

文章编号: 1671-6612 (2022) 06-809-04

高速飞行器水蒸发器换热性能实验研究

张雅丹¹ 马德胜² 庞丽萍²

(1. 新乡航空工业(集团)有限公司 新乡 453002;

2. 北京航空航天大学航空科学与工程学院 北京 100191)

【摘要】 水蒸发器是一种以消耗型工质水作为热沉,并且在低压环境下可以利用水的相变对高速飞行器机载电子设备进行冷却的一种换热设备。设计了一种内部单相通道采取偏置条形结构外部相变侧采取平直矩形翅片结构的水蒸发器。通过实验研究了三种质量流量(800kg/h、1510kg/h和2500kg/h)和低压7kPa下水蒸发器传热特性。在现有经验关联式的基础上修正了一个新的适用于低压沸腾的关联式,关联式最大误差为±10%。

【关键词】 水蒸发器; 矩形翅片; 沸腾; 关联式

中图分类号 V24 文献标识码 A

Experimental Study on Heat Transfer Performance of Water Evaporator for High Speed Aircraft

Zhang Yadan¹ Ma Desheng² Pang Liping²

(1. Xinxiang Aviation Industry (Group) Co., Xinxiang, 453002;

2. School of Aeronautical Science and engineering BUAA, Beijing, 100191)

【Abstract】 The water evaporator is a kind of heat exchange equipment which uses the consumable working medium water as the heat sink and uses the phase change of water to cool the airborne electronic equipment in the low-pressure environment. In this paper, a water evaporator with zigzag internal single-phase channel and flat rectangular fin external phase change side is designed. The pool boiling heat transfer characteristics of water with three mass flow rates (800kg/h, 1510kg/h and 2500kg/h) and low pressure of 7kPa were studied experimentally. Based on the existing empirical correlation, a new correlation for low-pressure boiling is modified in this paper. The maximum error of the correlation is ± 10%.

【Keywords】 Water evaporator; rectangular fin; boiling; correlation

0 引言

航空航天机载电子设备、汽车、电源逆变器和超级计算机等行业中的电子设备高性能化及小型化已成为发展的趋势,但这些机载电子设备在工作时会产生大量的热量,为了保持电子设备高效正常的工作,必须对这些电子设备进行有效的热管理^[1-4]。同时,板翅式换热器以其体积小、重量轻等优点被广泛应用,根据不同的应用领域,板翅式热交换器发展出了各种扩展面,如普通翅片、波浪翅

片、偏置条翅片、穿孔翅片和百叶窗翅片等在这些增强型翅片几何结构中,偏置条形翅片 offset strip fin (OSF) 的应用最为广泛^[5,6]。传统上应用基于强制对流的单相冷却方法无法满足大功率电子设备冷却需求。因此可以在单相液冷的基础上增加沸腾相变,利用液-汽相变过程潜热能够带走大量的热量,从而实现对电子设备的冷却^[8]。沸腾可分为池沸腾、内流沸腾、外流沸腾以及它们组合的混合配置^[9]。池沸腾是上述沸腾配置中最简单的方案,

作者简介: 张雅丹 (1988.09-), 女, 硕士, 工程师, E-mail: xhyadanzhang@126.com

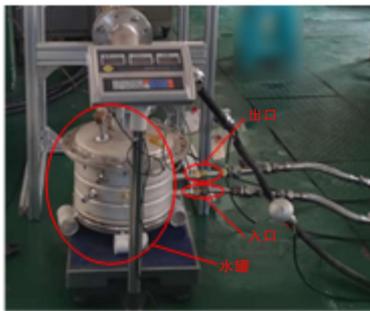
通讯作者: 马德胜 (1995.03-), 男, 博士, E-mail: madesheng@buaa.edu.cn

收稿日期: 2022-08-25

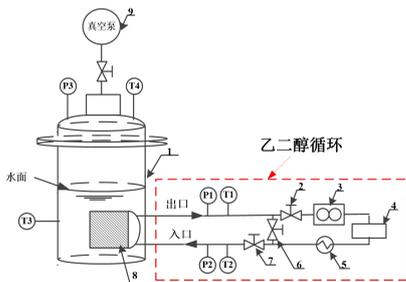
并且具有所谓的被动冷却的显著优势, 无需泵送功率或系统中的移动部件^[7,8]。本文在前人研究的基础上, 提出了一种基于偏置条形翅片作为单相液冷侧翅片, 平直矩形翅片作为沸腾侧翅片的相变换热器, 探究相变换热器在压力为 7kPa 环境和不同热通量下的池沸腾换热性能和单相液冷侧换热性能。为低压环境下池沸腾传热特性的研究提供参考。

