

文章编号:0253 – 4339(2015) 03 – 0066 – 07
doi:10. 3969/j. issn. 0253 – 4339. 2015. 03. 066

水平双侧强化管传热性能测定的新方法及实验研究

翁文兵 陈文景 石冬冬

(上海理工大学 上海 200093)

摘 要 针对水平双侧强化管的传热性能测定提出了一种新的方法,称之为水环实验法,其基本过程是:在自行设计的套管换热装置中,通过实验得到缠绕铜丝的光滑传热管管外环形小通道内单相水传热关联式,应用该式通过热阻分离的方法得到一种新齿形内螺纹双侧强化传热管的管内传热关联式。同时研究了对于该管水在管内对流和制冷工质 R123 在管外凝结的传热情况,并采用水环实验法和常规热阻分离法对实验数据进行处理。经过实验研究和理论分析表明:本文的方法所得到的管内外传热系数较常规热阻分离法更加准确。

关键词 双侧强化管;传热关联式;R123;实验研究

中图分类号:TK124; TB657. 5 **文献标识码:**A

New Method for Testing the Heat Transfer Performance of Horizontal
Doubly-enhanced Tubes and the Experimental Investigation

Weng Wenbing Chen Wenjing Shi Dongdong

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

Abstract In order to test the heat transfer performance of horizontal doubly-enhanced tubes, a new method called water-ring method was put forward. The basic process was that the annulus side correlation of the smooth heat transfer tube wrapping copper wire spirally was firstly obtained by a series of experiments in the self-designed annular tubes test bench. Then the convective heat transfer resistance of the doubly-enhanced tube with the same form of copper wire could be separated from the total thermal resistance to fit out the heat transfer correlations of the inside tube. The condensation surface heat transfer coefficients of refrigerant R123 and the convection surface heat transfer coefficients of water were measured by using the correlations. The experimental study and theoretical analysis shows that the result using water-ring method is more accurate than the normal thermal resistance separation method.

Keywords doubly-enhanced tubes; heat transfer coefficients; R123; experimental investigation

在制冷、化工等工业领域,壳管式结构以其优越的排污、防堵、抗冻等优势得到了广泛的应用,其中冷却水走管程,制冷剂走壳程。为了进一步提高强化管的传热系数,需要对两侧均采取强化措施^[1]。因此,对各管型双侧强化管换热性能的测试研究也显得十分重要。

一般对于强化管的管内传热系数,通常的方法是热阻分离法^[2]。应用 Sieder-Tate 公式 $Nu_i = \frac{h_i d_{i,nom}}{k_f}$

$$= STC Re_i^q Pr_i^p \left(\frac{\mu_i}{\mu_w} \right)^n$$

采用 Wilson 图解法来确定 p 、 q 和 STC 的值。这需要的工况点非常多,所以一般都是采用与光管相同的 p 和 q 的值,然后求得 STC 或者采用一些修正措施。这种方法仅在外侧强化管的测试中得到很好的应用,得出了较为满意的结果,称之

为常规热阻分离法。但是对于水平双侧强化管,采用这种方法所得出的结果往往偏差很大。主要是因为 在蒸发器、冷凝器或其中的强化换热管的实验中,换热管壁两侧的热阻往往非常接近,而根据误差传递理论可以得知:只有待测一侧的热阻远大于换热壁面另一侧热阻, Wilson 法得出的结果才具有较小的误差,否则会存在较大的误差^[3]。

针对以上问题,本文采用一种比较简单直接的方法,即水环实验法来计算双侧强化管的管内传热系数,得到一个形式为 $\ln(St_i Pr_i^m) = \sum_{j=0} a_j \ln^j(Re_i)$ 的管内换热关联式。并对该方法的准确性以及适用性作出实验验证,为工程实际和实验研究提供参考。

1 实验原理和装置

1.1 实验原理

由于光滑管管内的强制对流传热的相关研究较多,提出多个相关关联式经过验证准确度也较高。故可以先对双侧强化管利用机械加工等工艺方法,去除其外侧强化措施,然后针对二者构建相同的管外换热形制结构。本文则是采用构造套管换热器的方法,利用已知的比较准确的光管管内传热关联式,由于通过热阻分离的方法,建立起光管管外环状流动传热 的关联式,这部分实验称之为校核实验。由于二者的管外换热情况一致,则可采用光管的管外侧的传热关联式,再通过热阻分离的方法得出双侧强化管的管内传热系数,并建立起相关的管内传热关联式。

