图可以看出,在相同的液膜流量下,强化管管外降膜蒸发表面传热系数是光管的 2 倍左右,这主要是由于强化表面的作用。另外,图 5 显示,强化管管外降膜蒸发换热系数变化范围比光管小,这就意味着强化管更适合应用于液膜流量变化较大的场合。

2.3 蒸发温度的影响

实验在以下条件下进行:热水流速 2m/s;热流密度 25kW/m²;单位管长液膜流量 0.8kg/(m·s);通过改变冷凝管内乙二醇溶液的进口温度和流量控制实验筒体内的蒸发温度,分别控制在 0、5、10 和 15℃,实验结果如图 6 所示。从图中可以看出,随着蒸发温度增大,强化管外降膜蒸发表面传热系数呈先减小后增大的趋势。

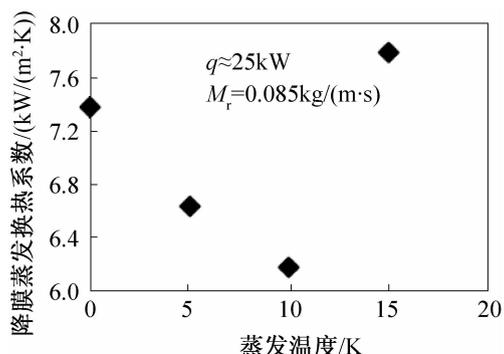


图 6 蒸发温度对管外降膜蒸发换热系数的影响
Fig. 6 Effects of evaporation temperature on heat transfer coefficient of falling film evaporation

分析认为:蒸发温度增大使得管壁与液膜之间的换热温差减小,这导致液膜与管壁间的换热量减小,液膜厚度就会增加,因此,换热系数会下降。这与 Awad 和 Negeed^[16]的研究吻合。然而,当蒸发温度增大到某一数值(本实验中大约为 10℃),如果继续增大蒸发温度会使制冷剂液膜的黏度减小,那么强化管外表面的强化表面不能够再留住较多液体,这就导致液膜减薄,所以换热又得到强化。这与 Parken 等^[17]的研究比较吻合。由上述可知,蒸发温度对降膜蒸发换热系数是否有积极影响还是取决于温差减小和黏度减小中哪一个是主要影响因素。

3 结论

实验对光管和强化管管外制冷剂 R404A 降膜蒸发换热特性进行了研究,得到了以下结论:

- 1) 在同样条件下,强化管外降膜蒸发表面传热系数是光管的 1.4 到 2.5 倍。
- 2) 在某些固定的喷淋量下,R404A 管子外表面降膜蒸发的表面传热系数随着热流密度的增大而减小。分析是表面干斑的影响,调整喷淋量或喷淋方式可改善这一状况。
- 3) 喷淋量的变化会使得降膜蒸发换热系数呈现先增加后减小的趋势。降膜蒸发换热有一个最合适的喷淋量。
- 4) 蒸发温度会对降膜蒸发换热性能构成影响。蒸发温度是否会提高降膜蒸发换热性能取决于其是否可以减小液膜厚度。

符号说明

- A——面积,m²
- c_p——比热容,J/(kg·K)
- D——管径,m
- K——总传热系数,W/(m²·K)

L ——有效加热管长, m
 M ——质量流量, kg / s
 Q ——热流, W / m²
 R ——热阻, m² · K / W
 Re ——雷诺数
 T ——温度, K
 Δt ——温差, K
 ΔT_{LMTD} ——对数平均温差, K
 λ ——导热系数, W / (m · K)
 μ ——动力黏度, Pa · s
 ν ——运动黏度, m² / s

下标

f——污垢	r——制冷剂
g——乙二醇溶液	s——饱和
i——管内	w——热水
o——管外	wall——管壁

参考文献

[1] Chang T B, Lu C C, Li J C. Enhancing the heat transfer performance of triangular-pitch shell-and-tube evaporators using an interior spray technique[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(11/12): 2527-2533.

[2] Thome J R. Falling film evaporation: state-of-the-art review of recent work[J]. Journal of Enhanced Transfer, 1999, 6(2/3/4): 263-277.

[3] Ribatski G, Jacobi A M. Falling-film evaporation on horizontal tubes - a critical review[J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28(5): 635-653.

[4] Zeng X, Chyu M C, Ayub Z H. Characteristic study of sprayed fluid flow in a tube bundle[J]. ASHREA Transactions, 1994, 100(1): 63-72.

[5] Zeng X, Chyu M C, Ayub Z H. Evaporation heat transfer performance of nozzle-sprayed ammonia on a horizontal tube [J]. ASHREA Transactions, 1995, 101(1): 136-149.

[6] Zeng X, Chyu M C, Ayub Z H. Nozzle-sprayed flow rate distribution on horizontal tube bundle [J]. ASHREA Transactions, 1995, 101(2): 353-443.

[7] Zeng X, Chyu M C, Ayub Z H. Experimental investigation on ammonia spray evaporator with triangular-pitch bundle, part 1: tube bundle effect [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 44(12): 2081-2092.

[8] Zeng X, Chyu M C, Ayub Z H. Experimental investigation on ammonia spray evaporator with triangular-pitch bundle, part 2: Evaporator performance [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 44(22): 2299-2310.

[9] Ribatski G, Thome J R. Experimental study on the onset of local dryout in an evaporating falling film on horizontal plain tubes[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2007, 31(6): 483-493.

[10] Roques J F, Thome J R. Falling films on arrays of horizontal tubes with R-134a, part II: flow visualization, onset of dryout, and heat transfer predictions [J]. Heat Transfer Engineering, 2007, 28(5): 415-434.

[11] Christians M, Thome J R. Falling film evaporation on enhanced tubes, part I: experimental results for pool boiling, onset-of-dryout and falling film evaporation [J]. International Journal of Refrigeration, 2012, 35(2): 300-312.

[12] Kim H Y, Kang B H. Effects of hydrophilic surface treatment on evaporation heat transfer at the outside wall of horizontal tubes[J]. Applied Thermal Engineering, 2003, 23(4): 449-458.

[13] Xia Z Z, Yang G Z, Wang R Z. Experimental investigation of capillary-assisted evaporation on the outside surface of horizontal tubes [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(15/16): 4047-4054.

[14] Lee S, Koroglu B, Park C. Experimental investigation of capillary-assisted solution wetting and heat transfer using a micro-scale, porous-layer coating on horizontal-tube, falling-film heat exchanger [J]. International Journal of Refrigeration, 2012, 35(4): 1176-1187.

[15] Sieder E N, Tate G E. Heat transfer and Pressure drop of liquid in tubes [J]. Ind. Eng. Chem., Res. 1936, 28(12): 1429-1435.

[16] Awad M M, Negeed E S R. Enhancement of evaporation of falling liquid film on horizontal tube bundles [C] // International Water Technology Conference, 2008, IWTC12, Alexandria, Egypt.

[17] Parken W H, Fletcher L S, Han J C, et al. Heat-transfer through falling film evaporation and boiling on horizontal tubes [J]. ASME J. Heat Transfer, 1990, 112(3): 744-750.

通信作者简介

邱雪松,男(1987 -), 硕士研究生,上海理工大学制冷及低温工程专业, (021) 55273428, E-mail: xs_qiu@163.com。研究方向: 强化传热, 降膜蒸发换热。

About the corresponding author

Qiu Xuesong (1987 -), male, master, University of Shanghai for Science and Technology, (021) 55273428, E-mail: xs_qiu@163.com. Research fields: heat transfer enhancement, falling film evaporation.