1 实验方法

1.1 实验系统



实验系统照片



1-水箱, 2、6 和 7-阀, 3-流量计, 4-储液箱, 5-泵, 8-水蒸发器, 9-真空泵, T1, T2, T3 和 T4 温度传感器, P1, P2 和 P3 压力传感器

图 1 实验系统原理图和照片

Fig.1 Schematic diagram and photos of experimental system

设计并建立了一个旨在进行低压池沸腾传热研究的实验系统, 如图 1 所示, 整个系统可分为三个部分, 即单相液冷乙二醇水溶液 (65%) 回路、低压池沸腾子系统和数据采集子系统。实验前, 对于单相液冷回路, 乙二醇水溶液在实验前存储在储液箱内, 并由储液箱内的控温设备 (加热器) 进行加热。对于低压池沸腾子系统, 将换热器放置在罐内, 并对罐内进行注水, 水液面距换热器上表面高度 8mm 处, 初始水温为 25℃。开始实验时, 乙二醇水溶液从储液箱中被流体泵抽出, 阀门 2 和阀门 6 被打开, 阀门 7 关闭, 然后, 通过调节液体泵的

转速, 来控制乙二醇水溶液的质量流量, 通过读取流量计的数值, 达到相应实验所需的质量流量后并待乙二醇水溶液在循环中达到稳定后, 打开阀门 7, 并相应的关闭旁路阀门 6, 乙二醇水溶液就可以流入偏置条形翅片的微通道内。实验采取三种工况, 即改变乙二醇水溶液质量流量, 其他参数: 罐内压力 7kPa、单相液冷回路压力 0.2MPa、乙二醇水溶液入口温度 85℃ 等保持不变, 输入参数如表 1 所示。实验过程中, 液冷回路以及罐体均采用隔热材料覆盖进行保温, 以减少与周围环境之间的热交换 (图 1 中是拆除隔热材料后拍摄的实验装置照片)。

表 1 实验输入参数

Table 1 Experimental input parameters

组数	质量流量/kg/h	防冻液入口压力/MPa	防冻液入口温度/℃	水箱内初始压力/kPa
Case1	800	0.2	85	7
Case2	1510	0.2	85	7
Case3	2500	0.2	85	7

实验所用的罐体为铝合金圆柱体, 内径为 325mm, 高度为 272mm, 罐体壁厚为 5mm。换热器采用单相液冷两流程的板翅式换热器, 如图 2 所示, 换热器长度为 210mm, 高度为 120mm, 宽度为 186mm, 单相液冷侧通道与沸腾侧通道采取间隔阵列的方式布置, 即一层单相乙二醇侧通道两侧布置沸腾侧通道, 实验所用换热器单相液冷侧共 18 层, 沸腾侧通道共 19 层。其中沸腾侧翅片采取平直矩形翅片, 翅片结构形式在图 2 中的 1 所示, 单相液冷侧采用偏置条形翅片结构, 翅片结构形式在图 2 中的 2 所示, 单相液冷侧通道进出口采取下入上出。为了更加明确表示单相液冷侧偏置条形微通道的布局方式, 选取一层偏置条形微通道布局方式在图 2 中的 3 所示, 在进出口翅片末端连接处, 采用翅片导热, 翅片切割夹角为 80°。翅片均采用铝合金材料。

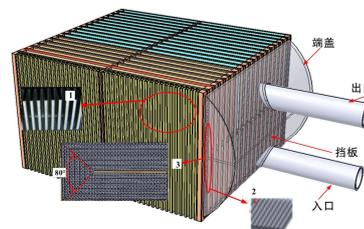


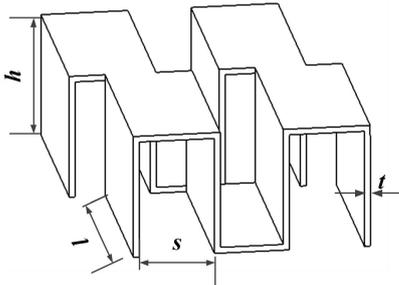
图 2 换热器结构模型图

Fig.2 Structural model diagram of heat exchanger

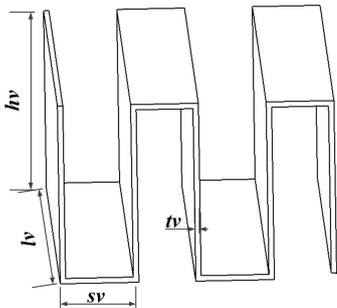
数据采集子系统包含质量流量计、温度传感器、压力传感器组成。本文使用涡轮流量计 (LWJ) 测量乙二醇溶液的质量流量, 涡轮流量计的测量范围和精度分别为 0~3000kg/h 和±0.5%。压力传感器 (KYB600) 测量水罐内的压力, 压力传感器的测量范围和精度分别为 0~600kPa 和±0.25%。温度传感器 (WZPK-336) 测量水罐内的水温以及乙二醇溶液的进出口温度, 温度传感器的测量范围和精度分别为-50℃~300℃和±0.5%。在进行正式实验前, 测量仪器均进行校准。