1.2 实验装置

1.2.1 套管换热装置

一般厂家生产的用于壳管式结构的铜管多为 3/4 英寸和 1 英寸两种主要形制,为了实验台的适用性,搭建了 2 套套管式换热装置,套管外采用保温棉保温。装置的原理图如图 1 所示,管内外的水采用逆流换热的方式。为了方便之后的说明,称被测管内为管侧,被测管外部与套管之间称为环侧。其中套管采用的铜管参数如表 1 所示。

表 1 套管采用的铜管参数
Tab.1 Parameters of annular tubes

编号	外管外径/ mm	外管内径/ mm	有效长度/ m
1	31.10	28.60	1.5
2	26.40	23.90	1.5

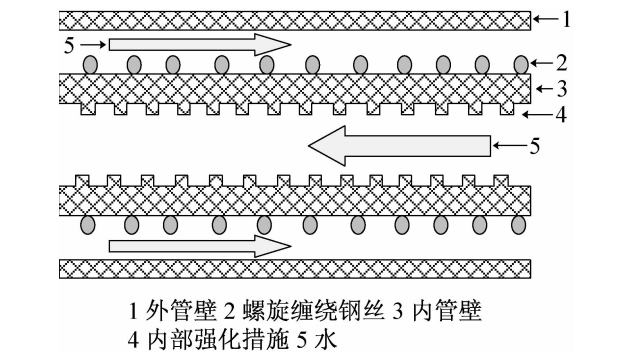


图 1 套管装置原理图
Fig. 1 Schematic of the annular tubes

1.2.2 实验测试系统

实验测试系统原理图如图 2 所示,采用安捷伦 34970a 采集各测点数据,触摸屏控制各设备开停。并采用 Labview 软件编写了测试程序,建立了数据采

集仪与各控制点的通讯,扩展性较强。该实验台还可以与常规的铜管换热性能实验台相结合。采用的各传感器均经过专业机构的标定,其中采用大小两个量程的压差变送器以确保不同工况下的精度要求。采用循环泵将恒温水箱内的水或者恒温水箱二内的乙二醇送入实验管侧,恒温水箱三的水则是送入实验环侧。另有电加热和制冷系统维持恒温水箱内的水温恒定,波动 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,各管道均采用良好的保温措施。相关的测量范围和精度经测试均满足实验要求。

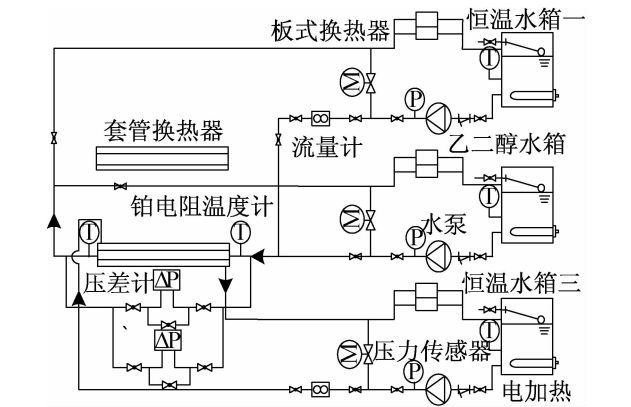


图 2 实验系统原理图
Fig.2 Schematic of the experimental system

2 实验管件与加工方法

2.1 实验管型

待测管选用国内某铜管公司生产的 1 英寸形制和 3/4 英寸形制双侧强化管,以及对应型号的光滑管同样各一根。具体管型参数见表 2。

表 2 实验管型参数
Tab.2 Parameters of experimental tubes

实验管型	外径/ mm	内径/ mm	外部强化措施	内部强化措施
A	22.22	20.02	光滑	光滑
A1	23.64	21.75	翅片	螺纹
A2	23.65	21.9	翅片	螺纹
A3	23.64	22.02	翅片	光滑
B	18.55	15.4	光滑	光滑
B1	19.05	16.70	翅片	螺纹

2.2 加工方式

为了减小环侧的热阻,并使光滑管和双侧强化管具有相同的管外换热形式。利用机械加工的方式,将待测的双侧强化管外翅片去除。在光滑管和双侧强

化管上均采用铜丝呈等间距螺旋状缠绕,并固定,防止实验时应水的冲刷脱落。铜丝的直径、长短以及螺旋缠绕的间距均对应相同。铜丝直径 0.8128 mm,每圈间距 8.458 mm,间距直径之比为 10.4。

3 实验流程

3.1 环侧校核实验

对光滑管中的单相对流传热的计算已有很多关联式。在对流传热中,以已定准则的幂函数形式整理实验数据的方法取得很大的成功^[3]。经过大量的测试研究,对于本实验所采用的光管,在所研究的 Re 和 Pr 范围内,其传热关联式为:

$$Nu_i = 0.0175Re_i^{0.83}Pr_i^{0.44} \tag{1}$$

该公式与业界经常采用的 MCAdams 修正式 $Nu_i = 0.0027Re_i^{0.8}Pr_i^{1/3}$ 所计算的结果偏差在 3% 左右,与 R L Webb 推荐 Petukhov 关联式^[4]偏差在 2.7% 左右,与 Gnielinski V^[5]关联式偏差 13% 左右。

由于在光管 A 外缠绕铜丝,其管外的热阻要远小于管内的热阻,采用 Wilson 法来求解误差较小。对于管外的传热系数,仿照 j 因子的形式提出一个类似的传热关联式:

$$St_oPr_o^m = C_oRe_o^n \tag{2}$$

式中: C_o 为一个常数。

3.1.1 数据处理

采用 Sieder-Tate 等式形式构建 Wilson 图:

$$Nu_i = \frac{h_i d_i}{\lambda} = STCRe_i^q Pr_i^p \left(\frac{\mu_i}{\mu_w} \right)^n \tag{3}$$

式中: $q = 0.83, p = 0.44$; 当管内流体加热时取 $n = 0.25$,冷却时取 $n = 0.24$,本文取 0.25^[4];角标 i 代表管内, o 代表管外; h_i 为管内传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; d_i 为管名义直径, m ; λ 为管内流体导热系数, $W/(m \cdot K)$; STC 为管内换热系数公式 Sieder and Tate 常数; μ_i 和 μ_w 分别为管内流体在平均温度下的动力粘度和管内流体在管壁温度下的动力粘度, $Pa \cdot s$ 。

总的传热系数公式如下:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_o} + R_{wall} + R_{foul} + \frac{d_o/d_i}{h_i} \tag{4}$$

式中: U 为总传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; h_o 为管外换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; R_{wall} 和 R_{foul} 分别为管壁热阻和管内污垢热阻, $(m^2 \cdot K)/W$; d_o 为管名义外径, m 。

实验铜管均为新加工铜管或经过丙酮清洗,内部污垢沉积热阻可认为是 0,即 $R_{foul} = 0$ 。

式(3)和式(4)可变换成以下形式:

$$\frac{1}{U} - R_{wall} = \frac{1}{h_o} + \frac{1}{STC} \frac{d_o}{\lambda Re_i^q Pr_i^p \left(\frac{\mu_i}{\mu_w} \right)^{0.25}} \tag{5}$$

在实验中,改变进口水温 and 管内流速以保持某一工况的热流密度不变,管外换热系数 h_o 也不变。利用最小二乘法线性拟和得到最优解,即 STC 值和此热流密度下的管外换热系数 h_o 。^[6]

由于热电偶安装困难,通常是不测定壁温的,在工业换热器实验中,一般也没有测量壁温的装置;由于在实验工况下,流体粘度的变化范围不显著,可以采用近似一维传热模型求内壁面温度:

$$T_{wall} = \bar{T}_{annulus} \pm \frac{(R_{wall} + 1/h_o)}{1/U} LMTD \tag{6}$$

式中:管内流体对环侧放热时,取正;管内流体从环侧吸热时,取负。 T_{wall} 为管内壁面温度, K ; $\bar{T}_{annulus}$ 为环侧平均温度, K ; $LMTD$ 为平均对数温差, K ; $LMTD$

$$= \frac{\Delta T_{max} - \Delta T_{min}}{\ln(\Delta T_{max}/\Delta T_{min})}。$$