1.2 翅片结构尺寸及实验边界条件

偏置条形翅片结构如图 3 (a) 所示, 结构参数包含翅片高度 (h)、翅片间距 (s)、翅片长度 (l)、翅片厚度 (t)。通常, 翅片通道假定为矩形, 翅片偏移量均匀且等于半翅片间距^[12]。平直矩形翅片结构如图 3 (b) 所示, 结构参数包含翅片高度 (h_v)、翅片间距 (s_v)、翅片厚度 (t_v) 和翅片长度 (l_v)。偏置条形翅片和平直矩形翅片的尺寸列于表 2。



(a) 锯齿形偏置条形翅片 (JC)



(b) 平直矩形翅片 (PJ)

图 3 翅片结构形式

Fig.3 fin structure

表 2 偏置条形和平直矩形翅片 (mm)

Table 2 serrated and straight rectangular fins (mm)

翅片	h/h_v	s/s_v	l/l_v	t/t_v
JC	2.5	2.5	3.2	0.15
PJ	6.5	2.5	120	0.2

偏置条形翅片的水力直径由公式 (1) 计算, 平直矩形翅片水力直径由公式 (2) 计算^[3]:

$$D_h = \frac{4l_f(h-t)(s-t)}{2(l_f(h-t)+l_f(s-t)+t(h-t))+t(s-2t)} \quad (1)$$

$$D_h = \frac{4l_v s_v h_v}{2(s_v l_v + h_v l_v + t_v h_v) + t_v s_v} \quad (2)$$

式中, l_f 为单相液冷侧流动总长度, mm。

1.3 数据处理

防冻液的散热量 (Q_f) 可由公式 (3) 进行计算:

$$Q_f = \dot{m} c_p (T_{in} - T_{out}) \quad (3)$$

式中, Q_f 为散热量, W; \dot{m} 为乙二醇质量流量, kg/s; c_p 为乙二醇定压比热, J/(kg·K); T_{out} 、 T_{in} 分别为乙二醇进出口温度, K。

乙二醇侧传热因子可由公式 (4) 进行计算^[9]:

$$j = 0.33 Re_{Dh}^{-0.57} \left[1 + 7.7 \times 10^{-5} Re_{Dh}^{1.3} \right]^{0.1} \quad (4)$$

式中, Re_{Dh} 为乙二醇溶液的雷诺数。

乙二醇侧努塞尔数 (Nu_f) 可以由公式 (5) 计算^[9]:

$$Nu_f = j \cdot Re_{Dh} Pr^{1/3} \quad (5)$$

式中, Pr 为乙二醇的普朗特数。

由上式进而可以计算获得乙二醇侧对流换热系数:

$$h_f = \frac{\lambda_f}{D_h} Nu_f \quad (6)$$

式中, λ_f 为乙二醇的导热系数, W/(m·K)。

翅片壁面温度采用公式 (7) 进行计算^[9]:

$$\frac{Q_f}{A_{sur} h_f} = \frac{T_{in} - T_{out}}{\ln \frac{T_{out} - T_w}{T_{in} - T_w}} \quad (7)$$

式中, A_{sur} 是液冷侧换热面积, m²; T_w 为壁面温度, K。

沸腾传热系数由公式 (8) 计算:

$$h_{sat} = \frac{Q_f}{A_{sat} (T_w - T_{sat})} \quad (8)$$

式中, A_{sat} 为沸腾侧总的换热面积, m²; T_{sat} 为水的饱和温度, K。

2 结果与讨论

图 4 (a) 是实验数据与经验关联式的热流和

过热度的对比，从图 4 (a) 中可以得出过热度随着热流的增加而增大。当过热度从 4K 变化到 7K 时，相应的实验热流从 1.57W/cm² 变化到 5.75W/cm²；过热度从 7.6K 变化到 12.16K 时，相对应的实验热流从 6.92W/cm² 变化为 20.35W/cm²。因此，当过热度大于 7K 时，此水蒸发器可以在较小过热度下获得较大热流。将实验数据与现有经验关联式 Jens-Lottes 和 Thom 进行对比，误差分别为 34%和 16%。实验数据与 Thom 关联式误差较小，因此本文 Thom 关联式基础上进行修正。