第一次计算出的壁温代入式(6),可再次计算出壁温,通过迭代直到第 N 次和第 $N + 1$ 次的壁温度的偏差小于 1‰,由于计算量较大,可采用计算机运算。

3.1.2 系数的拟合

对式(2)进行整理得到如下形式:

$$\ln St_o = n \ln Re_o + \ln \frac{C_o}{Pr_o^m} \tag{7}$$

$$\ln \frac{St_o}{Re_o^n} = -m \ln Pr_o + \ln C_o \tag{8}$$

通过控制环侧的水流量和环侧的进出口的水温,采用 Wilson 图解法可得到各个系数的值。

各实验工况如表 3 和表 4 所示,分别称之为 A 系列和 B 系列,实验每个编号的实验均做恒热流密度实验,用来求出 h_o 和 St_o 。表中: Q_{tube} 为管侧流量; $Q_{annulus}$ 为环侧流量; T_{tube} 为管侧进水水温; $T_{annulus}$ 为环侧进水水温。

表 3 指数 n 拟合实验工况

Tab. 3 Experimental conditions of fitting out exponent n				
编号	$Q_{tube}/$ (m^3/h)	$Q_{annulus}/$ (m^3/h)	$T_{tube}/$ $^{\circ}C$	$T_{annulus}/$ $^{\circ}C$
1	1.44 ~ 3.54	1.1	20.64 ~ 23.19	15.64
2	1.44 ~ 3.54	1.36	21.26 ~ 24.44	15.64
3	1.44 ~ 3.54	1.6	21.91 ~ 25.48	15.64
4	1.44 ~ 3.54	1.82	22.38 ~ 26.46	15.64
5	1.44 ~ 3.54	2.04	22.99 ~ 27.54	15.64
6	1.44 ~ 3.54	2.27	23.48 ~ 28.5	15.64

3.2 测试管管内换热系数测定实验

对于待测试的双侧强化管的管内传热系数,可以

采用式(9)表示:

$$\ln(St_i Pr_i^m) = \sum_{j=0} a_j \ln^j(Re_i)$$

(9)

表 4 指数 m 拟合实验工况

Tab. 4 Experimental conditions of fitting out exponent m

编号	$Q_{\text{tube}} /$ (m^3/h)	$Q_{\text{annulus}} /$ (m^3/h)	$T_{\text{tube}} /$ $^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{annulus}} /$ $^{\circ}\text{C}$
7	1.44 ~ 3.54	2.27	15.82 ~ 19.57	10.05
8	1.44 ~ 3.54	2.27	19.39 ~ 23.12	13.61
9	1.44 ~ 3.54	2.27	23.48 ~ 28.5	15.64
10	1.44 ~ 3.54	2.27	24.37 ~ 28.03	18.67
11	1.44 ~ 3.54	2.27	27.05 ~ 30.18	22.22
12	1.44 ~ 3.54	2.27	33.00 ~ 36.54	27.36

由于待测试的双侧强化管的管外也缠绕和光管同样形式的铜丝,且在同一个套管实验装置中,具有相同的换热情形,可采用环侧的传热关联式,计算管外的传热系数,通过热阻分离得到 St_i 。

以 $\ln St_i$ 为 Y 值,以 $\ln Pr_i$ 为 X 值,保持 Re_i 数不变,改变 Pr_i 数,拟合出一次线性关系式,其中直线的斜率为 $-m$ 。为确保关联式的适用性,可在不同的固定 Re_i 数下,重复实验几次,得出 m 的平均值。

确定 m 值之后,改变 Re_i 数,拟合出一个多项式确定多项式系数即 a_j ,一般 5 次项即可,以此来反映被测管的管内对流表面传热系数,从 Re_i 和 Pr_i 了解管内的换热情况。

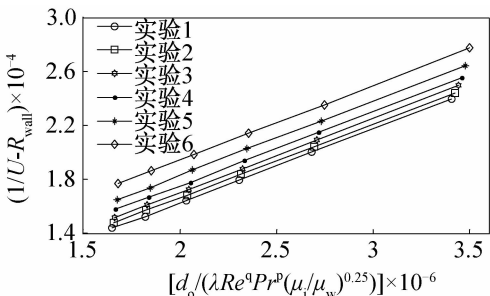
4 实验结果与分析

4.1 光管校核实验结果分析

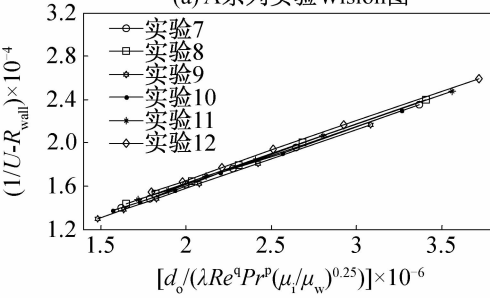
图 3 的 12 次的光管校核实验中,所拟合直线斜率的倒数即为 STC 值,与公式(1)中 0.0175 的偏差在 2.4% 之内。具体的计算值以及误差如表 5 所示。所以在以后的实验中,既可以采用 Wilson 法计算,也可以采用公式(1)直接进行计算,但是应当选取管内 Re 较大的实验点,以减小管内公式系数的影响。对管 A 的管外参数进行拟合所得的结果如图 4 所示。

按照同样的方法在另一个套管实验装置中对 B 管进行实验。 m, n 和 C_o 的结果如表 6,可以看出对于 A, B 管其管外的传热关联式的各系数数值相差很小,可采用同一个关联式进行后续的实验。

实验装置中铜丝间距直径之比为 10.4,内外径之差为 6.355 mm,铜丝直径为 0.8128 mm,所得的结果与 Dalle Donne 模型^[7]所预测的对流换热结果如图 5 所示,二者比较吻合。



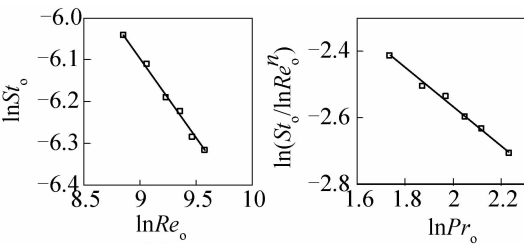
(a) A 系列实验 Wilson 图



(b) B 系列实验 Wilson 图

图 3 环侧校核 Wilson 图

Fig. 3 Wilson graph of the annulus side calibration



(a) n 值拟合图

(b) m 值拟合图

图 4 拟合 n, m 和 C_o 值

Fig. 4 Wilson graph of calculating the value of n, m and C_o

表 5 实验的环侧参数及 STC 值

Tab. 5 The experimental parameters of the annulus side and the values of STC

参数	1	2	3	4	5	6
Pr_o	7.76	7.76	7.76	7.76	7.76	7.76
Re_o	6693	8625	10199	11598	12939	14439
STC	17.83	17.92	17.71	17.81	17.94	17.85
δ	1.89	2.4	1.2	1.77	2.51	2

1) A 系列实验, STC 为乘以 10^3 后的值, δ (误差): %。

	7	8	9	10	11	12
Pr_o	9.32	8.32	7.76	7.16	6.50	5.68
Re_o	12332	13611	14439	15497	16849	18957
STC	17.89	17.90	17.86	17.77	17.66	17.85
δ	2.23	2.29	2.06	1.54	0.91	2

2) B 系列实验, STC 为乘以 10^3 后的值, δ (误差): %。

表 6 n 、 m 和 C_o 的值
Tab. 6 The value of n 、 m and C_o

项目	m	n	C_o
A_{wilson}	-0.3884	0.5803	0.2452
A_{direct}	-0.3863	0.5784	0.2432
B_{wilson}	-0.3814	0.5892	0.2413
B_{direct}	-0.3795	0.5854	0.2432

4.2 待测管换热系数测试结果分析

为了计算的适用性,测试管 m 值的确定在不同的 Re_i 数下做了 5 组实验。A1 和 A2 管型的结果如表 7 所示,各 m 值拟合非常良好,各点基本都在一条直线上。在不同的固定 Re_i 实验下,得到 m 的值有一定区别,现采用 m 的平均值进行多项式拟合实验。

表 7 A1 和 A2 管不同固定雷诺数下 m 的值
Tab. 7 The value of m on different Reynolds numbers about A1 and A2 tubes

A1	1	2	3	4	5
Re_i	20700	29400	50000	60000	94500
Pr_i	5.11 ~ 6.77	5.92 ~ 8.61	6.28 ~ 8.41	5.26 ~ 7.79	4.52 ~ 6.38
m	0.2857	0.4319	0.4531	0.4504	0.4526