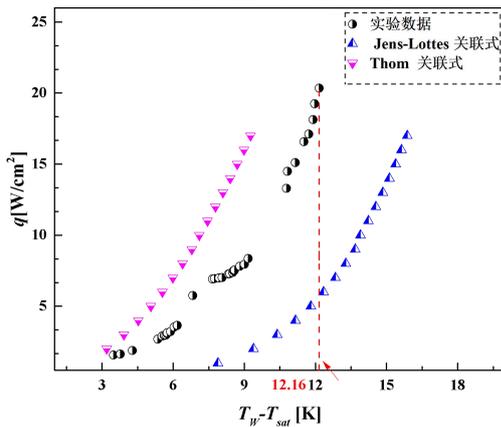


图 4 实验数据与经验关联式比较

Fig.4 Data Comparison between experiment and calculation.

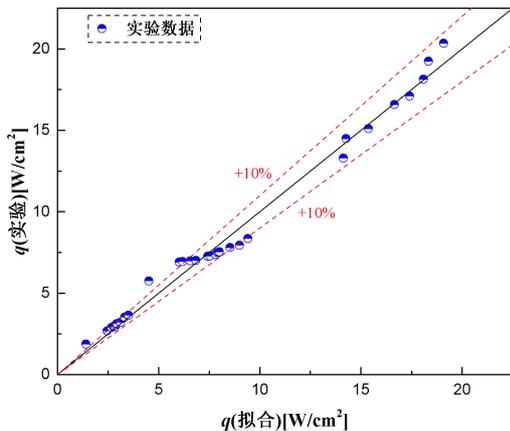


图 5 实验数据与拟合关联式对比

Fig.5 Comparison of experimental data and fitted data

Jens-Lottes 关联式^[10]:

$$T_w - T_s = 25 \left(\frac{q}{10^6} \right)^{0.25} e^{(-p/6.2)} \quad (9)$$

Thom 关联式^[10]:

$$T_w - T_s = 22.65 \left(\frac{q}{10^6} \right)^{0.5} e^{(-p/8.7)} \quad (10)$$

拟合关联式如公式 (11) 所示:

$$T_w - T_s = 45.34 \left(\frac{q}{10^6} \right)^{0.4} e^{(-p/8.7)} \quad (11)$$

式中, q 为热流密度, W/m²; P 为压力, MPa。

图 5 是实验数据与拟合关联式间的对比, 除极少数点外, 大多数实验数据都在最大±10%偏差内, 可以认为拟合关联式与实验数据吻合较好。

3 结论

在低压环境 7kPa 和质量流量为 800kg/h、1500kg/h 和 2500kg/h 的工况下研究了基于偏置条形翅片的板翅换热器的沸腾换热特性和单相液冷流动换热特性通过实验探究, 通过将实验数据与现有沸腾经验关联式进行对比可以得出, 实验数据与 Jens-Lottes 关联式误差较大, 与 Thom 关联式误差较小。因此在 Thom 关联式的基础上进行修正, 提出了一个修正的适用于平直矩形翅片的低压沸腾关联式, 最大误差在±10%以内。

参考文献:

- [1] B Sundén, SA Abbood, Z Wu. Effects of engineered micro/nanostructures on nucleate pool boiling heat transfer[J]. Nanosci. Nanotechnol, 2017,7:155-161.
- [2] 李漫露, 庞丽萍, 马德胜. 基于水蒸发器的高速飞行器电子设备冷却性能研究[J]. 真空与低温, 2022, 28(2): 170-173.
- [3] Yujie Yang, Yanzhong Li. General prediction of the thermal hydraulic performance for plate-fin heat exchanger with offset strip fins[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 78: 860-870.
- [4] Rui Song, Mengmeng Cui, Jianjun Liu. A correlation for heat transfer and flow friction characteristics of the offset strip fin heat exchanger[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 115: 695-705.
- [5] 马德胜, 庞丽萍, 毛晓东, 等. 机载综合环控系统的热管理[J]. 化工学报, 2020, 71(S01): 436-440.
- [6] Chunbao Liu, Weiyang Bu, Dong Xu. Multi-objective shape optimization of a plate-fin heat exchanger using CFD and multi-objective genetic algorithm[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 111: 65-82.