1) A1 管工况

A2	1	2	3	4	5
Re_i	35000	40000	50000	70000	90000
Pr_i	5.09 ~ 7.23	5.68 ~ 7.92	5.37 ~ 6.93	4.69 ~ 6.02	4.53 ~ 6.04
m	0.3174	0.3416	0.27	0.3666	0.42

2) A2 管工况

表 8 A1 和 A2 管的传热关联式的系数值
Tab. 8 The coefficients of the heat transfer correlations about A1 and A2 tubes

项目	A1	A2
m	0.4057	0.3415
a_0	-3523.54056613142	-14962.8655403854
a_2	1624.77536450736	6899.93958753618
a_3	-299.5403676417	-1272.40883752161
a_4	27.56783634144	117.25197348681
a_5	-1.26695186544	-5.39919415786
a_6	0.02326426176	0.09939034272

A1 管管内换热关联式测定实验中的 41 个实验点与拟合出的关联式之间最大的偏差为 4.1%, Re 在 8000 以下的偏差较大,可能是小 Re 下实验点较少的

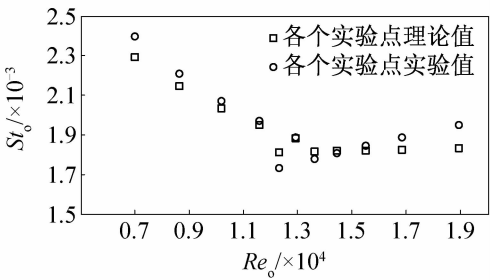


图 5 实验值和理论值对比
Fig. 5 Comparison of experimental values and theoretical values

被测管管内换热关联式测定实验的拟合出的关联式系数如表 8 所示。

原因。在 $8580 \leq Re \leq 100698$ 范围内,实验点的偏差小于 1.5%。说明该关联式能很好的反映实验点的情况。A2 实验的 38 个点也有也类似的情况。

为了减小实验难度,利于工程实际的应用可采取 8~9 个固定间隔的 Re_i 有代表性的工况来进行实验所得出的关联式,与较多实验点的关联式在相同的 Re_i 范围内偏差在 1% 之内, Re_i 范围外的趋势一致,但是偏差稍大。

为了验证该公式的准确性,采用以下两种方法:第一种方法采用一根未经加工处理过的双侧强化管 A1,以及一根内部光滑、外部强化措施与 A1 完全一致的 A3 铜管,分别在常规铜管传热性能测试实验台^[8],采用制冷剂 R123,在制冷剂饱和温度为 36℃ 的条件下进行实验。A1 管采用本文所拟合出的公式计算出各工况点的管内换热系数,通过热阻分离得到管外传热系数。A3 管则采用常规的热阻分离法计算

出管外传热系数。其结果如图 6 所示。

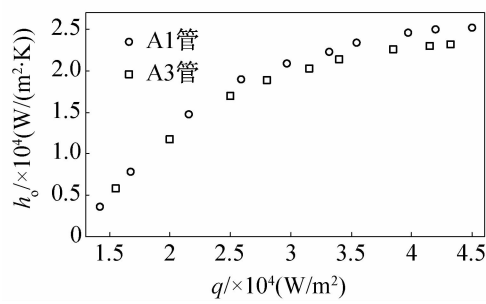


图 6 A1 和 A3 管外凝结表面传热系数对比
Fig. 6 Comparison of condensation surface heat transfer coefficients outside A1 and A3 tubes with the change of heat flux

由图 6 可以看出,采用本文方法得出的 A1 管和 A3 管外凝结表面传热系数随着热流密度的增大而增大,到达一定值后基本不变,趋势一致,偏差不大,这符合实际的情况。

第二种方法,对 A1 管进行的 R123 的管外冷凝实验采用本文的方法得出的管内关联式来计算与常规方法进行对比。结果如图 7 和图 8 所示。

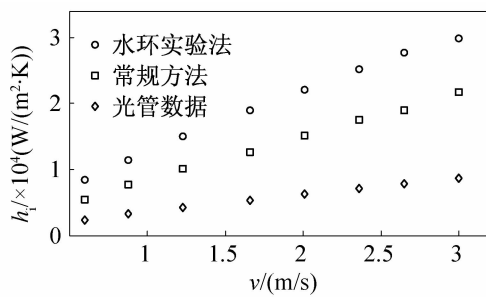


图 7 管内对流表面传热系数对比
Fig. 7 Comparison of convective surface heat transfer coefficients inside tube

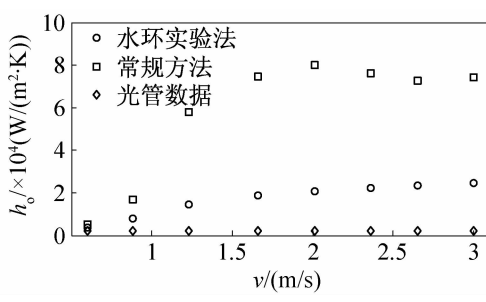


图 8 管外凝结表面传热系数对比
Fig. 8 Comparison of condensation surface heat transfer coefficients outside tube

有很多的研究表明,强化管的管内对流传热的强化倍率为 2.0 ~ 3.0^[3,9-11],由图 7 可以看出,采用常

规热阻分离法所得管内对流表面传热系数相对于光滑管的倍率为 1.9 ~ 2.1 之间,采用本文方法的强化倍率为 3.4 ~ 3.5。这是因为 A1 为内表面上均布有主副齿一高一低且相交叉的内螺纹铜管,主齿采用瘦形齿,在各相邻的主齿根部连接有比其低的副齿,使主副齿线相交叉连接,一高一低,具有二次绕流作用,更有利于汽化和冷凝,其管内对流表面的传热系数应较普通强化形式较高。这一点在之前的研究中也得到了验证^[12]。

由图 8 可以看出,采用常规热阻分离法所得出的管外传热系数过大,且管内外的传热系数相差巨大,不符合实际情况,而采用水环实验法管内外传热系数在较高流速下相差不大。其管内外热阻占总热阻的比例如图 9 所示。可以看出:1)在 $Re > 31668$ 左右之后水侧和制冷剂侧热阻已大致相当;2)在较低的 Re 下,热流密度较小,R123 管外蒸汽扩散膜热阻占主导地位。当水侧流速增大到一定程度后,随着水侧流速的增大,热流密度增大,冷凝液膜热阻占主导地位,制冷剂侧所占比例逐渐增大,管内内水侧热阻占总热阻的比例逐渐降低,管壁热阻所占比例也有所增加,所以应当加强对该管制冷剂侧强化措施的研究。

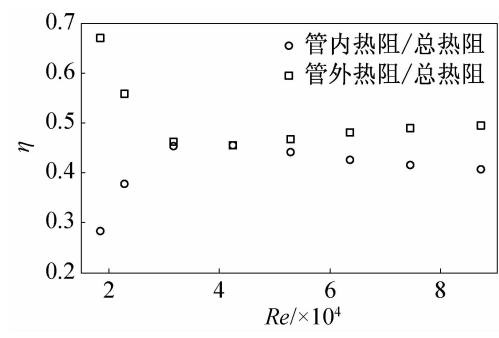


图 9 管内外热阻分析
Fig. 9 Thermal resistance analysis

5 实验结果与讨论

本文建立了一个套管式铜管测试实验台,针对常规热阻分离方法无法准确的计算双侧强化管的管内外传热系数的问题,提出了水环实验的方法。并主要分析对比了两种管型的实验数据,得到了以下的结论:

1)常规热阻分离法采用 $q = 0.8, p = 0.33$,计算出的管内对流表面传热系数过小,管外凝结表面传热系数过大,而采用本文的方法所得到的管内外传热系数均符合理论和实际情况。

2)1 英寸和 3/4 形制的光管在本实验中的管外的换热关联式为 $St_0 Pr_o^{0.5803} = 0.2452 Re_o^{-0.3884}$,此系

列的双侧强化管均可采用此关联式进行测试管管内传热系数的测定实验。

3) 提出一种新的关联式形 $\ln(St_i Pr_i^m) = \sum_{j=0} a_j \ln^j(Re_i)$, 取 $j = 5$ 即能较好的反映测试管的换热情况, 适用于准确度要求比较高的场合。

4) $\ln(St_i Pr_i^m) = \sum_{j=0} a_j \ln^j(Re_i)$ 中 m 值的确定实验可采取不同 Re 下对应 m 值的平均值或者常用下的 Re 下 m 值。所选取 Re 的范围应尽量在该铜管所应用的 Re 范围内, 实验点 8 ~ 9 个即能满足要求。

尚存在以下有待改进的问题和继续研究的方向:

1) 本文的进行的是管外冷凝实验, 可进行蒸发实验, 以验证该方法的拓展性;

2) 本文的实验介质为水, 可以采用乙二醇进行实验;

3) 增加被测管型种类和个数, 进行多种制冷剂的实验如 R134a;

4) 扩大实验的工况范围, 增加实验工况点, 可以进行 3/4 英寸系列双侧强化铜管的传热系数测定实验, 以验证该方法的准确性和适用性。

参考文献

- [1] 刘启斌, 何雅玲, 张定才, 等. R123 在水平双侧强化管外池沸腾换热[J]. 化工学报, 2006, 57(2): 251-257. (Liu Qibin, He Yaling, Zhang Dingcai, et al. Boiling heat transfer of R123 outside single horizontal doubly-enhanced tubes[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2006, 57(2): 251-257.)
- [2] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 4 版, 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [3] 欧阳新萍, 袁道安, 张同荣. R404A 在水平强化管外的冷凝实验及数据处理方法[J]. 制冷学报, 2014, 35(1): 92-97. (Ouyang Xinping, Yuan Daoan, Zhang Tongrong. Condensing test of R404A outside horizontal enhanced tubes and method of data processing[J]. Journal of Refrigeration, 2014, 35(1): 92-97.)
- [4] 谭盈科. 对圆管中充分发展的湍流流阻和传热关联式的选择[J]. 化学工程, 1985, 3: 4-11. (Tan Yingke. The selection of fully developed turbulent flow resistance and heat transfer correlations in tube[J]. Chemical Engineering, 1985, 3: 4-11.)
- [5] Gnielinski V. New equations for heat mass transfer in turbulent pipe and channel flows[J]. International Chemical

Engineering, 1976, 16(2): 359-368.

- [6] 陈剑波, 金传旻, 徐皓, 等. R134a 表面增强型蒸发强化传热管的实验研究[J]. 制冷学报, 2005, 25(1): 1-5. (Chen Jianbo, Jin Chuanmin, Xu Hao, et al. Experimental study on surface enhanced boiling heat exchanger tubes with R134a[J]. Journal of Refrigeration, 2004, 25(1): 1-5.)
- [7] M Dalle Donne, L Meyer. Turbulent convective heat transfer from rough surfaces with two-dimensional rectangular ribs[J]. International Journal Heat and Mass Transfer, 1977, 20(6): 583-620.
- [8] 全国有色金属标准化技术委员会. GB/T 19447—2004 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [9] Y T Kang, H Hong, Y S Lee. Experimental correlation of falling film condensation on enhanced tubes with HFC-134a; low-fin and Turbo-C tubes[J]. International Journal of Refrigeration, 2007, 30(5): 805-811.
- [10] 赵安利, 田松娜, 张定才, 等. 双侧强化管热阻分离实验研究[J]. 中原工学院学报, 2011, 22(1): 15-18. (Zhao Anli, Tian Songna, Zhang Dingcai, et al. Experimental study of doubly-enhanced tube thermal resistance separation[J]. Journal of Zhongyuan University of Technology, 2011, 22(1): 15-18.)
- [11] 欧阳新萍, 张同荣. 斜翅型冷凝强化换热管传热性能的实验研究[J]. 低温与超导, 2012, 40(5): 58-62. (Ouyang Xinping, Zhang Tongrong. Experimental study on characteristics of condensation heat transfer of oblique-fin tube[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2012, 40(5): 58-62.)
- [12] 邓斌, 王凯, 陶文铨. 新齿型内螺纹传热管蒸发性能研究[J]. 制冷学报, 2007, 28(4): 54-58. (Deng bin, Wang Kai, Tao Wenquan. Evaporation performance research of new micro-fin copper tube[J]. Journal of Refrigeration, 2007, 28(4): 54-58.)

通信作者简介

陈文景, 男, 硕士在读, 上海理工大学环境与建筑学院, 18817848969, E-mail: cwjlqjw@163.com。研究方向: 制冷与空调技术。

About the corresponding author

Chen Wenjing, male, master degree candidate, School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, +86 18817848969, E-mail: cwjlqjw@163.com. Research fields: the technology of refrigeration and air-conditioning.